

## 第20章 炉用材料的使用

曾 正 明

用来制造和修理工业炉的材料统称为炉用材料，包括耐火材料、隔热材料、耐热铸铁、耐热钢以及其他炉用材料等。耐火材料是炉用材料中的主要组成部分，一般占炉体总重的60%以上。

在修理工业炉时，合理地选用炉用材料对确保实现生产工艺要求、提高炉子使用寿命、降低修理费用以及节约动能都具有重要的作用。

### 第1节 耐火材料

耐火材料是耐火度不低于1580℃的无机非金属材料，它主要用于砌筑各种工业炉和其它热工设备。

#### (一) 对耐火材料的要求

工业炉在操作使用时，受到高温的物理、化学、机械等作用，使耐火材料产生熔化、软化、崩裂、熔蚀和磨损等损坏现象，这不但可能使操作中断，而且会降低物料、工作的热加工质量。因此，对耐火材料的性质有比较严格的要求，一般说来，可以概括为以下几个方面：

1) 应有足够的软化、不熔融温度；

2) 能承受炉子载荷及高温操作中所产生的应力作用，不丧失结构强度、不软化变形、不断裂坍塌；

3) 在高温下体积稳定，不致由于膨胀和收缩使砌体变形或出现裂纹；

4) 在温度急剧变化或受热不均时，不致破裂和剥落；

5) 对液态、气态及固态物质的化学侵蚀，应具有一定的耐侵蚀能力；

6) 应具有足够的强度和耐磨性能，以承受高温高速火焰、烟尘、炉渣的冲刷及金属的撞击等；

7) 为了保证炉子的砌筑质量，制品的外形尺寸应符合规定要求。根据不同需要，尚应具有一定的导热、导电性能。

#### (二) 耐火材料的分类

耐火材料是无机非金属固体材料，含有熔融温度很高的矿物组成，如粘土砖内有莫来石，高铝砖内有刚玉，硅砖内有鳞石英等。因此，耐火材料根据化学-矿物组成的不同，可以分为硅酸铝质耐火材料、硅质耐火材料、镁质耐火材料以及碳质耐火材料等(表20-1-1)。

表20-1-1 耐火材料的分类和使用范围

种类	耐火砖名称	主要化学成分(%)	使用温度(℃)	使用范围
硅酸铝质	耐火粘土砖	$Al_2O_3 30 \sim 48$	1300~1450	加热炉、热处理炉、冲天炉和干燥炉等
	高铝砖	$Al_2O_3 > 48$	1400~1650	电阻炉坩埚和电弧炉炉顶等
	刚玉砖	$Al_2O_3 > 99$	1600	电阻炉坩埚和钨丝炉等
硅质	硅砖	$SiO_2 > 93$	<1600	酸性电弧炉和连续式加热炉炉顶等
	熔融石英制品	$SiO_2 > 99$	<1450	热电偶保护管、感应炉套管和打结材料等

(续)

种类	耐火砖名称	主要化学成分 (%)	使用温度 (°C)	使用范围
镁质	镁砖	MgO > 87	1600	碱性电弧炉和加热炉炉底等
	镁铬砖	MgO > 48, Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> > 8	1520	电弧炉炉顶和加热炉炉底等
	镁铝砖	MgO > 80, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 5~10	1600	电弧炉炉顶和加热炉炉底等
白云石质	白云石砖	CaO > 40 MgO > 35	1600	碱性电弧炉炉底和炉墙、碱性冲天炉
碳质	碳化硅砖	SiC > 60	1600	加热炉的预热器、热处理炉的炉身壁和炉底板等
	石墨砖	C > 30	1400	熔炼用石墨坩埚、浇注用塞头砖和水口砖等
硅质	锆英石砖		2000	感钢桶衬砖、感应炉炉衬和高温盐浴炉炉膛

### (三) 耐火材料的使用性能

耐火材料最主要的性能是对损坏因素能直接起抵抗作用的那些性能, 具体说来就是耐火度、高温结构强度、高温体积稳定性、热稳定性和抗渣性。

#### 1. 耐火度

机械工厂工业炉的工作温度一般波动在 650~1700°C 范围内, 因此, 耐火材料首先必须具有高的耐火度, 即具有在高温下抵抗熔融的性能。

耐火度并不是耐火材料的“熔点”, 因为只有元素或纯化合物才具有一定的熔点。耐火材料是由多种化学成分的矿物所组成, 所以它是在一定温度范围内逐渐熔化的, 因而耐火度仅仅代表材料开始熔化后软化到一定程度时的温度, 表示耐火制品的高温难熔程度。

试验材料的耐火度时, 是将试样磨碎到一定程度, 用糊精调制成一个上底每边 2mm、下底每边 8mm、高 30mm、截面呈等边三角形的三角锥。在规定的加热条件下, 与标准锥弯倒 (图 20-1-1) 情况相比较, 直至试锥顶部因受温度及本身重力影响而弯倒接触底平面时的温度, 即为耐火度。

耐火度主要取决于原料的化学-矿物组成、易熔杂质的数量及其相互关系。

根据耐火度的高低, 耐火材料可分为: 普通耐火材料 (1580~1770°C)、高级耐火材料 (1770~2000°C) 和特级耐火材料 (2000~3000°C)。

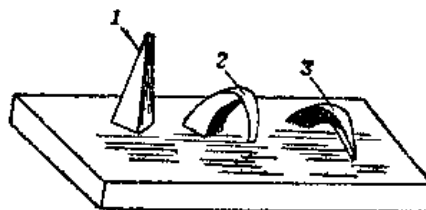


图 20-1-1 测温锥的软倒情况

1—软倒以前 2—相当耐火度下的情况

3—超过耐火度时

耐火度并不能代表耐火材料的实际使用温度。在实际使用中由于考虑到高温结构强度的问题, 所以耐火材料的实际允许最高使用温度要比耐火度低。

#### 2. 高温结构强度

耐火材料在一定高温作用下发生软化, 失去力学强度, 而引起炉衬的破坏。因此, 耐火材料必须具有较大的高温结构强度, 即具有在高温下承受机械负荷的性能。通常衡量高温结构强度的指标有下列两种, 即:

(1) 高温荷重变形温度 (荷重软化点) 是耐火制品在一定的压力下 (0.2MPa) 不断加热发生一定的变形量 (如压缩 4% 和 40%) 和坍塌时的温度, 见图 20-1-2。

(2) 高温力学强度 是耐火制品在一定的测定温度下所能承受的最大压应力。

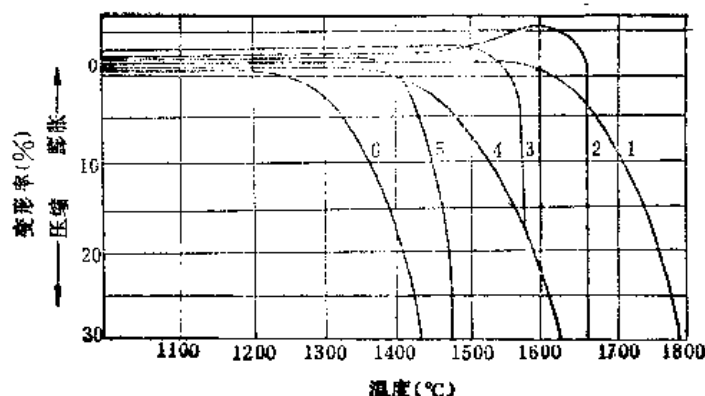


图20-1-2 耐火制品的荷重软化温度

1—高铝砖(含 $Al_2O_3$ 70%) 2—硅砖 3—镁砖  
4—耐火粘土砖 5—半硅砖 6—耐火粘土砖

高温时耐火材料发生软化,这并不是因为材料已全部软化,而是因为耐火材料内存在杂质,形成低熔点化合物而过早熔化,产生少量液相,促使固体颗粒彼此滑动的结果。

软化温度差别的大小取决于原材料的化学-矿物组成和制品结晶构造的特点(图20-1-2)。增加耐火材料的易熔物,则软化温度随之降低。这些有害的易熔物在粘土砖中为 $Na_2O$ ,在硅砖中则为 $Al_2O_3$ 。

### 3. 高温体积稳定性

耐火材料在高温下长期使用时,相成分会继续变化,产生再结晶和进一步烧结等现象,因此,体积会发生不可逆的变化,这和一般热胀冷缩的物理现象不同,称为“残余收缩”或“残余膨胀”。

耐火材料的“残余收缩”或“残余膨胀”过大会破坏砌体的几何形状和应力分布的均匀性,甚至发生倒塌,尤其是砌筑炉顶时更为明显。因此,耐火材料必须具有高温体积稳定性,即在高温时体积稳定不变的性能。

“残余收缩”或“残余膨胀”是和烧结、化学-矿物组成、扩散程度、温度等因素有关。大多数耐火材料,如耐火粘土砖和镁砖,在高温下将产生“残余收缩”,这是由于制品中的矿物继续发生结晶以及高温下制品中的低熔点化合物逐渐熔化,在液相表面张力的作用下,促使固体颗粒相互靠紧所致。硅砖在高温下会产生“残余膨胀”,这是由于砖内继续进行着二氧化硅的同素异型转变。烧成的硅砖一般约有10%的石英未转化。

对各种耐火制品的“残余收缩”或“残余膨胀”,一般不应超过0.5%~1%。

### 4. 热稳定性

热稳定性有两种含意:即抗热震性和耐崩裂性。抗热震性是指制品抵抗急冷急热而不破裂的性能,又称为温度急变抵抗力。耐崩裂性则是耐火制品在使用过程中抵抗发生碎断或破裂以致于成为碎块,由原制品上崩离并露出新的表面的性能。

热稳定性与热膨胀、相变、导热性和力学强度等物理常数密切相关,还取决于砖的外形尺寸、加热方式以及制造工艺因素。如增加粗颗粒

成分和磨化程度,热稳定性将随之提高。这是由于大颗粒的周围有小裂纹和孔隙存在,在这些地方砖组织形成局部结合,必要时这些没有被严格固定的颗粒能发生相互移动而局部地除去砖内的应力。

### 5. 抗渣性

耐火材料在高温下遭受熔融金属、炉渣、烟尘、盐类以及炉气等的侵蚀,而使之破坏,因此,耐火材料应具有良好的抗渣性,即在高温下抵抗炉渣侵蚀的性能。

炉渣破坏耐火材料时进行着两种过程:腐蚀和冲蚀。腐蚀是一种化学损坏作用,由于高温产生低熔点的物质,不断地往耐火材料内部扩散,使之软化、熔化,以致被腐蚀成为熔渣。冲蚀却是一种机械损坏现象,熔渣洗刷耐火材料的表面,移去表面的颗粒,这些脱落在熔渣中的固体颗粒,或者被熔渣带走,或者逐渐熔于熔渣中。在一般情况下,冲蚀作用是从属性的。

影响抗渣性的主要因素为耐火材料和熔渣的化学成分、工作温度、炉渣粘度和砖的组织。根据耐火材料与炉渣所起化学反应的不同,耐火材料又可分为酸性耐火材料(如硅砖)、碱性耐火材料(如镁砖)和中性耐火材料(如碲砖)。

炉渣、金属和气氛对耐火材料的影响列于表20-1-2。

不同种类耐火制品间的反应见表20-1-3。

一些耐火材料与电热材料间的作用温度见表20-1-4。

常用耐火材料的主要性能见表20-1-5。

表20-1-2 炉渣、金属和气氛对耐火材料的影响

耐火砖名称	炉 渣		无氧化物的熔融金属	气 氛	
	碱 性 渣	酸 性 渣		氧化性	还 原 性
耐火粘土砖 (弱酸性)	有作用,其破坏速度与化学成分、气孔率有关	作用微弱	抵抗较好	不破坏	1400°C以下抵抗较好,因砖中Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 的影响,CO在450~550°C损坏耐火粘土砖
高铝砖、刚玉砖(中性)	抵抗较好	抵抗尚好	抵抗较好	不破坏	1500°C下抵抗较好
硅砖(酸性)	作用激烈,1000°C时即遭破坏	抵抗较好,与氟化物作用激烈	对Zn、Cd、Sn抵抗较好	不破坏	1200°C以下抵抗良好,温度太高,碳要还原SiO <sub>2</sub>
镁砖(碱性)	抵抗很好	有作用,与SiO <sub>2</sub> 等酸性渣在低于1500°C作用	抵抗较好,对Fe、Ni、Cr的碳化物有作用	不作用	1450°C以下抵抗良好
镁磷砖(中性)	抵抗良好,但Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 使其破坏	作用微弱	抵抗良好	不作用	1500°C以下抵抗尚好
碳化硅砖(中性)	与Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 作用激烈,于1300°C开始反应。与CaO于800°C、与MnO <sub>2</sub> 于1360°C、与MgO、CaO于1000°C开始反应	于1200°C开始反应,抵抗酸类作用很好	与Zn、Cu不作用,易使Fe、Co、Ni、Cr等沾污有SiO <sub>2</sub>	1350°C以上氧化反应加快	抵抗较好,在CO <sub>2</sub> 气氛中作用温度为1300°C以上
石墨砖、焦炭砖(中性)	抵抗较好	抵抗尚好,因形成SiC而渐次损坏	抵抗较好,尤其对Ca、Al等。在1400~1500°C熔铁渐使之损坏。与熔融金属氧化物有作用	遭受激烈损坏,500~600°C即开始燃烧	抵抗较好

表20-1-3 不同种类耐火制品间的反应

耐火制品名称	耐火粘土砖				高铝砖 (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 70%)				高铝砖 (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 90%)				硅 砖				烧成镁砖			
	反 应 温 度 (°C)																			
	1500	1600	1650	1710	1500	1600	1650	1710	1500	1600	1650	1710	1500	1600	1650	1710	1500	1600	1650	1710
耐火粘土砖					不	不	不		不	不	不		中	严	严		严	整	整	
高铝砖 (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 70%)	不	不	不						不	不	不		不	中	中	中	中	中	中	严
高铝砖 (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 90%)	不	不	不		不	不	不						不	不	中		不	中	严	严
硅 砖	中	严	严		不	中	中	中	不	不	中						中	中	严	
烧成镁砖	严	整	整		中	中	中	严	不	中	严	严	中	严	整					

注: 不——不起反应, 中——中等反应, 严——严重反应, 整——整个破坏性反应。

表20-1-4 耐火材料与电热材料间的作用温度

耐火材料	电 热 材 料				
	钼 (Mo)	钨 (W)	钽 (Ta)	镍铬合金	铁铬铝合金
石 墨	1200°C时强烈生成碳化物	1400°C时强烈生成碳化物	1000°C时强烈生成碳化物	—	—
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1900°C	1900°C	1900°C	1200°C以下不起作用	1350°C以下不起作用
BeO	1900°C①	2000°C	1600°C	1200°C以下不起作用	1350°C以下不起作用
MgO	1800°C①	2000°C (MgO挥发)	1800°C	1200°C以下不起作用	1350°C以下不起作用
ZrO <sub>2</sub>	1900°C (Mo挥发)	1600°C①	1600°C	1200°C以下不起作用	1200°C以下不起作用
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1900°C	2200°C①	1900°C	1200°C以下不起作用	1200°C以下不起作用
粘土耐火砖	1200°C	1200°C	1200°C	1200°C以下不起作用	1200°C以下不起作用
碱性耐火砖	1600°C	1600°C	1200°C	1200°C以下不起作用	1200°C以下不起作用

① 在保护气氛中，电热材料与炉气发生作用的温度。

表20-1-5 常用耐火材料的主要性能

耐火砖名称	耐火度 (°C)	0.2MPa 荷重软化开始温度 (°C)	热稳定性 (冷热交换次数)	常温耐压强度 (MPa)	体积密度 (kg/m <sup>3</sup> )	热导率 (W/(m·K))	比热容 J/(kg·K)	线膨胀系数 200~1000°C (1/°C)	最高使用温度 (°C)
耐火粘土砖	1610 ~1730	1250 ~1400	10~25	12.5 ~25.5	2100 ~2200	0.7 + 0.64 × 10 <sup>-3</sup> f	879 + 230 × 10 <sup>-3</sup> f	(4.5~6) × 10 <sup>-6</sup>	1350 ~1450
高铝砖	1750 ~1790	1400 ~1530	—	25~60	2300 ~2750	2.1 + 1.9 × 10 <sup>-3</sup> f	837 + 234 × 10 <sup>-3</sup> f	20~1200°C 6 × 10 <sup>-6</sup>	1400 ~1550
刚玉砖	1800 ~2000	1580 ~1770	50	20~80	2600 ~2900	2.1 + 1.9 × 10 <sup>-3</sup> f	795 + 418 × 10 <sup>-3</sup> f	(8~8.5) × 10 <sup>-6</sup>	1600 ~1700
硅 砖	1690 ~1710	1620 ~1650	1~4	17.5 ~50	1900 ~1950	0.93 + 0.7 × 10 <sup>-3</sup> f	879 + 251 × 10 <sup>-3</sup> f	(11.5~13) × 10 <sup>-6</sup>	1700
镁 砖	>2000	1500 ~1600	3~5	35~60	2450 ~2700	4.3 - 0.7 × 10 <sup>-3</sup> f	1047 + 293 × 10 <sup>-3</sup> f	(14~15) × 10 <sup>-6</sup>	1650 ~1700
镁铬砖	1850 ~2000	1420 ~1520	>25	20~45	2800 ~2900	2.1 - 0.38 × 10 <sup>-3</sup> f	837 + 293 × 10 <sup>-3</sup> f	—	1700
镁铝砖	>1920	1250 ~1580	空气热 交换 30~40	25~30	2600 ~2800	—	—	20~700°C (9~10) × 10 <sup>-6</sup>	1600
稳定白云石砖	1770 ~2000	1400 ~1550	3~5	70	2600 ~3200	1000°C 3.3	—	—	—
碳化硅砖	1900 ~2200	1650 ~1800	50~60	40~70	2300 ~2800	21 - 10.5 × 10 <sup>-3</sup> f	963 + 147 × 10 <sup>-3</sup> f	300~900°C 4.7 × 10 <sup>-6</sup>	1400 ~1500
石墨砖	>3000	2000	—	20~30	1420 ~1600	163 - 41 × 10 <sup>-3</sup> f	837	—	2000
锆英石砖	2600	1550 ~1600	—	100 ~200	3300	1.3 + 0.64 × 10 <sup>-3</sup> f	—	—	2000

注：表中 f 表示实际温度。

常用耐火制品标准见表20-1-6。

表20-1-6 常用耐火制品标准

耐火制品名称	牌号	主要化学成分 (%)	耐火度 (°C)	荷重软化 开始温度 (°C)	重烧线变化		热稳定性 (次)	显气 孔率 (%)	体积 密度 (kg/ m <sup>3</sup> )	常温耐 压强度 (MPa)	标准号
					(°C)	(%)					
耐火粘土砖	N-1		1750	1400	1400	+0.1 -0.4		22		30	GB4415-84
	N-2 a		1730	1350	1400	+0.1 -0.5		24		25	
	N-2 b		1730	—	1400	+0.2 -0.5		26		20	
	N-3 a		1710	1820	1350	+0.2 -0.5		24		20	
	N-3 b		1710	—	1350	+0.2 -0.5		26		15	
	N-4		1690	1300	1350	+0.2 -0.5		24		20	
	N-5		1670	—	1350	+0.2 -0.5		26		15	
N-6		1580	—	—	—		28		15		
高铝砖	LZ-65	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 65	1790	1500	1500	+0.2 -0.1		23		50	GB2938-82
	LZ-55	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 55	1770	1470	1500	+0.2 -0.1		23		45	
	LZ-48	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 48	1750	1420	1450	+0.2 -0.1		23		40	
电弧炉炉顶 用高铝砖	DL-80	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 80	1790	1550	1550	+0.1 -0.4		19		80	GB2991-82
	DL-75	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 75	1790	1530	1550	+0.1 -0.4		19		70	
	DL-65	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 65	1790	1500	1500	+0.2 -0.6		22		60	
硅 砖	GZ-94	SiO <sub>2</sub> 94	1690	1640				23	真密度 2380	25	GB2608-81
	GZ-93	SiO <sub>2</sub> 93	1690	1620				25	真密度 2400	20	
电弧炉炉 顶用硅砖	DG-95	SiO <sub>2</sub> 95	1710	1650				22	真密度 2360	25	YB380-63
镁砖及镁硅砖	MZ-87	MgO 87		1520				19		40	GB2275-80
	MGZ-82	MgO 82 SiO <sub>2</sub> 5~10		1550				20		40	
镁铬砖	MGe-12	MgO 55 Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 12		1550				23		20	GB2277-80
	MGe-8	MgO 60 Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 8		1530				24		20	
手炉用镁铝砖	ML-80	一级 MgO 80 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 5~10		1590				3	18	40	GB2276-80
		二级 MgO 80 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 5~10		1570				3	20	26	

常用轻质耐火制品标准见表20-1-7。

表20-1-7 常用轻质耐火制品标准

轻质耐火制品名称	牌 号	主要化学成分 (%)	体积密度 (kg/m <sup>3</sup> )	常温耐压强度 (MPa)	热导率 (W/(m·K))	标 准 号
轻质耐火粘土砖	NG-1.5		1500	6	0.70	GB3994—83
	NG-1.3 <sup>a</sup>		1300	4.5	0.60	
	NG-1.3 <sup>b</sup>		1300	4	0.60	
	NG-1.0		1000	3	0.50	
	NG-0.9		900	2.5	0.40	
	NG-0.8		800	2.5	0.35	
	NG-0.7		700	2	0.35	
	NG-0.6		600	1.5	0.25	
	NG-0.5		500	1.2	0.25	
	NG-0.4		400	1	0.20	
轻质高铝砖	LG-1.0	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 48	1000	4	0.50	GB3995—83
	LG-0.9	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 48	900	3.5	0.45	
	LG-0.8	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 48	800	3	0.35	
	LG-0.7	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 48	700	2.5	0.35	
	LG-0.6	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 48	600	2	0.30	
	LG-0.5	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 48	500	1.5	0.25	
	LG-0.4	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 48	400	0.8	0.20	

#### (四) 耐火制品的形状和尺寸

耐火制品形状的正确和尺寸的精确，对炉衬的使用寿命有很大的影响，只有使用形状正确和尺寸精确的制品，才能得到砖缝小的砌体。砖缝是砌体中最薄弱和最易损坏的地方，易被熔融金属、炉渣和炉气所侵蚀，因此，砖缝过大就会加快这部分的损坏，而引起整个砌体的毁坏。

##### 1. 耐火制品的形状和尺寸

耐火制品除按理化指标分“等”外，还按外观情况分“级”。外观情况检查项目有尺寸公差、扭曲、缺角、缺棱、熔洞、渣蚀、裂纹等。常用耐火制品的尺寸允许偏差范围见表20-1-8。

表20-1-8 耐火制品的尺寸允许偏差范围

耐火制品名称	尺寸允许偏差 (mm)	
	一 级	二 级
耐火粘土砖、高铝砖	±1.5~±2	±2.5
普通硅砖	±2~±3	±3~±4
镁砖、镁铬砖	±1~±2	±2~±3
镁铝砖	±3~±4	±5~±6
轻质耐火粘土砖	±2~±3	

耐火制品的表面必须平滑，不应有裂缝、渣蚀和玻璃化，没有缺棱掉角，制品的断面组织必须均匀一致，不应有大的夹杂物，不许有孔隙、裂纹和层状组织；各熟料颗粒不应脱落和破裂。

根据形状和尺寸的不同，耐火制品分为标准型、普通型、异型和特异型（图20-1-3）。

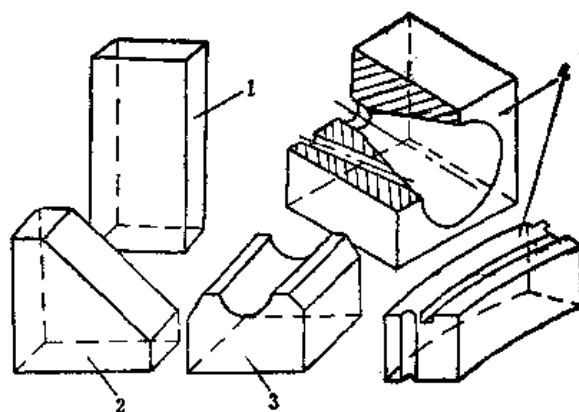


图20-1-3 常见各种砖型

1—标准型（直形砖） 2—普通型（拱脚砖）  
3—异型（导轨砖） 4—特异型（喷嘴砖、阶型砖）

2. 通用耐火砖形状尺寸

通用耐火砖形状和尺寸 (GB2992—82) 见表 20-1-9~13。

3. 标准电阻炉用异型砖

机械工厂标准电阻炉常用异型砖见图 20-1-4~8 以及表 20-1-14~16。

4. 异型耐火砖的设计

选用耐火制品时, 应尽可能选用国家标准、部颁标准规定的制品。当标准砖的形状不能满足要求时, 就必须自行设计异型砖。设计压制成型的异型耐火制品时, 要注意下列事项:

1) 合理确定异型砖的形状, 便于成型、脱模和烧成。结构不合理的砖形在制造过程中废品率高。

2) 异型制品的单重不能太大, 耐火粘土砖一般不超过 30kg, 高铝砖一般不超过 35kg, 硅砖一般不超过 25kg。

3) 制品的最大和最小外形尺寸之比, 耐火粘土砖和高铝砖一般不超过 1:8, 硅砖一般不超过 1:6。

4) 制品上两个面之间的夹角一般不应小于 30°。制品不能设计得过长、过细、过薄。

5) 制品上两个面的过渡尽量采用圆角, 因为锐角或直角在制造中易开裂。

6) 制品上的孔洞、凹角和沟槽不宜过多。

7) 异型砖的技术条件, 一般按照国家标准的相关规定。

表 20-1-9 直形砖

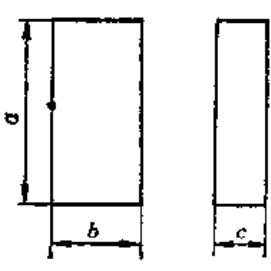
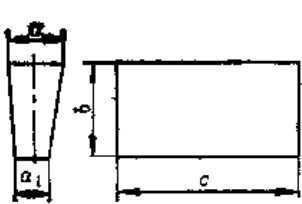
形 状	砖号	代号	尺 寸 (mm)			规 格 a × b × c	体 积 (cm <sup>3</sup> )
			a	b	c		
	Tz-1	Z 176	172	114	65	172 × 114 × 65	1274.5
	Tz-2	Z 233	230	114	32	230 × 114 × 32	839.0
	Tz-3	Z 236	230	114	65	230 × 114 × 65	1704.3
	Tz-4	Z 236 k	230	172	65	230 × 172 × 65	2571.4
	Tz-5	Z 177	172	114	75	172 × 114 × 75	1470.6
	Tz-6	Z 237	230	114	75	230 × 114 × 75	1966.5
	Tz-7	Z 306	300	150	65	300 × 150 × 65	2925.0
	Tz-8	Z 307	300	150	75	300 × 150 × 75	3375.0
	Tz-9	Z 307 k	300	225	75	300 × 225 × 75	5062.5

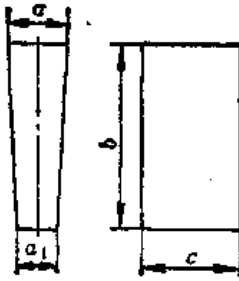
表 20-1-10 侧楔形砖

形 状	砖号	代号	尺 寸 (mm)				规 格 b × a/a <sub>1</sub> × c	弯曲外 半径 (mm) $\frac{ab}{a-a_1}$	每环极 限块数 $\frac{2\pi b}{a-a_1}$	倾斜角 $\frac{180(a-a_1)}{\pi b}$	体 积 (cm <sup>3</sup> )
			b	a	a <sub>1</sub>	c					
	Tc-21	C 1163	114	65	35	230	114 × 65/35 × 230	250.8	23.876	15°05'	1311.0
	Tc-22	C 1164	114	65	45	230	114 × 65/45 × 230	367.2	35.814	10°03'	1442.1
	Tc-23	C 1165	114	65	55	230	114 × 65/55 × 230	752.4	71.628	5°02'	1573.2
	Tc-24	C 1174	114	75	45	230	114 × 75/45 × 230	288.8	23.876	15°05'	1573.2
	Tc-25	C 1175	114	75	55	230	114 × 75/55 × 230	433.2	35.814	10°03'	1704.3
	Tc-26	C 1176	114	75	65	230	114 × 75/65 × 230	866.4	71.628	5°02'	1835.4
	Tc-27	C 1563	150	65	35	300	150 × 65/35 × 300	335	31.416	11°28'	2250.0
	Tc-28	C 1564	150	65	45	300	150 × 65/45 × 300	502.5	47.124	7°38'	2475.0
	Tc-29	C 1565	150	65	55	300	150 × 65/55 × 300	1005	94.248	3°49'	2700.0
	Tc-30	C 1574	150	75	45	300	150 × 75/45 × 300	385	31.416	11°28'	2700.0
	Tc-31	C 1575	150	75	55	300	150 × 75/55 × 300	577.5	47.124	7°38'	2925.0
	Tc-32	C 1576	150	75	65	300	150 × 75/65 × 300	1155	94.248	3°49'	3150.0

