

电火花表面强化工艺

HotMold.com 收集整理 欢迎转载

目 录

| | |
|-----------------|----|
| 前言 | |
| 概述 | 1 |
| 第一章 电火花表面强化原理 | 6 |
| 一、 强化原理和特点 | 6 |
| 二、 强化过程 | 12 |
| 三、 强化过程的物理模型 | 19 |
| 第二章 强化层形成规律 | 22 |
| 一、 电蚀量和迁移系数 | 22 |
| 二、 强化点的形成规律 | 24 |
| 三、 强化层的形成规律 | 26 |
| 四、 限制强化层增厚的原因 | 33 |
| 第三章 强化层的特性 | 37 |
| 一、 强化表面的形貌 | 37 |
| 二、 强化层的金相组织 | 40 |
| 三、 强化层的厚度 | 41 |
| 四、 强化层中化学元素的分布 | 42 |
| 五、 强化层的结构 | 46 |
| 六、 强化层的显微硬度和红硬性 | 49 |
| 七、 强化层的耐磨损性 | 52 |
| 八、 强化层的耐腐蚀性 | 59 |
| 九、 强化层的残余应力状态 | 63 |
| 第四章 影响强化层厚度的诸因素 | 65 |
| 一、 试验条件和计量方法 | 65 |
| 二、 强化层厚度与电压的关系 | 66 |

| | | |
|-----|----------------------|-----|
| 三、 | 强化层厚度与电容量的关系 | 66 |
| 四、 | 强化层厚度与放电能量的关系 | 72 |
| 五、 | 强化层厚度与比强化时间的关系 | 73 |
| 六、 | 强化层厚度与短路电流的关系 | 76 |
| 七、 | 放电回路阻抗的影响 | 77 |
| 八、 | 电极材料对的影响 | 78 |
| 九、 | 振动器性能的影响 | 81 |
| 十、 | 放电频率的影响 | 83 |
| 十一、 | 其他方面的影响 | 83 |
| 第五章 | 强化机的结构 | 84 |
| 一、 | 脉冲电源 | 84 |
| 二、 | 振动器 | 108 |
| 三、 | 附件 | 110 |
| 第六章 | 强化工艺方法 | 113 |
| 一、 | 应用范围 | 113 |
| 二、 | 工艺方法 | 114 |
| 第七章 | 模具强化及其应用 | 126 |
| 一、 | 模具强化工艺 | 127 |
| 二、 | 模具强化后的处理 | 132 |
| 三、 | 模具强化实例 | 133 |
| 第八章 | 刀具强化及其应用 | 147 |
| 一、 | 刀具强化原理 | 147 |
| 二、 | 刀具强化工艺 | 151 |
| 三、 | 刀具强化实例 | 174 |
| 第九章 | 机器零件强化及其应用 | 186 |
| 一、 | 机器零件强化的特点 | 186 |
| 二、 | 机器零件强化实例 | 188 |
| 三、 | 零件强化的机械化和自动化 | 194 |
| 四、 | 零件电火花强化工艺的发展 | 201 |

V

| | | |
|------|------------------------|-----|
| 第十章 | 磨损表面的修复 | 205 |
| 一、 | 磨损表面修复的操作规范及注意事项 | 205 |
| 二、 | 模具磨损表面的修复 | 206 |
| 三、 | 量具磨损表面的修复 | 212 |
| 四、 | 机器零件磨损表面的修复 | 213 |
| 第十一章 | 电火花强化机的其他应用 | 216 |
| 一、 | 穿孔加工 | 216 |
| 二、 | 零件表面的打毛 | 220 |
| 三、 | 刻字和打标志 | 223 |
| 第十二章 | 国外电火花强化工艺概况 | 226 |
| 一、 | 设备和应用 | 226 |
| 二、 | 实验和研究 | 237 |
| 参考文献 | | 247 |

概 述

在现代工业生产中，切削刀具和模具是普遍采用的重要生产工具。随着科学技术的发展和生产技术的进步，加工设备的运转速度、加工能量、生产效率和自动化水平日益提高，产品的精度要求也越来越严格。为了延长产品的使用寿命，新的高硬度、耐高温、高韧性等难加工材料不断涌现。因此，对切削刀具和模具的耐用度也相应地提出了更高的要求。

众所周知，车刀、刨刀、铣刀等刀具在切削过程中刃口会逐渐被磨损，切削效率随之而降低，产品的精度受到影响。当刀具磨损到一定程度之后，就要停机卸下刀具进行刃磨。如果刀具的耐磨性差，停机的次数就多，这不仅影响到工件的质量，而且使生产效率降低。在一些难加工材料的切削或深孔钻削加工中，还往往由于刀具的耐高温性能差而出现刃口退火，甚至于卷刃，直接妨碍了加工的正常进行。

模具在使用中同样也会被磨损。比如，冷冲模在磨损之后刃口变钝，模具配合间隙扩大，使冲件毛刺增加，必须卸模进行刃磨。一副模具的刃磨次数是有限的。两次刃磨之间的冲件数量越多，说明这付模具的使用寿命越长。热锻模、压铸模等模具则是工作在较高的温度下，而冷冲模具在使用中，局部也会产生高温，因此模具同样希望具有耐高温的性能。

除了刀具和模具之外，对于一些易磨损的机器零件也要

求提高它的耐磨性和使用寿命，因为一台机器往往就因为某个或某几个零件磨损而停止运转。所以，提高易磨损件的耐磨性是提高设备质量的重要方面。比如，拖拉机快档拨叉的早期磨损就是影响拖拉机质量的关键之一。提高拨叉的耐磨性，解决其早期磨损的缺陷，就能使拖拉机正常使用，大大减少制造厂的返修工作量。

为了提高刀具、模具和机器零件的耐磨性和耐热性，人们已经从各个方面进行了研究，并采取了许多有效的措施，其中包括研制新颖的合金材料，改进刀具和模具的设计、改善润滑和冷却条件、规定合理的工艺规范等等。而多种多样的表面处理工艺对提高耐磨性起了重要的作用，这些工艺包括常规的热处理、表面渗碳、碳氮共渗、软氮化、镀铬、离子镀、等离子喷镀、气相沉积、高频表面淬火、电接触淬火、激光热处理等等。电火花表面强化工艺就是其中的一项经济、简便而有效的工艺方法。

电火花表面强化是直接利用电能的高能量密度对表面进行强化处理的工艺，它是通过火花放电的作用，把作为电极的导电材料熔渗进金属工件的表层，从而形成合金化的表面强化层，使工件表面的物理、化学性能和机械特性得到改善。例如，采用WC、TiC等硬质合金电极材料强化高速钢或合金工具钢材料的工件，强化表面能形成显微硬度HM1100以上的耐磨、耐蚀和具有红硬性的强化层，使工件的使用寿命明显地得到提高。

正因为电火花强化能提高工件的耐磨性和使用寿命，自该工艺被发现以来，国内外许多学者对它进行了深入的研究，并设计制造了多种型式的强化设备，在工业生产中获得了应用。

我国应用电火花强化工艺始于五十年代。由于当时在基础理论和应用技术等方面缺乏研究，强化设备本身也存在某些缺点，因此未能得到推广。在七十年代，这项被遗忘的工艺因在刀具、模具上运用所取得的明显效果而重新引起人们的重视。国内一些厂家也先后仿制或自制了强化设备用于汽轮机叶片、冷冲模具和刀具的强化。为了推广应用这项工艺，机械工业部苏州电加工机床研究所从一九七七年开始对强化工艺和设备进行较系统的分析和研究，先后设计了D9105、D9105A、D9110、D9110A、D9110B和D9130型电火花强化机系列产品。D91系列的强化机除了用于模具、刀具和机器零件强化之外，还被大量地用于已磨损的模具、量具和机器零件的微量修补及淬火工件上打孔、去除折断的工具。该系列强化机已由江苏省泰州海陵电器厂和苏州无线电元件三厂批量生产，用户遍及全国二十多个省市，取得了良好的经济效益。

近年来，机械工业部第八设计院、浙江大学、山东工业大学、天津机床研究所等研究部门和高等院校，在电火花强化机理研究和推广应用方面也做了大量工作，对促进强化工艺的推广使用起了有益的作用。

特别是机械工业部对电火花强化技术甚为重视和支持。一九七八年九月在江苏泰州召开了“一机系统电火花强化机现场经验交流会”。一九八一年召开了“电火花强化机应用技术交流会”，并将电火花表面强化工艺列为机械工业部新工艺推广项目。一九八三年国家经济委员会将该工艺列为“六五”期间国家重点推广的新工艺之一。去年（一九八四年），机械工业部在苏州再次召开了技术交流会，总结了几年来研究和应用的新成果。

至今，电火花表面强化工艺已经在机械制造、电机、电器、轻工、化工、纺织、农业机械、交通和钢铁工业等许多部门得到了应用。使用的对象有车刀、刨刀、铣刀、钻头、铰刀、丝锥、拉刀和某些齿轮刀具等刀具，冲裁、压弯、压延、挤压、压铸和某些热锻模具，拨叉、夹具、凸轮、导向块和机床导轨等机器零件，并用于修复模具、量具、电机主轴、曲轴等工件。可以说此项工艺在四化建设中有着广阔的应用前景。目前国内从事的主要工作是：继续深入研究强化的机理，提高强化层的质量和强化效率；研究不同电极材料的强化层形成规律和特性；试验研究不同材料和工件的强化工艺参数；选择和控制放电脉冲参数；提高现有设备的使用效果，扩大应用领域；研制机械化和自动化的强化设备。这些研究工作的目的是在现有的基础上进一步提高强化工艺的稳定性、可靠性和生产效率，并适应更多零件的强化要求。

虽然在近年来电火花强化设备和工艺水平有了很大的提高，大量的应用实例也充分证明了它的科学性和实用意义，在工业生产中获得了较好的技术经济效益，但是，任何一项工艺都有它的局限性，电火花强化工艺也不例外。就其工艺本身来说，还存在着强化表面粗糙度较粗、强化层厚度较薄、效率较低等缺陷；目前的设备因手工操作，难以保证强化层的均匀性；最佳工艺参数和电极材料的选择等问题也尚待研究改进。因此，在实际应用中，由于不了解电火花强化工艺的特点和应用范围，致使强化无效或适得其反的情况也时有发生。我们编写本书的目的就在于：向读者介绍电火花强化的原理、性能、设备结构、使用方法、应用范围及其效果，以便使用者正确地采用该工艺，有效地解决生产中的实际问题。

此外，电火花强化工艺已被一些高等院校列入教学的内容，一些研究单位和用户正在着手进行大厚度、细粗糙度和机械化、自动化的强化机研制，现有设备也在扩大应用范围，为此，本书还以适当的篇幅介绍国外电火花强化工艺的概况，以便读者对国外的研究和应用情况有所了解和借鉴。

第一章 电火花表面强化原理

一、强化原理和特点

不论是哪一种表面强化工艺，为了使工件表面的性质发生改变，就必须以某种方式向被强化表面提供特定形式的能量。电火花强化就是以直接放电的方式向工件表面提供电能，并使它转化为热能和其它形式的能量，达到改变表层的元素成分和金相结构的目的，从而使表面性能得到改善。

为了了解电火花强化的原理，首先观察一下电火花强化设备是怎样工作的。

组成电火花强化设备的最基本部件是脉冲电源和振动器，前者供给瞬时放电能量，后者使电极振动并周期地接触工件。它的原理结构如图1-1所示。图中的脉冲电源是一个简单的RC弛张式

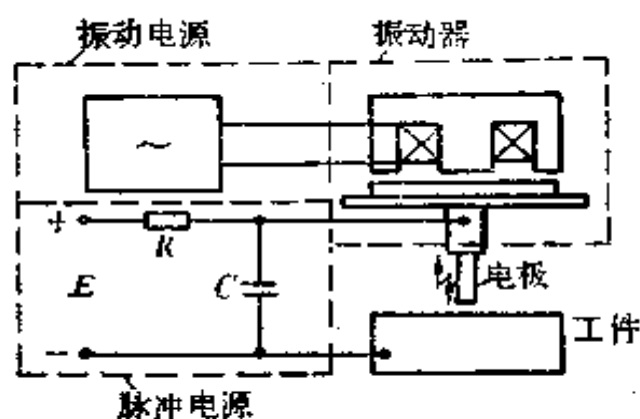


图1-1 设备原理结构

脉冲发生器，其中直流电源 E 、限流电阻 R 和储能电容器 C 三者组成充电回路；而电容器 C 、电极、工件及其引线组成了放电回路。通常电极接电源正极，而工件接

负极。电极与振动器的运动部分相连接，振动的频率由振动

器的振动电源频率来决定。振动电源和脉冲电源组成一体而成为设备的电源部分。

在工作时，电极随振动器作上下振动。当电极还没有接触到工件的时候，电源 E 通过限流电阻 R 向电容器 C 充电，电极与工件之间的状态如图1-2a所示，其中箭头表示该时刻电极振动的方向。接着因为电极向工件运动而无限接近工件，使放电回路形成通路，在火花放电通路和相互接触的微小区域内将瞬时地流过放电电流，电流密度可达到 $10^5 \sim 10^6$ A/cm²，而放电时间仅几 μ s至几ms。由于放电能量在时间上和空间上的高度集中，在放电微小区域内产生了约5000~10000℃的高温，使该区域的局部材料熔化甚至气化。并且放电时产生的压力使部分材料抛离工件或电极的基体，向周围介质中溅射。这种情况如图1-2b所示。此时电极继续向下运动，使电极和工件上熔化了的材料挤压在一起，如图1-2c所示。由于接触面积扩大和放电电流减小，使接触区域的电流密度急剧下降，同时接触电阻也明显减小，因此电能不再使接触部分发热。相反，由于空气介质和金属工件基体的冷却作用，熔融的材料被迅速冷却而凝固。接着，振动器带动电极向上运动而离开工件，如图1-2d所示。冷凝的材料脱离电极而粘结在工件上，成为工件表面上的强化点。同时，因放电回路被断开，电源重新对电容器 C 充电。这就是电火花强化设备的一次充放电的过程。重复这个充放电过程并移动电极的位置，强化点就相互重叠和融合，在工件表面形成一层强化层。

电火花强化工艺之所以能提高工件表面的性能，不仅仅是由于能够形成强化层，而更重要的是所形成的强化层具有的特性。采用电子显微镜、X射线衍射仪等现代科学仪器对

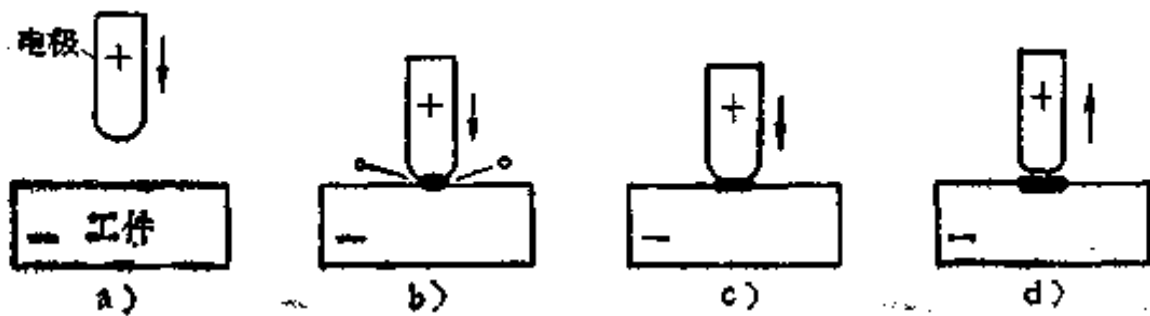


图1-2 强化过程中的电极状态

强化层进行分析的结果表明：当使用WC硬质合金材料作电极强化合金工具钢时，强化层是由电极和工件材料形成的具有特殊结构的新合金层，它的显微硬度高达HM1100以上；在700~800℃的高温下，强化层仍然具有高的硬度，耐磨性也得到明显提高。

因此，电火花强化的原理，简单地来说，就是：直接利用火花放电的能量，使电极材料在工件表面形成特殊性质的合金层。

当然，除了形成合金层之外，电火花强化改善工件表面性能还有另外一些原因，比如，火花放电的骤热骤冷作用具有表面淬火的效果，用石墨电极强化则有表面渗碳的效果等。

根据这种强化原理可以设计出多种形式的电火花强化设备。脉冲电源可以采用电阻、电容、电感组成的RC、RLC、LC或CC等储能方式的电气线路，也可以采用可控硅、晶体管等元件组成的开关线路。振动器可以是电磁振动方式，也可以是旋转方式。电极相对工件的运动可以有各种各样的选择，图1-8所示的就是其中的几种运动形式。

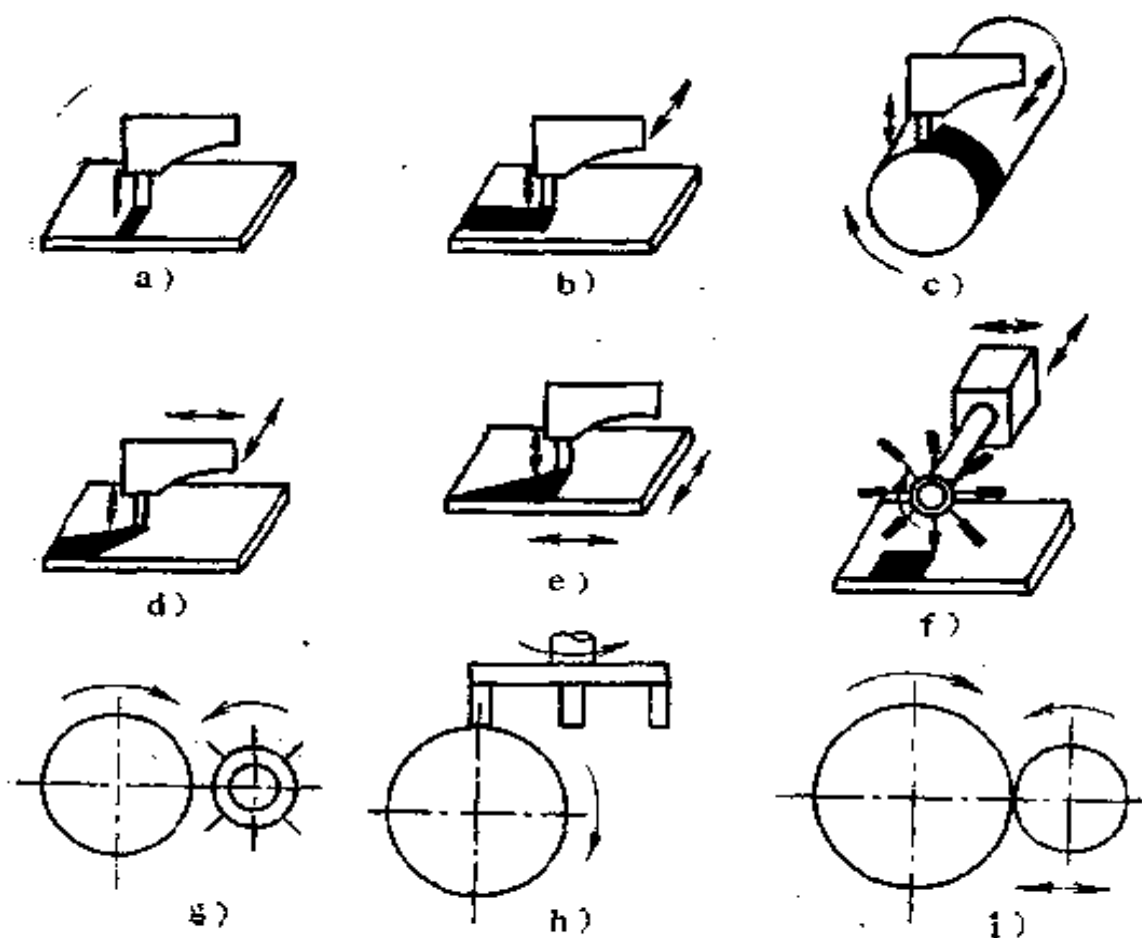


图1-3 电极运动的形式

我国目前的电火花强化机都是手工操作的小功率设备，操作时人工握持振动器，使电极沿需要强化的表面移动进行强化，如图1-3a所示。这种形式的优点是比较灵活，能适应多数不同形状的刀具、模具和机器零件的强化。但是效率较低，强化层的均匀性受操作者的熟练程度影响，操作者容易疲劳。为此试制了可以小面积自动强化的附件，其工作方式如图1-3b所示，除了电极轴向振动之外，振动器可以在小距离内横向自动往复运动。如果将它安装在普通车床的刀架上，使工件慢速旋转，则可自动强化轴类零件的外圆面，如图1-3c所示。

除了上面所介绍的三种工作方式之外，还可以有如图 1-3d 至图 1-3i 所示的方式。图 1-3d 和图 1-3e 是分别使振动器或工件作 X、Y 方向运动。图 1-3f 至图 1-3i 则是采用旋转电极强化平面或外圆。

根据电火花强化的工作过程和强化原理，并通过下面几章对强化层形成规律、强化层特性、工艺参数和应用实例的分析，我们将能了解到电火花强化工艺与常规热处理、离子氮化、等离子喷涂、激光淬火等等表面处理工艺相比具有许多特点，这些特点是：

1) 电火花强化是在空气中进行，不需要特殊、复杂的处理装置和设施，例如真空系统或特制的容器等，因此工艺设备简单。目前设计的手持式小功率电火花强化机主要由脉冲电源和振动器两部分组成，没有传动机构、工作台等机械构件，携带方便，使用灵活，设备投资和运行费用低，这也是强化工艺能够被广泛地推广应用的有利因素。

2) 可对零件表面施行局部强化，一般几何形状的平面或曲面均可进行。比如刀具、模具和机械零件，按原有的要求经过常规热处理之后，对刃口和易磨损部位进行强化处理，就能达到提高硬度和耐磨性的目的。

3) 不会使工件退火或热变形。电火花强化时虽然在放电瞬间能产生使电极材料熔化、以至气化的高温，但是，由于放电时间很短，约 $1 \sim 10000 \mu\text{s}$ ；放电脉冲间隔较长，约 3 至 5 倍于放电时间；放电点的面积又很小，因此放电的热作用只发生在工件表面的微小区域，就整个工件来说，仍处于常温状态或温升较低，工件不会退火或热变形。正因为有这个特性，所以常常作为终道工序来采用。然而对于细小的零件必须注意到变形的可能性，特别是宽而薄的零件，往往因

强化产生的拉应力致使发生翘曲。

4) 强化层与基体的结合非常牢固, 不会发生剥落。因为强化层是电极和工件材料在放电时的瞬时高温高压条件下重新合金化而形成的新合金层, 而不是电极材料简单的涂覆和堆积, 而且合金层与基体金属之间具有氮元素等的扩散层。

5) 电极材料可以根据用途自由选择。对于强化刀具、模具以提高耐磨性为目的的强化, 可以选用YG、YT或YW类硬质合金。用YG8硬质合金强化Cr12、3Cr2W8V等合金工具钢, 能形成高硬度、高耐磨、抗腐蚀的强化层, 可使刀具、模具使用寿命提高1~3倍。而以修复机器零件已磨损面为目的的强化, 可采用碳素钢、紫铜、黄铜等材料作电极。这些材料来源都比较广, 而且材料的消耗量也很少。

6) 强化层厚度和表面粗糙度与脉冲电源的电压、电容器容量等电气参数以及强化时间等操作因素有关, 因此可通过对电气量的调节和强化时间的控制来获得不同的工艺效果。

7) 经强化处理的工件表面将有微量增厚, 增厚量与强化层内的白亮层厚度相当。所以强化工艺除了能改善工件表面性能之外, 还可以用于已磨损的冲裁模、量具以及轴类零件的微量修复。

8) 操作方法容易掌握, 不需要技术等级高的操作人员。

目前电火花强化工艺存在的缺点是: 通常使用的设备的强化层厚度仅0.02~0.05mm, 表面粗糙度一般仅为 $Ra1.25 \sim 5\mu m$ ($\nabla 5 \sim 6$); 手工操作的强化速度较慢, 强化生产率为 $0.2 \sim 0.3cm^2/min$; 强化层的均匀性、连续性较差。因

此，限制了强化工艺在某些场合的使用。然而，如果充分认识该工艺的特点，运用恰当的操作方法，合理选择施用的对象，那么就能够有效地发挥强化工艺的特点，作为一项特种处理技术，它具有广泛的应用潜力。

二、强化过程

前面已经从电极的周期性运动规律来说明每次放电的过程。在此，将从放电现象的产生和放电过程中电压电流的变化进一步分析强化的过程。

图1-4是火花放电时的电压、电流波形图。

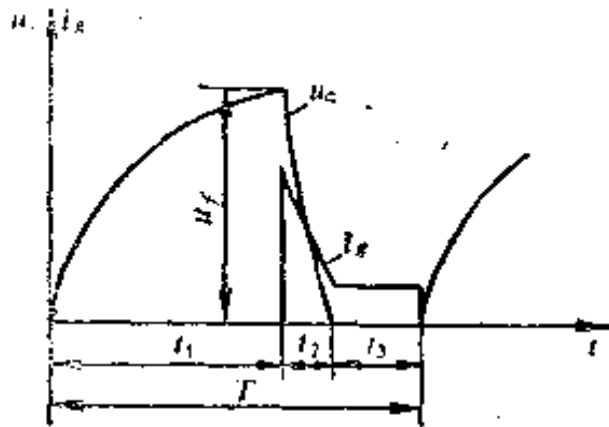


图1-4 放电电压和电流波形

u_c —储能电容器C上的充放电电压
 u_f —放电开始电压
 i_g —放电电流
 T —充放电周期

充放电周期由 t_1 、 t_2 和 t_3 三个部分组成。 t_1 是电容器充电时间，因此与电极未接触工件的状态相对应。 t_2 是放电时间，与电极接触工件的瞬间产生火花放电的状态相对应。 t_3 是电极与工件短路的时间，与放电之后电极继续挤压工件的状态相对应。在 t_3 之后，电极离开工件，开始下一次的充放电过程。因此，强化过程是

多次火花放电过程的重复，而每一次放电又是由三个不同的阶段所组成。这三个阶段分别称之为充电阶段（ t_1 ）、放电阶段（ t_2 ）和短接阶段（ t_3 ）。

1. 充电阶段（ t_1 ）

为了使火花放电能够一次又一次不断地产生，对于电容器储能系统来说，电极离开工件，并使电容器重新充电是必不可少的。 t_1 时间的长短主要决定于充电回路的时间常数。显然，为了提高工作频率，希望充电时间常数越小越好。此外，亦与振动器的振动频率、操作压力等因素有关。对于具有开关元件的脉冲电路来说， t_1 就是脉冲的停歇时间，在此期间电极与工件也必须脱离接触状态，否则就无法产生下一次放电。

充电阶段是上一次放电短接阶段的延续。因此，除了能使电容器再次充电之外，还要求在电极分开的瞬间使上一次放电所形成的强化点与工件牢固地结合，并使电极顺利地脱开。因为在短接阶段合金层迅速冷却凝固，其结果会造成电极与工件相互粘结。如果电极不能顺利地脱开，将影响到振动器的正常工作，并出现较长时间的短路，或者需强行拉开电极，将使合金层遭到机械性破坏。当出现后一种情况时，在飞溅的电蚀产物中往往可以观察到由于脆性破坏而形成的无固定形状的颗粒，这些颗粒具有撕裂的边缘，与正常情况下产生的球形颗粒是很容易区分的。

据研究，发生粘结的温度与电极材料的熔化温度有关。所以在电极材料确定之后，为了使振动器能够正常工作，就必须适当选择放电能量的大小，调整振动器的振动弹力和控制操作时电极对工件的压力。

据有关文献介绍^[1]，因为短接时的短路电流是通过电极和工件相接触的有限几个点，当电极拉开时，短路电流将集中通过最后拉开的接触点，所以会造成局部区域金属熔化，从而产生所谓材料的桥路迁移现象，而且通常是从阳极方面的最热点向远离最热点的阴极方面移动。还认为，参加桥路

迁移的物质数量可能相当地多，在大短路电流的情况下，可能导致形成表面凸起或凹坑。这些凸起和凹坑将使强化层遭到破坏，是应该注意避免的。

但是，在有关的试验中，并未发现这种桥路迁移现象。原因在于发生这种现象是有一定条件的，这就是：短路电流要相当地大；在放电回路中有较大的电感元件。所以，在小电流和电感量很小的情况下，电极拉开时的桥路迁移现象是不易发生的。

2. 放电阶段 (t_2)

在放电阶段，电容器上的电压具有急剧下降的特性；而在此期间，电流也从最大值降到短路电流值。电容器瞬时地释放出所储存的能量，电能在放电的微小区域（以下简称微区），转化为热能，使电极材料熔化、甚至气化，并出现耀眼的光和放电声音。在空气中低电压、小电容量放电的情况下，放电时间 t_2 约在0.1ms的数量级。

火花放电是一种自持的放电现象。为了解释电火花强化的过程，必须研究相对运动着的电极和工件之间的放电是怎样开始的。

众所周知，把不同电位的两个电极相互接近到某个距离时，由于间隙内气体的被电离，会产生火花放电现象。通常使气体电离的原因有：碰撞电离、光电离、热电离和场致发射等。但据试验和分析，在低电压的强化条件下，上述几种因素均不能或很少可能引起电极之间的自持火花放电。

就以碰撞电离来说，它是大多数气体自激放电的原因。设在两平板电极之间为一均匀的电场（图1-5），如有外来的电离因素使阴极的单位面积上产生了 n_0 个电子，这些电子在电场的作用下向阳极高速运动，并与气体分子或原子碰

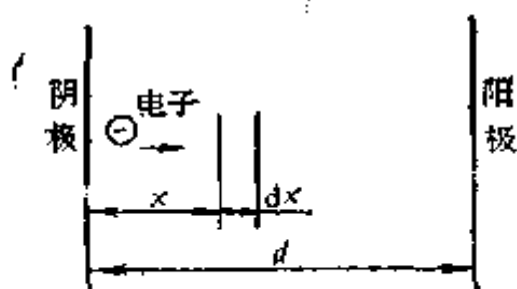


图1-5 碰撞电离

撞而发生电离，从而使电子的数目增加，形成电子“雪崩”。假定在1s内有 n 个电子飞过距离阴极为 x 的单位面积，并在移动 dx 的行程内产生了 αdx 次碰撞电离，那么就造成了 $d n$ 个新的电子，即

$$dn = n \alpha dx \quad (1-1)$$

式中 α ——电离系数。

经积分得：

$$n = n_0 e^{\alpha x} \quad (1-2)$$

设电极间的距离为 d ，则到达阳极的电子数目为：

$$n_a = n_0 e^{\alpha d} \quad (1-3)$$

或电流密度方程式为：

$$j_a = j_0 e^{\alpha d} \quad (1-4)$$

方程式(1-4)所描述的放电不是自持放电，因为当外来电离因素不存在时， $j_0 = 0$ ，所以 j_a 也随之为零，放电也就停止。为使放电成为自持的，就必须在阴极造成额外的电子发射，这种发射是依靠正离子打击阴极而产生二次电子来实现的。设每个正离子在阴极上产生了 γ 个二次电子，称 γ 为二次放射系数。故此，阴极发出的电子总数为：

$$n_1 = n_0 + \gamma n_0 (e^{\alpha d} - 1) \quad (1-5)$$

n_1 个电子将重复上述过程，直至达到平衡。平衡时从阴极发出的电子数将满足

$$n_1 = n_0 + \gamma n_1 (e^{\alpha d} - 1) \quad (1-6)$$

当气体由非自持放电进入自持放电，也即所谓气体点燃时，维持气体放电的原始电子完全依靠正离子轰击阴极所产

生的 γ 过程来获得, 在这种情况下, $n_0 = 0$ 。根据式(1-6), 即有

$$\gamma (e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (1-7)$$

式(1-7)是自持放电的条件。由式(1-7)可以得到:

$$\alpha d = \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) \quad (1-8)$$

以计算 α 的经验公式

$$\alpha = c_1 p e^{\frac{c_2 p}{X}}$$

和

$$X = \frac{U}{d}$$

代入式(1-8), 则有:

$$U = c_2 p d / \ln \left[\ln \left(\frac{1 + \gamma}{\gamma} \right) \right] \quad (1-9)$$

式中 p ——气体压强;

c_1, c_2 ——由实验确定的系数;

X ——电场强度;

U ——气体点燃电压。

根据式(1-9)计算得到的点燃电压和由实验所得的结果表明, 气体存在着最低点燃电压值。在铁质阴极时, 空气中的这个最低点燃电压大约在270V。显然, 在强化时的低电压条件下(一般电源电压低于100V), 碰撞电离不可能是引起放电的原因。

试验表明，在电极相互接触之前，并不能产生火花放电，因此提出了“接触放电”的概念。在实际应用中，任何工件和电极平面都是微观凹凸不平的，当两者相互接近的时候，或者是个别凸出的部分先接触，或者通过电极间隙中的导电微粒相接触。电容器就是通过接触点释放电能而产生火花放电的。放电电流在接触点引起的焦耳-楞次热使接触部分温度升高。这是一种不稳定的热传导过程，这个过程受放电功率、放电时间常数、接触部分的电阻、物质的密度以及热物理特性等因素所左右。

当电流密度超过某一临界值时，焦耳-楞次热将使电极材料部分地熔化，甚至发生爆炸性的蒸发。这种现象就象大电流通过细的熔丝时产生的爆炸性蒸发一样。图1-6是被放大的放电微区的情形，金属蒸气和液滴以及高温条件下

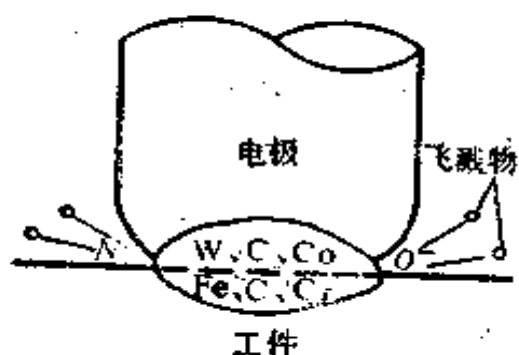


图1-6 放电微区的放电情形

被电离的气体构成了火花放电的通道，熔融状态的电极材料向阴极工件迁移，电极出现了蚀除现象。并且，在放电微区的高温高压条件下，迁移的元素与工件材料重新化合成新的化合物，其中空气电离所产生的氮离子和氧离子也参与了这种化学过程。

值得指出的是：电蚀现象不仅发生在阳极一侧，而且也发生在阴极一侧。图1-7是阴极在一次放电之后出现的电蚀凹穴。所使用的电极直径为2.3mm，而凹穴直径仅0.42mm，放电微区面积仅为电极截面积的1/30。如果假设放电通道的直径与凹穴直径相等，而放电电流峰值是短路电流的三

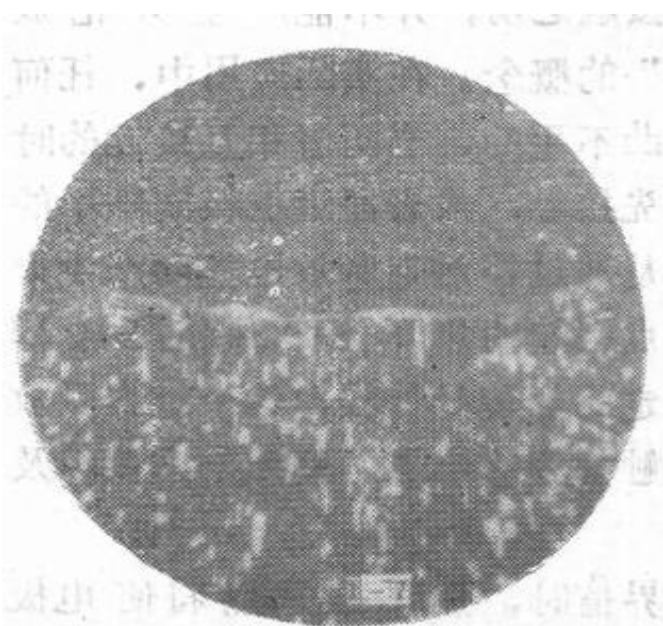


图1-7 一次放电在阴极上产生的电蚀凹穴 100×

电压: 36V 电容量: 65 μ F

工件: Cr12 电极: YG8

倍, 则放电电流密度的近似值为 $1.3 \times 10^4 \text{A/cm}^2$ 。对放电时飞溅的电蚀产物的观察表明, 其中绝大部分为球形, 说明这些电蚀产物是在熔融和气化之后飞溅, 并在空气中急骤冷却凝固而形成的。如果用铜作电极强化合金钢, 电蚀产物能被磁铁所吸引。这也说明阴极在放电时也被电蚀, 并与阳极材料融合在一起。

3. 短接阶段 (t_s)

短接阶段是指电容器放电结束之后, 电极对工件挤压并流过短路电流的时间。短接是发生在放电微区仍处于熔融状态的时候, 因此, 在电极对工件的机械挤压作用下, 将使尚处于高温熔融状态的材料各元素进一步相互扩散和化合, 并且使材料致密化。随着这部分组织的致密化, 电阻率降低, 短路电流在该区域产生的焦耳-楞次热也急剧减少, 因而熔化的材料迅速冷却凝固。这个阶段对合金层的机械性能是有很大的影响的。为了得到致密的、与基体结合牢固的强化层, 必须合理选择和控制在短路电流、挤压作用的时间和操作时的压力。

一般来说, 工件的导热性能远比电极好, 故熔化材料近工件的一侧首先凝固。如果近工件侧已凝固, 而近电极侧尚处于不完全固化的状态下拉开电极, 则大部熔融材料就粘结

在工件表面，成为所需的强化层。

通过上述分析，可以了解到每次放电是经过充电、放电和短接三个阶段，在这三个阶段中脉冲电源所提供的能量大小和形式是不同的。在充电阶段，电源使电极振动而拉开工件，并对储能电容器充电，这是电源的主要耗能阶段。在放电阶段，主要依靠释放电容器上所储存的电产生脉冲放电，使材料熔化以至于气化。而在短接阶段，主要是流过短路电流，其大小应根据不同工艺要求予以限制。

三、强化过程的物理模型

目前电火花强化过程通常是在某种气体或真空中进行，其中最为普遍的就是直接在空气中进行。人们通过真空和气体中的放电研究，提出了种种电火花强化过程的模型，但是许多研究的结论只能解释一些个别的实验事实。如果以放电产生的原理来分，则主要的有非接触放电和接触放电两种看法。

非接触放电的物理模型是^[1]：当电极相互接近时，电极之间间隙内的电场强度增强，当接近到某个距离时，电场强度足以使间隙电离击穿而产生火花放电，通过导电性的放电通道，电子束集中地撞击阳极表面，这种情形如图1-8a所示。电子流的动能在阳极表面层转化为热能，使阳极表面熔化，并产生出金属液滴。这个液滴在运动着的阳极前端向阴极移动，如图1-8b所示。由于过热的液滴和质点处于与空气接触的状态，所以它的成分和特性都将与原有的阳极材料有所区别。脉冲电源储能系统使向阴极飞溅的液滴自阳极分离的过程中得到加热，温度升高到出现沸腾和“爆炸”，因此使放电回路切断，电磁场的压缩力消失，从而形成了大

面积的质点流，如图1-8c所示。熔融的质点到达阴极，并与阴极粘结，部分熔渗进阴极的表层（图1-8d）。至此，过程并未结束，因为放电回路被切断而使储能系统重新得到充电。当滞后于这些质点而运动的电极接触阴极时，将通过涂覆在阴极上的被加热的质点流过第二次脉冲电流，并且使其承受电极的机械撞击（图1-8e）。在电极机械接触的情况下，迁移的质点相互之间以及质点与阴极之间被加热而相互熔合。这时除了扩散之外，在第二次脉冲电流的作用下，被迁移的质点之间和与阴极表面层之间还发生化学反应。而电极对迁移质点的机械锤击作用则较明显地提高了它的均匀性和密度。随后如图1-8f所示电极往上运动而离开工件，在阴极表面留下了与工件牢固地粘在一起的阳极材料层。

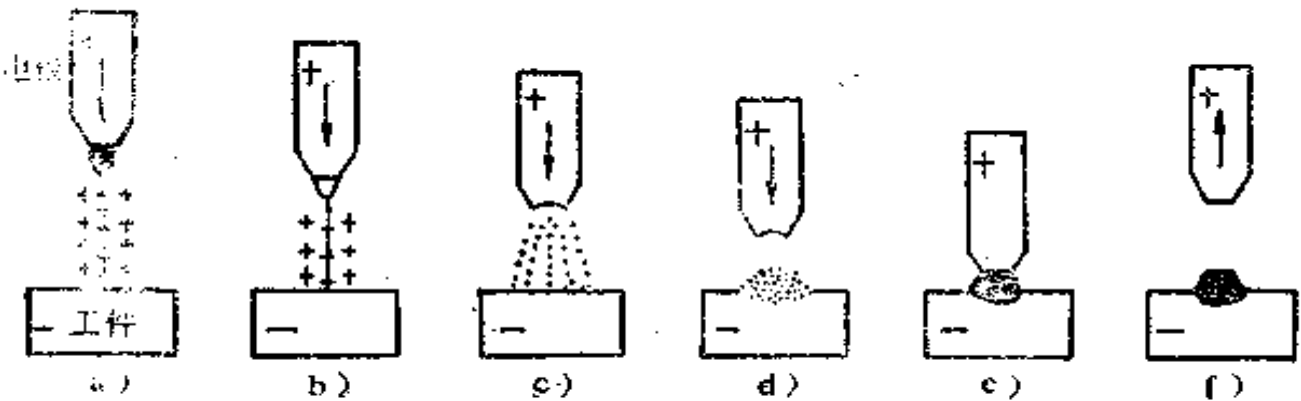


图1-8 非接触放电的强化物理模型

从上面所提出的电火花强化过程的物理模型可得出以下结论，即：阳极材料的迁移发生在从电极间隙击穿到电极与阴极表面接触的一段时间里；从击穿到电极接触产生了两次脉冲电流；阳极材料是在熔液状态迁移到阴极。

应该指出，上述强化模型只出现在高电压的情况下，并且用这种原理研制了高电压小电流的电火花强化机。而在低

电压的情况下，火花放电实际上是发生在阳极与阴极相接触的瞬间，也就是所谓接触放电的原理。

前面已经把电极的运动和充放电现象联系起来说明了接触放电的过程（图1-2）。按照这个过程，可以将接触放电的物理模型归纳如下：

当施加较低电压的电极接近工件直至接触的一刹那，在微小的接触区域通过足够大的放电电流，使电流密度达到很高的数值，电流产生的焦耳-楞次热使接触部分的电极材料瞬时地熔化和气化，引起爆炸性的火花放电；放电的通道是由熔化的金属液滴、金属蒸气和电离的气体构成，其间熔融的电极和工件材料相互扩散，产生了重新合金化的过程，电离的气体也参与了这个过程，并出现电极材料向工件表层的溶渗；金属的蒸发出现了电极的电蚀现象；接着电极以适当的机械力冲击和挤压工件，使重新合金化的材料急剧地冷却和致密化；最后，电极迅速离开工件，使合金层脱离阳极而牢固地粘结在工件表面。

从上述接触放电的强化过程物理模型，可以得出以下结论：阳极材料的迁移发生在电极相互接触的瞬间至电极短接的时间里；在电极迁移过程中只发生一次脉冲电流；阳极材料是在熔液状态迁移到阴极。

由于接触放电是在两电极相接触的瞬间产生的，与非接触放电有着实质上的区别，因此，有关非接触放电的材料电子逸出功、阳极和阴极压降、长放电柱、表面热源等等物理概念，对接触放电来说就成为次要的或者不适用了，而材料的电阻率、电阻温度系数、熔解热、气化热、接触电阻、导热率等则成为分析接触放电和影响强化效果的主要物理参数。

第二章 强化层形成规律

电火花强化和电火花尺寸加工在本质上都是利用了材料的电蚀现象。不过强化通常是在空气中进行，并且电极（阳极）周期地接触工件（阴极）。在大多数情况下，电极材料的电蚀占有优势，被蚀除的材料大量地迁移到相对的工作表面上，在工作表面形成新的合金层。

由第一章我们已经了解到电火花强化的原理，而且从一次放电之后阴极上所产生的电蚀凹穴（图 1—7）证实电蚀现象的存在。事实上强化层不是通过一次放电就能够形成的，实用的具有一定厚度和均匀、致密的强化层是经多次放电之后才形成的。因此，在分析了单次放电过程之后，有必要分析多次放电形成强化点和由强化点形成强化层的规律。

一、电蚀量的迁移系数

在火花放电的作用下，电极上放电微区的材料被熔化和气化，并在放电爆炸力的作用下被抛离基体。抛出的材料的质量，一般可用下式表示：

$$m = KW_M f t$$

式中 m ——抛出材料的质量；

K ——比例系数；

W_M ——单个放电脉冲能量；

f ——脉冲频率；

t ——加工时间。

该式说明电极的电蚀量正比于单个脉冲能量、放电频率和加工时间。比例系数 K 与电极材料的物理常数、脉冲能量峰值和脉宽、介质成分等因素有关。

在电火花强化的时候，电极上抛出的材料一部分转移到相对的工件上去，而另一部分则飞散在介质中。因此，从阳极上抛出的材料的质量 m_a 可以表示为：

$$m_a = m_{a1} + m_{a2}$$

式中 m_{a1} ——转移到阴极上的阳极材料质量；

m_{a2} ——飞散在介质中的阳极材料质量。

同样，阴极工件在火花放电时也产生电蚀和电蚀材料向阳极的转移，这种现象从用铜电极强化钢时电蚀产物中含有铁的成分和用 WC 强化铜时电极表面镀有铜的事实可以得到证实。因此，从阴极上抛出的材料的质量 m_k 同样可用下式表示：

$$m_k = m_{k1} + m_{k2}$$

式中 m_{k1} ——转移到阳极上的阴极材料质量；

m_{k2} ——飞散在介质中的阴极材料质量。

在强化过程中，要求 m_{a1} 尽可能地大，而 m_{a2} 和 m_k 应尽量地小，这样就能获得较高的材料利用率和强化效率。

为了表示材料的利用程度，这里引入转移系数的概念，即

$$k = \frac{\Delta_k}{\Delta_a} \times 100\%$$

式中 k ——转移系数；

Δ_k ——阴极增加的质量；

Δ_a ——阳极减少的质量。

如果不计及阳极和阴极材料相互的多次转移，而只考虑材料转移的宏观效果，那么

$$\Delta_k \approx m_{a1} - m_k$$

$$\Delta_c \approx m_c - m_{k1}$$

因此 k 值在一定程度上反映了实用的强化层形成的规律性。

因为 k 值与材料的电蚀量和转移量有关，所以它与比例系数 K 一样，与电极材料的物理常数、电气规准和介质成分有关。同时还与相对的工作材料和操作因素有关。尤其是在其它条件确定的情况下，与强化时间有着密切的关系。本章将从放电次数和强化时间的角度来分析强化层的不同状态和形成的规律。

二、强化点的形成规律

强化点是指在同一放电点上经一次或多次放电之后所形成的新合金材料。强化层就是这些强化点相互连接和重叠而构成的，因此我们首先来观察一下强化点形成的规律。

图1-7是一次放电在工件上所产生的放电凹穴的剖面金相照片，在凹穴上存在少量转移的电极材料。图2-1和图2-2分别是一次放电后在电极上和工件上的放电点正面形貌。放电条件是：电极材料YG8，工件材料Cr12，空载电压36V，电容量65 μ F。可以看出：两侧放电点的面积是相近的；虽然形貌有些差别，但都是由熔融材料冷凝而成的无规则表面；放电前即使是磨光的表面，经一次放电之后也就成为凹凸不平的表面了，因此放电始终是在两个凹凸不平的平面之间进行的。

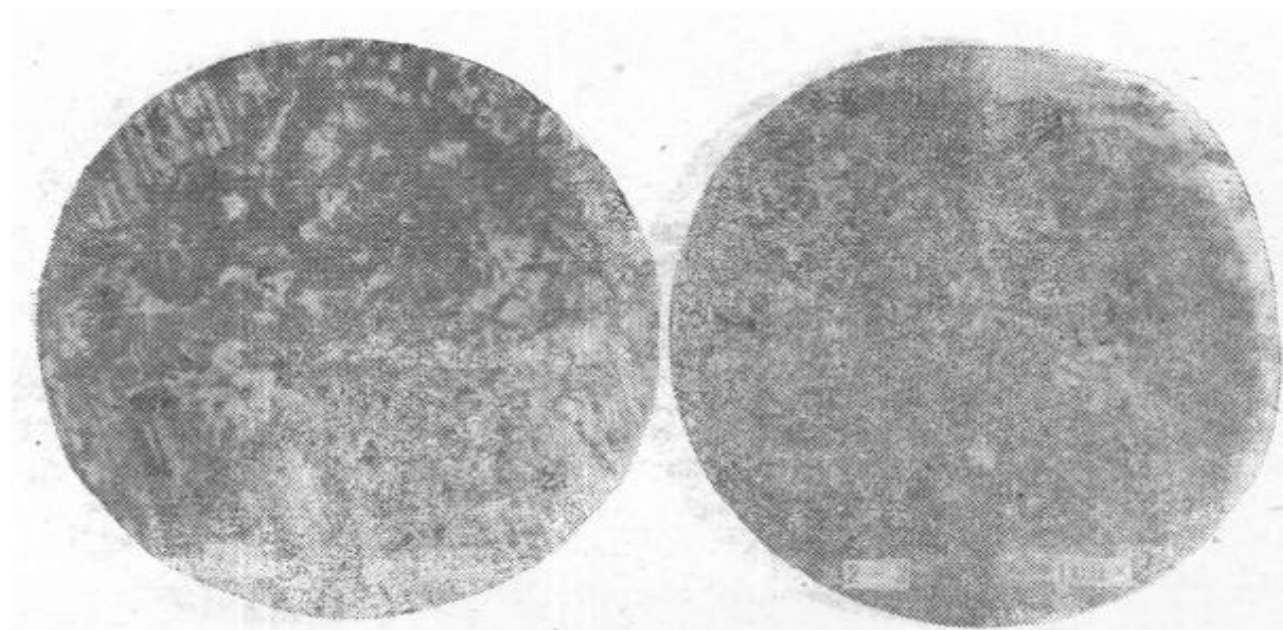


图 2-1 电极侧放电点 100×

图 2-2 工件侧放电点 100×

为了了解多次放电的效果，采用了单发脉冲在同一放电点进行强化，放电条件与图 1-7 相同。其结果如图 2-3、图 2-4 和图 2-5 所示。图 2-3 是经二次重复放电之后工件上的强化点剖面，显然放电凹穴仍然存在，但是电极的转移量较图 1-7 有所增加。图

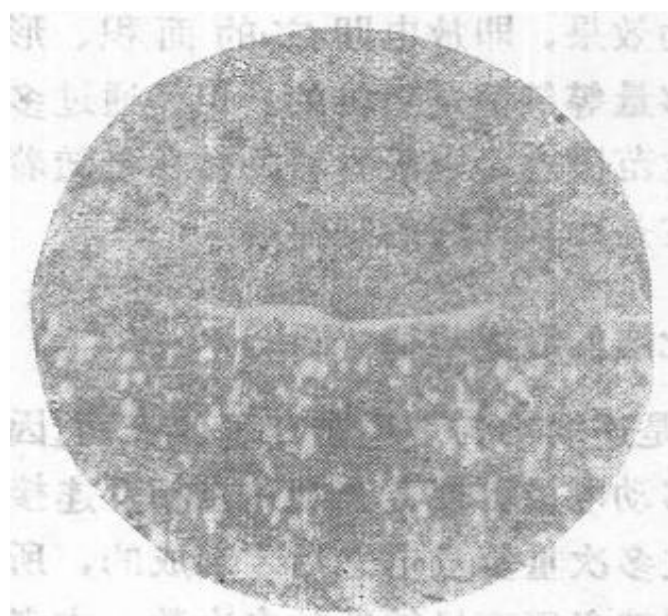


图 2-8 二次放电强化点 100×

图 2-4 是经三次重复放电之后的强化点金相照片，转移的电极材料几乎填平了工件上原有的放电凹穴。图 2-5 是经二十次重复放电之后的金相照片，转移材料已经明显地高出工件的原表面。

因此，从放电点重复放电的过程可以得出以下

结论：火花放电使电极和工件同时产生电蚀；在产生电蚀的

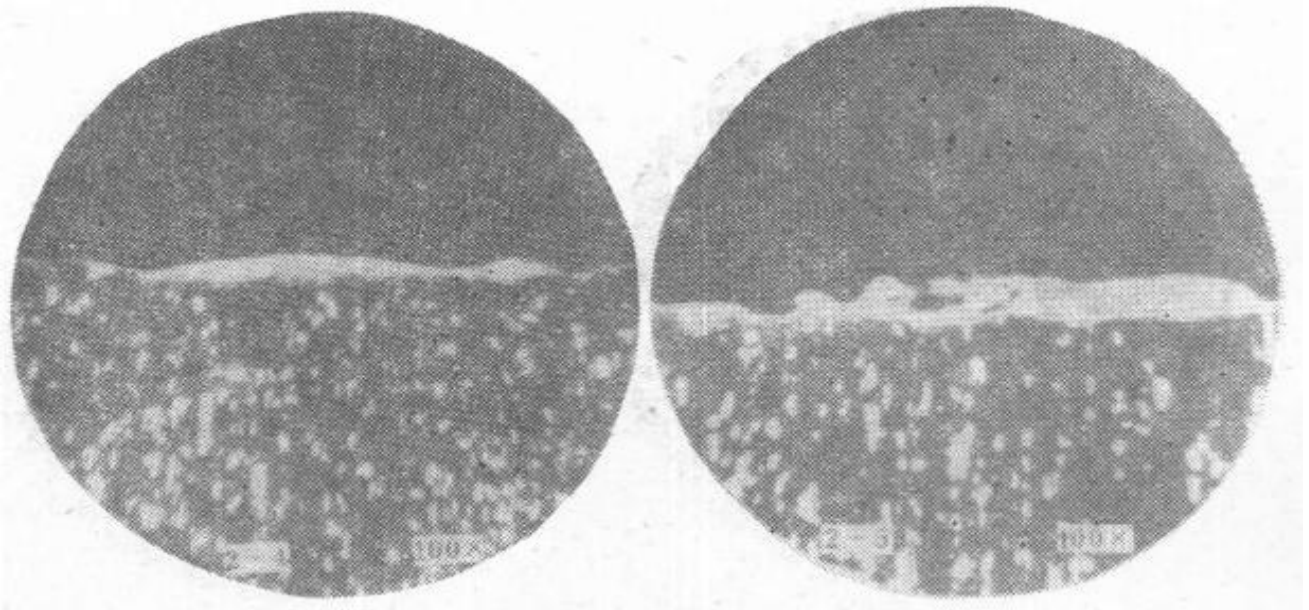


图2-4 三次放电强化点 100× 图2-5 二十次放电强化点 100×

同时，发生电极材料的转移和熔渗；电极材料的转移总量是每次火花放电转移量的累积；为了达到要求的转移量，必须有足够的放电次数。

必须指出，放电是在两个不规则的不平表面之间进行的，所以每次放电所产生的效果，即放电凹穴的面积、形状、深浅、电极材料的转移量等等都是随机的。但是通过多种材料的试验表明，在一定范围内，电极材料的转移量随着放电次数的增加而增多，这是比较普遍的规律。

三、强化层的形成规律

在实用上，希望强化层是连续均匀地覆盖在工件表面，因此，在强化操作时就要缓慢移动电极，使各个强化点相互连接和重叠。每个强化点是经过多次重复放电之后才形成的，所以要形成连续均匀的强化层就必须有足够的放电次数，或者说，对应一定的面积要有适当的强化时间。

为了研究强化层随着操作时间而变化的规律，分别用合

金钢CrMoV、45钢和球墨铸铁作为工件材料进行强化试验，并计量工件重量随强化时间的变化。试验的条件是：强化面积 1 cm^2 ，电极材料YG8，脉冲电源空载电压70V，电容量 $300\mu\text{F}$ ，放电频率约 150 s^{-1} 。测试的数据列于表2-1、表2-2和表2-3。测量的方法是：每强化1 min后用分析天平称量电极和工件的重量变化。图2-6、图2-7和图2-8分别是对应的电极和工件增量曲线及转移系数曲线。

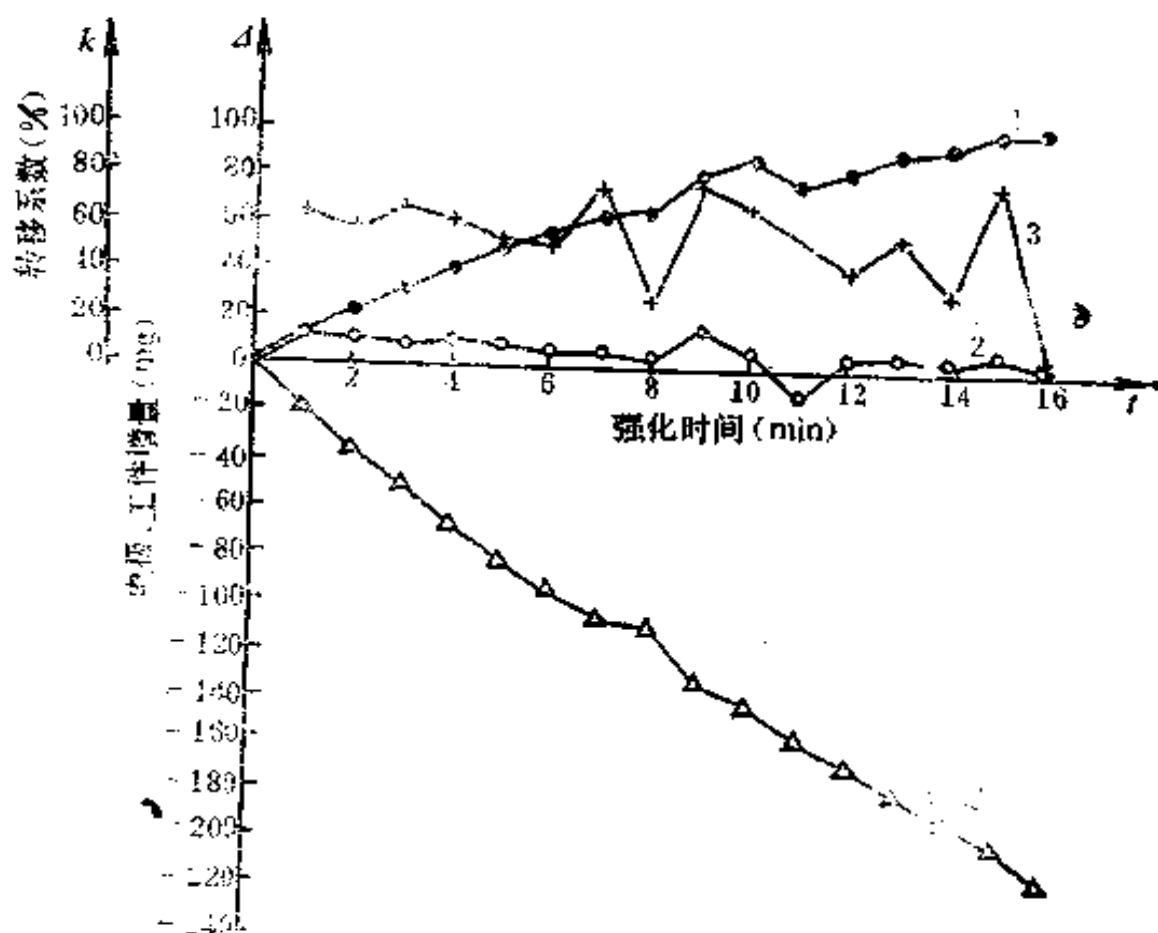


图2-9 CrMoV材料的增重规律

1—工件累积增量 2—工件相对增量 3—转移系数 4—电极累积减量

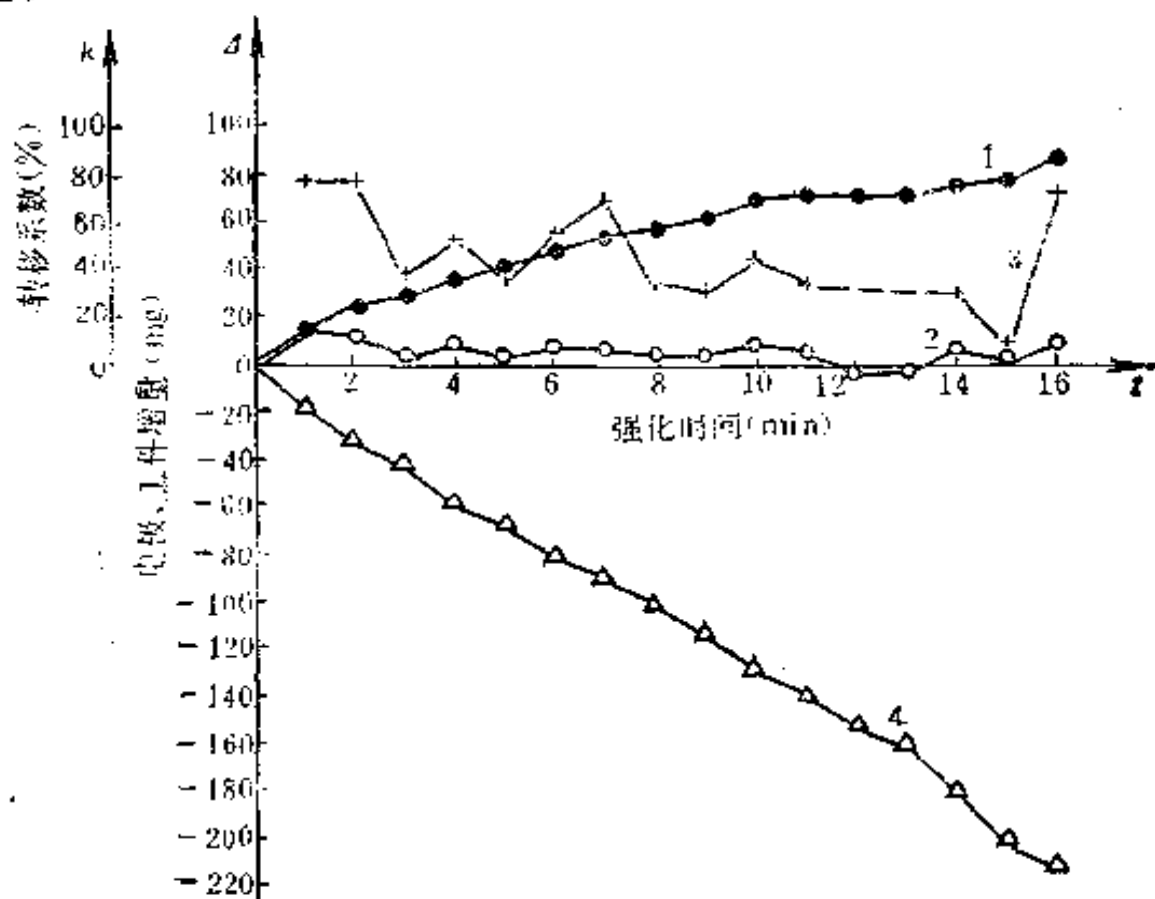


图2-7 45钢材的增重规律

1—工作累积增量 2—工作相对增量 3—转移系数 4—电极累积减量
从这些曲线可以得到下面的结论，

1) 电极材料的电蚀量几乎是随强化时间线性增加，也就是说，在电极材料、放电脉冲能量、放电频率和介质不变的情况下，比例系数 K 近似地是一个常数。

2) 在强化的初期工件重量逐渐增加，而强化到一定时间之后将出现负的增量，即工件的电蚀量超过电极材料的转移量。如果继续强化，工件又开始增重，即出现了周期变化的规律。累积增量的总趋势近似于指数曲线。

3) 转移系数在强化过程中变化较大，在初始阶段转移系数较高，可达到60~80%。比如，CrMoV的最大转移系数出现在加工开始后的1~4 min时间内，45钢出现在1~2

min时间内，而QT出现在第1min。

4) 强化时间延长会再出现高转移系数的情况，例如图中CrMoV强化到第7、9和15min的时候，45钢强化到第7和16min的时候；QT强化到第3、5、7至9和第16min的时候。但是这些高转移系数往往是原有的强化层在多次热应力的作用下遭到破坏之后出现的，即使重量有明显增加，然而不可避免地存在遭到破坏的原有强化层的缺陷，所以从应用角度来说是不可取的。

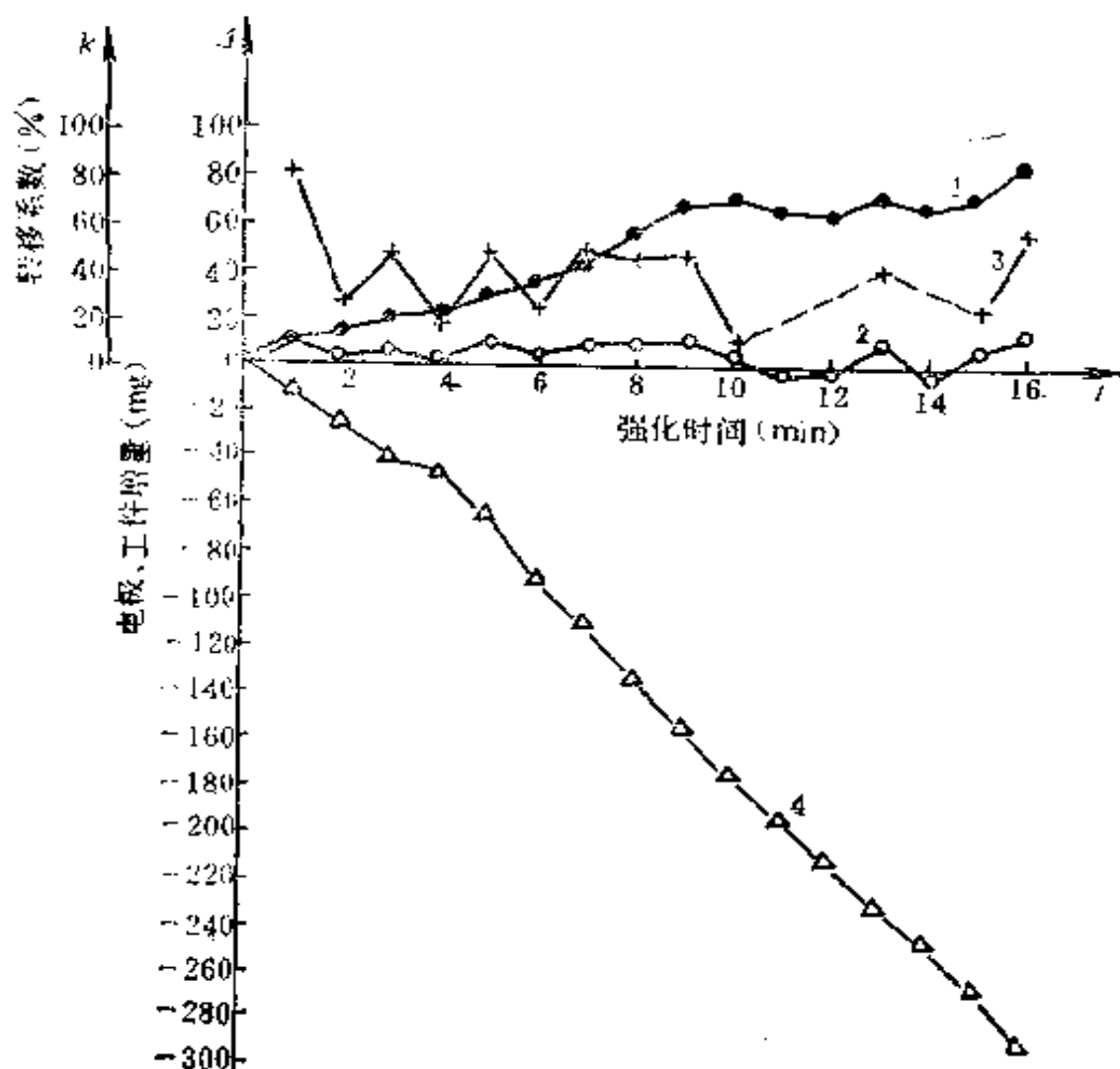


图 2-8 QT材料的增重规律

1—工件累积增量 2—工件相对增量 3—转移系数 4—电极累积减量

表 2-1 CrMoV 材料的增重规律

| 项 目 | 强 化 时 间(min) | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|--------------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| 电极累积减量 (mg) | 0 | 18.8 | 37.0 | 49.7 | 66.7 | 83.6 | 95.5 | 105.8 | 110.9 | 132.0 | 143.0 | 158.2 | 169.2 | 181.3 | 192.5 | 202.0 | 218.0 |
| 工件相对增量 (mg) | 0 | 12.0 | 10.7 | 8.4 | 10.6 | 9.1 | 6.1 | 7.7 | 1.4 | 16.3 | 7.5 | -10.0 | 4.7 | 6.7 | 3.6 | 7.4 | 0.6 |
| 工件累积增量 (mg) | 0 | 12.0 | 22.7 | 31.1 | 41.7 | 50.8 | 56.9 | 64.6 | 66.0 | 82.3 | 89.8 | 79.8 | 84.5 | 91.2 | 94.8 | 102.2 | 102.8 |
| 转移系数(%) | — | 63.8 | 58.8 | 66.1 | 62.4 | 53.9 | 51.3 | 74.8 | 27.5 | 77.3 | 68.2 | — | 42.7 | 55.4 | 32.1 | 77.9 | 3.8 |

