

# 草稿 塑料齿轮设计制造方法之齿轮副理论设计方法研究\*

马瑞伍 张海臣 王玉昌 黄明华

(深圳市海翔铭实业有限公司, 广东 深圳 518131)

2007.04.23

Maruiwu

**摘要:** 以工程塑料为制造原料、模具为成型设备、注塑为生产方式的塑料齿轮制造方法有别于传统的金属齿轮切齿加工方法。这一不同决定了二者的设计方法必然存在差异。本文在分析塑料齿轮设计制造流程的基础上, 以渐开线圆柱塑料齿轮为研究对象, 从齿轮副参数设计、齿轮结构设计和齿轮力学校核三个方面阐述了塑料齿轮副理论设计的基本方法。

仅供参考

**关键词:** 渐开线 塑料齿轮 设计方法

**Abstract:** The processing method of plastic gear, taking the engineering plastic as its raw material, the mould as its injection device, and the injection molding as its manufacturing method, is different from that of tradition cutting tooth for metal gear, which determines there are some different between their design means. On the basis of analyzing the design and manufacture process of plastic gears, this paper will set forth the basic designing method of involute plastic gear on the following three aspects: the gear pair designing, the gear structure designing and the mechanics checked.

**Key words:** Involute gear, Plastic gear, Design method

## 1 前言

齿轮是机械产品最重要的基础零件。由齿轮啮合副组成的传动系统是近代机器中最常见的一种机械传动形式, 是实现机器动力和运动传递的主要方式<sup>[1]</sup>。随着现代材料科学的不断发展, 应用高性能的工程塑料制作的塑料齿轮已经广泛应用于汽车、精密仪器、钟表、玩具、电子产品等众多行业中。塑料齿轮以其质轻、耐磨、耐腐蚀、振动小、噪音低、化学性能稳定、加工成本低、便于大批量快速生产等众多优势得到许多传动机构设计及研发工程师的青睐。

目前, 国内塑料齿轮行业还处于起步阶段, 塑料齿轮的设计方法制造技术都有待进一步提高。本文根据我公司多年塑料齿轮设计制造的经验, 在塑料齿轮制造方法分析的基础上, 对最常用的渐开线圆柱齿轮的设计方法进行初步探讨。

---

基金项目: 国家火炬计划项目 (2005EB041357)

## 2 塑料齿轮设计制造流程简析

塑料齿轮种类繁多（如图 1 所示我公司生产的部分齿轮产品图），但其设计制造过程都是相似的，主要包括四步：齿轮副理论设计、齿轮模具设计、齿轮模具制造和齿轮注塑生产，其流程如图 2 所示。



图 1 塑料齿轮产品图

注：①直齿轮，②斜齿轮，③内齿，④齿条，⑤双斜齿，⑥椭圆齿轮，⑦不完整齿，⑧局部齿，⑨蜗轮，⑩蜗杆。

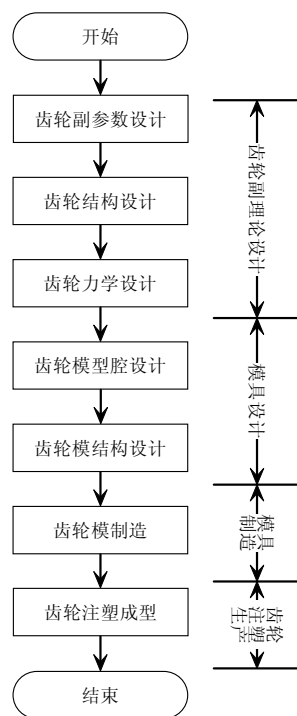


图 2 塑料齿轮设计制造流程

从图 2 所示的塑料齿轮设计制造流程可以看出，塑料齿轮的加工方法与金属齿轮的滚、插、剃等加工方法差异较大，它改变了人们对齿轮加工方法的传统认识。这种齿轮加工方法以工程塑料为制造原料，以模具为成型设备，以注塑为加工方法，通过注塑成型工艺即将高温熔化的塑料熔体注入模具型腔即可大批量的生产出相同规格的塑料齿轮产品。我们将塑料齿轮的这种加工方法称为“模塑法”。