注: 弯曲外半径计算式分子中的 a 包括砌砖砖缝厚度, c 为 230mm 长的砖考虑 1mm, 而其余砖考虑 2mm。

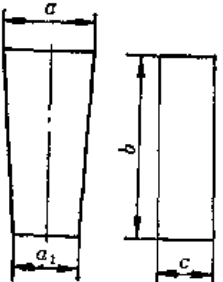


表20-1-11 竖楔形砖

形状	砖号	代号	尺寸(mm)				规格 $b \times a/c_1 \times c$	弯曲外半径 (mm) $\frac{ab}{a-a_1}$	每环极限块数 $\frac{2\pi b}{a-a_1}$	倾斜角 $\frac{180(a-a_1)}{\pi b}$	体积 ( $\text{cm}^3$ )
			b	a	a <sub>1</sub>	c					
	Ts-41	S 2363	230	65	35	114	230 × 65/35 × 114	506	48.177	7°28'	1311.0
	Ts-42	S 2364	230	65	45	114	230 × 65/45 × 114	759	72.257	4°59'	1442.1
	Ts-43	S 2365	230	65	55	114	230 × 65/55 × 114	1518	144.513	2°30'	1573.2
	Ts-44	S 2366	230	65	60	114	230 × 65/60 × 114	3036	289.027	1°15'	1638.75
	Ts-45	S 2363 k	230	65	35	172	230 × 65/35 × 172	506	48.171	7°28'	1978.0
	Ts-46	S 2364 k	230	65	45	172	230 × 65/45 × 172	759	72.257	4°59'	2175.8
	Ts-47	S 2365 k	230	65	55	172	230 × 65/55 × 172	1518	144.513	2°30'	2373.6
	Ts-48	S 2374	230	75	45	114	230 × 75/45 × 114	582.7	48.171	7°28'	1573.2
	Ts-49	S 2375	230	75	55	114	230 × 75/55 × 114	874	72.257	4°59'	1704.3
	Ts-50	S 2376	230	75	65	114	230 × 75/65 × 114	1748	144.513	2°30'	1835.4
	Ts-51	S 2377	230	75	70	114	230 × 75/70 × 114	3496	289.027	1°15'	1900.95
	Ts-52	S 2374 k	230	75	45	172	230 × 75/45 × 172	582.7	48.171	7°28'	2373.5
	Ts-53	S 2375 k	230	75	55	172	230 × 75/55 × 172	874	72.257	4°59'	2571.4
	Ts-54	S 2376 k	230	75	65	172	230 × 75/65 × 172	1748	144.513	2°30'	2769.2
	Ts-55	S 3064	300	65	45	150	300 × 65/45 × 150	1005	94.248	3°49'	2475.0
	Ts-56	S 3065	300	65	55	150	300 × 65/55 × 150	2010	188.496	1°55'	2700.0
	Ts-57	S 3066	300	65	60	150	300 × 65/60 × 150	4020	376.991	57'	2812.5
	Ts-58	S 3064 k	300	65	45	225	300 × 65/45 × 225	1005	94.248	3°49'	3712.5
	Ts-59	S 3065 k	300	65	55	225	300 × 65/55 × 225	2010	188.496	1°55'	4050.0
	Ts-60	S 3074	300	75	45	150	300 × 75/45 × 150	770	62.832	5°44'	2700.0
	Ts-61	S 3075	300	75	55	150	300 × 75/55 × 150	1155	94.248	3°49'	2925.0
	Ts-62	S 3076	300	75	65	150	300 × 75/65 × 150	2310	188.496	1°55'	3150.0
	Ts-63	S 3077	300	75	70	150	300 × 75/70 × 150	4620	376.991	57'	3262.5
	Ts-64	S 3074 k	300	75	45	225	300 × 75/45 × 225	770	62.832	5°44'	4050.0
	Ts-65	S 3075 k	300	75	55	225	300 × 75/55 × 225	1155	94.248	3°49'	4387.5
	Ts-66	S 3076 k	300	75	65	225	300 × 75/65 × 225	2310	188.496	1°55'	4725.0

注：弯曲外半径计算式分子中的  $a$  包括砖缝厚度； $b$  为 230mm 长的砖考虑 1mm，而其余砖考虑 2mm。

表20-1-12 宽楔形砖

形状	砖号	代号	尺寸(mm)				规格 $b \times a/a_1 \times c$	弯曲外半径 (mm) $\frac{ab}{a-a_1}$	每环极限块数 $\frac{2\pi b}{a-a_1}$	倾斜角 $\frac{180(a-a_1)}{\pi b}$	体积 ( $\text{cm}^3$ )
			b	a	a <sub>1</sub>	c					
	Tk-81	K 23117	230	114	74	65	230 × 114/74 × 65	667	36.128	9°58'	1405.3
	Tk-82	K 23119	230	114	94	65	230 × 114/94 × 65	1334	72.257	4°59'	1554.8
	Tk-83	K 231110	230	114	104	65	230 × 114/104 × 65	2668	144.513	2°30'	1629.55

注：弯曲外半径计算式分子中的  $a$  包括 2mm 砌砖砖缝。

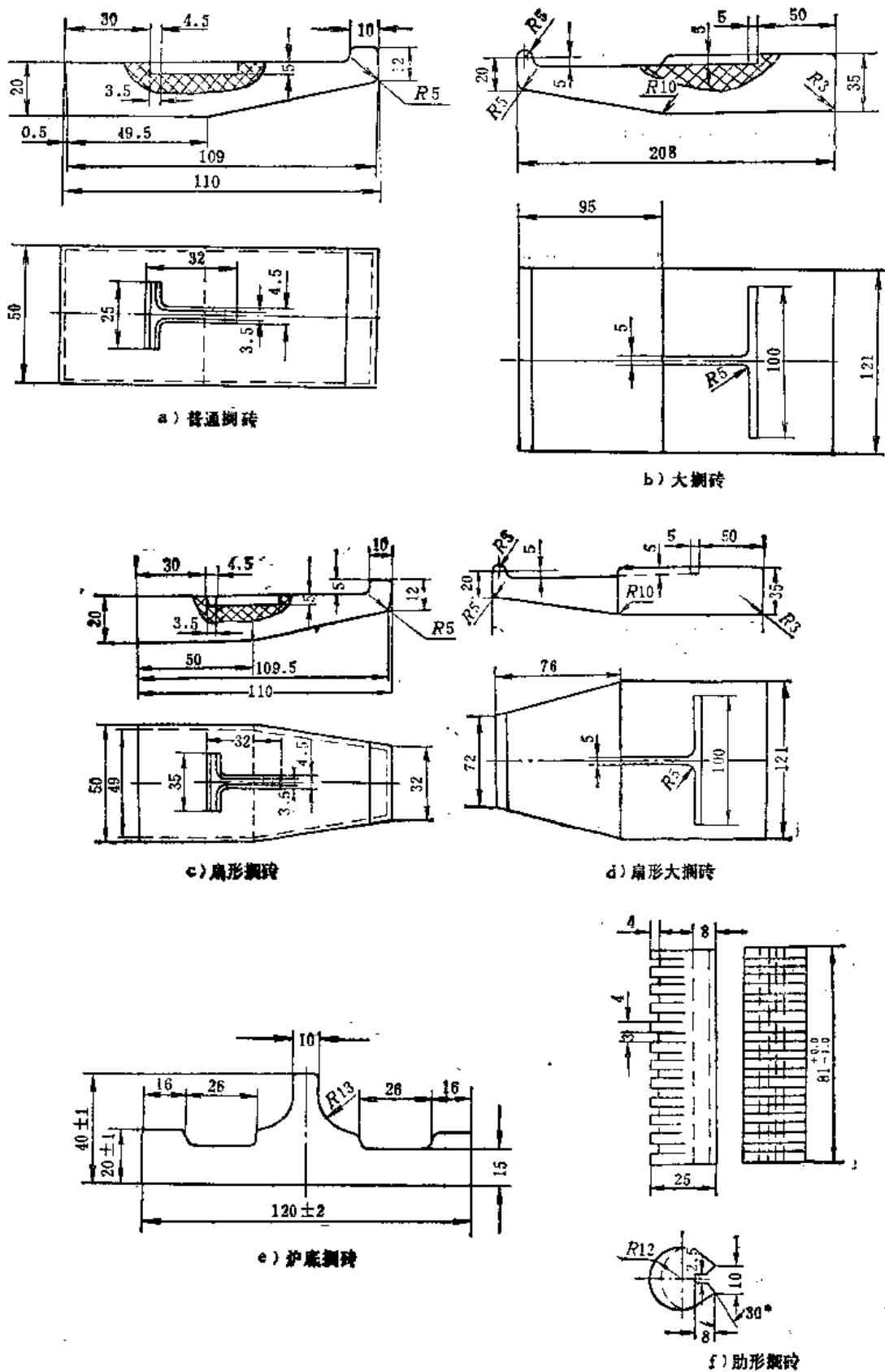


图20-1-4 侧砖

a) 普通侧砖 b) 大侧砖 c) 扇形侧砖 d) 扇形大侧砖 e) 炉底侧砖 f) 肋形侧砖

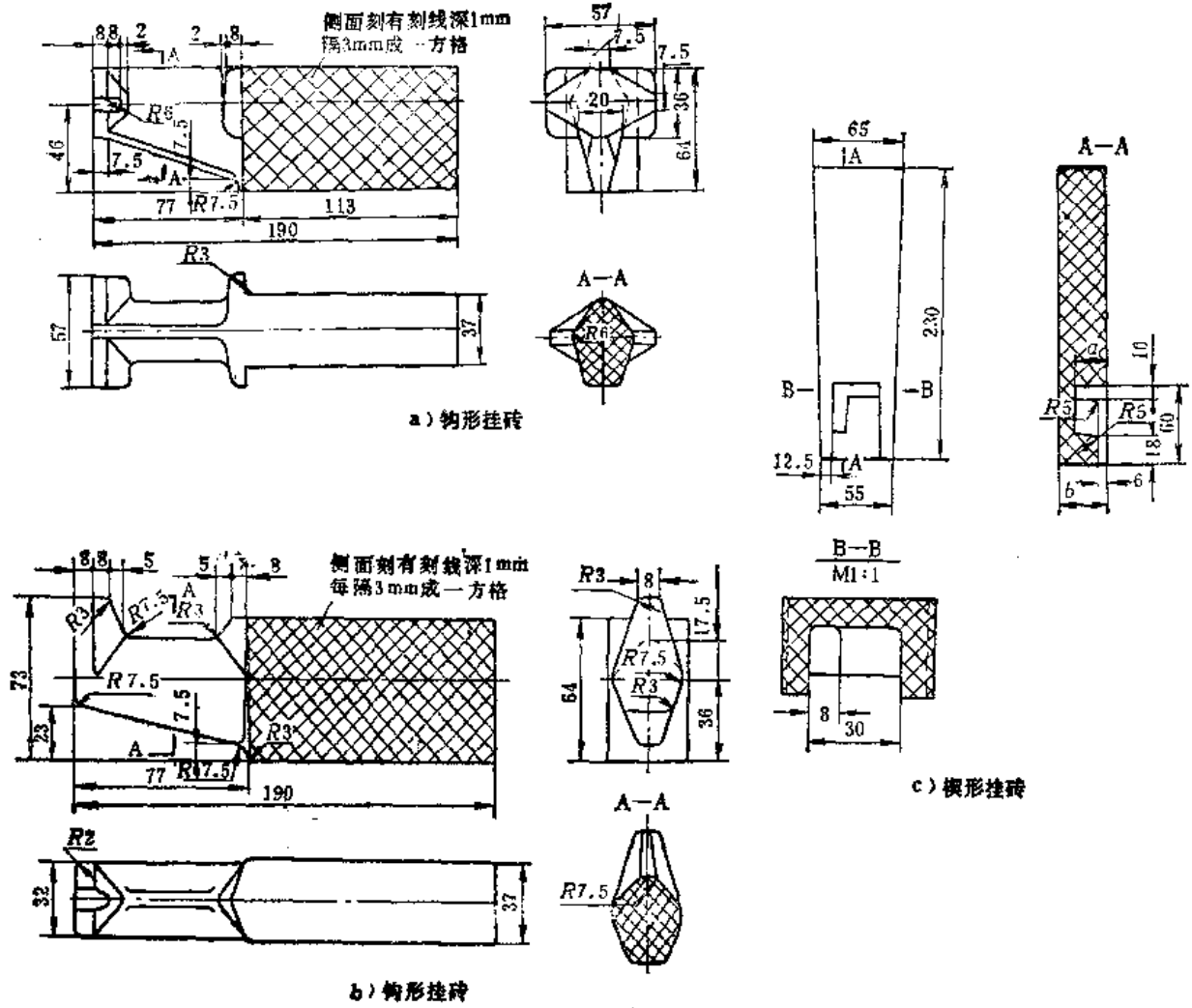


图20-1-5 挂砖

a) 钩形挂砖 b) 钩形挂砖 c) 楔形挂砖

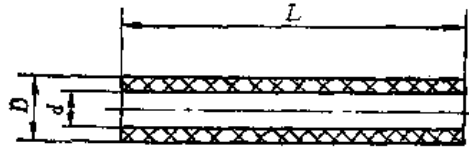
表20-1-13 拱脚砖

形 状	砖号	代号	尺寸(mm)						a	规格 L × a × C	体积 (cm <sup>3</sup> )
			L	a	b	c	d	e			
	TJ-91	J 116	114	114	132	230	33	57	60°	114 × 60° × 230	2812.1
	TJ-92	J 233	230	230	199	114	84	31	30°	230 × 30° × 114	3913.34
	TJ-93	J 234	230	230	199	114	36	67	45°	230 × 45° × 114	3703.35
	TJ-94	J 236	230	230	266	114	67	115	60°	230 × 60° × 114	5670.1
	TJ-95	J 303	300	345	199	73	49	85	30°	300 × 30° × 73	3588.32
	TJ-96	J 304	300	345	266	73	54	133	45°	300 × 45° × 73	5058.75
	TJ-97	J 306	300	230	333	73	74	80	60°	300 × 60° × 73	4167.57

注：拱脚砖斜面长L尺寸为参考尺寸。

表20-1-14 耐火管尺寸

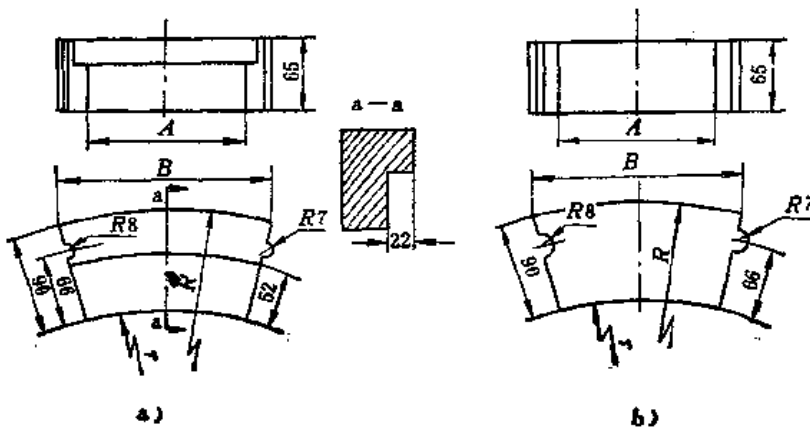
(mm)



d	D	L	备注
$16^{+2}_{-1}$	$36^{+1}_{-2}$	$210 \pm 3$	适用于 $\phi 12\text{mm}$ 引出棒 保护管
$16^{+2}_{-1}$	$36^{+1}_{-2}$	$250 \pm 5$	
$16^{+2}_{-1}$	$36^{+1}_{-2}$	$300 \pm 5$	
$16^{+2}_{-1}$	$36^{+1}_{-2}$	$350 \pm 7$	
$16^{+2}_{-1}$	$36^{+1}_{-2}$	$400 \pm 7$	
$25^{+2}_{-1}$	$40^{+1}_{-2}$	$210 \pm 3$	适用于 $\phi 22\text{mm}$ 以内的 引出棒和热电偶保护管
$25^{+2}_{-1}$	$40^{+1}_{-2}$	$250 \pm 2$	
$25^{+2}_{-1}$	$40^{+1}_{-2}$	$300 \pm 5$	
$25^{+2}_{-1}$	$40^{+1}_{-2}$	$350 \pm 5$	
$25^{+2}_{-1}$	$40^{+1}_{-2}$	$380 \pm 5$	
$46^{+2}_{-1}$	$64^{+1}_{-2}$	$300 \pm 5$	硅碳棒保护管

表20-1-15 轻质扇形砖尺寸

(mm)



A	B	R	r	备注
105	150	300	210	12块砌 $D = 420$
140	187	360	270	12块砌 $D = 540$
153	196	410	320	13块砌 $D = 640$
158	196	450	360	14块砌 $D = 720$
255	270	525	435	12块砌 $D = 870$
166	196	640	550	20块砌 $D = 1100$
168	190.8	765	675	25块砌 $D = 1530$

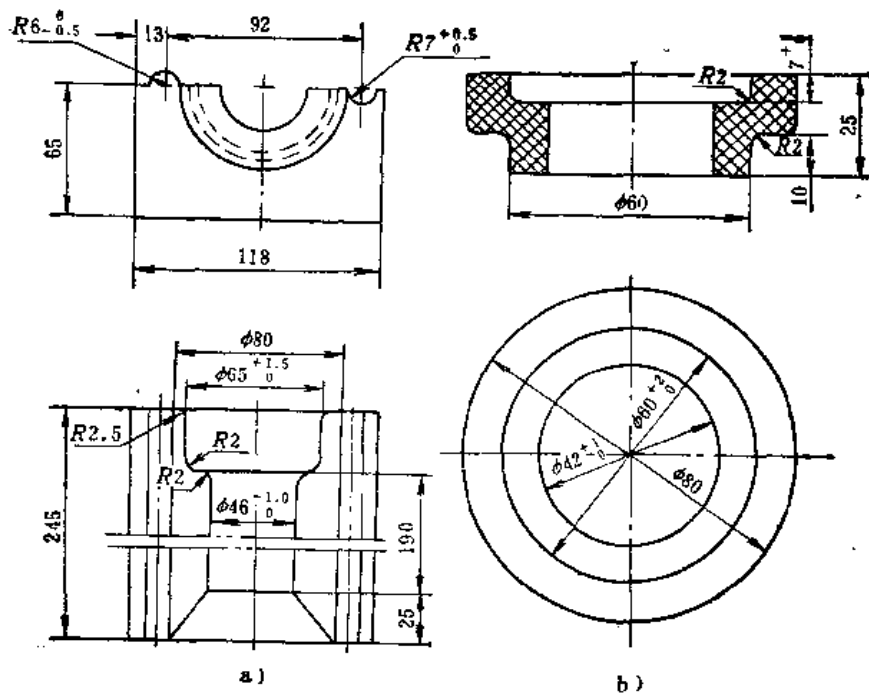
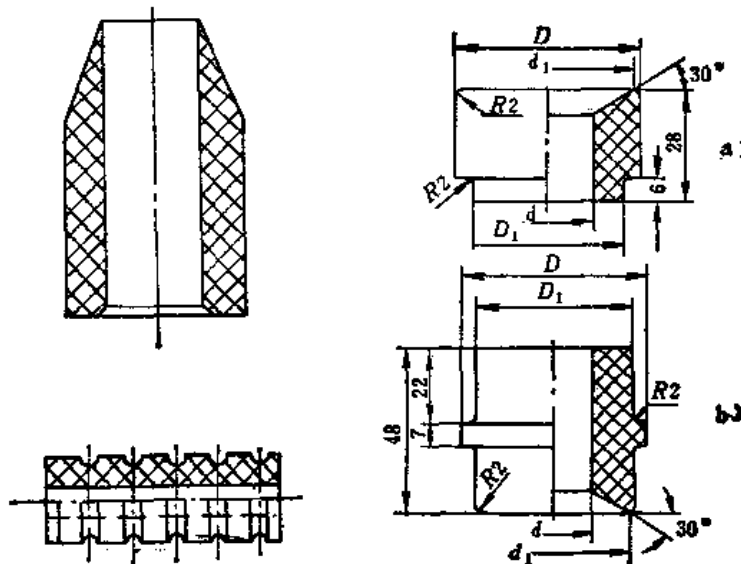


图20-1-6 硅碳棒用引出砖和套管

a) 引出砖 b) 套管

表20-1-16 绝缘子尺寸

(mm)



名称	$d$	$d_1$	$D$	$D_1$
绝缘子 a	$\phi 23 \pm 1.5$	$\phi 44$	$\phi 54$	$\phi 46 \pm 1.5$
	$\phi 15 \pm 1.5$	$\phi 32$	$\phi 44$	$\phi 34 \pm 1.5$
绝缘子 b	$\phi 23 \pm 1.5$	$\phi 44$	$\phi 46 \pm 1.5$	$\phi 33$
	$\phi 15 \pm 1.5$	$\phi 32$	$\phi 34 \pm 1.5$	$\phi 25$

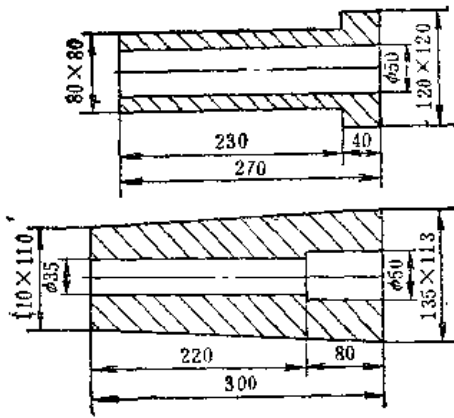


图20-1-7 热电偶用砖

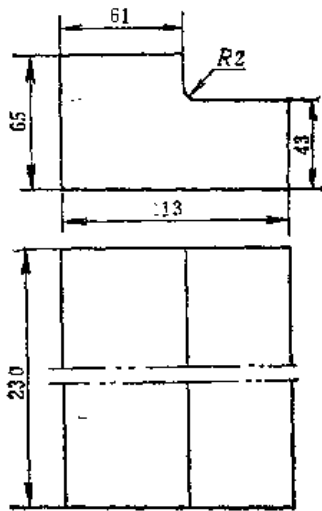


图20-1-8 轻质阶砖

**(五) 耐火材料的运输和保存**

搬运各种耐火制品时必须非常小心，决不能抛掷。装车时应紧密排列，中间空隙需用木板、草蓆之类东西填实。运输不同耐火材料时必须分别隔开，标志显明，以免混乱。

框架式小车比较实用(图20-1-9)，既能在地面上推运，又可在空中吊装。

所有耐火材料均应堆放在有盖仓库内，地坪应坚实，防止下陷。最好用木料垫底，不要受潮挨冻。露天保存时，耐火制品将由于先后受潮和干燥、冰冻和溶解等原因，而损坏它的工作性能。实践证明，在露天堆放一年后，一般耐火制品的耐压强度均会降低1/3左右。特别是镁砖、水玻璃和磷酸盐制品更不能受潮。

标准耐火粘土砖可堆放在仓库外面，但必须用

帆布或蓆席盖好，决不能受风雪侵袭。砖堆四周应设排水沟，以排泄积水。

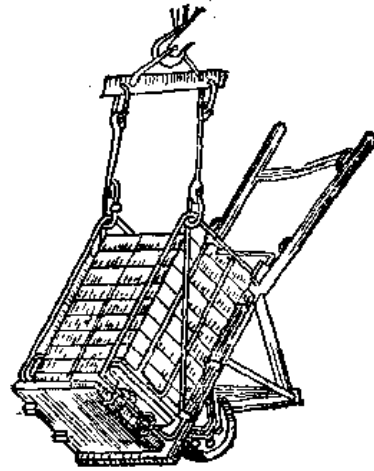


图20-1-9 框架式小车

必须根据耐火制品的种类、用途、规格和等级分别堆放。堆放时其高度不能超过1.8m，堆与堆之间必须留出不小于0.6m宽的通道，以便运输。

各种耐火粉料要严防风雨，以防吹跑细粒火泥而降低砌筑性能。受潮会结块，或混入泥砂则降低耐火度。最好分别堆放在有盖料仓和箱柜内，不要混杂。

耐火材料仓库内必须保持清洁、整齐和干燥，弄脏、受潮和挨冻的耐火材料在使用前应进行清理、干燥和预热。

**(六) 耐火材料的使用**

工业炉在日常使用中易损坏的部分，一般来说是耐火炉衬。不同用途的工业炉，其炉衬各部位的工作条件也各不相同。为了提高炉衬的寿命，首先必须了解工业炉的操作条件(表20-1-17)。要根据耐火材料的损坏机理，并针对不同部位的损坏现象，多方采取有效的改进措施。

表20-1-17 工业炉的操作条件

名称	因素	具体指标
热的因素	温度	内衬表面温度
	温度变化	升温速度、冷却速度
	温度分布	温度梯度

(续)

名称	因素	具体指标
机械因素	热应力	膨胀应力
	机械应力	静荷重、动荷重
	冲击	
	磨损	
	振动	
流体因素	熔体磨损	
	气体磨损	流速、密度、粘性
	气体透过	
化学因素	炉渣、玻璃质	化学成分、硬度
	熔融金属	化学成分、钢种
	气氛	氧气分压、真空度、气体组成
生产因素	装入材料	原料品位、尺寸
	操作速度	炉次/天、t/h

在实际工业炉上所发生的各种现象，可以认为是各种操作因素作用的结果。表 20-1-18 概括了主要的现象和操作因素的关系。当知道某些现象就可以推断和判定其操作因素，反之从操作条件也可以预想到会出现何种现象。

表 20-1-18 炉衬损坏现象与操作因素的关系

炉衬损坏现象	与其有关的主要操作因素
在一定气氛中的熔流和熔损	1. 温度 2. 温度、气氛中的粉尘
由熔体引起的熔损	1. 温度、机械摩擦 2. 温度、熔体(炉渣、玻璃质、熔融金属)的化学特性
发生龟裂、剥离脱落	1. 温度变化(热冲击) 2. 温度(烧结收缩) 3. 外部应力、膨胀应力 4. 炉渣(氧化铁皮、粉尘、渣的成分) 5. 气氛变化(氧化—还原)
崩坏、粉化、脆化	1. 温度变化(空态、热冲击) 2. 气氛(湿度、CO)
构造体的松动和变形	1. 振动 2. 温度(烧结收缩) 3. 机械冲击 4. 膨胀应力
工作面上的附着物	1. 温度 2. 接触物质的组成 3. 操作速度

耐火材料在工业炉上的使用过程中，遭受损坏的因素很多，但总结起来，其主要因素有：

- 1) 炉渣、液体金属或气体的侵蚀作用；
- 2) 温度剧烈波动或使用温度过高；
- 3) 机械冲击和磨损作用；
- 4) 高温应力作用或重烧变形。

据统计，其中渣蚀所占比重最大，温度波动其次。当然，对具体情况应作具体分析。例如连续式加热炉的高温段炉顶，其破坏的主要形态是剥落断块，为此温度波动和材料的重烧收缩可能是主要原因；但对高温段炉底的破坏，氧化铁皮的侵蚀是主要原因，而温度波动和重烧收缩是次要的。

### 1. 在锻造加热炉上的使用

(1) 炉底砖 锻造加热炉的温度一般波动在 1200~1400℃ 范围内，难以避免的强烈的锻锤振动直接影响着砌砖的强度和炉体的使用寿命，对拱顶危害更大。氧化铁皮掉在炉底上如不及时清除，就会熔融并与耐火砖发生作用，变得难以除去，致使炉底高低不平。因此，必须选择抗渣性强、耐磨性好、耐火度高的耐火材料砌筑锻造加热炉炉底。随着炉温高低、炉子大小、结构形式(半连续式还是室式)以及生产班次的不同，可以采用镁铬砖、烧结镁砖、镁铝砖、高铝砖等。由于镁质耐火材料供应紧张，实践证明，在一般室式加热炉用高铝砖还是可以基本满足生产要求的。但高铝砖必须充分烧结，因为烧结良好的砖，其耐磨强度也大。

铺砌炉底时一定要侧砌、干砌，且要顺着锻件毛坯的运动方向，以减少推抖时的阻力和磨损。锻造加热炉用各种炉底砖的使用寿命见表 20-1-19。

表 20-1-19 锻造加热炉用各种炉底砖的使用寿命

耐火材料名称	镁铬砖	烧结镁砖	镁铝砖	高铝砖
使用寿命(月)	3~4	~2	1.5~2	<1

注：两班生产制。

(2) 喷嘴砖 喷嘴砖是液体和气体燃料燃烧装置的重要组成部分，其主要作用为：

- 1) 将燃料在喷嘴砖内加热至着火温度，使其容易点燃并迅速燃烧。
- 2) 在喷嘴砖内保持一定的高温，稳定燃烧过程，避免产生脉动或燃料中断现象。
- 3) 组织火焰形状，以满足加热工艺的要求。