表 2-2 45 钢材料的增重规律

| 项 目 | 强 化 时 间(min) | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|--------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| 电极累积减量 (mg) | 0 | 18.0 | 31.9 | 41.9 | 57.7 | 68.4 | 82.0 | 90.8 | 101.7 | 113.6 | 128.9 | 140.4 | 153.4 | 160.4 | 180.2 | 201.0 | 212.1 |
| 工件相对增量 (mg) | 0 | 14.0 | 10.7 | 3.9 | 8.5 | 3.9 | 7.5 | 6.1 | 3.7 | 3.7 | 6.8 | 4.1 | -1.4 | -0.8 | 6.2 | 1.9 | 8.2 |
| 工件累积增量 (mg) | 0 | 14.0 | 24.7 | 28.6 | 37.1 | 41.0 | 48.5 | 54.6 | 58.3 | 62.0 | 68.8 | 72.9 | 71.5 | 70.7 | 76.9 | 78.8 | 87.0 |
| 转移系数(%) | — | 77.8 | 77.0 | 39.0 | 53.8 | 36.5 | 55.2 | 69.3 | 34.0 | 31.1 | 44.4 | 35.7 | — | — | 31.3 | 9.1 | 73.9 |

表2-3 QT材料的增量规律

| 项 目 | 强 化 时 间(min) | | | | | | | | |
|----------------|--------------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 电极累积减量 (mg) | 0 | 12.4 | 26.5 | 39.9 | 45.5 | 65.5 | 92.5 | 110.4 | 133.1 |
| 工件相对增量 (mg) | 0 | 10.0 | 3.8 | 6.2 | 1.1 | 9.7 | 6.8 | 8.8 | 10.6 |
| 工件累积增量 (mg) | 0 | 10.0 | 13.8 | 20.0 | 21.1 | 30.8 | 37.6 | 46.4 | 57.0 |
| 转移系数(%) | — | 80.7 | 27.0 | 46.3 | 19.6 | 48.5 | 25.2 | 49.2 | 46.7 |

| 项 目 | 强 化 时 间(min) | | | | | | | |
|----------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| 电极累积减量 (mg) | 155.7 | 175.7 | 194.5 | 210.5 | 231.7 | 245.1 | 266.5 | 290.0 |
| 工件相对增量 (mg) | 10.7 | 2.0 | -3.8 | -1.9 | 8.5 | -6.2 | 5.3 | 12.9 |
| 工件累积增量 (mg) | 67.7 | 69.7 | 65.9 | 64.0 | 72.5 | 66.3 | 71.6 | 84.5 |
| 转移系数(%) | 47.4 | 10.0 | — | — | 40.1 | — | 24.8 | 54.9 |

注：1. 工件相对增量是指相邻2min工件重量之差；

2. 转移系数是指对应的那t min的转移系数。

5) 当工件的重量有所减少的时候，不能采用转移系数的概念，所以图中用虚线来表示。

对于应用者来说，如何根据强化层的形成规律来选择操作时间是很重要的。从工件每min的绝对增重曲线来看，强化时间大于出现负增量的时间，显然是不合适的。但是，强化时间略小于出现负增量的时间也是不合适的。例如强化CrMoV时，如果选取强化时间为10min，而在10min之内转移系数和工件增重已经出现过最低点。此外，每平方厘米强

化10min 不仅强化效率极低，而且加工的表面粗糙度和强化层本身都已出现了不同程度的缺陷。所以作者认为最佳强化时间的确定应该从以下几个因素的综合效果来考虑。

1) 在强化时间内强化层要有明显增厚。

2) 在强化时间内，表面粗糙度不得明显变粗，强化层的质量不遭到破坏或出现明显缺陷。

3) 具有较高的强化效率。

4) 电极材料的利用率较高，也即转移系数较大。

从这样的观点出发，一般 1 cm^2 的强化时间可以选择 $1 \sim 4\text{ min}$ ，视不同的电规准和电极材料而定。例如，根据上述试验，45号钢 1 cm^2 的最佳强化时间是 $1 \sim 2\text{ min}$ ，QT的强化时间是 1 min 左右，而CrMoV则可适当延长，以不出现表面缺陷为限。

图2-9至图2-12是一组不同强化时间的强化层金相照片。强化的条件是：电规准D9110A型强化机第Ⅲ档，即电容量为 $25\mu\text{F}$ ，直流电源电压 36V ，电极材料YG8，工件材料QT。图2-9至图2-12分别是在 1 cm^2 的面积上强化了2、4、6和 10min 。从照片可以看出：强化 2 min 后在表面即可形成强化层； 4 min 后能形成比较均匀的强化层，厚度也有所增加；强化 6 min 后，强化层出现了断裂，而且厚薄不匀；在强化 10min 之后，工件表面出现明显的缺陷（照片内表层中部）。改变电规准和工件材料同样能出现强化层随强化时间逐渐形成而后又逐渐破坏的现象，只不过获得均匀强化层所需的时间和强化层的厚度有所不同而已。由此可以看出，强化层的形成和它的质量与强化时间有着密切的关系。认识不同强化条件下强化层形成的规律，对于选择最佳强化时间无疑是具有实用意义的。



图2-9 强化时间为2min 400× 图2-10 强化时间为4min 400×



图2-11 强化时间为6min 400× 图2-12 强化时间为10min 100×

四、限制强化层增厚的原因

电火花表面强化的特点之一就是在一一定的电规准和材料条件下强化层的厚度是有一定限度的，不会随强化时间的延长而无限制地增厚。从图2-6、2-7和2-8也能看出，

工件增重是随时间以指数规律变化，长时间强化将出现工件增重时而为正、时而为负，致使增重趋于饱和。因此电火花强化工艺有可能通过控制放电能量和强化时间来达到工艺上需要的强化层厚度。

强化层为什么不能随强化时间的延长而无限制地增厚？这个问题现在仍然是值得研究的问题之一。前面已经论述到，在电火花放电时阳极材料向阴极表面迁移，同时也产生阴极电蚀现象。迁移量和电蚀量的多少就决定了阴极表面的合金化层是增加还是减少，当迁移量大于电蚀量时，强化层增厚；相反，电蚀量超过迁移量时，强化层就减薄。因此关键的问题是找出强化过程中使迁移量和电蚀量起变化的因素。目前认为，可能的原因有以下几方面。

1. 热应力作用

电火花强化是利用火花放电的能量使金属材料熔化，熔化的材料又在空气中急剧地冷却而凝固，因此在强化层内存在着热应力。在多次放电的作用下，强化层内将会出现显微裂纹，这些裂纹的扩张将使强化层部分地脱落。图 2-13 是在长时间放电作用下遭到破坏的强化层。强化的条件是：D9130型电火花强化机第三档电规准，电极材料YG8，工件材料45钢。图 2-14是飞溅的电蚀产物，其中呈球形的是熔融的电极和工件材料在空气中冷凝而形成的，而不规则形状的颗粒是强化层脱落的碎片。

电火花强化时产生热应力是不可避免的。但是，如果从设备的电气参数、电极材料、保护气体等方面改善热应力状态，或者通过热处理工艺消除应力，则是有可能提高强化层厚度的。

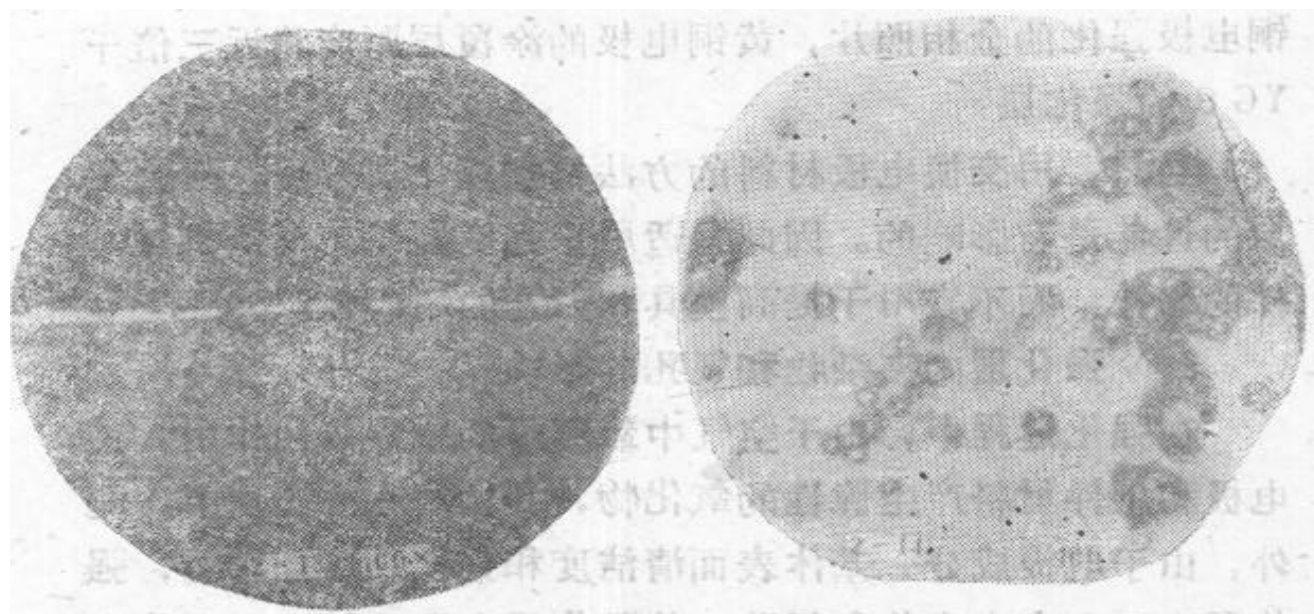


图2-13 强化层部分脱落 100×

图2-14 电蚀产物 400×

2. 工件表层化学成分的变化

在电火花强化的开始阶段，参与放电微区合金化的是电极材料和工件基体材料所含的各元素。例如，用YG8电极强化Cr12合金钢时，参与合金化的元素主要是W、C、Co、

图2-15 两种电极材料的强化层
400×

Fe、Cr以及空气中的氧离子和氮离子等。随着强化层的形成，参与合金化的基体元素逐渐减少，而电极材料的成分相对有所增加，放电将在相同元素之间进行。当延长强化时间强化层也不出现明显增厚的時候换用其它材料的电极，就有可能使强化层再次出现明显的增厚。图

2-15是在Cr12试件上先用YG8电极材料强化，然后再用黄

铜电极强化的金相照片，黄铜电极的涂覆层厚度将近三倍于YG 8的强化层。

当然，用交换电极材料的方法增加强化层厚度，对强化层的性能是有影响的。因此只适用于强度要求不高的机械零件的修补，而不宜用于提高模具和刀具的耐磨性。

3. 强化层内夹杂物和气孔的影响

在强化过程中，由于空气中氧离子的剧烈氧化作用，使电极和工件材料产生脆性的氧化物，并粘结在合金层中。此外，由于电极成分、基体表面清洁度和强化环境的影响，强化层内还存在夹杂物和气孔，使强化层变得疏松。夹杂物和气孔使强化层的机械强度降低，在多次放电的热应力和机械冲击作用下，强化层会出现碎裂和脱落。

4. 强化层电阻率的变化

由于强化层内元素成分的改变，气孔和夹杂物的存在，使强化层的体电阻增加，放电能量在层内产生较高的焦耳热，导致强化层电蚀量增加。同时，强化层表面的氧化层使电极材料的迁移和熔渗减少。因此使强化层的增厚受到阻碍。

总之，限制强化层增厚的原因是多方面的，不可能消除其中的一种因素的影响就使强化层无限制地增加。但是，可以根据这些因素选择热应力最小的条件，选用不易氧化的电极材料，采取消除应力的措施，使用保护气体等，来提高强化层的质量和厚度。作者认为，改进电气参数和电极材料的成分是其中较为有效的方法。

第三章 强化层的特性

从电火花强化原理和强化层形成规律可知，电火花强化层是电极之间经过多次放电之后形成的。在强化过程中，由于火花放电所产生的瞬时高温，使放电微区的电极材料和工件表面的基体材料被瞬间高速熔化，从而发生了一个高温物理化学冶金过程。在此冶金过程中，电极材料和被电离的空气中的氮离子等熔渗、扩散到工件表层，使工件表层重新合金化，它的化学成分也随着发生明显变化。同时，由于熔化微区体积极小，脉冲放电瞬时停止之后，在基体材料上的被熔化的金属微滴因快速冷却凝固而被高速淬火，大大地改变了工件表面层的组织结构和性能。所以，用适当的电极材料强化工件，能在工件表面形成一层高硬度，高耐磨性和抗腐蚀性的强化层，显著地提高被强化工件的使用寿命。

一、强化表面的形貌

电火花强化所形成的表面形貌与传统的机械加工方法所形成的表面形貌不同。机械加工所形成的表面形貌，是由切削刃或磨料运动痕迹所形成的，是有一定规律的带方向性的表面。在显微照片上可明显地看出有规则的加工条纹。图3-1所示为磨削加工后表面形貌的显微照片。而电火花强化表面的形貌是由无数密集的强化点和放电凹坑所构成的，因为它是经多次放电所形成的强化点的融合和重叠的结果。宏观呈银灰色的桔皮状，其显微照片如图3-2a、b所示。这种

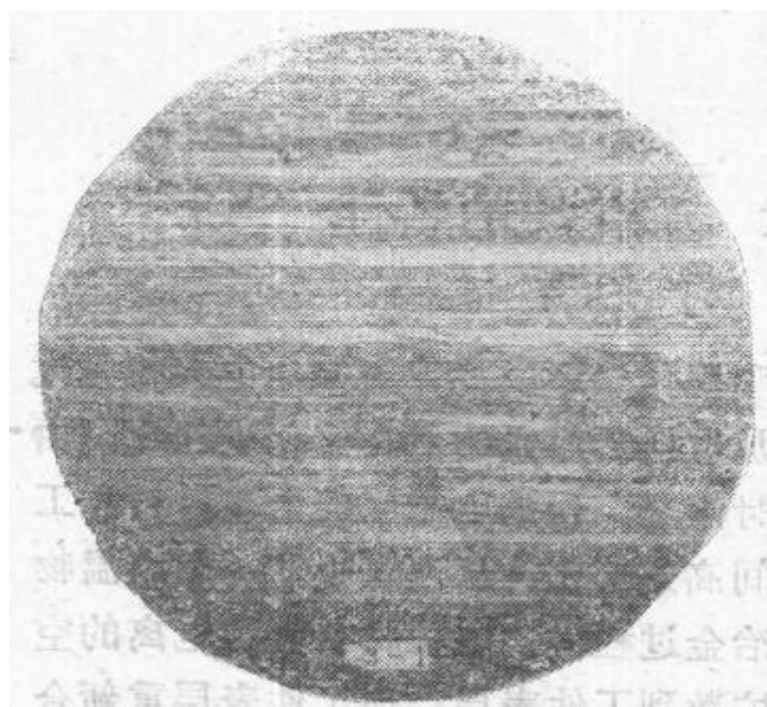


图3-1 磨削加工表面形貌 300×
材料: W18Cr4V(淬火回火状态)表面粗糙度
 $Ra = 0.16 \sim 0.32 \mu\text{m}$ (光洁度: $\nabla 9$)

表面形貌对改善工作表面的耐磨损性是有利的。

正因为电火花强化的表面是由多次脉冲放电所形成的放电凹坑和强化点所构成的, 单个脉冲放电能量越大, 所熔化的金属微滴也越大, 所形成的放电凹坑和强化点也就越大, 所以电火花强化的表面粗糙度

随着脉冲能量的增加而增加。表 3-1 是强化表面粗糙度与

表3-1 强化表面粗糙度与电规范的关系

| 序号 | 试件材料 | 电极材料 | 电 规 准 | | 表面粗糙度(光洁度) | |
|----|-------|------|----------------------------|-------------|------------------------|------------|
| | | | 电 容 量 (μF) | 工作电流 (A) | Ra (μm) | 光洁度 |
| 1 | GCr15 | YG8 | 1 | 0.6 | 1.15~1.3 | $\nabla 7$ |
| 2 | | | 5 | 1.0 | 2.0~2.2 | $\nabla 6$ |
| 3 | | | 25 | 1.3 | 3.4~4.0 | $\nabla 5$ |
| 4 | | | 45 | 1.5 | 4.0~5.0 | $\nabla 5$ |
| 5 | | | 65 | 1.8 | 5.5~5.8 | $\nabla 4$ |
| 6 | | | 95 | 2.1 | 5.6~7.0 | $\nabla 4$ |
| 7 | | | 115 | 2.3 | 7.2~7.8 | $\nabla 4$ |
| 8 | | | 65~1 | | 2.7~3.0 | $\nabla 5$ |

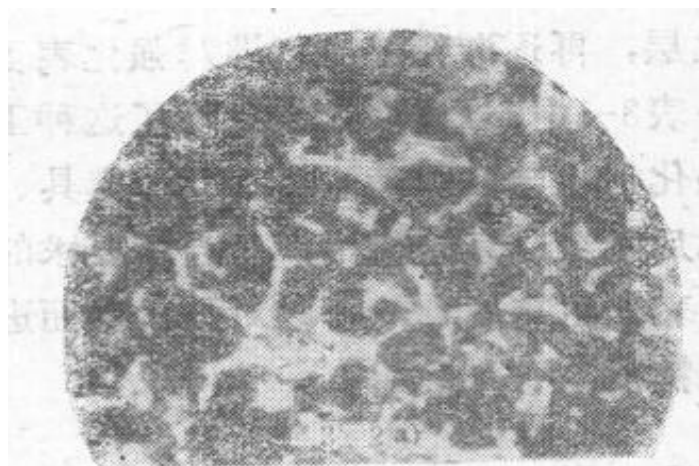
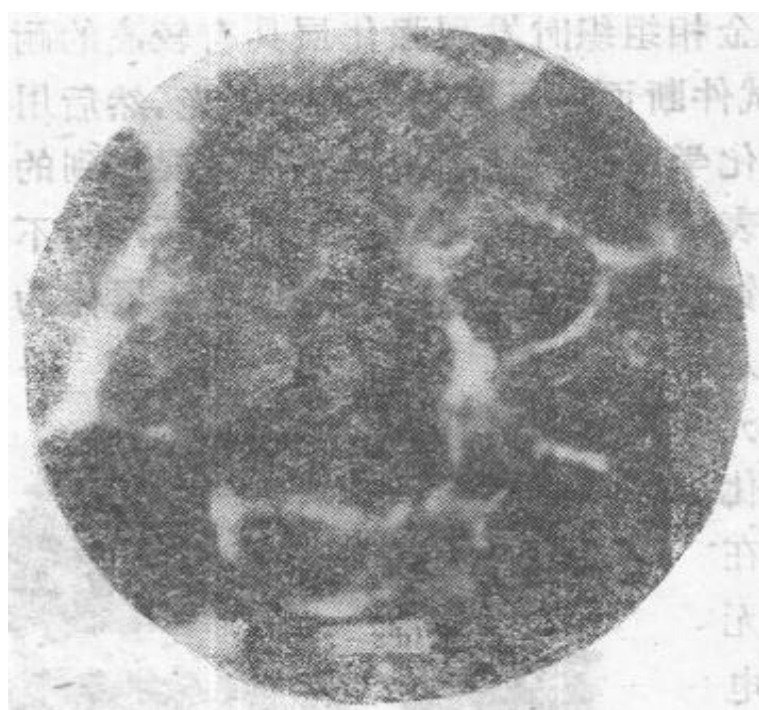
a) 充放电容量 $1\mu\text{F}$ b) 充放电容量 $45\mu\text{F}$

图3-2、电火花强化表面的形貌 500×

电规准的关系，试验使用 D9110A 型电火花强化机，经不同的电容量和工作电流强化的试件表面粗糙度是用 BCJ-2 型表面粗糙度检查仪测量。

从表 3-1 可以清楚地看出，随着电容量和工作电流的增大， R_a 值增大。在正常生产情况下，粗规准的表面粗糙度一般在 $R_a = 2.5 \sim 10\mu\text{m}$ ($\nabla 4 \sim 5$) 范围内，这时强化层的厚度较厚；而当用精规准时，表面粗糙度为 $R_a 1.6 \sim 0.8\mu\text{m}$ (光洁度 $\nabla 6 \sim 7$)，

但强化层的厚度较薄，一般只有几微米至十几微米。为了满足粗糙度要求，可以采取限制单个脉冲放电能量的方法来达到，但是强化层的厚度和生产率将下降，所以这样做不一定合理。那么，既要得到一定厚度的强化层，又要保持较细的粗糙度和生产率，合理的工艺方法是：先采用粗规准进行强

化，以得到较厚的强化层，再逐渐降低电规准对强化表面进行整修来降低粗糙度。表3-1中8号试件就是采用了这种工艺方法强化的结果。对强化后粗糙度即能满足要求的模具、刀具和零件，电火花强化后就可以直接使用；而当所要求的表面粗糙度细于强化后的表面粗糙度时，可以对强化表面进行研磨抛光，以降低其粗糙度。

二、强化层的金相组织

在分析强化层的金相组织时发现强化层具有较高的耐腐蚀性。对经过强化的试件断面进行磨制和机械抛光，然后用4%的硝酸酒精溶液进行化学腐蚀，在金相显微镜下观察到的金相组织如图3-3所示。表面层组织的耐腐蚀性较高，因不易被硝酸酒精溶液所腐蚀而呈白亮状态，通常把这一层称为白亮层或白层。白亮层是由电极和工件材料的元素及其化合物以及氧化物、氮化物所组成，在普通的光学显微镜下无法分辨出其组织。用电子显微镜分析可知，其组织主要是由一些具有特殊结构的碳化物所组成。在白亮层的内侧为稍暗的扩散区，它是由电极材料的组成元素熔渗、扩散到基体金属材料中，随后被高速淬火而形成的，其组织为超细化马氏体上分布一些特殊的碳化物，它的抗腐蚀

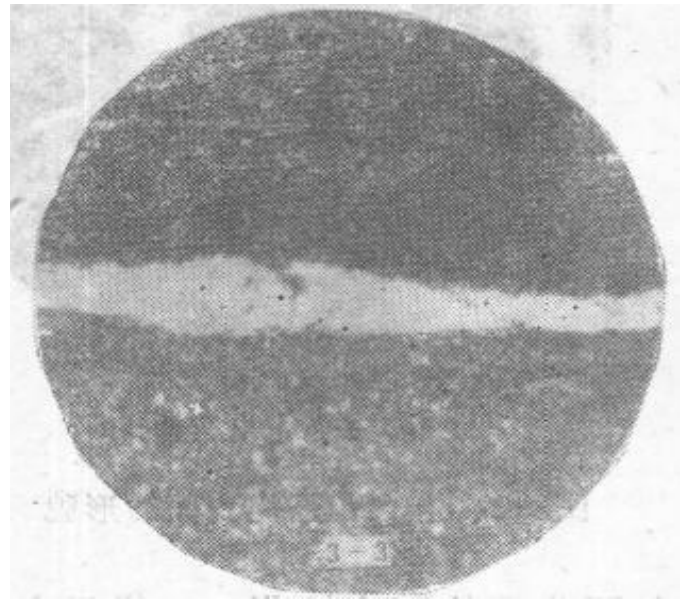


图3-3 强化层的金相组织 500×

工件材料：GCr15（淬回火状态）
电极材料：YG8

性也较高。再往里是过热影响区，该区的组织抗腐蚀性较差，被硝酸酒精腐蚀后呈一窄的暗带。过热影响区再往里为正常的基体组织。

三、强化层的厚度

强化层的厚度是白亮层厚度和扩散层厚度的总和。由于用常规的金相分析方法较难分辨出扩散层，而且大量实验表明，强化层中的白亮层厚度与强化后工件的增厚量相近，通常近似地用白亮层的厚度来表示强化层的厚度。

强化层的厚度随着强化设备的功率大小即电规准的强弱而变化。表3-2和图3-4是使用D9110A型电火花强化机对几种不同的金属材料进行电火花强化时，强化层厚度与电规准的关系。电极材料为YG8。强化生产率 $0.23\sim 0.28\text{cm}^2/\text{min}$ 。

表3-2 不同材料的白亮层厚度(μm)与电规准的关系

| 序号 | 电规准 | | 试件材料 | | | | |
|----|--------------------------|-------------|---------|-------|-------|-------|--------|
| | 电容量 (μF) | 工作电流 (A) | Cr12MoV | GCr15 | Cr12 | T10 | QT45-5 |
| 1 | 1 | 0.6 | 6~9 | 6~9 | 6 | 6 | 6 |
| 2 | 5 | 1.0 | 12~18 | 12~18 | 15 | 15 | 12 |
| 3 | 25 | 1.3 | 15~24 | 18~24 | 18~24 | 18 | 15 |
| 4 | 45 | 1.5 | 27~35 | 21~32 | 24~33 | 20~27 | 18 |
| 5 | 65 | 1.8 | 36~45 | 24~39 | 36~45 | 25~30 | 17 |
| 6 | 95 | 2.1 | 33~39 | 27~33 | 33~39 | 25~30 | 18 |
| 7 | 115 | 2.3 | 32~38 | 26~32 | 30~36 | 22~24 | 24 |
| 8 | 65~1 | | 33~39 | 24~33 | 24~30 | 24~30 | 21 |

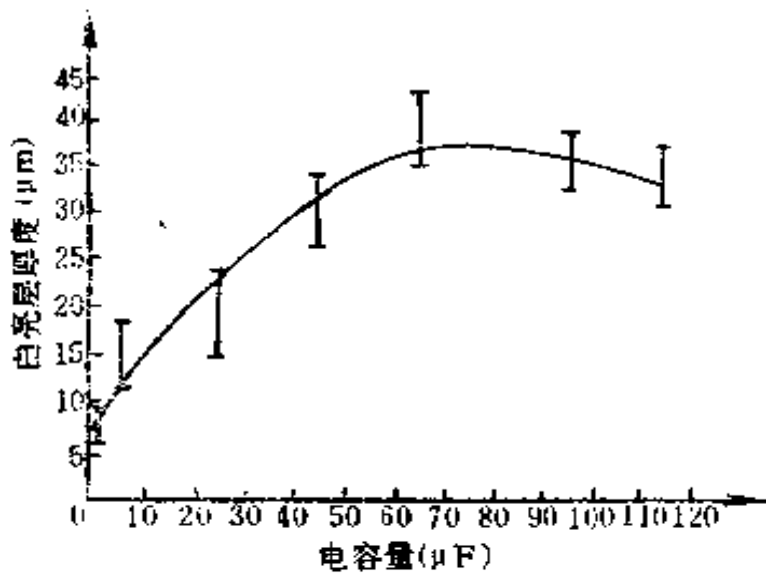


图3-4 Cr12MoV钢白亮层厚度与电容量的关系

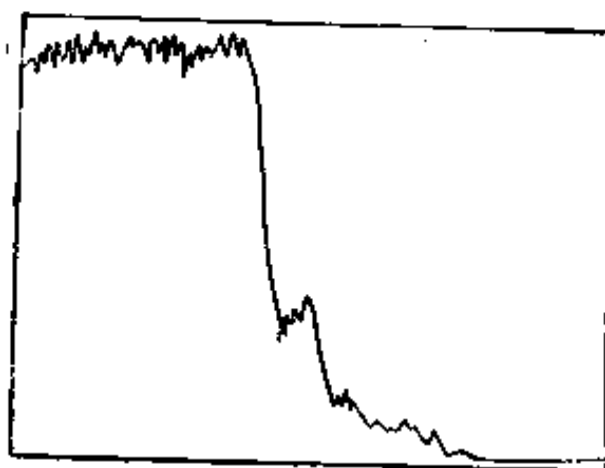
从表3-2和图3-4可见，白亮层的厚度一般随着电容量的增大而增大，但超过某一个电容量值（如 $65\mu\text{F}$ ）后，白亮层的厚度反而略有减小，也就是说白亮层的厚度与电规准大小的关系有一个最大值。然而在本试验条件下，球墨铸铁的白亮层厚度一直随着电规准的增大而增加。同时从表3-2还可以看出，不同材料的白亮层厚度的变化情况不同，合金元素含量高的材料，强化后白亮层的厚度较大。通常，在其他条件相同时，合金钢的白亮层厚度大于碳钢的白亮层厚度，而碳钢的白亮层厚度又大于球墨铸铁的白亮层厚度。由此得到启示，用同一种电极材料对不同材料的工件进行强化时，其强化层厚度不同；对不同的工件材料应选用不同的电极材料，有可能得到最佳的效果。

四、强化层中化学元素的分布

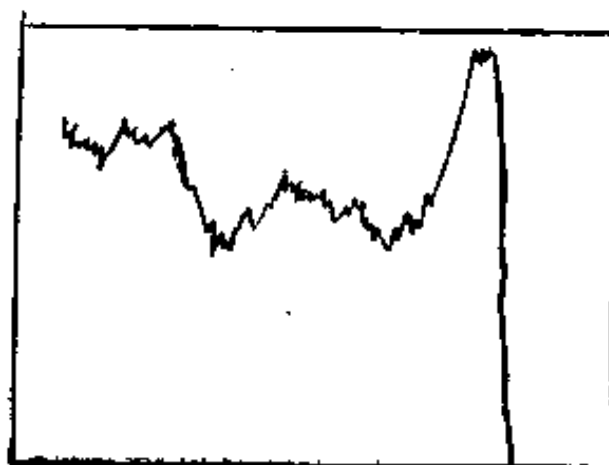
电火花强化层的化学成分与电极和基体金属材料的化学



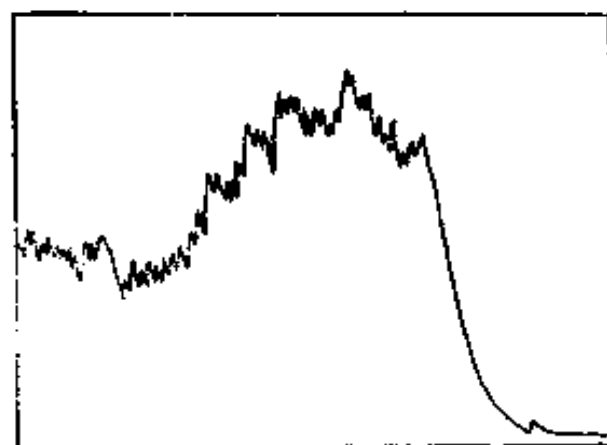
a) 二次图象



b) Fe的分布 20kV $1 \times 10^{-6} \text{A}$



c) C的分布 10kV $1 \times 10^{-6} \text{A}$

d) W的分布 30kV 1×10^{-8} Ae) Cr的分布 30kV 1×10^{-8} Af) Co的分布 30kV 1×10^{-8} A图3-5 在SEMQ上分析强化层中诸元素的分布 1000 \times

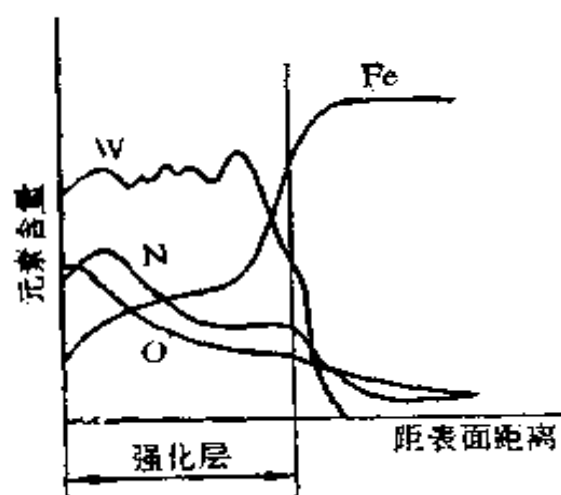


图 3-6 强化层中元素的分布

成分及周围介质有关，而化学成分在强化层中的分布情况与强化的工艺规准有关。

以YG8硬质合金作为电极，用 $45\mu\text{F}$ 电容量对GCr15钢进行电火花强化后的强化层，使用扫描电子探针定量分析仪（SEM-Q）进行成分分布分析，其结果如图3-5所示⁽²⁾。图3-6为文献⁽³⁾介绍的用硬质合金电极强化钢时，强化层内氧、氮、钨、铁等元素的分布情况。从图3-5和图3-6可见，两者的元素分布情况是一致的。

在电火花强化过程中，虽然放电时间极短，但由于其脉冲放电所产生的温度很高（ $5000\sim 10000^{\circ}\text{C}$ ），所以组成电极和工件材料的各种元素及空气电离产生的氮离子等都发生强烈的扩散。电极材料中的C、W和Co元素及氮离子等向基体金属材料中熔渗扩散，并且主要是存在于白亮层中，其

中只有少量的W和Co元素进入扩散层，但这少量的元素对扩散层的耐磨性等性能却产生良好的影响。基体金属材料中的Fe、Cr和C等元素向表层扩散，使白亮层中含有少量的Fe和Cr元素，而且越趋近表面其含量越低。其中碳的含量变化较特殊，除了电极中的C元素熔渗到表层外，基体金属材料中的C元素也向白亮层扩散，使表层碳的含量显著地增高，而使过热影响区中的碳含量比基体金属材料的含碳量低，形成低碳区。这种化学成分的变化，对强化层的性能有利。

五、强化层的结构

为了进一步探明强化层的特性，用X射线衍射法对强化层进行结构分析。分析条件是：电极为YG8硬质合金；工件为淬火回火状态的GCr15钢；使用D9110A型强化机，强化时的电容量为45 μ F，白亮层厚度为21~32 μ m；X射线衍射时用CuK α 靶，Ni滤波，SC-30。强化层的X射线衍射分析结果如图3-7所示。

图3-7a为白亮层表层的X射线衍射分析结果。从中可以确定强化层的表层结构为W₂C和少量的WC。还可能其他的相结构，因为其中有些衍射峰还未能确定为何种结构。

图3-7b为强化层剥去25 μ m后X射线衍射分析的结果。从中可以确定其结构仍为W₂C和少量WC，但已经有 α -Fe相存在。这时已经接近白亮层的内边缘。

图3-7c为强化层再剥去20 μ m（共剥去45 μ m）后X射线衍射分析的结果。从中可以确定其主要结构为 α -Fe相（即马氏体相组织），但还有极少量的W₂C存在。此处已进入扩散区。

电火花强化层的组织结构，还随着强化的工艺规准及电

a) 强化表层X射线衍射分析结果

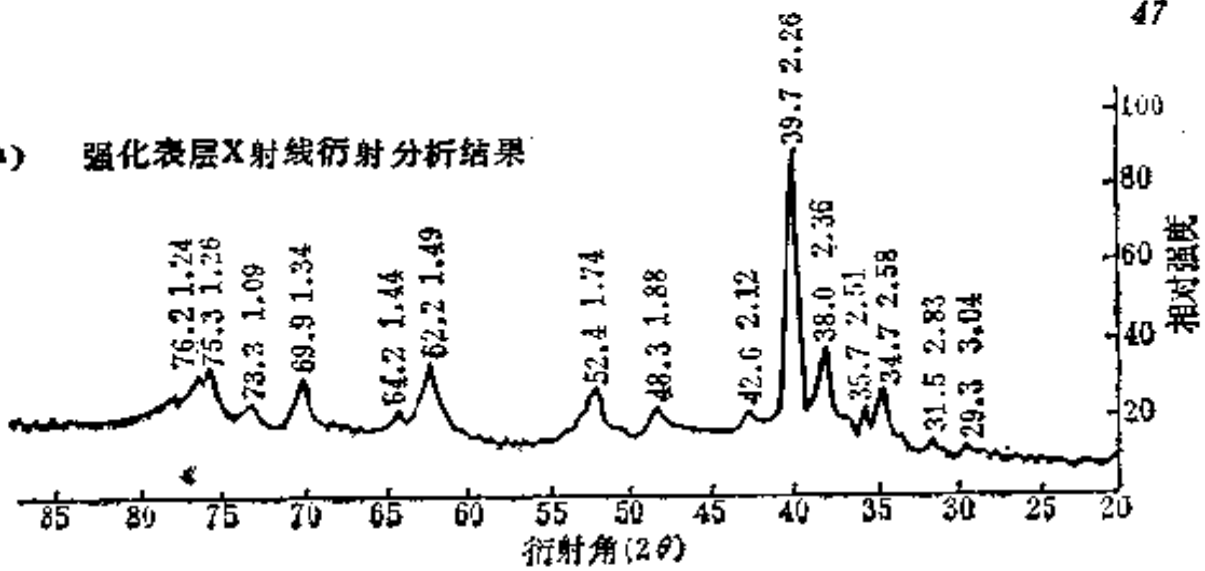
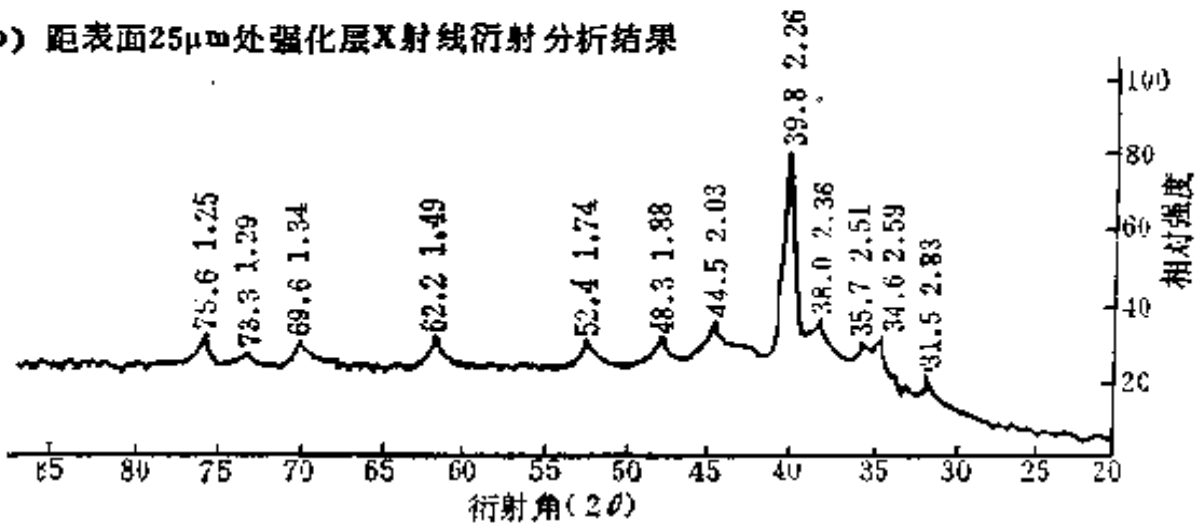
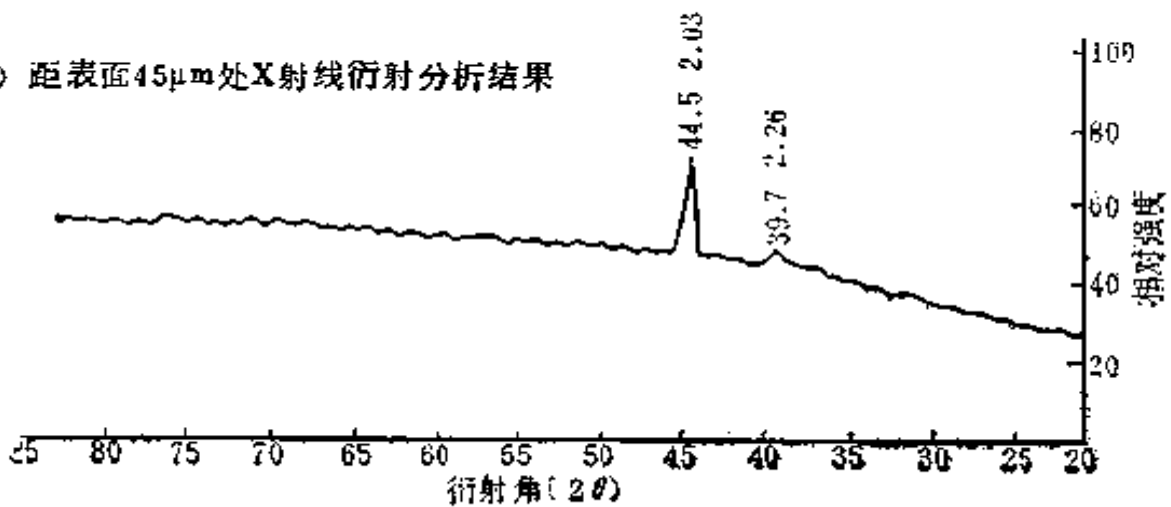
b) 距表面25 μm 处强化层X射线衍射分析结果c) 距表面45 μm 处X射线衍射分析结果

图3-7 电火花强化层X射线衍射分析结果

极和工件材料的不同而变化。例如用上述强化GCr15钢相同的条件对T10钢进行强化时,其强化层结构为 W_2C ,而没有WC存在。而用YG8硬质合金电极对灰口铸铁进行强化(设备功率为2kW,电容量为 $15\mu F$,其强化层的X射线衍射分析结果如图3-8所示。从中可以确定白亮层的主要结构为 Co_3W_3C 和少量的 Fe_3W_3C 。

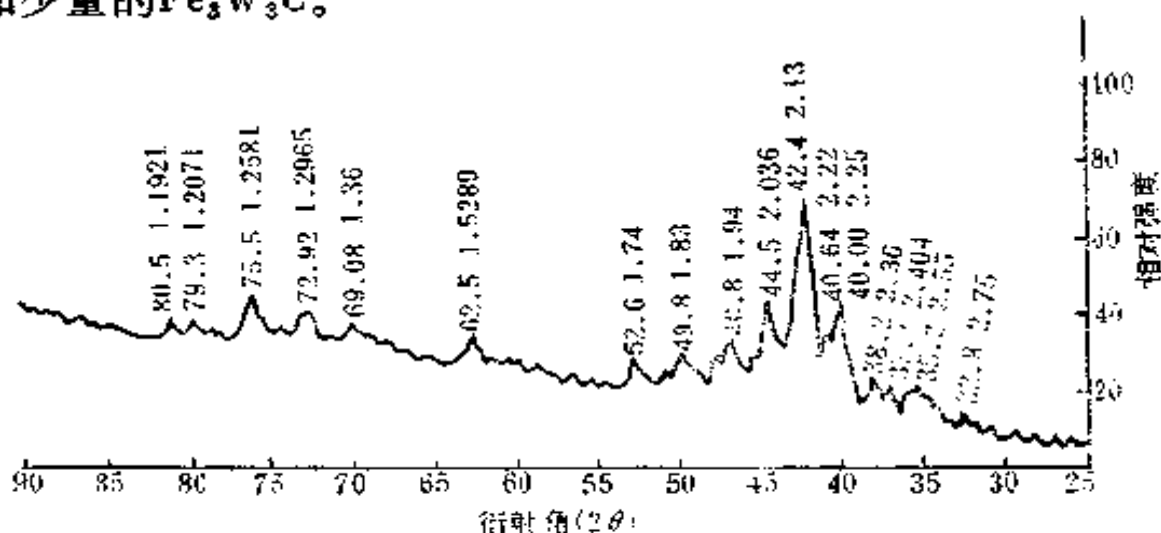


图3-8 灰口铸铁电火花强化层X射线衍射分析结果
(CuK_{α} 靶 Ni滤波 SC-39)

另外,据有关的X射线衍射和电镜分析资料^[4]报导,当其实验条件为:试件是经淬火、低温回火的Cr12,用YG8硬质合金电极进行强化,强化后经 $500^{\circ}C$ 4h去应力退火。分析结果认为:白亮层的外层主要是 M_6C 型碳化物,是在 Fe_3W_3C 碳化物的基体上分布着一定数量的 Cr_7C_3 、 $\epsilon-Fe_3N$ 和CrN等;而白亮层的内层为在 $\epsilon-Fe_3N$ 的基体上弥散地分布着极细小的圆粒子状的CrN;扩散层是粒度极细的含氮板条状马氏体,在它的上面分布着碳化物和铁、铬氮化物;过热影响区是由针状回火马氏体及碳化物所组成。

从以上的分析可以确认,电火花强化决不是简单的镀覆过程,而是由组成电极和工件的诸元素及空气中氮等电离的

离子，在电火花强化过程中发生剧烈而复杂的熔渗、扩散和重新合金化、氮化等物理化学反应，使金属材料经电火花强化后在强化层中产生一系列特殊结构的碳化物，因而大大地改善了工件表面层的机械、物理和化学性能。

六、强化层的显微硬度和红硬性

测量电火花强化层硬度的方法是：将试件的断面经过磨制、抛光和腐蚀而形成如图3-3所示的断面金相，然后用71型显微硬度计在100g载荷下分别测量各个区域的硬度值。几种试件材料强化后的显微硬度值列于表3-3。强化机的功率为100W，所用电容量为95 μ F。

从表3-3和图3-9可以看到，白亮层的显微硬度一般在HM970~1200左右，也有些资料介绍，白亮层的显微硬度可达HM1150~1600。这是由于白亮层内存在高硬度的碳化物结构（如 W_2C 、 Cr_7C_3 、 CrC 等）的关系。而过热影响区的显微硬度比基体组织略有下降，这是马氏体组织受热影响而进一步回火所致。基体组织的显微硬度保持不变。

表3-3 强化层的显微硬度

| 序号 | 试件材料 | 试件状态 | 电极材料 | 显微硬度(HM/100g) | | |
|----|---------|------|------------------|---------------|-------|-------|
| | | | | 白亮层 | 过热影响区 | 基体 |
| 1 | GCr15 | 淬回火 | YG8 | 1300 | 643 | 766 |
| 2 | Cr12MoV | 淬回火 | YG8 | 970 | 385.9 | 412.1 |
| 3 | Cr12 | 淬回火 | YG8 | 970 | 473.1 | 643.9 |
| 4 | GCr15 | 淬回火 | 726 ^① | 1027 | 532.3 | 773 |

① 726系自贡硬质合金厂生产的硬质合金牌号。

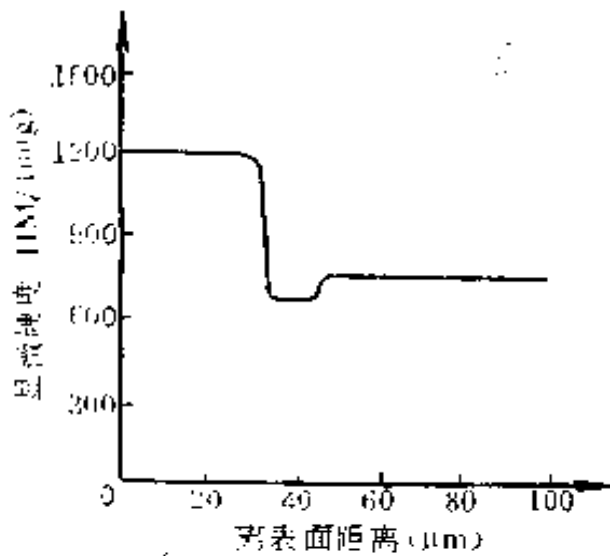


图3-9 强化层的显微硬度

从表 3-3 还可以看到，用同一种电极材料对不同基体金属材料进行强化，和用不同的电极材料对同一种基体金属材料进行强化，所测得的显微硬度值都有明显的差别，这说明用不同的电极强化，所得到的强化层性能是不一样的。

强化层的红硬性对切削刀具和工模具是一个重要的技术指标。由于在高温下测量硬度受到实验条件的限制，根据强化层经高温处理后硬度一旦降低，在缓冷到室温时，其硬度不会再回升的原理，将经过电火花强化后的试件（GCr15钢，淬火回火状态，用YG8电极强化），在真空炉中用不同的温度加热，保温2h30min后缓冷到室温，再用71型显微硬度计（载荷100g）测量强化层的硬度，其值列于表 3-4，显微硬度的压痕如图3-10所示。用这种方法来近似地表征强化层在高温下工作时的硬度值，即它的红硬性。图 3-10中，图 a 为经强化后未加热的显微压痕；图 b 为强化后加热到550℃保温后的显微压痕；图c为强化后加热到760℃保温后的显微压痕；图d为强化后加热到880℃保温后的显微压痕。

试验结果表明，电火花强化层具有优良的红硬性，即在较高温度下（约800℃）仍保持有较高的硬度，加热温度与硬度的关系如图3-11所示。这种优良的性能为提高切削刀具、工模具和工件的耐磨性和在较高温度下工作的能力提供

了有利的条件。

表3-4 加热保温2h30min后强化层的显微硬度

| 加热温度(℃) | 未加热 | 200 | 450 | 550 | 650 | 760 | 880 |
|--------------|------|------|------|------|------|------|-----|
| 显微硬度(HM100g) | 1114 | 1114 | 1132 | 1132 | 1132 | 1114 | 881 |

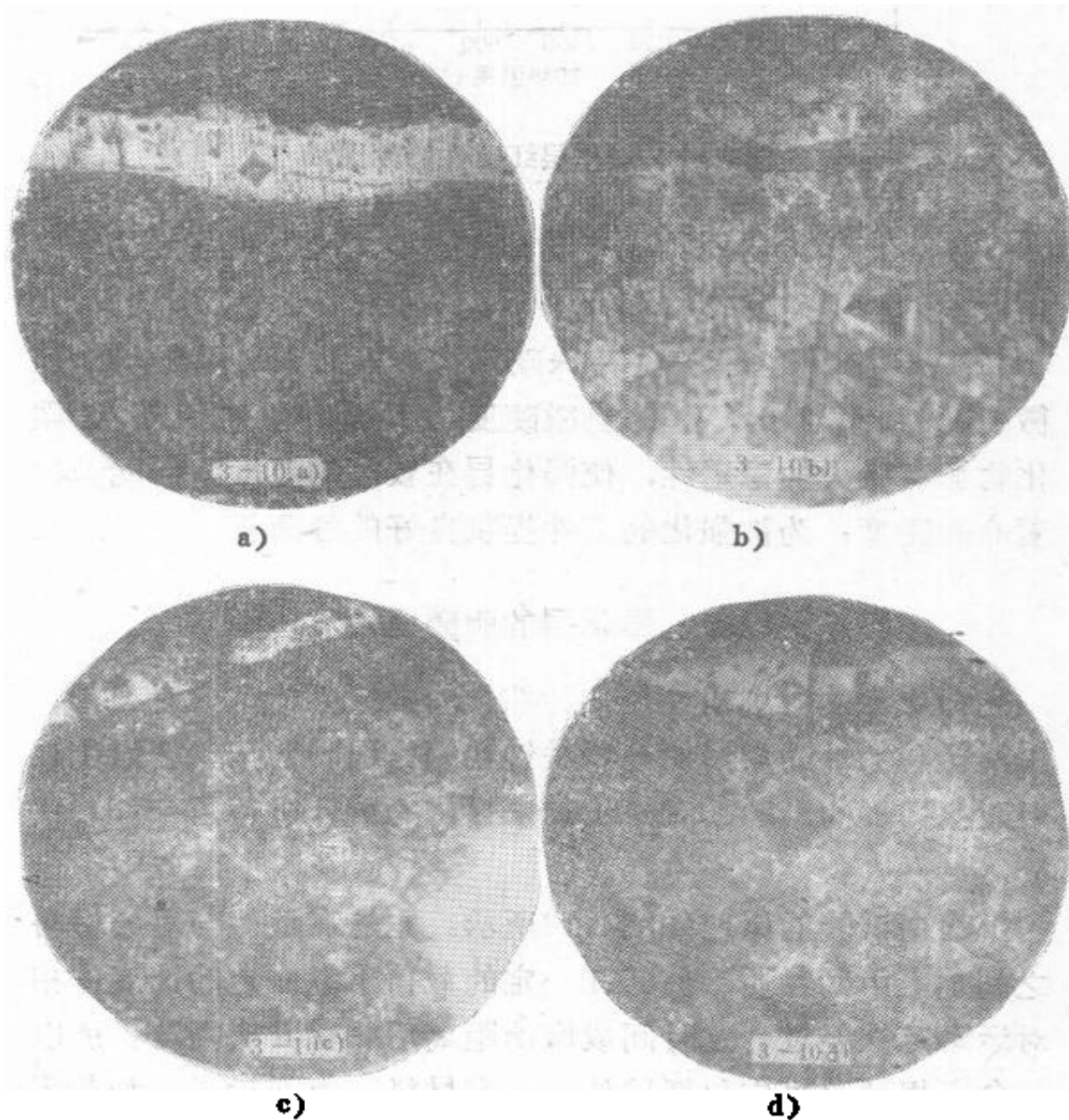


图3-10 强化层的显微硬度压痕

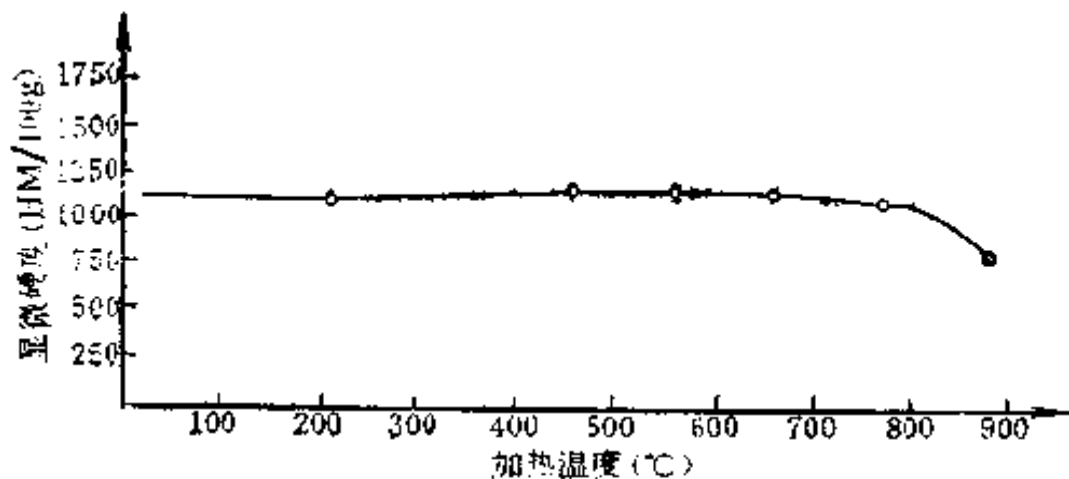


图3-11 强化层红硬性特性曲线

电火花强化层的显微硬度和红硬性与电火花强化过程中所形成的特殊碳化物密切相关，从X射线衍射分析知道，强化层主要是由 W_2C 等一些特殊碳化物堆积而成，而 W_2C 的显微硬度为HM3000，WC的显微硬度为HM2400，而且这些碳化物都有较大的稳定性，使强化层在较高的温度下仍能保持着高的硬度，为被强化的工件提供良好的红硬性。

七、强化层的耐磨损性

强化层的耐磨损性是一种综合的机械性能，它对刀具、工模具和工件的耐用度起着关键性的作用。为了了解强化层对耐磨损性的影响，对强化和未强化的试件进行了对比试验。

磨损试验的原理如图3-12所示。它是在试件与对磨材料之间加上中间物质，使其在一定的载荷下以一定的速度作相对运动，在经过一定时间或摩擦距离后测量其磨损量。所以一台磨损试验机应包括试件、对磨材料、中间材料、加载系统、运动系统和测量设备。

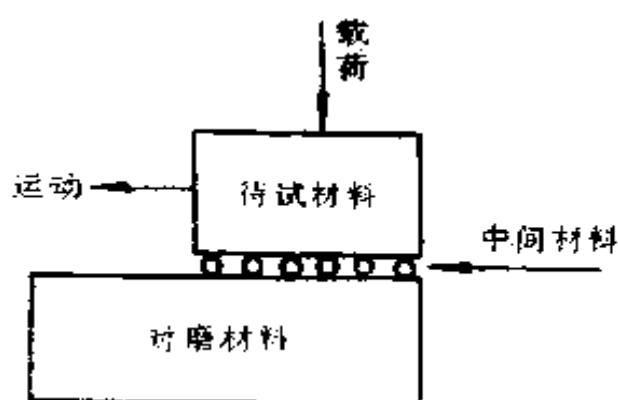


图3-12 磨损试验原理示意图

加载方式大多用压缩弹簧或杠杆系统。运动方式有滑动、滚动、滑动加滚动。试件形状、表面形态和工作环境则根据试验要求确定。中间材料既可以是固体（如磨料），也可以是液体（如润滑油）

或气体（如空气等）。对磨材料既可以与试件材料相同，也可以不同。这些条件的选择应尽量使试验条件与实际工作条件相近，以保证得到可靠的试验结果。

重复摩擦磨损试验机的种类和原理如图3-13所示。图3-13a为杆盘式磨损试验机，是将试件加上载荷紧压在旋转的圆盘上，试件既可在半径方向往复运动，也可以是静止的。在抛光机上加一个夹持装置和加载系统即可制成此种试验机。图3-13b为杆筒式磨损试验机，采用杆状试件紧压在旋转的圆筒上进行试验。图3-13c为往复运动式磨损试验机，试件在静止的平面上作往复运动。图3-13d为国产MM-200型磨损试验机原理示意图，该机主要用来测定金属材料滑动摩擦、滚动摩擦、滑动和滚动复合摩擦及间隙摩擦情况下的磨损量，以比较各种材料的耐磨性能。图3-13e为砂纸磨损试验机，与图3-13a相似，只是对磨材料改为砂纸。图3-13f为快速磨损试验机，旋转圆轮为硬质合金，能迅速获得试验结果。

磨损对比试验的条件是：在MS3B型往复式磨损试验机上（57次往返/min），用12kg的载荷，用杠杆系统加载。对

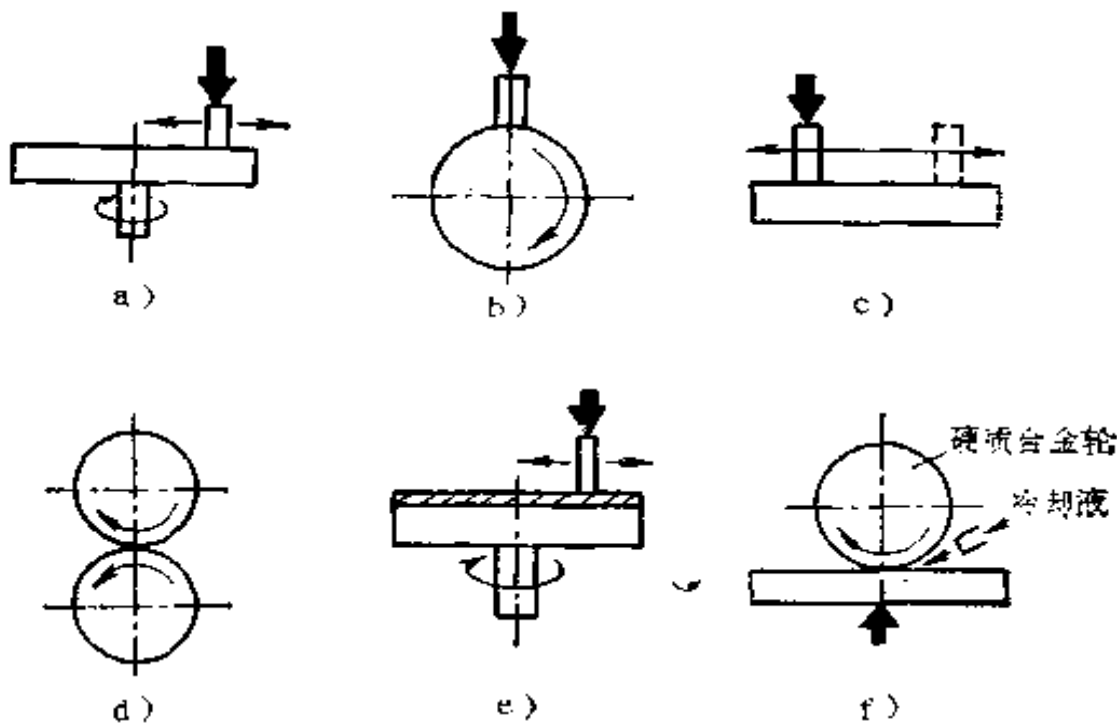
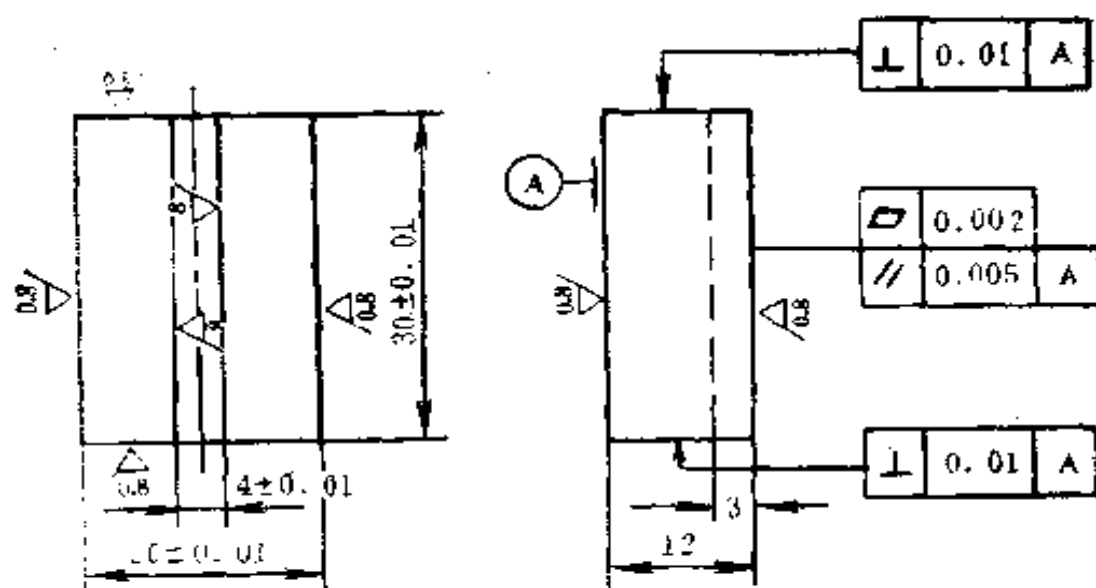


图3-13 重复摩擦磨损试验机原理图

比磨损试验中每隔2h加一次冷却液，冷却液为在995ml的10号机油中加进5gM2.5的氧化铝微粉所组成的混合液。试件为淬火低温回火状态的GCr15钢，试件的形状和尺寸如图3-14所示。电极材料为YG8。强化机功率100W，电容量65~1 μ F。

从磨损对比试验的磨损曲线（图3-15）和磨损试验的失重量数据（表3-5）表明，电火花强化层比机械加工表面具有高得多的耐磨损性能，电火花强化的磨损曲线的斜率比磨削加工的磨损曲线的斜率要小得多。例如，从0~10万次往返磨损，未经强化的1号试件失重100mg，而经强化的2号试件只失重22mg；又如未经强化的1号试件经26万次往返磨损失重240mg，而经强化的2号试件经42万次往返磨损仅90mg。可见，经电火花强化后工件的耐磨损性可提高3~4倍。另



技术要求: HRC58-62

图3-14 磨损试件的形状和尺寸

外, 根据文献〔3〕介绍, 用铬锰、钨铬钴合金、硬质合金YT15等电极强化45钢, 磨损试验表明, 较原来的材料平均耐磨损性提高2~2.5倍。表3-6为采用不同材料强化45钢后强化

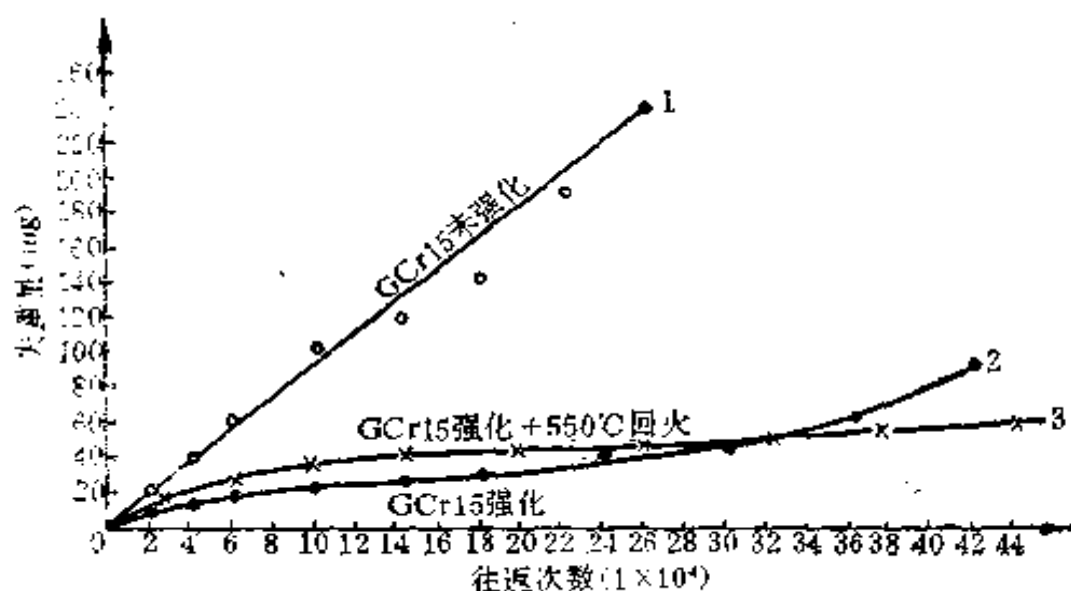


图3-15 磨损对比试验曲线

层的耐磨损性试验的数据,可见耐磨损性都有较大的提高。电火花强化层耐磨损性的提高,是由强化表面的形貌、强化层的组织结构和性能综合影响的结果。

表3-5 磨损对比试验时试件的失重量

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|---------------|-------------------------------|-----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|
| 1 | 未强化 | 磨损往返次数 (1×10^4) | 2 | 4 | 6 | 10 | 14 | 18 | 22 | 26 | — | — | — |
| | | 累计失重量 (mg) | 20 | 40 | 60 | 100 | 116 | 140 | 190 | 240 | — | — | — |
| 2 | 强化后 | 磨损往返次数 (1×10^4) | 2 | 4 | 6 | 10 | 14 | 18 | 24 | 30 | 36 | 42 | — |
| | | 累计失重量 (mg) | 10 | 15 | 18 | 22 | 27 | 30 | 43 | 48 | 63 | 90 | — |
| 8 | 强化后 550℃回火 | 磨损往返次数 (1×10^4) | 2.5 | 6 | 10 | 14 | 20 | 28 | 32 | 38 | 44 | 50 | 56 |
| | | 累计失重量 (mg) | 15 | 25 | 35 | 40 | 42 | 45 | 48 | 58 | 62 | 66 | 70 |

表3-6 用不同电极强化45钢后强化层的耐磨损性

| 电极材料 | 强化层厚度 (μm) | 硬度 (kg/mm^2) | 耐磨损性 提高倍数 |
|-------------------------|----------------------------|-----------------------------------|--------------|
| TiC | 80~126 | 3040 | 9.9 |
| ZrC | 70~120 | 2650 | 7.3 |
| NbC | 80~150 | 1860 | 5.0 |
| Cr_3C_2 | 120~160 | 1600 | 4.0 |
| Mo_2C | 100~180 | 1400 | 1.4 |
| WC | 110~180 | 1700 | 2.0 |

上面已谈到,电火花强化表面形貌是由无数密集的强化点和放电凹坑所构成的无方向性、银灰色的桔皮状表面,这种表面形貌有利于贮存润滑油并减少摩擦。同时,从BCJ-2型

表面粗糙度检查仪所记录的表面轮廓曲线图(图3-16)表明,与磨削加工表面的轮廓相比较,强化表面轮廓的微凸体角度值小,实度值大,过渡圆角半径大,具有较平滑的表面轮廓和较大的支承面,所以其耐磨损性比磨削表面有较大的提高。

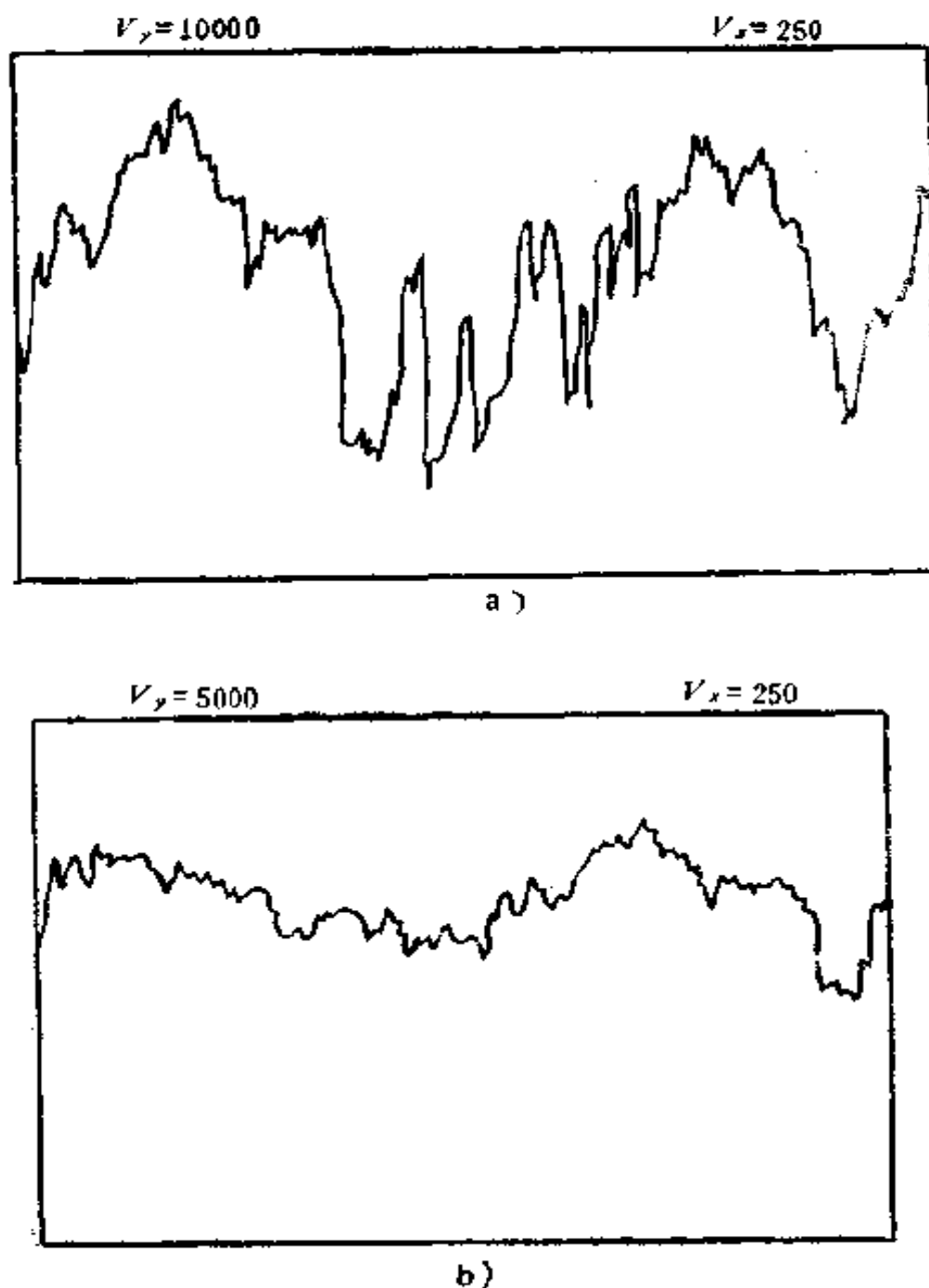


图3-16 表面轮廓曲线图

a)磨削表面 $Ra = 0.38\mu\text{m}$ ($\nabla 8$) b)强化表面 $Ra = 1.82\mu\text{m}$ ($\nabla 6$)

同时，由于强化层的特殊相结构，它具有很高的硬度，而材料的高硬度为其耐磨损性的提高提供有利的条件。根据金属材料的磨损原理知道，磨损体积 V (mm^3) 为：

$$V = B \frac{WS}{\text{HRC}}$$

式中 W ——总的外加载荷 (kg)，
 S ——摩擦面的相对运动距离 (mm)，
 HRC ——金属材料表面的硬度，
 B ——常数。

由上式可知，以体积计量的磨损量正比于法向载荷和摩擦面相对运动距离，而反比于金属材料表面的硬度，可见金属材料表面的硬度越高，耐磨损性越好。

比较图3-15上的2、3两条曲线可以看到，强化后经 550°C 回火处理的3号试件比强化后不经回火处理的2号试件的磨损量要小得多，表现在磨损曲线上3号试件的磨损曲线比2号要平坦得多。例如，2号试件经42万次磨损往返后失重90mg，而3号试件经44万次磨损往返后仅失重62mg，经56万次磨损往返后也只失重70mg。可见，强化后经回火处理的试件耐磨损性有较大的提高。但3号试件的起始阶段的磨损速率比2号试件大，表现在曲线3起始部分的斜率比曲线2大。这是因为在真空回火时真空炉有漏气现象，回火后试件表面有一层很薄的氧化膜，使其初始耐磨损性下降，但比未强化的磨削表面还是要耐磨得多。如果回火处理后先把氧化膜去除，那么其初始耐磨损性将会有较大的提高。从总的来看，强化后再经过适当的回火处理，使强化层的组织稳定和均化，并且降低了强化层的残余内应力，能够显著地提高

耐磨损性。针对当前普遍地都是电火花强化后不经过回火处理就直接使用的情况，建议工件强化后进行适当的回火处理再使用，这对提高强化层的耐磨损性能是可取的。

八、强化层的耐腐蚀性

为了更全面地认识强化层的特性，以满足某些被强化工件在有腐蚀性的气体或液体介质中工作的可靠性，用不同浓度（100%、30%、10%）的硫酸（ H_2SO_4 ）、盐酸（ HCl ）、硝酸（ HNO_3 ）及氢氧化钠（ $NaOH$ ）（30%）对未经强化和经过强化的T10、Cr12钢试件的变质层进行耐腐蚀试验。试验条件是：电极为YG8，以 $45\mu F$ 、 $25\mu F$ 、 $5\mu F$ 、 $1\mu F$ 的电容量逐次进行强化，在室温条件下进行腐蚀。试验结果见图3-17和表3-7。

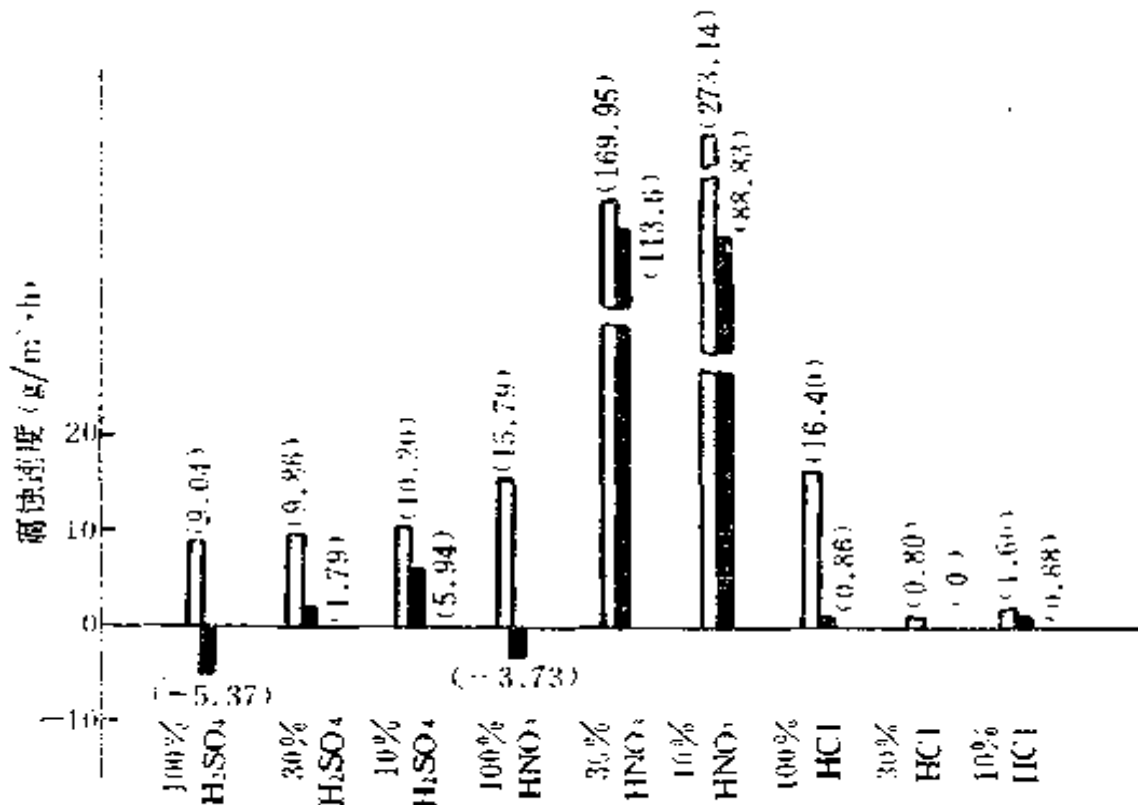


图3-17 T10钢强化层的腐蚀速度

□—退火状态 ■—经电火花强化

由图3-17和表3-7可以看到,与同种未强化的试件相比,强化后的耐腐蚀性都有较大的提高。同时可以看到,不同类型和不同浓度的酸、碱水溶液,对强化层和原始金属材料的腐蚀速度($\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{h}$)也不同,其中电火花强化层对硫酸、盐酸和氢氧化钠的水溶液有较高的耐腐蚀性,而对硝酸的耐腐蚀性相对来说较低,但都比未强化的原始金属材料高。另外,表3-7中试件1、2强化后在纯硫酸和纯硝酸中腐蚀时,由于在试件表面上形成一层钝化膜,反而使试件的重量增加。而试件15、16电火花强化后的腐蚀速度比没有强化的快,这是由于腐蚀时间过长,强化层局部地方被腐蚀穿透,强化层与基体金属材料结构不同而形成微电池腐蚀,使基体金属材料的腐蚀速度加快的缘故。

据文献[5]介绍,选用合适的电极材料,强化后的工件的耐化学腐蚀和耐水蚀的性能,都将有较大幅度的改善。表3-8为强化层的耐腐蚀性的试验结果,试件为 $25.2\times 14.7\times 3\text{mm}$ 的45钢,用不同的电极材料、采用同一电规准各强化三件同样的试件,生产率为 $0.5\text{mm}^2/\text{S}$,然后用 $10\text{g}/\text{lNaCl}$ 、 $6\text{g}/\text{lK}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 、 $2.5\text{g}/\text{l}$ 琼脂的水溶液作腐蚀剂,在 $18\sim 19^\circ\text{C}$ 的条件下腐蚀15d,从表中可见,经白口铁电极强化的耐腐蚀性提高8%,Si电极提高32%,石墨电极提高98%,Al电极提高100%,FeCr电极提高294%。用YG3作电极强化45钢,其耐腐蚀性并没有提高。但是用YG3(WC)、CrMn作电极强化不锈钢时,耐腐蚀性却可提高3~5倍。

另外,用FeCr(Cr80%,Fe20%)、YG3和白口铁三种电极材料强化 $\Theta\text{H}405$ 钢(含C、Si、Cr、Ni、Mo的合金)制造的汽轮机叶轮,在 700°C 高温下运行700h和1000h后分别测量叶轮表面的氧化膜厚度,测量结果列于表3-9中。强化生

表3-7 电火花强化层的耐腐蚀试验结果

| 试件 编号 | 试件 材料 | 试件状态 | 腐 蚀 剂 | 腐 蚀 速 度 (g/m ² ·h) | 备 注 |
|----------|----------|------|---------|----------------------------------|-------|
| 1 | T10 | 退火 | 纯 硫 酸 | 9.04 | 增重 |
| | | 强化 | | -5.437 | |
| 2 | T10 | 退火 | 纯 硝 酸 | 15.79 | 增重 |
| | | 强化 | | -3.73 | |
| 3 | T10 | 退火 | 纯 盐 酸 | 16.398 | |
| | | 强化 | | 0.285 | |
| 4 | T10 | 退火 | 30%硫酸 | 9.857 | |
| | | 强化 | | 1.785 | |
| 5 | T10 | 退火 | 30%硝酸 | 169.95 | |
| | | 强化 | | 113.6 | |
| 6 | T10 | 退火 | 30%盐酸 | 0.803 | |
| | | 强化 | | 0 | |
| 7 | T10 | 退火 | 10%硫酸 | 10.195 | |
| | | 强化 | | 5.936 | |
| 8 | T10 | 退火 | 10%硝酸 | 273.14 | |
| | | 强化 | | 38.83 | |
| 9 | T10 | 退火 | 10%盐酸 | 1.603 | |
| | | 强化 | | 0.881 | |
| 10 | T10 | 退火 | 30%氢氧化钠 | 0.241 | |
| | | 强化 | | 0.106 | |
| 11 | Cr12 | 淬火回火 | 30%硫酸 | 41.298 | |
| | | 强化 | | 25.884 | |
| 12 | Cr12 | 淬火回火 | 30%硝酸 | 230.40 | |
| | | 强化 | | 15.783 | |
| 13 | Cr12 | 淬火回火 | 30%盐酸 | 2.104 | |
| | | 强化 | | 0.789 | |
| 14 | Cr12 | 淬火回火 | 30%氢氧化钠 | 0.589 | |
| | | 强化 | | 0.294 | |
| 15 | T10 | 退火 | 10%硫酸 | 11.633 | 强化层破裂 |
| | | 强化 | | 33.273 | |
| 16 | T10 | 退火 | 10%硝酸 | 291.94 | 强化层破裂 |
| | | 强化 | | 444.36 | |

表3-8 用不同电极强化45钢后强化层的耐腐蚀性

| 电 极 材 料 | 平均失重量(g) | 15d后的失重量(g/dm ²) |
|---------|----------|------------------------------|
| 白口铁 | 0.0373 | 0.3947 |
| 未强化的45钢 | 0.0354 | 0.3612 |
| YG3硬质合金 | 0.0355 | 0.3631 |
| Si | 0.0304 | 0.2737 |
| 石墨 | 0.0256 | 0.1819 |
| Al | 0.0251 | 0.1807 |
| FeCr | 0.0204 | 0.0916 |

产率为 $0.2\text{cm}^2/\text{min}$ 。从表中可见，强化后叶轮沿直径方向的表面上氧化膜厚度的增长速度比未强化表面明显减低。其中，用FeCr电极强化的氧化膜厚度仅为未强化的 $1/15$ ；用白口铁电极强化时为 $1/7.5$ ，但运行1000h以后氧化膜出现脱落；而用YG3电极强化时为 $1/3$ 。可见强化层的耐水蚀性也有较大提高。汽轮机叶轮在高温和潮湿的条件下运行，对叶片既要求耐高温又要求耐水冲蚀，实际运行试验证明：未经电火花强化的叶片运行一年左右就发现进汽边有水蚀现象；运行六年半后，有的叶尖已被冲蚀；而经电火花强化的叶片，叶型大都仍然保持完整无损。又如蒸汽阀的喷嘴强化后，其耐水蚀性可提高3~5倍。

总之，经过电火花强化后的工件比未经强化的同类金属材料的耐腐蚀性提高，强化后的工件在有腐蚀性的介质中工作的化学稳定性和可靠性较高。

表3-9 汽轮机叶轮直径方向上氧化膜的增厚

(mm)

| 汽轮机叶轮运行时间 (h) | 叶 轮 表 面 | | | |
|------------------|---------|---------|--------|--------|
| | 未 强 化 | 用FeCr强化 | 用白口铁强化 | 用YG3强化 |
| 700 | 0.11 | 0.01 | 0.02 | 0.05 |
| 1000 | 0.15 | 0.01 | 0.02 | 0.05 |

九、强化层的残余应力状态

电火花表面强化时，由于脉冲放电所形成的瞬时高温，使放电微区的金属熔化或气化，在熔化的金属熔滴中，电极材料和工件材料产生熔渗、扩散和重新合金化，随后又迅速地被基体金属所冷却凝固，形成强化层。由于冷却速度极快，温度梯度很大，金属熔滴的体积收缩受到基体金属的约束，使强化层产生较大的热应力和组织应力。在XYL-73型X射线残余应力测定仪上，对用YG8电极强化的GCr15钢（依次用45 μ F、25 μ F、5 μ F和1 μ F电容量强化）的强化层进行残余应力的测定，其结果如表3-10所示。

表3-10 电火花强化层的残余应力

| 试 件 号 编 号 | 试 件 状 态 | 残 余 内 应 力 (10^7 Pa) |
|--------------|---------------------------------|---------------------------|
| 1 | 淬回火 + 强化 | 衍射峰很漫散 |
| 2 | 淬回火 + 强化 + 200 $^{\circ}$ C回火2h | +21.8 |
| 3 | 淬回火 + 强化 + 550 $^{\circ}$ C回火2h | +6.1 |

由表3-10可知，1号试件由于强化层的衍射峰很漫散，难以进行计算分析，无法确定它的残余应力的大小和方向。

但电火花强化后再进行200℃和550℃保温2h回火处理的2号和3号试件，测得强化层的残余应力分别为 $+21.8 \times 10^7 \text{Pa}$ 和 $+6.1 \times 10^7 \text{Pa}$ ，可以知道都是残余拉应力，而且经回火处理，使强化层内的组织应力和热应力得以松弛或减弱，可以明显地减小强化层的残余拉应力。由此可以推测未经回火处理的强化层具有更大的残余拉应力。

根据疲劳试验可知，表面残余应力状态与疲劳极限之间的关系如下：

$$\sigma = -q (\sigma_m + \sigma_r) + \sigma_0$$

式中 σ_0 ——在无残余应力，且 $\sigma_m = 0$ 时的疲劳极限；
 σ_m ——平均应力；
 σ_r ——残余应力（ $+\sigma_r$ 为拉应力， $-\sigma_r$ 为压应力）；
 q ——系数。

由上式可知，当表面残余应力为拉应力时，疲劳极限下降；为压应力时，疲劳极限提高。而且残余拉应力还增加疲劳裂纹的扩展率，而残余压应力则降低疲劳裂纹扩展率。因此，强化层存在残余拉应力对工件的疲劳强度和耐磨损性是不利的，应采取必要的措施降低或消除残余拉应力，以提高强化层的机械性能。实践证明，在电火花强化后再进行适当的回火处理，是降低强化层的残余拉应力的有效措施之一。

第四章 影响强化层厚度的诸因素

电火花强化层的质量是决定电火花强化工艺效果的重要条件。虽然强化效果还与应用对象和强化部位的选择、工件强化前后的处理等等有关，但是表征强化层质量的强化层硬度、厚度、粗糙度以及它的致密性、均匀性、连续性都会直接影响强化层的使用效果。通过第二章和第三章的分析，我们已经了解到：强化层的硬度主要与电极材料和工件材料有关；强化层的粗糙度则取决于单个放电脉冲的能量；强化层的厚度与电气参数、电极和工件材料以及强化生产率有关；而强化层的致密性和均匀性与强化的操作时间有着密切的联系。本章着重从应用的角度分析影响强化层厚度的各种因素及其规律性。

一、试验条件和计量方法

试验设备是一台电源直流电压、充放电电容量、短路电流等电气参数可调的强化装置，振动器的振动频率固定为 100s^{-1} 。

强化层的厚度用千分尺测量，即计量强化后的试样增厚量，测量多处，取其平均值。同时，每次用分析天平称量试样的增重和抽检试样的强化层金相，以作比较。一般来说，试样的增重和增厚并非线性关系，因为强化层的致密性、连续性和均匀性对这两种计量结果均有影响，由于实用上所关心的是强化层的增厚量，而不是增重，所以分析以强化层的

厚度为准。

此外，前面已经提到，强化层是由白亮层、过渡层和淬、回火层等不同金相组织的区域构成，通常以白亮层作为强化层的厚度，这是从金相分析来确定强化层厚度。而在这里所讨论的强化层厚度是用千分尺计量的试件的增厚量，是直接影响工件尺寸精度的量。所以两者虽然相近，但是在意义上是有区别的。

二、强化层厚度与电压的关系

这里所指的电压是充电电源的直流电压。当电容器充电时间足够长的时候，电容器上的电压峰值与电源直流电压接近，因此就以后者表示电容器放电的起始电压。当放电回路的阻抗一定时，放电起始电压越高，放电峰值电流就越大，释放的能量也越大，所以强化层的厚度有随着电压的提高而增厚的趋势。

1. 不同电容量时厚度与电压的关系

表4-1和图4-1是在不同的电容量时，强化层厚度随电压变化的规律。试验的条件是：工件材料Cr12，电极材

表4-1 不同电容量时厚度与电压的关系 (μm)

| 电 压 (V) | 电 容 量 (μF) | | | | | | |
|------------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 |
| 40 | 10 | 27 | 37 | 40 | 46 | 47 | 50 |
| 60 | 15 | 42 | 60 | 70 | 83 | 115 | 134 |
| 70 | 25 | 45 | 72 | 90 | 115 | 170 | 205 |

料 YG8，比强化时间 3 min/cm^2 。所谓“比强化时间”是表示强化单位面积所需的时间。其倒数称为强化生产率，即单位时间内的强化面积。

由图 4-1 可见，在同一电容量时，强化层的厚度随放电电压提高而增加。

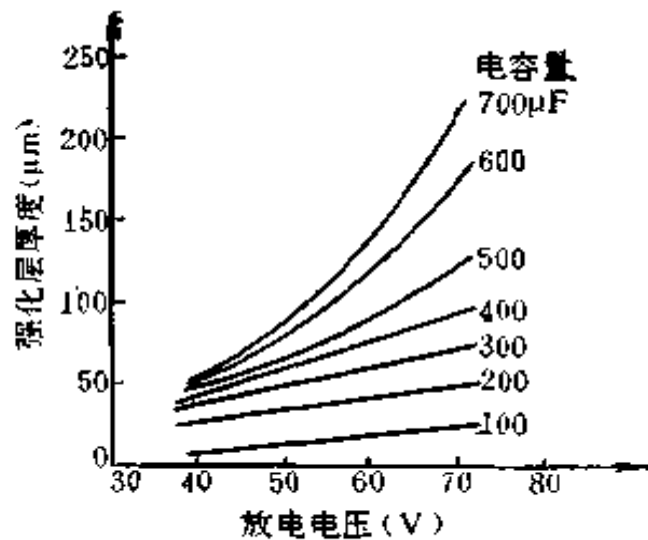


图4-1 不同电容量时强化层厚度与电压的关系

2. 不同材料时厚度与电压的关系

表 4-2 和图 4-2 是对不同的试件材料强化时强化层厚度与电压的关系。试验的条件是：电容量 $300 \mu\text{F}$ ，电极材料

表4-2 不同材料时厚度与电压的关系 (μm)

| 电 压 (V) | 电 极 材 料 | | |
|------------|---------|-----|-----|
| | Cr12 | T10 | 45钢 |
| 60 | 60 | 57 | 45 |
| 70 | 72 | 60 | 54 |

YG8, 比强化时间 $3\text{min}/\text{cm}^2$ 。

由图 4-2 可见, 在同一电压下, 强化层厚度各不相同, 但厚度均随电压增加而增厚。

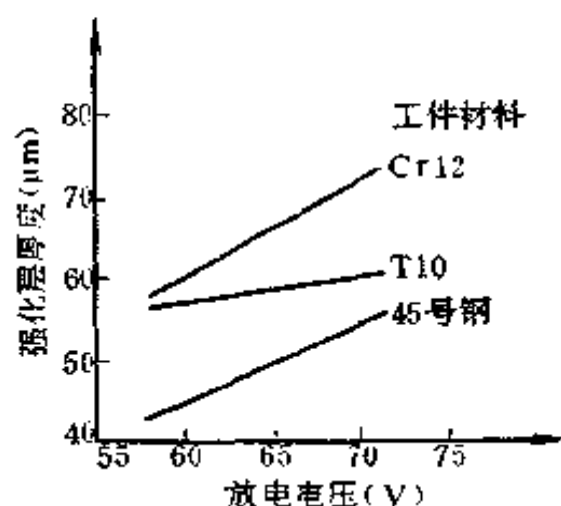


图4-2 不同材料时强化层厚度与电压的关系

3. 不同比强化时间时厚度与电压的关系

表 4-3 和图 4-3 是在单位面积上强化不同的时间时强化层厚度与电压的关系。试验条件为: 电容量 $200\mu\text{F}$, 电极材料 YG8, 工件材料 Cr12。可见在同一比强化时间时, 放电电压越高, 强化层也越厚。

表4-3 不同比强化时间时厚度与电压的关系 (μm)

| 电 压 (V) | 比强化时间 (min/cm^2) | | | | | |
|------------|------------------------------------|----|----|----|----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 40 | 26 | 35 | 37 | 43 | 62 | 72 |
| 60 | 31 | 40 | 42 | 59 | 72 | 92 |
| 70 | 40 | 43 | 45 | 65 | 85 | 100 |

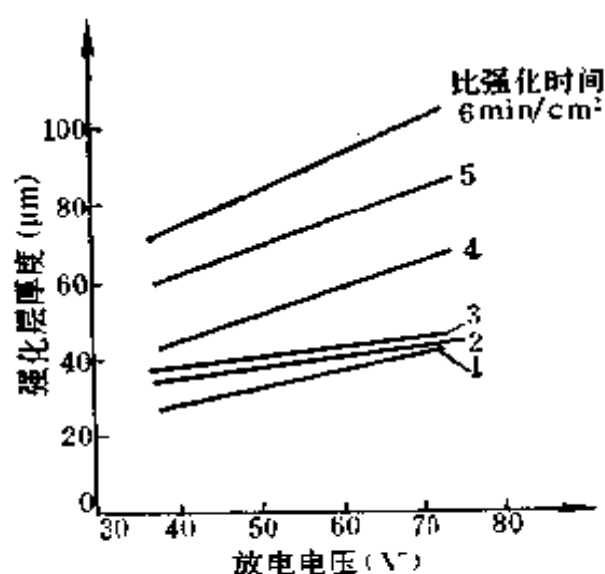


图4-8 不同比强化时间时强化层厚度与电压的关系

三、强化层厚度与电容量的关系

电容量增加，在相同的放电条件下，放电电流的脉宽增大，平均放电电流相应增加，因此强化层厚度也有随之而增厚的趋势。

1. 不同电压下厚度与电容量的关系

表4-4 在不同电压下厚度与电容量的关系 (μm)

| 电容量 (μF) | 电 压 (V) | | |
|-------------|---------|-----|-----|
| | 40 | 60 | 70 |
| 100 | 22 | 22 | 25 |
| 200 | 25 | 40 | 43 |
| 300 | 27 | 55 | 60 |
| 400 | 40 | 70 | 80 |
| 500 | 40 | 78 | 95 |
| 600 | 47 | 100 | 140 |
| 700 | 50 | 120 | 175 |

表 4-4 和图 4-4 是在不同的放电电压时强化层厚度与电容量的关系。试验的条件是：工件材料 Cr12，电极材料 YG8，比强化时间 $2\text{min}/\text{cm}^2$ 。可见强化层厚度随电容量增加而增厚。

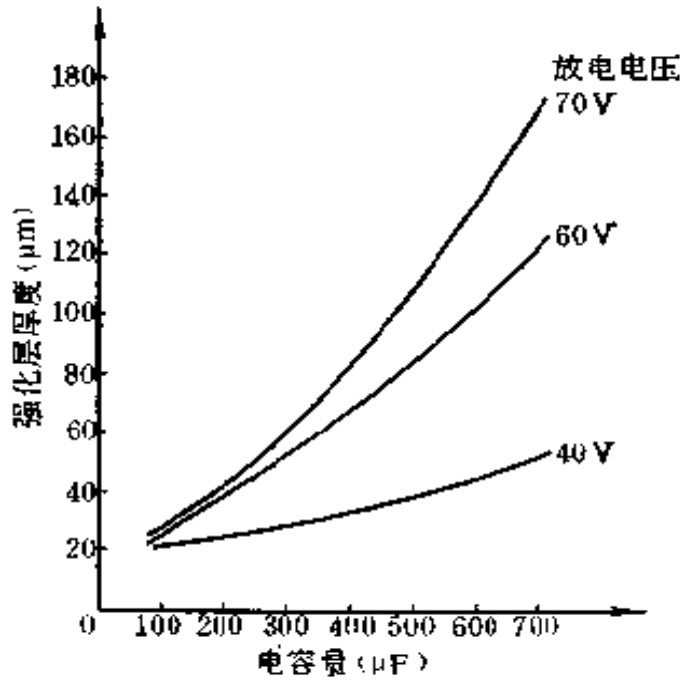


图 4-4 不同电压下强化层厚度与电容量的关系

2. 不同材料时厚度与电容量的关系

表 4-5 不同材料时厚度与电容量的关系 (μm)

| 电容量 (μF) | 工 件 材 料 | | | |
|-------------|---------|-----|---------|------|
| | T10 | 45钢 | Cr12MoV | Cr12 |
| 100 | 19 | 35 | 25 | 25 |
| 200 | 35 | 48 | 48 | 43 |
| 300 | 50 | 55 | 64 | 60 |
| 400 | 65 | 62 | 70 | 80 |
| 500 | 80 | 79 | 75 | 95 |
| 600 | 135 | 90 | 85 | 140 |

表 4-5 和图 4-5 是对不同材料强化时强化层厚度与电容量的关系, 试验条件为: 放电电压 70V, 电极材料 YG8, 比强化时间 $2\text{min}/\text{cm}^2$ 。随电容量增加, 强化层厚度也增厚, 但其规律各不相同。

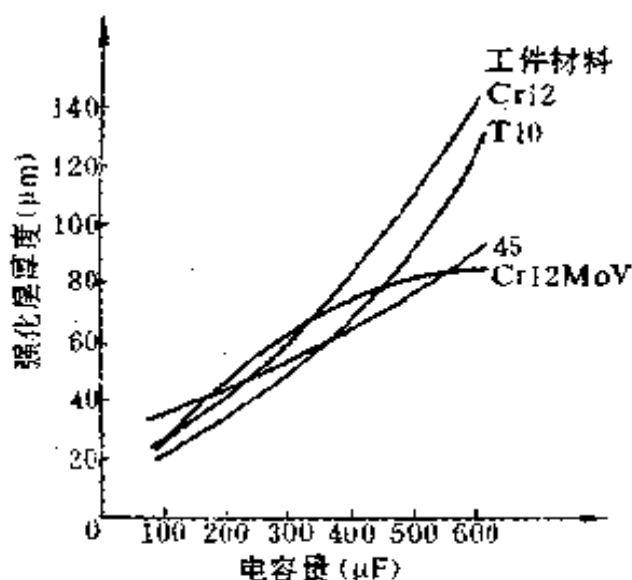


图 4-5 不同材料时强化层厚度与电容量的关系

3. 不同比强化时间时强化层厚度与电容量的关系

表 4-6 不同比强化时间时厚度与电容量的关系 (μm)

| 电容量 (μF) | 比强化时间 (min/cm^2) | | | |
|-------------|------------------------------------|----|----|-----|
| | 1 | 2 | 8 | 4 |
| 50 | 14 | 16 | 15 | 23 |
| 100 | 20 | 25 | 30 | 35 |
| 200 | 37 | 38 | 41 | 55 |
| 300 | 60 | 64 | 70 | 73 |
| 400 | 68 | 70 | 80 | 80 |
| 500 | 75 | 83 | 93 | 100 |

试验的条件为：工件材料Cr12MoV，电极材料YG8，放电电压70V。其结果如表4-6和图4-6所示。在同一比强化时间内，厚度随电容量增加而增厚。

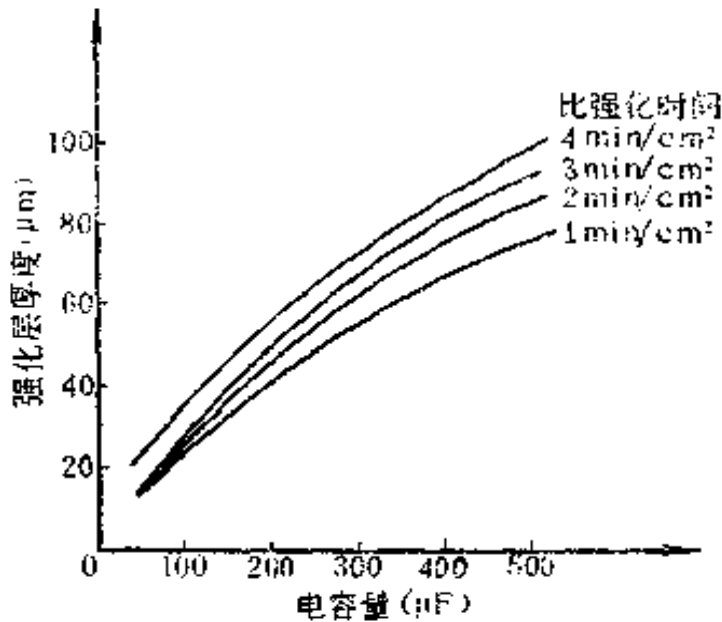


图 4-6 不同比强化时间时强化层厚度与电容量的关系

四、强化层厚度与放电能量的关系

单个放电脉冲能量可以用下式表示：

$$W_{\text{单}} = \frac{1}{2} C U_f^2$$

式中 C ——放电电容量；

U_f ——放电开始电压。

在这里假定放电结束时电容器上的剩余电压为零。表4-7和图4-7是不同比强化时间时厚度与单个脉冲能量的关系，随着脉冲能量的增加，强化层厚度也增厚。

表 4-7 不同比强化时间时的厚度与单个放电脉冲能量的关系

| 比强化时间 (min/cm ²) | 单个放电脉冲能量 (J) | | | | | | |
|---------------------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0.245 | 0.490 | 0.715 | 0.980 | 1.225 | 1.470 | 1.715 |
| 2 | 25 | 43 | 60 | 80 | 95 | 140 | 125 |
| 3 | 25 | 45 | 72 | 90 | 115 | 170 | 205 |

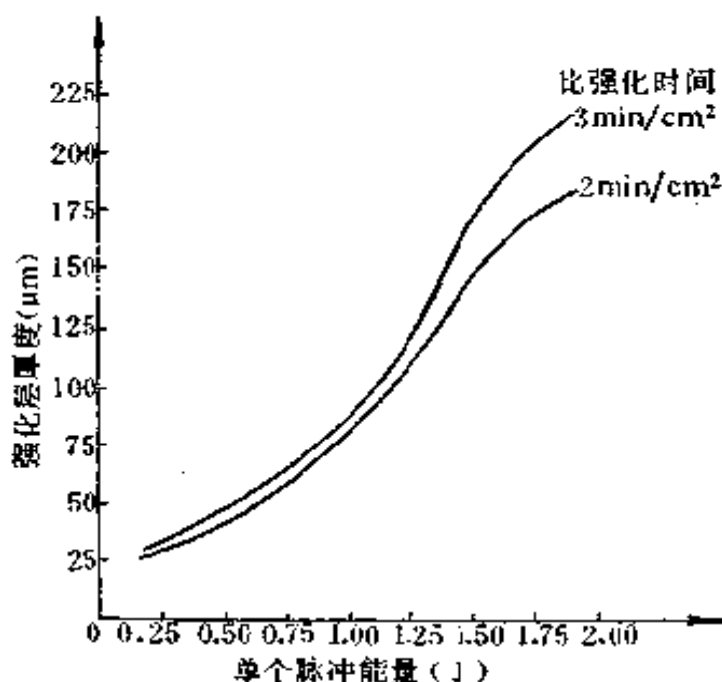


图 4-7 强化层厚度与单个放电脉冲能量的关系

五、强化层厚度与比强化时间的关系

在强化过程中工件的增重随单位面积强化时间的变化规律已如前述。在某一强化时间之前它是随强化时间增加而增加；而当强化时间过分延长，则出现负的增量。在出现负的增量之前的强化层厚度与比强化时间之间将具有以下规律：

1) 根据表 4-3 可以作成图 4-8，由图可知，在不同

的电压下强化层厚度与比强化时间的关系，随着强化时间的增加，强化层厚度也增加。

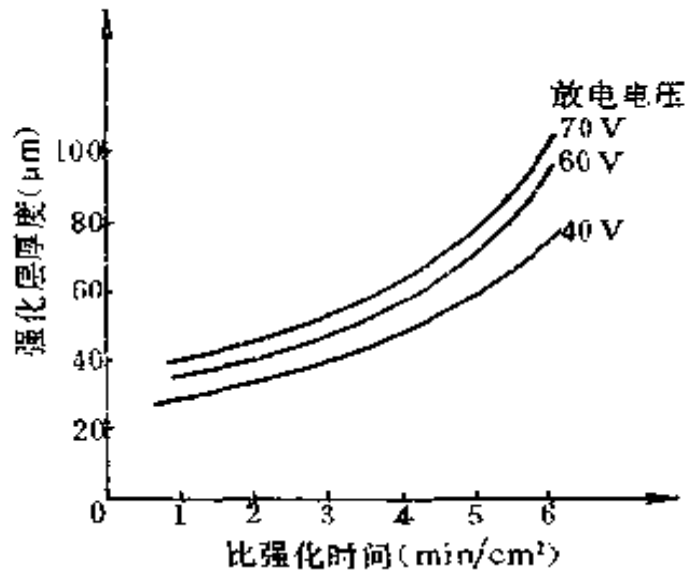


图 4-8 不同电压下强化层厚度与比强化时间的关系

2) 在不同电容量时厚度与比强化时间的关系可按表4-6作出图4-9。由图可知，强化层厚度也是随强化时间而增加的。

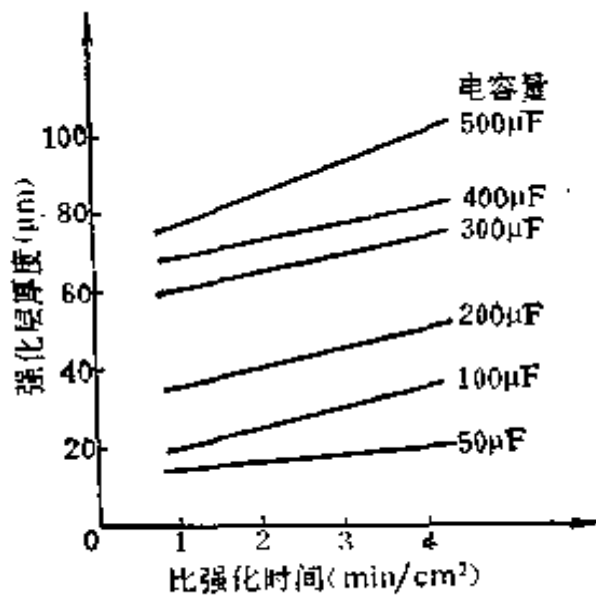


图 4-9 在不同电容量时强化层厚度与比强化时间的关系

3) 不同材料时, 强化层厚度与比强化时间的关系, 在放电电压为 70V, 电容量为 300 μ F, 电极材料为 YG8 的试验条件下, 其试验结果如表 4-8 和图 4-10 所示。由图可知, 在相同的强化条件下, 不同材料具有不同的强化层厚度和变化规律, 但随强化时间增加, 强化层厚度均有增厚的趋势。

表4-8 不同材料时强化层厚度与比强化时间的关系 (μ m)

| 比强化时间 (min/cm ²) | 试 件 材 料 | | | |
|---------------------------------|---------|-----|---------|------|
| | T10 | 45钢 | Cr12MoV | Cr12 |
| 1 | 40 | 30 | 57 | 53 |
| 2 | 50 | 33 | 64 | 60 |
| 3 | 60 | 45 | 75 | 72 |
| 4 | 70 | 60 | 80 | 80 |

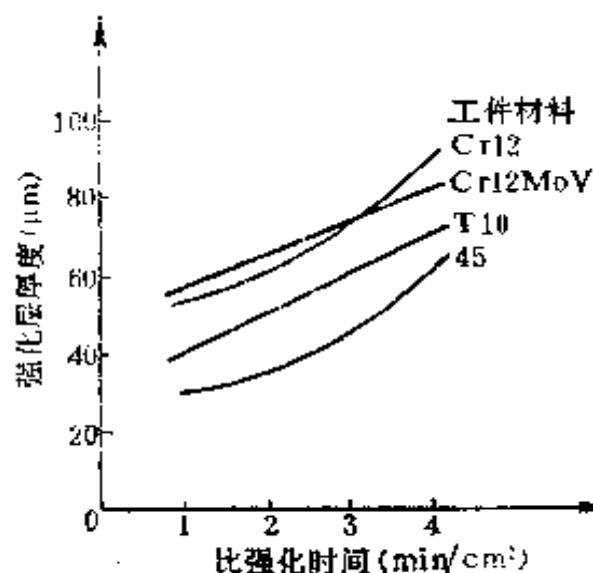


图4-10 不同材料时强化层厚度与比强化时间的关系

六、强化层厚度与短路电流的关系

在放电阶段和短接阶段，由于形成放电通道和电极挤压工件，在放电微区将流过短路电流，其值主要取决于直流电源电压和充电回路的阻抗。

短路电流提高了放电脉冲的能量，从而使强化层厚度增厚（表4-9和图4-11）。但是，过大的短路电流反而使脉冲状态受到不利影响，强化层减薄，表面粗糙度变粗，同时直流电源的功耗增加。所以短路电流要根据不同的电容量和电源功率来选择，一般小功率设备的短路电流限制在10A以内，而大功率的可以在100A以上，通常在设计强化机时就已分档选定。

表4-9 强化层厚度与短路电流的关系 (μm)

| 短 路 电 流 (A) | 电 容 量 (μF) | | | | | | | |
|-----------------|-----------------------------|----|----|----|-----|----|----|----|
| | 100 | | | | 200 | | | |
| | 比强化时间(min/cm ²) | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1.8 | 5 | 12 | 20 | 25 | — | — | — | — |
| 3.3 | — | — | — | — | 18 | 22 | 30 | 41 |
| 16 | 19 | 24 | 29 | 54 | 24 | 35 | 41 | 65 |
| 20 | 18 | 22 | 24 | 25 | 37 | 40 | 42 | 49 |
| 图 4-11内 曲线编号 | ① | ② | ③ | ④ | ⑤ | ⑥ | ⑦ | ⑧ |

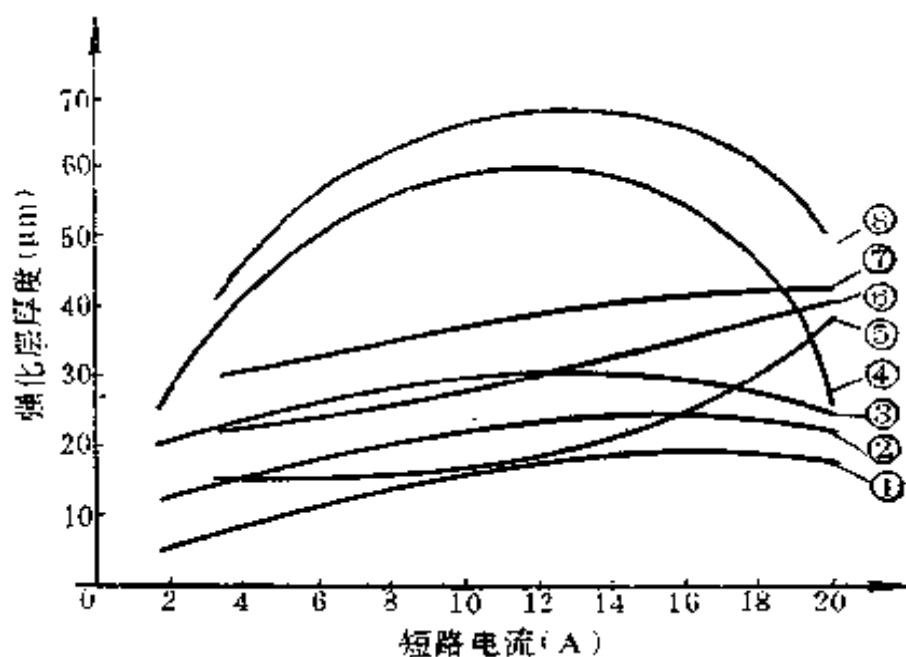


图4-11 强化层厚度与短路电流的关系

七、放电回路阻抗的影响

电火花强化是直接利用放电能量使材料熔融。构成放电回路的引线电阻、连接部分的接触电阻等将引起放电能量的损耗，因此使放电点的能量减少，强化层的厚度也将受到影响。所以放电回路引线的横截面积要求适当地大一些，而长度应尽可能地短，以减少引线电阻。同时，导线的连接要牢固，特别是吸附工件的磁铁要与工件接触良好。工件的吸附表面应除锈污，必要时应采用导线直接夹固。

放电回路的电感将影响放电电流的峰值和脉宽^[6]。图4-12是工件增重与放电回路电感的曲线。由图可见，不同的放电能量，存在不同的最佳放电电感值，能量越大，该值就越小。但放电回路的电感主要决定于导线的长短和形式，一般并不作为调节参数。

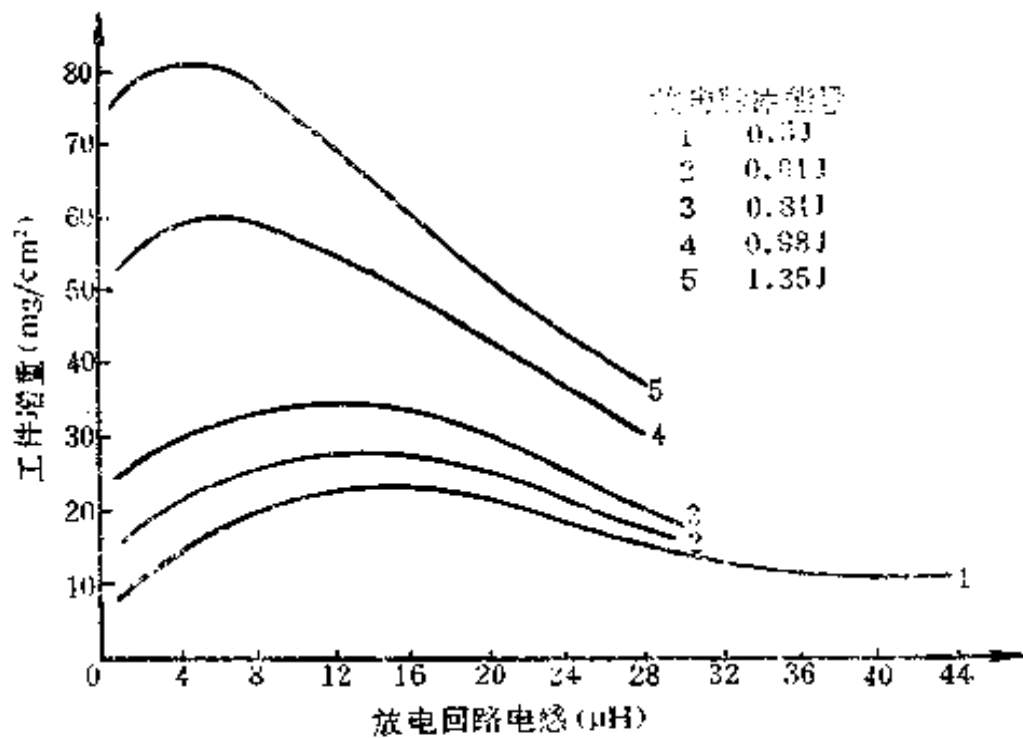


图4-12 工件增重与放电回路电感的关系

八、电极材料对的影响

广义的所谓电极材料对是指产生脉冲放电的电极材料和工件材料双方。接脉冲电源正极的是作为强化材料的电极，接负极的是作为被强化材料的工件。不同的电极材料对，即使在相同的强化条件下，所形成的强化层也具有不同的性状，它的显微硬度、粗糙度、厚度以及连续性往往有很大的差异。

从图4-2、4-5和4-10可以看到：强化层因工件材料不同而具有不同的厚度和变化规律。表4-10是用不同的电极材料与Cr12工件组成电极材料对时的强化层厚度，试验的条件是：D9110A强化机第IV档，即电容量 $65\mu\text{F}$ ；比强化时间 $3\text{min}/\text{cm}^2$ 。

表4-10 不同电极材料与Cr12组成电极材料对时的
强化层厚度 (μm)

| 电极材料 | 工件材料 | 强化层厚度 | 电极材料 | 工件材料 | 强化层厚度 |
|------|------|-------|----------------|------|-------|
| YG8 | Cr12 | 35~40 | YW | Cr12 | 30 |
| YG6 | | 32 | Z ₄ | | 35~40 |
| YG20 | | 40 | 黄铜 | | 60 |
| YT5 | | 30 | Al | | 20 |
| YT15 | | 38 | 422 | | 50 |

由表可见：YG、YT和YW类硬质合金强化Cr12钢的强化层厚度相近，其中以YG8的均匀性较好；黄铜和422焊条心棒的强化层较厚，但表面粗糙度较差；Z₄是钴的碳化物，强化表面易产生氧化物；而Al的强化层比较薄。

表4-11是不同材料对的强化层厚度和性状，试验条件同前。

表4-11 不同材料对的强化层厚度和性状

| 电极材料 | 工件材料 | 强化层厚度(μm) | 强化层性状 |
|------|---------|-----------|-----------|
| YG8 | Cr12MoV | 32~35 | 均匀、连续、有气孔 |
| | 45 | 27 | 均匀、连续 |
| | T10 | 20 | 均匀、连续、有气孔 |
| | QT | 10~20 | 均匀、连续 |
| | Al | | 电蚀严重、不平 |
| | Ca | | 不平 |

(续)

| 电极材料 | 工件材料 | 强化层厚度(μm) | 强化层性状 |
|------|---------|------------------------|---------|
| YT15 | Cr12MoV | 30 | 断续 |
| | 45 | 25 | 断续 |
| | T10 | 20~25 | 断续 |
| | QT | 22~25 | 均匀、连续 |
| | Al | | 电蚀严重、不平 |
| | Cu | | 起泡 |
| YGB | Cr12MoV | 20~25 | 均匀、连续 |
| | 45 | 25 | 均匀、连续 |
| | T10 | 20~22 | 均匀、连续 |

试验表明，YG和YT类硬质合金可用作电极材料强化合金钢、碳素钢和铸铁等黑色金属，但强化层的厚度和性状各不相同；硬质合金不能强化Al和Cu等有色金属。图4-13是YT15强化QT的强化层金相照片，强化层连续均匀。图4-14

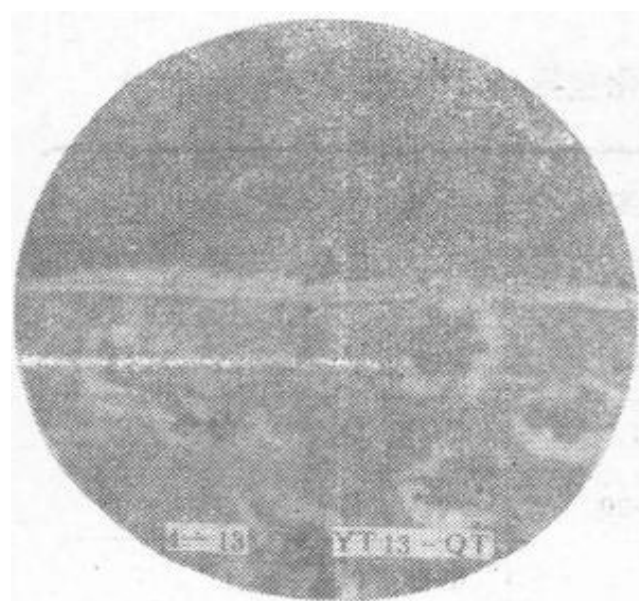


图4-13 YT15强化QT
的强化层 100×

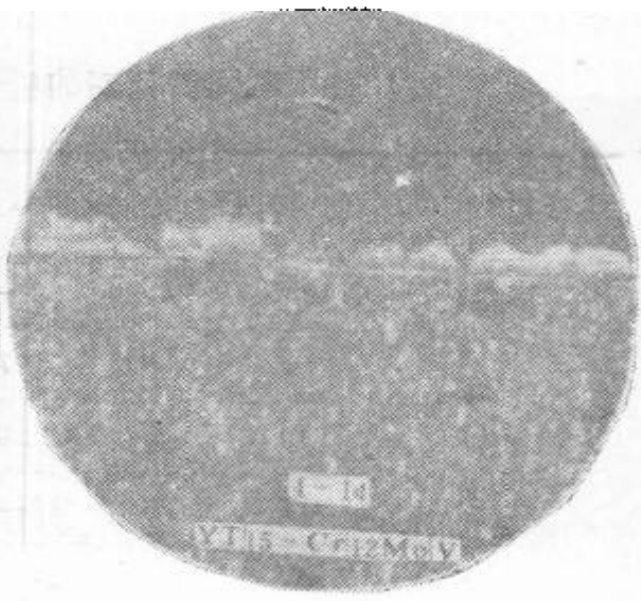


图4-14 YT15强化Cr12MoV
的强化层 100×

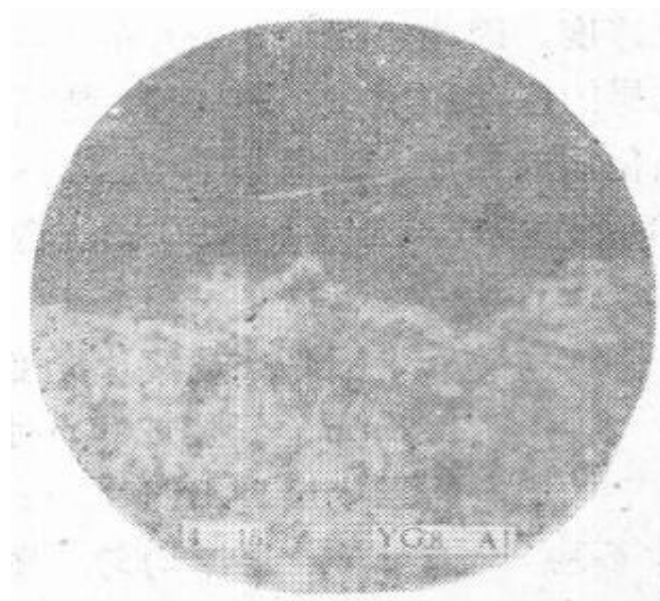


图4-15 YG8强化Al的强化层 100×

是YT15强化Cr12MoV的强化层金相照片，强化层断续。图4-15是YG8强化Al的金相照片，强化表面严重电蚀，出现较深的放电凹穴，表面粗糙不平。

电火花强化的过程是一个瞬时的合金化过程，又是急热急冷的热处理过程。所以，强化层的形成及其性状与电

极和工件材料的导电性能、热物理性能（比热、熔点等），高温下的化合和机械性能等等有着密切的关系。因此，改变电极材料的成分和结构，提高它的形成强化层的性能，是改进强化工艺的重要途径。

九、振动器性能的影响

电磁式振动器的弹簧片厚度影响弹簧片的刚性，而衔铁与铁芯之间的气隙影响电磁吸力，刚性和吸力又将影响电

表4-12 强化层厚度与簧片厚度、气隙的关系 (μm)

| 簧片厚度 (mm) | 气隙 (μm) | | |
|--------------|---------|--------|---------|
| | 120 | 80 | 60 |
| 1.2 | 43(均匀) | 31(粗糙) | 40(较粗糙) |
| 1.0 | 40(粗糙) | 32(断续) | 30(均匀) |
| 0.8 | 35(粗糙) | 20(均匀) | 20(均匀) |

极对工件的冲击力和拉开的速度，因此，振动器簧片的刚性强弱和气隙大小将影响强化层的厚度和质量。表4-12是不同簧片厚度与气隙情况下强化层的厚度。试验条件是：D9 110A强化机第IV档，即电容量为 $65\mu\text{F}$ ，工件材料Cr12，簧片材料A3，比强化时间 $4\text{min}/\text{cm}^2$ 。

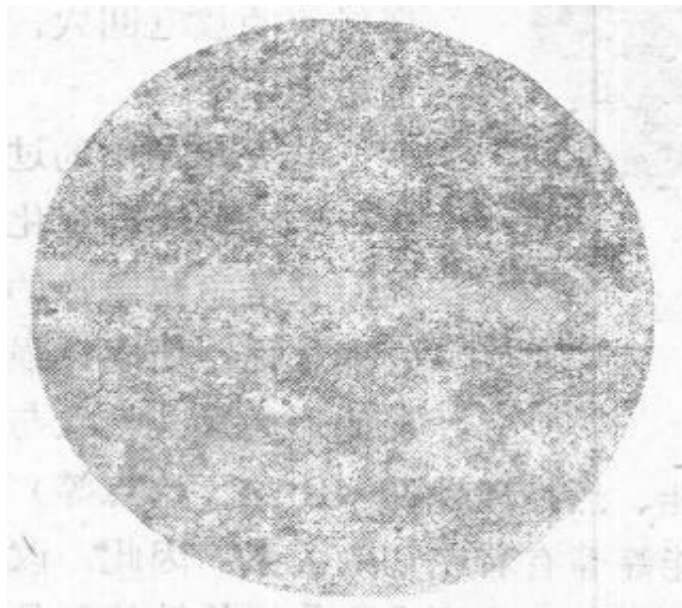


图4-16 振动器性能
试验(一)

图4-16是簧片厚度1.2mm、气隙 $120\mu\text{m}$ 时的强化层金相照片，表面平整、层厚均匀。图4-17是簧片厚度0.8mm，气隙 $60\mu\text{m}$ 的强化层金相照片，强化层均匀，但较薄。图4-18是簧片厚度1.0mm，气隙 $120\mu\text{m}$ 的强化层金相照片，表面较为粗糙。气

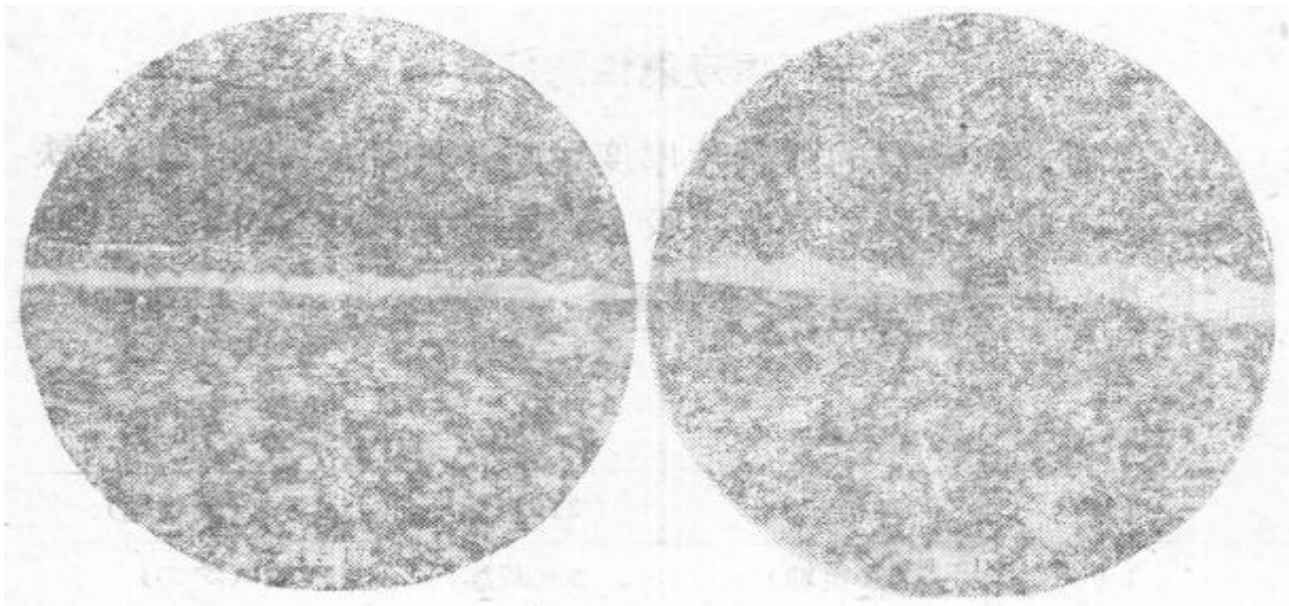


图4-17 振动器性能试验(二)

图4-18 振动器性能试验(三)

隙调整不当往往在强化过程中产生电极粘在工件上的现象，降低强化层质量和强化效率，而内部机械松动或簧片断裂更将影响使用。

十、放电频率的影响

电火花强化时的火花放电，只有在电极与工件接触的瞬間才能产生，所以放电频率 (s^{-1}) 主要决定于振动器的频率，它与电容器的充电时间和放电脉冲宽度有一定的匹配制约关系。

由电火花强化原理可知，放电脉冲具有一定的宽度和停歇期，电压、电容越大，电规准越强，则放电脉冲宽度越大，停歇期也应相应增加。所以对于不同的电规准，放电的频率具有对应的上限值。超过该值将反使放电能量减小（电容器充电不足或放电未完），致使强化层厚度减薄。而放电频率过低，使生产效率降低，同时强化层的厚度和质量也受影响，所以放电频率应该根据电规准来选择。

十一、其他方面的影响

在实用上影响强化层厚度的还有一些其它因素，比如工件表面的形状、原始粗糙度、清洁度和操作者的人为因素等等。

总之，强化层的厚度是由许多因素决定的，而其中尤以电气参数和电极材料的影响最为显著，所以改进电气参数和电极材料一直是人们努力的目标。除此之外，改变电极的运动方式，实现机械化、自动化操作，也是提高强化层厚度和质量的重要方面，必须予以重视。

第五章 强化机的结构

在第一章介绍电火花强化原理的时候，已经谈到强化设备，它是由提供放电能量的脉冲电源和使电极周期振动的振动器这两个主要部件组成的。除此之外，强化机还带有穿孔器等附件，以发挥它的其它功用或者改善强化的工艺性能。本章所要介绍的是目前应用比较广泛的 D9110A 等六种型号强化机的脉冲电源、振动器及附件的结构，可供设备维修时参考。

一、脉冲电源

通过对强化过程的分析和电气参数对电火花强化层的粗糙度、厚度、生产率等工艺指标的影响的实验研究可知，脉冲电源为火花放电所提供的能量、工作电压、放电频率等都是决定强化层质量的重要电气参数。对于脉冲电源来说，首先是能提供必要的火花放电能量，并且在电极与工件短路的时候要有适当的短路电流，以获得一定厚度的强化层；其次，根据加工工艺要求能方便地调整电气参数；第三是要有较高的放电频率，以提高强化的速度；第四要有较高的电能利用率，减少电源本身的损耗。此外，强化机主要是在普通的车间等一般条件的环境中使用，因此要考虑到设备的可靠性和便于维修。针对上述要求，已设计了 D9105、D9105A、D9110、D9110A、D9110B 和 D9130 等六种型号的强化机。下面将分别介绍这六种强化机电源的电气线路和性能。

1. D9105型电源

根据电火花强化的工艺特点和对脉冲电源所提出的要求，利用储能电容器的充放电特性来构成强化机的脉冲电源是比较合适的。它的原理线路如图 5-1 所示。当电极离开工件时，电源 E 通过电阻 R 对储能电容器 C 充电，充电电流为 i_c ，因此可以列出充电回路的方程：

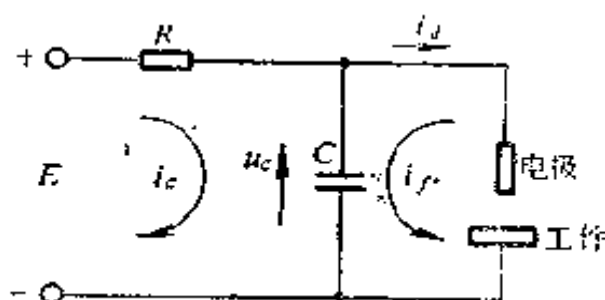


图 5-1 RC 线路电气原理图

$$i_c R + u_c = E \quad (5-1)$$

式中 u_c —— 电容器电压。

$$\text{因为 } i_c = C \frac{du_c}{dt}$$

$$\text{所以 } RC \frac{du_c}{dt} + u_c = E$$

假设充电开始时电容器上的电压为零，即初始条件为 $u_c|_{t=0} = 0$ ，便得到：

$$u_c = E \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) \quad (5-2)$$

$$i_c = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (5-3)$$

式中 $\tau_1 = RC$ —— 充电回路的时间常数。

设在 t_1 时刻电容器上的电压已充到接近电源电压 E ，此时电极与工件无限接近直至引起放电，电容器向通道和接触小区域提供瞬时的放电电能。以 r 代表放电回路的总电阻，它是导线、工件、电极的电阻以及各部分接触电阻之和，则可列出电容器放电时的回路方程，即

$$i_f r + u_c = 0 \quad (5-4)$$

式中 i_f —— 电容器放电电流。

因为
$$i_f = C \frac{du_c}{dt}$$

所以
$$rC \frac{du_c}{dt} + u_c = 0$$

如果设定开始放电时电容器已经充到电源电压 E ，即放电的初始条件为 $u_c|_{t=0} = E$ ，便得到：

$$u_c = E e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (5-5)$$

$$i_f = -\frac{E}{r} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (5-6)$$

式中 $\tau_2 = rC$ —— 放电回路的时间常数。

式 (5-6) 等号右边的负号表示电流的实际方向与图 中所标的方向相反。

通过放电通道的电流除了电容器的放电电流 i_f 之外，同时还流过短路电流 i_d ，它是由电源 E 经电阻 R 流过放电点的。假定在电容器放电期间电源不对电容器充电，而且放电电阻 $r \ll R$ 且接近为零，则有：

$$i_d = \frac{E}{R} \quad (5-7)$$

于是通过放电点的总电流为:

$$i_g = i_d + i_f = \frac{E}{R} + \frac{E}{r} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (5-8)$$

由式(5-8)可知,放电电流是由两部分电流叠加的,即

直流 $\frac{E}{R}$ 和按指数规律衰减的 $\frac{E}{r} e^{-\frac{t}{\tau_2}}$, 一般来说, 时间常数 τ_2 非常小, 所以后一部分电流具有较大的峰值, 但衰减得很快。