4) 使燃料和空气进一步混合。

因此，除了少数特殊的燃烧装置（例如大气烧嘴）外，都要装设喷嘴砖，以保证燃油喷嘴和煤气烧嘴充分发挥其性能。

喷嘴砖的形状和尺寸是和燃烧装置密切配合的，已经定型的燃油喷嘴和煤气烧嘴，一般都有与之相配合的喷嘴砖，如图20-1-10所示。在新设计喷嘴砖时，首先要注意尺寸和形状应与混合气体的流股或燃油喷出的雾化角相适应。喷嘴砖的张角过小，会使其过分受气流的冲刷而损坏，对燃油喷嘴来说还会使油雾喷到喷嘴砖上，造成积炭而缩小甚至堵塞通道；张角过大则点火困难，并容易造成燃烧不稳定的。

为了便于制作、施工和更换，每块喷嘴砖的重量不宜过大，太大的喷嘴砖可以分成2块或4块。

加热炉喷嘴砖的工作条件恶劣，不仅承受燃料燃烧时的高温作用和温度的急剧变化，而且还遭受燃料的高速冲击、燃料灰烬、焦油、油垢等的侵蚀，易于开裂剥落、变形软化而损坏。因此，用作喷嘴砖的材料必须是软化温度高、热稳定性好、抗渣性强，一般应用一等耐火粘土砖、高铝砖或矾土水泥耐火混凝土，并且要求有正确的几何形状和精确

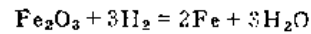
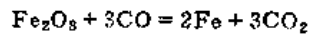
的尺寸。

砌筑喷嘴砖时，喷嘴必须对准中心线，不得有丝毫偏差，更不能先砌喷嘴砖后安装喷嘴，因为这样容易出现中心线不对的毛病。喷嘴砖与炉壳石棉板必须靠紧压实，不能有任何间隙，而且注意点火孔对准金属喷嘴板的点火孔。砌筑时最好在喷嘴砖的上面铺放一块强度高的大板砖，使其独立自在，不受负荷，且便于维修更换。

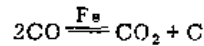
### 2. 在热处理炉上的使用

对于热处理炉，应考虑炉内气氛对耐火材料的热化学侵蚀作用以及耐火材料对炉内气氛的影响。

在常用的耐火材料中均含有  $Fe_2O_3$ ，这是一种十分引人注意的氧化物。耐火材料中含有的这种不稳定氧化物超过一定量时，是不宜用于控制气氛炉和真空炉。因为  $Fe_2O_3$  会与炉气中的  $CO$  和  $H_2$  发生如下反应，即



而经还原生成的铁，又是如下反应的催化剂，即



因而加速了  $CO$  的分解和碳黑的沉积过程。

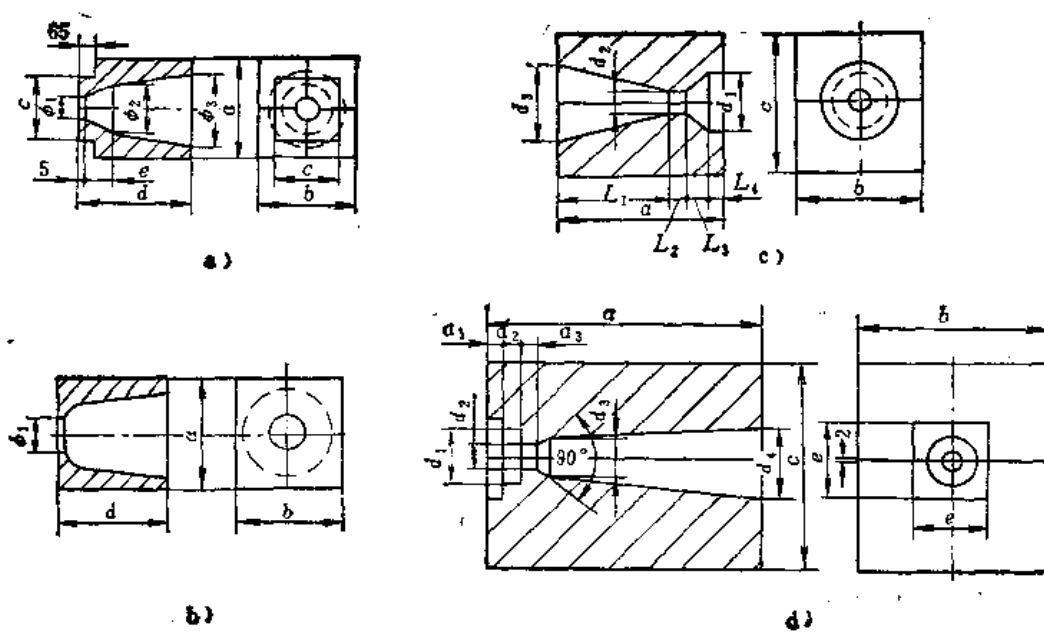


图20-1-10 喷嘴砖

a)、b) 燃油喷嘴砖 c)、d) 煤气烧嘴砖



上述反应结果，会导致：

1) 使开炉时炉气碳势上升缓慢，给炉内碳势控制带来了困难，并且会产生大量碳黑沉积；

2) 铁的生成，破坏了砖体的组织结构和砖内颗粒间的牢固结合，使砖体变得疏松，甚至碎裂；

3)  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  被  $\text{H}_2$  还原而生成  $\text{H}_2\text{O}$ ，使炉内露点上升，工件被氧化，达不到少无氧化加热的效果。

另外，实践还表明：当  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量较高的砖用于氮基气氛炉时，砖内的氧会大量进入炉气，使炉气由原来的弱还原性变为氧化性，结果达不到工件光亮淬火加热的目的。

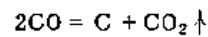
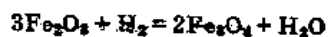
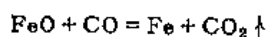
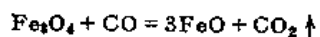
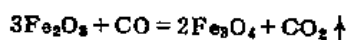
由此可见，用于控制气氛等要求较高的炉子，其耐火材料中的不稳定氧化物的含量，应给予限制。一般来说，对于渗碳气氛，砖内  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  的含量应控制在 1% 以内；对于以氮气为基体的控制气氛炉，砖内  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  的含量最好控制在 0.5% 以下。

(1) 高铝坩埚砖 为了搁放、吊挂和相互隔开电热元件所使用的各种坩埚砖、挂砖、隔板砖、引出管等，均是电阻炉内较易损坏的耐火材料，这是因为这些砖直接接触电热元件，承受温度高，温度急变，由于突出炉墙，容易遭到碰撞而被折断。如在渗碳炉内或含有可控气氛炉内使用，容易造成积碳现象（碳渗入砖内或是炉内挂有碳丝），引起短路。因此，对这些材料要求耐火度高、高温结构强度大以及烧结良好。

一般要求高铝坩埚砖含  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  量不超过 1.5%。氧化铁属于碱性，很容易与石英作用而生成硅酸铁（其熔点为  $1100^\circ\text{C}$ ），在砖上形成黑点。被侵蚀之处逐步蔓延，使之成为更大的熔洞和渣蚀，以致引起电热元件的短路。氧化铁在  $450\sim 550^\circ\text{C}$  时，又是促进可控气氛中一氧化碳析出碳黑反应的催化剂。碳黑沉积在砖中后使体积胀大，而导致砌体的强度下降和早期破坏。

采用高铝砖即可满足电阻炉用坩埚砖的要求，但最好不要采用耐火粘土砖。

(2) 抗渗碳砖 普通耐火粘土砖的抗渗碳性气氛能力差，其主要原因是砖中含有较多的  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ，它与可控气氛中的  $\text{CO}$  和  $\text{H}_2$  在高温下发生如下化学反应：



从以上反应式可以看出，由于  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  不断还原，炉气中的水和  $\text{CO}_2$  含量增加，露点上升，影响炉内气氛的稳定性，延长炉内气氛从通气到恢复正常使用露点的时间。同时， $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{Fe}$  和  $\text{Fe}_3\text{C}$  的生成和转化，由于它们的密度不同（见表 20-1-20），导致体积发生变化，使砖体疏松、脱落。此外，砖中的  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  还原生成的  $\text{Fe}$  是  $2\text{CO} = \text{C} + \text{CO}_2$  反应的触媒，加速  $\text{CO}$  分解析出碳黑。碳黑在砖内沉积也造成体积胀大。

表 20-1-20 铁及其化合物的密度

名称	Fe	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	FeO	$\text{Fe}_3\text{C}$
密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	7860	5240	5160	5700	7660

由此可见，耐火材料中  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量的多少是抗渗碳能力好坏的重要标志。实践证明， $\text{Fe}_2\text{O}_3$  的含量控制在 1.0% 以下就能满足要求，因此，把  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量在 1.0% 以下的耐火砖称为抗渗碳砖。

抗渗碳砖按照体积密度的不同，又可分为重质抗渗碳砖和轻质抗渗碳砖。对于重质抗渗碳砖，其气孔率要低，致密度要高，其技术性能见表 20-1-21。

表 20-1-21 抗渗碳砖的性能

性能名称	指标		
	重质抗渗碳砖	轻质抗渗碳砖	
化学成分	$\text{Al}_2\text{O}_3$	44.00	43.15
	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.42	0.32
体积密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	2140	880	
显气孔率 (%)	21.3	50~70	
常温抗压强度 (MPa)	30	3	
耐火度 ( $^\circ\text{C}$ )	1770	1730	
荷重软化开始温度 ( $^\circ\text{C}$ )	1350	1250	

(3) 碳化硅砖 碳化硅砖有着优良的导热性、荷重软化点高和热稳定性好等特点，因此，在高温热处理炉 ( $>1300^\circ\text{C}$ ) 上用作炉底板和马弗炉罩等。

碳化硅砖在高温下易氧化生成二氧化硅（以方石英状态存在），随之密度降低，体积增大，加上冷却时产生方石英效应，以致砖体破裂。砖的氧化除了与其性质和使用条件有关外，还与使用部位的气体成分有关，水汽愈多，则砖愈易氧化。硅酸钠在1300℃时，特别是在氧化气氛下将严重侵蚀碳化硅砖，因此，不宜用水玻璃作为砌砖的结合剂。由于碳化硅砖易膨胀开裂，所以砌筑时，其膨胀缝则显得更为重要。

碳化硅砖性极脆，受冲击、碰撞后易断裂破碎，使用时必须注意。

(4) 透气砖 流动粒子炉的透气砖主要是向粒子层内均匀布风，承受炉池内粒子的重量。因此，透气砖除要求具有一定的耐火度、耐压强度和急冷急热性外，更重要的还应具有透气均匀、气孔细小的特点，因为这是影响炉子流化质量的主要参数。因此，在透气砖材料的选配上，力求达到颗粒呈圆形（经球磨过的最好），粒度相近，以保证均匀的透气性。

透气砖一般可用刚玉或高铝质材料制成。高铝透气砖的性能见表20-1-22。最近也有采用往耐火纤维中加入粘结剂后压制而成的透气砖，其使用效果也比较好。

(5) 耐热瓷件 工业炉用耐热瓷件一般可分为镁质瓷和高铝瓷两大类。

堇青石瓷（ $2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$ ）系镁质瓷的一种，其膨胀系数特低，仅为一般瓷的1/3~1/2。

它的体积不随温度而变化，具有高的热稳定性和电绝缘强度，一般用作电炉的耐热绝缘瓷件。

表20-1-22 高铝透气砖的性能

性能名称	数值
体积密度(kg/m <sup>3</sup> )	2370
显气孔率(%)	32.8
常温耐压强度(MPa)	7.87
透气度(L·m/(m <sup>2</sup> ·h·Pa))	4.62
耐火度(°C)	1700

莫来石瓷和莫来石-刚玉瓷具有足够的力学强度和冲击强度，能耐急冷急热的温度变化，化学稳定性好，软化温度高，一般用来制作热电偶保护管等。

刚玉瓷的耐火度高，化学稳定性强，高温力学强度大，电绝缘性能优良，因此，可用作高级耐火绝缘制品。

耐热瓷性能脆，不耐冲击，抗弯强度差，同时热稳定性不好，使用时必须注意。

(6) 轻质耐火材料 工业炉操作时的热损失，仅砌体的蓄热损失和炉子表面向周围介质的辐射损失，就占全部热量消耗总数的24%~45%。为了减少热损失，提高炉子的热效率，就必须正确地选用轻质耐火材料（图20-1-11）。

根据使用温度的不同，轻质耐火材料的选用见表20-1-23。

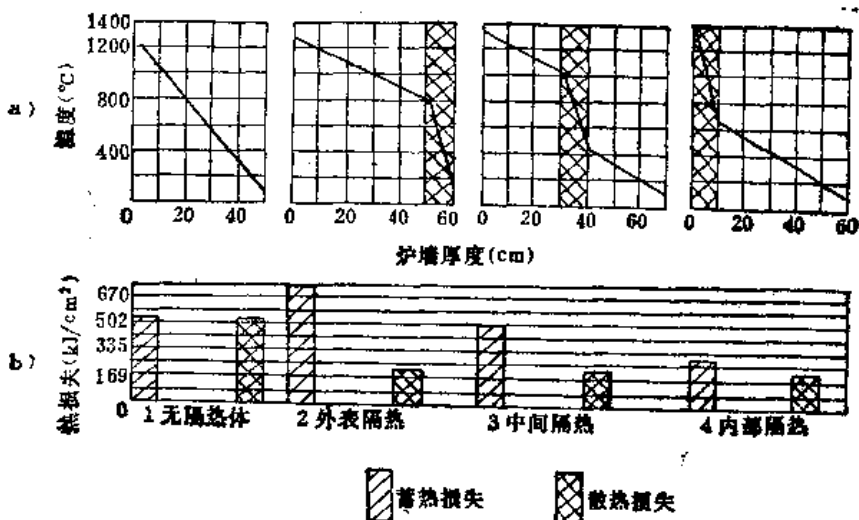


图20-1-11 轻质耐火材料部位与温度分布及热损失的关系

a) 轻质耐火材料部位与温度分布的关系 b) 轻质耐火材料与热损失的关系

表20-1-23 轻质耐火材料的选用

使用温度 (°C)	选 用 材 料
<1000	400~1000 kg/m <sup>3</sup> 轻质耐火粘土 砖、蛭石制品
1000~1300	1000~1300 kg/m <sup>3</sup> 轻质耐火粘土 砖、轻质高铝砖、轻质硅砖、耐火纤 维
>1300	轻质高铝砖、轻质刚玉砖、空心球 氧化铝砖

采用轻质耐火材料砌筑工业炉后,不仅可以节约燃料和动能,而且可以缩短升温时间,提高炉子的生产率。轻质耐火砖的使用温度应低于该砖烧结温度的70~100°C,以免产生大的重烧收缩而引起砖缝裂开和砖的破裂。由于砖的开口气孔较多,组织疏松,只能用于洁净气氛或不易扬尘的情况下,不能直接接触熔渣和熔融金属,不能用于与炉料接触摩擦的部分,不宜用于高速炉尘的通道,不能用于机械振动大的部位。因此,轻质耐火砖不能用作火焰热处理炉的内衬,即使电阻炉的炉底和拱基等承受较大负荷的部位,仍然应用耐火粘土砖砌筑。

砌筑轻质耐火砖时要注意留适当的砖缝,而且位置和宽度要求布置恰当,这是由于其抗压强度较差,在受热膨胀时易于破裂。如附近有锻锤之类产生振动的设备时,炉子基础最好能安装消震装置。如将轻质耐火砖用于火焰热处理炉的内衬,则应在其表面涂抹一层保护涂料。轻质砖的热容量小,虽然可以迅速加热,但如果过分地利用这一性能,由于其热稳定性差和强度差,也可能导致破裂。

### 3. 在冲天炉上的使用

随着冲天炉工作部位的不同,其工作条件和损坏情况也完全不一样。

在炉缸内,整个工作时间都充满着1400~1500°C的铁水,使炉缸承受相当大的压力,因此,当炉缸的砌体质量不好时,铁水就会渗入或穿过砖体和炉壳,发生漏炉事故。

燃烧带的温度高,可达1700°C,这里不仅遭受炉料的磨损、炉渣的侵蚀,而且在开风和停风时还受到温度急剧变化的影响。

预热带的温度为500~1100°C,它还受到炉料下落时的机械磨损以及带有大量烟尘的热空气向上冲刷的损坏作用。

加料口附近的温度不高,一般在400°C以下。

相对地说,它的工作条件较好,主要承受投料时的猛烈冲击。

出铁口经受高温铁水的冲刷、通开和堵塞时的冲击。出渣口经受熔融炉渣的侵蚀和冲刷,因此极易损坏。

一般说来,冲天炉上部的加料口用铸铁砖砌筑,预热带用质量较好的耐火粘土砖砌筑,而熔化带和炉缸既可用砖砌,也可采用打结料打结而成。由于修理频繁,并从节约耐火材料的原则出发,因此,燃烧带和炉缸大都采用打结方法。

冲天炉炉衬中工作条件最恶劣、损坏情况最严重的是风口砖和出渣口砖,因此,用作风口砖和出渣口砖的耐火材料必须是耐火度高、热稳定性好、抗渣性强、耐磨,且具有精确的外形尺寸。

### 4. 在电弧炉上的使用

炼钢是一个高温过程,炉衬经常在1600°C以上的温度下工作。虽然炼钢温度远低于炉衬材料的熔点,但是可使它处于软化状态。在熔化期,炉料受热能力很强,电弧较长时间地被废钢包住,在氧化期,钢液激烈沸腾,炉渣钢液吸热条件较好。因此,一般说来,在这两个阶段,炉衬不致为高温所损坏。还原期钢渣温度相当高,又受电弧直接辐射,炉衬很容易损坏。另外,出完钢装料时,炉衬温度突然下降,装完料开始送电,温度又慢慢升高,这种急冷急热的温度变化常常是炉衬剥落的直接原因。

炉渣对炉衬的侵蚀作用,决定于它的组成和流动性。渣中SiO<sub>2</sub>含量愈高,碱性炉衬被侵蚀愈严重。除SiO<sub>2</sub>外,渣中Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaF<sub>2</sub>等同样侵蚀炉衬。炉渣的流动性对炉衬也有影响,渣稀对炉衬冲刷作用严重,并且反射电弧的能力强,会增加炉衬的热负荷;渣稠使熔池加热困难,物化反应条件变差,延长炉衬高温作用时间(即冶炼时间)。这些都会加速炉衬的损坏。

在许多情况下,炉衬的损坏是由于机械力的冲击而引起的,如布料不合理,炉底没有小块废钢保护,装料的料罐太高等。在这些情况下,炉底就可能被大块废钢砸成凹坑。炉盖升降、炉体开出引起的机械振动也是损坏炉衬的原因。

另外,炉料配比不当,冶炼操作不正确,如吹氧时高温的氧气流股直接接触及炉衬等,都会损坏炉衬。

所以,砌筑电弧炉的耐火材料应具备高的耐火度和荷重软化点、良好的热稳定性和抗渣性、足够

的高温机械强度以及低的导热性等。

砌筑酸性电弧炉时一般采用硅质耐火材料，碱性电弧炉则采用镁质耐火材料，但其炉顶多半使用高铝砖，有的酸性炉则仍采用硅砖。

硅砖在电弧炉炉顶上的使用寿命很低，这主要是冶炼温度较高的缘故。硅砖除了经受熔渣、烟尘的作用外，剥落现象也是其主要损坏原因之一。由于裂纹的出现和砖块的剥落，增加了砖块与炉渣的接触，从而加速了熔渣侵入砖块内部，形成许多沟道，即所谓纵深损坏。

提高电弧炉硅砖炉顶寿命的方向是采用高硅砖，尽可能提高砖的  $\text{SiO}_2$  含量 ( $\geq 97\%$ ) 和降低其气孔率 ( $\leq 13\%$ )。由于高铝砖作电弧炉炉顶比硅砖好，因此，目前硅砖的使用在国内已日趋减少。

冶炼高级合金钢的碱性电弧炉炉顶在改用高铝砖以后，使用寿命比硅砖大大延长。硅砖使用寿命即炉龄，一般只有几十炉，而高铝砖可达 80~200 炉，小型电弧炉则高达 600 炉以上。同时由于高铝砖的耐火度高，还可以提高冶炼强度。

高铝砖用在电弧炉炉顶时，除了熔融损坏作用外，在冶炼过程中尚有砖体小片剥落现象，这是由于温度变化冷却收缩形成裂纹所致。

碱性电弧炉的炉底和炉墙广泛地使用镁质耐火材料来砌筑，其损坏的因素是多方面的，所以归纳为熔渣侵蚀、补充烧结、荷重软化、温度波动和炉气性质的变化等因素。

镁砖在使用过程中吸收着熔炼空间中的熔融硅酸和铁氧化物，受到熔渣强烈的侵蚀，这是损坏的主要原因。镁砖表面的剥落是由于内应力作用的结果。实践证明，熔融物质在砖体内的移动能力随砖气孔率的增大而增强。气孔率在 5% 以下时，熔融物质实际上已难以侵入到砖体内部，而且细小气孔结构的砖在使用过程中工作表面剥落的厚度比粗大气孔结构的砖要薄一些。

### 5. 在感应炉上的使用

感应炉的工作条件很差，为了提高炉子的功率因素，要求坩埚炉衬尽可能地薄一些。薄炉衬的内部直接和高温金属熔液接触，外部围绕着水冷感应器，内外温差悬殊，因此，炉衬的工作条件极其恶劣。在多数情况下，感应炉是间歇作业，炉衬反复遭受温度激烈变化的影响。不仅如此，炉衬还遭到熔融金属、熔剂和炉渣的强烈侵蚀，金属熔液电磁

搅拌时的机械磨损，投料时的冲击以及倾炉出钢时的振动等影响，这些都是坩埚炉衬损坏的原因。

打结坩埚炉衬的材料同样应具有高的耐火度和荷重软化点，热稳定性要好，防止产生龟裂和剥落，对金属熔液、熔剂和炉渣有良好的抵抗性以及低的导热、导电性，经烧结后还应具有足够的高温强度，以抵抗投料和出炉时的机械冲击。炉衬材料可分为酸性材料、碱性材料和中性材料三种。由于酸性材料的石英砂来源充足，烧结性能良好，因此被广泛采用。

采用的耐火材料不仅要求化学纯度高，使用性能好，而且颗粒组成应有一定配比。坩埚炉衬打结时必须均匀密实，防止偏薄和分层现象。注意烘炉和烧结，严格执行熔炼升温制度。由于石英砂坩埚对温度的敏感性较大，在熔炼过程中要防止温度的急剧变化，否则炉衬出现裂纹后往往导致金属熔液的渗漏。

感应炉坩埚炉衬的使用寿命不一，相差悬殊，长者几百炉，短者仅几炉，这与材料质量、配制、打结、烘炉冶炼以及日常维护等因素都有着密切的关系。无芯工频炉炉衬的使用寿命见表 20-1-24。

表 20-1-24 无芯工频炉炉衬的使用寿命

熔炼金属	工频炉容量 (t)	打结材料	使用寿命
钢	1.5	冶金镁砂	58~62 炉次
铸铁	3	石英砂	110~155 炉次
铜合金	0.6	石英砂	6~8 个月
铝合金	1	石英砂	8~14 个月

### 6. 石墨坩埚的使用

石墨坩埚应具有较高的耐火度和良好的热稳定性，因为在使用过程中，特别是在熔炼和浇注金属的过程中，坩埚壁的内外温差很大，产生相当大的热应力，使坩埚有破裂的危险。为了要承受熔融金属的全部负荷，保证浇注过程（运送和翻转操作）的安全进行，必须具有足够的机械强度。熔炼金属的热量是由坩埚壁传导得来，为了节约燃料，缩短熔炼时间，坩埚必须具有大的导热性。熔融金属和产生的熔渣对坩埚有侵蚀作用，特别是由于熔渣中氧化锰的存在，对坩埚的侵蚀更大，因此，要求它具有强的抗渣性。在坩埚配料内增加石墨量，除了会降低机械强度外，其它性能都可能得到提高。

表 20-1-25 是石墨坩埚的理化性能。

表20-1-25 石墨坩埚的理化性能

性能名称		理化指标	
		熔炼钢	熔炼铜合金
体积密度(kg/m <sup>3</sup> )	不小于	1.5	1.5
显气孔率(%)	不大于	33	33
常温抗压强度(MPa)	不小于	4.5	4.3
耐火度(°C)	不低于	1670	1630
温度急变抵抗性(1200°C, 水冷)			
(次数)	不低于	25	20
残余收缩(1200°C, 2h)	(%)		
	不大于	1	1

石墨坩埚会吸水,所以在保管和使用时必须充分考虑到这点。

实践证明:要使坩埚正常地工作,使用前必须进行细心烘烤。由于石墨坩埚没有经过高温烧结,因此,它的组织还不够十分致密,最好首先能经过2~3次的高温(1300~1500°C)熔炼,使其形成烧结层,这样就能提高坩埚的使用寿命。

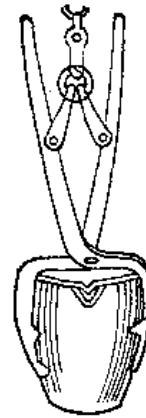
用煤气炉或重油炉加热时,火焰不可垂直喷射到坩埚壁上,应靠近炉壁环绕前进(炉膛要砌成圆形,炉壁必须光滑),并沿切线方向螺旋上升。

用焦炭炉加热时,熔炼后,将坩埚从炉内取出和进行浇铸时,倾侧坩埚的操作一定需要使用尺寸和形状准确的坩埚钳,如图20-1-12所示。每一号坩埚应该有单独的钳子。钳子必须在两个水平部位(上部和下部)同时把坩埚钳住,不可以只钳在坩埚上部的边缘。坩埚钳上最好带有柔软垫片,以防坩埚滑动倾翻和硬具夹坏。

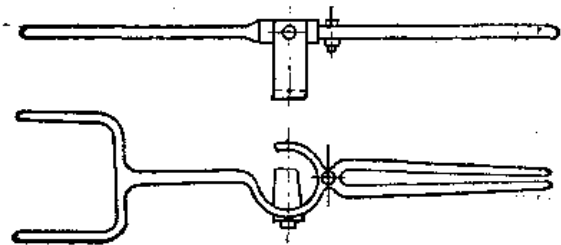
石墨坩埚在使用过程中,一部分石墨被烧去或溶解于金属内,另一部分则被金属从表面冲掉,而粘土等矿物质最后被熔化变成熔渣。这些脱碳和熔化作用的循环一直重复到坩埚完全损坏为止。石墨坩埚的使用寿命见表20-1-26。

表20-1-26 石墨坩埚的使用寿命

熔炼金属	熔炼温度(°C)	熔炼延续时间(h)	使用寿命(次)
钢	1600~1650	2~3	~6
铸铁	1420~1500	2~2.5	~12
铜合金	1250~1300	1~2	~25
铝合金	750~780	0.5~1	~40



a)



b)

图20-1-12 石墨坩埚钳

a) 提取用坩埚钳 b) 浇铸用坩埚钳

## (七) 耐火材料的选用和代用

### 1. 耐火材料的选用

在选用耐火材料时会遇到两个主要问题,即采用什么种类和等级的耐火材料来砌筑工业炉的各个部位;这些材料的来源有否保证,价格是否便宜。具体说来应考虑下述事项。

(1) 工业炉的工作条件 首先应深入调查炉子各部位的工作条件,分析破坏筑炉材料的主要和次要原因。着重考虑炉温高低、炉温变化情况、炉渣性质、炉内气氛、冲击磨损、传热隔热以及其它特殊要求,以保证炉子的寿命和产品的质量。例如,一般高温熔炼炉的炉底和渣线以下部位,炉渣侵蚀是主要的,而温度波动和体积稳定性是次要的,所以应选用高温抗渣性特别良好的材料。