电压和电流的波形如图5-2所示。

在 t_3 时刻, 电极在振动器的带动下离开工件, 放电回路被断开, 放电电流为零, 电源 E 通过电阻 R 重新对电容器充电。到 t_4 时刻, 电极再次接近工件, 又开始第二次放电。所以, 只要电极周期地离开和接近工件, 就能产生周期性的放电。

从以上的讨论可以了解到 RC 充放电电路的工作过程和所形成的电压电流脉冲, 并且可

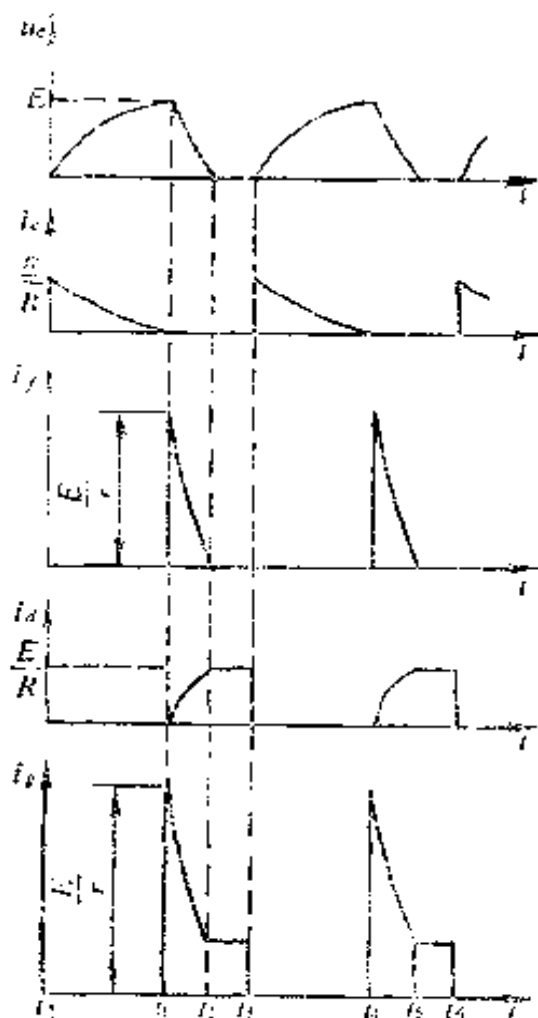


图 5-2 RC 充放电电压电流波形

以进一步分析这种线路的特点。

1) RC 电路能为电极的熔化和合金化提供必需的放电能量和短路电流。

在充电过程中, 因为

$$E = i_c R + u_c$$

所以
$$\int_0^E EC du_c = \int_0^\infty i_c^2 R dt + \int_0^E C u_c du_c$$

$$CE^2 = \int_0^\infty i_c^2 R dt + \frac{1}{2} CE^2 \quad (5-9)$$

式中等号左边是电源在充电过程中输入的能量, $\frac{1}{2} CE^2$ 是电

容器上储存的电能量, $\int_0^\infty i_c^2 R dt$ 是电阻上消耗的能量。在上

面讨论时曾设定充电开始和放电结束时电容器上的电压均为零, 因此, 一次放电的脉冲能量为: $W_M = \frac{1}{2} CE^2$ 。

改变电容器的容量 C 或电源的直流电压 E 就可以得到不同的放电能量。

2) 放电的频率决定于电极接近工件的频率, 也即振动器的频率。只要振动的周期足够大, 电容器 C 上的电压就能够充到接近电源电压 E 。

3) 脉冲电源结构简单, 元件可靠, 因此有利于使用和维修。

4) 从式 (5-9) 可知, 电阻上消耗的电能为:

$$\int_0^\infty i_c^2 R dt = \frac{1}{2} CE^2$$

所以，电源的充电效率不超过50%。再加上电源变压器、放电回路导线等的电能消耗，电能的利用率将低于50%，这是这种线路的一个缺点。

D9105型强化机的电源就是采用这种RC电路，它的电气线路图如图5-3所示。

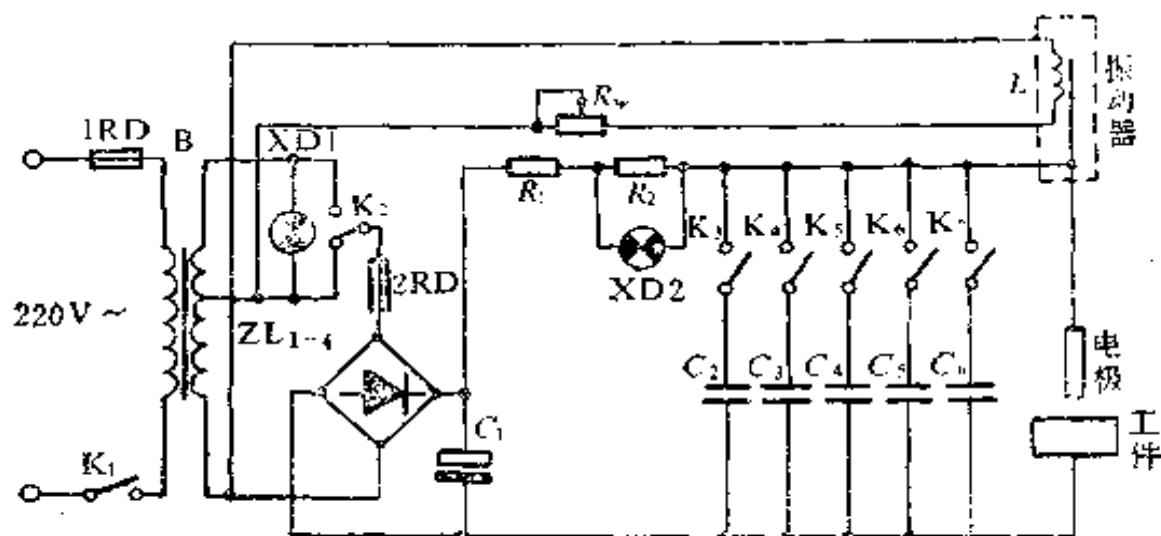


图5-3 D9105型强化机电气线路图

| | | | |
|-------|-------------------|------------|-------------------|
| R_1 | 60 Ω | C_2, C_3 | 1 μF |
| R_2 | 10 Ω | C_4, C_6 | 4 μF |
| R_3 | 270 Ω | C_5 | 10 μF |
| C_1 | 500 μF | ZL_{1-4} | 2CZ11B \times 4 |

图中的电源变压器可以直接采用控制变压器 EK 50。XD 1 作为电源接通指示，XD 2 作为强化时的工作指示。 $R_1 = 60\Omega$ ， $R_2 = 10\Omega$ ，所以充电电阻 $R = R_1 + R_2 = 70\Omega$ 。 $C_2 \sim C_6$ 为充放电电容，可以并联使用，最小电容量是 $1\mu\text{F}$ ，全部并联时的最大电容量是 $20\mu\text{F}$ 。

根据以上电气参数，最小放电能量和最大放电能量分别为 $0.8 \times 10^{-3}\text{J}$ 和 $2.5 \times 10^{-2}\text{J}$ 。

振动器的线圈电压直接取自变压器的次级，所以振动的

频率是 100s^{-1} 。电位器 R_{μ} 用于调节线圈电流的大小，以控制电极的振动幅度。

充电回路的最大时间常数 $\tau_1 = RC = 1.4 \times 10^{-3}\text{s}$ ，而振动器的振动周期是 $1/100\text{s}$ ，远大于 τ_1 ，所以可以认为在充电周期结束时，电容器已经充到接近直流电源电压。

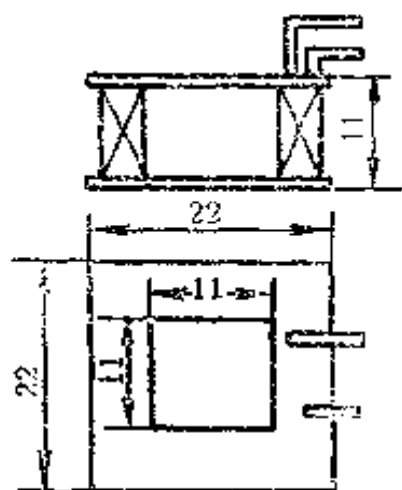


图5-4 D9105型振动器线圈

振动器线圈的示意图如图5-4所示，用线径 0.42mm 的高强度漆包线绕制，圈数200匝。或者用 $\phi 0.1 \sim 0.12\text{mm}$ 漆包线绕1000匝。

该机的强化层厚度和粗糙度见表5-1，其主要规格，参见表5-3。

图5-5是工作过程中电压、电流的波形，从上到下分别是直流电源电压、电容器充放电电压、振动器电流、充电电流和放电电流。

表5-1 D9105型的工艺指标

| 规 准 | 电压(V) | 电容量(μF) | 强化层厚度(μm) | 粗糙度(光洁度) |
|------|-------|----------------------|------------------------|--|
| 粗加工 | 50 | 10~20 | 10~15 | $Ra3.2 \sim 1.6\mu\text{m} (\nabla 5 \sim \nabla 6)$ |
| 半精加工 | 40 | 4~10 | 5~10 | $Ra1.6\mu\text{m} (\nabla 6)$ |
| 精加工 | 40 | 1~4 | 3~5 | $Ra1.6\mu\text{m} (\nabla 6)$ |

D9105型的特点是：电压分两档，电容量从 $1\mu\text{F}$ 到 $20\mu\text{F}$ 有16种数值，所以放电能量调节方便；粗糙度较细，可以达到 $Ra1.6\mu\text{m} (\nabla 6)$ 以上，因此可用于强化粗糙度要求较细

的量具和刀具。其缺点是：强化层较薄；振动器频率较低；如果电源变压器的效率在80%左右，则电能利用率不超过40%。

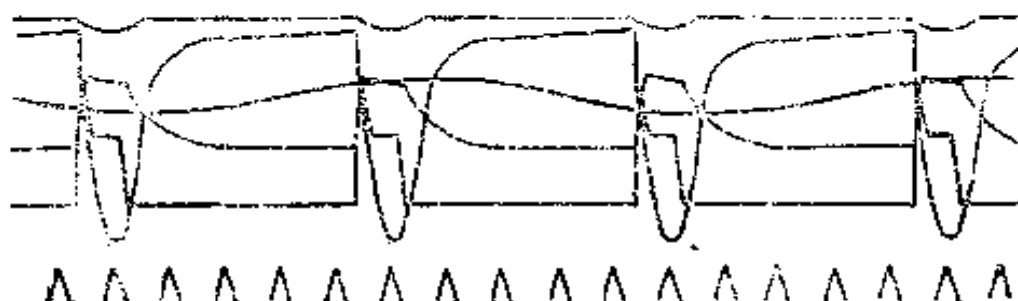


图5-5 D9105型电压、电流波形

2. D9105A型电源

D9105型电源采用RC充放电回路，如上所述，其充电效率和振动器的频率都不高。为了提高充电回路的效率和振动器的频率，D9105A型采用RLC充电回路，并且将振动器线圈

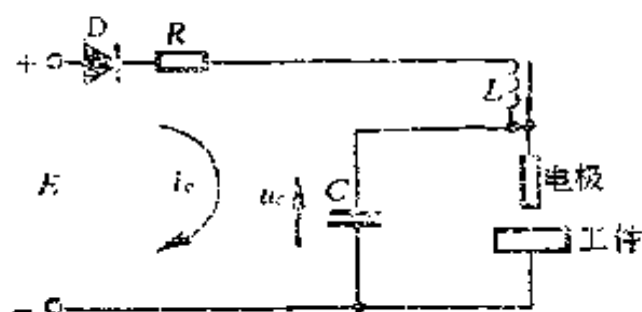


图5-6 D9105A型电气原理图

E —直流电源电压 R —充电回路电阻
 L —振动器线圈电感 C —储能电容
 D —隔离二极管

串接在充电回路中作为充电电感。它的原理线路如图5-6所示，隔离二极管 D 的作用是使电源只能向电容器 C 单向充电。当电极离开工件时，电源 E 通过电阻 R 、电感 L 对电容 C 充

电，因此可列出回路微分方程：

$$Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + u_c = E \quad (5-10)$$

因为
$$i_c = C \frac{du_c}{dt}$$

$$\frac{di_c}{dt} = C \frac{d^2u_c}{dt^2}$$

所以式 (5-10) 可改写成:

$$RC \frac{du_c}{dt} + LC \frac{d^2u_c}{dt^2} + u_c = E$$

整理后可得:

$$\frac{d^2u_c}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{du_c}{dt} + \frac{1}{LC} u_c = \frac{E}{LC} \quad (5-11)$$

在电路稳定时, 充电电流 $i_c = 0$, 式 (5-11) 有特解, 即稳定分量 $u_c' = E$ 。它的过渡分量 u_c'' 可由下列特征方程求得:

$$p^2 + \frac{R}{L} p + \frac{1}{LC} = 0 \quad (5-12)$$

其根为:
$$p_1 = -\frac{R}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \quad (5-13)$$

$$p_2 = -\frac{R}{2L} - \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \quad (5-14)$$

令
$$\frac{1}{LC} = \omega_0^2 \quad \text{及} \quad \frac{R}{2L} = \delta$$

则式 (5-13) 和 (5-14) 分别可写成:

$$p_1 = -\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$$

$$p_2 = -\delta - \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$$

为了提高充电效率, 希望充电回路工作在振荡充电的状态下, 即要求 $\delta < \omega_0$, 或者 $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 。此时, p_1 和 p_2 为共轭复数根, 即

$$p_1 = -\delta + j\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = -\delta + j\omega$$

$$p_2 = -\delta - j\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = -\delta - j\omega$$

式中

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$$

$$\text{过渡分量: } u_c'' = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} = e^{-\delta t} [(A_1 + A_2) \cos \omega t + j(A_1 - A_2) \sin \omega t] \quad (5-15)$$

所以, 式 (5-11) 的通解为:

$$u_c = u_{c'} + u_c'' = E + e^{-\delta t} [(A_1 + A_2) \cos \omega t + j(A_1 - A_2) \sin \omega t] \quad (5-16)$$

式 (5-16) 中的常数 A_1 和 A_2 可由电路的初始条件确定。

从电火花放电的过程分析可以知道, 如果电容有足够的时间放电, 则放电结束时电容器上的电压为零, 而通过充电电阻和振动器线圈的电流等于短路电流, 所以电容器充电的初始条件为:

$$u_c |_{t=0} = 0$$

$$i_c |_{t=0} = \frac{E}{R}$$

因此可求得:

$$A_1 + A_2 = -E \quad (5-17)$$

$$A_1 - A_2 = \frac{\frac{E}{R} - \delta C E}{j\omega C} \quad (5-18)$$

將式 (5-17) 和 (5-18) 代入式 (5-16), 得:

$$\begin{aligned} u_c &= E + e^{-\delta t} \left[-E \cos \omega t + j \frac{\frac{E}{R} - \delta C E}{j\omega C} \sin \omega t \right] \\ &= E + \frac{1 - \delta C R}{\omega C R} E e^{-\delta t} \left[\sin \omega t - \frac{\omega C R}{1 - \delta C R} \cos \omega t \right] \end{aligned} \quad (5-19)$$

設 $\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega C R}{1 - \delta C R}$

則 $u_c = E + \frac{1}{\omega C R} E e^{-\delta t} \sin(\omega t - \varphi) \quad (5-20)$

充电电流:

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} = \frac{E}{\omega R} e^{-\delta t} [\delta \sin \omega t + \omega \cos \omega t] \quad (5-21)$$

設 $\operatorname{tg} \psi = \frac{\omega}{\delta}$, 因 $\operatorname{tg} \psi > 0$, 所以 ψ 的取值范围是

$0 < \psi < \frac{\pi}{2}$, 則得

$$i_c = \frac{\omega_0 E}{\omega R} e^{-\delta t} \sin(\omega t + \psi) \quad (5-22)$$

根据式 (5-20) 和 (5-22), 可以讨论 RLC 充电回路电容器的充电电压和充电电流的最大值 $U_{c\max}$ 和 $I_{c\max}$ 以及充电回路的效率。

因为 u_c 和 i_c 都是按指数曲线衰减的振荡量, 可以认为充电电流和电压的最大值均出现在第一个振荡半周期内。

由 $\frac{du_c}{dt} = 0$ 可以求得 u_c 的最大值。因为 $i_c = C \frac{du_c}{dt}$, 所以 $i_c = 0$ 时 u_c 有最大值。

由式 (5-22) $i_c = \frac{\omega_0 E}{\omega R} e^{-\delta t} \sin(\omega t + \psi) = 0$, 求得:

$$t = \frac{\pi - \psi}{\omega}$$

所以电压最大值:

$$\begin{aligned} U_{c\max} &= E + \frac{1}{\omega CR} E \cdot e^{-\delta \frac{\pi - \psi}{\omega}} \sin(\psi + \varphi) \\ &= E + \frac{1}{\omega_0 CR} E e^{-\delta \frac{\pi - \psi}{\omega}} \end{aligned}$$

以 K 表示电容器的充电系数, 则

$$\begin{aligned} K &= \frac{U_{c\max}}{E} = 1 + \frac{1}{\omega_0 CR} e^{-\delta \frac{\pi - \psi}{\omega}} \\ &= 1 + \frac{1}{\omega_0 CR} e^{-\frac{\pi - \psi}{2Q}} > 1 \end{aligned}$$

式中 $Q = \frac{\omega}{2\delta} = \frac{\omega L}{R}$ —— 充电回路的品质因数， Q 值越大， K 值也越大。

充电电流的最大值可由式 (5-22) 对 t 微分求得，令

$$\frac{di_c}{dt} = \frac{\omega_0 E}{\omega R} [-\delta e^{-\delta t} \sin(\omega t + \psi) + \omega e^{-\delta t} \times \cos(\omega t + \psi)] = 0$$

则最大值出现在 $t = 0$ 的时候，即初始条件 $i_c = \frac{E}{R}$ 。

现在来分析充电回路中二极管 D 的作用。当电源向电容器充电的时候，二极管导通，忽略管压降，此时电流和电压

以式 (5-20) 和 (5-22) 所表示的规律变化。当 $t = \frac{\pi - \psi}{\omega}$ ，

$i_c = 0$ ， $U_{C_{\max}} = KE > E$ ，所以二极管加上了反向电压，二极管起防止电容向电源倒流的隔离作用，维持电容器电压为

$U_{C_{\max}}$ 。可见，充电回路的导电时间是从 $t = 0$ 到 $t = \frac{\pi - \psi}{\omega}$ 。

RLC 充电回路的充电效率：

$$\eta_c = \frac{W_M}{W_E}$$

$$W_M = \frac{1}{2} C U_{C_{\max}}^2 = \frac{1}{2} C K^2 E^2$$

式中 W_M —— 电容器上的充电能量；

W_E —— 电源供给的能量。

电源供给的能量由两部分组成，即

$$W_E = W_{E'} + W_E = \int_0^{\frac{\pi-\psi}{\omega}} E i_{\dots} dt + \frac{1}{2} L \left(\frac{E}{R} \right)^2$$

经计算得： $W'E = CKE^2$

$$\text{所以 } \eta = \frac{W_M}{W_E} = \frac{\frac{1}{2} CK^2 E^2}{CKE^2 + \frac{1}{2} \frac{L}{R^2} E^2} = \frac{CR^2 K^2}{2CR^2 K + L}$$

(5-23)

电容器充电到最高电压 U_{cmax} 之后，电压将维持到 t_1 时刻，在此时刻电极与工件无限接近，电容器瞬时地向通道和接触区域放电，放电电流为 i_f 。并且在某一时刻之后将有短路电流 i_d 流过振动器线圈。放电时的电路如图 5-7 所示，其中 r 代表放电回路的总电阻。

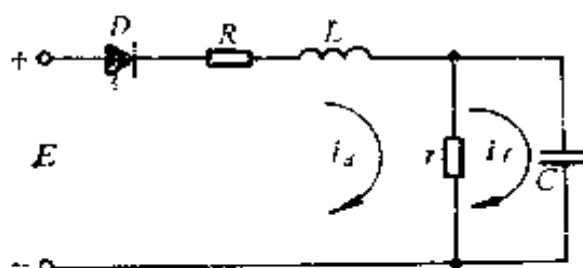


图5-7 D9105A型放电回路

由放电回路可列出回路方程：

$$i_f r + u_c = 0 \quad (5-24)$$

$$\text{和 } i_d R + L \frac{di_d}{dt} = E - u_c \quad (5-25)$$

考虑到放电初始条件是： $t = t_1$ 时， $u_c = U_{cmax}$ ，所以由式 (5-24) 可得：

$$u_c = U_{c \max} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (5-26)$$

$$i_f = C \frac{du_c}{dt} = -\frac{U_{c \max}}{r} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (5-27)$$

式中 $\tau_2 = rC$ —— 放电回路的时间常数。

上式中的负号表示放电电流的实际方向与图中所标的方向相反。

由于二极管D的隔离作用，当 $u_c \geq E$ 时， $i_d = 0$ ，即只有电容器的放电电流通过放电点。这段时间可以由 $u_c - E = 0$ 求得，即

$$U_{c \max} e^{-\frac{t}{\tau_2}} - E = 0$$

$$t_2 = \tau_2 \ln K \quad (5-28)$$

因为放电回路电阻 r 很小，假设在 t_2 时刻之后， i_d 的变化与 u_c 和 r 无关，则有：

$$i_d R + L \frac{di_d}{dt} = E \quad (5-29)$$

在 t_2 时刻之前 $i_d = 0$ ，在 t_2 时刻之后，由式 (5-29) 可求得：

$$i_d = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_3}} \right)$$

式中 $\tau_3 = \frac{L}{R}$ ——当工件和电极短路时的回路时间常数。

因此，放电总电流为：

$$i_y = \begin{cases} i_f & (\text{在 } t_2 \text{ 时刻之前}) \\ i_f + i_d & (\text{在 } t_2 \text{ 时刻之后}) \end{cases}$$

因为 τ_2 和 τ_3 均较小，当 t 足够大时， $i_s \approx \frac{E}{R}$ 。

在电极离开工件的瞬时 t_3 ，因为电感上的电流不能跃变，所以电容器将以 $i_s \approx \frac{E}{R}$ 的初始电流开始下一个周期的充电。

储能电容器充放电电压和电流的波形如图 5-8 所示。

由以上分析可知， RLC 充电回路所形成的电压、电流脉冲与 RC 充电回路有显著的区别。 RLC 回路的特点如下：

1) 电容器的充放电能量，在同样的电容器容量和直流电源电压的情况下，可增加到 K_2 倍。

2) 参数选择适当，可使充电回路的效

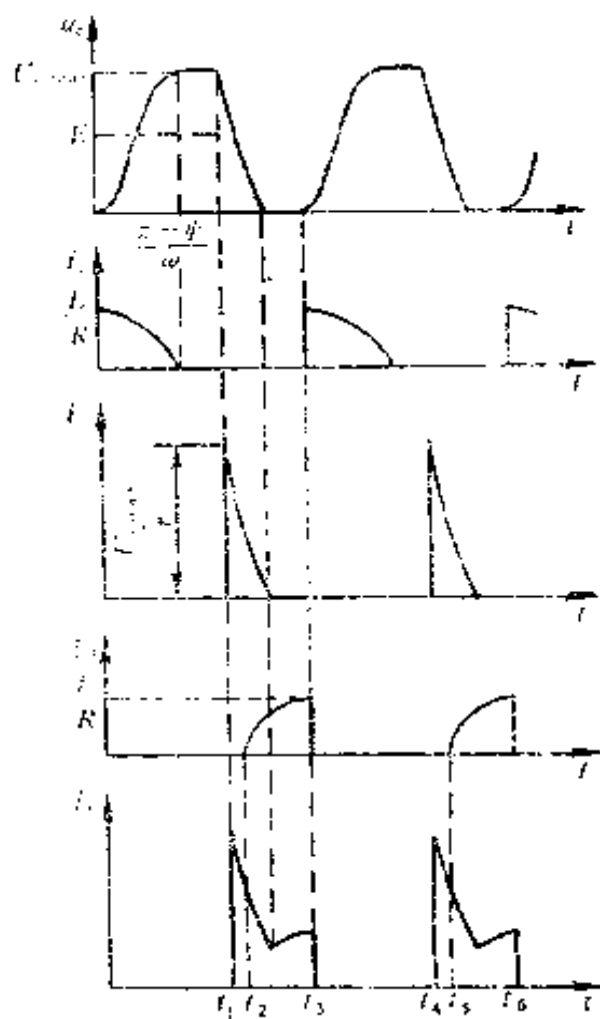


图5-8 RLC 充放电电压电流波形

率大于50%。

3) 振动线圈串联在充电回路中。当流过线圈的电流减小时,对振动器弹簧片的电磁吸力随之减弱,电极接近工件以至接触放电;而当线圈电流增加时,吸力也增大,弹簧片带动电极离开工件。因此充放电的频率与振动器的振动频率一致,即实现了同步振动。

4) 工作频率较高,可达 $200\sim 600\text{s}^{-1}$,而且频率的高低与放电能量的大小相适应,能使强化层的质量和强化效率得到改善。

图5-9是D9105A型的电气线路图。图中 $R_2 \gg R_1$,所以充电回路是 R_1, L_1 和储能电容器组 $C_2 \sim C_7$ 的串联回路。振动器线圈的骨架与D9105型一样,用 $\phi 0.46\text{mm}$ 高强度漆包线绕制180匝,电感量 $L_1 \approx 4\text{mH}$,振动线圈的直流电阻约为 2Ω 。最小电容量为 $1\mu\text{F}$,最大电容量为 $20\mu\text{F}$ 。

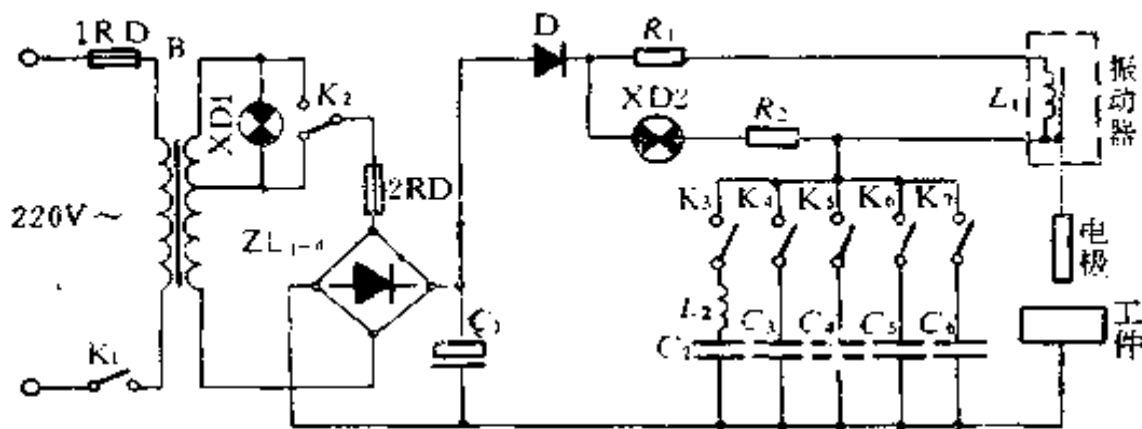


图5-9 D9105A型强化机电气线路图

| | | | |
|------------|-------------------|------------|-------------------|
| R_1 | 15 Ω | C_4, C_5 | 4 μF |
| R_2 | 360 Ω | C_6 | 10 μF |
| C_1 | 500 μF | ZL_{1-4} | 2CZ11B \times 4 |
| C_2, C_3 | 1 μF | D | 2CZ3A |

D9105A型是在D9105型的基础上改进的，主要元器件与D9105一样。选择充电电阻时兼顾了电容的调节范围， $20\mu\text{F}$ 时， K 值比较低，而 $1\mu\text{F}$ 时， K 值较高。为了改善小电容时的强化层质量，与 $1\mu\text{F}$ 电容串联了一只空心电感 L_2 ，用 $\phi 1.0\text{mm}$ 的高强度漆包线密绕20匝，线圈内径 $\phi 20\text{mm}$ 。

D9105A型的最大强化层厚度可达 0.02mm ，工作频率 $200\sim 400\text{s}^{-1}$ 。图5-10是工作时的电压电流波形，从上往下，第二条波形为电容器充放电电压，第三条为放电总电流，底部为频率 500Hz 的时标。可见工作频率约 300s^{-1} 。

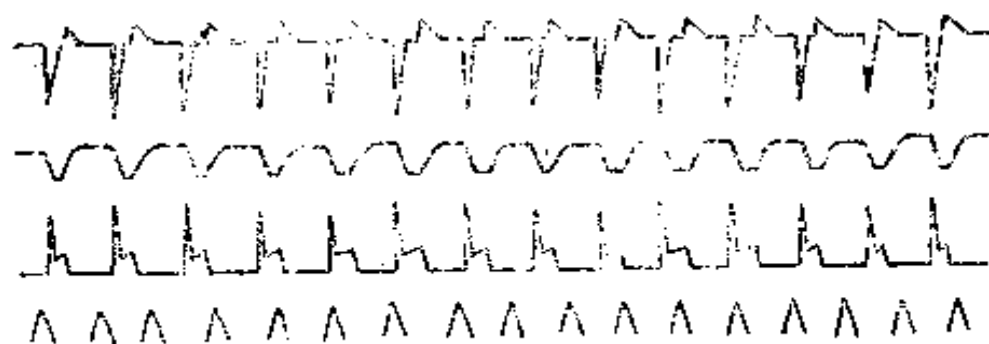


图5-10 D9105A型电压电流波形

3. D9110型电源

D9110型电源同样设计成 RLC 振荡充电和振动器线圈串联在充电回路中构成同步振动，其电气线路如图5-11所示。电源变压器容量为 100VA ，空载直流电压 35V ，最大电容量为 $45\mu\text{F}$ 。为了操作方便，该机有四档固定的规准，用波段开关转换。在第I、II档，电容量分别为 $1\mu\text{F}$ 和 $5\mu\text{F}$ ，电容器充电是通过电阻 R 和振动线圈 L_2 。而第III、IV档规准时，电容量分别为 $25\mu\text{F}$ 和 $45\mu\text{F}$ ，充电是通过电感 L_1 和 L_2 ，这样可使充电回路的参数更为合理。

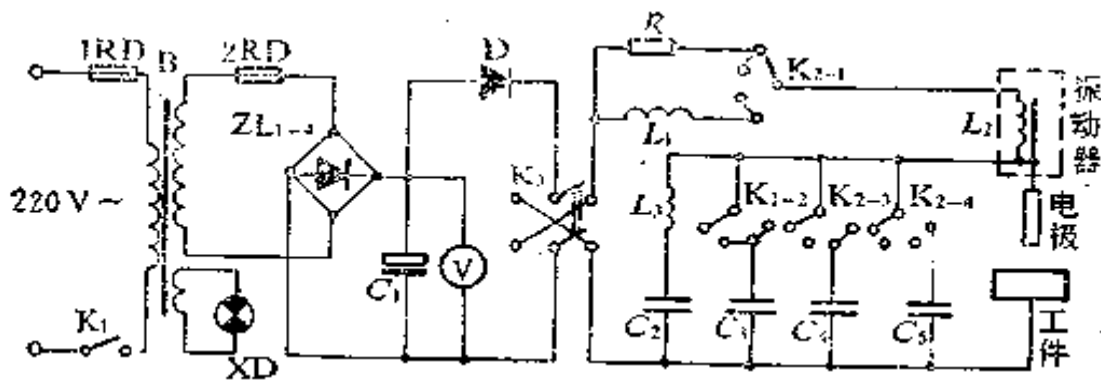


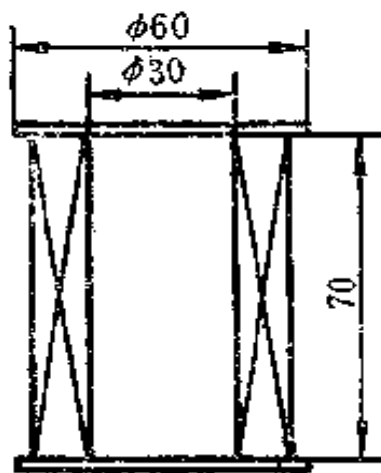
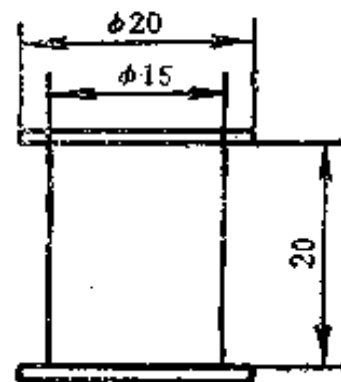
图 5-11 D9110型强化机电气线路图

| | | | |
|-------|-------------------|------------|------------------|
| R | 15 Ω | C_4, C_5 | 20 μF |
| C_1 | 500 μF | ZL_{1-4} | 2CZ5A \times 4 |
| C_2 | 1 μF | D | 2CZ5A |
| C_3 | 4 μF | | |

充电电感 L_1 的结构示意图如图 5-12 所示, 用 $\phi 0.8\text{mm}$ 的高强度漆包线密绕 800 匝, 电感量为 10.6mH, 直流电阻值 4 Ω 左右。

振动物线圈 L_2 用 $\phi 0.62\text{mm}$ 高强度漆包线绕 150 匝, 线圈骨架与振动物铁芯配作, 电感量约 1.4mH。

电感线圈 L_3 是为了改善 1 μF 档的强化性能, 线圈骨架如图 5-13 所示, 用 $\phi 0.8\text{mm}$ 漆包线密绕 60 匝。

图5-12 充电电感 L_1 示意图图5-13 L_3 线圈骨架

电气线路中的开关 K_3 是极性转换开关，当转换开关 K_3 使工件接电源正极的情况下，可用于工件的电蚀加工，如粉碎断丝锥，在淬硬工件上加工盲孔等，此时要使加工部分浸没在自来水、煤油等工作液中。

D9110型的强化性能如表5-2所示，其主要规格参见表5-3。

表5-2 D9110型强化性能

| 规 准 | 电 容 量 (μF) | 强化层厚度 (μm) | 粗 糙 度 (光洁度) |
|------|----------------------------|----------------------------|---|
| Ⅲ—Ⅳ | 25~45 | 25~30 | $Ra3.2\mu\text{m}$ ($\nabla 5$) |
| Ⅱ—Ⅲ | 5~15 | 10~20 | $Ra3.2\sim 1.6\mu\text{m}$ ($\nabla 5\sim 6$) |
| I—II | 1~5 | 5~10 | $Ra1.6\mu\text{m}$ ($\nabla 6$) |

4. D9110A和D9110B型电源

D9110A和D9110B型是在D9110型基础上改进的，主要做了如下改进：

1) 用工作电流表代替直流电源电压表，从各档电流的大小可以估计电路是否正常和操作是否得当。

2) 第Ⅳ档电容量增加到65 μF ，因为该档除了作为强化时的粗规准之外，还用于电蚀加工，增大容量可提高电蚀的生产率。

3) 充电回路的电感和电阻值稍作调整。

4) D9110B型在内部结构、操作显示、外型等方面均作了些改进。

D9110A和D9110B型的电气线路图分别示于图5-14和图5-15。

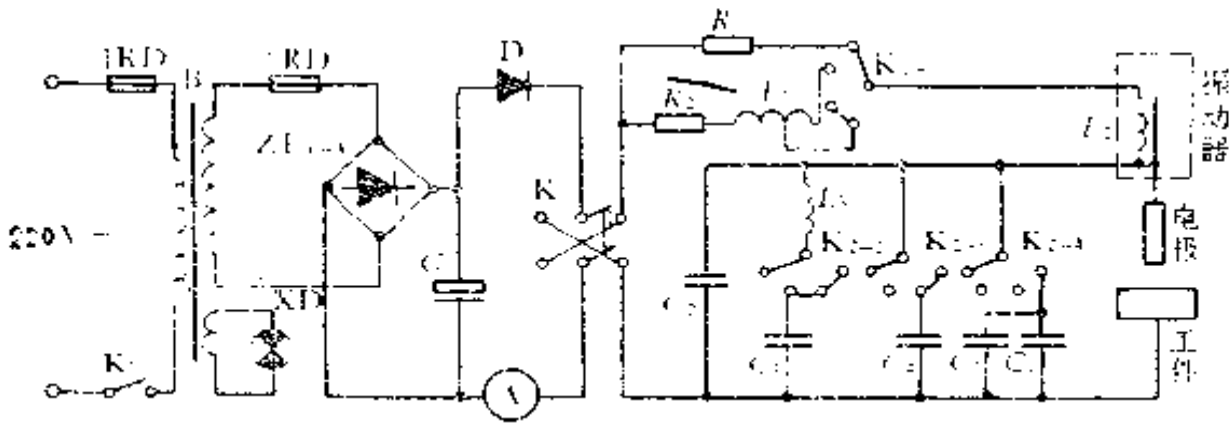


图5-14 D9110A型强化机电气线路图

| | | | |
|-------|-------|-----------------|-----------|
| R_1 | 7.5Ω | C_3 | 4μF |
| R_2 | 1Ω | C_4, C_5, C_6 | 20μF |
| C_1 | 470μF | ZL_{1-4} | 2CZ5A × 4 |
| C_2 | 1μF | D | 2CZ5A |

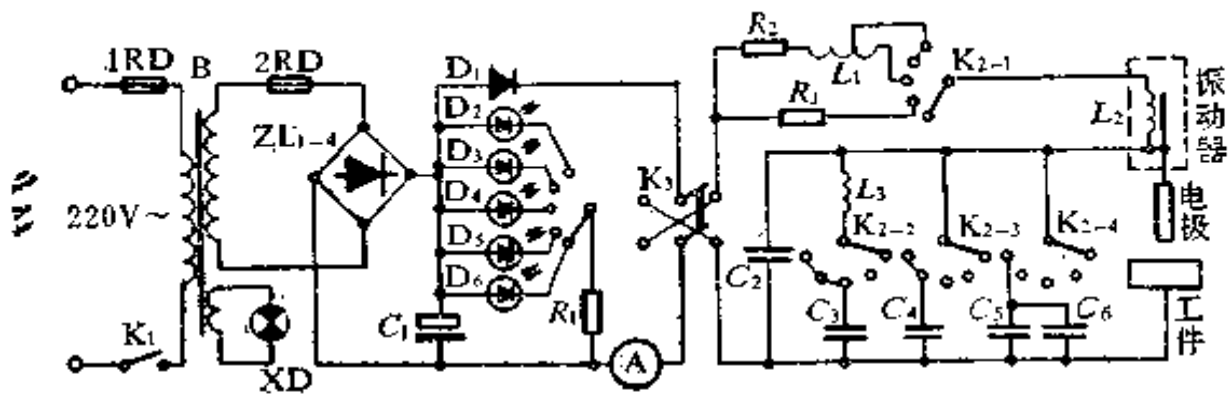


图5-15 D9110B型强化机电气线路图

| | | | |
|-------|-------|-----------------|-----------|
| R_1 | 3kΩ | C_3 | 4μF |
| R_2 | 1Ω | C_4, C_5, C_6 | 20μF |
| R_3 | 7.5Ω | ZL_{1-4} | 2CZ5A × 4 |
| C_1 | 470μF | D_1 | 2CZ58D |
| C_2 | 1μF | $D_2 \sim D_3$ | BT204 |
| | | D_4 | BT304 |

电感线圈 L_1 的示意图如图5-16所示，用 $\phi 0.8\text{mm}$ 高强度漆包线密绕600匝，在405匝处抽头，电感量分别为5.6mH和2.3mH。

振动器线圈骨架如图5-17所示，用 $\phi 0.8\text{mm}$ 高强度漆包线密绕135匝，电感量约为 1.35mH 。

电感 L_3 用 $\phi 1.35\text{mm}$ 漆包线密绕30匝，分两层，内径为 9mm 。

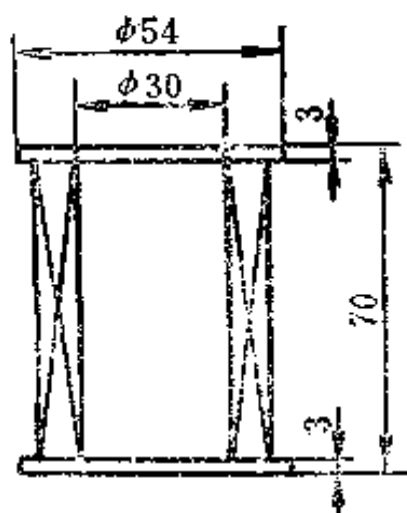


图5-16 电感线圈 L_1 示意图

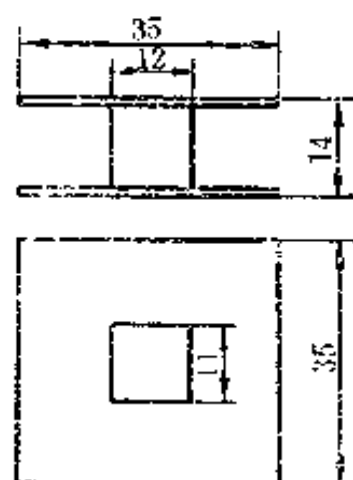


图5-17 振动器线圈 L_2 骨架

图5-18是这两种机的电压电流波形，从上到下分别为：振动器电流、电容器充放电电压、放电总电流和 500Hz 时标。

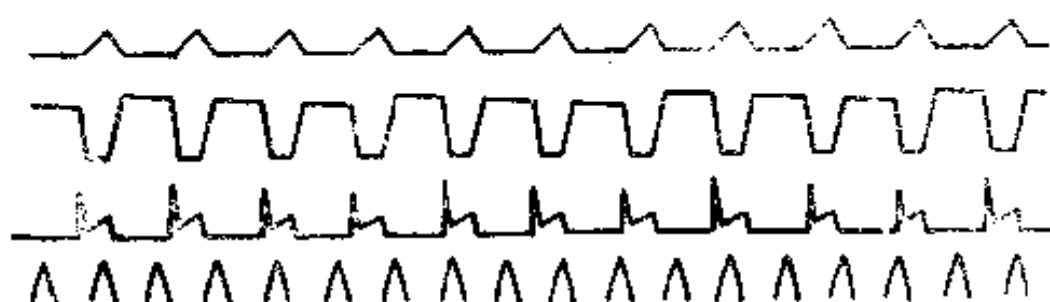


图5-18 D9110A和D9110B型电压、电流波形

5. D9130型电源

D9130型电源功率 300VA 左右，除了用于强化粗糙度要求不太细的工件之外，主要用于已磨损零件的修复。其强化

层厚度可达到 $0.05\sim 0.06\text{mm}$ 。此外，可用于粉碎较大直径的断丝锥或加工直径 12mm 以内的预加工孔。

D9130型的电气线路如图5-19所示，最大储能电容量为 $300\mu\text{F}$ 。在小电容量时，为 RCL 振荡充电状态。由于本机采用的直流电压较高（ 70V ），为了降低精加工时的粗糙度，在线路中不采用隔离二极管，因此充电电压 u_c 呈衰减振荡状态，如图5-20中自上往下第二条波形所示。而在其它规准时线路呈非振荡充电状态，故此充电效率有所降低，但振荡器仍与充放电同步，工作频率也较高。

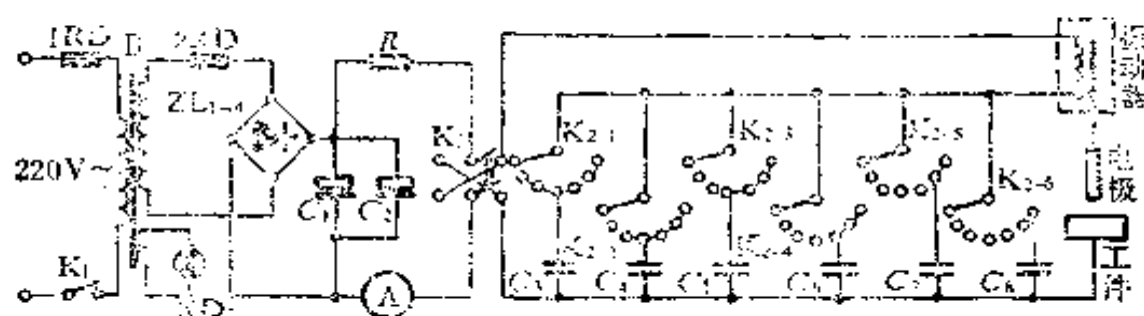


图5-19 D9130型电气线路图

| | | | |
|------------|------------------|------------|-----------------|
| R | 7.5Ω | C_6 | $60\mu\text{F}$ |
| C_1, C_2 | $470\mu\text{F}$ | C_7, C_8 | $80\mu\text{F}$ |
| C_3, C_4 | $20\mu\text{F}$ | ZL_{1-4} | QSZ-10A-4 |
| C_5 | $40\mu\text{F}$ | | |



图5-20 D9130型电压电流波形

表 5-3 列出了各型强化机的主要规格。

表5-3 各型强化机主要规格

| 规格 | 型 号 | | | | | |
|---------------------------------------|---|---------|--|----------------------|-----------------|---|
| | D9103 | D9105A | D9110 | D9110A | D9110B | D9130 |
| 电 源 | 220V | | | 单相50Hz | | |
| 消耗功率(VA) | 50 | | | 100 | | <350 |
| 空载直流电压(V) | 40、50 | | | 36 | | 70 |
| 最大电容量(μF) | 20 | | 45 | 65 | | 300 |
| 电规准档数 | 电容值有16种 | | | 4 | | 6 |
| 振动频率(s^{-1}) | 100 | 200~600 | 200~400 | 200~600 | | 120~450 |
| 强化工作电流(A) | 0.3~0.4 | 0.3~1 | 1~3 | 1~2.5 | | 1~3 |
| 穿孔工作电流(A) | | | 2~3 | 2.5~3 | | 2.5~5 |
| 最大短路电流(A) (不大于) | 0.8 | 2.6 | 6 | | 7 | |
| 强化层最大厚度 (μm) | 15 | 15~20 | 25~30 | | 50~60 | |
| 粗糙度(光洁度) | $Ra1.6\sim0.8\mu\text{m}$ ($\nabla 6\sim 7$) | | $Ra3.2\sim1.6\mu\text{m}$ ($\nabla 5\sim 6$) | | | $Ra6.3\sim$ $1.6\mu\text{m}$ ($\nabla 4\sim 6$) |
| 比强化时间 (min/cm^2) | 4~6 | 3~4 | 3~4 | | | 2~3 |
| 穿孔生产率 (mm^3/min) | | | 4~6 | | 15 | |
| 穿孔直径(mm) | | | 8 | | 16 | |
| 电极直径(mm) | $\phi 1\sim\phi 1.5$ | | | $\phi 1.5\sim\phi 2$ | | $\phi 2\sim\phi 4$ |
| 主机体积(mm) | 280×217 ×150 | | 420×270 ×160 | 330×230 ×175 | 270×275 ×170 | 437×315 ×172 |
| 总重量(kg) | 5.8 | | 12 | 9 | 10 (包括附件) | 23 |

二、振 动 器

电火花强化工艺要求电极周期性地无限接近和离开工件，实现这种动作的机械是电火花强化设备的必要组成部分。按照电极相对工件的运动方式，这种机械大致地分为两类：一类是使电极绕某一轴作公转运动，比如图1-3f、g和h所示，在旋转中周期性地碰触工件；另一类是使电极在某一方向上发生振动，比如图1-3a至e以及i所示的形式。这后一类通常都是使用振动器。

振动器的结构是多种多样的，而手持式的振动器通常都是采用电磁振动的结构，因为这种振动器结构简单，体积小，重量轻，耗电省，频率调节方便。

图5-21是D9105、D9110等小功率强化机所采用的振动器结构，它由电磁吸铁的铁芯1、线圈2、衔铁4和弹簧片5组成，电极夹持棒6固定在衔铁的一端。衔铁与弹簧片联结在一起。铁芯和弹簧片固定在支架3上。因此这些零部件可以在装配调整之后装入振动器外壳。工作时电极就随着衔铁的吸合和离开而作上下运动。由于弹簧片两端固定，振幅比较小，故适宜小功率强化机使用。

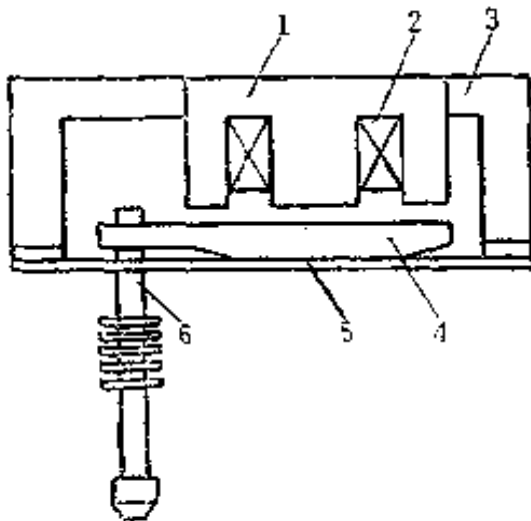


图5-21 小功率强化机振动器结构示意图

片5组成，电极夹持棒6固定在衔铁的一端。衔铁与弹簧片联结在一起。铁芯和弹簧片固定在支架3上。因此这些零部件可以在装配调整之后装入振动器外壳。工作时电极就随着衔铁的吸合和离开而作上下运动。由于弹簧片两端固定，振幅比较

小，故适宜小功率强化机使用。

图5-22是D9130强化机所采用的振动器结构。铁芯1、线圈2、固定支架3、弹簧片4和电极夹持棒5连接成一体，经调试后装入振动器外壳。它与图5-21的区别在于弹簧片单端固定，能获得较大的振幅，因此适用于功率较大的强化机，但其工作稳定性不及前一种。

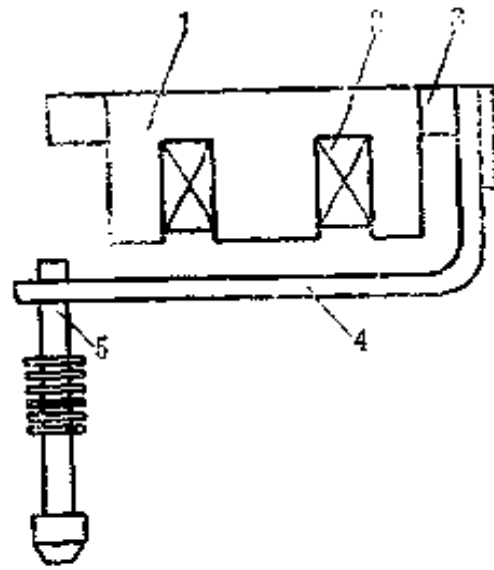


图5-22 D9130型强化机振动器结构示意图

两种振动器的工作原理是一样的。在工作过程中，衔铁受到三个力的作用，即：电磁铁线圈通电后产生的电磁吸力，它是使衔铁向上运动的外力；在固定电极夹持棒的一端，衔铁受到工件对电极的作用力，这个力在电极向下运动时是向上的，而电极离开工件时，由于强化点的粘结作用，此力是向下的，所以这个力可以看成是阻力；第三个力即弹簧片产生的弹力，它是始终指向平衡位置的。因此该振动系统的振动是在周期性外力作用下发生的受迫振动。

振动的频率就是电磁吸力的交变频率。电磁吸力的频率决定于线圈内电流的频率。当线圈接工频电压时，因为在一个周期内电流两次达到最大值，所以电磁吸力的频率是 100s^{-1} ，这就是D9105型强化机的电气线路的振动频率。当线圈串接在充电回路里时，电流的脉动频率就是电容器的充电频率，因此振动器与充放电频率同步。在粗规准时充放电频率低，振动频率也相应地低；在精规准时充放电频率高，振动频率也

提高。因此振动频率随电规准的变化而变化。

振幅的大小与以下几方面有关。

1) 电磁吸力的大小 电磁吸力与线圈的安匝数和磁隙的大小有关。调节铁芯与衔铁之间的气隙是调试振动器的主要工作。气隙大, 电磁吸力减弱, 振幅减小; 气隙小, 将使衔铁与铁芯产生碰撞。无论哪一种情况都会影响强化过程。所以气隙必须调整适当。一旦气隙调好之后, 振幅随线圈的安匝数, 或者说通过线圈的电流而变化。对于同步振动形式的设备来说, 粗规准时需要振幅大, 而这时充电电流较大, 正好能满足振幅的要求, 反之亦然。

2) 弹簧片的刚度越大, 振幅越小。

3) 操作时电极对工件的静压力过大, 使弹簧片变形, 振幅减小。所以操作时的压力要适中。

4) 外力的频率与振动部分(包括电极夹持棒和电极在内)的固有频率相差越大, 振幅越小。但是, 为了避免产生共振, 固有频率要求低于外力频率, 比如D9110A的振动器固有频率大约在100~120Hz, 而外力频率在200Hz以上。

振动器是封闭在手持的外壳内的, 散热条件较差, 因此希望线圈消耗的电能尽可能地小。振动器发热的另一个原因是电极在放电中产生的热经电极夹持棒传到铁芯。所以要提高电极夹持棒的热阻和增加散热面。

三、附 件

1. 自动强化装置

自动强化装置主要用于轴类零件强化, 可安装在C6136等普通车床上使用, 能减轻手工劳动, 改善强化层的质量。本装置的外形如图5-23所示。其基本参数和尺寸列于表

5-4。

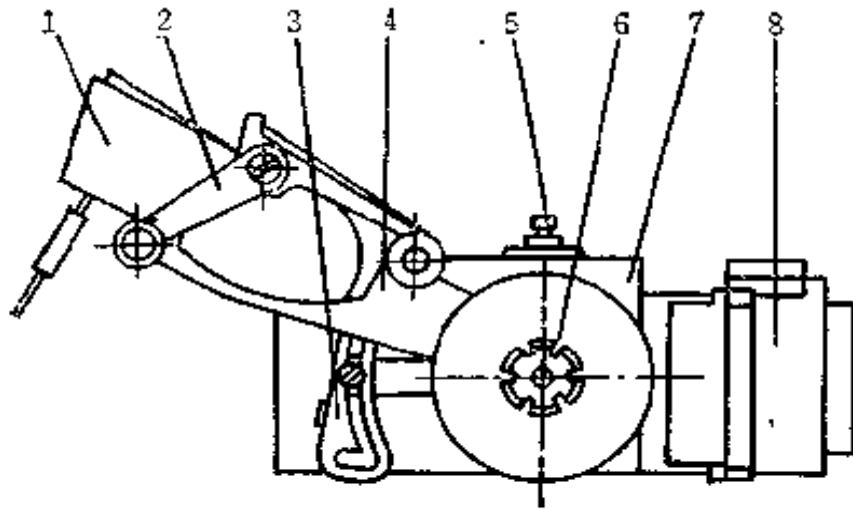


图5-23 自动强化装置

- 1—振动器 2—锁紧杆
3—支承杆 4—夹紧座
5—注油盖 6—旋钮
7—箱体 8—电机

表5-4 自动强化装置基本参数和尺寸

| | |
|------------|----------------|
| 加工工件直径 | 20~150mm |
| 转速 | 最大40r/min |
| 强化调节行程 | 0~10mm |
| 电极调节角度(小于) | $\pm 15^\circ$ |
| 外形尺寸 | 300×260×150mm |
| 总重量 | 10kg |

使用方法如下:

1) 卸下车床刀架, 将该装置箱体7按原刀架心轴位置装入并固定。

2) 把夹紧座4沿支承杆3向上推至最高位置支承固定,把D9110A型的振荡器1装入夹紧座4中,搭上锁紧杆2,拧紧固定螺钉。

3) 调整刀架与工件之间的距离,放下夹紧座4,使电极与工件表面接触并对中心。

4) 接通电火花强化机电源,调节旋钮6,使电极以一定的压力压向工件,保持最佳放电状态。

5) 起动机8,电极便作横向往复摆动,摆动的距离在0~10mm范围内可调。

2. 穿孔器

电火花强化时,工件是接脉冲电源的负极,而电极接正极,通常称为负极性。如果使极性相反,即工件接正极,电极接负极,并将工件浸没在煤油等工作液中,则能实现电火花加工,在淬硬的工件上穿制型孔,或者粉碎折断的丝锥、钻头。这时就要用穿孔器来代替强化用的振荡器。

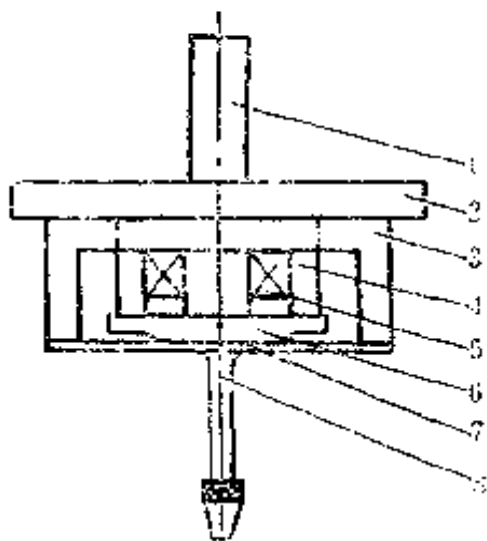


图5-24 穿孔器结构示意图

1—装夹柄 2—外壳上盖 3—
支架 4—铁芯 5—线圈 6—
衔铁 7—弹簧片 8—电极夹
持棒

花加工,在淬硬的工件上穿制型孔,或者粉碎折断的丝锥、钻头。这时就要用穿孔器来代替强化用的振荡器。

穿孔器的工作原理与振荡器无异,只是将电极夹持棒固定在衔铁的中心,其结构如图5-24所示。使用时将装夹柄1安装在钻床的钻夹具内。如果加工的孔径有一定精度要求,可以另加导向器和工件专用夹具。

第六章 强化工艺方法

本章将论述应用电火花强化工艺的一般方法。以后几章则按不同的应用对象分述在模具、刀具、机械零件、微量修补以及其它用途中的各种工艺方法和应用效果。希望通过这几章的介绍，能为有效地应用电火花强化工艺提供实际的操作方法和经验。

一、应用范围

在运用电火花强化工艺之前，对该工艺的特点要有全面的了解，特别是对主要工艺指标——强化层厚度、表面粗糙度和强化生产率以及三者之间的相互制约关系必须有充分的理解，这样才不至于将该工艺应用到不适当的场合。

目前手工操作的各型电火花强化机，其工艺指标的大致范围是：强化层厚度最大值在 0.03mm 以内的设备，其强化后的表面粗糙度为 $Ra1.25\sim 5\mu\text{m}$ ($\nabla 5\sim 6$)；最大厚度在 0.06mm 以内的其粗糙度为 $Ra6.3\sim 3.2\mu\text{m}$ ($\nabla 4\sim 5$)；强化生产率约 $0.25\sim 0.5\text{cm}^2/\text{min}$ 。如果充分发挥强化机的工艺性能，并配以刃磨、研磨等工艺，就能够在工业生产中获得广泛的应用。

几年来的应用表明，电火花强化工艺应用在以下几方面能够取得明显的技术经济效果。

1) 模具强化。冷冲模、压弯模、拉伸模、挤压模、压铸模和某些热冲、热锻模具，经强化后可提高寿命 $0.5\sim 2$

倍。

2) 刀具强化。车刀、刨刀、铣刀、钻头、绞刀、拉刀、推挤刀、丝锥和某些齿轮刀具，强化后能提高使用寿命1~3倍；用于加工韧性、高强度材料的刀具，强化效果更为显著。

3) 机器零件强化。易摩擦磨损的机器零件，如机床导轨、工夹具、导向件、滚轮、凸轮等，强化后可延长使用期限。

4) 磨损件微量修补。量具（游标卡尺、千分尺、塞规、卡板等）、机械零件（轴颈套筒、机床导轨、夹具等）和模具，在磨损超差之后，利用电火花强化能使工件表面微量增厚的作用，可以进行微量修补。

此外，使用强化机上配置的附件和极性开关，可以对工件进行电火花加工，用于取出折断的丝锥、钻头，在淬硬工件上加工小孔。

二、工艺方法

应用强化工艺的时候，应该重视强化前的准备、强化方法、强化后处理和强化工件的使用等四个方面。当然，强化方法是强化工艺的重要环节。

1. 强化前的准备

(1) 了解工件的性质和要求

首先要了解工件的材料、硬度、工作表面或刃口的状况、工作性质和经强化后希望达到的技术要求，以便确定是否可以采用电火花强化工艺。

就材料来说，一般碳钢、合金工具钢、铸铁等黑色金属材料通常是可以强化的，但其强化层的厚度是有差别的，合

金钢比较厚，碳钢次之，铸铁最薄。而有色金属，如铝、铜等是很难强化的。如果用硬质合金电极强化铝或铜，将使强化表面遭到不同程度的破坏。因此这类材料的工件是不宜采用该工艺的。

对于刀具、模具等工件来说，本身要经过淬硬处理使其具有合格的硬度，电火花强化不可能代替热处理。虽然硬度稍低的刀具、模具经强化也能起一定补救作用，但硬度很低时，强化也是无效的。

强化层虽然比较薄，但在许多情况下， $10\sim 20\mu\text{m}$ ，甚至几 μm 就能起良好的作用。然而需要强化的表面如果已经严重缺损，就无法采用强化的方法进行强化和修复。比如，冷冲模具的配合间隙如果超差已达 0.1mm 以上，用D9110 A型强化机就不能使其修复；磨损量在 0.06mm 以上的零件，即使用D9130也很难修复；而对于要求粗糙度较细的量具，修复量就更小了。

此外，粗糙度要求很细的工件，例如，薄片材料的冲模粗糙度要求 $Ra0.4\mu\text{m}$ 以下（光洁度 $\nabla 8$ 以上），而且配合精度要求高，这时就要根据情况仔细考虑，否则，将适得其反。

总之，电火花强化工艺是有一定的使用范围的，必须根据工件的技术要求慎重选用。

（2）确定强化部位

模具、刀具和机械零件在使用中由于磨损以至于报废，但是磨损通常不是发生在整个工件，而只是工件的局部。因此利用电火花强化工艺的局部处理特性，就能对提高这些工件的使用寿命收到事半功倍的效果。

一般说来，强化的部位就是工件最易磨损的部位。比如，

模具和刀具的刃口，机械零件的工作面等等。不过也要根据工件的性质和状况来分别处置。

冲压模具通常是强化凹、凸模的刃口，即构成凹、凸模刃口的端面和侧面。但是遇到凹模型腔狭窄的地方，电极不易深入，强化侧面就有困难，这时只得强化端面。如果为保持刃口锋利，往往在强化之后要刃磨一次，这时端面就不必强化了。当模具上只是部分型面发生磨损时，则只要强化易磨损的部位就能获得效果。C62 A 型敞车的下侧门、中门和侧柱等大型压型件的模具强化就是一个局部强化的例子⁽⁷⁾，这三种压型件的下料尺寸分别为： $1300 \times 986 \times 5\text{mm}$ 、 $1940 \times 820 \times 5\text{mm}$ 和 $2242 \times 432 \times 7\text{mm}$ 。压筋的深度为50mm左右。压模体积大、结构复杂，模具的制造和维修都比较困难。由于工件为中厚钢板，外形又比较复杂，所以模具在压型过程中受力条件恶劣，使用寿命短。特别是工件成型轮廓线条的接头和拐角等部位，一般在压制200~300件以后就会因模具塌陷或粘结杂物而使工件拉伤，严重时甚至使工件破裂。为改善模具的磨损，于是采用了D9130机仅对易损的拐角等型面进行局部强化。下侧门压模的生产统计表明，强化后压制10854件才出现拉伤，为强化前的36倍。

刀具强化也要根据刀具本身的性质和工件的性质选择强化部位，通常切削韧性材料的刀具以强化前刀面为主，切削脆性材料的刀具可以前后刀面都强化。

(3) 清洁强化部位

工件表面的油污和锈斑会影响强化层的质量，应该用酒精、丙酮等溶剂去除油污、并用砂纸、油石等工具擦去锈斑。已使用过的模具还可以用微型砂轮磨平待强化表面上的伤痕或粘着物。强化后不再刃磨的刀具，要预先刃磨好所需的几何

角度。而待修复的量具有时要先将工作面研平。对于细小的零件，为减少强化时的热影响和变形，可以将零件与导热导电良好的衬物连接，零件和衬物相接的部分同样要进行清洁处理。

（4）选择设备和强化规准

对于要求较细粗糙度的中小型模具和刀具强化，以及量具的微量修复，通常选用D9105 A、D9110 A、D9110 B等小功率的设备；对粗糙度要求较粗而需要较厚强化层的大型工件的强化和修复，则可以选用D9130型强化机。

强化规准的选择也要根据工件对粗糙度和强化层厚度的要求。为了同时保证厚度和粗糙度，往往采取多规准强化的方法。比如，先用强规准强化，使表面有较大的增厚量；然后用中规准强化，使表面平整；最后用弱规准强化，以降低粗糙度。或者先用中规准强化，在表面形成一层保护层；再用强规准使强化层增厚；最后用弱规准精修。也可以用二种或者一种规准强化，只要能满足技术要求即可。

对于薄而小的零件和量具修复，一般不用强规准，以免产生变形或使粗糙度变粗。

冲裁模有配合间隙的要求。对于冲厚料的模具，因为原来的配合间隙较大，强化层的影响较小。但对于小间隙模具，强化层厚度就不能忽视。因此在选择规准时应该考虑到这一点。

根据已确定的强化部位可以算出强化的面积，又根据强化设备和规准能估计强化必须的工时。

（5）选择电极材料

以提高工作使用寿命为目的的强化，可以采用YG、YT、YW类的硬质合金作电极，经这类材料强化后的表面具有硬

度高、红硬性好和耐腐蚀等特点。目前最常用的是 YG8 硬质合金，这是因为这种材料的电火花强化性能比较好，强化层比较均匀。

以修复已经磨损的表面为目的的强化，则可以根据工件对硬度、厚度等的要求采用硬质合金或碳钢、合金钢、铜等材料作电极。

当强化机用于电火花加工，即对淬硬的工件打小孔或取出折断在工件内的丝锥、钻头工具时，用铜或黄铜电极能获得较稳定的加工状态，使加工的生产率提高。

（6）强化试验

在有条件的时候，或者当强化的工件材料比较特殊的情况下，最好用同样材料做成的试块进行强化试验，以便检验所确定的电规准、电极材料和强化时间是否恰当。如果试样的表面粗糙度、强化层厚度等未达到技术要求，就应该重新修订强化条件。

2. 强化方法

（1）安置设备、电极和工件

在进行强化操作之前，首先要安置好设备、电极和工件，检查各部分的引线是否连接牢固，工件吸铁与工件吸合是否紧密、导电是否良好。然后试验各档规准是否正常。最后将极性开关和规准开关调整在要求的位置。

（2）调整电极与工件强化表面的夹角

在操作中，电极与工件强化表面必然形成一个夹角 β （图 6-1），这个夹角的大小要视加工的条件、振动器的性能和工件的型面形状随时予以调整，以期获得稳定的火花放电和均匀的强化层。比如，在机械强化的条件下， β 角比较大，以至与工件表面垂直。这样，电极电蚀之后向工件进给比较