如果根据炉温来选用耐火材料时,一般可参考表20-1-27的数据。

(2) 耐火材料的高温使用性能 要掌握各种耐火材料的性能,尤其是高温使用性能。例如普通烧结镁砖的使用性能中,其主要优点是耐火度高、

表20-1-27 根据炉温选用耐火材料

炉温 (°C)	炉子名称	炉膛内衬选用耐火材料
1000	中温电阻炉	轻质耐火粘土砖、耐火纤维
1300	火焰加热炉、热处理炉	耐火粘土砖、高铝砖、硅砖、碳化硅砖、耐火混凝土
1300	高温盐浴炉	耐火粘土砖、高铝砖、耐火混凝土
1400	高温电阻炉	轻质耐火粘土砖、轻质高铝砖、氧化铝砖、碳化硅砖
1650	钨丝炉	氧化铝砖、刚玉砖、碳化硅砖、氧化铝空心球制品
1650	冲天炉	耐火粘土砖、碳化硅砖、白云石砖
1700	电弧炉	高铝砖、硅砖、镁砖、镁铝砖、镁铬砖、白云石砖、耐火混凝土
1700	感应炉	石英砂、镁砂、高铝砂、锆砂

抗碱性渣能力强，缺点是热稳定性差、荷重变形温度低。选用时应充分发挥它的优点，并从炉型结构、砌筑及维护等方面来克服它的缺点。

(3) 砌体各部位使用寿命的配合 由于炉子中修或大修一次，耗费的工时、材料、燃料都很大。另外炉子某部分的拆修，势必影响其它部位的寿命。例如火焰炉的喷嘴砖工作条件恶劣，损坏较快。因此，选用材料时应该全面考虑砌体各部位的寿命，使其相互适应。

(4) 经济上是否合理 选用材料时要做技术经济分析，在技术指标符合炉子工作条件的前提下，应尽量用价格较低的耐火材料，不用高级制

品。要考虑自己能否动手制造（例如浇筑耐火混凝土），尽量做到就地取材，修旧利废，找代用品，勤俭办企业。

许多耐火制品，虽然性能很好，但价格太高，因之限制了它们的使用。有些制品，虽价格较贵，但使用寿命很长，经核算使用还是合理的。

随着生产技术的发展，原料的开发，耐火材料的价格也在不断变化。表20-1-28是根据1971年冶金部编订的一级耐火制品的出厂价格，以二等耐火粘土砖（NZ-35）的价格为基数，算出其它各种制品的相对价格比值，供选用时参考。

选用耐火材料时，可参考表20-1-28。

表20-1-28 耐火制品的相对价格比值

名称	牌号或理化指标	价格比值
耐火粘土砖（一般工业炉用）	NZ-35	1
高铝砖（一般工业炉用）	LZ-40	1.80
高铝砖（一般工业炉用）	LZ-55	2.30
硅砖（一般工业炉用）	GZ-93	1.41
电炉顶用硅砖	DG-95	1.80
结合镁砖		1.28
烧结镁砖	MZ-87	8.59
镁铝砖	ML-80	3.98
碳化硅砖	SiC83%	23.0
锆莫来石砖		17.3
惟刚玉砖		25.5
硅藻土砖	550kg/m <sup>3</sup>	3.46
轻质耐火粘土砖	QN-1.0~1.3	3.46
轻质耐火粘土砖	QN-0.8	3.85
轻质耐火粘土砖	QN-0.4	6.41
轻质高铝砖		7.69
红砖	手工，75~100号	0.15

表20-1-29 耐火材料的选用

炉子名称	主要部位	工作条件					选用耐火材料		
		温度 (°C)	温度变化	炉渣侵蚀	冲击振动	磨损	名称	形状	特殊要求
燃煤加热炉	全部砌砖	1300	严	中	中	不	耐火粘土砖	标准型	
半连续式煤气炉	炉顶、炉墙	1300	严	不	中	不	耐火粘土砖	标准型	几何形状正确 耐磨性好
	烧嘴	1400	严	中	严	不	耐火粘土砖、高铝砖	异型	
	炉底	1500	中	整	不	严	镁砖、镁铬砖、镁铝砖 耐火混凝土	标准型	
转炉式煤气炉	炉顶	1300	中	不	中	不	耐火粘土砖	标准型	几何形状正确
	炉壁、炉底	1300	严	中	中	不	耐火混凝土	异型	
	烧嘴	1400	严	中	严	不	耐火粘土砖、高铝砖	异型	

(续)

炉子名称	主要部位	工 作 条 件					选 用 耐 火 材 料		
		温度 (°C)	温度 变化	炉渣 侵蚀	冲击 振动	磨 损	名 称	形 状	特殊要求
台车式油炉	炉顶、炉墙	1300	严	不	中	不	耐火粘土砖	标准型	几何形状正确
	喷嘴	1400	严	不	中	不	耐火粘土砖、高铝砖	异型	
	台车	1300	严	中	中	不	耐火粘土砖	标准型	
中温电阻炉	全部砌砖	1000	中	不	不	不	轻质粘土砖	标准型	含铁量低
	嘴砖	1100	中	不	不	不	高铝砖、刚玉砖	异型	
	引出管	1000	严	不	不	不	高铝砖	异型	
高温电阻炉 (硅碳棒)	全部砌砖	1300	中	不	不	不	轻质高铝砖	标准型	形状正确, 荷重 软化点高 导热性好, 高温 强度大
	引出砖	1400	中	不	不	不	高铝砖、刚玉砖	异型	
	炉底板	1300	严	中	严	中	碳化硅板	异型	
箱式多用炉	砌砖内衬	1000	中	严	不	不	重质高铝抗渗碳砖	标准型	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <1.0% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <1.0% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <1.0%
	隔热层	700	不	严	不	不	轻质抗渗碳砖	标准型	
	炉门	1000	中	严	中	不	重质抗渗碳砖	标准型	
燃料预热炉	全部砌砖	1000	中	不	中	不	耐火粘土砖	标准型	几何形状正确
	喷嘴	1100	中	中	中	不	耐火粘土砖、高铝砖	异型	
	探底	1000	中	中	严	不	耐火混凝土	异型	
钎焊炉	砌砖内衬	1600	严	不	不	不	刚玉砖	异型	荷重软化点高
	隔热层	1000	中	不	不	不	轻质刚玉砖	标准型	
	刚玉炉底	1600	严	中	不	不	刚玉砖	异型	
电镀盐浴炉	坩埚炉底	1300	严	整	严	不	耐火粘土砖、高铝砖	异型	外形尺寸正确
冲天炉	前炉	1400	中	中	中	不	耐火粘土砖	标准型	热稳定性好 抗渣性强
	炉缸	1500	中	中	中	不	打结料		
	燃烧带	1650	整	严	整	中	打结料		
	预热带	—	中	不	严	中	耐火粘土砖、打结料	标准型	
	风口	—	中	中	严	中	耐火粘土砖、打结料	异型	
	出渣口	—	中	整	严	中	耐火粘土砖、高铝砖	异型	
酸性电弧炉	炉顶	1700	整	严	中	不	硅砖、高铝砖	异型	电极砖外形尺寸 正确
	炉墙	1600	严	严	中	不	硅砖、高铝砖	标准型	
	炉底、熔池	1700	严	整	中	中	硅砂打结料		
	炉底	—	中	不	中	不	硅砖	标准型	
	出钢槽	—	中	中	中	中	打结料、耐火混凝土		
碱性电弧炉	炉顶	1700	整	严	中	不	高铝砖、镁质砖	异型	电极砖外形尺寸 正确
	炉墙	1600	严	严	中	不	镁砖、镁质打结料	标准型	
	炉底、熔池	1700	严	整	中	中	镁质打结料		
	炉底	—	中	不	中	不	镁砖、镁质打结料	标准型	
	出钢槽	—	中	中	中	中	打结料、耐火混凝土		
感应炉	坩埚炉衬	1700	严	整	严	中	石英砂或镁砂打结料		纯度高、严格颗 粒组成
炉嘴	—	严	中	严	中	打结料中适当多加结合 剂			
干燥炉	全部砌砖	—	中	不	中	不	耐火粘土砖	标准型	
	燃烧室	1000	中	中	中	不	耐火粘土砖	标准型	

注: 不——不致损坏, 中——中等损坏, 严——严重损坏, 整——整个破坏。

## 2. 耐火材料的代用

在工业炉的砌筑过程中，经常会遇到材料的代用问题。一般来说，代用时有两种情况：一种是材料质量的代用；另一种是形状尺寸的代用。

(1) 材料质量的代用 所谓代用，就是用质量相近，甚至质量稍低的材料来代替使用。如果采用高一档的材料来砌筑，那就不能称之为“代用”。当施工现场发现缺乏某一种耐火材料，必须设法采用其它材料进行代用时，应该从两方面去考虑：一是该炉的工作条件，真正弄清哪个是炉衬破坏的主要因素；二是评价耐火材料的各项性能，能否适应炉子的需要。经过全面衡量，方可决定。

如锻造半连续式加热炉的炉底，原设计应采用镁铬砖砌筑。由于我国铬矿缺乏，镁铬砖供应一直十分紧张，有时不能不考虑代用来解决。在这种情况下，首先应分析炉底的使用条件，该炉采用推杆将毛坯由进料端推向出料端，由于毛坯在炉底上不断移动，炉底磨损很快，因此，要求炉底的耐磨强度高。又炉底上积满了氧化铁皮，在1300℃高温的作用下，对炉底的侵蚀严重，因此，炉底又必须具有良好的抗渣性。因在缺乏镁铬砖的情况下，若采用烧结镁砖，其使用效果也较好。但千万不能采用结合镁砖，因为它未经高温烧结，机械强度不大，耐磨性很差。若烧结镁砖又没有，镁铝砖也是较好的代用材料，唯其使用寿命稍短。如果上列三种镁质制品全部没有，也可采用高铝砖。但必须烧结良好，因为高铝砖的机械强度与烧结是否充分有很大关系，否则使用寿命则更短。

(2) 形状尺寸的代用 形状尺寸上的代用，就是一般所说的加工改制。没有图纸上所要求的那种形状和尺寸的砖，必须将形状近似或大砖改小的办法进行必要的加工，如砍砖、磨砖、切砖等过程而达到所需的外形和尺寸。砌筑时注意被砍削的砖面不要朝向炉膛而直接与火焰、钢水等接触。

也可采用以小砖代替大砖使用，但要尽量减少炉膛内的砖缝数量，并合理布置，不致影响炉衬的强度。

## 第2节 隔热材料

所有热导率低、重度小、具有一定的力学强度，且在隔热表面温度影响下不致破坏的材料，都可以用作隔热材料，又称保温材料或绝热材料。

### (一) 对隔热材料的要求

由于工业炉的使用温度较高，因此，一般对隔热材料的具体要求如下：

- 1) 体积密度小于 $1000\text{kg/m}^3$ ；
- 2) 热导率不超过 $0.23\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ；
- 3) 成型制品的耐压强度不小于 $0.3\text{MPa}$ ；散状材料应有足够的强度，收缩量要小；
- 4) 不燃烧、不腐蚀、且吸湿性小，因为水的热导率比空气大24倍；
- 5) 一般的最高使用温度应在 $400^\circ\text{C}$ 以上。被隔热表面的温度，应在允许范围内。

### (二) 隔热材料的分类

机械工厂工业炉常用隔热材料的分类见图20-2-1。

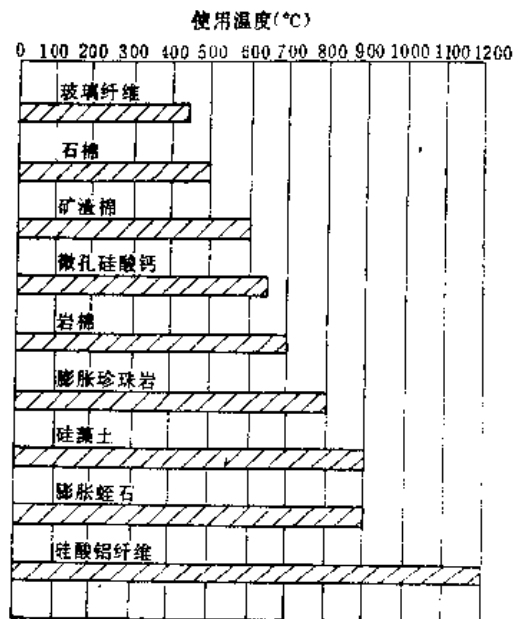


图20-2-1 常用隔热材料的分类图

按隔热材料的形状又可分为松散状、颗粒状和成型制品。

下面分述8种隔热材料的性能。硅酸铝纤维的性能详见第21章第10节。

#### 1. 硅藻土质隔热材料

硅藻土是藻类有机物腐败后，经地壳变迁而形成的。硅藻土的主要成分为非晶体二氧化硅（一般在70%~85%之间）和少量粘土杂质，其熔化温度



在1000~1200℃范围内。硅藻土是由细微气孔组织构成，其气孔率可达85%，所以具有良好的隔热性能，被广泛地用作隔热材料。

(1) 硅藻土灰 硅藻土灰有生料和熟料之分，生料用于砌筑泥浆和隔热层抹面，熟料用于填充隔热层。一般用在900℃以下的隔热部位，如遇高温将严重收缩，甚至熔化。硅藻土的技术性能见表20-2-1。

(2) 硅藻土石棉灰 硅藻土石棉灰是一种松散状隔热材料，俗称鸡毛灰，一般是由85%硅藻土和15%低级石棉所组成，其最高使用温度不能超过600℃。硅藻土石棉灰的技术性能见表20-2-2。

表20-2-1 硅藻土灰的技术性能

名称	体积密度 (kg/m³)	导热性 [W/(m·K)]			粒径 < 1.5 mm 的残余水分 (%)
		温度 (°C)	热导率	导热方程式	
生料	680	50	0.12	0.1 + 0.28 × 10 <sup>-3</sup> t ①	25~30
		350	0.2		
		500	0.24		
熟料	600	50	0.093	0.085 + 0.21 × 10 <sup>-3</sup> t	15~20
		350	0.16		
		500	0.19		

① t 表示实际温度。

表20-2-2 硅藻土石棉灰的技术性能

指标名称	数值
体积密度 (kg/m³)	不大于 450
热导率 [W/(m·K)]	不大于 0.07
水分 (%)	不大于 7

(3) 硅藻土砖 硅藻土砖是由硅藻土和添加剂经成型、烘干，在850~900℃烧成。硅藻土砖的体积密度小，气孔大，耐热度在1280℃以上，因此，硅藻土砖只能用在900℃以下的隔热部位，不能直接接触火焰。如遇高温，则将产生缩裂，甚至熔融。硅藻土砖的技术性能见表20-2-3。

2. 石棉

石棉是唯一的自然矿物纤维，能松散成富有弹性的纤维。根据生成时外界自然条件的不同可分为蛇纹石石棉和角闪石石棉两大类，实际应用最多的为蛇纹石石棉，又称温石棉，其化学分子式为 3MgO·2SiO<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O。

石棉松散后的纤维直径可细至0.5μm，长度约

表20-2-3 硅藻土砖的技术性能

级别	体积密度 (kg/m³)	气孔率 (%)	导热性 [W/(m·K)]			耐压强度 (MPa)	线膨胀系数 (1/°C)
			温度 (°C)	热导率	导热方程式		
A级	550	75	50	0.081	0.072 + 0.21 × 10 <sup>-3</sup> t ①	0.5	0.9 × 10 <sup>-6</sup>
			350	0.14			
			550	0.17			
B级	600	73	50	0.095	0.085 + 0.21 × 10 <sup>-3</sup> t	0.7	0.94 × 10 <sup>-6</sup>
			350	0.16			
			550	0.19			
C级	700	72	50	0.11	0.1 + 0.23 × 10 <sup>-3</sup> t	0.11	0.97 × 10 <sup>-6</sup>
			350	0.16			
			550	0.21			

① t 表示实际温度。

介于1~40mm之间，具有大的抗拉强度和弹性。在松散状态下具有较小的重度及导热性。石棉的耐碱性很强，但其耐酸性较弱。石棉不燃烧，有着较好的耐热性。加热时随着结构水的消失，其强度显著下降，在600℃温度下石棉纤维变脆，受外力后极易粉碎(表20-2-4)，石棉的熔点约1500℃左右。

根据纤维长度的不同，机选石棉分为六级(表20-2-5)。石棉纤维较长时，具有很好的柔韧性，可以搓成石棉绳，织成石棉布；纤维较短时则可以用来制作石棉灰或石棉板等。

石棉的使用温度：长时间为500℃；短时间可提高到600℃。

表20-2-4 石棉在加热时的性状变化

加热温度 (°C)	性状变化
<200	失去吸附水，抗拉强度提高
200	析出结构水，石棉开始分解
430	强度降低20%，但在常温和常湿度下，经过几天后，尚可恢复原来的性状
480	强度降低40%
580~600	失去全部结构水，强度不能恢复，石棉纤维变脆，易受外力作用而成粉末

表20-2-5 石棉绒的分级

级 别	1	2	3	4	5	6
纤维长度 (mm)	15	12	8	5	2.5	1.5

(1) 石棉灰 石棉灰经常与轻质碳酸镁、钙

及轻质耐火土等混拌一起, 用作隔热材料, 其技术性能见表20-2-6。

表20-2-6 石棉灰的技术性能

指标名称	碳酸镁 石棉灰	一级 石棉灰		二级 石棉灰	
		一级 石棉灰	二级 石棉灰	一级 石棉灰	二级 石棉灰
组成(%)：碳酸镁	80	—	—	—	—
石棉纤维	20	15	10	—	—
轻质耐火土及碳酸镁、钙	—	85	90	—	—
体积密度(kg/m <sup>3</sup> )	不大于	1400	600	860	—
热导率[W/(m·K)]	不大于	0.048	0.081	0.093	—
水分(%)	不大于	5	5	5	—
最高使用温度(°C)	不高于	450	600	600	—

(2) 石棉板 石棉板是由65%石棉和35%粘结材料所制成, 主要用作热工设备的衬垫或隔热材料。

石棉板的烧失量应不大于18%, 纵向抗拉强度应不小于1.4MPa。石棉板的结构和厚度必须均匀、表面光滑、断面组织一致, 没有结疤、孔隙和裂缝。石棉板的一般规格为1000mm×1000mm(厚度自1.6至16mm), 重量为每1mm厚度, 重约1.3kg/m<sup>2</sup>。最高使用温度不超过500°C。

### 3. 矿渣棉

矿渣棉是熔融的冶金矿渣从炉中流出时, 用高压蒸汽喷射使其形成雾状后, 迅速在空气中冷却而制成的人造矿物纤维。

矿渣棉的纤维长2~60mm, 直径约2~20μm。松散状态的矿渣棉空隙率极大, 具有重度小、导热性低、不燃烧和吸湿性小等特点。它对铁、铜和铝没有腐蚀作用, 但当硫及硫化物含量超过1.5%, 且在潮湿和高温的条件下使用时, 对金属产生腐蚀。

矿渣棉纤维有脆性, 当堆积过厚或受振动时易被压实, 而产生沉陷, 使重度增加, 导致隔热性能变差, 因此, 使用时必须采用分层结构或是制成矿渣棉制品。

表20-2-7和表20-2-8分别为矿渣棉及其制品的技术性能。

### 4. 膨胀蛭石

蛭石是一种复杂的铁、镁含水硅铝酸盐类矿物, 具有云母的外貌, 易于剥成薄片, 内含5%~10%的水分, 受热后水分迅速蒸发膨胀。由于膨胀时很象水蛭的蠕动, 故此得名蛭石。

表20-2-7 矿渣棉的技术性能

指标名称		一级	二级
体积密度(在荷重0.02MPa时)	(kg/m <sup>3</sup> )	不大于	100 150
热导率[W/(m·K)]		不大于	0.044 0.047
小珠含量(>0.5mm者)(%)		不大于	6 10
烧结温度(°C)		不低于	800 800
最高使用温度(°C)		不高于	600 600

表20-2-8 矿渣棉制品的技术性能

指标名称	沥青矿渣棉毡		酚醛树脂矿渣棉板	
	I级	II级	I级	II级
体积密度(kg/m <sup>3</sup> )	不大于	100 120	160	200
热导率[W/(m·K)]	不大于	0.044 0.47	0.47	0.052
抗折强度(MPa)	不低于	—	0.2	0.2
吸湿率(%)	不大于	1.07 1.03	0.08	0.08
含水率(%)	不大于	—	~1	~1
最高使用温度(°C)	不高于	250 250	300	300

蛭石在850~1000°C的温度下煅烧时, 由于硅铝酸盐层间基距减小, 水蒸汽排出的条件受到限制, 造成层间水蒸汽压力增高, 致使蛭石产生剧烈膨胀。蛭石的颗粒单片体积能膨胀20倍以上, 许多颗粒总的体积膨胀5~7倍。膨胀蛭石的颗粒是由0.02~0.05mm厚的极薄的薄片组成, 各个薄片彼此隔开, 层间充满空气, 因而具有很轻的体积密度和很小的热导率。其熔点为1370~1400°C, 在800~1000°C时性能仍不改变, 可用作高温隔热, 最高使用温度可达1100°C左右。

蛭石耐碱不耐酸, 不宜用于有酸性侵蚀的地方。膨胀蛭石使用时可以直接充填在炉壳与砌砖之间, 或用粘结剂制成各种形状的制品。但蛭石煅烧时, 如果超过了膨胀所需的温度, 则变脆易碎, 因此, 在运输和使用过程中应予以注意。

膨胀蛭石及其制品的技术性能见表20-2-9和表20-2-10。

表20-2-9 膨胀蛭石的技术性能

指标名称	数值
体积密度(kg/m <sup>3</sup> )	80~200
热导率[W/(m·K)]	0.047~0.07
吸湿率(%)	不大于 1.1
最高使用温度(°C)	不高于 1100

表20-2-10 膨胀蛭石制品的技术性能

指标名称	蛭石耐火 混凝土	水玻璃 蛭石制品	水 泥 蛭石制品
体积密度 (kg/m <sup>3</sup> )	800~850	300~400	450~500
热导率[W/(m·K)]	0.1 ~0.12	0.079 ~0.084	0.1 ~0.14
抗压强度 (MPa)	1.7~2	0.35 ~0.65	0.25 ~0.6
最高使用温度 (°C)	不高于 1000 ~1100	900	600

### 5. 膨胀珍珠岩

珍珠岩是一种酸性岩浆喷出的玻璃质熔岩，由于具有珍珠裂隙结构而得名，其主要成分为 SiO<sub>2</sub> (70%左右) 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (11%~14%)。

珍珠岩矿石经破碎、预热和焙烧后可制得膨胀珍珠岩。在1260°C焙烧时，珍珠岩急剧受热达到熔融软化温度，玻璃质中结构水瞬间汽化，产生很大压力，在粘稠的玻璃质中体积迅速膨胀，当玻璃质冷却至软化温度以下，便凝结成空腔结构，形成多孔洁白的膨胀珍珠岩。珍珠岩的体积膨胀一般可达7~30倍。

膨胀珍珠岩的重度小，热导率低，其熔点为1280~1360°C。但当加热至900°C时，颗粒收缩达50%，因此，膨胀珍珠岩的最高使用温度为800°C。

膨胀珍珠岩的技术性能见表20-2-11。

膨胀珍珠岩的形状是松散颗粒，它可以直接充填于炉子的夹层，也可加入粘结剂经成型、焙烧或养护而制成各种形状的制品。膨胀珍珠岩制品的技术性能见表20-2-12。

### 6. 玻璃纤维

玻璃纤维是以玻璃材料经高温熔化后加工而成，按纤维长短分为玻璃毡和玻璃棉两种。

玻璃纤维直径很小，超细玻璃棉的直径小于2μm，细而柔，对人的皮肤无刺痒感。它具有相当大的抗拉强度和弹性，抗震性好，但性脆易折断。玻璃纤维不燃烧，吸湿性小，在300°C以下温度对其性能无显著影响，在450°C以下不烧结，无碱玻璃在1360~1400°C时才熔化。

表20-2-13和表20-2-14分别为玻璃纤维及其制品的技术性能。

表20-2-11 膨胀珍珠岩的技术性能

指标名称	一级	二级
体积密度 (kg/m <sup>3</sup> )	40~80	80~120
热导率[W/(m·K)]	0.037~0.048	0.048~0.048
吸水率 (%)	不大于 1.8	1.8
最高使用温度 (°C)	不高于 300	300

表20-2-12 膨胀珍珠岩制品的技术性能

指标名称	磷酸盐 珍珠岩制品	水玻璃 珍珠岩制品	水泥 珍珠岩制品
体积密度 (kg/m <sup>3</sup> )	200~250	200~300	300~400
热导率[W/(m·K)]	0.044 ~0.052	0.056 ~0.065	0.058 ~0.087
抗压强度 (MPa)	0.6~1	0.6~1.2	0.5~1.0
最高使用温度 (°C)	不高于 1000		600

表20-2-13 玻璃纤维的技术性能

指标名称	玻璃棉	无碱超细 玻璃棉
体积密度 (kg/m <sup>3</sup> )	100~150	400~600
热导率[W/(m·K)]	0.052~0.058	0.029~0.035
纤维直径 (μm)	不大于 15	2
最高使用温度 (°C)	不高于 450	600

表20-2-14 玻璃棉制品的技术性能

指标名称		短 棉			超 细 棉		
		沥青玻 璃棉毡	酚醛玻 璃棉毡	酚醛玻 璃棉管	酚醛超细 玻璃棉毡	酚醛超细 玻璃棉管	酚醛超细 玻璃棉板
纤维直径 (μm)	不大于	13	15	15	3~4	6	6
渣球含量 (%)	不大于	4	5	5	0.4	1	1
体积密度 (kg/m <sup>3</sup> )	不大于	80	120	120	20	60	60
热导率[W/(m·K)]	不大于	0.041	0.041	0.041	0.035	0.035	0.035
吸水率 (%)	不大于	0.5	1	1	1	1	1
最高使用温度 (°C)	不高于	250	300	300	400	300	300

用作隔热材料的玻璃纤维一般为絮状、毡状或带状制品。制品可用玻璃线或软铁丝缝缀；可用沥青纸或铁丝网包裹，也可用粘结剂将玻璃纤维加工成需要的各种形状。

### 7. 微孔硅酸钙

微孔硅酸钙是由硅藻土、石灰、石棉纤维和玻璃等按一定配比混合后，经加热胶化、灌模成型、蒸压硬化、烘干整形等一系列过程制成的。

硅酸钙材料中的主要成分是二氧化硅和氧化钙，而它们在高温高压的情况下，能发生合成反应而生成水热硅酸钙。加热后水分逸出而产生均匀的微孔，气孔率高达90%以上，故名微孔硅酸钙。

微孔硅酸钙的特点是重度小、热导率低、强度高，是目前较好的一种新型隔热材料。微孔硅酸钙的技术性能见表20-2-15。

表20-2-15 微孔硅酸钙制品的技术性能

指 标 名 称	数 值
体积密度 (kg/m <sup>3</sup> )	200~250
热导率 [W/(m·K)]	0.041 + 0.21 × 10 <sup>-3</sup> t
气孔率 (%)	约91.5
抗压强度 (MPa) 不低于	0.5
抗弯强度 (MPa) 不低于	0.3
最高使用温度 (°C) 不高于	650

### 8. 岩棉

岩棉是一种新型无机纤维优质隔热材料。岩棉的生产是将玄武岩、辉绿岩等矿石，与少量的白云石、平炉钢渣等助熔剂放入冲天炉，在1400~1500°C高温下加热成熔融状态，通过四辊高速离心机形成纤维。制造岩棉制品时，将水溶性树脂或硅溶胶等粘结剂喷射到纤维表面，经过加工成型，并可在制品表面喷上防尘油膜，后再经烘干、贴面、缝合和固化等工序而成。

表20-2-16和表20-2-17是岩棉及其制品的技术

性能。

表20-2-16 岩棉的技术性能

指 标 名 称	数 值
体积密度 (kg/m <sup>3</sup> )	40~250
热导率 [W/(m·K)]	0.035~0.047
纤维直径 (μm)	4~10
纤维长度 (cm)	2~15
渣球含量 (%)	5~10
最高使用温度 (°C) 不高于	700

表20-2-17 岩棉制品的技术性能

指 标 名 称	岩 棉 板	岩 棉 毡	岩 棉 管
体积密度 (kg/m <sup>3</sup> )	100~200	80~150	100~200
热导率50°C时 [W/(m·K)]	0.055 ~0.067	0.055 ~0.06	0.06 ~0.067
纤维平均直径 (μm)	4~7	4~7	4~7
抗弯强度 (MPa) 不低于	0.25	—	3
最高使用温度 (°C) 不高于	350	350	350

### (三) 隔热材料的使用性能

从使用角度出发，隔热材料最重要的性能是热导率、耐压强度和最高使用温度。

对于一些高温隔热材料，如轻质耐火砖的最高使用温度是指将整块砖加热到某温度，保持2h，其重烧收缩率等于1%，或者温度升至某值，其体积开始加快收缩的温度就是该材料的最高使用温度。超过这个温度，隔热层遭到破坏，降低隔热效果。对于耐火纤维的最高使用温度，一般规定收缩率为4%时的温度。收缩率为2.5%时称为允许持续使用温度。对于一些中、低温隔热材料，如石棉的最高使用温度为它开始脱水的温度，有些材料则为粘结剂失去作用的温度。