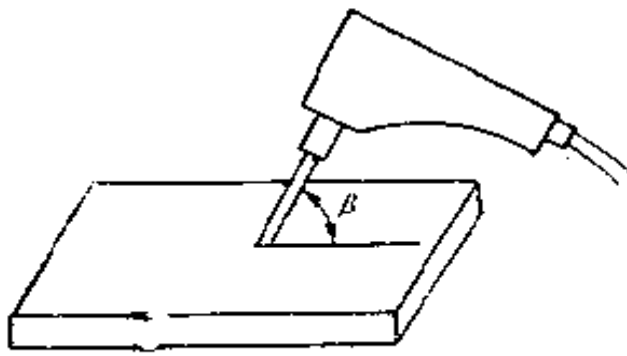


图6-1 电极与工件强化表面的夹角

小会使电极对工件的挤压力和回弹力减小，将影响强化层的质量。

振动器的性能也是影响 β 角的一个原因。衔铁与铁芯之间的间隙的不一致性，使每把振动器最佳振动状态时的 β 角也有一些差别。

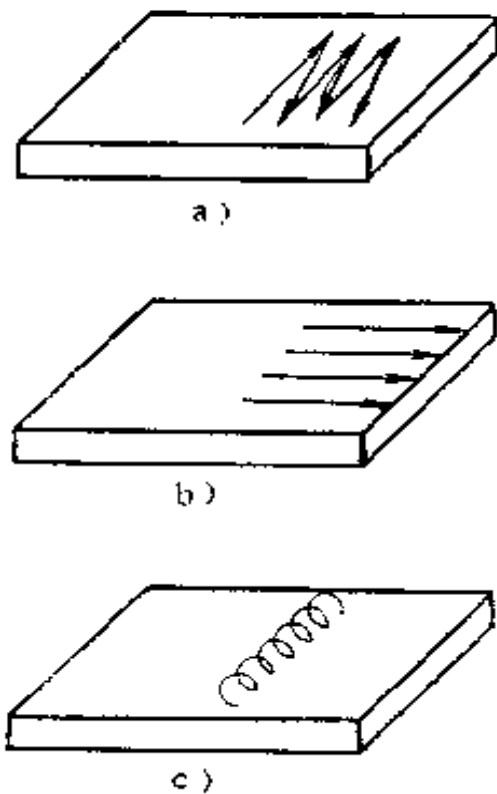


图6-2 电极移动方式

容易，且电极不易折断。常州拖拉机厂快档拨叉专用强化机就是按垂直方式设计的，强化质量很好。而手工操作时，一般 β 角较小，通常在 40° 至 70° 之间，便于观察和操作。夹角过

尤其是工件型面的多样化，操作者不得不随时变换电极的角度。例如强化窄槽的侧面时， β 角只得很小。

(3) 电极移动方式和速度

电极移动的方式可以多种多样，图6-2中所示的是其中的几种。图a是电极沿强化表面来回移动，相邻两条强化带应该紧密相接。要注意在转向的地方电极不要停留太久，以免烧伤。图b是单方向移动，同样要求相

邻强化带紧靠在一起。图c是电极作螺旋运动，每个螺旋之间也要相互靠紧。表面强化过一次之后可以换一个方向再强化，直到强化层均匀、细致为止。

电极移动的速度与规准有关，可以按照最佳比强化时间来估算。比如，以比强化时间为 $3\text{min}/\text{cm}^2$ 的规准为例，如果打算在 3min 内强化三次，第一次的时间宜长一些，假定是 1.5min ，则电极的移动速度大约是 $4\sim 5\text{cm}/\text{min}$ 。接下去的二次强化主要是使强化层均匀。电极移动速度可以快一些。粗规准强化之后，用精规准精修时的电极移动速度也可以适当快一些。总之，操作一定要细心，移动速度要均匀，长时间停留在一个部位，或者电极在工件表面一划而过，都不能收到良好的效果。

(4) 刃口的保护

强化冷冲模具和刀具等工件时必须保护好刃口。由于电火花放电使刃口形成月牙形的放电凹坑，它将影响刃口的直线度和锋利性。放电能量越集中，或者电规准越强，形成的放电凹坑也越大，使刃口的切削性能明显降低。其结果非但不能提高工模具的使用寿命，相反地将使寿命降低，工件加工质量劣化。保护刃口的方法之一就是刃口部位不要用强规准强化，并且不要使电极正对刃口放电。在操作中如果出现电极与刃口之间的强烈放电，就要注意改变电极的角度和移动方向。保护刃口的另一种方法就是在强化后再进行刃磨。

(5) 内角的强化

冷冲模具往往有些尖锐的内角，用平头的电极强化不能达到夹角部分（图6-3 a）。这时应该使电极端面形成一个斜面，如图6-3 b所示，这样就能强化到接近夹角的部位。形成斜面的方法之一是将电极用砂轮修整。这种方法的

缺点是修整次数多,工时和材料都有浪费。最简便的方法是在强化平面时使电极形成斜面,然后用来强化内角,如此交替强化,就不致于使工时和材料浪费了。

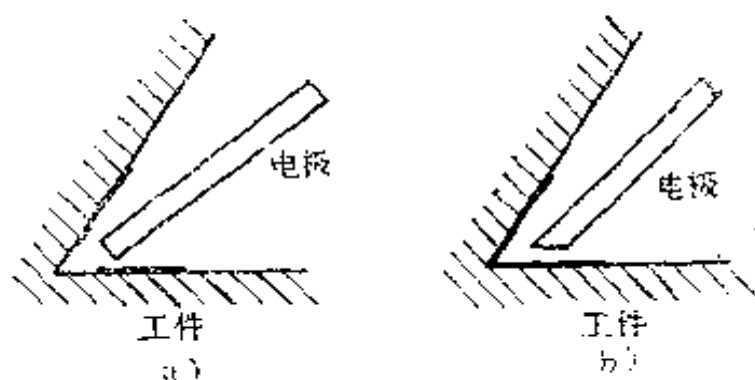


图6-3 内角强化

(6) 去除疵点

在强化不当,或者电极材质不纯的时候,强化表面往往出现明显高出的强化点,影响强化表面的精度和粗糙度。这时可以使用设备上的极性开关,使工件接正极,电极接负极,在空气中进行放电来去除这个高点。然后,再用精规准修平。这个方法只能作为不得已时的补救措施,不可经常采用,否则将使加工表面粗糙度变粗和强化层质量明显降低。

3. 强化之后的处理

(1) 表面清理

强化结束之后,要用干净的棉纱轻轻揩拭强化表面,去掉电蚀产物和沾着的污物,个别污垢严重的地方可以用橡皮擦拭,使强化层清晰显现,以便观察。

(2) 表面质量检查

首先用肉眼观察强化表面的粗糙度和均匀程度。如存在未强化到的原机加工表面或个别突出的高点,就应及时修

整。如果用25倍左右的放大镜观察，更能清楚地看出表面放电凹坑分布是否均匀。

然后，用千分尺等量具检测强化层的厚度，特别是对有配合要求的工件，比如冷冲模具，要仔细检测配合间隙。

当必须了解强化层的硬度时，通常是用同种材料强化后做成金相试样，用显微硬度计测量强化层的横截面，如图6-4a所示。因为强化层很薄，不能用大载荷，尤其是图6-4b所示的测量方法，不能获得正确的结果。

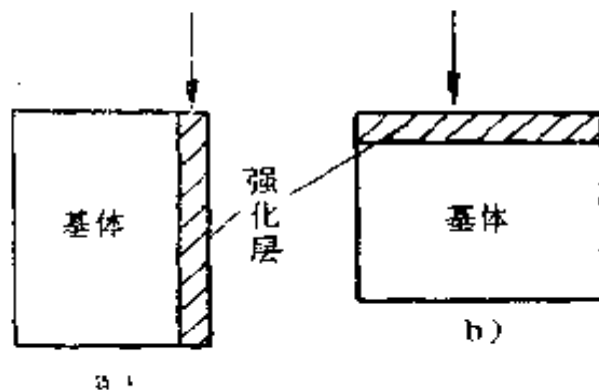


图6-4 测量显微硬度时的加载方向

在批量强化的情况下，也可用抽检的方法检测强化层的硬度、厚度和金相组织。

(3) 研磨和刃磨

一般，粗加工或半精加工的刀具和冷冲模，电火花强化后即可使用。但是有些工件在强化后必须经过研磨和刃磨才可使用。例如：修复量具时，在强化后应该进行研磨；刀具强化后可用细粒度的金刚石油石修磨去毛刺，以降低粗糙度，但研磨量要小，以保证强化层的厚度；为使模具刃口锋利，也可以经刃磨后使用。沈阳电缆厂的铜线圆扒皮模强化就是其中的一个例子。起初对圆扒皮模的内锥面和外锥面磨削后进行

强化，由于不能保持刃部的锋利，结果扒不下皮，或者铜线表面有划伤。后来改进了强化工艺，只对外锥面进行粗、中、精三次强化，然后进行内孔磨削。这样既保证了锋利的刃部，又保证了强度和耐磨性，使圆扒皮模的寿命从1t/块提高到2~3t/块。可见，在某些场合下，刃磨还是必不可少的。

(4) 回火处理

在有条件的情况下，对强化的模具进行回火处理，以消除强化引起的表面层拉应力，能提高模具的使用寿命。

4. 工件强化后的使用

(1) 模具配合间隙检查和试模

有配合要求的模具，在强化之前要测量各部的间隙，以便确定是否可以强化以及强化部位和电规准。强化后必须进行仔细的测量。因为强化表面增厚，致使配合间隙缩小。如果配合间隙超出公差范围，将影响模具的使用寿命和冲件质量，严重时甚至使模具报废，所以必须进行间隙检查和试模。

强化刃口侧面的冷冲模，使用中刃口变钝之后，可以象未强化的模具那样刃磨后继续使用。而热锻模等型腔模具可以在强化层未完全磨损的情况下再次强化，能提高模具的使用寿命和工件精度。

(2) 刀具工况的调整

经强化的刀具的使用工况（切削深度、进给量、切削速度等）可以与未强化刀具相同，但往往改变工况能取得更好的效果。图6-5便是其中之一例，其中图a是 $\phi 26$ 麻花钻强化前后钻削时机床驱动电机的工作电流，图b是 $\phi 17$ 麻花钻的工作电流。加工件同是HT-00铸铁垫块，钻削深度115mm，

进给量 0.40mm/r 。钻头的几何参数(图6-6)同为: $2\theta = 120^\circ$, $2\theta' = 70^\circ$, 横刃角 $\xi = 65^\circ$, 横刃长 1mm , 分刃长 3mm , 后角 18° , $l = 3 \sim 4\text{mm}$ 。其区别在于图b的主轴转速比图a高, 切削载荷反而减小。由此例可见, 强化刀具提高切削速度是有利的。

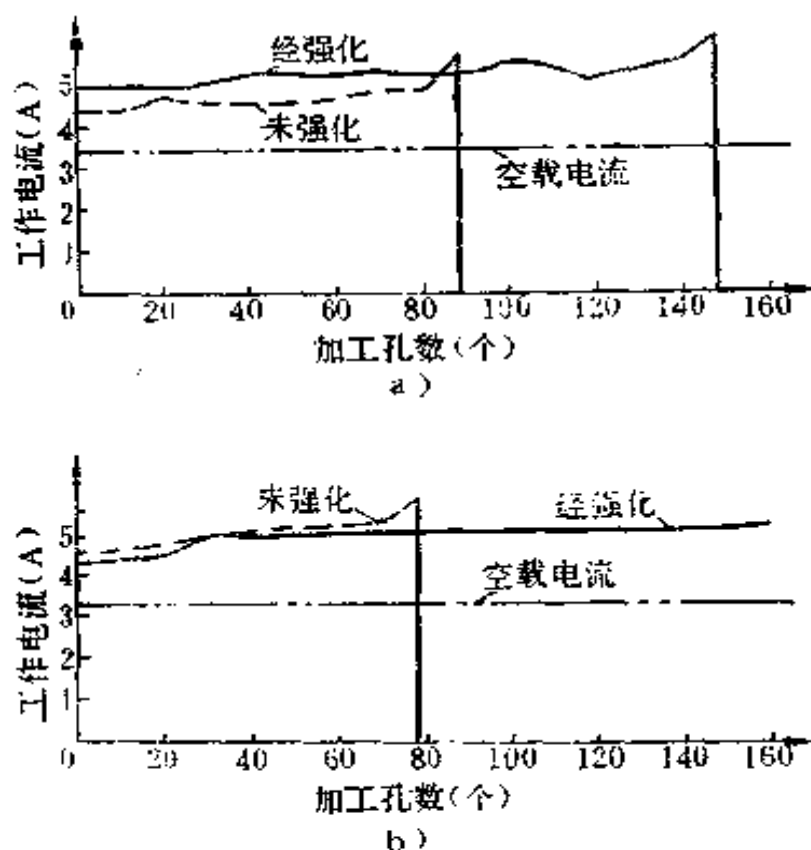


图6-5 钻削时驱动电机的工作电流

(3) 做好使用记录

如上所述, 电火花强化虽然是一项操作简便的表面处理工艺, 但是强化是否有效与强化前的准备、强化时的操作方法、强化后的处理以及强化工件的使用工况调整等等环节有着密切关系, 因此, 每次采用强化工艺时, 详细记录工件和电极的材料、工件类型和参数、强化规准、使用工况和使用效果, 对分析强化效果和改进强化工艺是很有好处的。

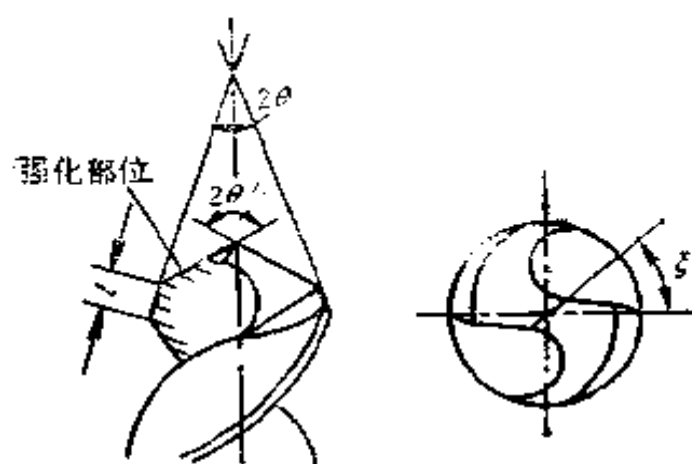


图6-6 钻头几何参数

第七章 模具强化及其应用

模具是产品生产的重要工具，随着产品更新期的缩短和新产品的开发，模具的需要量成倍地增长。而且在大批量生产中，又需要延长模具的使用寿命。因此，缩短模具的制造周期和提高模具的寿命是发展产品的重要条件。虽然硬质合金模具能够延长使用寿命，但是模具制造周期长，工艺要求高，而且应用也有一定限制。所以目前大量使用的仍然是以碳钢和合金钢模具为主。这些材料的热处理硬度通常在HRC 60左右，在使用中容易磨损。如果用YG、YT类的硬质合金作电极强化模具的易磨损部位，将使模具表面的显微硬度提高到HM1100以上，并且具有红硬性，能够使模具寿命提高0.5~2倍。

模具的使用寿命与许多因素有关，比如，模具结构、模具材料及热处理、制造精度、使用状况等等。在其他条件相同的情况下，改变材料的材质和金相组织，或者通过热处理来提高硬度和耐磨性，往往能使模具寿命明显地延长。

模具损坏的原因当然不仅仅由于磨损，但是，耐磨性的优劣是模具寿命长短的重要标志。例如，冲裁模具的凹、凸模刃口部分磨损之后，工件就要产生毛刺，当毛刺超出规定的要求就要卸模，对凹、凸模刃口进行刃磨。一副模具刃磨的次数是有限的，当刃磨到凹凸模配合间隙超差时，模具就报废了。因此模具的耐磨性越好，每次刃磨后的冲次越多，则工件的产量越大，说明该副模具的寿命也越长。又如，拉

延模的磨损主要发生在凹模模口凸缘部分和圆角部分，磨损将使间隙超差，引起毛坯起皱，严重时就不能再使用。所以，提高模具的耐磨性是延长模具使用寿命的重要途径。

在第三章中已经谈到，经电火花强化处理的合金钢表面能获得具有高硬度和红硬性的特殊金相结构的强化层，它的耐磨损性能是未强化时的几倍。因此，将这种工艺施用在模具刃口或其他易损部分时就能延长模具的使用寿命，并且减少修模次数，提高生产效率。

一、模具强化工艺

1. 模具材料

冷冲压模具常用材料有45、T8 (T8A)、T10 (T10A)、T12 (T12A)、GCr15、CrWMn、9SiCr、Cr12、Cr12MoV、W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2等；热锻压模具常用材料有45、40Cr、5CrMnMo、5CrNiMo、3Cr2W8V等。这些材料的化学成分见表7-1。

由于各种材料的导热系数、比热、熔点、沸点等物理性能以及在熔融状态下与电极材料相互熔渗和化学反应的难易有所不同，因此电火花强化层的金相结构、厚度、硬度等也各有差别。比如，用同样的规准强化45钢的强化层厚度不如CrMoV等合金钢，在考虑模具配合间隙时就应该预先估计到这一点。因此，在模具强化之前应该知道模具所用的材料。

电火花强化只能在工件表面形成极薄的(0.02~0.03 mm)一层强化层，所以各类需要强化的模具都必须具有足够的强度和硬度，也就是说材料应该按照常规的要求经过锻打、热处理等工序，否则将影响电火花强化的效果，甚至强

化是无效的。

表7-1 模具材料化学成分

| 钢 号 | 化 学 成 分 (%) | | | | | | | |
|------------|---------------|---------------|---------------|----------------|---------------|-----------------|---------------|---------------|
| | C | Si | Mn | Cr | Ni | W | Mo | V |
| 45 | 0.42~ 0.50 | 0.17~ 0.37 | 0.50~ 0.80 | | | | | |
| T8 (T8A) | 0.75~ 0.84 | ≤0.35 | ≤0.40 | | | | | |
| T10 (T10A) | 0.95~ 1.04 | ≤0.35 | ≤0.35 | | | | | |
| T12 (T12A) | 1.15~ 1.24 | ≤0.35 | ≤0.35 | | | | | |
| GCr15 | 0.95~ 1.05 | 0.15~ 0.35 | 0.20~ 0.40 | 1.30~ 1.65 | | | | |
| CrWMn | 0.90~ 1.05 | ≤0.35 | 0.80~ 1.10 | 0.90~ 1.20 | | 1.20~ 1.60 | | |
| 9SiCr | 0.85~ 0.95 | 1.20~ 1.60 | 0.30~ 0.60 | 0.95~ 1.25 | | | | |
| Cr12 | 2.00~ 2.30 | ≤0.40 | ≤0.35 | 11.5~ 13.00 | | | | |
| Cr12MoV | 1.45~ 1.70 | ≤0.40 | ≤0.35 | 11.00~ 12.5 | | | 0.40~ 0.60 | 0.15~ 0.30 |
| W18Cr4V | 0.70~ 0.80 | ≤0.40 | ≤0.40 | 3.80~ 4.40 | | 17.50~ 19.00 | | 1.00~ 1.40 |
| W6Mo5Cr4V2 | 1.05~ 1.20 | ≤0.60 | ≤0.40 | 3.80~ 4.40 | | 5.50~ 6.75 | 4.50~ 5.50 | 1.75~ 2.20 |
| 40Cr | 0.37~ 0.45 | 0.20~ 0.40 | 0.50~ 0.80 | 0.80~ 1.10 | | | | |
| 5CrMnMo | 0.50~ 0.60 | 0.25~ 0.60 | 1.20~ 1.60 | 0.60~ 0.90 | | | | |
| 5CrNiMo | 0.50~ 0.60 | ≤0.35 | 0.50~ 0.80 | 0.50~ 0.80 | 1.40~ 1.80 | | 0.15~ 0.30 | |
| 3Cr2W8V | 0.30~ 0.40 | ≤0.35 | ≤0.40 | 2.20~ 2.70 | | 7.50~ 9.00 | | 0.20~ 0.50 |

注：钢号后加“A”，表示高级优质钢，即S≤0.02%，P≤0.03%。

2. 模具强化部位

电火花强化的目的是提高模具工作表面的硬度和耐磨性。所以对于各类模具，易磨损的部分都可以作为强化的部位。现举以下几种模具通常强化的部位作为示例。

(1) 冷冲模

冷冲模具在冲裁过程中受到冲件的反作用力和卸料、顶料时的摩擦力，在这些力的作用下，使凹、凸模的刃口附近产生磨损。所以，冷冲模的主要强化部位是包围刃口的侧面A和端面B(图7-1)。通常 a 取 $3 \sim 5 \text{ mm}$ ， b 取 3 mm 左右。强化侧面的模具间隙将比原来的缩小，这一点必须时刻留意。

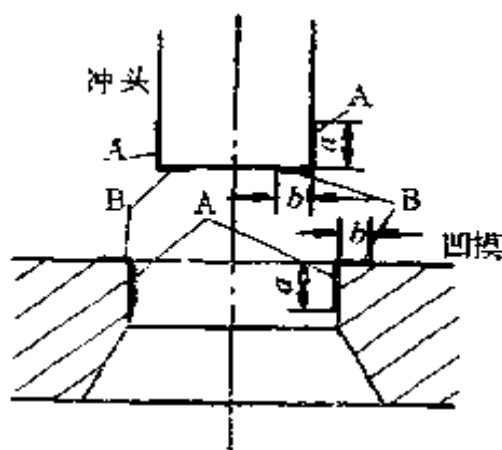


图7-1 冷冲模强化部位

根据不同的模具型腔和要求，又有三种不同的强化方法。

第一种方法是A、B两面都强化，一般的薄板材落料模均可采用这种方法。

第二种方法是只强化A面，强化之后将端平面刃磨一次，磨削量约 0.2 mm ，以保持刃口锋利。当刃口变钝

之后，经第二次刃磨即可继续使用，而无须再强化A面。

第三种方法是只强化B面，而不强化A面，因此不影响模具配合间隙，适用于窄槽等一些无法强化侧面的型腔，或者配合间隙已经很小，不允许再强化的模具。

(2) 切断模

切断模的工作情况与冷冲模相似，它的强化部位也是包围刃口的两面，也可以只强化其中的一面。

(3) 压模

压模用于压型件的加工，磨损主要发生在工件对模具摩擦作用较大的部位，例如轮廓线的接头、转角或压弯成型部分。所以大型的压模只需要强化这些部位即可，这样能节省强化工时和材料。而小型的压模可以强化整个工作面。

(4) 拉延模

拉延模的磨损主要发生在凹模模口的托料部分和圆角部分，一般只需要强化这些部分。凸模的棱角部也可以强化，以保持零件的内圆角半径精度。

(5) 卷边模

比如桶边挤压模，食品罐盒封底卷边模等，在使用中对模具的工作面挤压摩擦，使模具磨损，甚至出现凹槽。所以强化的主要部位是工作表面。

(6) 推挤模

材料推挤过程中，模具工作表面易磨损的部位。

(7) 冷镦模

强化凹模模孔的前端一定高度或成型表面。

(8) 锻模

主要强化材料流动较大易产生磨损的部位和毛边槽的桥部，也可以强化整个工作表面。

此外如勒光模、压铸模、热压模等等，可以对整个工作表面强化。

3. 常用电极材料

模具强化的常用电极材料有YG8、YG6、YT15等硬质合金，所形成的强化层的显微硬度高，耐磨性好。铁—铬—铝合金也可作为电极材料，但因其熔点和硬度都较低，并且，在放电过程中常发生粘结而造成短路，表面粗糙度较粗。

电极的消耗速度与被强化的工件材料、电规准以及电极本身的物理特性、氧化性能有关。易氧化的材料不宜作为电极，这不仅是由于电极容易氧化而消耗，而且氧化物直接影响强化层的质量。

电极的直径对强化层的形成速度和质量有一定影响。强

规准应该用大直径的电极，而弱规准可以用小直径的电极。如果强规准用小直径电极，在强化过程中电极很容易过热氧化，使强化表面变得异常粗糙，这一点在强化模具时是必须注意的。

4. 电规准选择

D9110型电火花强化机放电电容量有1、5、25、65 μ F四种可供选择，D9130型电火花强化机放电电容量有20、40、80、160、220、300 μ F六种可供选择。选择的原则是：达到较理想的强化层厚度、硬度和粗糙度。如果对模具表面有较高要求，则可以采取多次电火花强化的工艺，即第一次电容，量选大些，相当于粗加工，然后，第二次用小电容量（相当于精加工）。

模具通常要求较细的粗糙度，刀口模更要保持刃口的锋利，因此强化模具的电规准一般采用中、精规准，只有当粗糙度要求不细的情况下才选用粗规准。所以D9110型强化机能满足一般中小型模具强化的需要，而D9130型强化机更适用于大型的，或者允许强化后修整的模具。

5. 强化操作前的准备

操作前的准备按以下几项进行：

- 1) 按模具要求确定型腔表面的强化部位与面积。
- 2) 凡强化的模具必须经过热处理（淬火、回火），使模具达到需要的硬度。
- 3) 清洗模具的强化部位，不允许有油垢、氧化皮和锈斑。
- 4) 按模具要求选择工艺参数。

6. 强化操作

操作步骤如下：

- 1) 手持振动器与模具非刃口部位接触（最好是与非成

型面接触)，查看一下放电电流大小。

2) 用一定压力使电极与模具强化表面接触，电极与模具表面成 $45^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 的倾角。先强化远离刃口的部分，逐渐向刃口靠近。应当避免先在刃口处放电，否则刃口处放电强度大，会使刃口熔化，形成凹陷及变钝。

3) 移动电极。移动时，速度要适当，力求均匀缓慢且无遗漏。这样保证强化层质量均匀。

4) 用手的感觉（即压力）和听声音辨别振动器弹簧及振动部分的振动情况。如振动微弱、电容器放电间隔与电极移动不匹配，强化层质量就要降低。操作时用力太大，将振动器上电极压紧在模具上，电容器只能不连续地放电，也影响强化层质量。

一般开始时轻压振动器，然后逐渐增加到获得一定的放电电流为止。

5) 掌握强化时间。强化时间要合适，时间过短，强化层薄而不均匀；过长不但强化层不能增厚，相反由于过多的粘附、迁移，而使强化层变得松脆，内层回火现象严重。试验表明，当比强化时间达到 5 min/cm^2 时，强化层硬度将从HM1100~1400降至HM1000以下。

D9130型电火花强化机用YG8作电极材料，电极尺寸为 $\phi 3 \sim 5 \text{ mm}$ ，最佳强化生产率为 $0.7 \sim 2 \text{ cm}^2/\text{min}$ ，而D9110型电火花强化机用YG8作电极材料，电极尺寸为 $\phi 1.2 \sim 2.5 \text{ mm}$ ，最佳强化生产率为 $0.4 \sim 0.7 \text{ cm}^2/\text{min}$ 。

二、模具强化后的处理

1. 研磨

电火花强化层的表面粗糙度通常是 $Ra3.2 \sim 1.6 \mu\text{m}$ （光

洁度 $\nabla 5 \sim 6$)，同时刃口部分也有不同程度的电蚀，对各类需要更细粗糙度的模具，或者要求刃口锋利的模具，可以用金刚石油石或金相砂纸轻轻研磨强化层。但必须注意，因为强化层较薄，研磨余量是很有限的。

2. 刃磨

冷冲模具刃口侧面强化之后，可以先刃磨一次，这样刃口能保持更好的锋利。

3. 回火

一般放电后由于急热急冷，在模具强化部位有较大的拉应力，对模具的耐磨性有影响。故电火花强化后的模具进行去应力处理对提高模具使用寿命有明显效果。去应力温度比材料通常回火温度低 $30 \sim 50^{\circ}\text{C}$ （见表7-2）^{〔8〕}。

表7-2 模具电火花强化后的去应力处理

| 钢 号 | 淬火后回火温度($^{\circ}\text{C}$) | 强化后的去应力温度($^{\circ}\text{C}$) | 去应力时间(h) |
|---------|-------------------------------|---------------------------------|----------|
| T8~F12 | 160~180 | 130~150 | 2 |
| CrW Mn | 180~200 | 150~160 | 2 |
| Cr12 | 220~250 | 180~200 | 2 |
| W18Cr4V | 540~560 | 500~520 | 2 |
| 3Cr2W8V | 550~570 | 520~530 | 2 |
| 5CrMnMo | 480~520 | 430~450 | 2 |

4. 重复强化

经强化的模具使用到强化层未完全磨损之前即行再次强化，能对模具工作表面起保护作用，并延长其使用寿命。

三、模具强化实例

1. 定子双槽模（图7-2）

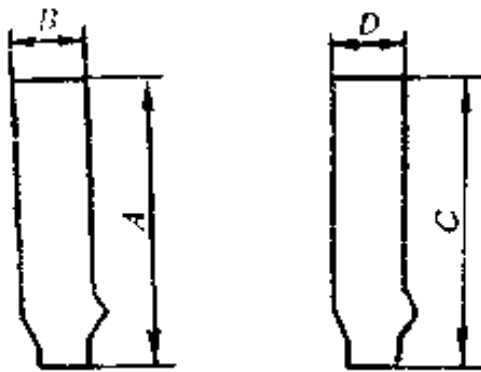


图 7-2 定子双槽模

模具材料：Cr12。

工件材料：0.5mm硅钢片。

强化部位：刃口侧面，
强化高度 4 ~ 5 mm。

强化规准：粗加工：电
压 50V，电容 20 μ F；精加
工：电压 40V，电容 2 μ F。

在强化前，刃口部位先用汽油洗净，稍待片刻再行强化。

强化后因涂层增厚使配合间隙减小，故设计模具时要考虑该因素。表 7-3 中列出了模具强化前后尺寸精度变化测量值。

表 7-3 强化前后尺寸精度变化测量值

| 部位尺寸 (mm) | | A | B | C | D |
|-------------|------|--------|--------|--------|--------|
| 强 化 前 | 凸 模 | 48.035 | 11.027 | 48.035 | 11.025 |
| | 凹 模 | 48.125 | 11.117 | 48.125 | 11.105 |
| | 双面间隙 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.08 |
| 强 化 后 | 凸 模 | 48.050 | 11.037 | 48.050 | 11.038 |
| | 凹 模 | 48.110 | 11.102 | 48.110 | 11.095 |
| | 双面间隙 | 0.06 | 0.065 | 0.06 | 0.057 |

使用效果：未处理前每刃磨一次平均使用寿命为 5 万次，经表面强化后，达到 20 万次，提高使用寿命 3 倍。

2. 冲头 (图 7-3)

模具材料：W18Cr4V。

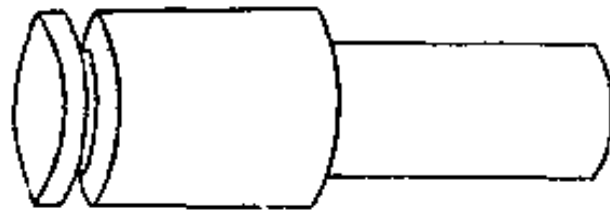


图 7-3 冲头

使用部位尺寸： $\phi 16 \times 30\text{mm}$ 。

热处理状态：淬火+回火

(1) 强化部位及面积

冲头冲孔使用部分是 $\phi 16 \times 30\text{mm}$ 这一段的 $2/3$ ，因此，电火花强化就选取从端面至 20mm 处，强化部位的面积为 $\pi \times 1.6 \times 2 \approx 10\text{cm}^2$ 。

表 7-4 冲头电火花强化工艺参数

| | | |
|-------|-------------|--------------------------|
| 第一次强化 | 电容量 | 65 μF |
| | 电极材料 | YG8 |
| | 电极尺寸 | $\phi 2\text{mm}$ |
| | 电极与模具放电时的角度 | $45^\circ \sim 60^\circ$ |
| | 强化时间 | 20min |
| 第二次强化 | 电容量 | 5 μF |
| | 电极材料 | YG8 |
| | 电极与模具放电时的角度 | $45^\circ \sim 60^\circ$ |
| | 电极尺寸 | $\phi 2\text{mm}$ |
| | 强化时间 | 30min |

(2) 电火花强化工艺

使用D9110A型强化机，分粗、精两次强化，其工艺参数见表 7-4。

(3) 电火花强化后去应力

电火花强化后所形成的强化层具有较大的拉应力，且密布显微裂纹。当强化的模具用于轻负荷锻压机械，冲薄小的有色金属和薄钢片时，其使用效果尚明显；当用于中、重负荷的锻压机械，冲较厚的钢板时，显微裂纹会缓慢扩展，模具寿命提高不太明显。所以，拉应力对模具寿命是有害的，必须用热处理方法加以消除。本例W18Cr4V钢电火花强化后的去应力工艺为：500~520℃，2h。

3. 薄铁片冲模（图7-4）

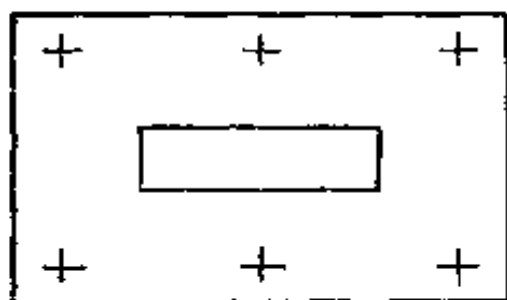


图7-4 薄铁片冲模

模具材料：T10。

使用部位尺寸：40
×15mm。

热处理状态：淬火
+回火。

（1）强化部位及
面积

薄铁片冲模在冲制
过程中刃口部位最易磨

损，因此，强化部位选取凹模端面刃口四周，宽度3mm，强化面积约3.7cm²

（2）电火花强化工艺

使用D9110A型强化机分两次强化，其工艺参数见表7-5。

（3）电火花强化后去应力

T10钢冲模去应力工艺为：160~180℃，2h。

4. 0.2mm铜片冲模（图7-5）

模具材料：Cr12。

使用部位：Π形型腔。

热处理状态：淬火+回火。

表7-5 薄铁片冲模电火花强化工艺参数

| | | |
|-------|-------------|-------------------|
| 第一次强化 | 电容量 | 65 μ F |
| | 电极材料 | YG3 |
| | 电极尺寸 | $\phi 2\text{mm}$ |
| | 电极与模具放电时的角度 | 45°~60° |
| | 强化时间 | 6min |
| 第二次强化 | 电容量 | 5 μ F |
| | 电极材料 | YG3 |
| | 电极尺寸 | $\phi 2\text{mm}$ |
| | 电极与模具放电时的角度 | 45°~60° |
| | 强化时间 | 8min |

(1) 强化部位及面积

此冲模热处理后经磨削发现型腔超差0.06mm,为此,对此模具不仅是刃口水平位置进行电火花强化,而且对刃口侧面也进行电火花修补,并且采用不同的工艺参数。修补部位面积约39cm²,强化部位面积约5.6cm²(强化宽度为3mm)。

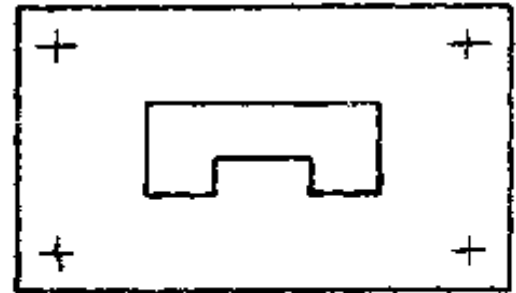


图7-5 钢片冲模

(2) 电火花强化工艺参数

修补使用D9130机,强化使用D9110A机,均分两次强化,其工艺参数见表7-6。

表7-6 钢片冲模电火花强化工艺参数

| 强化工艺参数 | | 修 补 | 强 化 |
|--------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| 第一次强化 | 电容量 (μF) | 220 | 65 |
| | 电极材料 | YG8 | YG8 |
| | 电极尺寸 (mm) | $\phi 4$ | $\phi 2$ |
| | 电极与模具放电时的角度 | $45^\circ \sim 60^\circ$ | $45^\circ \sim 60^\circ$ |
| | 强化时间 (min) | 60 | 12 |
| 第二次强化 | 电容量 (μF) | 20 | 5 |
| | 电极材料 | YG8 | YG8 |
| | 电极尺寸 (mm) | $\phi 4$ | $\phi 2$ |
| | 电极与模具放电时的角度 | $45^\circ \sim 60^\circ$ | $45^\circ \sim 60^\circ$ |
| | 强化时间 (min) | 60 | 12 |

(3) 电火花强化后去应力

Cr12钢去应力处理工艺为 $500 \sim 520^\circ\text{C}$, 2h。

5. 切断模 (图7-6)



图7-6 切断模下模

模具材料: T10A, 淬火硬度HRC60。

工件材料: KD91 铍杆材料, 热轧成型并经热处理回火。

强化部位: 上、下模刃口。

强化规准: 用YG8电极分三次强化。先用 $25\mu\text{F}$ 粗强化, 然后用 $5\mu\text{F}$ 强化, 最后用 $1\mu\text{F}$ 修整。强化表面用金相砂纸抛光。

6. 铝牙膏壳冷挤压模冲头 (图7-7)

冲头材料: Cr12MoV。

原先经常规热处理的冲头,在冷挤速率为48~56支/min时,工作8h后单边磨损12~15 μm 左右。生产约2~3万支铝牙膏壳后就要更换冲头,以保证铝牙膏壳的壁厚在0.11~0.125mm范围内。

强化规范:第一次用电容量72 μF ,电压28V,电流2A,强化时间约8min;然后用电容量25 μF 和5 μF 各强化1.5min左右,以降低表面粗糙度。

经强化后测得的单边白亮层厚度约为30~50 μm 。由于冷挤压模冲头的粗糙度要求 $Ra0.8\sim0.2\mu\text{m}$ (光洁度 $\nabla 7\sim 9$),故需进行精磨,单边约磨去5 μF 左右。部分经强化的冷挤压模冲头试验结果见表7-7。其中编号1是代表一组冲头,其强化层厚度和磨损情况基本相同。主要差别是强化后精磨量不同,所以磨损量也有上下。尽管如此,强化后的冲头寿命比未强化的冲头寿命可提高一倍以上。磨损后的冲头如能选配尺寸合适的凹模,则可继续使用,其寿命也可进一步提高。

编号2的冷挤压模冲头的原始尺寸为 $\phi 24.69\text{mm}$,强化后的尺寸为 $\phi 24.77\text{mm}$,精磨后的使用尺寸为 $\phi 24.68\text{mm}$,经两班使用,生产37200支牙膏壳后的冲头尺寸为 $\phi 24.66\text{mm}$ 。由此可以看出,虽然经精磨后把强化层都磨去了,但冷挤压模冲头的寿命仍然提高将近一倍。估计,这是由于过渡区所

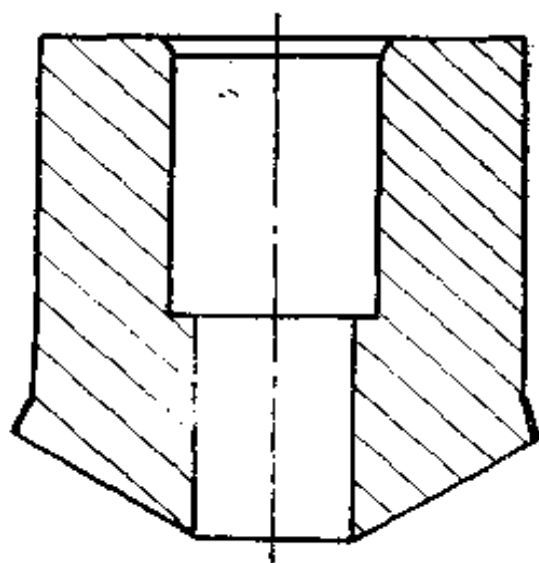


图7-7 铝牙膏壳冷挤压模冲头

表7-7 部分冷挤压模冲头试验结果

| 编号 | 电极类型 | 使用情况 (单边磨损量) | | |
|----|--------|-----------------|-----------------|-------------------|
| | | 第一班 | 第二班 | 第三班 |
| 1 | YG8 | 5 μm | 4 μm | 5~8 μm |
| 2 | YG8 | 5 μm | 5 μm | |
| 3 | YG8+石墨 | 近于零 | | |

起的作用。

编号3是经过YG8电极强化后, 又用石墨电极进行强化。可以看出, 经一班生产25110支牙膏壳后, 其磨损量极微, 但稍许有些椭圆度, 这可能是强化的不均匀性所造成的。

7. 合页65mm半自动连续卷管模

模具材料: Cr12热处理, 硬度HRC58~62。

冲件材料: B2F冷轧带钢, 厚度1.35mm。

连续冲制: 120件/min。

电极材料: YG8。

强化部位: 卷管模主R槽, 强化层厚度约0.05mm。

强化后刃磨一次可冲制5万件以上, 比未强化提高一倍多。

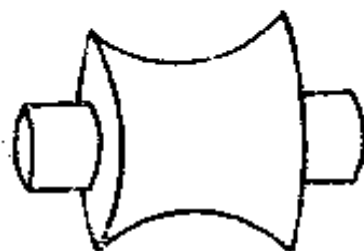


图7-8 热轧辊

100×40mm (整个双曲线圆柱面)

热处理状态: 调质。

(1) 强化部位及面积

热轧辊工作时整个双曲线圆柱面为工作部位, 因此, 强化面积约为150cm²。

8. 热轧辊 (图7-8)

模具材料: 40Cr

使用部位尺寸: $\phi 150 \times \phi$

(2) 电火花强化工艺

使用D9130型强化机,分二次强化,其工艺参数见表7-8。

表7-8 热轧辊电火花强化工艺参数

| | | |
|-------|-------------|-------------|
| 第一次强化 | 电容量 | 300 μ F |
| | 电极材料 | YG8 |
| | 电极尺寸 | ϕ 4mm |
| | 电极与模具放电时的角度 | 45°~60° |
| | 强化时间 | 150min |
| 第二次强化 | 电容量 | 40 μ F |
| | 电极材料 | YG8 |
| | 电极尺寸 | ϕ 4mm |
| | 电极与模具放电时的角度 | 45°~60° |
| | 强化时间 | 250 min |

(3) 电火花强化后去应力

热轧辊在热态下工作,其热处理为调质,即淬火+高温回火(600~650℃),去应力处理比回火温度低30~50℃。故40Cr热轧辊去应力处理工艺采用500~550℃,2h。

9. 热锻模(图7-9)

模具材料:5CrMnMo。

使用部位:凸起的面。

热处理状态:淬火+回火。

(1) 强化部位及面积

锻件在热锻模(外有模套限形)内塑性流动,剧烈摩擦型面,因此强化整个接触面。强化面积为环形(ϕ 150 \times ϕ 120mm)和阶梯圆台(ϕ 120 \times 15mm, ϕ 90 \times 15mm)面积

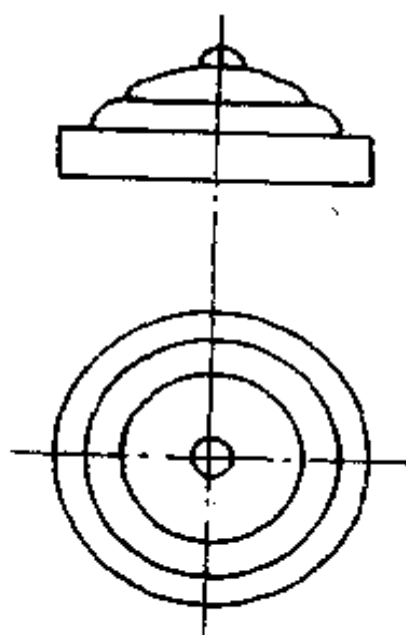


图 7-9 热锻模

之和,约 25cm^2 。

(2) 电火花强化工艺参数

使用 D9130 机,分二次强化,其工艺参数见表 7-9。

(3) 电火花强化后去应力

热锻模受冲击力的作用,模具内存在的拉应力危害极大,故必须进行去应力处理。去应力工艺为:

$430\sim 450^\circ\text{C}$, 2h。

表7-10列出了部分模具强化的使用效果,仅供参考。

表7-9 热锻模电火花强化工艺参数

| | | |
|-------|-------------|---|
| 第一次强化 | 电容量 | $300\mu\text{F}$ (面与面接触处用 $80\mu\text{F}$) |
| | 电极材料 | YG8 |
| | 电极尺寸 | $\phi 4\text{mm}$ |
| | 电极与模具放电时的角度 | $45^\circ\sim 60^\circ$ (小圆头部分可任意角度) |
| | 强化时间 | 60min |
| 第二次强化 | 电容量 | $40\mu\text{F}$ |
| | 电极材料 | YG8 |
| | 电极尺寸 | $\phi 4\text{mm}$ |
| | 电极与模具放电时的角度 | $45^\circ\sim 60^\circ$ (小圆头部分可任意角度) |
| | 强化时间 | 60min |

表7-10 模具电火花强化实例

| 厂名 | 模具名称 | 模具材料硬度 | 工件材质 | 强化部位 | 强化效果 | | 备注 |
|--------------|--------------------|---------------------|------------------|----------------|------------------|------------------|----------------------|
| | | | | | 强化前 | 强化后 | |
| 直兴电子器件 总厂 | 外引线冲模 | 硬度偏低 | | 凹凸模刃口 | | | 每件节约300元 |
| | 陶瓷热压件模 | | | 型芯部分 | | 提高寿命2倍 | 每件节约50元 |
| 常熟市扳手厂 | 扳手体切拔模 | 3Cr2W8V HRC49~51 | | 下刃口、上 表面和侧面 | 切2000次 | 切3000余次 | 工件温度 700℃ |
| 兴化橡胶制品 厂 | 35×56×12油 封骨架冲模 | 45 HB241 | A3,0.6~ 1.5mm | 刃口 | | 提高寿命2倍 | |
| 沈阳电缆厂 | 圆扒皮模 | | | 外稍面和 刃部 | 扒铜皮1t | 扒铜皮2~3t | 每月600套、年 节约2.16万元 |
| 柳州标准件厂 | M12切角模 | 9SiCrHRC55 ~58 | | 刃口 | 切300~500件 | 切7000~70000 件 | |
| | M12螺栓冷 墩下模 | T10HRC58~ 61 | | 模孔前端 10mm | 墩5000~10000 件 | 墩3~5万件 | |
| | M8冷墩螺帽 六角模 | CrWMn HRC58~61 | | 成形表面 | | 提高3~5倍 | |
| 北京化工制桶 厂 | 桶边挤压模 | | | 凹槽 | 1班 | 8班 | |

(续)

| 厂名 | 模具名称 | 模具材料硬度 | 工件材质 | 强化部位 | 强化效果 | | 备注 |
|----------|-----------|------------------------|----------------------|--------|-------------|---------------|----|
| | | | | | 强化前 | 强化后 | |
| 太原机车车辆厂 | 冷冲模 | T10A, HRC58~62 | A3 6mm | | | 5套模具平均提高3倍 | |
| 交城县五金厂 | 梅花扳手热压模 | 3Cr2W8V HRC50~54 | 40Cr | 易损部位 | 压3000件 | 压1000件 | |
| 秦州电工器材厂 | 40A主触头冲模 | | | | 冲件30kg | 100多kg | |
| 上海7426厂 | 十二角冲头 | W18Cr4V | | | 冲200件 | 冲500件 | |
| 上海第一压缩机厂 | 压缩机阀片夏式冲模 | T8A, T10A, Cr12MoV等 | 30CrMnSiA 50CrVA等 | 刃口 | 冲3000件 | 冲10000件 | |
| 天津打火机厂 | 外充成型拉伸模 | Cr12 | | 托料圆坡口面 | 拉5000件 | 拉15000件仍可使用 | |
| 天津制敏厂 | 钢印模 | | | | 冲字32h | 冲56h仍清晰 | |
| 天津钟表厂 | 二轮压簧压弯模 | Cr12 HRC 58~60 | | | 压10万件出现明显压痕 | 压35万件无压痕 | |
| 天津手表盘针厂 | 商标冲模 | Cr12 | | 端面 | 冲3000~5000次 | 冲1.5~1.6万次仍可用 | |

(续)

| 厂名 | 模具名称 | 模具材料硬度 | 工件材质 | 强化部位 | 强化效果 | | 备注 |
|----------|--------------------------|------------------|----------------|------|-------------|-----------|---------|
| | | | | | 强化前 | 强化后 | |
| 上海罗店无线电厂 | 管座翻连模 | | | 冲头端面 | 冲6万次 | 冲12万次 | |
| 苏州纺织机械厂 | 切断模 | T10, HRC60 | K091铰杆 | 刃口 | 切2000次 | 切3000次 | |
| 上海印铁制罐厂 | 封底卷边模 | T8, HRC60 | 铁皮 | | 卷5件出现凹槽 | 卷10万多件无凹痕 | |
| 成都量具刃具厂 | 推挤模 | | 钻头 | | | 提高1~5倍 | 已纳入正式工艺 |
| 武汉江岸机床厂 | 自行车零件冲模 | | B2F, 3mm | | 冲1万件 | 冲3万件仍可用 | |
| 山西电机厂 | J0 ₂ -6定子复式冲模 | Cr12 HRC58~62 | D22 0.5mm | 刃口 | 冲5000件 | 冲15000件 | |
| 泰州标准件厂 | 冷墩多工位冲型模 | | | 型腔 | 冲6000~7000件 | 冲2万件 | |
| 西安市合页厂 | 连续卷管模 | Cr12 HRC58~62 | B2F 冷轧带钢1.35mm | 主R槽 | 卷2.4万件 | 卷5万件 | |

(续)

| 厂名 | 模具名称 | 模具材料硬度 | 工件材质 | 强化部位 | 强化效果 | | 备注 |
|------------|-------------------------|---------------------|---------------|-------|-------------|------------|--------------|
| | | | | | 强化前 | 强化后 | |
| 南宁电影机械厂 | 山字铁芯模 | | | | 冲1万片 | 冲5.4万片 | |
| 吉林重型机器厂 | 洗衣机内筒卷边成型模 | 45钢 | F179洗衣机特制不锈钢板 | 刃口接触面 | 每次刃磨卷10~15件 | 卷100~150件 | |
| 上海航海仪器厂 | 铝压铸模 | 3Cr2W8V HRC58~62 | ZL104 | 型腔 | 压铸几件就粘模 | 压300余件无粘模 | 压铸温度 700℃ |
| 沈阳213机床电器厂 | A1805压弯模 | | 接触器导向件 | | 压6000件 | 压1.5~6.0万件 | |
| | 压弯成型模 | | 弹簧夹片 | | 压5000~7000件 | 压1~2万件 | |
| 重庆川江电机厂 | J0 ₂ 4-4定子冲模 | | | | 每班刃磨2次 | 两班刃磨1次 | |
| 泰州跃进机械厂 | 冲模 | Cr12 HRC60~62 | 薄板材 | | 15000冲次 | 55000冲次 | |

第八章 刀具强化及其应用

对各种碳素工具钢（T10A，T12A等）、合金工具钢（GCr15，Cr12，9SiCr等）及高速钢（W18Cr4V，M42等）刀具切削部分的刃口、刃面进行电火花强化处理，能够提高其耐用度（即刀具从刃磨后开始切削直到磨钝时为止的总切削时间）1~3倍甚至更多，并可实现对某些高硬度材料的加工。

本章将介绍刀具强化的原理、工艺特点、强化刀具的合理使用和生产实际中的应用实例。

一、刀具强化原理

金属切削刀具的耐用度主要取决于刀具材料的耐磨性和红硬性。同时也与刀具的结构和几何参数（角度、刃形等）有关。而刀具材料的耐磨性又是材料本身强度、硬度和组织结构等因素的综合反映。

各种工具钢及高速钢材料都具有较好的抗弯强度和冲击韧性；容易磨得锋利，刃口钝圆半径小于 $12\sim 15\mu\text{m}$ （图8-1）。因此，适于制造各种不易用硬质合金制造的、刃形复杂的刀具，如螺纹车刀、切断刀、成形车刀、铣刀、刨刀、钻头、拉刀、其他螺纹刀具及齿轮刀具等。但是，工具钢和高速钢材料的硬度一般为HRC62~65，红硬性在 $200\sim 600^\circ\text{C}$ 之间，不能用于加工硬度较高的材料。用高速钢（W18Cr4V）车刀切削中碳钢并保持刀具的耐用度为45~60min时，切

削速度只有 $30\text{m}/\text{min}$ 左右。

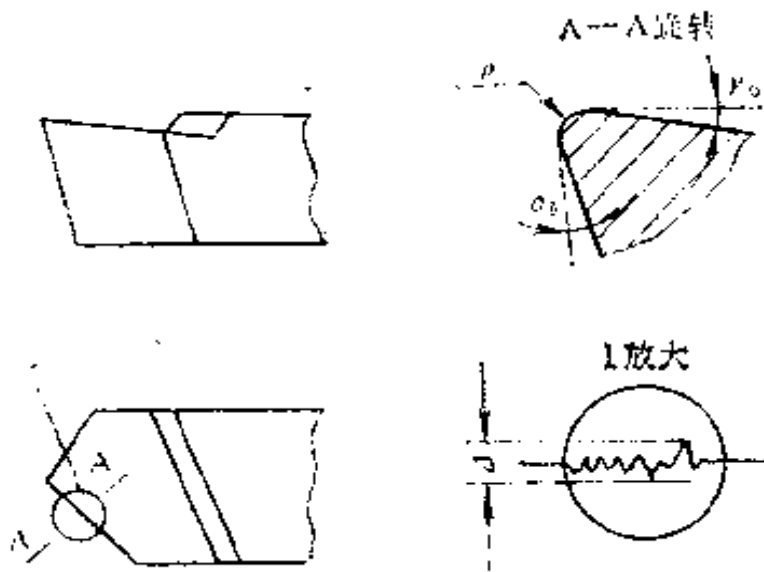


图8-1 工具钢刀具的刃口

各种工具钢和高速钢刀具的磨损都发生在工作刃口、刀尖附近的前刀面、后刀面以及副后刀面的小区域内(图8-2)。加工塑性材料时,磨损通常在前后刀面同时发生,而加工脆性材料时,磨损则主要发生在后刀面上。

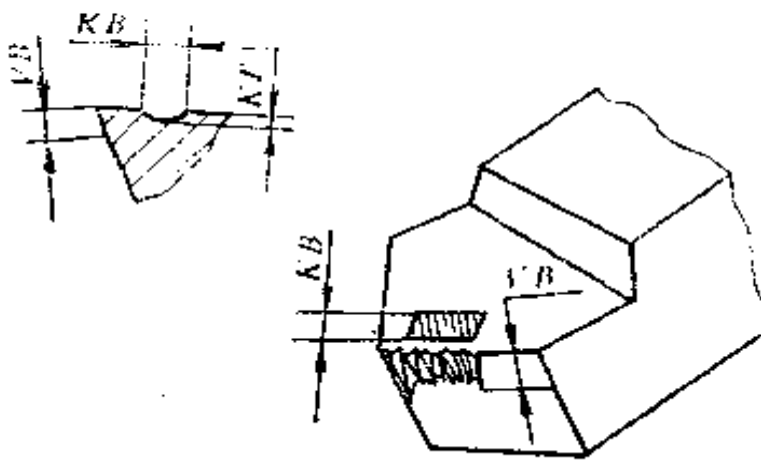


图8-2 工具钢刀具的磨损

各种工具钢和高速钢刀具的磨损原因主要是低速切削时的磨料磨损（即机械擦伤）和高速高温切削条件下的“相变”磨损（退火、卷刃等）。前者与刀具材料的硬度有关，而后者主要取决于刀具材料红硬性的高低。图8-3为温度对工具钢和高速钢刀具硬度的影响。

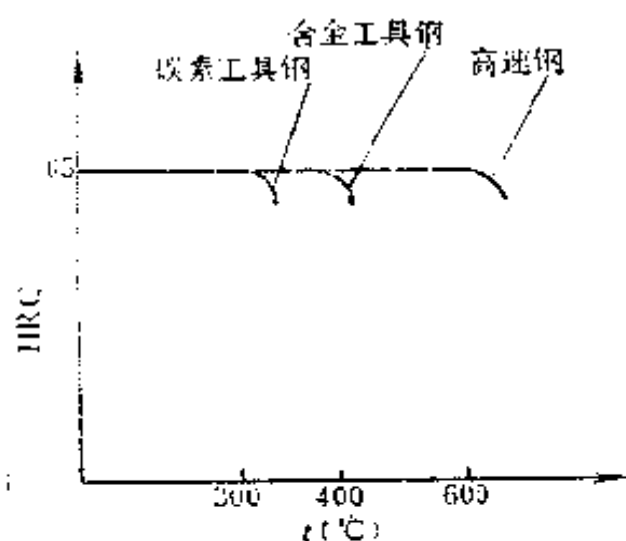


图8-3 各种工具钢的耐热性

刀具的电火花强化，就是采用YG、YT、YW等各类硬质合金或其他高硬度、难熔材料作电极，通过火花放电，在刀具切削区域的一个或几个刃面上形成具有一定厚度和粗糙度的高硬、耐热和耐腐蚀的表面强化层，从而使刀具的切削性能得到改善，达到提高刀具耐用度的目的。表8-1、8-2和表8-3是几种工具钢进行电火花强化处理后的表面层硬度和耐热性。

刀具的表面强化层厚度和粗糙度与刀具材料、刀具表面原始状况、强化用电极、强化规准以及操作手法等多种因素有关。用小型电火花强化机D9105A、D9110A等设备对刀具

表8-1 GCr15的强化层硬度与耐热性

| | | | | | | | |
|--------|------|------|------|------|------|------|-----|
| 温度(°C) | 未加热 | 200 | 450 | 550 | 650 | 760 | 880 |
| 硬度(HM) | 1114 | 1114 | 1132 | 1132 | 1132 | 1114 | 881 |

表8-2 W18Cr4V的强化层硬度与耐热性

| | | | | | |
|---------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 温度(°C) | 600 | 650 | 700 | 750 | 800 |
| 硬度(HRC) | 65 | 61 | 50 | 50 | 49 |

表8-3 Cr12的强化层硬度与耐热性

| | | | | | | |
|--------|------|------|------|---------------|------|---------------|
| 温度(°C) | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| 硬度(HM) | 1545 | 1264 | 1264 | 1264~ 1545 | 1545 | 1264~ 1918 |

进行强化，可以得到不必再加工的、比较切合实用的表面强化层。图8-4为用硬质合金YG8电极对高速钢车刀表面进行电火花强化时的电规准与强化层厚度(h)、表面粗糙度(R_z)的关系。试验条件：高速钢经淬火后回火处理，HRC60~62，强化前试件表面粗糙度 $Ra0.4\mu m$

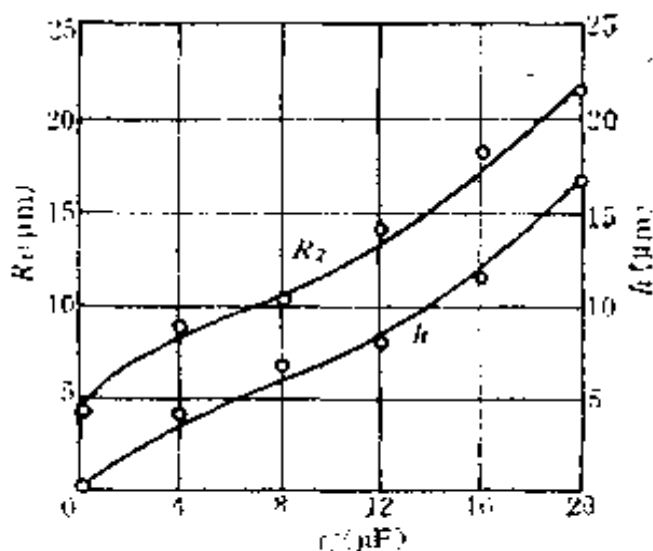


图8-4 强化层厚度、粗糙度与电规准的关系

(光洁度 $\nabla 8$), 强化电压为 40V, 比强化时间 3 min/cm²。

可以看出, 经电火花强化处理后的刀具工作表面, 硬度和红硬性都接近硬质合金 (硬质合金硬度为 HRC74~81、MH1100~1800, 红硬性达 800~1000℃), 因此可以显著提高抗机械擦伤和在高温下保持一定硬度的能力。并且由于工作表面层的成分和结构的变化, 比如用 YT 类硬质合金电极强化的表面层含有 TiC 等成分, 因此还可以提高刀具抵抗扩散和粘结磨损的能力, 从而使刀具的耐用度大为提高。

二、刀具强化工艺

对刀具表面进行电火花强化时, 应综合考虑处理部位、强化规准及强化方法等问题。尤其是要考虑刀具强化时造成的刃口烧伤。

1. 刃口保护及其处理方法^[9]

由于脉冲放电时的火花腐蚀及熔融材料的飞溅, 刀具原来锋利的刃口在强化时将不同程度地造成烧伤。并且, 由于

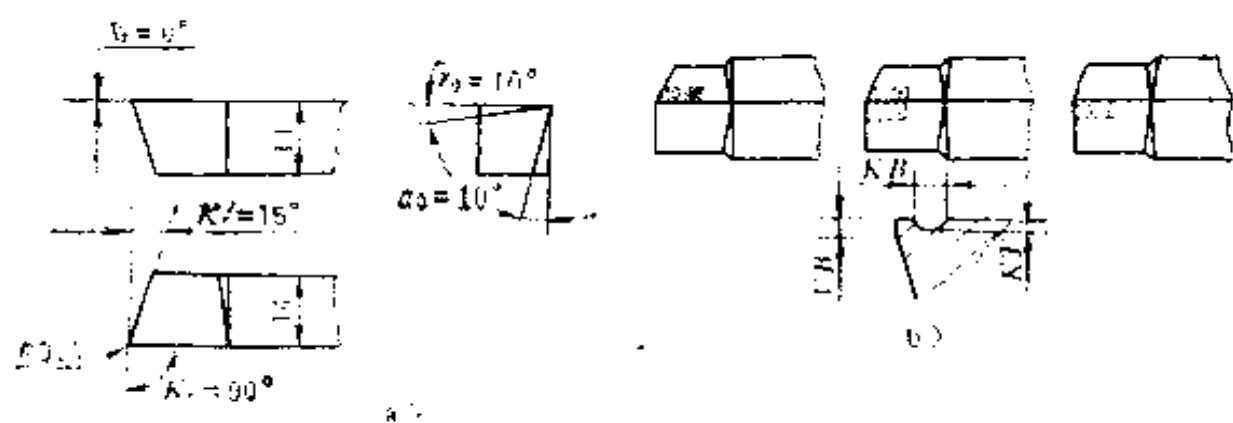


图8-5 试验用高速钢车刀及其强化部位

a) 试验用高速钢车刀 b) 车刀强化部位

强化表面层的粗糙度限制，强化后的刀具刃口将不同程度地变形和钝化。对图8-5所示的试验车刀进行强化后测得的刃口直线度偏差 Δ 和刃口圆角半径 ρ 如图8-6和图8-7所示。

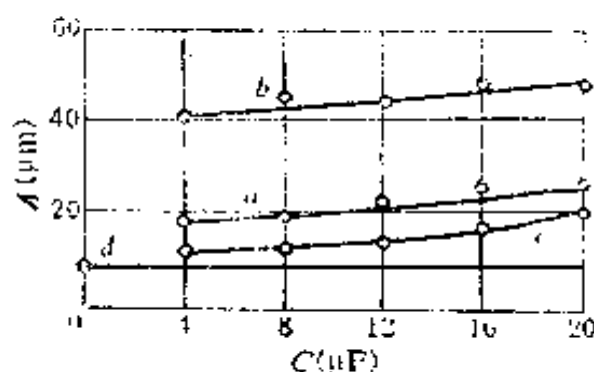


图8-6 刀具强化后的刃口直线度偏差

a—刀具单面强化 b—刀具前面、后面均强化
c—刀具单面强化并精磨另一刀面至 $Ra0.4\mu\text{m}(\nabla 8)$ d—刀具未经强化

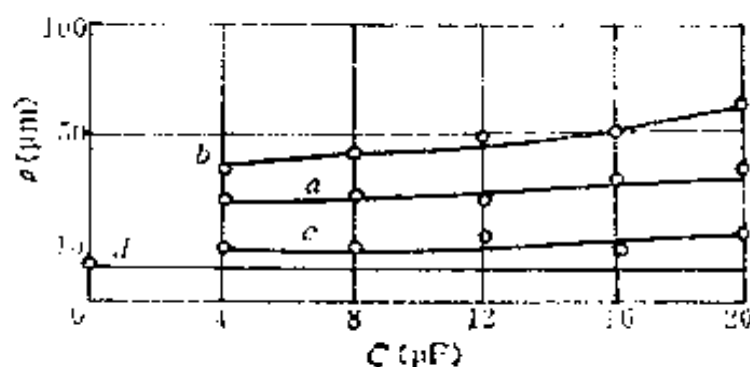


图8-7 刀具强化后的刃口钝圆半径

a—刀具单面强化 b—刀具前面、后面均强化
c—刀具单面强化并精磨另一刀面至 $Ra0.4\mu\text{m}(\nabla 8)$ d—刀具未经强化

车刀材料为W18Cr4V，淬火后回火，HRC63~64。强化前的刀面粗糙度为 $Ra0.4\mu\text{m}$ （光洁度为 $\nabla 8$ ）。电极材料为YG8，直径 $\phi 1.5\text{mm}$ 。强化设备为D9105型电火花强化机。强化处理时，电极垂直于刀面移动。相邻两次强化的电极移动轨迹相互垂直。比强化时间为 $8\text{min}/\text{cm}^2$ 。刃口的烧伤是

在不同的电规准下进行单面（前刀面或后刀面）和双面同时强化后测得的。

由图可以看出：随着电容量 C 的增加，刃口的破坏程度加剧了；前后刀面都强化的刀具刃口破坏程度较单面强化时更为严重。测量与分析表明，刃口的直线度偏差和刃口钝化程度基本上与强化表面的粗糙度变化相一致。直线度误差数值同粗糙度，而刃口钝圆半径数值接近粗糙度的 $\sqrt{2}$ 倍。

刃口烧伤不仅使工件加工表面的粗糙度变粗，而且会使切削力增加，刀具磨损加快。尤其是刀具的后刀面磨损将更

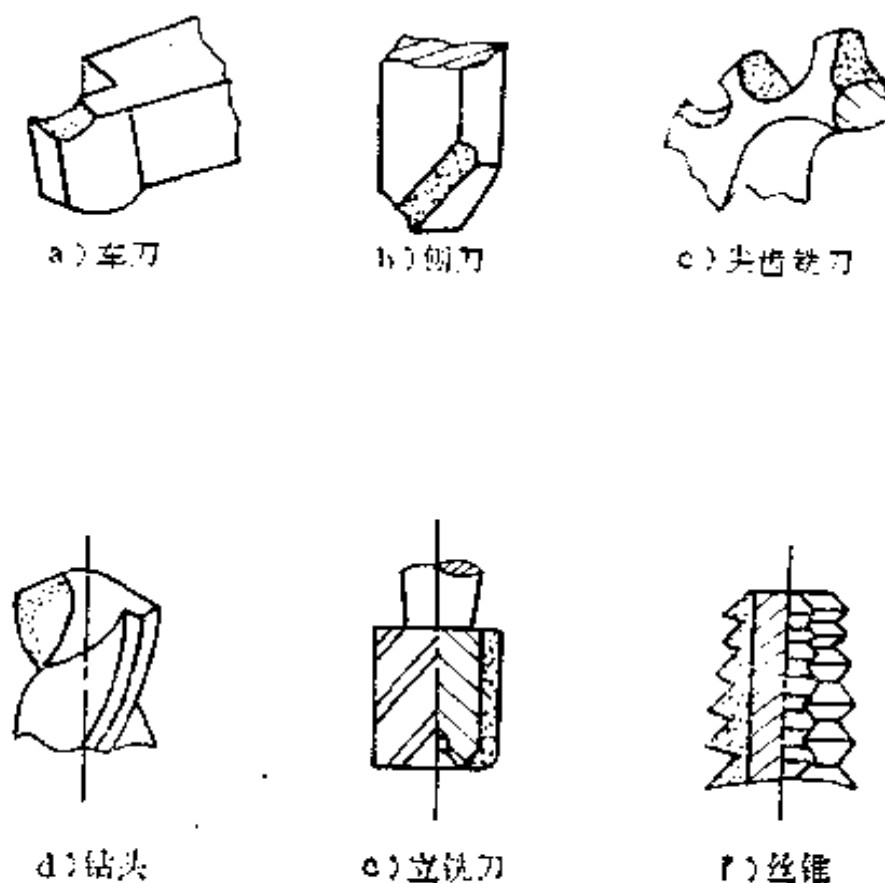


图8-8 强化前刀面的刀具

为严重。为此，对于不同结构和用途的刀具应采用不同的强化方法。

1) 车刀、刨刀、尖齿铣刀、钻头等以重磨后刀面为主的刀具（图8-8），通常强化前刀面后即可直接用于粗加工。当用于半精加工和精加工时，可在强化前刀面后再对后刀面进行一次精磨。对图8-5所示的高速钢车刀的前刀面进行强化后再精磨后刀面到 $Ra0.4\mu\text{m}$ ($\nabla 8$)，其刃口的直线度误差及刃口钝化状况都有明显的改善（见图8-6及图8-7）。