机械工厂常用隔热材料的主要性能见表20-2-18。

表20-2-18 常用隔热材料的主要性能

材 料 名 称		体 积 密 度 (kg/m <sup>3</sup> )	热 导 率 (W/(m·K))	最 高 使 用 温 度 (°C)	
硅 藻 土 制 品	硅 藻 土 粉	生料	680	0.10 + 0.28 × 10 <sup>-3</sup> t ①	800
		熟料	600	0.083 + 0.21 × 10 <sup>-3</sup> t	900
	硅 藻 土 砖	A 级	550	0.072 + 0.21 × 10 <sup>-3</sup> t	900
		B 级	600	0.085 + 0.21 × 10 <sup>-3</sup> t	900
		C 级	700	0.1 + 0.23 × 10 <sup>-3</sup> t	900

(续)

材 料 名 称		体积密度 (kg/m <sup>3</sup> )	热 导 率 (W/(m·K))	最高使用温度 (°C)	
硅 藻 土 制 品	泡沫硅藻土砖	240~350	0.071	900	
	硅藻土石棉灰 (鸡毛灰)	450	0.07	900	
石 棉 制 品	石棉绒	340	$0.087 + 0.23 \times 10^{-3} t$	500	
	石棉灰	一级	600	0.081	500
		二级	680	0.093	500
	石棉绳	800	$0.073 + 0.31 \times 10^{-3} t$	400	
	石棉布	500~600	$0.13 + 0.26 \times 10^{-3} t$	400	
	石棉板	900~1000	$0.16 + 0.16 \times 10^{-3} t$	500	
	石棉水泥板	1700~2000	$0.07 + 0.16 \times 10^{-3} t$	450	
碳酸镁石棉制品	350~400	0.81~0.86	500		
矿 渣 棉 制 品	矿渣棉	一级	125	0.045	600
		二级	150	$0.04 + 0.16 \times 10^{-3} t$	600
三级		200	$0.046 + 0.16 \times 10^{-3} t$	600	
	水玻璃矿渣棉制品	400~450	0.07	750	
蛭 石 制 品	膨胀蛭石粉	一级	100	0.052~0.058	1000
		二级	200	0.052~0.058	1000
		三级	300	0.052~0.058	1000
	蛭石耐火混凝土	800~850	0.1~0.13	1000	
水玻璃蛭石制品	300~400	0.07~0.084	900		
水泥蛭石制品	450~500	0.1~0.14	600		
珍 珠 岩 制 品	膨胀珍珠岩	一级	65	0.019~0.029	800
		二级	66~160	0.029~0.038	800
		三级	161~300	0.046~0.061	800
	磷酸盐珍珠岩制品	200~250	0.044~0.052	800	
水玻璃珍珠岩制品	200~300	0.059~0.065	650		
水泥珍珠岩制品	300~400	0.058~0.087	600		
岩 棉 制 品	岩棉	40~250	0.035~0.047	700	
	岩棉板	100~200	0.055~0.067	350	
	岩棉毡	80~150	0.055~0.06	350	
	岩棉管	100~200	0.06~0.067	350	
微孔硅酸钙制品		200~250	$0.041 + 0.21 \times 10^{-3} t$	650	
玻 璃 棉 制 品	玻璃棉	100~150	0.052~0.058	450	
	无碱超细玻璃棉	40~60	0.029~0.035	600	
	酚醛超细玻璃棉毡	20	0.035	400	
	酚醛超细玻璃棉管	60	0.035	300	
	酚醛超细玻璃棉板	60	0.035	300	

① t 表示实际温度。

(四) 隔热材料的选用

选用隔热材料时, 可参考表20-2-19。

表20-2-19 隔热材料的选用

名称	接触面最高温度(°C)	选用隔热材料
低温隔热材料	<600	石棉、矿渣棉、玻璃棉、泡沫石棉制品
中温隔热材料	600~900	硅藻土、膨胀蛭石、膨胀珍珠岩、微孔硅酸钙、超轻质耐火砖
高温隔热材料	>900	膨胀蛭石、各种轻质耐火砖、耐火纤维、氧化铝空心球制品

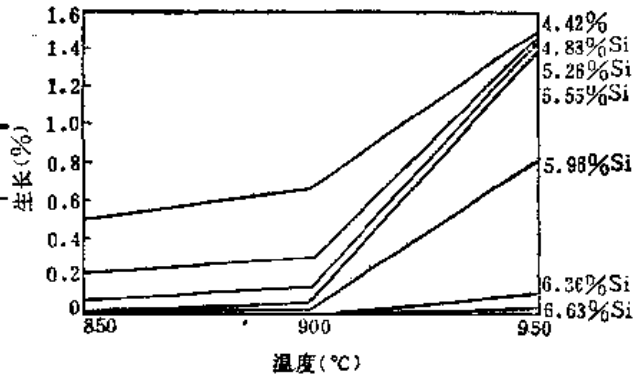


图20-3-2 硅系耐热球墨铸铁在不同温度下加热 150 h 后的生长率

第3节 耐热铸铁

耐热铸铁是在高温条件下具有抗氧化、抗生长的性能, 且能保持较高强度的一种特殊铸铁。

(一) 对耐热铸铁的要求

对耐热铸铁的主要要求是具有良好的抗氧化性和抗生长性。

1) 抗氧化性: 所谓抗氧化性, 就是耐热铸铁在高温工作时抵抗周围气氛对它腐蚀的性能。一般来说, 耐热铸铁在规定的温度下, 150 h 氧化平均速度不超过  $0.5 \text{ g}(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。图20-3-1 表示硅系

表20-3-1 铸铁的耐热性等级

耐热性等级	耐热性	氧化增重 (加热 150 h 后) ( $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ )	生长 (加热 150 h 后) (%)
1	完全耐热	$\leq 0.1$	$\leq 0.05$
2	耐热	0.1~1.0	0.05~0.15
3	次耐热	1.0~3.0	0.15~0.5
4	弱耐热	3.0~10.0	0.5~1.5
5	不耐热	$> 10.0$	$> 1.5$

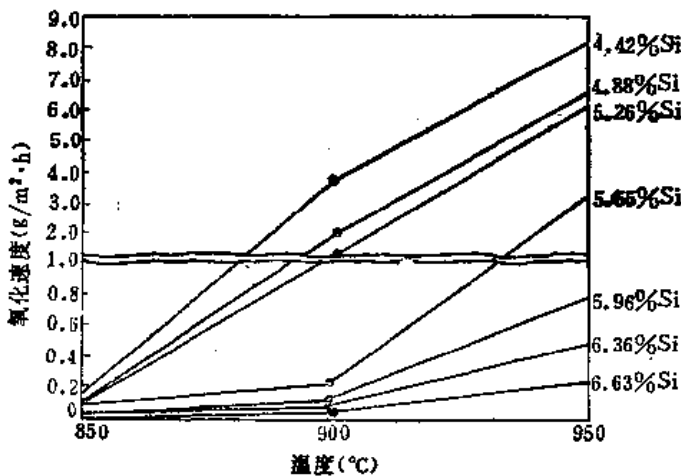


图20-3-1 硅系耐热球墨铸铁在不同温度下加热 150 h 后的平均氧化速度

耐热球墨铸铁在不同温度下加热 150 h 后的平均氧化速度。

2) 抗生长性: 所谓抗生长性, 就是耐热铸铁在高温工作时抵抗体积不可逆长大的性能。一般来说, 耐热铸铁在规定的温度下, 150 h 抵抗生长的能力应不超过 0.2%。图20-3-2 表示硅系耐热球墨铸铁在不同温度下加热 150 h 后的生长率。

根据耐热性的高低, 可将铸铁分为 5 个等级, 见表20-3-1。

生产实践表明, 基体组织对耐热性能有一定的影响, 如表20-3-2 所示。

耐热铸铁的力学性能见表20-3-

3。

表20-3-2 基体组织对耐热性能的影响

基 体 组 织	耐 热 性 能		说 明
	抗氧化性	抗生长性	
片 状 石 墨	劣	劣	分割基体, 氧沿片状石墨深入铸铁内部 比片状石墨优越 不存在由于渗碳体分解而使铸铁生长问题 渗碳体分解使铸铁生长 渗碳体细而稳定, 不易分解 与铁素体同 它比Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 膜更致密、结实
球 状 石 墨	优	优	
铁 素 体	—	优	
珠 光 体	—	劣	
索 氏 体	—	中	
奥 氏 体	—	优	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、SiO <sub>2</sub> 、Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 保 护 膜	优	—	

表20-3-3 耐热铸铁的力学性能

牌 号	主要化学成分 (%)	不同温度下的力学性能							
			室温	500℃	600℃	700℃	800℃	900℃	1000℃
中硅耐热铸铁	Si 5.83	$\sigma_b$ $\delta$	3.1 —	2.1 —	2.92 —	0.62 —	0.38 8.62	0.19 5.64	— —
中硅球墨铸铁	Si 6.40	$\sigma_b$ $\delta$	2.8 —	5.6 —	6.02 —	4.82 —	0.60 7.15	0.19 20.94	0.10 39.9
中硅球墨铸铁	Si 5.72	$\sigma_b$ $\delta$	6.72 0.5	— —	— —	— —	0.65 2.8	0.26 41.0	— —
高铝铸铁	Al 20.8	$\sigma_b$ $\delta$	1.12 —	1.23 —	— —	0.95 1.6	0.54 1.8	— —	— —
高铝球墨铸铁	Al 19.9	$\sigma_b$ $\delta$	3.24 —	2.35 —	— —	1.85 —	1.42 2.4	— —	— —
铝硅球墨铸铁	Al+Si 9.32 其中Al 4.90	$\sigma_b$ $\delta$	2.75 —	3.15 0.5	— —	1.85 3.5	1.20 6.5	0.43 10.5	0.18 17.0
低铬铸铁	Cr 0.72	$\sigma_b$ $\delta$	2.95 —	3.070 —	2.55 —	1.470 —	0.580 4.24	0.360 4.44	— —

注:  $\sigma_b$ ——抗拉强度 (MPa);  $\delta$ ——伸长率 (%)。

## (二) 耐热铸铁的分类

在普通铸铁中加入Si、Al、Cr等合金元件, 可以改变铸铁的组织, 提高铸铁的耐热性能。因此, 耐热铸铁一般分为硅系耐热铸铁、铝系耐热铸铁、铝硅系耐热铸铁和铬系耐热铸铁等, 见表20-3

-4所列。

耐热铸铁由于硅、铝等元素含量高, 因此, 铸造时流动性稍差、线收缩较大、脆性转变温度较高, 铸件常易出现裂纹。故在造型和落砂清理过程中有一定的特殊性, 与普通铸铁有所不同。耐热铸铁件的铸造缺陷有冷裂、气孔、石墨偏析和缩孔等。

表20-3-4 耐热铸铁的分类和使用范围

种 类	牌 号	主要化学成分 (%)	使用温度 (°C)	使 用 范 围
硅系耐热铸铁	中硅耐热铸铁 RTSi-5.5	Si 5.0~6.0	600~750	用于空气及炉气介质, 介质有水蒸气时, 使用寿命降低。强度低、脆性大、易碎裂

种 类	牌 号	主要化学成分 (%)	使用温度 (°C)	使 用 范 围
硅系耐热铸铁	中硅球墨铸铁	Si 3.5~4.5	600~750	用于空气及炉气介质, 介质有水蒸气时, 使用寿命降低。含 Si < 4.5% 时, 能承受一定的动载荷和温度急变, 加工性良好, 裂碎倾向较小。硅量提高, 耐热性提高, 其它性能均下降。当 Si < 5.5% 时, 裂碎倾向显著增加
	中硅球墨铸铁	Si 4.5~5.5	750~900	
	中硅球墨铸铁	Si 5.0~6.0	900~950	
	RQTSi-5.5	Si 5.0~6.0	900~950	
	中硅球墨铸铁	Si 6.0~6.5	950~1000	
铝系耐热铸铁	中铝铸铁	Al 5.5~7.0	<700	用于空气及炉气介质, 介质有水蒸气时, 其耐热性优于硅系耐热铸铁。有良好的抗硫化性能, 耐温度急变性较差
	高铝铸铁	Al 20~24	850~900	
	高铝球墨铸铁	Al 21~24	1000~1100	
铝硅系耐热铸铁	铝硅球墨铸铁	Al+Si 8.5~10.0 其中 Al 4.0~5.0	950~1050	有一定的被切削性和耐温度急变性, 其余同上
铬系耐热铸铁	低铬耐热铸铁 RTC <sub>Cr</sub> -0.8	Cr 0.5~1.1	<600	用于空气及炉气介质, 能承受一定的动载荷, 耐温度急变性较好, 加工性良好
	低铬耐热铸铁 RTC <sub>Cr</sub> -1.5	Cr 1.2~1.9	<650	
	高铬铸铁 高铬铸铁	Cr 26~30 Cr 32~36	1000~1100 1100~1200	用于空气及炉气介质, 介质有水蒸气时, 其耐热性优于硅系耐热铸铁。有优良的抗硫化性能, 不宜用于温度急变场合

### (三) 耐热铸铁的使用

耐热铸铁一般用来制造工业炉的闸板、炉条、喷嘴、底板和换热器等。选用耐热铸铁时可参考表 20-3-5。

#### 1. 硅系耐热铸铁

中硅铸铁脆性大, 在零下温度则更大, 因此, 只能用于温度变化小、不受冲击的低载荷构件。

中硅球墨铸铁的导热性低, 热应力敏感性强, 脆性较大。在设计构件时, 壁厚和截面应力求均匀, 两平面相交处需用较大的圆角, 铸件尺寸也不宜过大。中硅球墨铸铁构件的工作条件是均匀受热、升温降温的速度要慢, 若局部受热或突然急冷都将导致破裂。在加工、运输、安装及使用过程中, 应避免撞击。

#### 2. 铝系耐热铸铁

高铝铸铁较为硬脆, 力学性能较低, 难于切削加工。由于它的线收缩大, 内应力形成倾向大, 构件的设计要点与中硅球墨铸铁相似。

高铝球墨铸铁和高铝铸铁一样, 其耐温度急变性较差, 不宜用于温度急变的场合, 使用时升温 and 降温应缓慢。

#### 3. 铝硅系耐热铸铁

铝硅球墨铸铁不但有较好的耐热性, 还具有一定的力学性能、被切削性和耐温度急变性, 其使用特点可参照中硅球墨铸铁。

#### 4. 铬系耐热铸铁

低铬铸铁的抗氧化、抗生长性能随铬含量的增加而改善。

高铬铸铁的耐热、耐腐蚀性好, 力学性能也较



表20-3-5 耐热铸铁的选用

最高使用温度 (°C)	铸 铁 名 称	用 途 举 例
600	低铬铸铁 RTCr-0.8	托架、炉排、风帽、闸板和炉条等
650	低铬铸铁 RTCr-1.5	喷嘴、炉条和耙齿等
600~750	中硅球墨铸铁 (Si3.5%~4.5%)	砖架、管板和火格子等
750~900	中硅球墨铸铁 (Si4.5%~5.5%)	管板、挡板、垫块、喷嘴和梳形板等
900~950	中硅球墨铸铁 (Si5.0%~6.0%) 高铝铸铁 (Al20%~24%) 铝硅球墨铸铁 (Al+Si8.0%~9.0%)	底板、坩埚和换热器等
950~1050	高铝球墨铸铁 (Al 21%~24%) 铝硅球墨铸铁 (Al+Si8.5%~10.0%)等	底板、渗碳罐、坩埚和换热器等
1000~1100	高铝球墨铸铁 (Al 21%~24%) 高铬铸铁 (Cr26%~30%)	底板和传送链构件等
1100~1200	高铬铸铁 (Cr32%~36%)	底板和传送链构件等

高,但由于成本高,而使应用受到一定的限制。高铬铸铁件的结构应避免尖角,断面不要急剧过渡,也不宜用于温度急变的地方。

#### 第4节 耐 热 钢

耐热钢是在高温下不易氧化,并具有一定高温力学强度的特殊钢种。它主要用作工业炉的炉罐、底板、坩埚等构件。

##### (一) 对耐热钢的要求

对耐热钢的要求是:

- 1) 在工作温度下具有良好的耐蚀性,不致因为炉内介质的腐蚀而过早地损坏。
- 2) 高温下塑性变形小,抗蠕变强度大,具有足够的高温强度。
- 3) 在冷热急变或振动负荷的情况下,应有较高的抗热疲劳性。
- 4) 较好的工艺性,尤其是切削加工性和焊接性要好。

##### (二) 耐热钢的分类

耐热钢基本上可以分为抗氧化钢和热强钢两大

类:

1) 抗氧化钢:抗氧化钢,即在高温下能抵抗炉气的侵蚀,组织稳定性好,且不易起皮的钢,也称不起皮钢。

2) 热强钢:热强钢,即在高温下不易氧化,且具有较高的蠕变强度和持久强度,能承受较大应力的钢。

耐热钢还可根据热处理后的组织分为马氏体钢、铁素体钢和奥氏体钢等。

1) 马氏体钢:指含铬5%~9%的中铬钢和含铬13%的高铬钢,有较好的抗氧化性,较大的淬硬倾向,焊接性差。

2) 铁素体钢:为了提高抗氧化性而加入相当数量的铬、铝、硅等铁素体元素,使钢具有单相铁素体组织。这类钢具有很好的抗氧化性,但焊接性差,并有脆性倾向。

3) 奥氏体钢:奥氏体钢含有较高的镍、锰、氮等奥氏体形成元素,高温下有较好的热强性和组织稳定性,无磁性

耐热钢的分类和使用范围见表20-4-1。

常用耐热钢的化学成分、室温力学性能以及高温力学性能分别见表20-4-3和表20-4-4。

表20-4-1 耐热钢的分类和使用范围

组织	钢种	钢号	使用温度 (°C)	使用范围		
马氏体		4Cr9Si2	800	不起皮钢, 可用作小负荷的炉用构件		
		1Cr13	700	不起皮钢, 一般用作引出棒		
铁素体	铬钢	1Cr17	900	不起皮钢, 可用作无负荷和不渗碳的炉用构件		
		1Cr25Ti	1100	不起皮钢, 抗硫腐蚀性好, 可用作不受重负荷的炉用构件		
		3Cr25Si3Ni 1Cr28	1100 1150			
奥氏体	铬镍钢	1Cr18Ni9Ti	900	不起皮钢和热强钢, 有良好的抗腐蚀性, 用作负荷构件达 800°C; 无负荷时用至 900°C		
		1Cr14Ni14Mo2Wb	850	不起皮钢和热强钢, 抗晶间腐蚀性能良好, 可用作负荷构件		
		1Cr23Ni13	1000	不起皮钢和热强钢, 用作负荷构件		
		1Cr23Ni18	1050	不起皮钢和热强钢, 受中等负荷时用于 850°C; 不受负荷或很小负荷时用至 900~1050°C		
		3Cr30Ni11N	1100	不起皮钢和热强钢, 用作负荷构件		
		3Cr18Ni25Si2	1100	不起皮钢和热强钢, 对含硫气氛较敏感, 用作负荷构件		
		1Cr25Ni20Si2	1200	不起皮钢和热强钢, 用作负荷构件		
		1Cr20Ni35	1200	不起皮钢和热强钢, 有较高的热强性能和综合性能, 用作高温炉用负荷构件		
		铬镍氮钢		4Cr22Ni4N	1000	不起皮钢和热强钢, 用作负荷构件
				3Cr24Ni7SiNRo	1050	
铬锰氮钢		45Cr20Ni5Mn5WMoN	900	不起皮钢和热强钢, 有较高的抗硫腐蚀性和抗渗碳性, 可用作各种炉用构件		
		3Cr18Mn12Si2N	950			
		3Cr22Mn4Ni4Si2N	1000			
		2Cr20Mn9Ni2Si2N	1050			
铁铝锰钢		6Mn18Al5Si2Ti	950	不起皮钢和热强钢, 可用作小负荷或中等负荷的炉用构件		
		6Mn28Al7TiRo	1050			
		6Mn28Al9TiRo	1050			

表20-4-2 常用耐热钢的化学成分

钢号	C	Si	Mn	P		S	Cr	Ni	Ti	其他
				P	S					
4Cr9Si2	0.35~0.50	2.0~3.0	<0.7	0.035	0.03	0.03	8.0~10.0	<0.60	—	—
1Cr13	0.08~0.15	<0.8	<0.8	0.035	0.03	0.03	12.0~14.0	<0.60	—	—
1Cr17	<0.12	<0.8	<0.8	0.035	0.03	0.03	16.0~18.0	—	—	—
1Cr25Ti	<0.12	<1.0	<0.8	0.030	0.03	0.03	24.0~27.0	—	5(C-0.02)~0.8	—
3Cr25Si3N4	<0.35	2.5~3.5	<0.7	0.035	0.03	0.03	23.0~27.0	0.7~1.3	—	—
1Cr28	<0.15	<1.0	<0.8	0.035	0.03	0.03	27.0~30.0	—	<0.20	—
1Cr18Ni9Ti	<0.12	<1.0	<2.0	0.035	0.03	0.03	17.0~19.0	8.0~11.0	5(C-0.02)~0.8	Mo1.7~2.0 W1.25~1.65 Nb(8~10)×C~<1.2
1Cr14Ni14Mo2W Nb	0.09~0.15	<0.55	0.5~1.0	0.025	0.02	0.02	13.0~15.0	13.0~15.0	—	—
1Cr23Ni13	<0.20	<1.0	<2.0	0.035	0.03	0.03	22.0~25.0	12.0~15.0	—	—
1Cr23Ni18	<0.20	<1.0	<2.0	0.035	0.03	0.03	22.0~25.0	17.0~20.0	—	—
3Cr30Ni11N	0.30~0.40	<0.85	<0.6	0.035	0.035	0.035	29.0~32.0	9.0~13.0	—	—
3Cr18Ni25Si2	0.30~0.40	1.5~2.5	<1.5	0.035	0.03	0.03	17.0~20.0	23.0~26.0	—	—
1Cr25Ni20Si2	<0.20	1.5~2.5	<1.5	0.035	0.03	0.03	24.0~27.0	18.0~21.0	—	—
1Cr20Ni35	<0.15	1.0~2.0	0.5~1.0	0.035	0.03	0.03	15.0~20.0	30.0~35.0	—	—
4Cr22Ni4N	0.35~0.45	1.2~2.0	<1.0	0.035	0.03	0.03	21.0~24.0	3.5~5.0	—	—
3Cr24Ni7SiNR <sub>a</sub>	0.27~0.37	1.3~2.0	<1.0	0.035	0.03	0.03	23.0~26.0	7.0~8.7	—	—
45Cr20Ni15Mo5WMoN	0.40~0.50	1.2~2.0	4.5~5.5	0.035	0.035	0.035	19.0~21.5	4.5~5.5	—	—
3Cr18Ni12Si2N	0.22~0.30	1.4~2.2	10.5~12.5	0.060	0.03	0.03	17.0~19.0	—	—	—
3Cr22Mn4Ni4Si2N	0.30~0.40	1.5~2.0	3.5~5.5	0.045	0.03	0.03	20.0~23.0	3.5~5.5	—	—
2Cr20Mn9Ni2Si2N	0.17~0.26	1.8~2.7	8.5~11.0	0.060	0.03	0.03	18.0~21.0	2.0~3.0	—	—
6Mn18Al5Si2Ti	0.6~0.7	1.8~2.5	18.0~20.0	0.060	0.03	0.03	—	—	0.15~0.35	—
6Mn28Al7TiRe	0.55~0.75	0.8~1.5	27.5~30.0	0.12	0.04	0.04	—	—	0.1	—
6Mn28Al9TiRe	0.55~0.75	0.8~1.5	27.5~30.0	0.12	0.04	0.04	—	—	0.1	—

表20-4-3 常用耐热钢的室温机械性能

钢号	热 处 理	抗拉强度 $\sigma_b$ (MPa)	屈服点 $\sigma_s$ (MPa)	伸 长 率 $\delta_5$ (%)	断面收缩率 $\psi$ (%)	冲击韧度 $\alpha_{kv}$ (J/cm <sup>2</sup> )
4Cr9Si2	1020~1040℃淬火、油冷；700~780℃回火，油冷	900	600	19	50	—
1Cr13	1000~1050℃淬火，油或水冷；700~790℃回火，油、水或空冷	600	420	20	60	90
1Cr17	750~800℃回火，空冷	400	250	20	50	—
1Cr25Ti	700~800℃回火，空冷	450	300	20	45	—
1Cr18Ni9Ti	1000~1100℃淬火，水冷	550	200	40	55	—
1Cr14Ni14Mo2W Nb	1180℃固溶，800℃时效，750℃时效	400	200	18	35	40
1Cr23Ni13	1100~1150℃淬火，油、水或空冷	550	250	35	50	—
1Cr23Ni18	1100~1150℃淬火，油、水或空冷	550	250	35	50	—
3Cr18Ni25Si2	1100~1150℃淬火，油、水或空冷	650	350	25	40	—
1Cr25Ni20Si2	1100~1150℃淬火，油、水或空冷	600	300	35	50	—
4Cr22Ni4N	1150℃淬火，水冷	1000	—	10	19	40
3Cr18Mn12Si2N	1100~1150℃淬火，油、水或空冷	70	40	35	45	—
2Cr20Mn9Ni2Si2N	1100~1150℃淬火，油、水或空冷	65	40	35	45	—
6Mn28A19TiRe	铸态	45	—	—	—	4

### (三) 耐热钢的使用性能

耐热钢不仅有一定的常温力学性能，而且还应具备特殊的高温使用性能，如高温耐蚀性、高温强度、抗热疲劳性以及加工工艺性等。

#### 1. 高温耐热性

耐热钢的高温耐热性，主要是指高温下的抗氧化性、抗增碳性、抗硫蚀性以及抗氮化性。其中以抗氧化性为最重要，因为抗氧化性高的耐热钢，一般来说，抵抗其它气体腐蚀的性能也较好。

当往钢内加入一定数量的铬、铝、硅等元素时，由于这些元素对氧的亲合力较铁为大，高温时在钢的表面生成致密的高熔点氧化膜，不分解，不龟裂，严密地覆盖住金属表面，使通过氧化膜的扩散不易进行，从而保护钢免于继续氧化。如钢中含有15%Cr时，其抗氧化温度可达900℃；若含20%~25%Cr，则抗氧化温度可达1100℃。

高温时耐热钢的抗氧化性取决于钢的化学成分、在钢表面形成氧化膜的稳定性以及所在介质的成分。金相组织对抗氧化性的影响不甚明显。生成稳定氧化膜的元素有Cr、Al、Si、Ni及其它稀土元素，相应的氧化物为Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub>、NiO<sub>2</sub>等。另外，TiO<sub>2</sub>、CeO<sub>2</sub>、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等还能组成更稳定

的复合氧化物，大大提高耐蚀效能。

抗氧化性可用增重法或减重法来衡量，以g/(m<sup>2</sup>·h)为单位。各种耐热钢在高温下的氧化损失重量极限为1g/(m<sup>2</sup>·h)。常用耐热钢的抗氧化性见表20-4-4。

表20-4-4 常用耐热钢的抗氧化性

钢号	氧化增重(失重)速度(g/(cm <sup>2</sup> ·h))			
	800℃	900℃	1000℃	1100℃
1Cr13	(0.45)	(2.0)	(4.2)	—
1Cr17	(0.2)	(0.4)	(2.0)	—
1Cr25Ti	—	—	(0.85)	—
1Cr28	—	(0.12)	(0.2)	(1.15)
1Cr23Ni18	—	(0.28)	(0.48)	(1.65)
3Cr18Ni25Si2	—	0.1	0.2	0.65
1Cr25Ni20Si2	—	0.15	—	0.38 —0.56
4Cr22Ni4N	—	0.15	0.25	—
3Cr24Ni7SiN	—	—	0.25	—
3Cr24Ni7NRE	—	—	—	—
3Cr18Mn12Si2N	—	0.033 —0.055	0.78	—

注：带括号为失重速度。

#### 2. 高温强度

耐热钢在高温下所表现的力学性能与室温下是

大不相同的。许多在高温下工作的构件，如料盘、底板和传送带等承受相当大的负荷，它们的损坏是由于严重的变形和开裂所引起。因此，耐热钢必须在高温下具有足够的力学强度。耐热钢构件不变形、不开裂的特性，一般可根据蠕变极限和持久强度来衡量。

(1) 蠕变极限 耐热钢构件在高温工作中受到各种应力的作用，虽然这些应力的作用大小还不至于立即使其发生明显的变形和断裂，但长期受这些应力作用的结果，耐热钢构件就会缓慢地、连续地发生变形，这种现象称为“蠕变”。蠕变极限系在一定的温度下，引起一定变形速度所需的应力。在大多数情况下，工业炉构件的蠕变极限在10000 h为1%。