2) 对于多数以重磨前刀面为主的刀具，如成形车刀、成形铣刀、拉刀、铰刀、丝锥、齿轮滚刀、齿轮刨齿刀等，强化前刀面仍然是一种简便有效的方法。但只适于粗加工与半精加工。由于这类刀具不再刃磨后刀面，为减轻刃口烧伤，对强化规准的选择和操作手法应加以注意。强化时，可在远离刃口的部位采用较强的规准，而在刃口附近采用较弱的规准。在强化刃口时应使电极朝内侧倾斜，如图8-9所示。并且最好使用已经形成斜面的电极。操作时动作要平稳、均匀。但某些精加工刀具，根据其结构特点，在进行前刀面强化后再精磨一次后刀面，仍可以在提高刀具耐用度的同时保证精加工的需要。对于锥铰刀，由于其直径尺寸不必严格控制，因此可以在强化前刀面对刃带（即后刀面）进行精磨，其加工精度则不会受到刃口的影响。

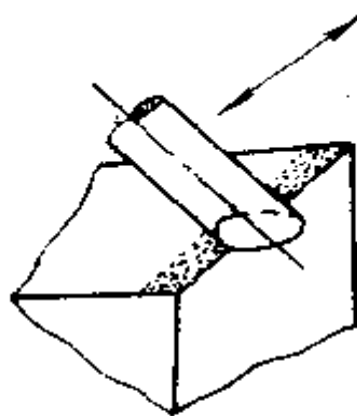


图8-9 刀具刃口部位的强化

3) 某些只铲齿而不铲磨的成形铣刀，如钻头螺旋槽铣刀，当用中、精规准仔细强化后刀面时，其表面粗糙度并不

比原来的铲齿后刀面粗。因而强化后的刀具不仅耐用度高，而且加工工件的表面粗糙度也比未强化刀具的加工工件细。

4) 可以根据刀具的结构特点，采取多种措施来保护刃口和降低强化表面的粗糙度。如图8-10所示的锯片铣刀，就

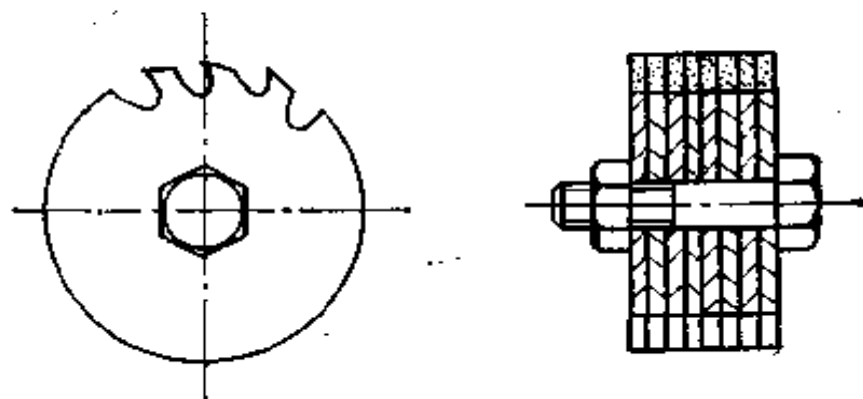


图8-10 锯片铣刀的强化

可以多片叠合后对前刀面进行强化。由于它们的侧刃互相贴合，因而可以得到保护。又如推刀和拉刀，可以利用车床进

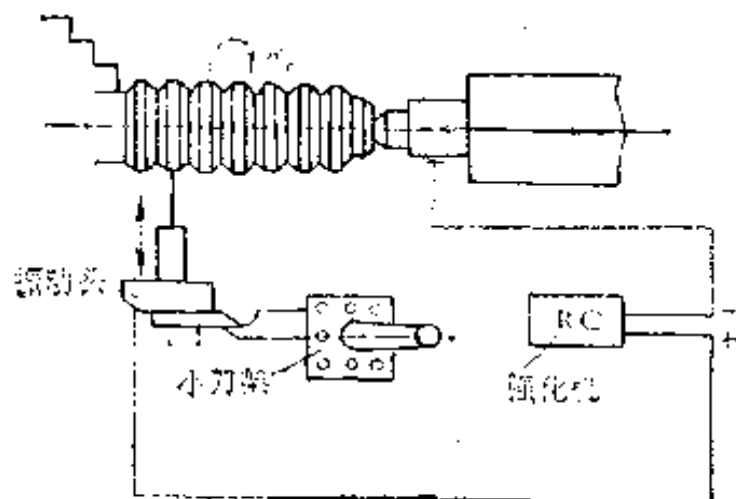


图8-11 刀具机动强化示意图

行机动强化（图8-11）。机动强化的表面粗糙度比手工强化可降低约一级，强化效率也有所提高。经过机动强化的推刀挤压铸铁孔时的表面粗糙度可达 $Ra1.6\mu\text{m}$ （光洁度 $\nabla 6$ ）。

5) 对后刀面用粗规准进行厚层强化，然后加以精磨，以得到 $Ra0.8\mu\text{m}$ 以下（ $\nabla 7$ 以上）的后刀面，是修复定尺寸刀具，同时又使刀具得到强化的方法之一。但这需要使用较大功率的强化机（如D9130型电火花强化机）。这种方法主要用于刃形较为简单、规则的刀具。用中、小型强化机强化的刀具表面粗糙度一般为 $Ra3.2\sim 1.6\mu\text{m}$ （光洁度 $\nabla 5\sim 6$ ），若需要降低粗糙度，可以用油石轻微研磨强化面。圆孔拉刀及推刀的后刀面（刃带）即可如此处理。

6) 在加工中等硬度的碳钢、合金钢一类的塑性材料时，强化一个刀面（如强化前刀面）是合适的。而对于加工铸铁及较硬的钢时，对刃口的前后刀面同时强化将更为有效。这是因为切削硬脆工件材料时，刀具后刀面与工件加工表面的摩擦不如切削塑性材料时严重。此时刀具刃口虽较钝，却具有较高的强度，因而对于提高刀具耐用度是适宜的。如对钻头的主刃前后刀面、横刃两侧、刃带的局部都进行强化（图8-12），用于加工铸铁时，其耐用度较单面强化更高，甚至可以用于加工淬火钢及玻璃一类的材料。

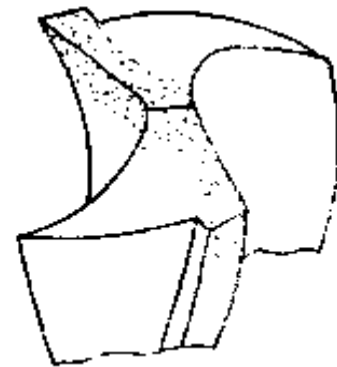


图8-12 钻头的强化

2. 刀具强化后的耐用度

经电火花强化的工具钢和高速钢刀具，其磨损形式和磨损过程与未强化的刀具相似，但前者的耐用度却较后者高出

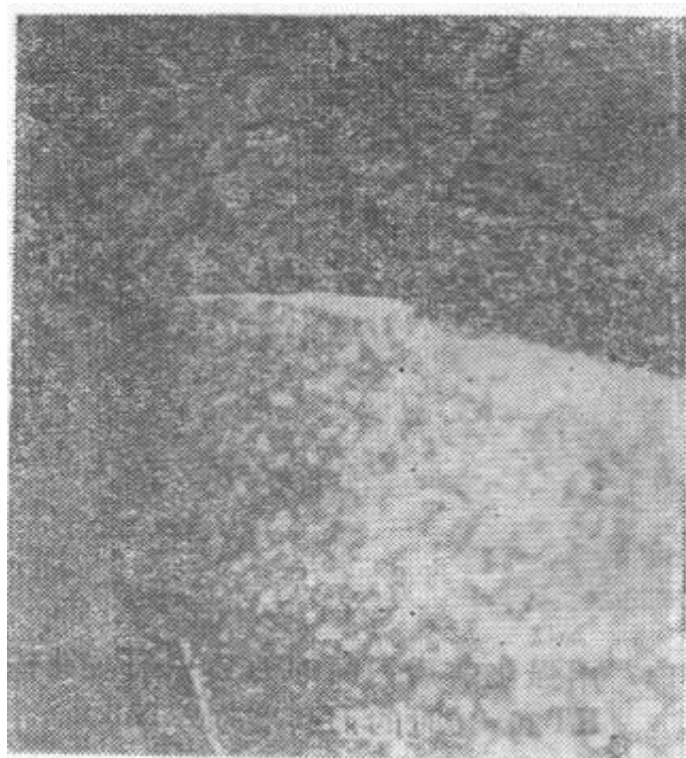


图8-13 用强化前后刀面的刀具车削45钢时的刀具磨损 150×

一至数倍。经强化的刀具，其耐用度与被加工材料的性质、切削条件、强化规准、强化部位以及后续处理方法有关。

用强化刀具切削碳钢一类的韧性材料时，其磨损也是在前后刀面同时发生的。而当切削灰铸铁一类的脆性材料时，其磨损也主要发生在后刀面上。

图8-13所示是用强化前后刀面的刀具车削45钢（热轧棒料， $HB = 169$ ）时刀具磨损（主剖面的金相照片），由此可以看到前刀面的月牙洼磨损（照片上月牙洼不完整，只显示了近刃口的一部分）和后刀面磨损。刃口附近的前刀面上由于积屑瘤的保护，未遭磨损的强化层还明显可见。强化层的存在使形成月牙洼的时间大大推迟，并使月牙洼的加深加宽速度和后刀面磨损速度变慢。图8-14是用强化前后刀面的刀具车削灰铸铁HT20-40（ $HB = 163$ ）时的刀具磨损照片。磨

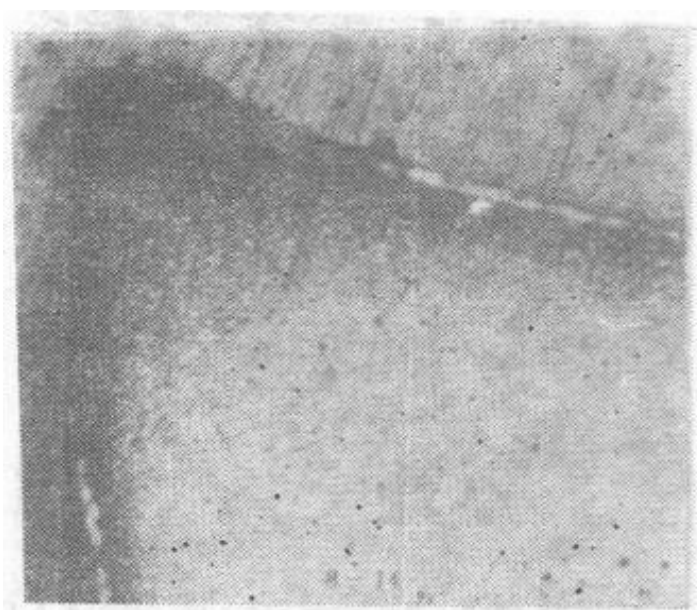


图8-14 用强化前后刀面的刀具车削灰铸铁
HT20-40时的刀具磨损 150×

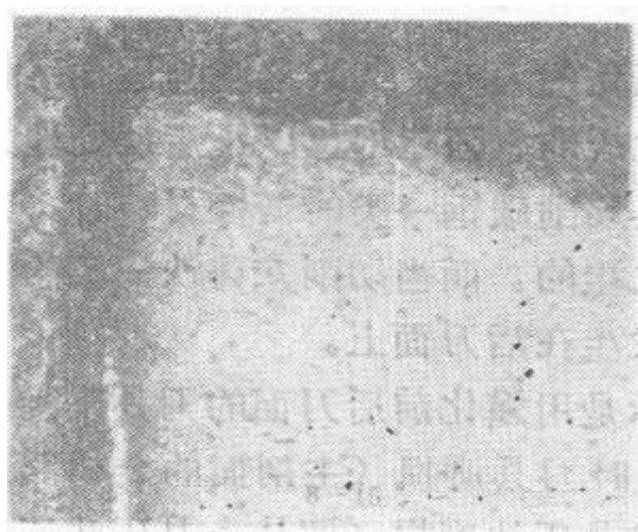


图8-15 用强化后刀面的刀具车削灰铸铁时的磨损 150×

损主要发生在后刀面上，但前刀面上也有磨损。前刀面强化层的存在也使后刀面的磨损大为减缓，这同只强化后刀面的刀具磨损情形（图8-15）相比，前刀面的磨损程度有明显的

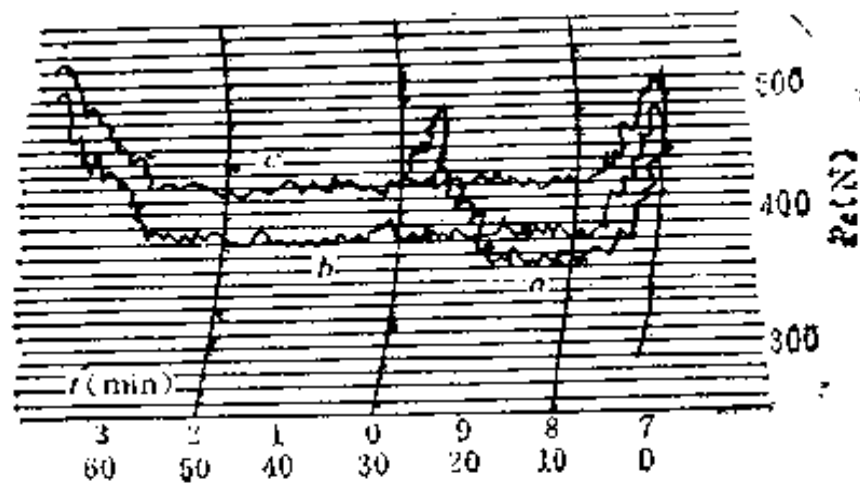


图8-16 切削力法测定的车刀耐用度(车45钢)

$\sigma_p = 1.0\text{mm}$ $f_j = 0.12\text{mm/r}$ $v = 55\text{m/min}$
 a—未经强化的刀具 b—强化后刀面并精磨强化
 层厚0.018mm c—强化前刀面,强化层厚0.018mm

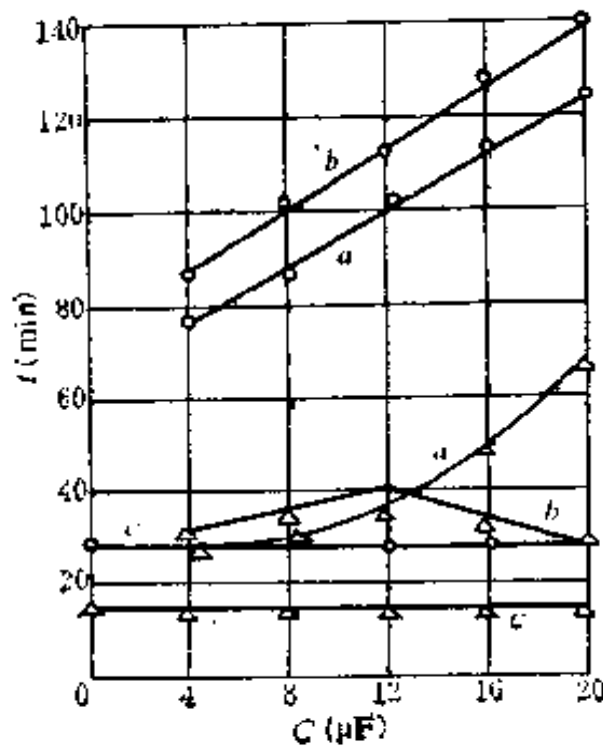


图8-17 高速钢车刀的耐用度

Δ —车45钢 $\sigma_p = 1.0\text{mm}$ $f_j = 0.1\text{mm/r}$ $v = 54\text{m/min}$
 \bigcirc —车HT20-40 $\sigma_p = 1.5\text{mm}$ $f_j = 0.1\text{mm/r}$ $v = 51\text{m/min}$
 a—强化前刀面的车刀 b—强化前后刀面的车刀 c—未经强化的车刀

差别。

用切削方法测定的高速钢车刀车削45钢和用后刀面磨损测量法(磨损限度为1.0mm) 测定的高速钢车刀车削灰铸铁HT20-40时的耐用度与强化规准(改变电容量 C) 的关系分别见图8-16和图8-17。

测定结果表明,车削45钢时,强化前刀面的刀具比未强化刀具的耐用度高1~3倍。用D9105型电火花强化机强化车刀时,所用的电规准越大,强化层就越厚,刀具的耐用度也越高。但前后刀面都强化的车刀,情况却有所不同。在电规准较小时,适当提高电规准,强化层的厚度增加,但表面粗糙度并无明显变化,因而刀具的耐用度将有所提高。而当电规准进一步增大时,强化层虽然继续增厚,但粗糙度却会变粗。由于切削韧性材料时,工件已加工表面存在明显的弹性恢复,因而在刀具后刀面与工件已加工表面相接触的小面积上将会有较大的摩擦(图8-18)。后刀面越粗糙,摩擦越严重,后刀面的初期磨损就越快,切削温度也越高,刀具的耐用度将下降。这就是前后刀面都强化的刀具耐用度具有图8-16中曲线 b 变化规律的原因。

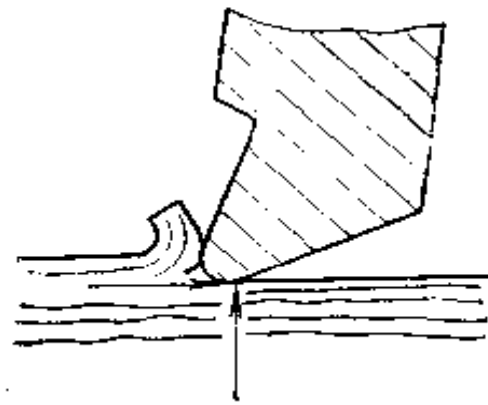


图8-18 刀具的后刀面摩擦

用强化刀具切削灰铸铁时,由于工件材料塑性较小,已加工表面弹性恢复较小,因此,刀具后刀面与工件已加工表面的摩擦也不象切削钢材那么严重,切削温度较低。所以与切削钢材时不同,刀具耐用度总是随强化层的增厚而提高。

的。而前后刀面都强化的刀具的耐磨性就更高一些。用强化刀具车削HT20-40时的耐用度比未强化刀具高1.5~4.5倍。

对后刀面进行强化并精磨前后刀面的刀具具有较为锋利的刃口（刃口钝圆半径 $\rho = 0.012 \sim 0.015 \mu\text{m}$ ）。当用以车削45钢时，其切削力较强化前刀面的刀具要小。用切削力法测定的车刀耐用度与前刀面强化刀具相近（图8-16）。用这种刀具车削灰铸铁时的磨损情形如图8-15，可以看到，刀具的前刀面因未强化而仍有轻微的月牙洼磨损。由于切削灰铸铁时的磨损主要发生在后刀面上，因此，其耐用度较强化前刀面的刀具略高。例如，用切削深度 $a_p = 1.5\text{mm}$ ，进给量 $f_j = 0.15\text{mm/r}$ 和切削速度 $v = 50\text{m/min}$ 的切削用量车削灰

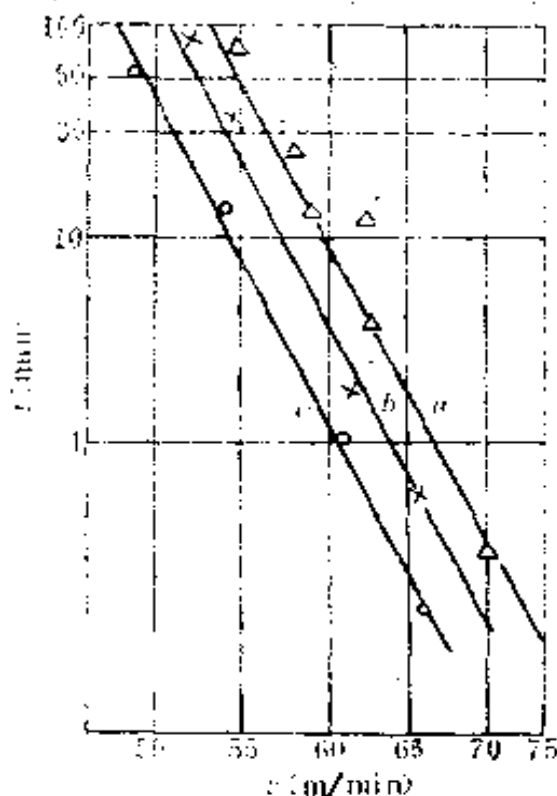


图8-19 高速钢车刀的切削速度耐用度曲线

- a—强化前刀面 $c = 20\mu\text{F}$
- b—强化前后刀面 $c = 12\mu\text{F}$
- c—未经强化

铸铁HT20-40时，未经强化的刀具的耐用度为30min，前刀面强化的刀具为110min，后刀面强化的刀具为125min。

试验还表明，经强化的刀具的切削速度-耐用度（ $v-t$ ）曲线几乎同未经强化的刀具平行。图8-19是用不同方法强化的高速钢车刀车削45钢时的切削速度-耐用度曲线。切削用量为：切削深度 $a_p = 1.0\text{mm}$ ，进给量 $f_j = 0.14\text{mm/r}$ 。实测得：

$$vt_B = vt^{0.07} = A$$

式中 A ——常数。

图8-19中带*的试验点的耐用度数十倍于未经强化的刀具的耐用度，这些点的情形是：因强化表面较粗糙，在较高的切削速度下，一旦在切削初期形成积屑瘤，则由于积屑瘤对刀尖的保护作用，将使刀具获得很高的耐用度。但这种状态并不稳定，与积屑瘤生成的初始条件，如工件材料性质、刀具表面状况及振动情况等有关。

3. 强化刀具的使用特点

对刀具进行电火花强化处理，一方面使刀具的工作表面硬度和红硬性提高，从而耐磨性得到提高。另一方面又造成刃口钝化和刀面粗糙。因而强化刀具在使用中具有一些显著的特点。

(1) 强化刀具的切削力

用工具钢和高速钢车刀切削45钢一类的韧性材料时，在切削速度为5~60m/min的范围内，由于积屑瘤的存在，一方面使刀具刃口得到保护，另一方面又使刀具的实际工作前角增大（图8-20），从而使切削力有所降低。这可以从图8-

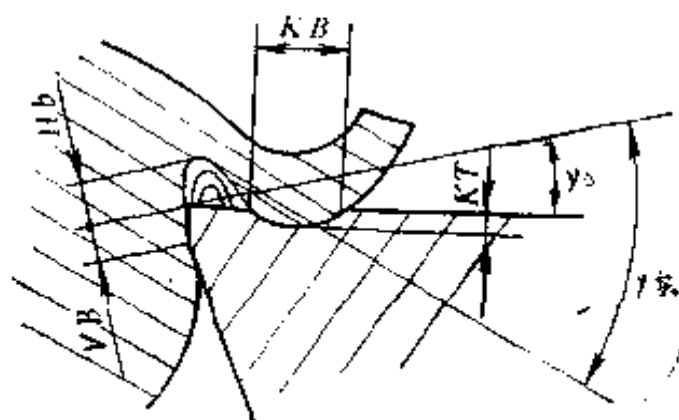


图8-20 刀具的实际前角

16看出，稳定切削时的切削力比开始切削时的切削力几乎低了一半。图8-21是强化的高速钢车刀车削45钢时的主切削力 P_z 随切削速度 v 变化的曲线，切削用量为 $a_p = 1.0\text{mm}$ ， $f_j = 0.14\text{mm/r}$ 。可以看出，在切削速度 $v < 40\text{m/min}$ 时，强化刀具的切削力低于未强化刀具5~10%，而当 $v \geq 50\text{m/min}$ 时，又高出未强化刀具约15%。切削力的这种变化是由于强化刀具刃口较钝、前刀面较粗糙而造成的。在这种情况下，能够生成积屑瘤的速度范围比不强化刀具要宽，使积屑瘤生长得最高的切削速度较低，而积屑瘤的最大高度 H_b 也较高（图8-21），由此造成了切削力的相应变化。根据强化刀具切削

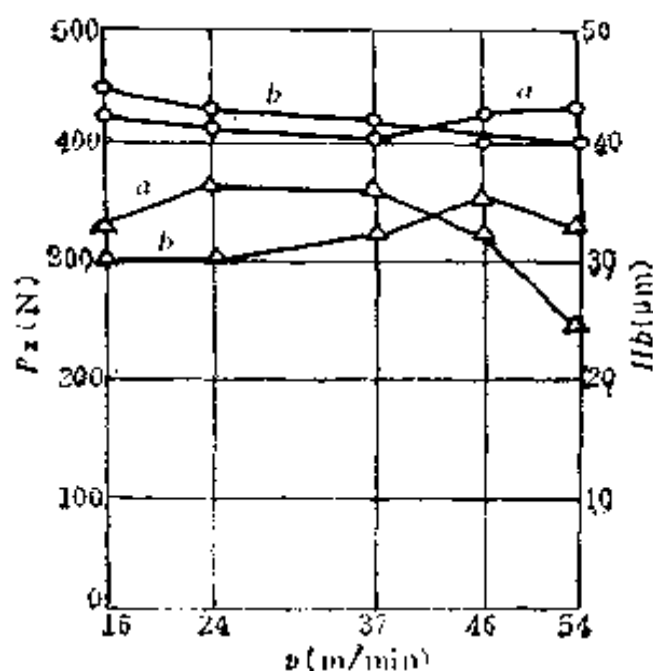


图8-21 强化刀具的切削力

Δ — P_z - v 关系 \circ — H_b - v 关系

a —强化前刀面,电压40V,电容量20 μF b —未经强化

力较低的这个特点，可以在机床—刀具—工件系统刚性和机床功率一定的条件下增大切削深度和进给量，从而使生产率

得到提高。

用强化高速钢刀具车削灰铸铁，由于刃口较钝，其切削力比普通刀具约高10~20%。但在钻孔这类切削热较为集中的切削加工中，强化刀具在较高的切削速度下切削铸铁所达到的切削温度比普通刀具要高，以至可以使工件材料的强度稍有降低。因此，切削力反而比普通刀具要低。图8-22是用强化前后刀面的 $\phi 16\text{mm}$ 标准钻头在灰铸铁HT20-40上钻孔时的扭矩 M_n 和轴向力 P_x 随切削速度变化的关系曲线。当切削速度达 55m/min 时，强化钻头的扭矩（反映了主切削力的大小）约比普通钻头低7%。上海重型机床厂用强化的 $\phi 17\text{mm}$ 麻花钻在铸铁垫块上钻孔，当钻削用量较高时（达 $v = 30\text{m/min}$ 和 $f_i = 0.4\text{mm/r}$ ）亦发现主电动机的工作电流反而比未强化钻头小。

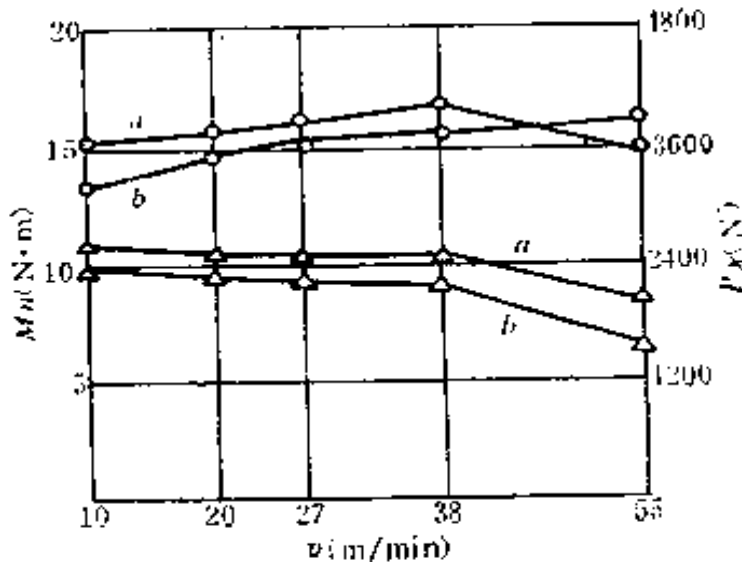


图8-22 强化钻头的扭矩和轴向力($f_i = 0.15\text{mm/r}$)

Δ — P_x - v 关系 \circ — M_n - v 关系

a—强化前刀面的钻头电压40V，电容量 $20\mu\text{F}$ b—未经强化的钻头

(2) 强化刀具的加工粗糙度

在一般的车削、钻削、刨削及端铣等切削加工中，被加工表面的粗糙度受刀具刃口形状的影响并不大。而在诸如圆周铣削、成形铣削、铰孔、拉削及车螺纹等切削加工中，强化刀具的刃形和刃口锋利程度对加工表面质量将有重要影响。因此，在刃口强化方法上应采取相应的措施。图8-23是用 $\phi 20\text{mm}$ 立铣刀铣削45钢平面时，工件表面纵向、横向不平度平均高度的测试结果。铣削用量为：铣削深度 $a_p = 0.5\text{mm}$ ，铣削宽度 $a_e = 10\text{mm}$ ，每齿进给量 $f_z = 0.02\text{mm/r}$ ，铣削速度 $v = 26.4\text{m/min}$ 。逆铣，不加冷却液。铣刀的四种处理方法见表8-4。

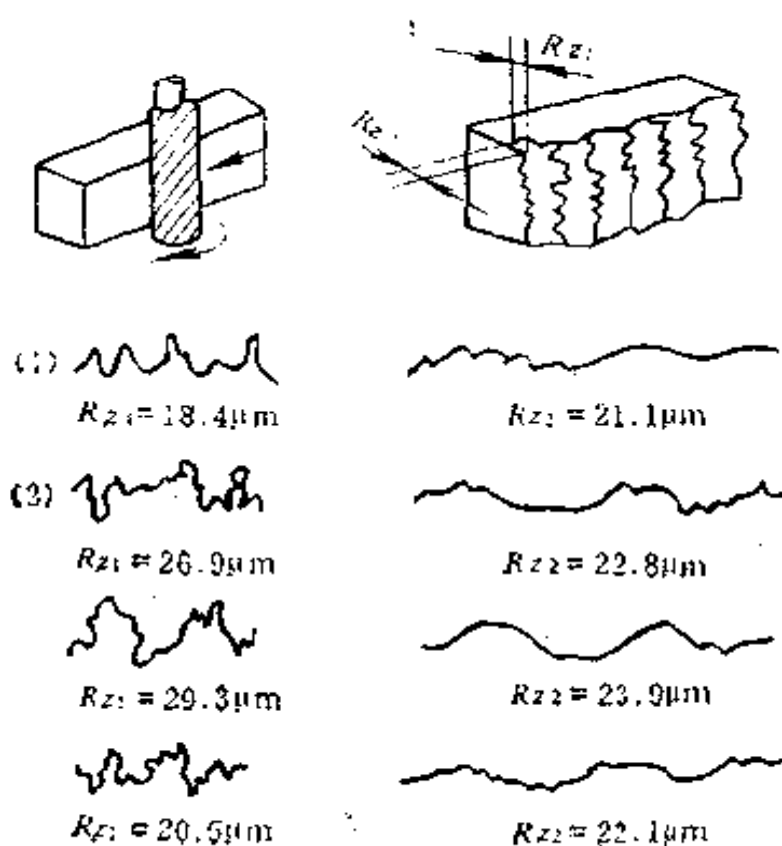


图8-23 平面铣削的粗糙度

表8-4 立铣刀的处理方法

| 编 号 | 处 理 参 数 | 处 理 方 法 |
|-----|----------------|---|
| (1) | 未 处 理 | 后面刃磨0.4mm,粗糙度 $Ra0.4\mu m$ (光洁度 $\nabla 8$) |
| (2) | 40V、20 μF | 强化前刀面 |
| (3) | 40V、20 μF | 强化前后刀面 |
| (4) | 40V、20 μF | 强化前刀面,后刀面刃磨0.4mm,粗糙度 $Ra0.4\mu m$ (光洁度 $\nabla 8$) |

结果表明, 刀具刃口的直线度越好, 刃口越锋利, 后刀面的粗糙度越细, 则加工表面的粗糙度也越细。强化前刀面并对后刀面进行刃磨的立铣刀, 其加工表面不平度平均偏差与未经强化铣刀相比, 纵向约高10%, 而横向增高还不到5%。这对于一般的半精加工要求是可以满足的。而象锥铰刀一类的精加工刀具, 如前所述, 由于强化前刀面后可以对圆刃带进行刃磨(直径尺寸可用铰孔深度控制), 而圆刃带在切削中对已加工表面有挤压和校正作用, 因此, 刃口对加工表面的质量影响极其微小。用手铰刀(刀具材料为9SiCr)铰削淬火硬度为HRC35~54的45钢时, 在对铰刀前刀面进行强化并刃磨后刀面及圆刃带至 $Ra0.4\mu m$ ($\nabla 8$)以后, 铰孔粗糙度与未强化铰刀基本相同。但前者的耐用度却比后者高3~5倍。至于铲齿而不铲磨齿背的成形铣刀(如钻头螺旋槽铣刀), 用中、精规准强化后刀面后的加工粗糙度反而比未强化铣刀约高一级。这是因为只铲齿而不铲磨的铣刀的后刀面一般较为粗糙, 而强化之后可使表面粗糙度降低。

(8) 冷却润滑液对强化刀具切削性能的影响

强化刀具的前刀面较为粗糙。这些不连贯的表面凸起之间（图8-24）有利于容纳冷却润滑液，减轻切屑底面对刀具前刀面的粘附。因此，与未强化刀具相比，冷却润滑作用要充分得多。

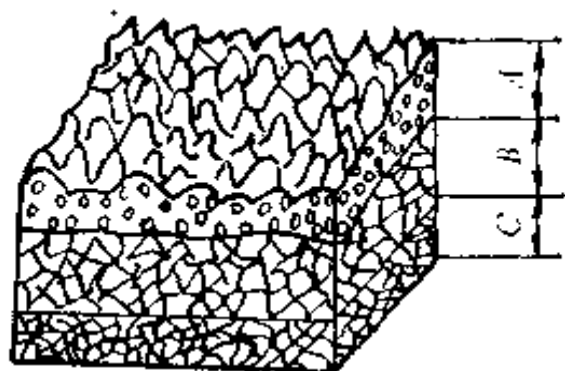


图8-24 强化层的表面形态

A—白层 B—热影响区 C—基体

这在加工钢一类的韧性材料时效果更为显著。例如，用强化过的 $\phi 20\text{mm}$ 立铣刀干铣45钢时，其耐用度比未强化立铣刀约高2倍，而加乳化液铣削时则约高4倍（铣削深度 $a_p = 8\text{mm}$ ，铣削宽度 $a_e = 20\text{mm}$ ，进给速度 $v_f = 190\text{mm}/\text{min}$ ，铣削速度 $v = 24\text{m}/\text{min}$ ）。当铣削灰铸铁HT20-40时，经强化处理的立铣刀的耐用度，加乳化液铣削与干铣相比，可提高30%（原强化刀具的耐用度比未经强化的刀具高8倍，加乳化液铣削时比未经强化的刀具高4倍。 $a_p = 15\text{mm}$ ， $a_e = 20\text{mm}$ ， $v_f = 110\text{mm}/\text{min}$ ， $v = 24\text{m}/\text{min}$ ）。

(4) 强化刀具的耐用度与工件材料硬度的关系

强化处理后的工具钢和高速钢刀具表面硬度为HM1200~1400（HRC72~74），接近于硬质合金的硬度（HRC74~81），而比未经强化的工具钢和高速钢刀具的硬度（HRC60~65）高得多。因此在切削硬度较高的材料时就显示出优越的切削性能，其耐用度的提高也更显著。用 $\phi 4.9\text{mm}$ 钻头和 $\phi 5\text{mm}$ 手用锥铰刀钻、铰不同硬度的45钢就是两个实例

(表8-5)。

表8-5 强化刀具耐用度与加工材料硬度的关系

| 刀 具 | 强 化 方 法 | 切 削 用 量 | 强化刀具相对未强化 刀具的耐用度提高 | | |
|-----------------------------------|---|--|-----------------------|--------------|--------------|
| | | | HRC35 ~39 | HRC43 ~47 | HRC50 ~53 |
| $\phi 4.9\text{mm}$ 标准 钻 头 | 前刀面强化40V、 20 μF 后刀面强化40V、 8 μF | $v = 7.3\text{m}/\text{min}$ $f_j = 0.08\text{mm}/\text{r}$ | 1 | 1.7 | 2.5 |
| 锥度1:50 $\phi 5\text{mm}$ 锥 铰 刀 | 前刀面强化40V、 20 μF 精磨后刀面及圆 刃带 | 手铰、铅油润滑 | 3 | 3.5 | 5 |

4. 刀具电火花强化工艺的特点

对刀具进行电火花强化，目前主要用手工操作。为获得牢固的、有效的强化表面，根据试验及生产使用的经验，影响其工艺过程的因素有：

(1) 刀具材料与电极材料的影响

试验表明，对于常用工具钢及高速钢刀具，用不同的硬质合金材料作电极进行电火花强化时，其强化层硬度并无明显的差别。用YG8，YT15和YW1等牌号的硬质合金对T10、Cr12和W18Cr4V等刀具材料进行强化处理时的表面硬度见表8-6。

生产使用也表明，用YT15强化的高速钢刀具较用YG8强化的表面层显微硬度稍高但较脆，强化层厚度亦略小。因此，目前绝大多数情况下都用YG8作电极材料进行刀具强化。用YG8强化T10、CrWMn及9SiCr等刀具材料时的强化层厚度比强化高速钢时约小10~30%。

表8-6 不同电极材料的强化层显微硬度 (HM)

| 刀具材料 | 电 极 材 料 | | | | | |
|---------|---------|---------------|-------|------|-----|------|
| | YG8 | | YT15 | | YW1 | |
| | 基 体 | 强化层 | 基 体 | 强化层 | 基 体 | 强化层 |
| T10 | 642 | 1423 | 644 | 1647 | 701 | 1504 |
| Cr12 | HRC60 | 1400~ 1600 | HRC60 | 1800 | | |
| W18Cr4V | 862 | 1480 | 756 | 1938 | 644 | 1734 |

为取得更理想的强化效果, 根据近年来使用各种新型硬质合金的经验, 有条件时, 可根据不同的工件材料来选用不同的电极材料 (表 8-7) [10]。

表8-7 强化刀具所用的电极材料

| | | | | | |
|------|----------------|------------|-------|------------------|-----------------|
| 工件材料 | Cr17Ni2 | 1Cr18Ni9Ti | 钛合金 | 一般钢材 | 有色金属 或铸铁 |
| 电极材料 | YW1、YW2 YW3 | YA6T | YG10H | YT5、YT15 YT30 | YG6、YG8 YG6X |

(2) 对刀具基体硬度的要求

当用于修复已退火的或制造不良的刀具时, 刀具基体应有一定的强度和硬度。生产使用表明, 基体硬度一般在HRC 45以上的刀具, 电火花强化才能有明显的效果。

(3) 刀具表面状况的影响

刀具表面的原始粗糙度对强化后的表面粗糙度影响不大。因此, 进行强化的刀具表面无须象不强化刀具那样应当刃磨到 $Ra0.8\sim0.2\mu\text{m}$ 以下 ($\nabla 7\sim 9$ 以上)。但对于定尺寸刀具及成形刀具, 其刃形及尺寸精度应预先予以保证。为保证强化层的质量, 并使强化层与基体结合牢固, 待处理表面应作清洁处理, 去污去油去锈。

(4) 强化规准的选择

用小型电火花强化机对刀具进行强化时，用不同的电规准所得到的强化表面硬度相差不多。在保证有较细的粗糙度的同时尽量提高强化层的厚度，是刀具强化所期望的目标。因此，在选择电规准和安排强化过程时应根据不同的条件加以考虑。通常是先采用粗规准进行处理以获得较大的厚度，然后依次减小规准以降低强化表面的粗糙度。例如，用D9110A型电火花强化机强化锯片铣刀、立铣刀和钻头等的前刀面时，可先用 $20\mu\text{F}$ 强化，再依次用 $5\mu\text{F}$ 和 $1\mu\text{F}$ 进行精强化。

强化规准可以用试验的方法进行确定，例如用优选法确定。

(5) 强化速度的选择及火花判断

强化时间过短，则强化层可能不够致密。但强化时间过长，强化表面的粗糙度可能变粗，还可能造成局部刃口变脆。用小型电火花强化机强化刀具时，强化生产率为 $0.3\sim 1\text{cm}^2/\text{min}$ 。用YG8作电极材料对高速钢刀具进行强化时，可以根据放电火花颜色来判断强化的程度。实践表明，开始强化时，火花以白色和红色为主，火花飞溅也较长，而且有“劈啪”的放电响声。然后就逐渐变成淡黄色火花。继续强化将会变成蓝色小火花，此时强化层已完全形成。一般情况下，强化进行到火花为淡黄色时较好。而最后形成的强化层表面应呈均匀的白亮色。

(6) 工作压力及操作手法

在不同强化规准下，为获得较大的强化层厚度，应对振动头的工作压力（以操作者手感为主）适当加以控制。控制方法是观察强化机上的工作电流并使之保持一最佳值。表

8-8为用D9110A型电火花强化机进行强化时，能获得最大强化层厚度的“最佳工作电流”。

表8-8 D9110A型电火花强化机的最佳工作电流

| 电 容 量(μF) | 最佳工作电流(A) |
|------------------------|-----------|
| 1 | 0.5 |
| 5 | 0.7~0.8 |
| 25 | 1.1~1.3 |
| 45 | 1.9~2.1 |
| 65 | 2.2~2.5 |

强化时，工具电极与刀具被强化表面的夹角对强化层的厚度也有一定的影响，试验表明，以两者相互垂直(成 90°)时的强化层厚度最大。当夹角减小时，强化层厚度也随之减小，且易发生短路粘连现象。但完全垂直地进行强化则有时将妨碍观

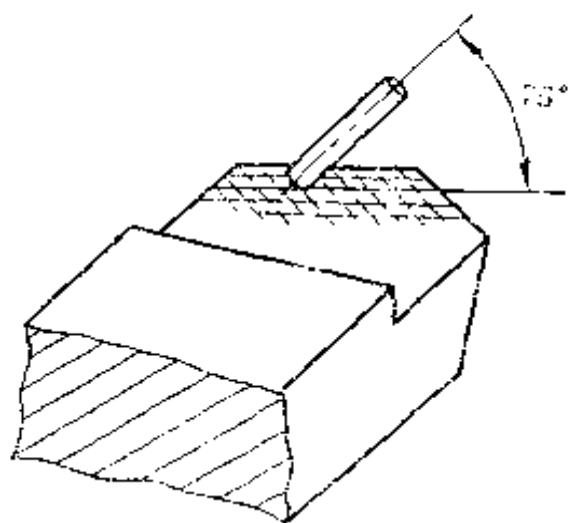


图8-25 刀具表面的重复强化

察，且易破坏刃口，因此在刃口附近应略为向后倾斜，如成 75° 夹角。而在远离刃口的部位则可垂直强化。强化时应均匀、平稳，强化迹线紧密相连，防止迹线杂乱无章。重复强化时可成 90° 纵横交叉进行(图8-25)，以保证刀面强化

表 8-9 强化时电极工作夹角、强化工作
电流与强化层厚度的关系

| 试样 编号 | 试样 材料 | 试样原 始状态 | 强 化 工 艺 | | | | 强化层厚 度 (μm) |
|----------|----------|---------------------|---------|----------------------------|-------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| | | | 夹 角 | 电 容 量 (μF) | 工作电流 (A) | 比强化时间 (min/cm^2) | |
| 1 | GCr15 | 淬火 + 低温 回火 | 90° | 45 | 0.5 | 4 | 15~21 |
| 2 | | | 90° | 45 | 1.2 | 4 | 18~27 |
| 3 | | | 90° | 45 | 2 | 4 | 30~36 |
| 4 | | | 90° | 45 | 3 | 4 | 21~30 |
| 5 | | | 60° | 45 | 2.5 | 4 | 21~33 |
| 6 | | | 45° | 45 | 2.5 | 4 | 18~27 |
| 7 | | | 90° | 25 | 1.2 | 4 | 16~25 |

层的完整和致密。表 8-9 为电极工作夹角、强化工作电流与强化层厚度的关系。

(7) 强化面积

刀具表面的强化面积视强化部位及刀具结构而定。

重磨后刀面的刀具（如车刀、刨刀、钻头及尖齿铣刀等），在强化前刀面时可以一次沿主刃口的垂直方向强化足够长的一块面积，以便在重磨后不必每次都进行强化（图 8-26）。

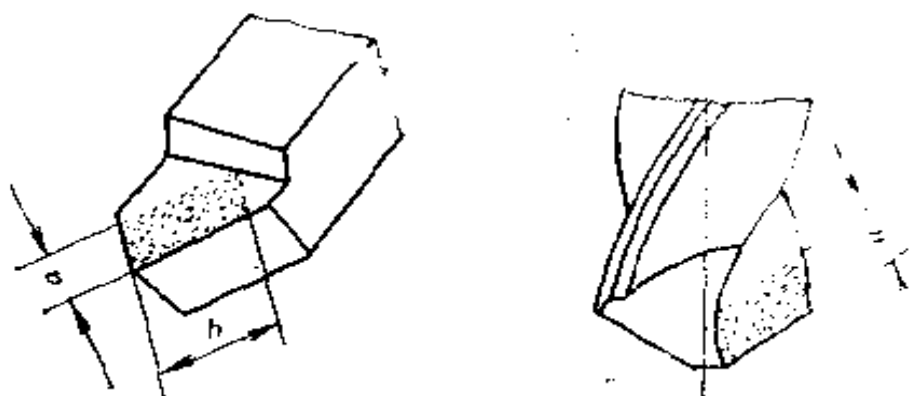


图8-26 前刀面的强化面积

对于重磨前刀面的刀具，如铲齿铣刀、成形车刀、铰刀及齿轮刀具等，其前刀面的强化宽度应超过切屑在刀面上的接触长度（图8-26），建议取

$$a = 6f_p \sin K_r + 2 \quad (\text{mm})$$

式中 f_p ——刀具每转进给量 (mm/r)；

K_r ——刀具的主偏角 ($^\circ$)。

而对刀具的后刀面进行强化时，强化宽度 c 应大于刀具允许的磨损限度 VB （图8-27）。常用刀具的后刀面磨损限度见表8-10。

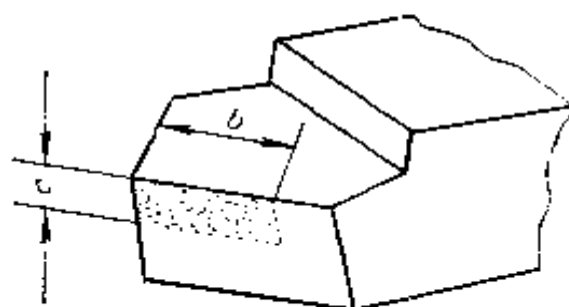


图8-27 后刀面的强化面积

表8-10 常用高速钢刀具的磨损限度 VB (mm)

| 刀 具 | 加 工 钢 | 加 工 铸 铁 | 刀 具 | 加 工 钢 | 加 工 铸 铁 |
|------|---------|---------|------|----------|----------|
| 普通车刀 | 0.3~2.0 | 1.5~4.0 | 立铣刀 | 0.15~0.5 | 0.2~0.8 |
| 成形车刀 | 0.4~0.5 | 1.5~2.0 | 成形铣刀 | 0.2~0.7 | |
| 钻 头 | 1.0~1.2 | 0.5~1.2 | 齿轮刀具 | 0.14~1.5 | 0.14~1.0 |

一般情况下：

$$c = VB + 1 \quad (\text{mm})$$

(8) 硬质合金刀具的强化

一些工厂对硬质合金刀具，如车刀、钻头等进行电火花强化，也取得了一定的效果。根据经验，其强化方法有如下一些特点：

1) 进行强化的硬质合金，通常是YG8、YT5等韧性较好的材料。处理这类刀具，主要是为了保持刀具原有的韧性和提高刀具耐磨性。

2) 强化规准一般较小。如车刀、刨刀等刀具，常用 $1 \sim 2 \mu\text{F}$ ，并避免重复强化。一般是一次覆盖即可（图8-28）。

3) 硬质合金车刀，一般都要对刃口进行倒棱。因此，进行电火花强化时，可先对准刃口强化一次，将刃口倒钝，然后在刀尖周围的三个刀面（前刀面和主、副后刀面）进行强化。

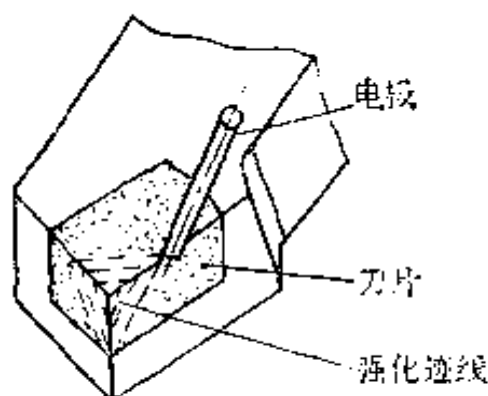


图8-28 硬质合金车刀的强化

三、刀具强化实例

由于金属切削刀具的种类繁多，使用条件差别很大，因此，强化方法、使用范围和效果不尽相同。试验和生产使用表明，电火花强化工艺在提高刀具耐用度和使用寿命，提高切削效率和加工质量，切削某些难加工材料以及修复废、旧刀具方面都显示了突出的效果。

1. 刀具强化规准的一般选择及优选实例

刀具电火花强化规准和强化部位的一般选择实例见表8

-11。用优选法确定强化电规准的实例见表8-12。

2. 刀具电火花强化的一般效果

各类刀具电火花强化的实例和效果见表8-13至表8-17。

3. 强化刀具用于加工高硬材料的效果

经过电火花强化的刀具在加工硬度较高的材料时，有更显著的效果。甚至可以加工用未强化刀具所不能加工的某些材料。其使用实例见表8-18。

4. 强化刀具用于腐蚀性和高温加工条件下的实例

例如，上海化纤三厂用于切断化纤的刀片，由于浸在P-H 5度的酸性液体中，很易腐蚀。原来使用一个月后就需调换。现经强化处理以后，可使用四个月，延长使用寿命三倍，效果很好。

又如，南京汽轮机厂用高速钢车刀进行电火花强化后车削45钢零件，切速高达 $v = 100\text{m}/\text{min}$ 以上，切削温度超过 400°C 。切削400mm长以后，刀尖尚未磨损。而强化前，切削速度只允许 $30\text{m}/\text{min}$ 。

5. 强化工艺用于刀具修复的实例

某些因磨损而尺寸变小的报废刀具，可以用电火花强化工艺加以修复。经修复的刀具，往往比原刀具的耐用度更高，而且其中一些刀具可以在磨损后再次修复。用电火花强化工艺修复刀具的部分实例见表8-19。

6. 硬质合金刀具强化处理实例

根据一些工厂的生产使用经验，硬质合金刀具亦可进行电火花强化处理，并有一定效果。其部分实例见表8-20。

表8-11 刀具电火花强化规范及强化部位选择实例

| 厂名 | 刀具 | 工件材料 | 电极材料 | 刀具强化部位 | 强化规范 | 刀具强化效果 |
|---------------------|---------------------------------|----------|------|-------------|--|---|
| 上海德拉 机厂 | $\phi 30\text{mm}$ 钻头 | 18CrMnTi | YG8 | 前后刀面 及刃带 | 粗规范 $20\mu\text{F}$ 精规范 $4\mu\text{F}$ | 强化前刃磨一次钻孔20个, 强化后, 切削用量不变, 一次刃磨钻孔40个 |
| 上海先锋 电机厂 | $\phi 75 \times 1.5$ mm 锯片铣刀 | 20钢 | YG8 | 前刀面 | 50V 、 $15\mu\text{F}$ | 铣 $\phi 6\text{mm}$ 轴的平面时, 强化前每次 刃磨加工2000件, 强化后切削用量 不变, 每次刃磨加工4700件 |
| 泰州航海 电器厂 | 63×4 链轮主 铣刀 | 45钢 | YG8 | 前刀面 | 粗规范 $20\mu\text{F}$ 半精规范 $10\mu\text{F}$ 精规范 $1\mu\text{F}$ | 强化前铣一只链轮, 刃口明显磨 损, 强化后可铣3只链轮 |
| 沈阳 213 机床电器 厂 | 立铣刀 | CrWMn | YG8 | 前刀面 | 粗规范 $20\mu\text{F}$ 半精规范 $4 \sim 5\mu\text{F}$ 精规范 $1\mu\text{F}$ | 强化前加工8件需时1280min 强化后同样加工8件, 需时仅320min |
| 苏州纺织 机械厂 | $\phi 4.7\text{mm}$ 钻头 | GCr15 | YG8 | 前刀面 | 粗规范 35V 、 $25\mu\text{F}$ 精规范 35V 、 $2\mu\text{F}$ | 强化前一次刃磨钻孔5~6个, 强化 后, 切削用量不变, 一次刃磨可钻 孔15~16个 |

表8-12 用优选法确定刀具强化规范实例

| 强化条件 | | 强化规范 | 优选过程 | 程序 |
|------|----------------------------------|------|-----------------|------------------------------------|
| 厂名 | 天津市大明电机厂 | 强化规范 | 钻头强化后的使用效果 | |
| 刀具 | φ4mm钻头 | 10μF | 较未强化的钻头耐用度略低 | |
| 工件 | HT20-40电机底座 | 6μF | 比未强化的钻头耐用度高2倍 | |
| 电极材料 | YG8 | 4μF | 比未强化的钻头耐用度高2倍 | |
| 强化设备 | D9105型电火花强化机 | 2μF | 比未强化的钻头耐用度高4.5倍 | |
| 强化部位 | 钻头前刀面及刃带 | 1μF | 比未强化的钻头耐用度高2倍 | |
| 试验方法 | 在不改变切削用量的条件下，用不同的处理电规范强化钻头进行钻孔比较 | 试验次数 | 试验结果 | 因刀具较小，刃口薄弱，试验证明用2μF规范强化φ4mm钻头，效果最好 |

表8-13 切刀类刀具电火花强化实例

| 厂名 | 刀具 | 工件 | 电极材料 | 刀具使用效果 | |
|------------|---------------------|---------------------------------|------|--------------------------------------|---|
| | | | | 强化前 | 强化后 |
| 湖北襄樊609研究所 | 外圆车刀 | 1Cr18Ni9Ti 洗衣机轴 $\phi 14$ 外圆 | YA6T | 用硬质合金车刀切削不到300mm崩刃, 高速钢车刀刃磨一次加工一件 | 每次刃磨可加工20~30件(切削用量 $v_r = 368r/min, f_s = 0.7mm/r, a_p = 1.0mm$) |
| 天津市大明电机厂 | $B = 5mm$ 切断刀 | 45钢垫圈 | YG8 | 以切削速度 $v = 36m/min$ 手动进给, 每次刃磨加工200件 | 切削用度不变, 每次刃磨可切1600件 |
| 江苏泰州林业机械厂 | 6mm插齿刀 | 45钢插齿件 | YG8 | 每次刃磨插槽50件 | 每次刃磨插槽100件 |
| 上海消防器材厂 | 刨刀 | 45钢齿端平面 | YG8 | 刃磨一次刨轴16根 | 刃磨一次可刨轴40根 |
| 北京重型机器厂 | 倒切刀 | 43CrNi5A 燕压机螺母 | YG8 | 切深140mm每次切2/3槽即需重新磨刀 | 可切削1.5~2槽, 重磨后仍可强化使用 |
| 上海重型机器厂 | $10 \times 10mm$ 车刀 | Z335卡盘 | YG8 | 工件转速 $n_s = 100r/min$ 时, 每次刃磨可加工7件 | 切削用度不变时, 每次刃磨可加工16件 |

表8-14 铣刀类刀具电火花强化实例

| 厂名 | 刀具 | 工件 | 电极材料 | 强化前 | 强化后 |
|------------|---|---------------------|------|---|---|
| 苏北电机厂 | $\phi 13 \times 3 \text{mm}$ 半圆键铣刀 | 球铁顶板槽 HRC35 | YG8 | 刃磨一次加工轴60根 | 切削用量不变, 刃磨一次可加工轴130根 |
| 南京汽轮机厂 | $B = 4 \text{mm}$ 专用槽铣刀 | 38CrMo 连轴节 | YG8 | 铣削 4×20 槽连轴节一对, 10把刀全部磨根, 槽宽公差 0.04mm , 不能保证 | 切削用量同前, 仅用两把刀就加工完三对连轴节, 公差符合要求 |
| 天津第二锻压机床厂 | $\phi 25 \text{mm}$ 立铣刀 | HT20-40 液 压机导向件 | YG8 | 切削深度 $a_p = 6 \text{mm}$, 进给速度 $v_f = 110 \text{mm/min}$, 切削速度 $v = 35 \text{m/min}$ 每次刃磨加工1.5件 | 切削用量不变, 每次刃磨可加工3.5件 |
| 天津仪表机床厂 | $\phi 21.5 \times 9 \text{mm}$ T形槽铣刀 | HT20-40 台面 | YG8 | 进给速度 $v_f = 23.5 \text{m/min}$, 切削速度 $v = 8 \text{m/min}$, 每把刀加工1件 | 进给速度 $v_f \approx 75 \text{mm/min}$ 其余不变, 每刀可加工4件 |
| 北京千斤顶厂 | R4mm成型 铣刀 | 35钢千斤 顶泵芯 | YG8 | 每刀可加工1500件 | 每刀可加工3000件 |
| 湖北襄樊609研究所 | $\phi 8 \text{mm}$ 键 槽铣刀 | Cr12Ni2 HRC38~32 | YW1 | 主轴转速 $v_s = 400 \text{r/min}$, 每刀加工不到10件 | 提高转速 $v_s = 600 \text{r/min}$, 每刀可加工32件 |

表8-15 孔加工刀具电火花强化实例

| 厂名 | 刀具 | 工件 | 电极材料 | 强化前 | 强化后 |
|------------|-------------------------|--------------|--------------|---|------------------------------|
| 沈阳电缆厂 | $\phi 3.5\text{mm}$ 钻头 | 不锈钢链条轴 | YG8 | 每次刃磨钻孔3~4个 | 前刀面强化后每次刃磨可钻孔20个 |
| 天津纺织机械厂 | $\phi 13\text{mm}$ 钻头 | 45钢板点窝 | YG8 | 切速 $v = 30\text{m/min}$, 进给量 $f_p = 0.28\text{mm/r}$ 时, 每次刃磨加工180件 | 切削用量不变时, 每次刃磨可加工540件 |
| 太原机车车辆厂 | $\phi 23.5\text{mm}$ 铰刀 | 货车底架铆钉孔 | YG8 | 加工质量差, 有时一个孔需铰刀1~4把才能完成 | 可铰孔80余个, 且提高效率2~3倍, 延长寿命4~5倍 |
| 解放军7426厂 | $\phi 10\text{mm}$ 铰刀 | 42Cr | YG8 | 强化后的铰刀比原刀具寿命延长一倍 | |
| 天津纺织机械厂 | $\phi 15\text{mm}$ 锥铰刀 | 45钢中管 | YG8 | 当切速 $v = 30\text{m/min}$, 进给速度 $v_f = 25\text{mm/min}$ 时, 每把刀可铰孔140个 | 切削用量不变时, 每把刀可铰孔290个 |
| 湖北襄樊609研究所 | 铰孔刀 | 18CrNiVA 活塞孔 | YT15 YT30 | 每次可铰孔2~3件 | 每次可铰孔12件, 但粗糙度稍粗 |

表8-16 齿轮刀具电火花强化实例

| 厂名 | 刀具 | 工件 | 电极材料 | | 刀具使用效果 | |
|--------------|--|-------------------------|------|-----|--|-----------------------------------|
| | | | 电 极 | 材 料 | 强 化 前 | 强 化 后 |
| 吉林重型 机器厂 | $m = 24\text{mm}$ 指形铣刀 | ZG45大齿轮 | YG8 | | 每把刀每次可加工8齿 | 强化前刀面及后刀面后, 每 次可加工20齿 |
| 广州重型 机器厂 | $m = 22\text{mm}$ 指形铣刀 | ZG45, $z = 98$ 直齿大齿轮 | YG8 | | 刀具转速 $n_r = 67\pi/\text{min}$, 进给 速度 $v_f = 20\text{mm}/\text{min}$, 两刃成 型, 一次加工10齿 | 切削用量不变时, 一次可加 工25~27齿 |
| 北京重型 机器厂 | $m = 26\text{mm}$ 齿轮初开铣 刀 | 45钢大齿轮 | YG8 | | 每次可铣齿10~15个 | 每次可铣齿20~30个 |
| 江苏泰县 柴油机厂 | 插齿刀 | 凸轮轴齿轮 | YG8 | | 每次刃磨可加工20件 | 每次刃磨可加工72件 |
| 天津第四 机床厂 | $\phi 98\text{mm}$ $m = 3\text{mm}$ 蜗杆铣刀 | 40 Cr蜗杆 | YG8 | | 切速 $v = 35\text{m}/\text{min}$, 进给速度 $v_f = 14.5\text{mm}/\text{min}$, 切深 $a_p =$ 6.6mm时, 刃磨一次加工5件 | 提高进给速度10%, 其余用 量不变, 刃磨一次可加工10件 |
| 天津机械 厂 | 锥齿轮 刨刀 | 锥齿轮 | YG8 | | 刃磨一次刨2~3件 | 强化前刀面后, 刃磨一次刨 10件 |

表8-17 其他刀具电火花强化实例

| 厂名 | 刀具 | 工件 | 电极材料 | 刀具使用效果 | |
|--------------------|----------------------|---------------|------|------------|--------------------------|
| | | | | 强化前 | 强化后 |
| 天津第二 锻压机床厂 | M6 手用丝锥 | 65Mn 车刀体 | YG8 | 每把丝锥可攻4孔 | 每把丝锥可攻12孔 |
| 江苏泰县 柴油机厂 | M12×1.25 丝锥 | 45钢 连杆 | YG8 | 每把丝锥可攻10孔 | 每把丝锥可攻62孔 |
| 解放军 7426厂 | 剃齿刀 | φ12×24齿 齿轮 | YG8 | 每把刀可剃1个齿轮 | 每刀可剃1个齿轮 |
| 上海梅拉 机厂 | 内花键推刀 | 60DT1 花键孔 | YG8 | 每把刀可推挤300件 | 每把刀可推挤1000件 |
| 天津东方 红汽车配件 厂 | 45钢 站子 | 离合器 封口 | YG8 | 每磨一次封口90次 | 每磨一次可封口600次 |
| 西安第三 印刷厂 | 1.17×0.13 0.05切纸刀 | 纸 | YG8 | 每次磨刀切纸12h | 强化宽度5mm可磨5次,每 次可切纸28h |

表3-18 强化刀具加工高硬度材料的实例

| 厂名 | 刀具 | 工件 | 电极材料 | 强化前 | 强化后 |
|---------|------------------------|---------------------|------|--|--|
| 武汉江岸机床厂 | $\phi 6.7\text{mm}$ 钻头 | C630主轴, 45钢锻件, 硬度较高 | YG8 | 刀具转速 $n_r = 76\text{r/min}$, 进给量 $f_g = 0.8\text{mm/r}$, 每钻一孔需磨钻头10次 | 切削用量不变时, 刃磨几次就钻完480孔 |
| 湖北机床厂 | $\phi 8.5\text{mm}$ 钻头 | 45钢淬火件 HRC50~52 | YG8 | 只能钻HRC32的孔不能钻淬火孔 | 当 $n_g = 400\text{r/min}$, $f_g = 0.1\text{mm/r}$ 时, 每次可钻3孔 |
| 沈阳电缆厂 | 60° 角度铤刀 | 高速钢调质线嘴子 | YG8 | 加工不到1件 | 能加工30件 |
| 天津磨床厂 | $\phi 12\text{mm}$ 立铣刀 | GCr15磨头导轨 HRC40 | YG8 | 切深 $a_p = 30\text{mm}$ 切削速度 $v = 10.8\text{m/min}$ 时, 手动进给, 刃磨一次加工0.3件 | 切削用量相同时, 刃磨一次可加工2件 |
| 天津电机厂 | $\phi 8.5\text{mm}$ 钻头 | 白口铸铁法兰盘 | YG8 | 一次可钻3孔 | 一次可钻15~20孔 |
| 天津内燃机厂 | $\phi 5\text{mm}$ 钻头 | 玻璃 | YG8 | 不能钻 | 刃磨一次可钻2mm深 |

表8-19 用电火花强化工艺修复刀具有实例

| 工厂 | 刀具 | 工件 | 电极材料 | 刀具使用效果 | |
|--------------------------|---|--------------|------|--|---|
| | | | | 修复前 | 修复后 |
| 广西南宁电 影机械厂 | $\phi 10_0^{+0.016}$ mm 及 $\phi 10_{-0.012}^{+0.004}$ mm 铰刀 | 铸铁油泵盖 | YG8 | 铰10孔后尺寸超差报废 | 可铰20孔, 共可修复6~7次 |
| 湖北机床厂 | $\phi 50$ mm硬质合 金套式机铰刀 | HT20-40 | YG8 | 原尺寸 $\phi 49.98$ mm已超差 | 修复后为 $\phi 50.01$ mm, 在T611 机床试铰尺寸为 $\phi 50.02$, 合格 |
| 上海拖拉机 厂 | 括平刀 (德钻) | 铸 铁 | YG8 | 因制造刀具时材料搞错(用 45钢)无法使用 | 恢复使用, 能正常切削, 效果 良好 |
| 上海拖拉机 厂 | $\phi 20$ mm 挤光刀 | ZG45 精铸拔叉 | YG8 | 挤100件后尺寸超差 (0.01mm) | 可挤300件, 加工表面粗糙度 $R\phi 1.6 \sim 0.8 \mu\text{m}$ (光洁度 $\nabla 6 \sim$ 7)合格 |
| 上海柴油 机厂 | $\phi 20$ mm硬质合 金圆孔拉刀 | 钢 件 | YG8 | 校准齿直径磨损超差报废 | 校准齿直径加大 $0.015 \sim 0.02$ mm, 加工表面粗糙度 $R\phi 1.6 \mu\text{m}$ (光洁度 $\nabla 6$), 恢复使用 |
| 天津二锻压 仪表机床及纺 织机械厂等 | $\phi 20$ mm立铣刀 | 铸铁钢件 | YG8 | 原刀具因磨钝退火或为不合 格品, 无法使用, 平均硬度只有 HRC45~50 | 加工钢材, 耐用度为正品刀具的 80~100%, 加工铸铁时为100 ~150%, 加冷却液时高出1~2倍 |