(2) 持久强度 耐热钢构件在高温下受应力作用，但并不立即断裂，而是在持续了较长或很长时间后断裂，这种性能反映了耐热钢在高温下抵抗应力的耐久性。持久强度系在一定温度下，经过一定的时间而引起断裂的应力。

常用耐热钢的高温力学性能见表20-4-5。

### 3. 抗热疲劳性

有些耐热钢构件在工作中要受到周期性的升温 and 冷却的影响，如料盘要随工件一起在空气、油或水中冷却，更容易发生疲劳损坏。所以，对受到周期性升温 and 冷却影响的耐热钢构件，要求具有高的抗热疲劳性。

所谓“疲劳”，是指零件在交变载荷作用下引起的疲劳失效。零件“热疲劳”时的应力主要是由于热胀和冷缩受阻引起的。正确的零件设计将会使零件的实际热胀和冷缩的受阻应力减至最小程度。当然，快速加热和快速冷却都会使零件内部产生较大的温度梯度，零件内温度低的部分将会阻碍温度高的部分膨胀。有限元分析计算表明，有些工业炉用的零件内因温度变化所产生的热应力可能超过机械加载所造成的应力。

抗热疲劳性好的材料，其热导率与抗拉强度大，而热膨胀系数与弹性系数小。特别是材料在一定温度下的伸长率，此值越高，抗热疲劳性越好。实践证明，以镍为主的和有些HH型耐热钢具有优良的抗热疲劳性。往钢中加入 Nb、Ti 等元素，可以防止碳化物时效析出，从而提高伸长率，改善其抗热疲劳性。

抗热疲劳性的好坏，一般是用材料在承受冷热交变循环时产生裂纹的迟早及扩展的快慢来衡量

的。

表20-4-5 常用耐热钢的高温力学性能

钢号	试验温度 (°C)	持久强度 (MPa)		蠕变强度 (MPa)	
		$\sigma_{10^4}$	$\sigma_{10^5}$	$\sigma_{1/10^4}$	$\sigma_{1/10^5}$
1Cr25Ti	650	20	14		
	980	1.6	1		
2G1Cr14Ni14Mo2W Nb	600	180	150		100 ~140
	650	115			90
1Cr23Ni18	700		35		24~28
	800		13		6~7
ZG3Cr18Ni25Si2	900	18.6	16.7	32.5	
	1000	8.2	6.3	14.9	
	1100	3.1	1.3	6.9	
ZG4Cr25Ni20Si2	900	22.1	13.8	35	
	1000	11.8	6.1	14.7	
	1100	4.7	2.8	4.1	
ZG4Cr22Ni14N	900	8~12			
ZG3Cr24Ni7N	900	28			
ZG3Cr18Mn12Si2N	900	16~17.5			
ZG2Cr20Mn9Ni2Si2N	900	10~11			

### 4. 加工工艺性

耐热钢构件的种类和规格很多，需用各种不同工艺方法制造，所以耐热钢的加工工艺性是极为重要的。

钢的冶炼工艺要求在一般生产条件下已能够掌握，达到成分准确和夹杂物少，同时可以利用浇冒口、废品和旧料返回重新冶炼。铸造性能方面要求钢的流动性好，热裂敏感性小，这对制造薄壁和形状复杂的铸件尤为重要。有的构件是锻件和轧件，有的是冲压件，经常需要焊接和切割，不同构件还要进行不同的切削加工。因此，随着构件用途的不同，对耐热钢的可锻性、冲压性、焊接性以及切削加工性都提出了一定的要求。总之，炉用耐热钢应具有良好的综合工艺性（表20-4-6）。

常用耐热钢的性能比较见表20-4-7。

主要炉用构件对耐热钢的性能要求见表20-4-8。

表20-4-6 常用耐热钢的加工工艺性

钢 号	铸造	压力加工		焊 接		切削加工
		热 锻	冷 冲	气 焊	电 焊	
1Cr13	较好	好	较好	较好	较好	较好
1Cr17	较好	较好	较好	较好	较好	较好
1Cr25Ti, 1Cr28	不好	尚可	尚可	尚可	尚可	较好
4Cr9Si2	好	好	好	不好	较好	好
1Cr18Ni9Ti, 1Cr23Ni18, 3Cr18Ni25Si2, 1Cr25Ni20Si2	较好	较好	较好	较好	较好	尚可
1Cr20Ni35	较好	—	—	较好	尚可	不好
CrNiN	较好	—	—	尚可	尚可	尚可
CrMnN	较好	尚可	较好	较好	较好	尚可

表20-4-7 常用耐热钢的性能比较

性能名称	3Cr18Mn12 -Si2N	3Cr24Ni17 -SiNRE	3Cr30Ni11 -N	3Cr22M4Ni14 -Si2N	45Cr20Ni5 -Mn5WMoN	4Cr25Ni20	3Cr15Ni35	35Cr18Ni25 -Si2
抗 氧 化	≤900°C	良	优	优	良	优	良	优
	≤950°C	良	优	优	差	优	良	优
	≤1000°C	差	优	优	差	优	可	优
	≤1100°C	差	良	良	可	差	良	差
	≤1200°C	差	可	可	差	差	可	差
	总评	D	A	A	B	D	A	C
高 温 强 度	≤800°C	A	B	C	B	A	B	B
	900°C	B	B	C	B	A	A	C
	950~ 1000°C	B	B	B	B	B	A	D
	总评	A	B	B	B	A	A	C
抗渗碳	C	C	D	C	C	A	B	A
抗渗氮	B	A	D	A	B	C	D	C
组织性能稳定性	C	D	B	B	A	C	A	B
抗热疲劳	A	C	D	B	C	C	C	B
切削性能	D	D	B	C	C	A	A	B

注：A、B、C、D为性能的排队次序。

表20-4-8 主要炉用构件对钢种的性能要求

构件名称	性 能 要 求			构件名称	性 能 要 求		
	1	2	3		1	2	3
渗碳炉罐	抗氧化	高温强度	抗渗碳	箱式炉底板	抗氧化	高温强度	抗热疲劳
渗碳淬火料盘	抗渗碳	抗热疲劳	高温强度	退火炉台车盖板	高温强度	抗氧化	组织稳定性
渗碳夹具	抗渗碳	组织稳定性	抗热疲劳	传递带链节	高温强度	抗氧化	组织稳定性
渗碳炉装料筐	抗渗碳	抗渗氮	高温强度	正火料盘	高温强度	抗氧化	抗热疲劳
辐射管	抗氧化腐蚀	抗渗碳	可焊性	风扇叶	高温强度	切削加工	抗渗碳
震底板	中温强度	切削加工	抗热疲劳	风扇轴	高温强度	切削加工	抗渗碳

#### (四) 耐热钢的选用和代用

##### 1. 耐热钢的选用

选用炉用耐热钢时，应根据工业炉的实际工作条件，全面分析，综合考虑。由于镍铬是我国稀有元素，因此，希望尽量采用无镍铬或少镍铬的耐热钢。选用耐热钢时必须注意下列事项：

(1) 工作温度 包括最高工作温度；温度波动范围；温度变化的频率和速率以及零件中的温差范围。

(2) 承受负荷 包括外加载荷；加载、支承和外部约束方式；有无冲击振动；应力分布状况以及特殊受力情况。

(3) 介质侵蚀 是否接触盐浴或炉渣；是氧化气氛还是还原气氛；有无硫化物以及其它化合物的腐蚀作用等。

(4) 零件和构件的要求 包括零件的热处理工艺和容许的变形量；构件的结构形式、使用寿命

以及其它使用要求，可以选用铸件、轧件或锻件耐热钢。

选用耐热钢时可参考表20-4-9。国内外耐热钢钢号对照表列于表20-4-10。

##### 2. 耐热钢的代用

镍铬元素比较稀缺，节约代用镍铬的主要途径是：

(1) 用铝、硅来代替铬 铝对提高钢的抗氧化性比铬还大，能形成非常致密的氧化膜。硅也具有同样性能。因而在钢中加入适量的铝、硅来代替部分铬或全部铬，同样可以获得良好的抗氧化性，甚至还可以用到1000℃以上。但铝和硅都是形成铁素体的元素，高温时产生相变，从而降低钢的高温强度和抗热疲劳性。

目前，往钢中加入稀土元素，如Ce、Y等，这不仅形成更稳定的复合氧化膜，显著提高其抗氧化性，而且可以改善钢的高温性能和热加工性能。

(2) 用锰、氮来代替镍 锰和氮能在钢中扩

表20-4-9 耐热钢构件的选用

构件名称	工作条件					选 用 耐 热 钢	
	温度 (°C)	介质 侵蚀	承受 负荷	冲击 振动	冷热 变化	钢 号	材料状态
渗碳炉罐	950	严	中	中	中	Cr18Ni25Si2, Cr25Ni20Si2, CrMnN	铸件
裂化管	950	严	不	不	中	Cr18Ni25Si2, Cr25Ni20Si2, CrNiN	轧件、铸件
辐射管	950	严	不	中	中	Cr20Ni35, Cr25Ni20Si2, Ni11N	轧件
滚筒、转鼓	940	中	严	严	中	Cr18Ni25Si2, CrMnN	铸件
导轨、钢枕、导板	860	中	严	中	不	Cr23Ni18, Cr23Ni13, CrMnN	铸件、轧件
辊道	1100	不	中	严	中	Cr25Ni20Si2, CrNiN	轧件
底板、垫板	850	中	严	严	中	Cr9Si2, Cr23Ni13, CrMnN, FeAlMn	铸件
底座、炉脚	950	中	严	中	不	Cr23Ni18, CrMnN, FeAlMn	铸件
托架	940	不	中	中	严	Cr25Si3Ni, CrNiN, CrMnNNi	铸件
链环	940	不	严	中	中	Cr20Ni35, Cr18Ni25Si2	铸件
链板、销子	850	中	严	中	中	Cr23Ni18, CrMnN	铸件、轧件、锻件
网状链条	940	严	严	中	严	Cr25Ni20Si2, Cr23Ni18, CrMnN	轧件
风扇和轴	950	中	不	严	不	Cr18Ni25Si2, 1Cr18Ni9Ti	铸件、轧件
有色金属熔化用坩埚	1050	严	严	中	严	Cr18Ni25Si2, CrMnN	铸件
盐浴炉用电极	1300	严	不	中	中	Cr13, Cr23Ni13, 1Cr18Ni9Ti	铸件、锻件、轧件
淬火料盘、滑块	950	中	严	严	严	Cr23Ni18, CrMnN, FeAlMn, Ni7N	铸件
不淬火料盘、滑块、料筐	950	中	严	严	中	CrMnN, AlMnSi, FeAlMn	铸件
护架	650	不	中	不	不	CrMnN, Cr9Si2	铸件
退火炉台车盖板	960	不	严	中	中	CrMnN, CrMnNNi	铸件
震底板	860	中	中	严	中	Cr18Ni9Ti, CrMnNNi	铸件
渗碳夹具	950	严	严	中	严	Ni11N, CrMnNNi	铸件

注：不——不致损坏；中——中等损坏；严——严重损坏。

表20-4-10 耐热钢钢号与国外对照表

钢 号	标准号	国 外 钢 号 对 照				
		美国 AISI	英国 BS	前 苏 联 ГОСТ	日本 JIS	德国 DIN
4Cr9Si2	GB1221-84			4X9C2(9CX8)	SEH1	X45CrSi9 3
1Cr13	GB1221-84	403	En56A	1X13(ЭЖ1)	SUS21	X10Cr13
1Cr17	GB1221-84	430	En60	X17(ЭЖ17)	SUS24	X8Cr17
1Cr25Ti	GB1221-75	446		X25T(ЭЖ439)		X8Cr28
1Cr18Ni9Ti	GB1221-84	321	En58B	1X18H9T	SUS29	X10CrNiTi18 9
4Cr14Ni14W2Mo	GB1221-84		En54	4X14H14B2M(ЭЖ69)	SEH4	
1Cr23Ni13	GB1221-84	309		X23H13	SUS41	X12CrNi22 12
1Cr23Ni18	GB1221-75	310S		X23H18	SUS42	X12CrNi25 21
1Cr25Ni20Si2	GB1221-75	310		X25H20C2	SEH5	X15CrNi25 20
3Cr18Ni25Si2	GB1221-75			X18H25C2(Ж3C)	SCH19	

大稳定奥氏体区域，而氮对奥氏体的稳定作用比镍还大。在复杂的奥氏体钢中，氮还可形成各种氮化物而析出，产生沉淀硬化作用，进而提高钢的高温强度。所以在奥氏体钢中加入适量的锰和氮，可获得节约镍或不用镍的良好效果。但锰能破坏抗氧化性，加氮冶炼工艺则较难掌握，而且浇注时容易产生“胃胀”现象。

目前，往钢中添加Nb、Mo、W、Co等元素，用以改善钢的高温性能。

(3) 改进炉子和构件的结构 将有罐气体渗碳炉改成无罐气体渗碳炉，就取消了耐热钢炉罐。这不仅可以节约镍铬，而且提高了渗碳质量和炉子的生产率。将外热式盐浴炉改成内热式后，就可取消耐热钢坩埚。弹簧淬火炉原用链环结构，改成托架(图20-4-1)后，由于改变了受力和受热情况，其下部埋设在砖槽内，并通水冷却，因此，使用一般耐热钢(Cr25Si3Ni)就可满足生产需要。采用代用钢种后，一般都要相应改变其原有结构，如加厚、加筋等。

井式气体渗碳炉的炉罐，原用耐热钢铸件，可采用耐热钢板弯曲焊接而成，这样可以大大减轻构件的重量。一些贯通式热处理炉的夹具，可采用精密铸件，这不仅节约材料，还可提高其使用寿命。有的耐热钢导轨，还可改用普通水冷导轨，但热损失增加了。

(4) 采用耐火材料代替耐热钢 碳化硅板的力学强度高，导热性好，碳化硅马弗炉膛经常用于小型高温炉膛。棕刚玉-碳化硅滑轨的耐磨性、热稳定性和高温力学强度都较好，是连续式加热炉上

用作无水冷却轨的好材料。目前，双排无罐气体渗碳炉的导轨全部采用碳化硅制成，使用情况良好。采用石墨坩埚熔炼有色金属时，可以保证金属的纯度。

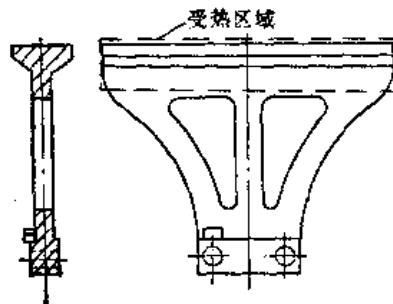


图20-4-1 弹簧淬火炉用托架

## 第5节 电热材料

电热材料是指物体自身通电以后，由于它的电阻而产生热量，或者说它是能发热的电阻材料。电热材料主要用于制造各种电炉中的电热元件，它作为电阻体接在电路中，把电能转变为热能，使炉温升高。

### (一) 对电热材料的要求

对电热材料的要求是：

- 1) 具有高的电阻率；
- 2) 小的电阻温度系数，在炉温变化时要求电阻稳定；
- 3) 高的抗蚀性，不与炉衬、炉气发生化学反



应,且不易氧化、不易蒸发、不易变脆、不易老化;

4) 在工作温度下应有足够的耐热强度,不易伸长,不易变形;

5) 要有耐热性,熔点要高。能承受热冲击,耐急冷急热性好;

6) 冷态时易于加工,焊接性要好。

## (二) 电热材料的分类

电热材料一般分为金属电热材料和非金属电热材料两大类,见表20-5-1。

表20-5-1 电热材料的分类和使用范围

种类	钢号	使用温度(°C)		特点	形状	使用范围	
		推荐	最高				
金属电热材料	镍铬合金	Cr23Ni18	750~800	900	电阻率较高,电阻温度系数较小,加工性能好,可拉成细丝;高温强度好,用后不变脆;奥氏体组织,基本无磁性	线、带	适于在氧化、含氮及含硫气氛的低温、中温电炉
		Cr25Ni20Si2	750~800	900			
		Cr20Ni30	870~920	1000			
		Cr15Ni60	850~900	1000			
		Cr20Ni80	950~1000	1100			
		Cr20Ni80Ti3	1000~1050	1150			
	铁铬铝合金	1Cr13Al4 0Cr25Al5 0Cr27Al7Mo2	900~950	1100	与镍铬合金比较,具有:抗氧化性好,使用温度高;电阻率高,密度小;热膨胀系数大;高温强度低,用后变脆;加工性能稍差;铁素体组织,有磁性;价格低廉	线、带	适于在氧化及含硫气氛的固定式低温、中温和高温电炉
			1050~1200	1300			
			1200~1300	1400			
		0Cr13Al6Mo2RE 0Cr21Al6Nb 0Cr23Al6Y 0Cr23Al6CoZr 0Cr24Al6RE	1050~1200	1300			
			1200~1300	1400			
			1200~1300	1400			
			1200~1300	1400			
			1400	1400			
纯金属	铂Pt		1600	在空气中使用,不能在还原性气氛中使用,高温下形成挥发性氧化物,影响使用寿命;昂贵	线、片	用于研究性小型电炉	
	钼Mo	1350~1600	1700	熔点高,须在保护气体中使用,钨钼可在真空、惰性气体、氢气、分解氨中使用,钨仅能在真空、惰性气体(氮气除外)中使用,电阻率低,电阻温度系数大,须配调压装置;钨的加工(弯曲、铆接、焊接)特难;材料稀少,价贵	线、片	用于高温真空炉、高温氢气炉	
	钨W	2000~2200	2400				
	钽Ta	1800~2000	2200			用于高温真空炉	
非金属电热材料	硅碳棒SiC	1250~1400	1500	能在空气中耐1300°C以上高温,高温强度高,价格较低;硬而脆,不能加工成形,一般只作成棒状;元件间的电阻值一致性差,有老化现象	棒、管	适用于隧道炉、多温区、长温区传送带炉等	
	硅钼棒MoSi2	1500~1600	1700	能在空气中耐1600°C以上高温,无老化现象,电阻温度系数较大;须配调压装置,开始加热阶段须逐渐降低电压,防止过大电流,室温下脆而硬	棒	适用于1500°C以上高温	

(续)

种类	牌号	使用温度(°C)		特点	形状	使用范围
		推荐	最高			
非 金 属 电 热 材 料	钨酸钡LaCrO <sub>3</sub>	1600~1700	1800	能在空气中耐1700°C以上高温; 800°C以上电阻温度系数略有下降; 1600°C以上Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 逐渐挥发, 元件老化	棒状	适用于1600°C以上高温
	碳质	2300(真空)	3000	能耐3000°C以上高温; 电阻率高, 但加热器总电阻率很低, 又不精确, 故须配低电压、大电流变压器; 须在真空或保护气氛中使用。石墨蒸汽容易污染炉膛和工件	棒、管、粒	适用于真空、氢气和惰性气体的特高温电炉

### (三) 电热材料的使用性能

电热材料是一种特殊材料, 其使用性能主要有电阻率、电阻温度系数、表面负荷以及最高使用温度。

#### 1. 电阻率

电能和热能可以互相转化, 它们之间有如下的关系:

$$Q = 0.24I^2R(J)$$

式中  $Q$ ——电阻通电发出的热量(J);

$I$ ——通过电阻的工作电流(A);

$R$ ——电阻在工作状态下的电阻值( $\Omega$ );

电热材料的作用是将电能转变为热能。因此, 要求电热材料必须具有较大的电阻率, 只有采用高电阻率的材料作电热元件, 才能用较少的材料发生较多的热量。

可以用来作为合金电热元件的材料很多, 按电阻率的大小可分为3类:

- 1) 高电阻材料——电阻率  $\rho > 1\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ;
- 2) 中电阻材料——电阻率  $\rho = 0.2 \sim 1\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ;
- 3) 低电阻材料——电阻率  $\rho < 0.2\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 。

#### 2. 电阻温度系数

电热元件的电阻值在使用过程中, 随着温度的变化而相应变化, 其变化值以电阻温度系数表示。当电阻温度系数为正值时, 随着炉温及元件温度的升高, 电阻值相应增大。如电阻温度系数为负值时,

随着元件温度的升高, 电阻值下降。电阻值的变化直接影响电炉功率的变化与炉温变化, 电阻温度系数小, 说明元件功率稳定。

在设计电热元件时, 按实际使用温度时元件电阻值(即热态电阻)为依据, 以保持输出功率, 符合实际使用要求。热态电阻与冷态电阻之间的关系如下式

$$R_t = R_{20}[1 + \alpha(t - 20)]$$

式中  $R_t$ ——元件在工作温度的热态电阻( $\Omega$ );

$R_{20}$ ——元件在常温下(20°C)的冷态电阻( $\Omega$ );

$\alpha$ ——元件的电阻温度系数(1/°C);

$t$ ——元件工作温度(°C)。

在工作温度下的热态电阻  $R$  与常温下的冷态电阻  $R_{20}$  之比称为电阻率修正系数  $C_r$ , 即为电阻温度系数。常用的合金电热元件的电阻率修正系数见图20-5-1、图20-5-2和表20-5-2。

#### 3. 表面负荷

表面负荷是指电热元件在单位面积上所分担的功率数, 单位为  $\text{W}/\text{cm}^2$ 。它是衡量电热材料耐热性的一个重要指标。因为通过电热元件单位面积上的功率愈大, 电热元件的温度也愈高。如超过一定限度, 电热元件的寿命就会缩短, 甚至被烧毁。

硅碳棒的允许表面负荷见表20-5-3。

在实际使用中, 表面负荷的选择不宜过大, 但也不宜过小。因为表面负荷小, 虽然可以延长电热元件的使用寿命, 但造成材料的浪费, 影响炉子的升温速度, 因此, 必须合理地选择元件的表面负荷。

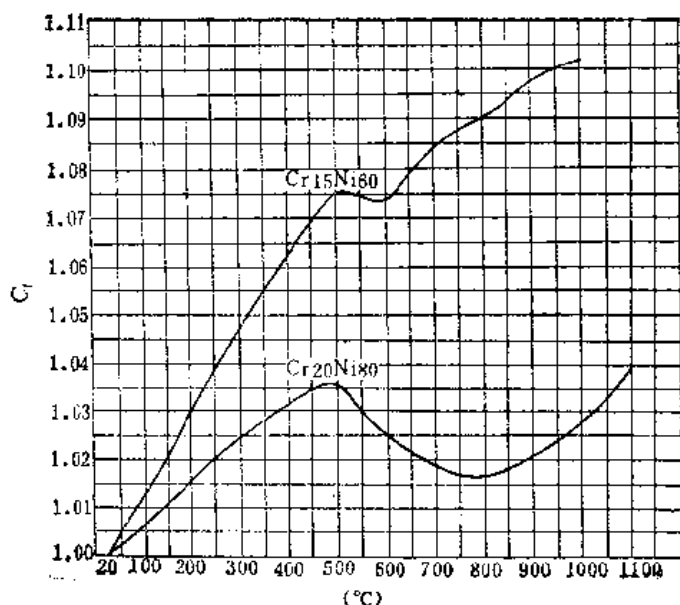


图20-5-1 镍铬合金电阻率修正系数 $C_T$ 与温度的关系曲线

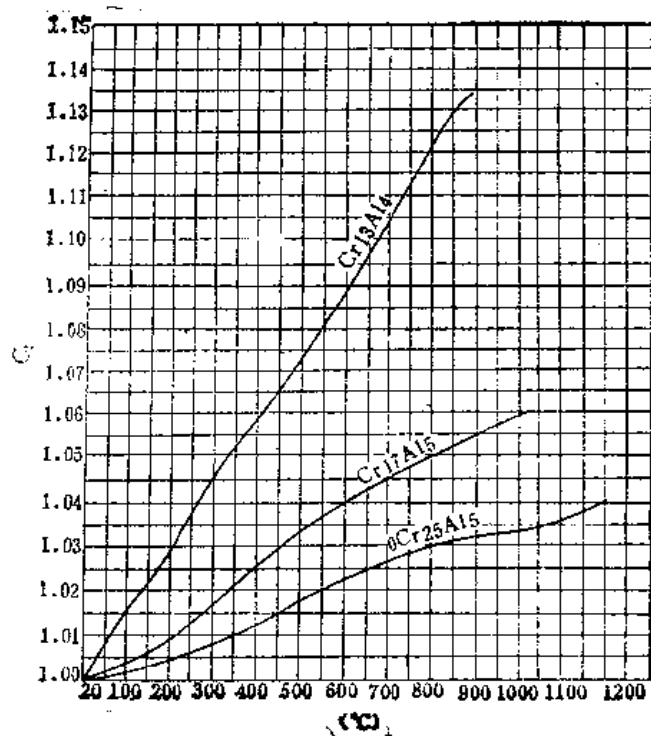


图20-5-2 铁铬铝合金电阻率修正系数 $C_T$ 与温度的关系曲线

选择表面负荷时，必须考虑下列因素：

(1) 炉膛工作温度 炉内温度愈高，表面负荷应取得愈小，两者成反比关系。

(2) 元件表面散热情况 如果电热元件安装在密封的瓷管、辐射管或马弗内(称封闭型)，表面冷却条件很差，表面负荷应取低些(低40%~50%)，如果电热元件的表面没有任何遮蔽(称敞露型)，有较好的散热条件，表面负荷则可取大些。若炉内安有风扇，元件处于强制对流中，有良好的散热条件，其表面负荷可增加30%~50%，但当风扇停止运转时，必须立即停电。

(3) 有害介质影响 在有害气氛中，电热元件的表面负荷应取低值。如用于熔炼有色金属，则应比黑色金属为低。

(4) 元件的截面积 电阻带的表面负荷可以比电阻丝的高。因为当两者的截面积相等时，电阻带比电阻丝的面积要大得多，尤其是宽度和厚度比值较大时，则更为明显。由于电阻带的表面积大，散热面积也大，所以其表面负荷应比电阻丝大，甚至有时可增加50%。

#### 4. 最高使用温度

合金元件的最高使用温度，是指元件在干燥空气中允许的本身表面温度，并不是指被加热物质的温度或电热元件周围介质的温度。这是因为电热元件本身表面温度一般比它周围介质温度或被加热物体温度要高100°C以上。

在使用中，合金元件表面温度愈高，则高温强度愈低，容易发生倒塌现象，从而造成短路烧毁。表面温度过高，还会产生合金组织结构的破坏，发生熔融现象而终止寿命。

合金元件在保证比较满意的寿命前提下所允许的最高使用温度，不仅与合金牌号有关，还往往与炉子构造、元件形状、断面大小、表面负荷、周围介质、散热情况等都有密切的关系，它不是一个孤立的数字。在一般情况下，元件的最高使用温度取决于合金牌号和截面尺寸。表

20-5-4列出了常用合金元件的最高使用温度的经验数据。

表20-5-2 合金元件在不同温度下的电阻率修正系数 $C_t$ 

钢 号	温 度 (°C)												
	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
Cr15Ni60	1.000	1.013	1.029	1.046	1.062	1.074	1.073	1.083	1.089	1.097	1.105	—	—
Cr20Ni80	1.000	1.006	1.016	1.024	1.031	1.035	1.026	1.019	1.017	1.021	1.028	1.038	—
1Cr13Al4	1.000	1.015	1.029	1.044	1.059	1.074	1.089	1.104	1.120	1.134	—	—	—
0Cr13Al6Mo2	1.000	1.001	1.003	1.007	1.014	1.028	1.048	1.053	1.057	1.060	1.063	1.066	1.069
0Cr25Al5	1.000	1.002	1.005	1.008	1.013	1.017	1.022	1.026	1.029	1.031	1.034	1.036	1.040
0Cr27Al7Mo2	1.000	0.997	0.994	0.992	0.992	0.992	0.992	0.992	0.992	0.992	0.992	0.992	0.992

表20-5-3 硅碳棒的允许表面负荷

炉膛温度 (°C)	1000	1100	1200	1250	1300	1350	1400
允许表面负荷 (W/cm <sup>2</sup> )	24	22	21	18	14	10	5

表20-5-4 合金元件的最高使用温度 (°C)

牌 号	规 格 (mm)		
	$\phi$ 0.4~1	$\phi$ 1~3	$\phi > 3$ ; $a > 1.5$
Cr15Ni60	925	950	1000
Cr20Ni80	1000	1050	1100
1Cr13Al4	900	950	1000
0Cr13Al6Mo2	1150	1200	1250
0Cr25Al5	1150	1200	1250
0Cr27Al7Mo2	1300	1350	1400

注：表中 $\phi$ 为电阻丝直径， $a$ 为电阻带厚度。

#### (四) 金属电热材料

##### 1. 电热合金

常用的电热合金材料有镍铬合金和铁铬铝合金，其化学成分和物理力学性能分别见表20-5-5和表20-5-6。

(1) 镍铬合金 是用作电热元件的最好材料。它具有高的电阻率和较小的电阻温度系数，所以当炉温升高时电功率稳定。镍铬合金在高温下不易氧化，这是因为在加热时表面生成一层墨绿色的氧化铬(Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)薄膜，防止了电热元件的进一步氧化。镍铬合金的高温强度比较高，冷却后无脆性，同时塑性大，可拉成细丝，易于加工，焊接性能良好。