表8-20 硬质合金刀具的电火花强化实例

| 厂名 | 刀具 | 工件 | 电极材料 | 强化效果 | |
|-------------|---------------|-------------------------------|-------------|--|---|
| | | | | 强化前 | 强化后 |
| 天津市大明电机厂 | YG8 90°焊接外圆车刀 | 45钢, J02电机转子铸铝心轴 | YG8, 紫铜及铁铬铝 | 切削深度6mm, 进给量0.5mm/r, 切削速度66m/min时, 每次刃磨可加工3~4件 | 切削用量不变, 每次刃磨可加工11~12件 |
| 天津市东方红汽车配件厂 | φ12mm硬质合金钻头 | 白口铸铁件 | YG8 | 每次刃磨可钻100件 | 每次刃磨可钻800件 |
| 天津机械厂 | YG845°刨刀 | HRC40耐酸钢 | YG8 | 切削深度2mm时, 每次刃磨可刨面积120×240mm ² | 切削深度不变, 每次刃磨可刨面积120×1200mm ² |
| 天津市大明电机厂 | YG890°焊接外圆车刀 | J02电机硅钢片下料模 CrWMn HRC58~62 | YG8 | 用砂轮粗磨, 8h加工1件 | 切削深度0.2mm, 进给量0.05mm/r, 切削速度37m/min, 1.5h可车1件, 刀具耐用度60min |
| 天津市微电机厂 | YT5焊接45°车刀 | 车床尾座套筒 | YG8 | 用YT15加工时, 常崩刃, (因工件上有纵向键槽), 用YT5加工时车一刀需磨刀3~4次 | 强化一次可加工一件 |

第九章 机器零件强化及其应用

对于某些在摩擦状态或腐蚀条件下工作，并由于磨损或腐蚀而失效的机器零件，用电火花强化方法提高其工作表面的硬度、耐磨性和耐腐蚀性，被证明是一种有效的方法。在一定条件下，这种方法可以代替某些热处理工序，降低对机器零件材料的要求和改善零件制造的结构工艺性，能收到简便、节约、延长使用寿命的效果。

一、机器零件强化的特点

由于机器零件的材质是多种多样的，并且工作状态各不相同，因此具有不同于刀具、模具强化的一些特点：

1) 不同零件的强化表面质量要求和采用的电规准应通过试验确定。强化零件的耐磨性除与零件本身的表面质量有关外，尚与由该零件构成的摩擦副有关，即与配合零件和结合性质等因素有关。

2) 电火花强化最适合具有小的（或局部）工作表面的零件。对于具有较大工作表面的零件，间断式强化和机械强化将更为适用，而面积大且粗糙度要求细的工作表面，有必要进行大功率厚层强化并进行后续加工。

3) 可以电火花强化的机器零件材料包括各种碳钢、合金钢、铸铁及其它合金（轴承合金、硬质合金等）。强化用的电极材料也不限于各类硬质合金，可以采用其它金属或非金属材料（钨铬钴合金、铁铬铝合金及石墨等）。根据电极

材料的不同，强化处理后的性能也有很大差异。

表9-1 用不同电极材料强化45钢时的强化层显微硬度 (HM)

| 电 极 材 料 | 白亮层显微硬度 | 电 极 材 料 | 白亮层显微硬度 |
|---------|-----------|-------------------|---------|
| YG8 | 1000~1400 | Cr ₃ C | ~1250 |
| YT15 | 1200~1600 | NbC | ~1635 |
| 铁 鎔 铝 | 430~520 | 氮 化 铬 | ~820 |
| 硼 铁 | 1100~1300 | 硼 化 钛 | ~3300 |

表9-2 用不同电极材料强化45钢的相对耐磨性

| 电 极 材 料 | 相对耐磨性 | 电 极 材 料 | 相对耐磨性 |
|--|-------|--------------------------------|-------|
| 45钢不强化 | 1.0 | TiC + 30%Fe | 6.1 |
| TiB ₂ | 8.0 | B ₄ C | 5.6 |
| ZrB ₂ + 5%Mo | 7.6 | Cr ₃ C ₂ | 5.5 |
| Cr ₃ C ₂ + 15%Ni | 6.6 | TiC | 5.0 |

表9-3 用不同电极材料强化45钢的疲劳强度

| 电 极 材 料 | 疲劳强度 (MPa) | 相对疲劳强度 (%) |
|--------------------------------|------------|------------|
| 45钢淬火不强化 | 260 | 100 |
| YT15 | 173 | 66.5 |
| Cr ₃ C ₂ | 194 | 74.6 |
| NbC | 204 | 78.5 |
| ZrN | 203 | 78.0 |
| TiB ₂ | 183 | 70.4 |
| ZrB ₂ | 210 | 80.8 |
| TiC + 30 %Fe | 213 | 82.0 |
| ZrB ₂ + 5 %Mo | 223 | 88.8 |

以45钢为例，用不同电极材料进行强化后的强化层显微硬度、相对耐磨性、冲击韧性、疲劳强度和残余应力分别见表9-1、9-2和9-3及图9-1和9-2。

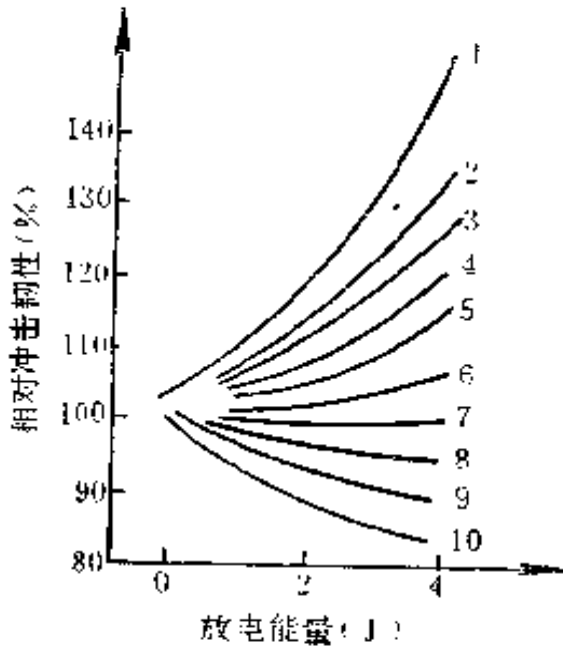


图9-1 强化45钢后的冲击韧性随强化能量的变化

电极材料：1—ZrN

2—ZrC 3—ZrB₂ 4—TiC

5—石墨 6—NbC 7—Cr₃C₂

8—TiB₂ 9—YT15

10—B₄C + TiB₂

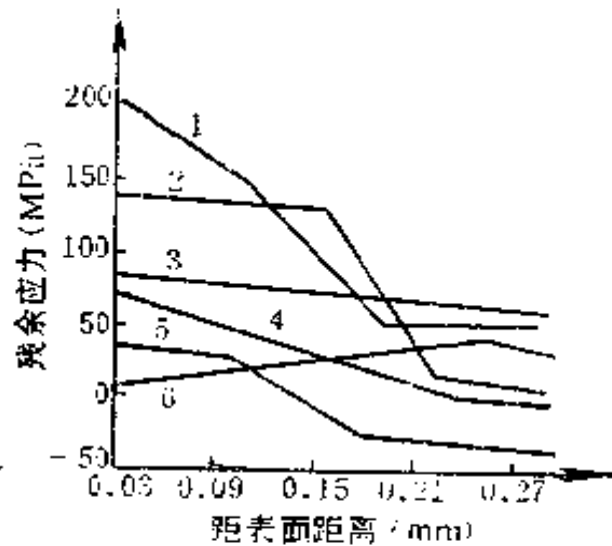


图9-2 强化45钢后的残余应力沿深度的分布

强化条件：电源电压100V

短路电流2.5~3A

电容量300 μ F

比强化时间1min/cm²

电极材料：1—Cr₃C₂ 2—TiB₂

3—YT15 4—TiC + 30%Fe

5—ZrC 6—TiC

二、机器零件强化实例

1. 产品零件的电火花强化

【例1】东风-12型手扶拖拉机快档拨叉的强化

东风-12型手扶拖拉机快档拨叉的工作面由于早期磨损而造成2、5档脱档，长期以来成为该行业的突出问题。采

用高频淬火存在变形和使用断裂等问题，而采用铸钢材料又有加工性能差和成本高等缺点。近年采用了电火花强化工艺，不但性能好，而且加工成本低。其强化工艺规范见表9-4，强化后的零件表面特性见表9-5。

表9-4 拨叉电火花强化工艺规范

| | | | |
|------|--------------------|-------|----------------------|
| 设备名称 | D9110A型 | 工件材料 | HT35-10 可锻铸铁 |
| 电极材料 | YG8 | 电规准 | 45 μ F |
| 电极尺寸 | $\phi 2 \times 30$ | 比强化时间 | 2min/cm ² |

表9-5 拨叉电火花强化层特性

| | | | |
|--------------------------------------|------------|----------|---|
| 厚度(mm) | 0.01~0.015 | 显微硬度(HM) | 1231~1239 |
| 粗糙度(光洁度) Ra3.2 μ m($\nabla 5$) | | 表面磨损比 | 未强化 = 498.0×10^{-5} mg/r 强化 = 7.4×10^{-6} mg/r |

由于采用电火花强化工艺，经强化的近5万个拨叉，基本上都达到了预期效果，在万台拖拉机中，没有一台因快档拨叉早期磨损而返修。拨叉的装机对比试验结果如下：

1) 未经强化的拨叉共8组，平均试验时间155min，平均磨损量为2.22mm；强化的拨叉共19组，平均试验时间240min，平均磨损量仅为0.013。

2) 未经强化的拨叉，经新机带重1t拖车试验，分25组，开5档速度，正常运转60min，平均磨损量为0.404；强化的拨叉在同样情况下分21组试验，平均磨损量为零。

3) 对95台机分24组，共154台次，500h试验，最后经40台机反复试验验证，充分证明电火花强化工艺用于拨叉处

理是完全成功的。

【例2】自行车飞轮芯子弹道强化

山西省平陆县阀片厂用D9130型电火花强化机对自行车飞轮芯子的弹道（滚道）用YG8电极进行强化，强化层总深0.18mm（其中白层深0.1mm，扩散层深0.03mm，热影响层的硬度增高部分深0.05mm），表面硬度HM1200（相当于HRC72，HRA85），经抛光后表面粗糙度 $Ra1.6\mu m$ （光洁度 $\nabla 6$ ），超过了轻标71-15规定的弹道部分硬度HRA68的标准。

经强化的飞轮芯子，以“1982年日本工业标准·JIS自行车标准·D9418-68自行车用飞轮及飞片试验标准”为依据，按飞轮的平丝档“空转以250r/min，运转 $5 \times 10^4 r$ ，弹道与珠子磨合后的光带宽度不能大于珠子直径的四分之一”的规定，在加载50N载荷条件下进行试验，其结果见表9-6和9-7。

表9-6 飞轮在加载50N载荷下的磨损性能

| 运转时间(h) | 转 数 | 相当 km 数 | 磨损情况 |
|---------|--------|---------|------|
| 3 | 52500 | 110.25 | 无异状 |
| 16.5 | 247500 | 519.75 | 同上 |
| 18 | 270000 | 567 | 同上 |
| 16 | 240000 | 504 | 同上 |
| 23 | 420000 | 882 | 同上 |
| 42 | 630000 | 1322 | 同上 |
| 11 | 165000 | 346.5 | 同上 |

试验表明，在加载50N的1323km运行及装车后的2100km运行中，芯子弹道部分都完好无损。经强化的飞轮总装配后

表9-7 飞轮装配后实际运行的磨损性能

| 总里程(km) | 上坡(km) | 下坡(km) | 磨损情况 |
|---------|--------|--------|------|
| 2100 | 1000 | 1100 | 无 |
| 1300 | 650 | 650 | 无 |
| 1600 | 800 | 800 | 无 |
| 1800 | 900 | 900 | 无 |
| 1000 | 600 | 400 | 无 |

的跳动量有85.2%以上控制在0.25mm以内（优质产品标准），比整体渗碳淬火的芯子高3倍以上，响声清脆，灵敏度高，质量上产生了飞跃。而强化成本每个仅需1分钱，比原工艺降低60%。

【例3】汽轮机末级叶片强化

上海电力修造总厂等对25000kW汽轮机末级叶片（图9-3）的进汽边进行电火花强化，与高频淬火、镀硬铬及等离子喷涂等工艺方法相比，其效果较好（图9-4）。

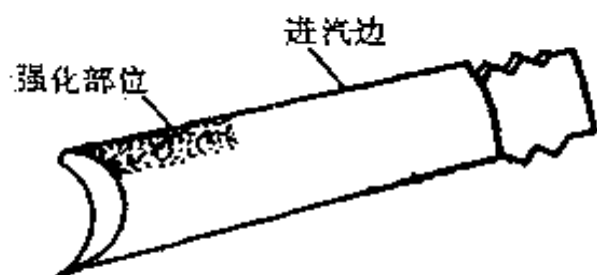


图9-3 汽轮机叶片的进汽边电火花强化

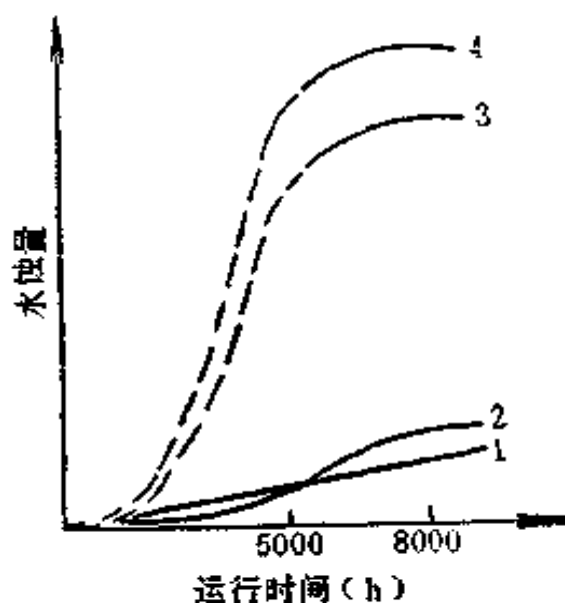


图9-4 各种强化工艺对叶片水蚀的影响

1—高频局部淬硬 2—电火花强化
3—镀铬 4—等离子喷涂(Al_2O_3)

叶片材料为 2Cr13, 电极材料为YT15, 强化层深度为 0.3~0.5mm, 表面硬度HM850。强化后进行喷丸处理, 以消除或减轻强化引起的抗拉强度、冲击韧性、延伸率和断面收缩率的下降, 尤其是疲劳强度的大幅度下降(约50%)。测试结果表明, 喷丸后的疲劳强度(σ_{-1})提高很快, 反而比未强化叶片高出25%左右。

叶片运行表明, 采用电火花强化工艺处理的可在 4~5 年内保持进汽边型线不受水蚀损坏, 并可在发电厂进行现场修复。

2. 夹具零件的电火花强化

【例1】料盘口强化

ZC9005型高速铣口机的料盘(图9-5), 材料为 T10 A, 热处理要求60°两槽面淬硬到HRC62~65。由于用火焰淬火和高频淬火都满足不了要求(只达到HRC45左右), 因此原夹具在三班制生产时, 20天即报废(60°面磨损出沟纹, 使零件装夹不紧)。

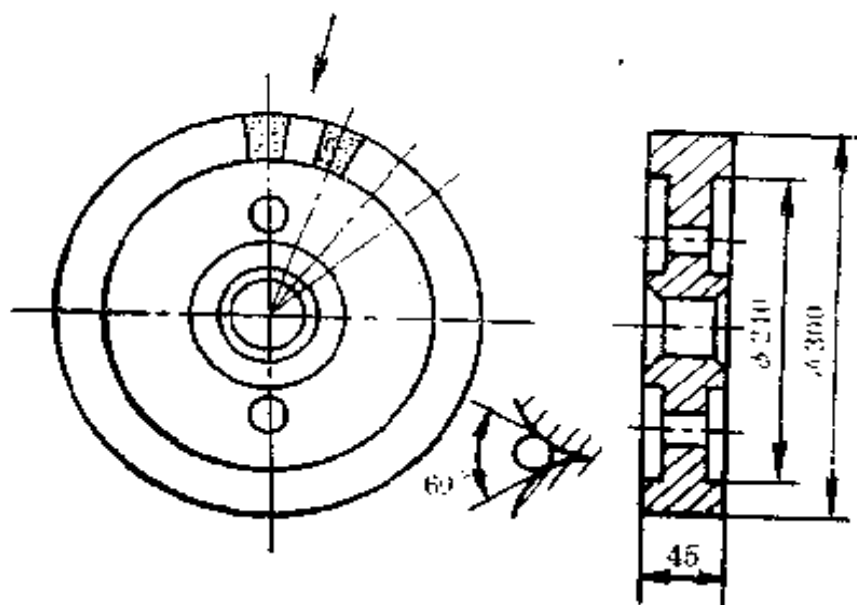


图 9-5 高速铣口机料盘

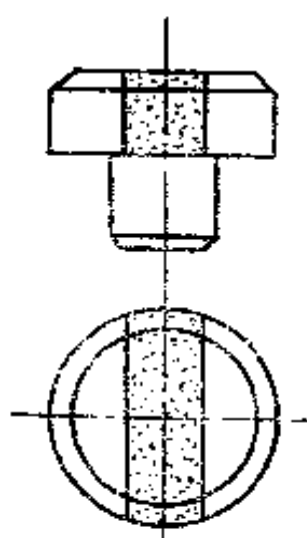


图9-6 定位销
支承面的强化

采用D9130型电火花强化机对 60° 槽面进行强化后，单面厚度增加 $0.05\sim 0.06\text{mm}$ ，粗糙度 $Ra3.2\mu\text{m}$ （光洁度 $\nabla 5$ ），使夹具寿命提高到两个月以上。

【例2】定位销等零件强化

量具刃具厂对一些镶焊硬质合金的夹具零件及上下配合位置都需要淬火处理的零件的制造工艺进行改进，用电火花强化代替硬质合金镶焊（图9-6），或者将配合的淬火件之一采用电火

花强化，使零件的制造工艺性大为改善，既保证了质量，又节约了材料和制造工时。

3. 大型零件的电火花强化

【例1】机床导轨强化

一些工厂对C620、C630等车床的滑动导轨面进行电火花强化（图9-7），用模板或手工操作，在工作面上强化成网状或鱼鳞状条纹，使导轨耐磨性显著提高，延长了大修周期。使用和分检表明，两班制开动的机床可延长导轨大修周期3~4年。

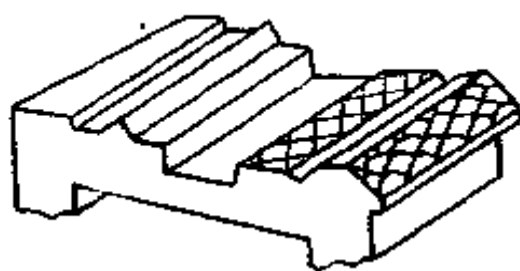


图9-7 车床导轨面的强化

【例2】轧辊强化

一些钢厂用D9110A和D9130型强化机，对直径200~600mm的几种型材轧辊工作面进行电火花强化，使轧辊寿命延长一倍以上，不仅减少了轧辊需要量，还节省了更换轧辊的时间，使产量得到提高，收到了显著的技术经济效益。

图9-8为250轧机K4孔轧辊工作面电火花强化示意图。轧辊直径260mm，工作面长度510mm，材料为冷硬铸铁。共28条槽，用D9130型强化机对其中9条槽进行强化。电极材料为YG8，电极尺寸为 $\phi 3 \times 30\text{mm}$ ，强化线速度 8mm/s 。强化层厚度 $30 \sim 50\mu\text{m}$ ，粗糙度 $Ra6.3 \sim 3.2\mu\text{m}$ （光洁度 $\nabla 4 \sim 5$ ），经轧制B2和混合钢种试验，三条槽可轧制265t，是同一对轧辊上未强化槽轧钢能力的两倍。

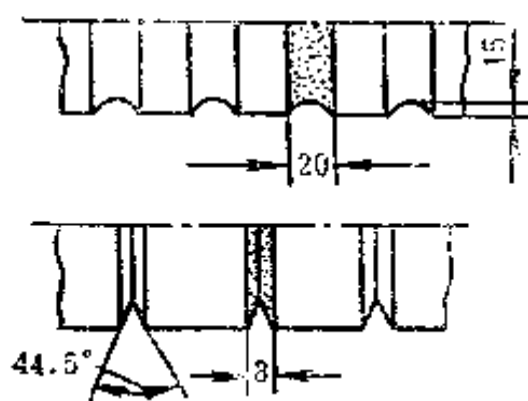


图9-8 强化轧辊工作面

该厂一根 $\phi 270\text{mm}$ 冷硬铸铁轧辊的强化费用表明，每次强化费用不到30元，原轧辊购价每根400元，可重复强化4次，强化一次节约70元，尚不包括由于调槽、调辊次数减少，轧材能源消耗下降，以及不停机线材成材率提高的经济效益。尤其对于大型轧辊，其效益将更为显著。

该厂一根 $\phi 270\text{mm}$ 冷硬铸铁轧辊的强化费用表明，每次强化费用不到30元，原轧辊购价每根400元，可重复强化4次，强化一次节约70元，尚不包括由于调槽、调辊次数减少，轧材能源消耗下降，以及不停机线材成材率提高的经济效益。尤其对于大型轧辊，其效益将更为显著。

三、零件强化的机械化和自动化

实现零件电火花强化过程的机械化和自动化的意义在于：

1) 可以使强化过程的电气、机械和状态参数稳定,从而获得良好的性能一致的强化层。尤其对于具有一定规律的成形表面,机械化和自动化更为必要。

2) 在相同的强化规准下,与手工相比,机械化和自动化强化可获得更均匀和粗糙度更细的强化层。

3) 在用大功率强化设备进行大厚度电火花强化时,机械化和自动化强化更能保证强化层的致密性和均匀性,几乎是手工操作所不能代替的。

4) 可以提高强化的生产效率,极大地减轻工人的劳动强度。这在大面积、大厚度和成形表面强化时更为突出。

电火花强化的机械化和自动化所要确定的主要参数和必需解决的问题包括下述几方面:

1) 电规准。包括供电电压、储能电容器容量、平均工作电流及短路电流等。

2) 电极与工件表面间的相对运动参数。比如,通常采用的旋转电极方式(图9-9),其运动参数包括:工件旋转速度、工具头旋转速度、纵向进给量及电极数等。

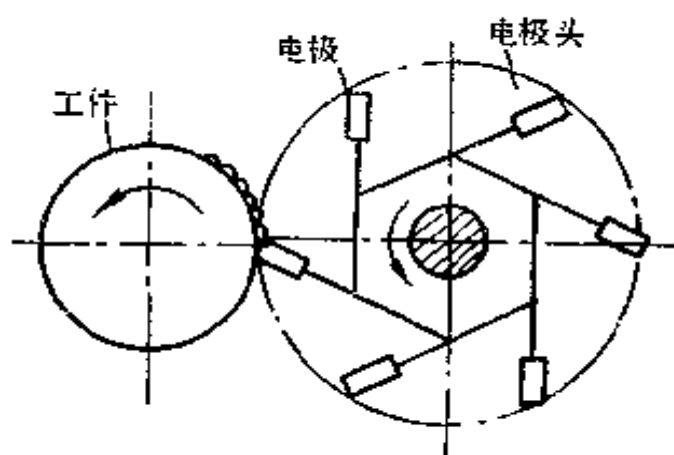


图 9-9 旋转电极头的机械化强化示意图

3) 被强化工件条件。如工件材料、外形尺寸、表面温度和状态等。

4) 强化用电极条件。如电极材料、截面大小、电极长度、电极运动方式及电极温度等。

5) 电极头结构。要考虑电极所在圆周位置、电极弹性位移轴的圆周位置、电极对工件表面的接触压力等。

6) 极间介质。例如，介质的化学成分、状态以及压力等。

机械化强化同样要根据工件的技术要求对强化层质量进行控制，这些要求包括：强化层厚度、均匀性、致密性、气孔率、疲劳强度、冲击韧性、裂纹状况、残余应力、粗糙度、硬度、耐磨性、耐热性及耐腐蚀性。

用电磁式振动头实现的最简单的机械化强化装置示意图如图9-10所示，其进给及压力控制依靠固定的重量来实现。凭观察火花颜色来判断强化的效果。当用D9105或D9110型电火花强化机在普通车床上以精规准强化圆柱表面时，表面粗糙度（光洁度）可稳定地达到 $Ra0.8\mu m$ ($\nabla 7$)。

江苏常州拖拉机厂为东风-12型手扶拖拉机快档拨叉强化，设计了专用的机械化强化设备，每次可同时强化两个零件。

国外在机械化和自动化强化方面已有多种装置和机构。

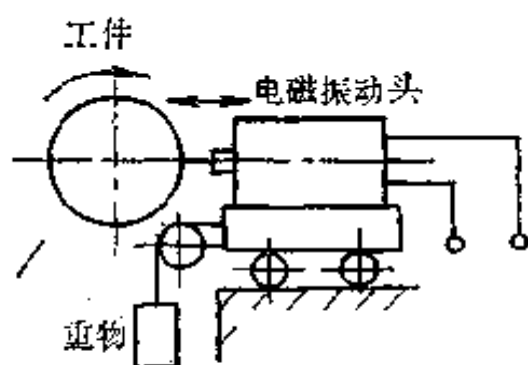


图9-10 压力进给的电磁振动头机械化强化装置示意图

这些装置通常由三个部分组成。

1. 脉冲电源

各种大、中、小功率的电火花强化用脉冲电源均可用于机械化和自动化强化

2. 电极头

手工操作作用的电磁式电极头都是单电极的，可以用于机

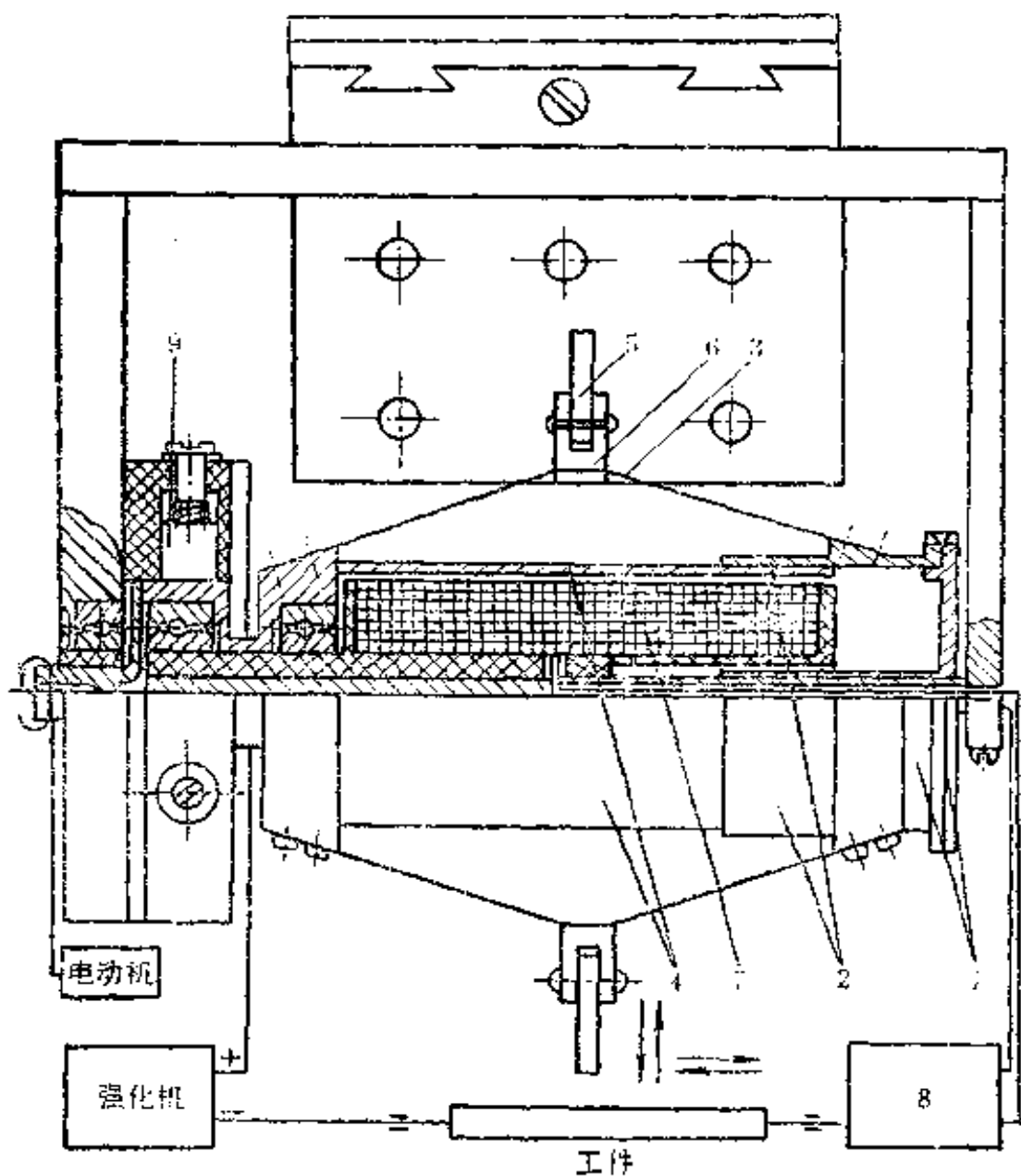


图9-11 电磁式旋转多电极电极头示意图（一）

械化、自动化强化。但多数机械强化采用旋转多电极结构的电极头。

图9-11和图9-12(11)所示的两种电磁式旋转多电极电极头都采用了振动调节线圈，以改善各个电极消耗不均匀而产生强化点漏空的缺陷。图中1为电枢，4和2为一组可以相对滑动的衔铁，它们通过弹簧片3组成弹性电极夹6，5是强

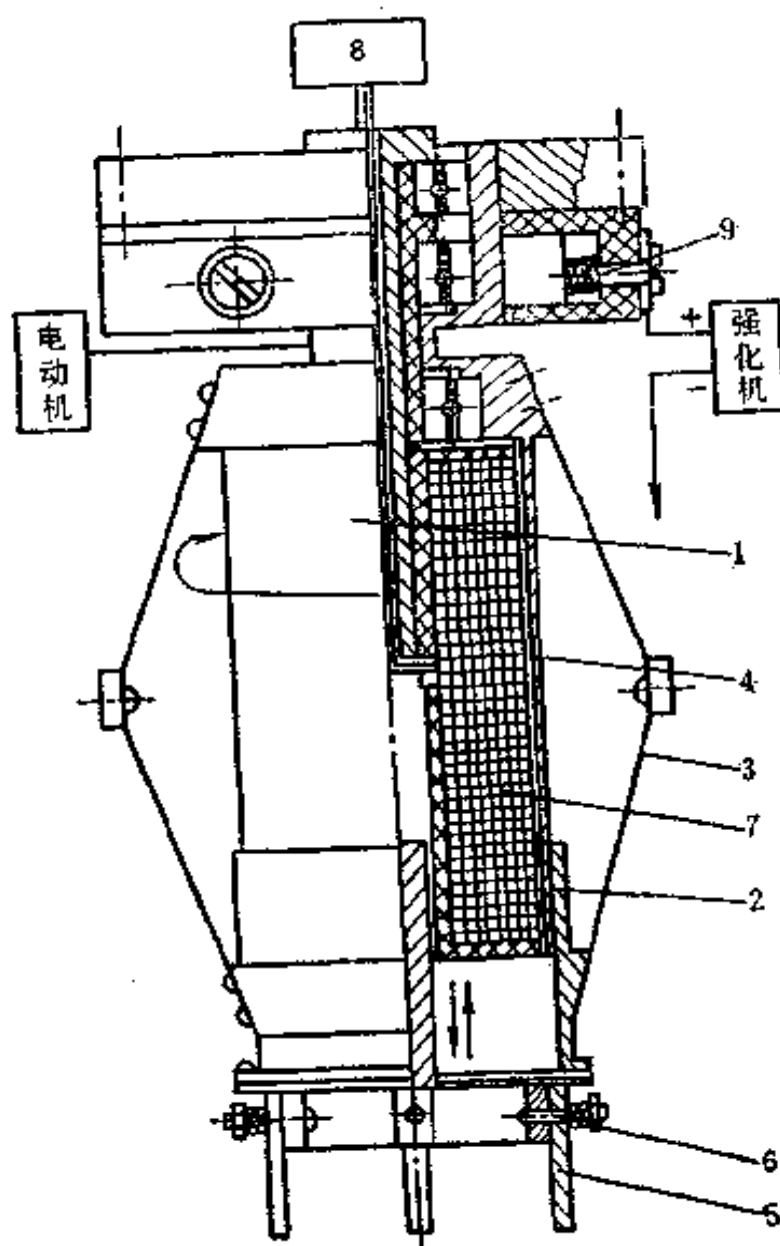


图9-12 电磁式旋转多电极电极头示意图 (二)

化用电极。作为振动调节线圈 7 的电源 8 装在电极头外的不动的结构上。强化机的脉冲电流经电刷 9 接入电极头电极。另一极与被加工零件连接。电极头的转速从 $0 \sim 800 \text{r/min}$ 连续可调。由于振动调节器的作用，这类电极头可以很好地完成六方、圆锥和具有 10mm 偏心的旋转体的表面强化。

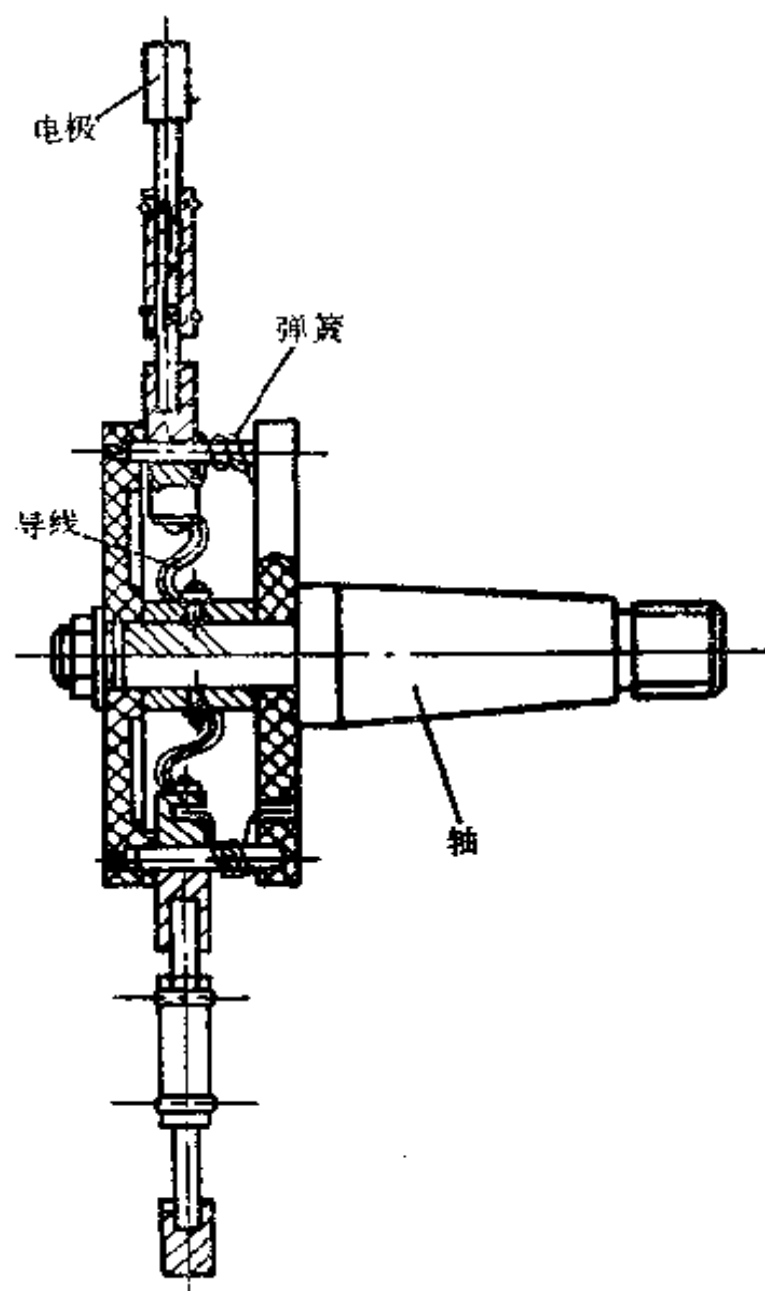


图9-13 弹性连接旋转多电极电极头的结构示意图 (一)

图 9-13〔12〕和图 9-14 是另一类具有弹性连接的旋转多电极电极头结构示意图，其弹性环节的高灵敏度可以保证在小位移和工件表面的微量起伏时有正常的振动运动。强化频率的调节是由电动机带动电极头以无级调速方式实现的。

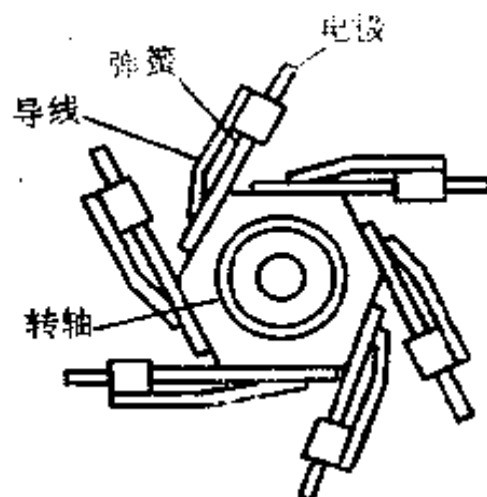


图9-14 弹性连接旋转多电极电极头结构示意图（二）

此外，还有所谓滚子式的多电极旋转电极头。

3. 机械装置

机械化强化装置可以利用现有的各种通用金属切削机床（车床、铣床等）改装使用，也可以设计各种专用机械装置。

天津市大明电机厂用C630普通车床，将D9105型强化机的手持振动头增加一个弹性连接片，架装在车床刀架上，对电动机轴颈进行电火花强化，工件直径40mm，转速5r/min。刀架纵进给用手动，压力凭强化机工作电流来调整，可得到厚度0.01~0.015mm、粗糙度 $Ra0.8\mu m$ （光洁度 $\nabla 7$ ）的强化层。

图9-15是用1M13丝杠车床强化轧辊的装置示意图〔13〕。多电极旋转电极头通过齿轮减速器和驱动电机安装在车床刀架上。脉冲电源依靠电刷加到工件和电极上。

图9-16为用万能铣床6H82Г强化剪断机零件的机械化强化装置示意图。零件材料为Y8A，HRC58~62。零件与

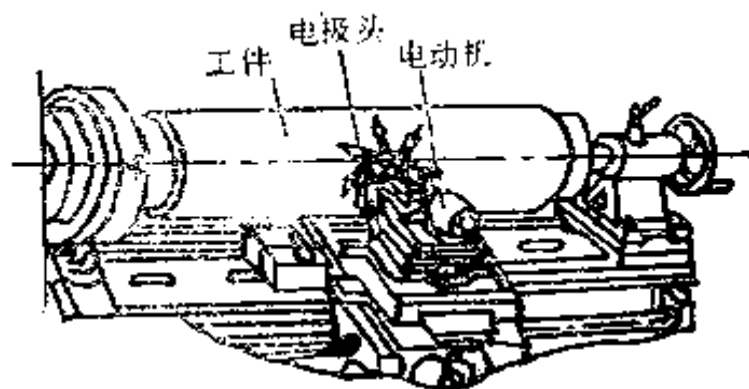


图9-15 轧辊强化装置示意图

机床工作台绝缘，并与脉冲电源负极相连。旋转电极头转速 $60\text{r}/\text{min}$ ，纵进给速度 $67\text{mm}/\text{min}$ 。工具电极为BK8，强化设备用ЭФН-25。强化后的零件使用寿命可提高 $1.5\sim 2$ 倍。

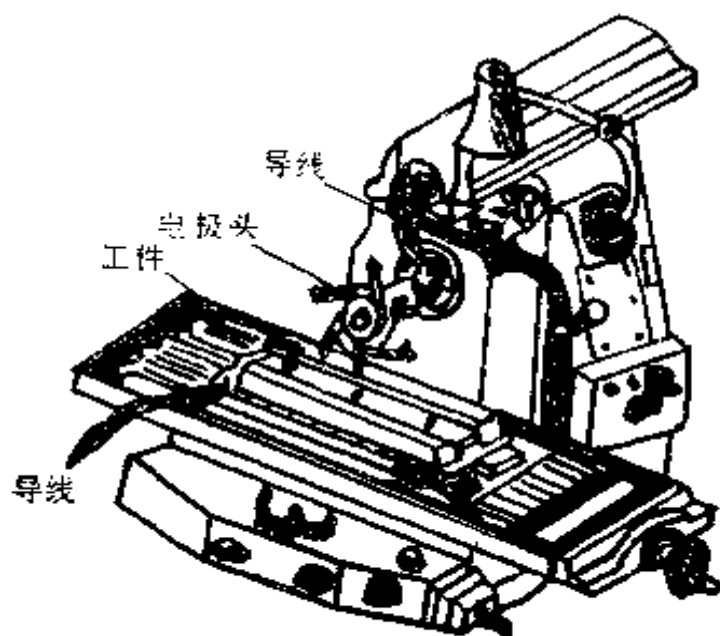


图 9-16 剪断机零件机械化强化装置示意图

图9-17为强化圆锥形零件的专用机械装置。零件的母线处于水平位置，并可以转动和随小车作水平移动。电极与零件间的距离可通过杠杆调节。零件转速 $0.5\text{r}/\text{min}$ ，直线移动1双行程/ min （40mm长），电极转速 $40\text{r}/\text{min}$ 。强化后的零件使用寿命提高 $2.5\sim 3$ 倍。

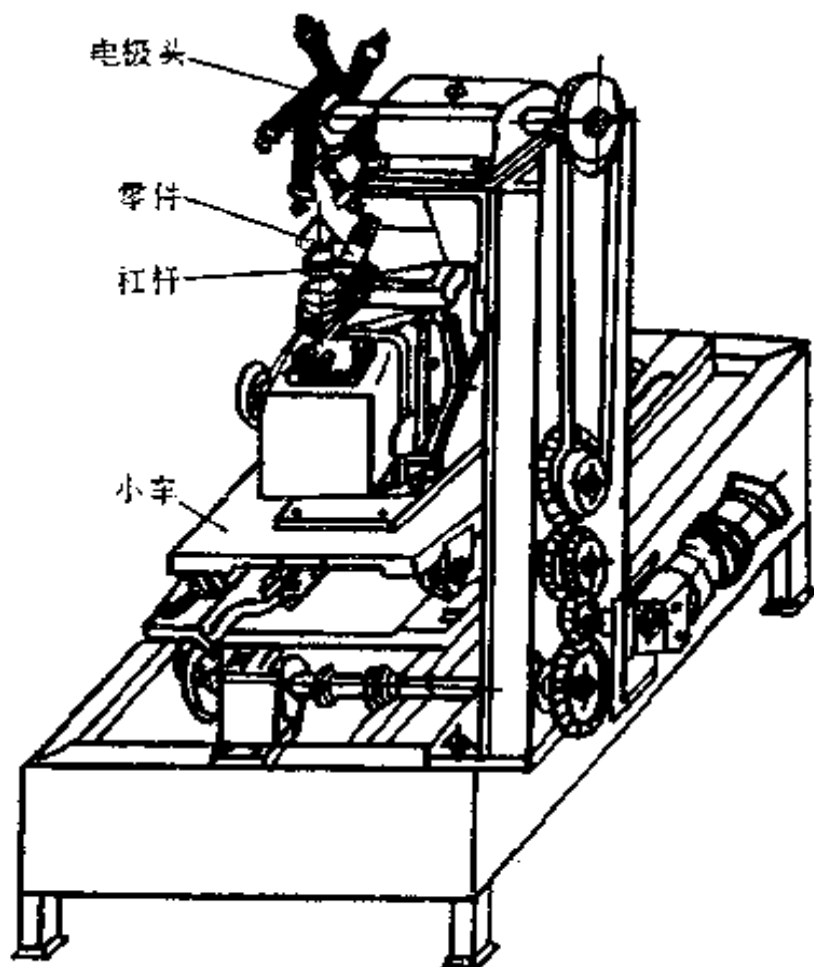


图9-17 圆锥形零件强化专用机

图9-18为双重旋转电极机械化强化专用装置。工件安装在减速器输出轴的夹头上，而电极头另由一个单独的传动系统来传动，每个旋转电极头各用一个脉冲电源输入，这样的双重电极装置比单头的强化效率提高 $1.5\sim 2$ 倍。

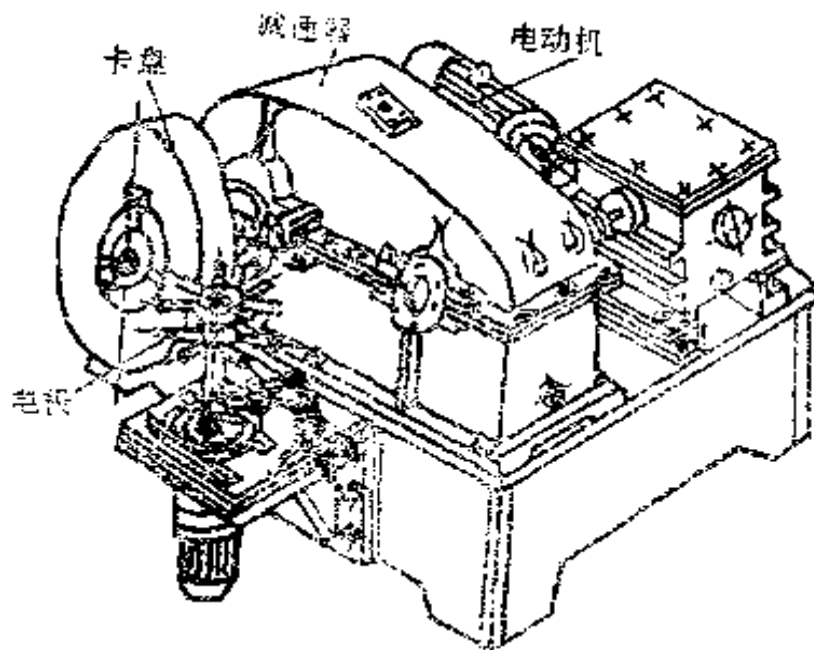


图9-18 双重旋转电极强化机

自动化强化系统的电极与工件之间的接触压力是利用某种形式的伺服机构来控制的。图9-19是强化齿形零件的半自动强化装置的传动系统图。零件的定位心轴通过齿轮副 z_1-z_2 、超越离合器3和电动机 D_1 组成工作进给传动链。而通过电机 D_2 、齿轮传动副 z_3-z_2 实现工件的快速转位。电极4及电磁振动头5与主轴8连接，并通过电机 D_3 实现强化时的压力控制。控制系统由输出信号、比较环节和放大器三部分组成。而电机 D_4 通过凸轮6、拨叉7使振动头水平振动，以防止电极沿宽度方向消耗的不均匀。当一个齿强化结束时，由 $\Pi-\Phi$ 组成的光感传感系统将信号经放大器1放大后输入进给系统。联锁装置2则用以协调整个系统的自动工作循环。

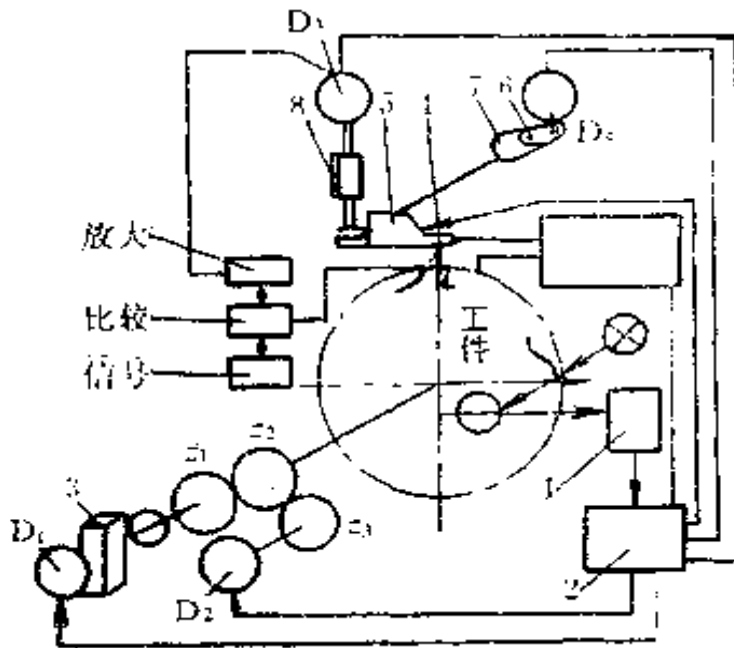


图9-19 半自动强化装置传动系统

四、零件电火花强化工艺的发展

电火花强化工艺在零件强化方面有着广泛的应用前途，并将有更大的发展，主要表现在：

1) 应用对象将进一步扩大。国内外已在磨损零件、腐蚀零件（如医疗器械）以至复杂的传动零件（丝杠等）和大型零件上找到了更多的用途。

2) 强化方法的进一步发展。将由单电极、多电极和粉末强化等多种方法形成一个大的领域。激光-电火花强化、超声-电火花强化以及电火花与其它机械加工方法的复合，将使电火花强化工艺更富有生命力。

3) 手工强化与机械化强化相结合，为成熟的零件强化工艺设计通用或专用的机械化、自动化强化机床，将使电火花强化工艺取得更大的技术经济效益。

第十章 磨损表面的修复

电火花强化层具有一定的增厚量，所以电火花表面强化工艺除了应用于模具、刀具和机械零件易磨损表面的强化外，还广泛地应用于修复各种模具、量具、轧辊、零件的已磨损表面，使这些要报废的产品能够重新使用，既解决了生产上的急需，保证生产计划按期完成，又节约了大量的资金，为厂矿企业创造大量的财富。

由于被修复产品的磨损情况不同，技术要求也各异，所以在用电火花强化修复时，必须根据具体的零件制定、选用合适的强化修复方法和工艺参数。

一、磨损表面修复的操作规范及注意事项

为了保证磨损表面的修复质量，必须遵循前面已经介绍过的一些原则，现根据修复要求归纳如下：

1) 由于各型号的强化机都有一个单边最大增厚量（强化层最大厚度），所以应根据本单位的强化机型号选择被修复对象，被修复工件的磨损层厚度应小于该型号强化机的单边最大增厚量，否则就无法修复。

2) 被修复表面应进行仔细清理，否则将使修复层产生气孔、氧化物夹杂等缺陷，影响修复层的质量。

3) 根据修复层的厚度和被修复工件的材料选择电极材料和电规准，磨损大的要选用较强的电规准；反之，应选用较弱的电规准。但为了降低修复表面的粗糙度，最后都要用弱

规准进行修整。

4)操作时电极要与工件表面倾斜一个角度,减少电极对工件的冲击和振动。电极不允许正对着修复件的夹角、棱边和刃口放电,以防止将模具、量具、刀具等的尖角、棱边和刃口打钝。

磨损表面修复过程的操作方法与强化过程基本上相似,要求电极移动要连续均匀,其移动速度要保证整个修复层致密无间断,一般比强化时间为 $2 \sim 3 \text{ min/cm}^2$ 。修复层厚度在一定的电规准下有一个极限值,如果达到了该值后还继续强化,修复层不但不会增厚,相反地还会出现减薄、疏松、裂纹和气孔等缺陷。

下面就模具、量具和机器零件的磨损表面修复工艺进行论述。刃具磨损表面的修复在本书“刀具强化及其应用”一章中已谈及,这里就不再重述。

二、模具磨损表面的修复

模具在使用中,由于所受的应力状态不同,所以在正常工作条件下,其损坏的原因和部位也不同,例如:冲裁模是以刃口磨钝和崩口为主;拉延模是以凹模模口的磨损为主;而锻模是以磨损、裂纹和局部变形为主。因而不同的模具其修复的部位也不同。但必须注意,用电火花强化法修复模具,只能进行磨损表面、磨钝的和崩口刃口的微量修复,不适宜对模具裂纹和模具的形位宏观变形的修复。

1. 冲裁模磨损表面的修复

作用在凸、凹模上的力为被冲裁材料的反作用力(方向与图10-1所示相反)。冲裁时,由于材料的弯曲变形,使凸、凹模端面与材料接触的宽度仅限制在刃口附近,所以垂

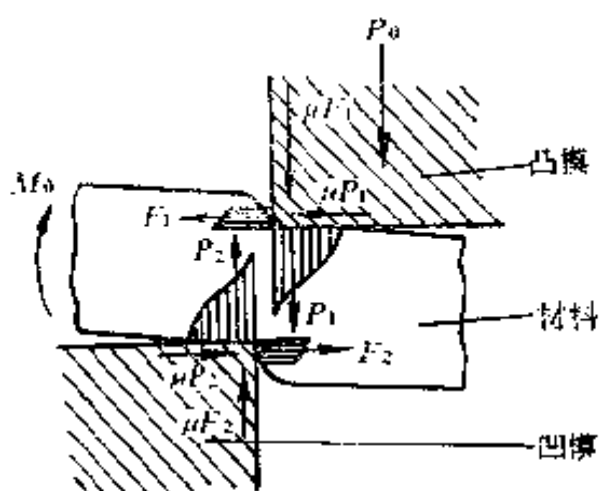


图10-1 冲裁时作用在模具上的力

直力主要集中在刃口部分。间隙小时，冲裁力 P_0 与摩擦力 μP 增大，使刃口所受的压应力增大，造成刃口变形和端面的磨损加剧，甚至崩口。而侧向力 F 和摩擦力 μF 也随间隙的减小而增

大，使凸、凹模侧面磨损严重。

凸、凹模侧面磨损的另一个原因是由卸料和顶件的滑动摩擦造成的。当间隙小时，将增加卸料和顶件的困难，加剧凸、凹模侧面的磨损。间隙增大有利于减小凸、凹模的磨损，但间隙过大时，也将因弯曲力矩和拉应力而导致刃口损坏。而且由于从凸模上卸料，加剧其侧面磨损，所以凸模侧面的磨损比凸、凹模端面的磨损大。

当凸、凹模的刃口磨损后，即使间隙值合理，也将在冲裁件上产生毛刺。当凸模磨损时，毛刺产生在落料制件上（图10-2b）；凹模刃口磨钝时，毛刺产生在所冲的孔上（图10-2a）；若凸、凹模都磨钝，则制件与孔上均出现毛刺。所以为了保证冲裁件的质量必须对模具进行修复。

由上面的分析可知，冲裁模的磨损主要是在与刃口相邻的端面和侧面的一定宽度范围内，所以这些部位也就是要强化的部位。

冲裁模具修复时通常用YG8等硬质合金作电极，先用中规准强化到所需的厚度，再用精规准进行修整以降低表面粗

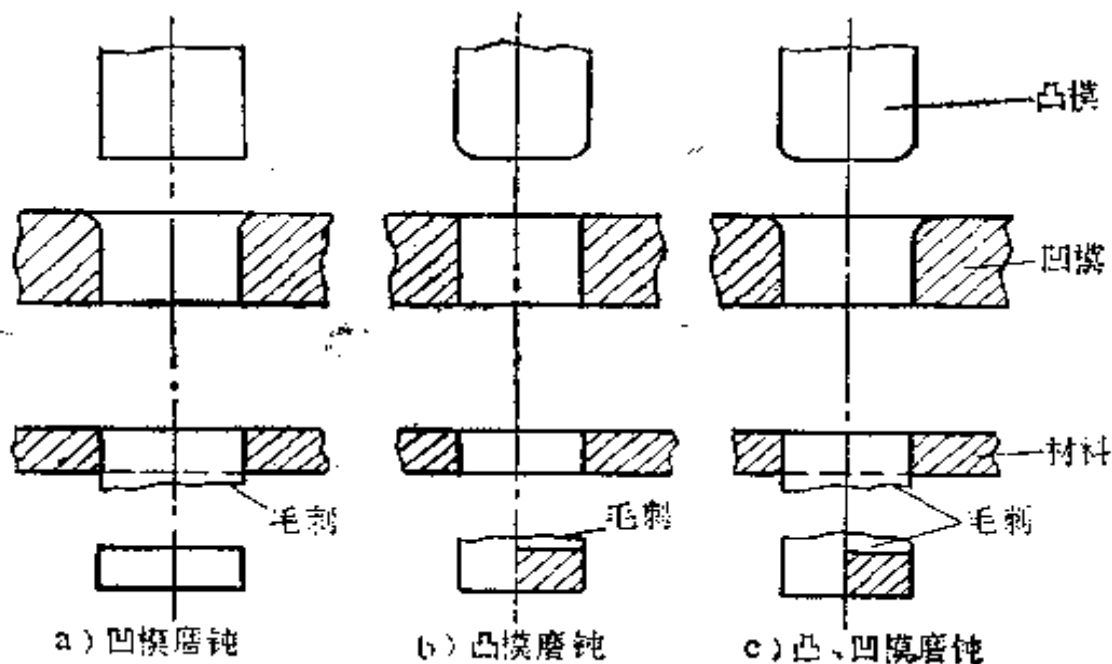


图10-2 凸、凹模磨钝与冲裁件毛刺分布情况

糙度。

例如有一副扼流圈山字铁芯冲裁模，由于使用时间长，凸、凹模配合间隙增大，单边间隙为 0.12mm ，冲裁出来的零件毛刺已达 $0.4\sim 0.6\text{mm}$ ，个别地方已出现拉断现象，此模已属报废模具。为了满足生产的需要，对凸模和凹模进行强化修复。每边强化厚度为 0.03mm ，结果冲出来的零件的毛刺在 0.1mm 以下，已符合要求。修复后使用5次，冲裁7万多件，延长模具寿命三分之一。

又如 1250kW 发电机扇形复式冲模，使用一段时间后，单边磨损超差 $0.02\sim 0.03\text{mm}$ ，已报废。但在凹模磨大部位或凸模磨小部位，采用粗、中、精规准进行强化修复，强化层的厚度为 $0.02\sim 0.03\text{mm}$ ，不仅达到了技术要求，而且使模具使用寿命延长二倍左右。过去修复一副模具最少要花费两个月时间，现在只要两天就修复好，保证了生产任务的完

成，并且每修复一次就可节约人民币4500元左右。

2. 拉延模磨损表面的修复

拉延是利用材料的塑性变形而达到板料成形的一种加工工艺。它的变形原理如图10-3所示。I区为凹模口的凸缘部分，这是拉延变形的主要区域，受到板料进入凹模时的径向拉应力、切向和垂直方向的压应力，以及材料移动时的摩擦力的作用；II区为凹模圆角部分，是个过渡区，除了受I区相似的应力外，还受板料弯曲时所产生的压应力和较大的摩擦阻力；III区为筒壁部分，此区材料不发生大的变形，只受拉延时的单向拉应力作用；IV区为凸模圆角部分，也是过渡区域，这区变形小，拉应力较大，摩擦阻力较小；V区为筒底部分，不产生大的变形，只受径向拉应力作用。

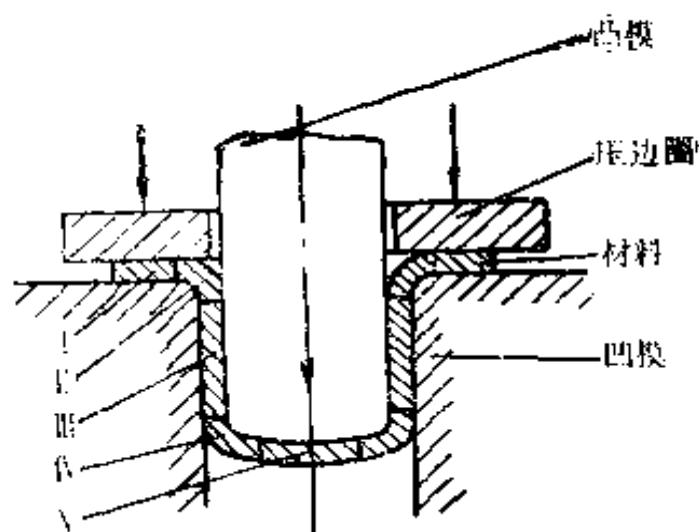


图10-3 拉延变形示意图

由上述应力应变状态分析可知，拉延模主要磨损是在凹模口的凸缘部分和圆角部分，使圆角半径加大，而这个部位磨损后将引起毛坯起皱，影响零件的质量。所以在拉延模修复时的修复部位主要是在凹模模口的凸缘部分和圆角部分。

而凸模磨损较小，主要是在圆角部分，一般可不修补，但如果对零件的内圆角半径有严格要求，那么凸模也需修复。修复方法与冲裁模相似，但因为凹、凸模上不存在刃口被倒圆问题，所以修复要容易一些，所用电规准也可以大一些。

3. 锻模磨损表面的修复

在锻造时，由于坯料在型槽内流动而与型槽的表面产生激烈的摩擦，造成型槽表面的磨损，以至引起尺寸变化。特别是毛边槽桥部的磨损最快，因为金属变形填满型槽后流入毛边槽时，桥部厚度薄、冷却快，金属与桥壁的摩擦特别激烈。同时将在型槽表面形成无数凹凸不平的摩擦沟槽。在整个模槽内，坯料变形困难的部位，产生的磨损往往较小。锻模的损坏，大多数是从表面层金属的磨损和裂纹开始的。毛边槽桥部的磨损将引起锻造时的充填阻力不足而造成废品和由于尺寸、形状的变化而影响产品质量，这对精度要求较高的锻模更为重要，必须及时进行修复。

锻模的修复，一般是用强规准和中规准。修复的部位主要是在毛边槽的桥部（见图10-4）以及金属变形流动较大的部位。

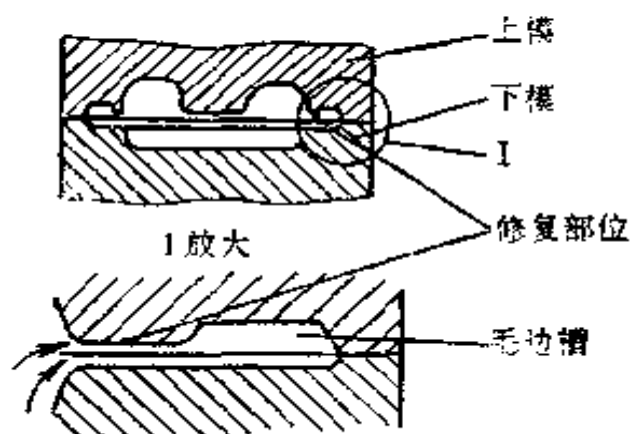


图10-4 锻模的修复部位

表10-1 模具电火花强化修复实例

| 厂名 | 模具名称 | 模具材料 硬度 | 工件材质 | 修复部位 | 使用效果 | | 备注 |
|-----------|-------------------------|-------------------|--------------|--------------|----------------------------|----------------------|-----------------|
| | | | | | 修复前 | 修复后 | |
| 兴化橡胶制品厂 | 105 × 130 × 14 油封模具 | | | 磨损部分 | 超差 | 正常使用 | 粗糙度略粗 |
| 柳州标准件厂 | M16 螺母冲孔 抱模 | 9SiCr HRC58~61 | | 超差部分 | 超差0.01~ 0.02mm | 比新模提高5 倍 | 开机率提高 15~20% |
| 苏州第四光学仪器厂 | 冲模 | 45、A3、20 | | 刃口 | 试模即刃口变 钝 | 正常使用, 有 的冲件达万件 | 节约重制模具费1 万余元 |
| 武昌电扇厂 | 400mm排扇转 子 | | 砂钢片 | 磨损部分 | 毛刺超差 | 正常使用 | 节约1万余元 |
| 南宁电影机械厂 | 山字铁芯模 | Cr12 HRC58~62 | 砂钢片 0.5mm | 磨损部分 | 间隙大毛刺 0.4~0.6mm | 毛刺0.1mm以 内, 冲片7万件 | |
| 扬州柴油机厂 | 吊耳复合冲模 大型气缸盖罩 切边模 | T8 9SiCr | 1.5mm 钢板 | 磨损部分 超差部分 | 冲2000件已报废 热处理变形间 隙超差 | 冲1万件 正常使用 | |
| 天津吊扇厂 | 洗衣机电动机 转子复式冲模 | Cr12 | 砂钢片 | | 间隙超差报废 | 冲5万件仍可使 用 | |

如有一副多缸发动机曲轴的热锻模，材料为5CrMnMo，锻造一段时间后，锻模的毛边槽桥部等磨损而影响锻件质量。后在D9130型强化机上用直径4mm的YG8电极进行强化修复，粗规准用300 μ F、1.5A，中规准用80 μ F、1.5A，强化修复后进行消除内应力热处理（加热到450~480℃，保温2~4h），修复后的锻模锻造出来的锻件达到技术要求。

模具磨损表面的修复，除了上述冲裁模、拉延模和锻模外，还可以修复弯曲模、挤压模、压铸模和塑料模的磨损表面，其修复工艺规程基本上相似，就不再一一叙述。

表10-1所列是模具电火花强化修复实例，供参考。

三、量具磨损表面的修复

游标卡尺、千分尺、塞规、卡规、深度尺、高度尺等量具，在测量过程中与工件表面经常接触摩擦，其测量面或工作面容易产生磨损。由于量具是计量工具，精度、粗糙度要求严格，发现磨损应及时调整修复。用电火花强化修复量具时，一般只能用中规准和精规准，操作时要特别注意不要把量具的刃口和尖角损坏。同时修复后通常都要对修复表面仔细地进行研磨，以降低粗糙度，保证量具的精度。

游标卡尺的两个卡脚工作面磨损以后，在进行修复前，应先把两卡脚研磨平贴，然后强化两卡脚工作面（见图10-5），再轻轻地研平，最后调整零位。经过强化修复的游标卡尺可以恢复到原来精度，而且耐磨性有所提高。

千分尺的修复方法与游标卡尺相似，也要先把两个测量头的圆柱端面研磨平贴，再进行强化修复。但可以用稍强一些的电规准进行粗修，再用中规准，最后用精规准进行修整，强化后再进行研磨至技术要求。

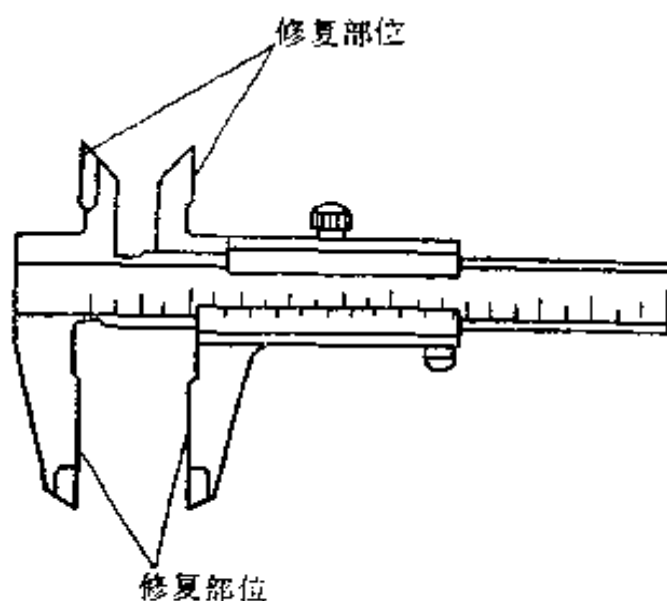


图10-5 游标卡尺的修复部位

塞规在使用中，很容易产生磨损，有时还会因使用不当造成划痕、拉伤等现象。用电火花强化修复时，最好使塞规绕自身的轴线旋转，电极移动速度要连续均匀，保证强化层增厚一致。修复后进行微量修磨和研磨，以恢复到原来的精度和表面粗糙度。

四、机器零件磨损表面的修复

各种机器零件在使用过程中，由于零件配合面间的相对运动而产生摩擦磨损。如各种金属切削机床、汽车、电机、动力机械、建筑机械、农业机械、钻探机械等的转动轴轴颈、凸轮、拨叉、滑块、偏心套、机床导轨面、曲轴轴颈等等，都承受较大载荷和旋转摩擦，在使用中产生磨损。也有些零件是在加工过程中超差，都会造成设备不能运行或零件不能装配而报废，不仅影响生产，而且经济上也造成很大的损