(2) 铁铬铝合金 熔点比镍铬合金高，电阻率也比镍铬合金大。高温时易与耐火砖的SiO<sub>2</sub>和Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>作用，最好采用高铝制品。铁铬铝的热膨胀系数比较大，加热到高温往往伸长弯曲。冷加工性

能较差，但经低温(约300°C左右)加热后，其冲击韧度急剧增大，使加工和成形变得容易，经高温使用后，晶粒长大变脆，在重新焊接和移动时容易折断，因此，不宜用在有振动和冲击的部位。但是铁铬铝合金的密度小，用料省；又不用镍，价格也比较低廉。

若往铁铬铝内添加一定数量的稀有或稀土元素，可以提高合金的抗氧化性，改善加工脆性，防止高温脆化及晶粒长大，而且在各种气氛(特别是CO和N<sub>2</sub>)中，有很强的抵抗能力。因此，可用作多用可控气氛炉和无罐渗碳炉等的抗渗碳合金元件，如Cr<sub>23</sub>Al<sub>6</sub>Y、Cr<sub>23</sub>Al<sub>6</sub>CoZr和Cr<sub>13</sub>Al<sub>6</sub>Mo<sub>2</sub>R。

镍铬合金与铁铬铝合金的性能比较见表20-5-7。

用于制造电热元件的合金材料，其化学成分必须符合规定要求，组织均匀，不得有偏析；电阻值应稳定在规定范围内；尺寸要符合公差要求；表面必须光滑洁净，没有裂纹、夹渣和锈蚀等缺陷。

电热合金材料常用规格见表20-5-8。

##### 2. 纯金属电热材料

(1) 钼丝 钼是一种难熔的稀有金属，其熔点约2630°C，导电性强，膨胀系数小，较易加工。因此，钼丝比较适宜用作粉末冶金烧结炉和高温实验室电炉(1300~1700°C)的电热元件。

钼在空气中当温度高于600°C时，很快地与氧作用而生成氧化钼(Mo<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)，失去了金属钼的性质，变得很脆。因此，在使用钼做电热元件时，必须采用保护气体，使其在高温下稳定。一般还原性气氛对钼都起保护作用，如在氢、惰性气体(氩、

表20-5-5 电热合金的化学成分

钢 号	主要化学成分 (%)				杂质含量 不大于 (%)					备 注
	Ni	Cr	Al	Fe	C	Si	Mn	S	P	
Cr23Ni18	17~20	22~25	—	余量	0.10	1.0	2.0	0.020	0.035	
Cr25Ni20Si2	18~21	24~27	—	余量	0.20	2.0~3.0	1.50	0.020	0.035	
Cr20Ni30	29~30	20~22	—	余量	0.20	3.0~4.0	1.10	0.025	0.035	
Cr15Ni60	55~61	15~18	≤0.2	余量	0.15	0.4~1.3	1.50	0.025	0.035	
Cr20Ni80	75~78	20~23	≤0.2	<1.0	0.15	0.4~1.3	0.70	0.025	0.035	
Cr20Ni80Ti3	余量	19~23	0.4~1.1	2.5	0.08	1.0	0.50	0.015	0.020	
1Cr13A14	<0.6	12~15	3.5~5.5	余量	0.15	1.0	0.70	0.025	0.035	
0Cr25A15	<0.6	23~27	4.5~6.5	余量	0.06	0.06	0.70	0.030	0.035	
0Cr27A17Mo2	—	25.6~27.5	6~7	余量	0.05	0.40	0.20	0.035	0.035	Mo 1.8~2.2, Re 0.3
0Cr13A16Mo2R	—	12~15	5~7	余量	0.06	0.60	0.30	0.030	0.025	Mo 1.5~2.5, Ce ≤ 0.50
0Cr21A16Nb	—	21.0	6.0	余量						Co, Nb, Re 均适量
0Cr23A16Y	—	22~25	5~7	余量	0.06	0.60	0.30	0.025	0.030	Y 0.3~1.0
0Cr23A16CoZr	—	21.5~24.5	5~7	余量	0.06	0.60	0.30	0.025	0.030	Co 0.45~0.5, Zr ≤ 0.20
0Cr24A16RE	—	24.0	6.0	余量						Re 适量

表20-5-6 电热合金的物理-力学性能

钢 号	密 度 (kg/m <sup>3</sup> )	电阻系数	电阻温度系数	线膨胀系数	比热容 (J/(kg·K))	热 导 率 (W/(m·K))
		20°C (Ω·mm <sup>2</sup> / m)	20~1000°C (×10 <sup>-5</sup> /°C)	20~1000°C (×10 <sup>-6</sup> /°C)		
Cr23Ni18	7800	0.9	—	17.0	502	12.8~14.0
Cr25Ni20Si2	7840	0.92	—	16.0	502	12.8~14.0
Cr20Ni30	7950	1.04	—	16.0	502	13.1
Cr15Ni60	8200	1.10	74	13.0	461	12.6
Cr20Ni80	8400	1.11	20~1100°C 8.4	14.0	440	16.7
Cr20Ni80Ti3	8400	1.27	—	—	—	—
1Cr13A14	7400	1.26	20~850°C 15	15.4	490	14.7
0Cr25A15	7100	1.45	20~1200°C 3~4	16.0	494	12.8
0Cr27A17Mo2	7100	1.50	-0.65	16.6	494	12.6
0Cr13A16Mo2R	7200	1.40	7.25	15.6	494	13.6
0Cr21A16Nb	7100	1.46	± 5	15.0	—	—
0Cr23A16Y	—	1.45	1.4	—	—	—
0Cr23A16CoZr	—	1.45	6.1	—	—	—
0Cr24A16RE	7100	1.45	< 1	13.0	—	—

(续)

牌 号	熔 点 (°C)	抗拉强度 (MPa)	伸长率 (%)	断面收缩率 (%)	硬 度 (HFB)	组 织	磁 性
Cr23Ni18	1400~1420	650~750	35~45	50~65	145~210	奥氏体	弱
Cr25Ni20Si2	1400~1420	600	35	50	—	奥氏体	弱
Cr20Ni30	1400~1420	600~750	20~30	—	—	奥氏体	弱
Cr15Ni60	1390	650~800	25~35	60~70	130~150	奥氏体	弱
Cr20Ni80	1400	650~800	25~35	60~70	130~150	奥氏体	无
Cr20Ni80Ti3	—	—	—	—	—	奥氏体	无
1Cr13Al4	1450	600~750	15~30	65~75	200~260	铁素体	有
0Cr25Al6	1500	650~800	20~25	70~75	200~260	铁素体	有
0Cr27Al7Mo2	1520	700~800	15	65	210~240	铁素体	有
0Cr13Al6Mo2R	1500	700~850	10~25	65~80	—	铁素体	有
0Cr21Al6Nb	1510	700~800	>12	65~75	220~260	铁素体	有
0Cr23Al6Y	—	>600	>10	—	—	铁素体	有
0Cr23Al6CoZr	—	>600	>10	—	—	铁素体	有
0Cr24Al6RE	1520	650~800	>15	65~75	200~250	铁素体	有

表20-5-7 镍铬合金与铁铬铝合金的性能比较

性 能 名 称	镍铬合金	铁铬铝合金
最高使用温度(°C)	1000~1100	1000~1250
快速寿命试验1200°C(h)	60	300
电阻系数( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ )	1.1~1.2	1.3~1.4
电阻温度系数20~1200°C( $\times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ )	8.5~14	5~6
高温强度1000°C时( $\text{mm}^2$ )	6.0	2.1
抗腐蚀性: 1) 含S、C—H化合物 2) 含N <sub>2</sub> 、化学腐蚀	易被腐蚀 耐蚀性强	耐蚀性好 耐蚀性弱
常温加工性	良好	刚性大, 且有产生裂纹倾向
对振动、冲击的影响	不影响	严重影响
高温使用后的脆性	几乎没有	晶粒长大、脆性增加

表20-5-8 电热合金材料常用规格

电热合金种类	常 用 规 格 (mm)
电阻丝 直径 d	1.0 1.2 1.4 1.6 1.8 2.0 2.2 2.5 2.6 3.0 3.5 4.0 4.5 5.0 5.5 6.0 6.5 7.0 8.0
电阻带 厚度 a 宽度 b	1.0 1.2 1.4 1.5 1.6 1.8 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0 10 12 14 15 16 18 20 25 30 40

氮)中能稳定至熔点。钼也可在真空中工作,但在高温高真空中(当温度 $>1650^\circ\text{C}$ ,真空度 $<10^{-4}$  mmHg时),则强烈挥发。故钼只能在 $1600^\circ\text{C}$ 以下和真空度 $<10^{-2}$  mmHg的真空炉中使用。

在高温时,水蒸气、氧化亚氮和氧化氮均使钼发生氧化。当温度达 $1100^\circ\text{C}$ 时,钼在二氧化碳、氮和氨中惰性较强。碳及含碳气体(碳氢化合物和一氧化碳)在 $1200^\circ\text{C}$ 以上会使钼碳化,生成 $\text{Mo}_2\text{C}$ ,降

低了使用寿命。在还原气氛中,钼对高温的硫化氢具有很好的耐蚀性,但在氧化气氛中则被含硫物质腐蚀。

钼对氟、溴、碘有良好的抗蚀性,抵抗无机酸的作用相当强。熔融的锡、铅、镍、铁和钴对钼的侵蚀较严重。

钼丝的物理-力学性能见表20-5-9。

常用钼丝规格见表20-5-10。

表20-5-9 钨丝的物理-力学性能

性能名称	数值
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	10200
电阻系数 20°C (Ω·mm <sup>2</sup> /m)	0.045
1200°C (Ω·mm <sup>2</sup> /m)	0.374
1300°C (Ω·mm <sup>2</sup> /m)	0.403
1500°C (Ω·mm <sup>2</sup> /m)	0.462
电阻温度系数 (×10 <sup>-3</sup> /°C)	5.5
线膨胀系数 (×10 <sup>-6</sup> /°C) 20°C	5.3
比热容 20°C J/(kg·K)	272
热导率	
蒸发速度 (mg/(cm <sup>2</sup> ·h)) 1530°C	3.1×10 <sup>-4</sup>
1730°C	3.6×10 <sup>-2</sup>
1930°C	180
抗拉强度 (MPa) 未退火	1400~2600
退火	800~1200

表20-5-10 钨丝常用规格

钨丝直径 (mm)	最小长度 (m)
φ0.3~0.5	40
φ0.5~0.8	15
φ0.8~1.5	10
φ1.6~2.5	2

表20-5-11 钨和钼的物理-力学性能

性能名称	钨	钼
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	19.3	16.87
电阻系数 (Ω·mm <sup>2</sup> /m)	0.051	0.131
电阻温度系数 (×10 <sup>-3</sup> /°C)	482	385
线膨胀系数 (×10 <sup>-6</sup> /°C)	4.6 (20°C)	6.55
比热容 (J/(kg·K))	142	142
热导率 (W/(m·K))	166	54.4
熔点 (°C)	3380	2980

表20-5-12 炉气对钨和钼的影响

炉内气氛	钨	钼	
空气及氧	500°C开始氧化, 1200°C以上强烈蒸发	400°C开始氧化, 并生成氟化物	
干氢 (水<5g/m <sup>3</sup> )	稳定	400~800°C生成氟化物, 800°C以上表面氧化	
湿氢 (水>20g/m <sup>3</sup> )	至1400°C稳定, 以上生成针状金属, 材料受损耗	450°C以上生成氟化物, 并强烈氧化	
分解氨	稳定	400°C以上生成氟化物、氟化物, 温度更高完全渗碳	
惰性气体(氩、氮)	稳定	稳定	
真空	>10 <sup>-2</sup> Torr	至2000°C稳定	
	<10 <sup>-4</sup> Torr	2400°C以上强烈蒸发	2200°C以上强烈蒸发

(2) 钨和钼 共同特点是熔点高, 抗氧化性差, 只能在真空或保护气氛中使用。由于它们的电阻系数小, 电阻温度系数大, 因此, 随着温度的变化, 炉子功率有较大的变化, 为了稳定功率, 必须采用调压器调节。钨和钼的物理-力学性能见表20-5-11。炉气对钨和钼的影响见表20-5-12。

### (五) 非金属电热材料

#### 1. 硅碳棒

硅碳棒是非金属电热元件中使用最广的一种。它是以碳化硅为主要原料, 经挤压成坯, 在高温下再结晶而成。硅碳棒一般多呈两端加粗的空心棒状, 当制成管状时, 则叫硅碳管。

随着电阻炉结构设计上的需要和硅碳棒制造技术上的进步, 发展了多种多样的元件: 如为了缩小炉膛引出孔的直径, 以增加炉膛强度和减小电炉的热损失, 发展了发热部分和引出部分同样粗细的棒; 为了克服在电炉上两端引出的困难, 发展了两根棒或3根棒连在一起的元件; 为了增加元件的电阻, 以提高电炉的输入电压, 减小输入电流而发展了单螺旋形元件; 为了解决单螺旋形元件的一端引出问题, 又发展了双螺旋形元件等, 正如图20-5-3所示。

硅碳棒的表面负荷(单位表面功率)和电阻系数均比电热合金高得多, 电阻温度系数在20~900°C时为负值, 约在900°C时特性曲线由负变正(图20-5-4), 这一特点可以防止硅碳棒因电压的骤增而被烧毁。

硅碳棒的导热性、导电性和耐磨性良好, 在高温条件下的急冷急热性较好, 高温时具有足够的机械强度。硅碳棒不与硫酸、盐酸、硝酸发生反应,

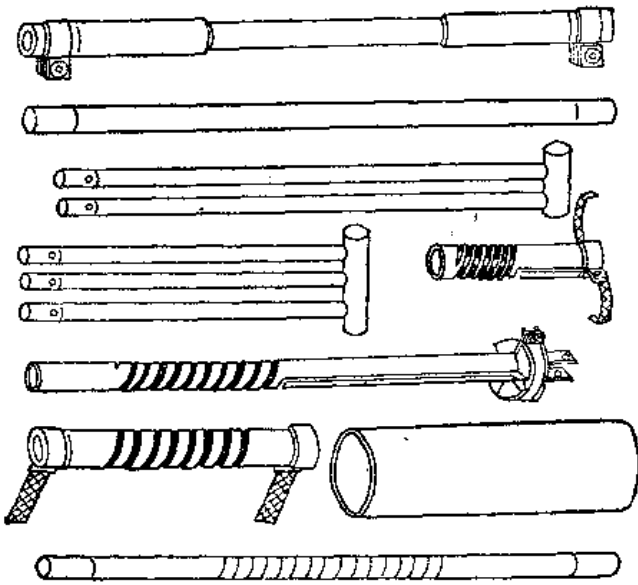


图20-5-3 硅碳棒电热元件

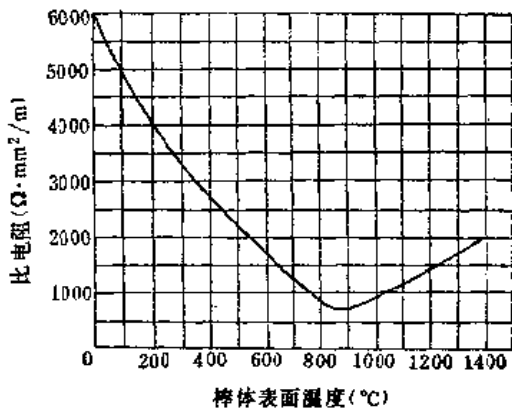


图20-5-4 硅碳棒的电阻特性

而碱、碱土金属、硅酸盐及碳化物在高温下对棒有腐蚀作用。一氧化碳和二氧化碳对其作用缓慢，在650°C左右的空气中开始氧化，高温时氧化增快。与水蒸气接触则发生强烈的氧化反应：



与氢接触会变脆。氮、氨、氧等在高温时都有不同程度分解碳化硅的作用，使其电阻很快增加。特别是氧，在600°C左右能使碳化硅缓慢分解，在1200°C时将有完全被分解的可能。

各种气氛对硅碳棒的影响见表20-5-13。

硅碳棒(管)的性能见表20-5-14。

硅碳棒的规格尺寸和电气性能见表20-5-15。

## 2. 硅钼棒

二硅化钼 ( $\text{MoSi}_2$ ) 电热元件主要是以硅粉和

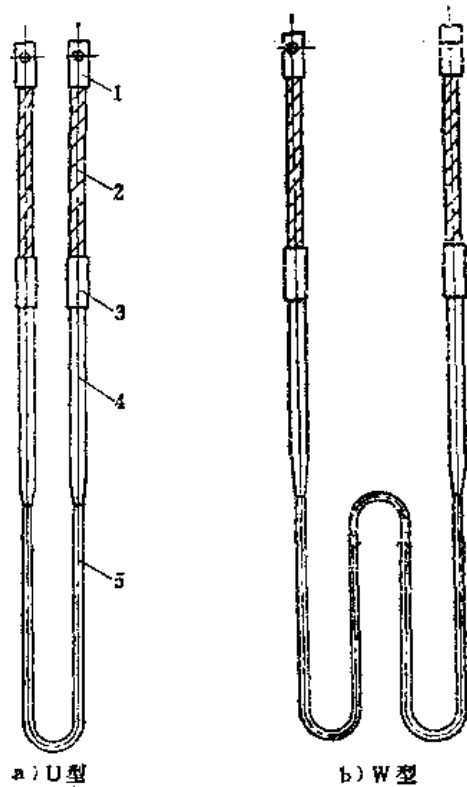


图20-5-5 U型硅钼棒

a) U型 b) W型

1—铝接头 2—软电线 3—铝端头  
4—联接冷端 5—发热端

钼粉为原料，用粉末冶金方法经挤压、烧结而成，简称硅钼棒(图20-5-5)。这种元件在氧化气氛中

表20-5-13 各种气氛对硅碳棒的影响

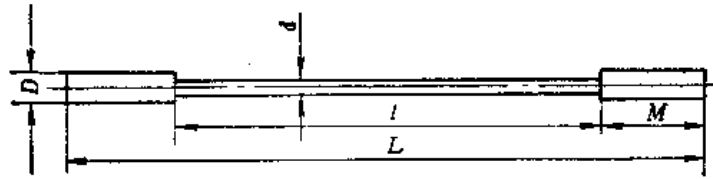
炉内气氛	老化机理	老化速度
氧气	650°C 开始氧化，逐步生成 $\text{SiO}_2$	快
氮气	1400°C 以上 $\text{SiC}$ 氮化成氮化硅	1400°C 以下缓慢
二氧化碳	氧化生成 $\text{SiO}_2$	较快
氢气	1700°C 以下 $\text{SiC}$ 无反应	作保护气氛
真空	部分 $\text{SiC}$ 分解为 C、Si	快

表20-5-14 硅碳棒(管)的性能

性能名称	硅碳棒	硅碳管
SiC含量 (%)	94.4	97
体积密度 ( $\text{kg/m}^3$ )	3.27~3.30	3.0~3.2
电阻系数 ( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ )	1000~2000	500~1000
线膨胀系数 ( $\times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ )	20~1400°C 5.6	20~1500°C 5
比热容 ( $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ )	712	712
热导率 ( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ )	23.3	23.3



表20-5-15 硅碳棒的规格尺寸和电气性能



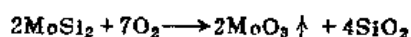
规格	发热部尺寸 (mm)		冷端部尺寸 (mm)		1400°C时 电阻 ±10% (Ω)	在不同炉温下每根硅碳棒的功率、电压和电流 $\left(\frac{W}{V/A}\right)$				有效表面积 (cm <sup>2</sup> )
	直径 d	长度 l	直径 D	长度 M		1200°C	1300°C	1350°C	1400°C	
6/60/75	6	60	12	75	2.2	$\frac{240}{23/10.5}$	$\frac{160}{19/3.5}$	$\frac{115}{16/7.2}$	$\frac{70}{12.5/5.6}$	11.30
6/100/75	6	100	12	75	3.5	$\frac{395}{37/10.6}$	$\frac{265}{30/8.8}$	$\frac{190}{26/7.3}$	$\frac{114}{20/5.7}$	18.85
6/100/130	6	100	12	130	3.5	$\frac{395}{37/10.6}$	$\frac{265}{30/8.8}$	$\frac{190}{26/7.3}$	$\frac{114}{20/5.7}$	18.85
8/100/85	8	100	14	85	2.4	$\frac{530}{36/14.7}$	$\frac{350}{29/12.1}$	$\frac{250}{24/10.4}$	$\frac{150}{19/7.9}$	25.13
8/100/130	8	100	14	130	2.4	$\frac{530}{36/14.7}$	$\frac{350}{29/12.1}$	$\frac{250}{24/10.4}$	$\frac{150}{19/7.9}$	25.13
8/150/60	8	150	14	60	3.6	$\frac{790}{53/14.7}$	$\frac{525}{43/12.2}$	$\frac{380}{37/10.3}$	$\frac{228}{28.5/7.9}$	37.69
8/150/85	8	150	14	85	3.6	$\frac{790}{53/14.7}$	$\frac{525}{43/12.2}$	$\frac{380}{37/10.3}$	$\frac{228}{28.5/7.9}$	37.69
8/150/150	8	150	14	150	3.6	$\frac{790}{53/14.7}$	$\frac{525}{43/12.2}$	$\frac{380}{37/10.3}$	$\frac{228}{28.5/7.9}$	37.69
8/180/60	8	180	14	60	4.4	$\frac{950}{65/14.7}$	$\frac{635}{53/12.0}$	$\frac{460}{45/10.2}$	$\frac{270}{34.5/7.9}$	45.23
8/180/85	8	180	14	85	4.4	$\frac{950}{65/14.7}$	$\frac{635}{53/12.0}$	$\frac{460}{45/10.2}$	$\frac{270}{34.5/7.9}$	45.23
8/180/150	8	180	14	150	4.4	$\frac{950}{65/14.7}$	$\frac{635}{53/12.0}$	$\frac{460}{45/10.2}$	$\frac{270}{34.5/7.9}$	45.23
8/200/85	8	200	14	85	5.0	$\frac{1050}{71/14.8}$	$\frac{700}{58/12.1}$	$\frac{500}{49/10.2}$	$\frac{300}{38/7.9}$	50.26
8/200/150	8	200	14	150	5.0	$\frac{1050}{71/14.8}$	$\frac{700}{58/12.1}$	$\frac{500}{49/10.2}$	$\frac{300}{38/7.9}$	50.26
8/250/100	8	250	14	100	6.2	$\frac{1320}{91/14.5}$	$\frac{880}{74/11.9}$	$\frac{630}{62/10.1}$	$\frac{385}{49/7.9}$	62.83
8/250/150	8	250	14	150	6.2	$\frac{1320}{91/14.5}$	$\frac{880}{74/11.9}$	$\frac{630}{62/10.1}$	$\frac{385}{49/7.9}$	62.83
12/100/200	12	100	18	200	1.1	$\frac{1790}{30/26.4}$	$\frac{530}{24/22.0}$	$\frac{375}{20/18.7}$	$\frac{225}{16/14.3}$	37.70
12/150/200	12	150	18	200	1.7	$\frac{1180}{45/26.4}$	$\frac{795}{37/21.4}$	$\frac{565}{21/18.2}$	$\frac{340}{24/14.2}$	56.55
12/200/200	12	200	18	200	2.2	$\frac{1580}{59/26.8}$	$\frac{1050}{48/21.8}$	$\frac{755}{41/18.5}$	$\frac{450}{31.5/14.3}$	75.40
12/250/200	12	250	18	200	2.9	$\frac{1970}{74/26.6}$	$\frac{1320}{61/21.6}$	$\frac{940}{51/18.4}$	$\frac{565}{40/14.2}$	94.25
14/200/250	14	200	22	250	1.8	$\frac{1850}{58/32.0}$	$\frac{1230}{47/26.2}$	$\frac{880}{40/22.0}$	$\frac{530}{31/17.2}$	87.96
14/200/350	14	200	22	350	1.8	$\frac{1850}{58/32.0}$	$\frac{1230}{47/26.2}$	$\frac{880}{40/22.0}$	$\frac{530}{31/17.2}$	87.96
14/250/250	14	250	22	250	2.2	$\frac{2310}{71/32.6}$	$\frac{1540}{56/26.6}$	$\frac{1100}{49/22.4}$	$\frac{665}{38/17.3}$	109.90
14/250/350	14	250	22	350	2.2	$\frac{2310}{71/32.6}$	$\frac{1540}{56/26.6}$	$\frac{1100}{49/22.4}$	$\frac{665}{38/17.3}$	109.90
14/300/250	14	300	22	250	2.6	$\frac{2770}{85/32.6}$	$\frac{1850}{69/26.7}$	$\frac{1320}{59/22.4}$	$\frac{785}{45/17.4}$	131.90
14/300/350	14	300	22	350	2.6	$\frac{2770}{85/32.6}$	$\frac{1850}{69/26.7}$	$\frac{1320}{59/22.4}$	$\frac{785}{45/17.4}$	131.90
14/400/250	14	400	22	250	3.5	$\frac{3680}{113/32.5}$	$\frac{2450}{93/26.4}$	$\frac{1750}{78/22.5}$	$\frac{1060}{61/17.4}$	175.90
14/400/350	14	400	22	350	3.5	$\frac{3680}{113/32.5}$	$\frac{2450}{93/26.4}$	$\frac{1750}{78/22.5}$	$\frac{1060}{61/17.4}$	175.90
14/600/250	14	600	22	250	6.0	$\frac{5550}{170/32.8}$	$\frac{3700}{139/26.6}$	$\frac{2650}{118/22.6}$	$\frac{1580}{91/17.4}$	263.80
14/600/350	14	600	22	350	6.0	$\frac{5550}{170/32.8}$	$\frac{3700}{139/26.6}$	$\frac{2650}{118/22.6}$	$\frac{1580}{91/17.4}$	263.80
18/250/250	18	250	28	250	1.3	$\frac{2960}{62/47.8}$	$\frac{1370}{51/38.8}$	$\frac{1410}{43/32.8}$	$\frac{840}{33/25.5}$	141.40
18/250/350	18	250	28	350	1.3	$\frac{2960}{62/47.8}$	$\frac{1370}{51/38.8}$	$\frac{1410}{43/32.8}$	$\frac{840}{33/25.5}$	141.40

(续)

规格	发热部尺寸 (mm)		冷端部尺寸 (mm)		1400℃时 电阻 ±10% (Ω)	在不同炉温下每根硅碳棒的功率、电压和电流 $\left(\frac{W}{V/A}\right)$				有效表面积 (cm <sup>2</sup> )
	直径 <i>d</i>	长度 <i>l</i>	直径 <i>D</i>	长度 <i>M</i>		1200℃	1300℃	1350℃	1400℃	
18/300/250 18/300/350	18 18	300 300	28 28	250 350	1.7 1.7	$\frac{3570}{78/45.8}$	$\frac{2280}{64/37.2}$	$\frac{1700}{54/31.5}$	$\frac{1020}{41.5/24.5}$	169.70
18/400/250 18/400/350	18 18	400 400	28 28	250 350	2.3 2.3	$\frac{4740}{104/45.6}$	$\frac{3160}{85/37.2}$	$\frac{2280}{72/31.4}$	$\frac{1360}{56/24.3}$	226.20
18/500/250 18/500/350	18 18	500 500	28 28	250 350	2.7 2.7	$\frac{5960}{127/47.0}$	$\frac{3840}{120/37.6}$	$\frac{2860}{88/32.6}$	$\frac{1700}{68/25.1}$	282.20
18/600/250 18/600/350	18 18	600 600	28 28	250 350	3.4 3.4	$\frac{7140}{156/45.7}$	$\frac{4760}{127/37.6}$	$\frac{3400}{102/31.8}$	$\frac{2040}{83/24.5}$	339.30
18/800/250 18/800/350	18 18	800 800	28 28	250 350	4.6 4.6	$\frac{9450}{209/45.4}$	$\frac{6300}{170/37.0}$	$\frac{4500}{144/31.3}$	$\frac{2700}{111/24.3}$	452.40
25/300/400	25	300	38	400	1.1	$\frac{4900}{70/70}$	$\frac{3360}{58/58}$	$\frac{2400}{49/49}$	$\frac{1410}{37.5/37.5}$	234.50
25/400/350 25/400/400	25 25	400 400	38 38	350 400	1.3 1.3	$\frac{6600}{92/71.0}$	$\frac{4400}{75/58.5}$	$\frac{3140}{64/49.2}$	$\frac{1900}{50/38.0}$	314.20
30/1000/500	30	1000	45	500	2.6	$\frac{20441}{189/108}$	$\frac{12936}{152/84.8}$	$\frac{9420}{129/72.6}$	$\frac{5275}{99/53}$	942.00

可以用到1650℃，是目前工业上在氧化气氛中使用温度最高的电热元件。

硅钼棒在氧化气氛下加热到1200℃以上发生如下反应：



MoO<sub>3</sub>挥发掉，SiO<sub>2</sub>就附在元件表面生成致密的石英玻璃膜，保护基体不再氧化。因此，硅钼棒的抗氧化性很好，在氧化气氛下最高使用温度可达1700℃（低于石英熔点1713℃）。如因为机械的或化学的损伤而破坏了SiO<sub>2</sub>膜，在使用过程中还会自动再次生成。

硅钼棒的性能与金属陶瓷材料相似，在室温下既硬又脆，抗冲击强度较低；抗弯、抗拉强度较好，在1350℃以上变软，有延展性。冷热急变性良好，冷却后恢复脆性。硅钼棒的物理-力学性能见表20-5-16。

硅钼棒在400~700℃内会发生低温氧化，致使元件损坏，应避免在此范围内使用。

硅钼棒特别适于在空气、氮、二氧化碳和惰性气体（氦、氖、氩）中工作，在还原性气氛（CO、分解氨和碳氢化合物）中也得到很好的效果。水蒸气对其无害，氢会破坏其保护膜，而形成一种碳氢

表20-5-16 硅钼棒的物理-力学性能

性能名称	数值
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	5.3~5.5
气孔率 (%)	不大于 2
电阻系数 (Ω·mm <sup>2</sup> /m) 20℃时	10
抗弯强度 (MPa)	250~350
伸长率 (%)	4~5
熔点 (℃)	2030

表20-5-17 硅钼棒在各种气氛中的最高使用温度

炉内气氛	最高使用温度 (℃)
空气及氧	1700
氮	1550
干氢	1350
湿氢 (露点10℃)	1400
分解氨	1400
惰性气体 (氦、氖、氩)	1500
一氧化碳	1500
二氧化碳	1600
二氧化氮	1700
二氧化硫	1600
真空: 10 <sup>-2</sup> Torr	1300
10 <sup>-4</sup> Torr	1000

元件发热端长度(L1) →

表20-5-18 φ6/13mm 硅铝棒规格尺寸和电气性能

mm	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000		
	1090 0.043 6.8	1390 0.054 8.7	1690 0.066 10.6	1970 0.077 12.3	2280 0.089 14.2	2580 0.101 16.1	2880 0.112 18.0													
	1130 0.044 7.1	1430 0.056 8.9	1720 0.067 10.8	2020 0.079 12.6	2320 0.091 14.5	2620 0.102 16.4	2920 0.114 18.3	3220 0.126 20.1	3510 0.137 21.9	3810 0.149 23.8	4110 0.161 25.7	4410 0.173 27.6								
	1170 0.046 7.3	1460 0.057 9.2	1770 0.069 11.1	2070 0.081 12.9	2370 0.093 14.8	2670 0.104 16.7	2950 0.116 18.5	3260 0.127 20.3	3550 0.139 22.2	3860 0.154 24.1	4160 0.162 26.0	4460 0.174 27.8	4760 0.186 29.7	5040 0.197 31.5	5340 0.209 33.4	5640 0.220 35.3	5940 0.232 37.1	6240 0.244 39.0		
	1220 0.046 7.6	1510 0.059 9.5	1820 0.071 11.4	2120 0.083 13.2	2400 0.094 15.0	2700 0.106 16.9	3000 0.117 18.8	3300 0.129 20.6	3600 0.141 22.5	3900 0.152 24.4	4200 0.164 26.3	4490 0.175 28.0	4790 0.187 29.9	5090 0.199 31.8	5390 0.211 33.7	5690 0.222 35.6	5990 0.234 37.4	6290 0.246 39.3		
	1260 0.049 7.9	1560 0.061 9.7	1850 0.072 11.6	2150 0.084 13.4	2450 0.096 15.3	2750 0.107 17.2	3060 0.119 20.2	3350 0.131 22.8	3650 0.143 24.8	3930 0.154 28.5	4230 0.165 28.3	4530 0.177 30.2	4840 0.189 32.1	5140 0.201 34.0	5440 0.212 35.8	5720 0.223 37.6	6020 0.235 39.5	6320 0.247 41.4		
	1300 0.051 8.1	1600 0.062 10.0	1900 0.074 11.9	2200 0.086 13.7	2500 0.098 15.6	2800 0.109 17.5	3100 0.121 21.1	3390 0.132 23.0	3680 0.144 24.9	3980 0.156 28.8	4280 0.167 30.5	4580 0.179 32.4	4880 0.191 34.2	5170 0.201 36.0	5470 0.214 37.9	5770 0.225 39.8	6070 0.237 41.7	6370 0.249 43.6		
		1640 0.064 10.3	1950 0.076 12.1	2240 0.088 14.0	2540 0.099 15.9	2830 0.111 17.7	3130 0.122 21.4	3430 0.134 25.2	3730 0.146 28.3	4030 0.157 31.1	4330 0.169 35.0	4610 0.180 38.8	4910 0.192 42.6	5210 0.204 46.4	5510 0.215 50.2	5810 0.227 54.0	6110 0.239 57.8	6410 0.251 61.6		
		1680 0.066 10.6	1990 0.078 12.4	2280 0.089 14.2	2580 0.101 16.1	2880 0.112 18.0	3180 0.124 21.7	3480 0.136 25.4	3780 0.148 29.1	4060 0.159 32.9	4360 0.170 36.6	4660 0.182 40.4	4960 0.194 44.2	5260 0.206 48.0	5560 0.217 51.8	5860 0.229 55.6	6150 0.240 59.4	6450 0.252 63.2		
			2020 0.079 12.6	2320 0.091 14.5	2620 0.102 16.4	2920 0.114 18.3	3220 0.126 22.1	3510 0.137 25.9	3810 0.149 30.7	4110 0.161 34.5	4410 0.172 38.3	4710 0.184 42.0	5010 0.196 45.6	5310 0.207 49.2	5590 0.219 52.8	5890 0.230 56.4	6190 0.242 60.0	6490 0.254 63.6		
			2070 0.081 12.9	2370 0.093 14.8	2670 0.104 16.7	2950 0.116 18.5	3260 0.127 20.3	3550 0.139 24.1	3860 0.151 28.0	4160 0.162 31.8	4460 0.174 35.6	4760 0.186 39.4	5040 0.197 43.0	5340 0.209 46.6	5640 0.220 50.2	5940 0.232 53.8	6240 0.244 57.4	6540 0.256 61.0		
650		炉温1500°C	2400 0.094 15.0	2700 0.106 16.9	3000 0.117 18.8	3300 0.129 20.6	3600 0.141 24.4	3900 0.152 28.1	4200 0.164 31.6	4490 0.175 35.1	4790 0.187 38.3	5090 0.199 41.5	5390 0.211 44.7	5690 0.222 48.0	5990 0.234 51.2	6290 0.246 54.4	6570 0.257 57.6			
700		电流 160 A	2450 0.096 15.3	2750 0.107 17.2	3050 0.119 19.1	3350 0.131 20.9	3650 0.143 24.6	3930 0.154 28.5	4230 0.165 32.3	4530 0.177 36.0	4840 0.189 38.8	5140 0.201 42.6	5440 0.212 46.4	5740 0.224 50.2	6020 0.235 53.8	6320 0.247 57.4	6620 0.259 61.0			
750		元件表面负荷15.8W/cm <sup>2</sup>		3100 0.121 19.4	3380 0.132 21.1	3680 0.144 24.9	3980 0.156 28.8	4280 0.167 31.7	4580 0.179 35.6	4880 0.191 39.4	5180 0.202 43.2	5480 0.214 47.0	5770 0.225 50.8	6070 0.237 54.6	6370 0.249 58.4	6670 0.261 62.2				
800				3130 0.122 19.6	3430 0.134 21.4	3730 0.146 25.2	4030 0.157 29.1	4330 0.169 32.9	4630 0.180 36.6	4930 0.192 40.4	5230 0.204 44.2	5530 0.215 48.0	5830 0.227 51.8	6130 0.239 55.6	6430 0.251 59.4	6730 0.263 63.0				

↓ 电阻率及长度 ↑

元件发热端长度 (L2) →

表20-5-19 φ9/18mm硅钼棒规格尺寸和电气性能

mm	160	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1090	
150	1330 0.0235 5.6	1810 0.032 7.6	2280 0.0402 9.6	2760 0.0487 11.6	3230 0.0570 13.6	3710 0.0655 15.6	4180 0.0738 17.6	4660 0.0823 19.6	5140 0.0907 21.6	5620 0.0990 23.6	6100 0.1073 25.6	6580 0.1156 27.6	7060 0.1239 29.6	7540 0.1322 31.6	8020 0.1405 33.6	8500 0.1488 35.6	8980 0.1571 37.6	9460 0.1654 39.6	1090
200	1375 0.0245 5.8	1950 0.0327 7.7	2325 0.0411 9.8	2805 0.0496 11.8	3285 0.0579 13.8	3765 0.0662 15.8	4245 0.0747 17.8	4725 0.0830 19.8	5205 0.0913 21.8	5685 0.0996 23.8	6165 0.1079 25.8	6645 0.1162 27.8	7125 0.1245 29.8	7605 0.1328 31.8	8085 0.1411 33.8	8565 0.1494 35.8	9045 0.1577 37.8	9525 0.1660 39.8	
250	1420 0.0251 6.0	1890 0.0334 7.9	2370 0.0418 10.0	2850 0.0503 12.0	3330 0.0586 13.9	3810 0.0669 15.9	4290 0.0752 17.9	4770 0.0835 19.9	5250 0.0918 21.9	5730 0.1001 23.9	6210 0.1084 25.9	6690 0.1167 27.9	7170 0.1250 29.9	7650 0.1333 31.9	8130 0.1416 33.9	8610 0.1499 35.9	9090 0.1582 37.9	9570 0.1665 39.9	
300	1460 0.0258 6.1	1935 0.0342 8.2	2410 0.0425 10.1	2890 0.0510 12.1	3370 0.0593 14.1	3850 0.0676 16.1	4330 0.0759 18.1	4810 0.0842 20.1	5290 0.0925 22.1	5770 0.1008 24.1	6250 0.1091 26.1	6730 0.1174 28.1	7210 0.1257 30.1	7690 0.1340 32.1	8170 0.1423 34.1	8650 0.1506 36.1	9130 0.1589 38.1	9610 0.1672 40.1	
350	1980 0.0350 8.3	2450 0.0433 10.3	2920 0.0517 12.3	3400 0.0600 14.3	3880 0.0683 16.3	4360 0.0766 18.3	4840 0.0849 20.3	5320 0.0932 22.3	5800 0.1015 24.3	6280 0.1098 26.3	6760 0.1181 28.3	7240 0.1264 30.3	7720 0.1347 32.3	8200 0.1430 34.3	8680 0.1513 36.3	9160 0.1596 38.3	9640 0.1679 40.3		
400	2020 0.0357 8.5	2495 0.0441 10.5	2975 0.0525 12.5	3455 0.0609 14.5	3935 0.0692 16.5	4415 0.0775 18.5	4895 0.0858 20.5	5375 0.0941 22.5	5855 0.1024 24.5	6335 0.1107 26.5	6815 0.1190 28.5	7295 0.1273 30.5	7775 0.1356 32.5	8255 0.1439 34.5	8735 0.1522 36.5	9215 0.1605 38.5	9695 0.1688 40.5		
450	2540 0.0451 10.7	3020 0.0533 12.9	3500 0.0617 14.9	3980 0.0700 16.9	4460 0.0783 18.9	4940 0.0866 20.9	5420 0.0949 22.9	5900 0.1032 24.9	6380 0.1115 26.9	6860 0.1198 28.9	7340 0.1281 30.9	7820 0.1364 32.9	8300 0.1447 34.9	8780 0.1530 36.9	9260 0.1613 38.9	9740 0.1696 40.9			
500	2580 0.0455 10.8	3060 0.0537 12.9	3540 0.0621 14.9	4020 0.0704 16.9	4500 0.0787 18.9	4980 0.0870 20.9	5460 0.0953 22.9	5940 0.1036 24.9	6420 0.1119 26.9	6900 0.1202 28.9	7380 0.1285 30.9	7860 0.1368 32.9	8340 0.1451 34.9	8820 0.1534 36.9	9300 0.1617 38.9	9780 0.1700 40.9			
550	3100 0.0547 13.0	3580 0.0629 15.0	4060 0.0713 17.0	4540 0.0796 19.0	5020 0.0879 21.0	5500 0.0962 23.0	5980 0.1045 25.0	6460 0.1128 27.0	6940 0.1211 29.0	7420 0.1294 31.0	7900 0.1377 33.0	8380 0.1460 35.0	8860 0.1543 37.0	9340 0.1626 39.0	9820 0.1709 41.0				
600	3145 0.0556 13.2	3625 0.0639 15.2	4105 0.0723 17.2	4585 0.0806 19.2	5065 0.0889 21.2	5545 0.0972 23.2	6025 0.1055 25.2	6505 0.1138 27.2	6985 0.1221 29.2	7465 0.1304 31.2	7945 0.1387 33.2	8425 0.1470 35.2	8905 0.1553 37.2	9385 0.1636 39.2	9865 0.1719 41.2				
650	3190 0.0563 13.4	3670 0.0646 15.4	4150 0.0730 17.4	4630 0.0813 19.4	5110 0.0896 21.4	5590 0.0979 23.4	6070 0.1062 25.4	6550 0.1145 27.4	7030 0.1228 29.4	7510 0.1311 31.4	7990 0.1394 33.4	8470 0.1477 35.4	8950 0.1560 37.4	9430 0.1643 39.4	9910 0.1726 41.4				
700	3230 0.0570 13.6	3710 0.0653 15.6	4190 0.0737 17.6	4670 0.0820 19.6	5150 0.0903 21.6	5630 0.0986 23.6	6110 0.1069 25.6	6590 0.1152 27.6	7070 0.1235 29.6	7550 0.1318 31.6	8030 0.1401 33.6	8510 0.1484 35.6	8990 0.1567 37.6	9470 0.1650 39.6	9950 0.1733 41.6				
750	3270 0.0577 13.7	3750 0.0660 15.7	4230 0.0744 17.7	4710 0.0827 19.7	5190 0.0910 21.7	5670 0.0993 23.7	6150 0.1076 25.7	6630 0.1159 27.7	7110 0.1242 29.7	7590 0.1325 31.7	8070 0.1408 33.7	8550 0.1491 35.7	9030 0.1574 37.7	9510 0.1657 39.7	9990 0.1740 41.7				
800	3785 0.0669 15.9	4265 0.0752 17.9	4745 0.0835 19.9	5225 0.0918 21.9	5705 0.1001 23.9	6185 0.1084 25.9	6665 0.1167 27.9	7145 0.1250 29.9	7625 0.1333 31.9	8105 0.1416 33.9	8585 0.1499 35.9	9065 0.1582 37.9	9545 0.1665 39.9	10025 0.1748 41.9					

↑ 温度 1500°C

电源 238 A

元件表面负荷

15.1 W/cm<sup>2</sup>

表20-5-20 碳质电热材料的性能

性能名称	碳	碳粒	碳毡	石墨	石墨粉	石墨纤维	石墨坩埚
体积密度 (kg/m <sup>3</sup> )	1600	1000~1250	1600	2200	450~700	1600	2000
电阻系数 (Ω·mm <sup>2</sup> /m)	40~60	600~2000	100	8~13	5.24	100	10
比热容 (J/(kg·K))	670~1005	670~1005	—	1842	1172~1507	—	1591
热导率 (W/(m·K))	233~58.2	—	0.17	116~174	—	0.24~0.47	128~186
氧化开始温度 (°C)	300	—	—	450	—	—	—
燃烧温度 (°C)	300~480	—	—	620~690	—	—	—
最高使用温度 (°C)	3000	1800 (真空中2500)	—	3000	1300	—	3200

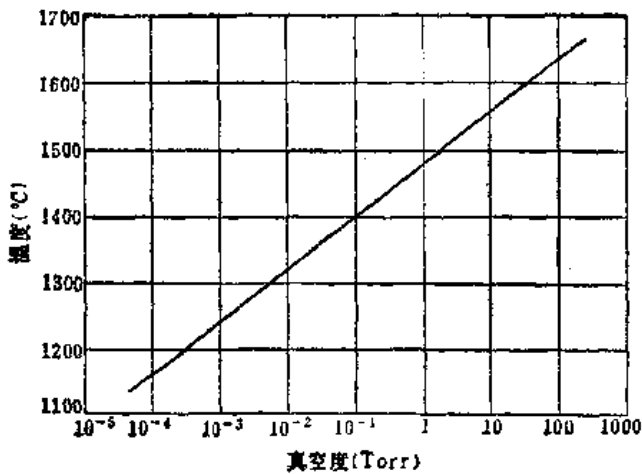


图20-5-6 硅钼棒在真空中的最高连续使用温度

化合物,但当温度低于1350°C时仍能应用。硫、氟、氯和碱对元件有害,酸类对元件发生反应,应避免接触。硅钼棒在各种气氛中的最高使用温度见表20-5-17。

硅钼棒在真空中使用时会降低其寿命,元件的最高连续使用温度与真空度的关系见图20-5-6。

硅钼棒(图20-5-7)的规格尺寸和电气性能见表20-5-18和表20-5-19。

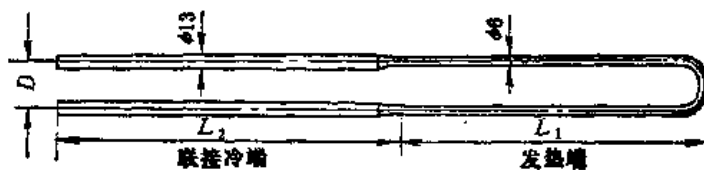


图20-5-7 U型硅钼棒

### 3. 碳质电热材料

碳质电热材料的电阻系数大,使用温度高。碳质电热材料可制成棒状、管状、粒状、粉状、毡状以及纤维状,还可埋入坩埚内加热。使用碳棒(管)或石墨棒(管)时,由于电阻值非常低,需要大电流,低电压回路,其形状和尺寸应按设计要求制作。碳粒炉是利用接触电阻,所以需要熟练的技术,用不同的粒径,充填密度以及断面积等来调节电阻值的大小。一般碳粒炉由2~3mm的碳粒组成,堆积电阻系数很大,但随炉内碳粒致密程度的增加而减少。碳粒逐步烧掉,必须及时补充新的碳粒。40~80目石墨粉可用作流动粒子炉的电热材料。

碳质电热材料的性能见表20-5-20。

由于石墨电热元件是挤压成型,所以石墨棒的径向电阻和轴向电阻并不相同。在达到400~600°C以前阻值减少,在此温度以上,电阻则随温度增加而增大。碳质电热元件的电阻温度系数都是负值,电阻随温度升高而减小,所以高温用电热元件通常以石墨为主。

碳质电热元件因氧化而消耗,以此作为寿命的界限。换言之,根据 $C + O_2 \rightarrow CO_2$ 这一反应,电热元件逐渐消耗变细,同时电阻增加,强度降低,寿命逐渐缩短。碳的氧化速度由炉内气氛中氧的分压及炉内温度而定,所以碳质电热元件必须在真空中或中性可控气氛中,或在还原性气氛中使用。

碳质电热材料在各种气氛中的最高使用温度如表20-5-21所示。

表20-5-21 碳质电热材料在  
各种气氛中的最高使用温度

炉内气氛	最高使用温度 (°C)
空气及氧	400°C以下稳定, 从 900°C左右起剧烈氧化
氮	3000
干氢	2500
湿氢	2000°C缓慢氧化
分解氨	2500
CO <sub>2</sub>	氧化
真空	2000

## 第 6 节 其它筑炉材料

### (一) 普通耐火材料

#### 1. 普通粘土砖

一般建筑用普通粘土砖是由耐火度低于1350°C的易熔粘土制造的, 按颜色的不同分为红砖和青砖两种; 按耐压强度的高低又可分为50、75、100、150和200五种标号。

普通粘土砖的外观要求应没有弯曲、缺棱、掉角和裂纹等缺陷。剖开断面没有影响强度的有害杂质和过大的孔洞。从色声上观察, 色深的火候足, 敲击时声音响亮的强度高; 色浅的欠火, 敲击时声哑的强度低。

砖吸水的多少与焙烧的火候有关。欠火的吸水多, 这种砖强度低, 易受冻融的破坏; 过火的砖吸水少, 这种砖的强度高、导热性大、保温性差。一般要求砖的吸水率在8%~16%之间。

普通粘土砖的标准尺寸为240mm×115mm×53mm, 体积密度为1600~1700kg/m<sup>3</sup>, 每块砖重约2.5kg。

普通粘土砖只能用于温度较低(<700°C)、并且温度变化不大的部位, 常用来砌筑炉子的外墙、烟道以及其它温度不太高的地方。

#### 2. 低钙铝酸盐耐火水泥

低钙铝酸盐耐火水泥是以优质矾土和石灰石为原料, 经烧结、磨细而制成的一种具有耐火性的水硬性胶结材料, 其各龄期强度见表20-6-1。

低钙铝酸盐耐火水泥的耐火度不应低于1650°C, 主要用来调制耐火混凝土和耐火泥浆。

### 3. 矾土水泥

矾土水泥的主要成分是弱碱性铝酸钙, 是一种硬化快、早期强度高、抗蚀性很强的水硬性胶结材料。矾土水泥标号及各龄期强度见表20-6-3其保存期为3~6个月。结块后不能使用。

矾土水泥在工业炉砌筑上主要用来调制耐火混凝土、耐火泥浆和密封涂料。使用时应注意不能与硅酸盐水泥、石灰等能析出Ca(OH)<sub>2</sub>的胶结材料混合使用, 这是由于Ca(OH)<sub>2</sub>作用形成含水铝酸三钙, 使水泥迅速凝结, 强度大大降低。它不能在高温(>30°C)、高湿度下养护, 不能用于接触碱液的工程。

表20-6-1 低钙铝酸盐耐火水泥各龄期强度

耐压强度 (MPa)			抗拉强度 (MPa)		
3天	7天	28天	3天	7天	28天
16	26	40	1.5	1.9	2.4

表20-6-2 矾土水泥标号及各龄期强度

水泥标号	抗压强度 (MPa)		抗拉强度 (MPa)	
	1天	3天	1天	3天
300	25	30	16	18
400	35	40	20	22
500	45	50	24	26

### (二) 化工材料

#### 1. 水玻璃

水玻璃的成分是硅酸钠(Na<sub>2</sub>O·nSiO<sub>2</sub>), 又名泡花碱, 其溶液呈青灰色半透明的稠状液体, 是一种矿物胶, 与有机胶相比, 不燃烧也不腐败。

水玻璃溶液中SiO<sub>2</sub>与Na<sub>2</sub>O的克分子比值称为水玻璃的模数(M), 通常模数为2.0~3.5, 密度为1.25~1.5。水玻璃的粘度随模数、密度的提高而增大, 但温度升高, 却使其粘度下降。温度低于零度时, 水玻璃的粘度急剧增大。冻结过的水玻璃, 加热后其性能基本不变, 仍能照常使用。

水玻璃溶液的密度较大时, 需加水稀释, 其用水量可按式计算:

$$V = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho - 1} \cdot V_0$$

式中 V——稀释用水量(L);

$\rho_0$ ——稀释前水玻璃溶液的密度;

$\rho$ ——稀释后水玻璃溶液的密度；

$V_0$ ——需要稀释的水玻璃溶液量(L)。

为了加速硬化，可掺入促凝剂硅氟酸钠，其加入量为水玻璃重量的12%~15%。水玻璃常用来调制泥浆、涂料和耐火混凝土。

## 2. 磷酸

磷酸有三种：正磷酸( $H_3PO_4$ )、焦磷酸( $H_4P_2O_7$ )和偏磷酸( $HPO_3$ )。在各种磷酸中，正磷酸是最稳定的一种。在工业炉砌筑中主要是采用正磷酸，简称磷酸。

磷酸是无色透明的晶体，极易溶于水。通常工业用磷酸含 $H_3PO_4$ 85%左右，呈浓浆状。磷酸主要用来配制各种磷酸盐耐水混凝土和磷酸盐泥浆。

磷酸盐耐水混凝土用的磷酸，其浓度通常为40%~50%。若用浓度为85%的工业磷酸，可按下式或表20-6-3加水稀释。

$$x = \frac{A - B}{B}$$

式中  $x$ ——每千克浓磷酸的加水量(kg)；

$A$ ——浓磷酸的浓度(%)；

$B$ ——需用稀磷酸的浓度(%)。

磷酸对金属、人的皮肤和衣服有腐蚀性，必须用陶瓷缸或其它耐酸容器配制。磷酸的稀释，宜先将水盛于缸中，然后将磷酸缓缓注入，随注随搅，这样容易搅均。

浓磷酸或配制的磷酸溶液，存放过久或气温低于5°C时，有结晶物析出或发生沉淀现象。这种情况并非变质，是由于容器不光洁、受冲撞振动产生晶种，导致磷酸发生结晶。处理结晶的方法是将磷酸加热至80°C以上，消除晶种，否则冷后又结

晶，发生沉淀要搅拌后再用。

## 3. 卤水

卤水的主要成分是氯化镁( $MgCl_2$ )，通常呈固态。使用前将卤水放在容器内，加入净水，并加热溶化，使其达到所要求密度的水溶液(表20-6-4)。卤水属有毒物种，注意保管。

卤水在工业炉砌筑上主要用来调制镁质泥浆和打结料。用卤水调制的泥浆容易凝固，因此，砌筑时泥浆应随调随用，放置时间不宜太久。

## 4. 硼酸

硼酸( $H_3BO_3$ )是白色细粉状。加热至171°C时，脱水变成 $B_2O_3$ ；至588°C时呈熔融状态，与石英形成玻璃相(硅酸硼)，降低了石英的熔点，加速石英转化为鳞石英和方石英。

工业硼酸中含 $H_3BO_3 \geq 96\%$ ，粘度 $< 0.5$ mm，不应受潮水化。硼酸主要用作打结酸性感应炉炉衬的粘结剂。

## 5. 氟硅酸钠

氟硅酸钠( $Na_2SiF_6$ )为白色或微黄色的粉末，在水中的溶解度很小，呈酸性反应，有毒。受潮结块时需经烘干、粉碎和过筛方可使用。烘干的温度不应超过65°C，以免氟硅酸钠析出 $SiF_4$ 而挥发掉。

根据 $Na_2SiF_6$ 含量的不同分为两级：即一级 $> 95\%$ 、二级 $> 90\%$ 。氟硅酸钠常加入水玻璃内作为促凝剂，以加速水玻璃的硬化。

## 6. 沥青

沥青为有机胶结材料，有石油沥青和煤焦沥青之分。一般采用煤焦沥青作为打结电弧炉炉衬和制砖时的粘结剂。

沥青是焦油分离后的残留物，为黑色固体，有

表20-6-3 磷酸稀释的加水量

磷酸浓度(%)	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40
密度 20°C (kg/m <sup>3</sup> )	1689	1633	1579	1526	1475	1426	1379	1335	1293	1253
每千克浓磷酸加 水量(kg)	0	0.063	0.134	0.214	0.307	0.417	0.546	0.70	0.89	1.125

表20-6-4 卤水密度与 $MgCl_2$ 含量的关系

卤水密度(kg/m <sup>3</sup> )	1200	1220	1240	1260	1280	1300
$MgCl_2$ 含量(g/mL)	0.90	1.05	1.40	1.65	1.90	2.15

高温沥青和中温沥青之分，电弧炉炉衬一般多用中温沥青。中温沥青的软化点为75~90℃，含游离碳18%~28%，灰分0.3%~0.5%，挥发物55%~75%，水分<5%。沥青初燃时发黄烟，有特殊的臭味。感温性强，冬季变脆，在200℃以上即碳化，挥发物去掉后留下的固定碳在炉衬中起骨架作用。沥青的质量以游离碳含量高，挥发物和水分子少为好。

### 7. 焦油

焦油是炼焦时的副产品，为黑色粘稠液体，其密度为1120~1220kg/m<sup>3</sup>。含灰分<0.15%，游离碳6%~10%，挥发物77%~89%，水分4%。焦

油在使用前需作脱水处理，使水分≤0.5%。焦油主要用来作为打结电弧炉炉衬和制作焦油沥青镁砂砖的粘结剂。

### (三) 纸浆

纸浆是亚硫酸纸浆废液的浓缩物，呈暗褐色稠状液体。纸浆为高分子粘滞性胶体物质，具有亲水性，溶于水中能降低水的表面张力，使液体的毛细管作用增大。纸浆稀薄溶液具有乳化、扩散及起泡性质，浓度高时粘性非常显著。但温度增高，会使粘度降低。在室温下其密度为1200~1300kg/m<sup>3</sup>。