失。如果用电火花强化修复工艺，对其中的一部分零件进行修复使用，将对生产建设起很大的作用。

机器零部件的修复，是直接地在相应的已磨损表面上进行。对面积较大的磨损表面，如机床的导轨面，大的轴颈（图10-6）等，可以强化成网状花纹。所用规准可根据修复表面层厚度、面积、粗糙度要求合理选择，但一般可以选择比较强的电规准，以增大修复层厚度和提高修复的生产率。



图10-6 传动轴的修复

下面举一些例子加以说明：

某修配厂在修理钻探机时，发现汽车钻探机上的卷扬机部分轴承、减速箱轴承和传动轴轴承与轴承座孔配合时，孔径均超差 $0.03\sim 0.05\text{mm}$ ，结果轴承的外壳在孔座内转动。过去修复是先将孔堆焊，再镗孔，很费工时。现改用电火花修复工艺，一次修复至标准尺寸，大大缩短了修复周期，减少修复费用。1983年至1984年对30余台汽车钻探机修复60余台次，强化近700个轴承座孔，仅此一项就节约修理费用一万余元。强化修复工艺为：精规准—粗规准—精规准，即先用 $20\mu\text{F}$ 电容强化（比强化时间 $2\text{min}/\text{cm}^2$ ），再用 $80\mu\text{F}$ 或 $160\mu\text{F}$ 电容强化（比强化时间 $2\text{min}/\text{cm}^2$ ）增大修复层厚度，最后用 $20\mu\text{F}$

电容强化修整（降低粗糙度）。所用设备是 D9130 型强化机。

某厂在生产与柴油机配套的F29B型发电机和 ST9517 型起动电机时，每年因加工误差使电机转子轴超差报废近5000个。用电火花强化修复工艺修复转子轴的轴肩，使产品达到合格尺寸，两个月就挽回4000元的损失。

某厂在曲线磨床上磨削一只凸轮靠模，它的尺寸精度要求很高，径差要小于0.003mm，已经磨了一个星期，最后有一段圆弧偏大几μm，在进行再次进刀磨削时，对刀处被磨削凹入0.005mm，重新磨一只既费时又耽误生产任务。后在磨床上直接用电火花强化修复，在凸轮靠模的凹入部位强化增厚0.01mm，然后再磨削，前后用不到1h就磨好，解决了大问题，仅曲线磨削一项就节约加工费250元。

有一台六缸空气压缩机，因曲轴的轴肩磨损，致使该机无法使用。如果调换一根新的曲轴，生产周期长，成本高（1000元以上），而且当时生产又急需该机投入使用。后用 D9110 型强化机，用YG8电极将该报废的曲轴修复，只花了十元钱的修理费，30min就解决了问题，不但节省了上千元开支，更重要的是争取了时间。

这类例子很多，不一一列举。

总之，用电火花表面强化工艺来修复模具、量具、刀具和机器零件等的磨损表面，是一项既方便又经济的新工艺，它已在机械制造等工业部门中崭露头角，必将显示出更大的优越性和经济效果。

第十一章 电火花强化机的其他应用

电火花强化技术除了前面所述的在模具、刀具和机器零件的强化以及对量具、模具、机器零件等的磨损表面的修复中应用外，还可以利用电火花强化机进行电火花穿孔加工、模具等工件工作表面的打毛和在工具、试件上刻字、打标志等。

一、穿孔加工

大家知道，在工件上钻孔、攻螺纹时，特别是对小孔，钻头和丝锥很容易发生折断，使钻头或丝锥断在工件的孔中。而且钻头或丝锥的硬度都很高（通常为HRC60~62），无法用其它机械加工方法取出。所以在不少情况下，往往只好把几乎要完工的零件报废，造成不应有的损失。利用电火花加工虽然可以很容易地把折断的钻头或丝锥取出，但是大部分工厂企业没有价格昂贵（每台几万元）的电火花加工机床。这时可以利用电火花强化机（如D9110A型强化机每台不到五百元）进行穿孔加工，将折断的钻头或丝锥取出，虽然工作效率较低，但仍是一种行之有效的加工方法。

穿孔加工时要把工件浸没在煤油中，加工部位离煤油液面的距离不应小于20mm。煤油是液体电介质。在液体电介质中进行电火花穿孔时，能大大地提高电火花蚀除金属的效果，加速折断钻头、丝锥的取出速度。因为液体介质能压缩电火花放电通道，并限制其扩展，使放电能量高度集中在极

小的放电微区，从而加强蚀除的效果，这对小能量的电火花强化机（如D9110A型强化机的功率只有100W，就是D9130型强化机也只有300W）显得特别重要。同时在液体介质中火花放电，能加剧放电的流体动力过程，有助于熔化金属的抛出和加速电蚀产物的排除，使抛出的电蚀产物（金属微粒等）及时地抛离放电微区，加快了蚀除速度，可以避免在空气中强化时那样，金属熔滴大部分在被强化工件表面上重新冷却凝固而形成强化层的现象发生，从而达到在被加工工件上穿孔的目的。另外，在液体介质中火花放电能加速消电离过程，有助于防止电弧放电，保证穿孔加工的正常进行。

穿孔加工时，将电极安装在穿孔器的电极夹持棒上。穿孔器的结构如图5-24所示。穿孔器的柄1是用来将穿孔器安装在普通钻床的钻夹头中。将线圈5的引线接到强化机的输出插座上，当强化机内的电容器充电时，由于线圈中有电流通过，使铁芯4在电磁场作用下而成为电磁铁，铁芯吸住衔铁6，带动弹簧片7和电极夹持棒8向上运动。在电容器充电完毕时，铁芯失去磁性，衔铁和电极夹持棒在弹簧片的弹力作用下恢复原位，这样就使电极上下运动而产生火花放电和断路消电离。电极与工件间的放电频率等于强化机中电容器的充放电频率。

用强化机进行穿孔加工时，必须把它的极性开关放在“穿孔”位置上，也就是工件接正极，电极接负极，用正极性加工。这是由于强化机是低电压（35V）、小电容量（一般小于75 μ F）放电，放电时间约在0.1ms数量级，放电持续时间较短，即脉宽较短。

众所周知，在电火花放电时，在电场作用下，放电通道中的电子奔向阳极，正离子奔向阴极。由于电子的质量轻，

惯性小,在短时间内容易获得较高的运动速度。相反,正离子的质量重,惯性大,在短时间内不易获得较高的运动速度。所以当脉冲放电持续时间较短时,电子的动能大,电子流传递给阳极的能量大于正离子流传递给阴极的能量,使阳极的蚀除量大于阴极的蚀除量,这时工件应接正极,电极接负极。以加快穿孔加工的速度。

穿孔加工可以将穿孔器安装在普通钻床的钻夹头上(如图11-1),也可以安装在简易的专用装备上。因为它只要能用手轮转动使穿孔器上下移动就可以,所以钻床的电动机电源不要接通。加工时转动钻床的进给手轮使电极接近工件直至产生火花放电。正常的火花放电应该是放电的声音比较密集均匀,如果电极与工件之间的距离过大则火花放电不能产生,反之,如果电极进给速度过快,将与工件产生短路,这两种情况的出现,都会影响正常工作,降低加工速度。

任何导电材料制成的工件都可以进行穿孔加工,通常不受它的材料性能的限制。电极材料可以用合金钢、铸铁、铜合金、硬质合金等。而最好用黄铜或紫铜,因为这些材料的加工稳定性较好。石墨虽然是很好的电火花加工用的电极材料,但是在用强化机穿孔加工时不宜采用,因为石墨质松脆性大,穿孔加工时电极在振动中时常接触工件,进给设备

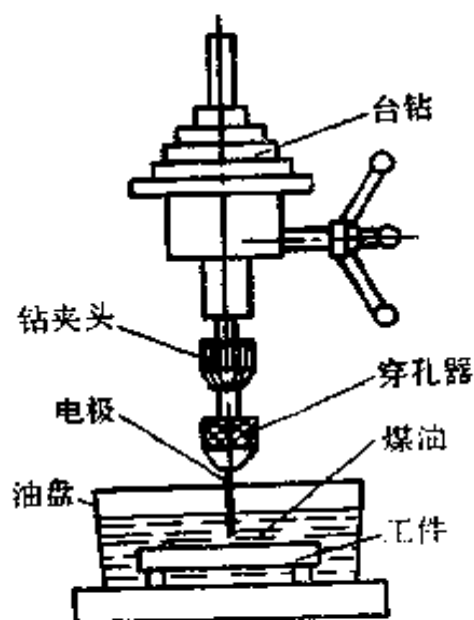


图11-1 穿孔加工装置示意图

又没有放电间隙自动调节系统，所以在手工操作的情况下，很容易击碎。

在穿孔加工时，电极和工件之间的侧面会产生放电间隙，而且普通钻床或简易的专用装置主轴的精度都较低，电极安装和对准加工部位时也都有误差，所以所选用的电极尺寸应比所需要的预孔尺寸小 $0.1\sim 0.2\text{mm}$ 左右。用于取出折断的钻头或丝锥时的电极直径应大于钻头的钻心或丝锥的锥心直径，而小于孔的直径或螺纹的内径（见图11-2），以便既能粉碎折断的钻头或丝锥，又保证不破坏工件的完整性。

在机修装拆过程中，经常会碰到螺钉、螺栓等紧固件折断在工件的孔中。为了将折断件从工件中取出，可以利用方形电极，用上述的穿孔方法，使方形电极穿入断螺柱或螺栓体中，加工出一定深度的方孔，然后用方形套筒搬手将断在工件孔中的螺柱或螺栓拧出来。

在取除折断的钻头、丝锥、螺柱或螺栓时，都没有较高的加工精度要求，所以应尽量地选择大一些的电极，以便提高穿孔速度。

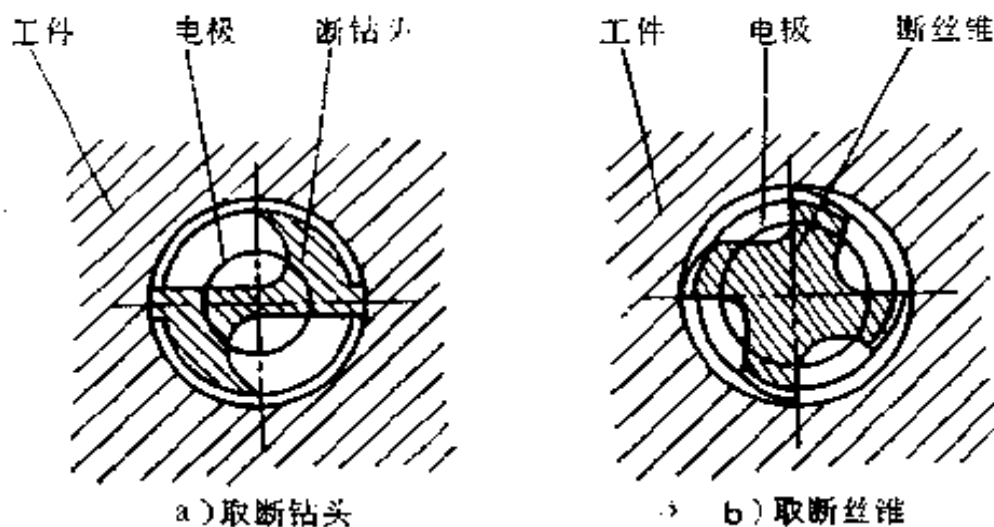


图11-2 穿孔加工的电极直径

二、零件表面的打毛

在第三章第一节中已经讲到：电火花强化表面的形貌是由无数密集的强化点和放电凹坑所构成的、呈银灰色的桔皮状表面。这种表面在工业产品、日用产品及喷镀技术中有它一定的用途。

1. 塑料模表面的打毛

当前很多塑料模是用机械加工成型，最后用钳工修整，形成了平整光滑的表面。用这种表面的模具注塑出来的工件，其表面形貌单调光亮，具有一定的反光能力，美感较差。而有些产品，如照相机壳体，录音机外壳，塑料“飞碟”等等，有的希望表面不反光，呈暗色；有的希望具有一定的细粒状表面，以增加美的感觉；有的希望有一定的摩擦表面。在这些情况下，将机械加工修整后的塑料模具的表面进行电火花强化，既可形成微凹凸的细桔皮状的表面形貌，达到不反光，增强美感外，还可以大大地提高塑料模具的使用寿命。塑料模的打毛可根据其表面要求而选用合适的电规准。

2. 喷镀表面的预处理

金属喷镀就是用压缩空气把熔融的金属喷成雾状，涂在工件表面上而形成覆盖层的一种表面加工技术(见图11-3)。如在传动轴、气缸、轧辊、化工容器等产品上喷镀特殊合金，可使其表面硬化，提高耐磨性、耐腐蚀性等，同时还可以用于工件表面的装饰，所以在生产中应用较为广泛。喷镀层的形成不是金相学和冶金学问题，它与工件表面没有重新合金化等过程，而是喷雾金属的变形粒子间及金属粒子与基体金属间的互相咬合式的机械结合。因此，不仅喷镀工件的表

面必须净化，而且为了提高喷镀层的金属附着性，还必须在喷镀工件的表面上制作适当的凸凹。制作凸凹表面的方法很多，如喷砂法、喷丸法、机械法等，而用电火花强化法是将特殊的电极与基体金属表面接触产生火花放电，使电极金属熔渗到基体金属表面上，得到凸凹表面，然后用喷镀法将金属喷镀到工件表面而形成喷镀层。这种方法对硬度大、强度高的金属工件的喷镀表面预处理更是具有特殊的效果，因为前几种预处理方法对硬度大、强度高的金属工件处理效果很差，甚至无法形成凸凹表面。经过电火花强化预处理的工件表面的金属附着性良好，喷镀层不易剥落。

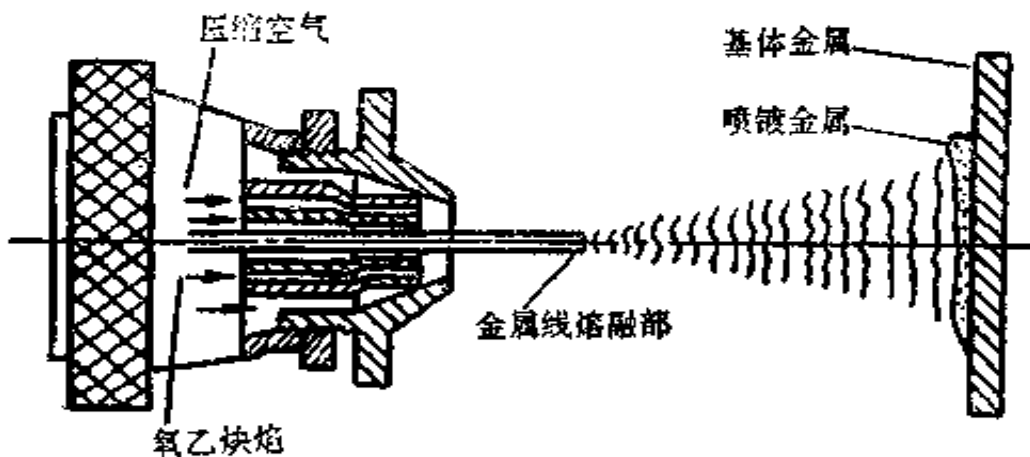


图11-3 金属喷镀示意图

3. 轧辊打毛

在金属轧制时，轧辊作旋转运动，被轧制金属坯料通过两轧辊而改变其截面积和截面形状（图11-4），并改善金属的内部性质，提高金属的机械性能。轧辊一方面压缩金属，另一方面由于轧辊表面和金属之间发生的摩擦而完成进给运

动，使金属坯料产生塑性变形。

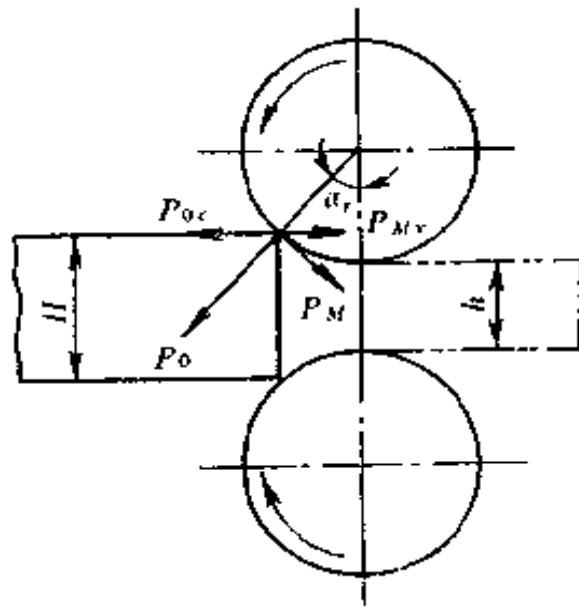


图11-4 轧制咬入力的分析示意图

轧制时轧辊把轧件拉入辊缝叫咬入。轧辊咬入金属是实现轧制所必需的条件。轧制时轧件与轧辊表面接触的弧线所对的圆心角称作咬入角。咬入角 α_r 的大小决定于压下量($\Delta h = H - h$)，并与轧辊和轧件表面状态、轧制温度及轧辊转速等有关，即与轧辊轧件间的摩擦系数有关。从图中可见，轧辊与轧件相接触时，轧辊作用于轧件上的有垂直于轧辊表面的正压力 P_0 和沿轧辊表面切线方向的摩擦力 P_M 。摩擦力 P_M 在水平方向的分力 P_{Mx} 是使轧件拉入轧辊的力，称为拉入力。正压力 P_0 的水平分力 P_{0x} ，其方向与 P_{Mx} 相反，阻碍轧件进入轧辊，称为推出力。显然，只有拉入力大于推出力时，轧件才能被拉入轧辊，实现正常的咬入。

为了改善咬入条件，用减小压下量 Δh 来减小咬入角的方法显然是不可取的，因为这时轧制生产率将大大降低。在咬

入角、压下量一定时，可用降低轧辊咬入时的转速和应用刻痕等增加摩擦系数及用强迫喂钢等方法改善咬入条件。但用降低咬入时的转速来增加摩擦力的办法需要有能调速的轧制设备，一般难以实现。所以用提高轧辊表面摩擦力的办法较现实。

当轧辊表面的摩擦力小时，不但不能咬入，而且轧辊与金属坯料间会产生相对滑动，加速轧辊表面的磨损。所以在轧辊表面上用电火花强化打毛，形成小凸凹表面，可以增大摩擦系数 f_M ，使拉入力显著地大于推出力，改善咬入条件，防止相对滑动，从而提高轧制生产率。同时由于经过电火花强化，提高了轧辊表面的耐磨性，可以延长轧辊的使用寿命。这对表面粗糙度要求不是很细的小型材的轧制是有利而又较简便的改善咬入条件的方法。

三、刻字和打标志

为了在量具、刀具、零件和试件上标明商标、材料、规格，一般都要在这些产品或零件上刻字和打标志。过去常用酸洗的办法来刻字和打标志。用酸洗法时，必须先在工作表面上加上防腐蚀的保护层，然后在要刻字或打标志的地方把防护层去掉，再进行酸洗，使未防护的地方被腐蚀而显示出所需的字和标志，最后再将防护层去掉、清洗。这种方法工艺复杂，生产率较低，劳动强度大，劳动条件也较差。

采用电火花刻字打标志的方法，工艺简单，不受工件大小和部位的限制，有较大的方便性和优越性。

用强化机进行电火花刻字和打标志，按其操作方法不同，大致可以分为三种：

1. 手工刻字法

用手握住强化机的振动器，将电极对准工件需要刻字打标志的表面，由于工件和电极各接上脉冲电源的一极，所以就在电极与工件间产生火花放电，从而在工件表面上刻出字和标志。此法所刻字的字体和大小及标志完全由操作者象用笔写字和绘画一样进行。这种方法简单易行，但对操作者的技术要求高，所刻的印记质量不稳定。适用于单件、小批量和精度要求不高的场合。

2. 仿形刻字法

这种方法与手工刻字法基本上一样，所不同的就是将要刻的字和标志先刻在非导体薄片（如胶木、有机玻璃、纸板等）上，形成刻字模片。然后把模片覆盖在工件适当的位置上，再按上述方法将电极沿着刻字模片进行仿形刻字。这时由于模片为非导体，所以只能在模片刻穿的标志处产生脉冲放电，使工件上刻出与模片上所刻的相同的标志。这种方法比较简单，虽然增加了模片的制作工作，但对成批生产的工件，能保证所刻的字和标志一致，提高刻字和标志的质量，同时对操作者的技术要求也可低些。

3. 字模刻字法

这种方法与电火花加工花模相似，是用铜片或铁片制成字头图形作为电极。刻字打标志时将电极（字头）接负极，工件接正极，然后在空气中互相接触，字头与工件间产生火花放电，在振动器弹簧片的带动下，字头上下振动，反复与工件产生放电，就将字头图形复印在工件表面上，达到刻字打标志的目的。这种方法所刻的字和标志质量好，生产效率高，但要预先制作金属的字头图形电极，而且要把强化机的振动头与工件安装在一定的相对位置上，要仔细调整，以保证字头每次上下振动时打在同一位置上，否则将使所刻的字

错位模糊。这种方法适用于批量生产。

用电火花强化机打出的字和标志与用自动描绘器所得到的字和图形不同，电火花打出的标志具有特殊的金属光泽，清晰度好，标志的强度很高，不易被抹掉。对氧化处理过的金属表面进行刻字打标志特别有效。在机器仪器装配中，也可以利用强化机在零件上打印、配合处划线等各种打标志工作。

第十二章 国外电火花强化工艺概况

电火花强化方法是苏联学者Б.Р.Лазаренко和Н.И.Лазаренко在1943年提出的。之后，苏联、美国、英国、法国、日本、瑞士、西德和东欧一些国家的许多学者对强化的机理和工艺特性进行了广泛深入的研究，并设计了多种实用的电火花强化设备，使该工艺的应用领域不断地扩大。

目前所运用的电火花强化工艺已经不局限于前面所介绍的采用整体电极和在空气等气体介质中进行强化的工艺形式了。除此之外，还有在气体介质中在电场或磁场的作用下用粉末材料的强化工艺和在电解液中的强化工艺。不过，在工业上应用最广的仍然是前面的那种形式，所以在这里也只是介绍国外在这方面的概况。

一、设备和应用

在苏联，电火花强化称为金属表面电火花合金化(Электронскрового легированиемегаеллических Поверхностей—ЭЛМЛ)或简称为电火花合金化(Электронскровое легирование—ЭИЛ)。该工艺在工具强化和机器零件的修复方面的实际应用始于50年代。1950年苏联中央电气科学研究所制成了试验装置УПР-1型强化机。在此基础上又研制了УПР-2、УПР-3和УПР-3М型。此时苏联中央机器制造与工艺科学研究所也研制了ИЕ-2、ИЕ-2М、ИАС-2М、ИАС-3等型号的强化机。

摩尔达维亚科学院应用物理研究所和它的实验工厂，从

1964年开始，研制并生产了手工操作的系列产品 ЭФИ-Электром10、ЭФИ-10、ЭФИ-10М、ЭФИ-40、ЭФИ-45、ЭФИ-46、ЭФИ-25、ЭФИ-25М、ЭФИ-25А，机械化操作的系列产品 ЭФИ-66、ЭФИ-68，以及专用设备 ЭФИ-41、ЭФИ-50、ЭФИ-54、ЭФИ-54А 等等，其中主要设备的规格性能见表 12-1 和表 12-2。

上述设备广泛应用于机器制造、工具、仪器、电气和其他工业部门。

设备 ЭФИ-10М 和 ЭФИ-46А 适用于宽断面的工具和工艺装备零件的强化，以及在电气触头上涂覆贵重金属。由碳钢和高速钢制成的刀具（车刀、铣刀、钻头、丝锥等）强化后的耐磨性可提高 2 ~ 5 倍。用于模具（冲裁模、切边模、压弯模、冲孔模等）工作面强化时，能使耐磨性提高 3 ~ 7 倍。而用于电气触头的修复，一台设备平均每年的经济收益是 4 ~ 6 千卢布。表 12-3 是 ЭФИ-46А 型的六档规准电气参数。表 12-4 是 ЭФИ-46 型的强化性能。

设备 ЭФИ-25、ЭФИ-25М、ЭФИ-25А 应用于工作在高压、高温和具有磨料磨损情况下的机器和仪器大尺寸零件的粗规准强化，例如抽风机叶片、汽轮机叶片、轧机的轧棍、球磨机的工作零件、泥土搅拌机、农业机械等，也可以用于机器和工艺装备已磨损零件的尺寸修复。

此外，设备 ЭФИ-23М 用于新的机器零件提高耐磨性，已磨损零件的尺寸修复，切削工具的强化，以及在电气触头上涂覆贵重金属。设备 ЭФИ-54А 用于电气触点涂覆贵重金属、工具强化和冷冲压模具的强化。而设备 ЭФИ-66М 和 ЭФИ-68М 则被广泛应用于圆形零件的强化和修复。

在 1977 至 1979 年，摩尔达维亚科学院应用物理研究所的

表12-1 ЭФН系列设备的主要规格性能

| 规格 | 型号 | | | | | | | | | |
|----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|----------------|-----------|----------------|----------------|--|
| | ЭФН-23 | ЭФН-25 | ЭФН-25М | ЭФН-45 | ЭФН-46 | ЭФН-46А | ЭФН-79 | ЭФН-41 | ЭФН-50 | |
| 电源功率 (kW) | 0.5 | 1.6 | 1.6 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1.5 | 0.25 | 1.5 | |
| 电源电压 (V) | — | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | — | — | |
| 电容量 (μF) | 300 | — | 300 | — | — | 300 | — | — | — | |
| 规范档数 | 3 | 6 | 3 | 6 | 6 | 6 | — | — | — | |
| 空载电压 (V) | 6~31 | 70 | 29~37 | — | — | 9~204 | — | — | — | |
| 工作电压 (V) | 2~50 | — | 15~40 | — | — | 9~68 | — | — | — | |
| 短路电流 (A) | 4~28 | — | 20~150 | — | — | 3.2~4.7 | — | — | — | |
| 工作电流 (A) | 2~14 | — | 9~85 | — | 2.5 | 0.8~2.8 | 20 | — | — | |
| 生产率 (cm^2/min) | 1.4~3 | 2~3 | 1.4~3.3 | 2 | 2 | 0.25~2 | — | 2 | 15~20 | |
| 强化层厚度 (μm) | — | 0.1~1.0 | 0.3 | 0.05~0.1 | 0.07~0.1 | 0.12 | 0.1 | — | — | |
| 粗糙度 R_z (μm) | — | 40~80 | 80 | 10~20 | 10~20 | ($\nabla 6$) | 5~40 | ($\nabla 6$) | ($\nabla 6$) | |
| 工作频率 (Hz) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | |
| 外形尺寸 (mm) | 564 × 360 × 510 | 570 × 420 × 490 | 420 × 490 | 564 × 360 | 411 × 268 | 411 × 268 | 560 × 350 | 280 × 240 | 564 × 360 | |
| | × 318 | × 1000 | × 750 | × 318 | × 305 | × 305 | × 370 | × 220 | × 318 | |
| 重量 (kg) | 38 | 120 | 80 | 32 | 27.5 | 27.5 | 50 | 8 | 42 | |

表12-2 机械化设备的技术性能

| 规 格 | 型 号 | |
|-----------------|---------------|----------------|
| | ЭФН-66 | ЭФН-68 |
| 基型(螺纹车床)型号 | TB-320 | 163/IK 621 |
| 被加工零件外表面直径(mm) | | |
| 圆柱体表面直径 | 15~155 | 15~340 |
| 球形表面直径 | 70~100 | 70~100 |
| 被加工零件长度(mm) | 100~500 | 200~1500 |
| 零件旋转速度(r/min) | 36~500 | 10~500 |
| 工具电极旋转速度(r/min) | 100~500 | 100~500 |
| 工具电极纵向进给量(mm/r) | 0.03~0.49 | 0.1~0.6 |
| 机床外形尺寸(mm) | 1800×950×1750 | 3580×1337×1290 |
| 控制箱外形尺寸(mm) | 700×865×1000 | 1100×590×1400 |
| 机床重量(kg) | 950 | 4050 |
| 控制箱重量(kg) | 150 | 250 |

表12-3 ЭФН-46A六档规准的电气参数

| 电 气 参 数 | 规 准 | | | | | |
|---------|------|------|------|------|-----|-----|
| | I | II | III | IV | V | VI |
| 短路电流(A) | 2.6 | 3.8 | 4.0 | 4.3 | 4.6 | 4.9 |
| 空载电压(V) | 15 | 25 | 43 | 75 | 130 | 193 |
| 工作电流(A) | 0.9 | 1.2 | 1.5 | 2.0 | 2.2 | 2.4 |
| 脉冲能量(J) | 0.03 | 0.12 | 0.28 | 0.93 | 3.0 | 6.0 |

基希涅夫实验工厂又生产了不同于初期设备的手工和机械化ЭФН新系列设备(见表12-5和表12-6) [14], 采用了可控硅和晶体管脉冲发生器, 以代替过去的RC发生器, 改变了合金化的控制方法, 并使用了新型的操作工具。其中手工操作的设备按其用途可分为三类: 工具和工艺装备的工作表面强

表12-4 ЭФН-46的强化层性能

| 性 能 | 规 准 | | | | | |
|--|---------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | I | II | III | IV | V | VI |
| 白亮层厚度 (μm) | 3~10 | 5~20 | 5~25 | 10~30 | 10~35 | 20~50 |
| 扩散区和热影响区宽度 (μm) | 10~30 | 10~30 | 10~30 | 10~40 | 10~40 | 10~50 |
| 白亮层硬度 (kg/mm^2) | 600~900 | 900~1200 | 1100~1500 | 1250~1500 | 1200~1800 | 1500~1900 |
| 扩散区和热影响区硬度 (kg/mm^2) | 300~400 | 300~400 | 300~400 | 300~400 | 300~450 | 300~450 |
| 微观不平度高度 (μm) | 16 | 16 | 16 | 25 | 28 | 30 |
| 白亮层致密度 (%) | 50 | 80 | 80 | 85 | 80 | 80 |

化 (ЭФН-78和ЭФН-80) ; 提高在高压、强摩擦和磨料磨损条件下工作的零件的抗磨损性, 以及大尺寸零件的强化 (ЭФН-25Б和ЭФН-23М); 在电机、电器和仪表接触表面局部堆积银或其他贵重金属 (ЭФН-81和ЭФН-79)。据调查, 在1978至1979年间, 苏联应用的37台 ЭФН-78 型强化机共节约了40万卢布。

机械化设备是采用通用螺纹车床或专用机床作为基型。ЭФН-66Б 和ЭФН-68Б 用于旋转件的内外表面强化和修复, 《Штамп》供锻模工作表面的修复和强化用, 而《Плоскость-3》供平面合金化用。

欧美和日本等国家分别是五十年或六十年代开始研究和应用电火花强化工艺。主要的产品有: 美国的 1269、TUNG CARB 220和F-5型; 英国的SPARCARD; 法国的CARBUMATIC; 西德的SAP; 日本的 DEPOSITRON; 瑞士的 CARBIDOR和Penetron; 意大利的Tucadur2000等。这些设备大都是小型手工操作的设备, 容量一般在200VA以内, 主要用于模具和刀具的强化。表12-7列出了几种设备的主要规格和性

表12-5 新3ΦM系列手工操作设备

| 规格 | 型号 | | | | | |
|----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|
| | 3ΦH-80 | 3ΦH-78 | 3ΦH-23M | 3ΦH-25B | 3ΦH-81 | 3ΦH-79 |
| 脉冲发生器型式 | 晶体管 | 可控硅 | 可控硅 | 可控硅 | 可控硅 | 可控硅 |
| 操作工具 | 1型 | 1型 | 2型 | 2型 | 1型、旋转头 | 1和2型、旋转头 |
| 电源电压 (V) | 380/220±5% | 220±5% | 220±5% | 220±5% | 220±5% | 220±5% |
| 电源功率(不大于)(kW) | 0.5 | 0.5 | 1.0 | 2 | 0.25 | 1.5 |
| 工作频率 (Hz) | 100, 200 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 规范档数 | 8 | 9 | 6 | 6 | 2 | 9 |
| 生产率 (cm ² /min) | ~3 | ~5 | 1.5~10 | ~10 | ~1.0 | 2~10 |
| 强化层厚度 (mm) | | | | | | |
| T15K6电极 | 0.01~0.1 | 0.03~0.12 | ~0.14 | 0.01~0.2 | — | 0.03~0.11 |
| 银电极 | — | 0.03~0.17 | ~0.05 | — | 0.003~0.01 | 0.01~0.11 |
| 表面粗糙度Rz (μm) | | | | | | |
| T15K6电极 | 2~40 | 10~80 | 20~160 | 40~240 | — | 12.5~40 |
| 银电极 | — | 5~40 | 10~40 | — | 2.5~10 | 6.3~40 |
| 外形尺寸 (mm) | 480×480 ×200 | 480×480 ×200 | 550×350 ×365 | 650×450 ×1200 | 300×250 ×200 | 480×480 ×200 |
| 重量 (kg) | 30 | 33 | 50 | 140 | 10 | 45 |

表12-6 新9ФИ系列机械化操作设备

| 规格 | ЭФН-68Б | ЭФН-66Б | Штамп | Площадь, м ² |
|----------------------------|----------------|---------------|--------------|-------------------------|
| 机床基型 | 163, ИК62 | АИИ3.299.082 | АИИ4.039.014 | АИИ4.135.001 |
| 脉冲发生器型式 | 可控硅 | 可控硅 | 可控硅 | 可控硅、晶体管 |
| 电源电压 (V) | 220±5% | 380/220±5% | 220±5% | 220±5% |
| 电源功率 (不大于) (kW) | 5 | 4 | 3.5 | 4 |
| 电极振动频率 (Hz) | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 电极振动频率 | 3 | 3 | 6 | 7 |
| 规范档数 | 2~20 | 2~25 | ~10 | 2~5 |
| 生产率 (cm ² /min) | 0.01~0.2 | 0.02~0.2 | 0.18 | 0.1~0.3 |
| 强化层厚度(Т15К6) (mm) | 25~160 | 20~160 | 20~160 | 20~160 |
| 表面粗糙度Rz (μm) | — | — | — | — |
| 被加工件尺寸 (mm) | — | — | — | 50×100×200 |
| 平面 | (15~340)/~1400 | (10~250)/~500 | 500/250 | — |
| 圆形外表面(直径/长度) | 45/~200 | 40/(10~150) | — | — |
| 圆形内表面 | — | — | — | — |
| 外形尺寸 (mm) | 3580×1337×1290 | 740×1670×1200 | 500×800×1620 | 600×700×1610 |
| 机床 | 603×700×1685 | 600×650×200 | 600×650×1280 | 740×830×1200 |
| 发生器 | — | — | — | — |
| 重量 (kg) | 4050 | 400 | 400 | 120 |
| 机床 | 不超过200 | 200 | 200 | 180 |
| 发生器 | — | — | — | — |

表12-7 欧美、日本电火花强化设备主要规格及性能

| 规格 | 型号 | | | |
|----------------------------|--|---------------------------------------|----------------------------|------------------|
| | DEPOSITRON720 DEPOSITRON820 (日本) | DEPOSITRON730 TUNG-CARB220 (美国) | ELECTRO ARC F-5 (美国) | CARBIDOR (瑞士) |
| 电源功率 | 63VA | 170VA | — | 140VA |
| 电源电压 (V) | 100 单相 | 220 三相 | 120 单相 | 220或110 |
| 工作电压 (V) | — | 13~30 | — | — |
| 工作电流 (A) | — | 1~4 | — | — |
| 生产率 (cm ² /min) | 0.5~1 | 0.5~1 | — | — |
| 强化层厚度 (mm) | 0.01~0.06 | 0.02~0.12 | 0.0127~0.0254 | 0.03 |
| 电极振动频率 (Hz) | 与发生器同步 | 200~400 | 120 | — |
| 外形尺寸 (mm) | 420 × 220 × 180 | 420 × 220 × 180 | 16" × 9 3/4" × 15 1/2" | 425 × 275 × 235 |
| 重量 (kg) | 8 | 22 | 15磅 | 15 |

能。表12-8是 DEPOSITRON730采用不同电极材料强化时的工艺参数和强层厚度。

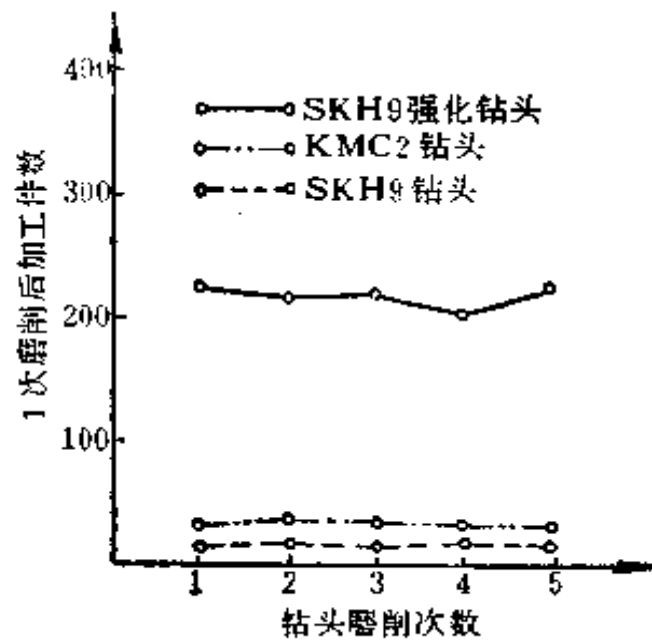
表12-8 不同电极材料时的强化层厚度

| 参 数 | 电 极 材 料 | | | |
|------------------------------|---------|--------|--------|--------|
| | JSE-3D | JSE-3D | JSE-2A | JSE-2A |
| 加工规范 | 3A | 3B | 3A | 3B |
| 工作电流 (A) | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 比强化时间 (min/cm ²) | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 硬度(HM) | 1700 | 1800 | 1850 | 大于2000 |
| 强化层厚度(μm) | 55 | 37 | 40 | 20 |

民主德国、匈牙利、保加利亚等东欧国家也有类似的产品。特别是保加利亚的专家，为了获得粗糙度细、连续和性能稳定的强化层，提出了采用独立式脉冲电源的非接触电火花强化方法，并研制了EΠΦA-111、EΠΦA-112、EΠΦA-311、EΠΦA-321、EΠΦA-411、EΠΦA-511和EΠΦA-531等型号的设备，应用于半导体器件、电气触点、切削刀具、冲压机械以及不重磨刀具的表面合金化和强化。

图12-1是日本オカネツ齿轮厂采用DEPOSITRON720强化机强化钻头的使用效果^[15]。表12-9是强化钻头的使用条件。

用未强化的SKH 9钻头加工10~15件齿轮毛坯就被磨损，出现火花而不能再使用。如果用含钴的KMC 2材料的钻头，能加工40~50件。而用强化的SKH 9钻头则能加工200

图12-1 $\Phi 31$ 钻头的强化效果表12-9 $\Phi 31$ 强化钻头的使用条件

| | | |
|------|-------|-----------|
| 机 床 | 厂 家 | 日 立 精 機 |
| | 型 号 | 4D |
| 钻 头 | 厂 家 | 神户制钢 |
| | 材 质 | SKH9 |
| | 外 径 | 31 mm |
| 工 件 | 材 质 | S45C调质 |
| | 硬 度 | HB260~280 |
| 切削条件 | 转 速 | 300r/min |
| | 进 给 | 0.2mm/r |
| | 切 削 液 | 水溶性 |

件以上。这就减少了钻头的磨削和装夹时间，使工作效率从60%提高到70%。据该厂高速钢材料的钻头、丝锥、铰刀、键槽拉刀和滚刀强化后的使用表明，切削S45C、S45C调质、

SCM21、FC等材料的工件时的刀具寿命均能提高1倍以上，并提高了工作效率。但也指出，应该研究不同刀具的强化部位，注意切削液的选择和加工区域的充分供液。

表12-10 小齿轮热锻模寿命

| 模具型号 | 压机 | 未强化模具 | | 强化模具 | | 变化量 (%) |
|---------|-------|-------|------|------|------|------------|
| | | 编号 | 平均寿命 | 编号 | 平均寿命 | |
| C2AW-B | P-82 | 8 | 2706 | 13 | 3069 | 13.4 |
| | P-319 | — | — | 7① | 6643 | — |
| | P-323 | — | — | 8 | 4294 | — |
| C2AW-D | P-82 | 19 | 2954 | 18 | 2916 | -1.3 |
| | P-323 | 70 | 3063 | 56① | 3738 | 22.0 |
| C3AW-A | P-82 | — | — | 1 | 4313 | — |
| C7AW-H | P-82 | 156 | 2551 | 154 | 2968 | 16.3 |
| | P-323 | 31 | 4032 | 2 | 3365 | NMF② |
| WAR-C | P-323 | 2 | 2508 | 1 | 4720 | NMF② |
| DOAW-A | P-319 | 29① | 4260 | 35 | 4572 | 9.7 |
| | P-323 | 18① | 2464 | 4 | 3860 | NMF② |
| C40W-B | P-323 | 10 | 3370 | 14① | 4747 | 40.9 |
| C60W-A | P-319 | 37 | 5939 | 14① | 6826 | 14.9 |
| | P-323 | 9 | 4975 | 17① | 5761 | 15.8 |
| D7AW-AA | P-319 | 12 | 7303 | 30 | 4013 | -45.0 |
| | P-323 | 1 | 1831 | 38 | 3915 | NMF② |
| D7AW-BA | P-82 | 18 | 3244 | 37 | 3362 | 3.6 |
| | P-319 | — | — | 22 | 6365 | — |

① 数据内不包括寿命少于200次的。

② NMF表示该项无意义。

DEPOSITRON730用于冲模强化的结果表明：对于薄料冲模，例如0.35mm的矽钢片冲模，可提高寿命50%；对厚料冲模的效果较薄料冲模更好。该机用于热锻模强化也能取得良好的效果，用JSE-3A电极材料强化汽车制动器零件的热

锻模(材料DKA)就是其中之一例。产品的制造工序是将SS41纯铁棒料加热到 $800\sim 850^{\circ}\text{C}$ ，用80t压机锻造成形，然后用切边模切除飞边制成产品。强化的方法是每加工1000~1200件强化一次。一台压机的日产量是2500件，所以是半天强化一次。这样，当模具稍微有点磨损就再次强化，能确保模具良好的精度和延长使用寿命。过去未强化的寿命是6000~7000件，而强化后可达到10000~12000件。

但是，文献〔16〕的作者，根据电火花强化对小齿轮热锻模使用寿命影响的考查，认为热锻模寿命是否延长与影响模具寿命的有利的和不利的各种因素的作用程度，以及采用的压机等工况差异有很大的关系。表12-10是所考察的模具寿命的平均值。尽管在大体上强化的模具寿命比未强化的高，但是各类模具的对比数据是颇不相同的。

二、实验和研究

正如前面所指出的那样，在电火花强化过程中，阴极表面层的物理-化学特性起了显著的变化。为了在实用中能获得最佳强化过程，并事先预测强化层的特性，就必须知道影响强化层的相结构、物理-化学性能、应力状态和它的硬度、粗糙度、耐磨性、高温稳定性的各种因素，这些因素包括电极材料、介质成分、电气规准、工具电极振动方式等等。因此，国外的许多学者对这些有关强化性能的因素都进行了广泛深入的实验和研究。

文献〔17〕的作者指出，强化层可能有如图12-2所示的几种基本形式。

并且得出如下结论：

- 1) 当强化过程的进行有赖于阳极材料在阴极表面的沉积

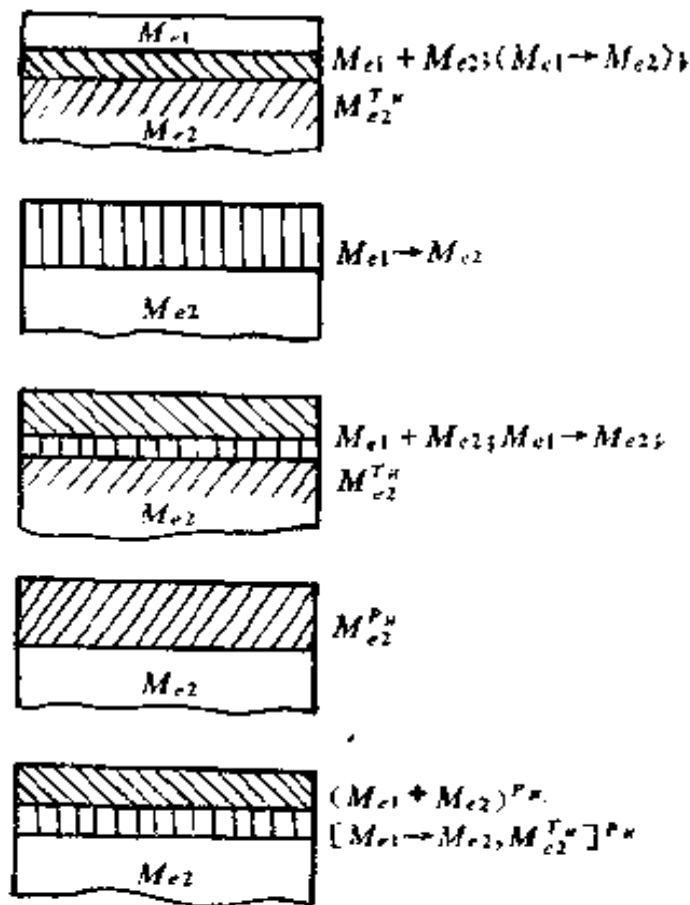


图12-2 强化层的基本形式

Me_1 —阳极材料 Me_2 —阴极材料 $Me_1 + Me_2$ —形成化合物和固溶体
 $Me_1 \rightarrow Me_2$ —阳极材料向阴极扩散 Me_2^{TH} —对阴极材料的脉冲热作用
 Me_2^{PH} —对阴极材料的脉冲机械作用

时，如果采用具有最大硬度和耐磨性的材料作为电极，则能取得最佳强化效果，即

$$H_{\text{YUP}} = f(Me_1)$$

2) 当表面层是阳极和阴极材料相互作用而产生的固溶体、化合物、氧化物和氮化物时，

$$H_{\text{YUP}} = f[(Me_1 + Me_2) (\Pi_0 + H_c)]$$

式中 $\Pi_0 + H_c$ ——电子形成氧化物和氮化物所引起的强化效果。

3) 当强化过程不仅有赖于电极材料的迁移和相互作用, 而且由于高温、高压的脉冲作用导致出现极不均衡的结构、新的相和微量破碎时,

$$H_{\text{упр}} = f[(Me_1 + Me_2) (P_0 + H_0)]_{PHT_{HT}}$$

式中 PHT_{HT} ——高压和高温对强化层材料的脉冲作用。

在电火花强化过程中, 由于电极和工件周期地接触, 其结果发生了所谓电极的粘结现象。文献^[18]系统地研究了粘结对元素周期表中IV至VI族元素电蚀的影响, 以及与周围介质成分和加工规准的关系。强化是在空气(不同真空度)和氩气中进行的。精加工用ЭФН-46A型强化机, 粗加工用 ЭФН-25A和ЭФН-54A型。采用多晶体和单晶体的IV至VI族材料(纯度为99.96~99.999%)作阳极, 以铁作阴极。表12-11是电极工作表面X射线分析的结果, 其中各相是以量的多少依次排列。

表12-12给出了IV至VI族金属在精规准和粗规准强化时的电蚀性质。当同种金属和与铁强化时的条件为: 工作电流110A, 比强化时间1 min/cm²。当与钛强化时的条件为: 工作电流4.3A, 比强化时间同上。

由表12-12的数据可以得出如下的结论, 即在强化Fe时, 从IV族到VI族金属的电蚀量依次减少, 而在其他两种情况下则没有这种规律。

在空气中强化时, 空气的压力对材料的电蚀也有影响。表12-13是W和Zr同种材料强化时气压对阳极电蚀的影响, 可见当气压降低到 $13.33 \times 10^5 \text{Pa}$ 时, 出现了与电极的粘结作用有关的相反过程, 材料从阴极向阳极转移, 因此阳极的重量在多数情况下将增加。

文献^[19]对强化Y8钢之后的碳化物电极表面用电子显微

表12-11 电极工作表面X射线分析结果(比强化时间10min/cm²,
单个脉冲能量0.24J)

| 电极材料 | 阳 极 | | 阴 极(Fe) | |
|------|--|--------------------------------------|---|---|
| | 在空气中 | 在氩气中 | 在空气中 | 在氩气中 |
| Ti | α -Fe, Ti α -Fe ₂ O ₃ , Ti ₂ O ₂ Fe ₂ Ti, TiN | α -Fe, γ -Fe Ti | Ti, α -Fe TiO ₂ | Ti, α -Fe |
| Zr | ZrO ₂ , FeO ₃ α -Fe | α -Fe, Zr ZrO ₂ | Zr, Fe ZrO ₂ | Zr, α -Fe ZrO ₂ |
| Nb | Nb, α -Fe, Fe ₄ N FeNbO ₄ , NbN | Nb, α -Fe | Nb, Nb ₂ Fe ₅ α -Fe, Fe ₂ O ₃ | Nb, Nb ₂ Fe ₅ α -Fe |
| Ta | Ta, α -Fe Fe ₂ O ₃ | Ta, α -Fe | Ta ₃ Fe ₅ , α -Fe Fe ₂ O ₃ | Ta ₃ Fe ₅ , α -Fe |
| Cr | Cr, α -Fe Cr ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ | Cr, α -Fe | FeCr, α -Fe Fe ₂ O ₃ | FeCr, α -Fe |
| W | α -Fe ₂ O ₃ , α -Fe W, Fe ₄ N, WO ₃ | W, Fe ₂ W α -Fe | W, α -Fe Fe ₂ O ₃ | W, α -Fe |

表12-12 电火花强化时电极材料的电蚀量 ($\gamma_a, 10^{-4}\text{cm}^3$)

| 电极材料 | 同种金属 | | Fe | | Ti | |
|------|------|------|-------|------|------|------|
| | 在空气中 | 在氩气中 | 在空气中 | 在氩气中 | 在空气中 | 在氩气中 |
| Ti | 2.5 | 1.1 | 168.0 | 13.3 | 5.3 | 2.9 |
| Zr | 1.0 | 0.7 | 153.6 | 11.2 | 8.9 | 7.0 |
| Hf | — | — | — | — | 8.1 | 5.4 |
| V | 5.6 | 4.2 | 20.9 | 6.7 | 11.2 | 8.4 |
| Nb | 3.1 | 3.2 | 8.6 | 6.5 | 2.6 | 4.3 |
| Ta | 2.7 | 3.3 | 5.4 | 5.4 | 1.4 | 3.3 |
| Cr | 4.7 | 2.9 | 7.2 | 3.6 | 6.5 | 10.1 |
| Mo | 2.4 | 3.3 | 3.8 | 3.8 | 7.5 | 6.6 |
| W | 4.4 | 2.9 | 3.8 | 3.8 | 7.6 | 3.8 |

表12-13 气压(Pa)对阳极电蚀($\gamma_a, 10^{-3}\text{cm}^3$)的影响(工作电流6A, 脉冲能量0.12J)

| 比强化时间 (s/cm ²) | W-W | | | Zr-Zr | |
|-------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | 10.13×10^9 | 13.33×10^7 | 13.33×10^5 | 10.13×10^9 | 13.33×10^5 |
| 120 | -0.42 | -0.80 | +0.10 | -0.61 | -2.76 |
| 240 | -0.52 | -1.30 | +0.16 | -0.55 | +0.05 |
| 360 | -0.80 | -0.90 | +0.40 | -0.43 | +0.09 |
| 480 | -0.42 | -0.80 | +0.22 | -0.55 | 0.00 |
| 600 | -0.30 | +1.10 | - | -0.54 | +0.29 |

镜进行了分析, 确认电蚀表面的微观凹凸与电极材料物理-化学性能、结构状态及加工时间有关。表12-14是试验所得的数据。试验用的电极材料是热压制品, 根据X射线分析和化学分析, 它们具有单一的相组织和化学结构, 其气孔率约10%。强化的条件是: 在空气中用ЭФН-46A强化机强化, 短路电流4.4A, 空载电压40V, 电容量300 μ F。比强化时间分别为1、3和5 min/cm²。分析结果认为: 随着加工时间延长, 表面球形气孔数量增多, 凹穴的尺寸变大; 在一般情况下, 是从TiC阴极的脆性粒子边界破坏向WC的主要是液态的电蚀过渡, 由液相产生的球形熔化质点在电蚀产物中依次增加; 强化层形成条件按Me^{VI}C至Me^{VII}C的顺序逐渐改善。

目前, 工业用的电火花强化设备主要是带电磁振动(频率为50~1000Hz)的设备, 这种振动方式使强化过程的机械化变得困难。此外, 为了改善强化层的表面质量, 在实质上就是降低生产率。因此, 文献^[20]的作者认为, 最有前途的改善表面质量的方法是减少单个脉冲能量到0.01J, 并且采用

表12-14 碳化物工作表面的相结构、电蚀产物及平均尺寸
(\bar{r})和溶解温度($T_{s,1}$)

| 电极表面 | | 电 蚀 产 物 | \bar{r} (μm) | $T_{s,1}$ ($^{\circ}\text{K}$) |
|--------------------------------|---|---|--------------------------------|-------------------------------------|
| 原 始 | 加 工 后 | | | |
| TiC | TiC | TiC | 8 | 3530 |
| ZrC | ZrC | ZrN, Zr, ZrO ₂ , Fe ₃ O ₄ | 6 | 3803 |
| NbC | NbC, Nb ₂ C $\gamma\text{-Fe}$ | NbC, Nb ₂ O ₅ | 2.5 | 3886 |
| TaC | — | TaC | 5.5 | 4258 |
| Cr ₃ C ₂ | — | Cr ₃ C ₂ , Cr ₇ C ₃ | 8 | 2168 |
| Mo ₂ C | Mo ₂ C | Mo ₂ C, Mo, MoO ₂ | 4 | 2753 |
| WC | WC(六角形) $\alpha\text{-W}_2\text{C}$ WC(立方体) | $\alpha\text{-W}_2\text{C}$ WC(六角形) | 2 | 3058 |

注：相分布按含量依次减少。

非接触的火花放电系统和保证必要生产率的高频独立式脉冲发生器。作者采用ШГН (苏联) 和ЕЛФА (保加利亚) 两种独立式脉冲发生器进行了试验, 研究了结构钢45、30XГСА、07X16H6以及工具钢Y8、X12M、XBF、P18、P6M5用BK和TK类硬质合金及纯金属 Cr、Ta、Ag 电极材料强化后的表面层质量。试验的原理装置如图12-3所示。在广范围内改变影响强化层形成的主要过程参数, 这些参数包括短路电流、放电容量、脉冲宽度、脉冲频率、电极相对工件的移动速度和沿工件表面的行程次数。表12-15是这些参数对强化层表面粗糙度的影响的定性分析结果, 它适合于所有被研究的钢和二种发生器的所有规准。表面粗糙度的绝对值 R_a 在 $0.64 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 的范围内。金相研究表明, 其厚度与过程参数、电极和工件的材料有关。但是在得到没有裂缝、气孔和其它瑕疵的表面层的情况下, 通常厚度不超过 $10 \sim 15 \mu\text{m}$ 。

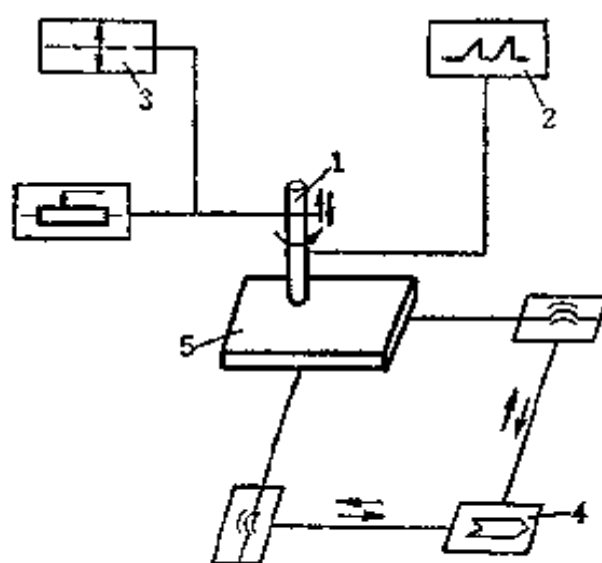


图12-3 用独立式脉冲发生器强化的原理装置

1—电极—阳极 2—脉冲发生器 3—电极间隙跟踪系统
4—工件移动机械 5—被加工工件—阴极

表12-15 强化表面微观几何学定性变化趋势

| 强化参数 | 粗糙度变化 | 备注 |
|--------------------|-------|---|
| 短路电流从1.6~16A | 增加 | — |
| 脉冲宽度从3~20 μ s | 不变 | — |
| 电容量从0.1~1 μ F | 不变 | 在用Ta强化07X16H6时,在最大电流情况下,电容量减少,粗糙度提高 |
| 电极移动速度从0.2~1.0mm/s | 降低 | 当速度>0.6mm/s(电极直径1.0mm)时,出现漏渣 |
| 行程次数从1~3次 | 不变 | 行程次数>8,粗糙度不变,在用可塑性电极材料时,观察到随行程次数增加而粗糙度提高的趋向 |

用MAP-1型X射线微观分析仪对强化层进行研究的结果表明,改变过程参数能使钢的强化层内具有不同的合金化元素含量的百分比。这揭示了获得预定特性的强化层的可能

性。图12-4说明在钢 X12M强化层内合金化元素含量的变化。强化电极是硬质合金 13K 6 M, 过程参数为: 短路电流 16A、电容量 $1 \mu\text{F}$ 。

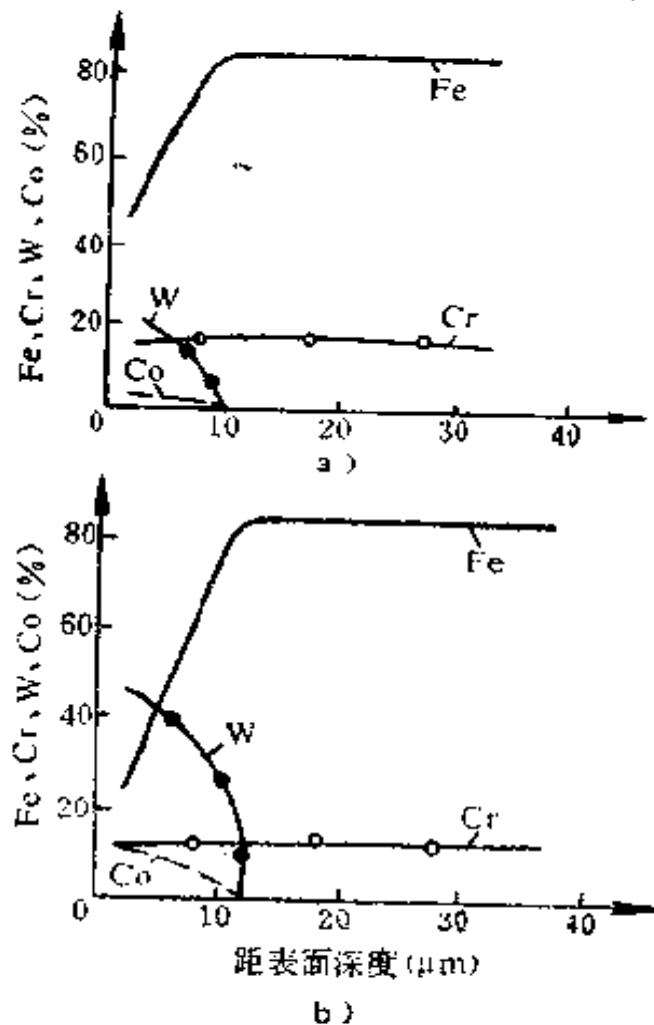


图12-4 强化层内主要元素分布
脉冲宽度: a) $3 \mu\text{s}$ b) $20 \mu\text{s}$

强化层的性能不仅决定于脉冲发生器的电参数和电极双方——工件和工具电极材料的特性, 而且还与运动的机械参数有关, 其中包括工具电极的振动频率和振幅。

文献^[21]提出了六种振动试验方案, 分别是使电极或工件产生100Hz的低频振动, 或者22kHz的超声振动。试验的结果认为, 最佳的方案是如图12-5所示的超声振动方案, 这时

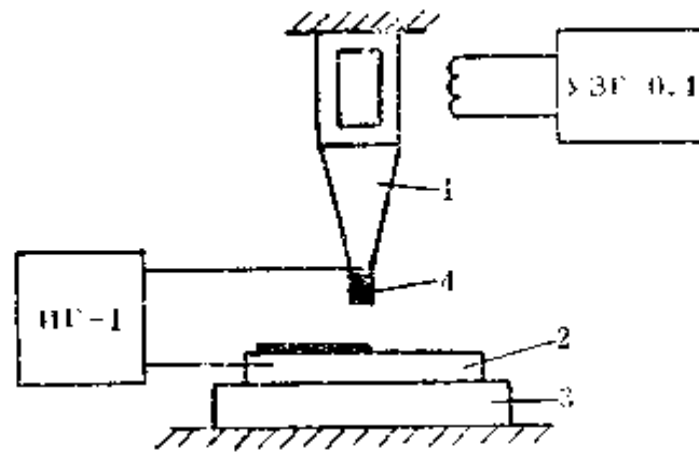


图12-5 叠加超声波振动

用获得22kHz超声振动的聚能器1作为振动器，它由УЗГ-0.4超声发生器供电。工件2置于可移动的工作台3上，移动速度为25~100mm/min。电极4与聚能器连接，电极振幅在 $1.6 \sim 2 \times 10^{-4}$ cm的范围内。脉冲发生器采用ИГ-1型。当电极与工件之间的间隙达到 $5 \sim 7 \times 10^{-4}$ cm时，间隙被击穿，并且强化过程稳定下来。试验表明，在相同的条件下，这个振动方案提高了过程的生产率、降低了强化层的粗糙度（表12-16）和气孔率。

表12-16 两种振动方案的强化特性比较

| 参 数 | 振 动 方 案 | |
|---------------------------------|---------|--------|
| | 通常的振动 | 叠加超声振动 |
| 粗糙度 $Rz(\mu\text{m})$ | 10 | 5 |
| 强化层厚度(μm) | 15~20 | 7~10 |
| 比强化时间(s/mm^2) | 2 | 1 |

使电火花强化工艺的应用受到限制的原因之一是它的生产率比较低。文献[22]在分析影响强化生产率的各种因素之

后指出，提高生产率的途径基本上有三种：

1) 使用现有的放电能量和工作频率的发生器，使设备多回路运用。

2) 提高放电能量和工作频率。

3) 人为地改变工作间隙内能量和质量的平衡，提高阳极电蚀量，减少阳极向阴极迁移过程中的损失和阴极的电蚀量。

文献〔22〕并介绍了在实际运用中的多回路装置的结构，这些装置能使生产率提高到 $20 \sim 50 \text{cm}^2/\text{min}$ 。

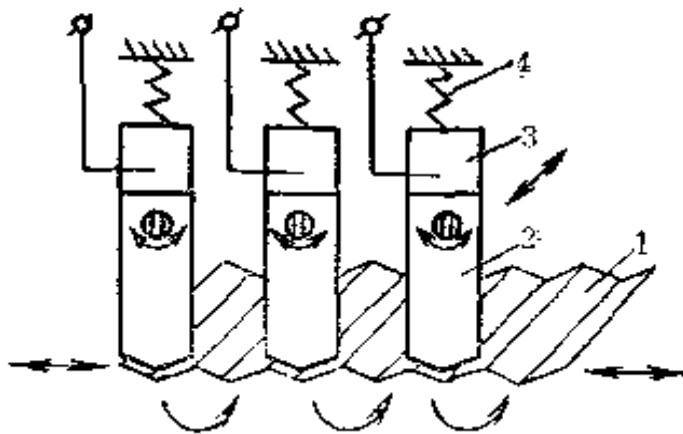


图12-6 ЭФН-87强化锯齿形甜菜切削刀片的原理

1—刀片 2—电极 3—电极夹持器 4—弹性元件

图12-6是用ЭФН-87型多回路强化甜菜锯齿形切削刀片的例子。该机有28个独立的晶体管电源回路，可以两两并接在电极上。电极振动频率100Hz，振幅0.3mm。电源电压分三档调节。一台ЭФН-87强化机即能充分保证甜菜切削刀片的强化，并可减少熟练的刀具操作人员。

除了以上所介绍的几个带有方向性的研究内容之外，国外学者还对强化的机理、电极材料成分、设备的机械化自动化等进行了许多研究。毫无疑问，这些研究是值得我们分析和借鉴的。

参 考 文 献

1. Г.В.Самсонов, А.Д.Верхотуров, Г.А.Бовкун, В.С.Смирчев: Электронскровое легирование металлических поверхностей, Научова думка, 1976
2. 朱保养, 郑良桂: 电火花强化层的耐磨性, 《浙江机械》, 1982, No5
3. 陈鍾燮: 金属表面的电火花强化, 《电加工》, 1978, No2
4. 王荣华: 电火花熔渗强化及其机理的研究, 《理化检验》物理分册, 1978, No5
5. Г.П.Иванов: Технология Электронскрового упрочнения инструментов и деталей машин, МАНГИЗ, 1961
6. C.S.Kahlon, H.J.Baker, C.F.Noble, F.Koenigsberger, Electric spark toughening of cutting tools and steel components, Int. J. Mach. Tool Des. Res. 1970, Vol.10, P.95-121
7. 高金鼎, 电火花强化工艺在大型压模上的应用, 《车辆工艺》, 1984, No3
8. 彭其凤、赵锡卫、汤先明、于锡广, 提高工模具寿命的电火花放电硬化法, 《山东机械》, 1982, 5
9. 苏廷礼, 高速钢刀具的电火花强化处理, 《天津机械》, 1981, No3
10. 庞淑云, 刀具的电火花表面强化, 《湖北机械》, 1982, No2
11. И.В.Добында, А.М.Парамонь, А.В.Семенчук, С.П.Фурсов, Об автоматизации подачи электрода при электронскровом легировании сложнопрофильных поверхностей, Электронная обработка материалов, 1977, No3
12. В.И.Андреев, Электронскровое легирование спаренными вращающимися электродами, электронная обработка

материалов, 1978, №3

13. В.И. Андреев. Опыт применения вращающихся много-
Электродных инструментов с упруговязкими Элемента-
ми для Электронского упрочнения деталей. Электронная
обработка материалов, 1977, №5

14. А.И. Кориенко, А.Г. Базилько, Установки для элект-
ронского легирования поверхностей, станки и инструме-
нт, 1981, №2

15. 中本幸義, 超硬被覆装置による工具の強化, 機械と工具,
1976, 6

16. P.H. Thornton, Effect of spark hardening on life of
hot-forging dies, Metals Technology, 1980, 1

17. А.Д. Верхотуров, И.М. Мука, Технология Электронскр-
ового легирования металлических поверхностей, ТЕХНИКА
1982

18. А.Д. Верхотуров, Влияние схватывания Электродов на
Эрозию анода в процессе Электронского легирования,
Электронная обработка материалов, 1984, №6

19. А.Д. Верхотуров, Н.П. Коржовандр, Электронно-микр-
оскопическое исследование поверхности карбидов после
Электронского легирования стали у8, Электронная обраб-
отка материалов, 1984, №3

20. В.И. Ливурдов, В.А. Снежков идр, Качество поверх-
остного слоя сталей после Электронского легирования
с использованием генератора независимых импульсов, Эл-
ектронная обработка материалов, 1984, №4

21. А.А. Бугаев, А.И. Перевертундр, Электронское
легирование с наложением ультразвука, Электронная обр-
аботка Материалов, 1984, №4

22. А.Е.Гитлевич, В.М.Ревуцкий и др., Возможности повышения производительности процесса Электроискрового легирования, Электронная обработка Материалов, 1984, №5