不同的加工形式决定了塑料齿轮的设计方法将有别于金属齿轮。限于文章篇幅，本文将对塑料齿轮设计的第一步——塑料齿轮副理论设计方法进行初步探讨，而其余部分将在后续文章中再逐步介绍。

### 3 塑料齿轮副理论设计方法

塑料齿轮多应用于小功率精密传动系统中，其传递力矩相对较小，结构非常紧凑。鉴于常用塑料齿轮多为渐开线小模数（ $m < 1$ ）圆柱塑料齿轮，故本文以渐开线小模数塑料齿轮为研究对象，从齿轮几何参数选择、齿轮结构设计和力学校核三个方面介绍塑料齿轮副理论参数设计的基本方法。

#### 3.1 齿轮几何参数设计

塑料齿轮几何参数计算公式可参考《齿轮手册》中金属齿轮几何参数的计算公式。下文主要就塑料齿轮副几何参数的选择进行分析，而对计算公式就不再赘述。

##### 3.1.1 模数

模数是轮齿抗弯能力的重要标志，塑料齿轮模数的选择同样需要考虑强度因素。但在实际应用过程中，由于模塑法加工塑料齿轮与标准刀具关系不大，而且塑料齿轮多用于小功率精密传动系统中，故而可以采用“结构定模数”的指导思想选择模数。塑料齿轮模数的选择可以采用以下公式计算：

$$m = \frac{2a}{z_1(1+i_{12})} = \frac{2a}{z_1 + z_2}$$

式中： $m$  为模数，单位：mm； $a$  为设计中心距，单位：mm； $i_{12}$  代表齿数比， $i_{12} = \frac{z_2}{z_1}$ ； $z_1$ 、 $z_2$  则是两啮合齿轮的齿数。

### 3.1.2 齿数

模塑法加工塑料齿轮是通过齿轮模具型腔成型齿形，该过程不存在刀具与齿轮的成形加工运动，因此也就不会产生金属齿轮范成法加工中的“根切”现象。在保证啮合齿轮不发生啮合干涉的前提下，若仅考虑满足连续传动的条件（重合度  $\varepsilon > 1$ ），则对标准圆柱塑料齿轮（ $\alpha = 20^\circ$ ， $h_a^* = 1$ ）的最少齿数可以取到 3。<sup>[2]</sup>这也是很多塑料齿轮可选用少齿数的一个重要原因。

### 3.1.3 压力角

压力角是作用线与节线相交所成的锐角，它指出了啮合齿轮副的压力作用方向。在米制金属齿轮设计时，压力角可取  $20^\circ$ 、 $14.5^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $17.5^\circ$ 、 $22.5^\circ$ 、 $25^\circ$  和  $30^\circ$  等<sup>[1]</sup>。需要指出的是增大压力角对减小齿轮最少齿数有利，但减小压力角则对减小传动中的回差有利。因此，压力角的选择不能任意扩大和降低。在各国标准中，压力角一般规定： $\alpha = 20^\circ$ 。

在塑料齿轮设计时，我们推荐使用  $\alpha = 20^\circ$ 。另外，我们还可以根据实际应用情况选择其它压力角值，例如：为增大重合度降低噪音可选用  $\alpha = 14.5^\circ$ ；为提高承载能力提高轮齿强度可选  $\alpha = 22.5^\circ$  或  $\alpha = 25^\circ$ ；甚至还可以选择双压力角齿形，即轮齿两侧为不同压力角的渐开线齿形，如图 3 所示的扶壁齿形(buttruss-shaped teeth)<sup>[3]</sup>。

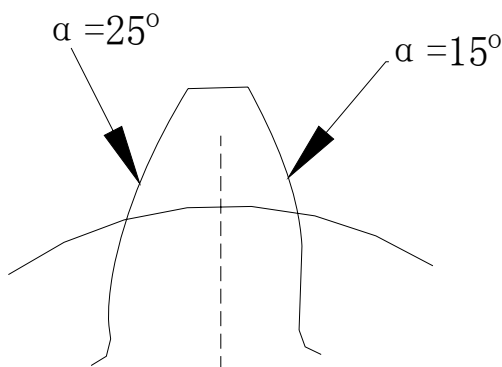


图 3 扶壁齿形

### 3.1.4 变位系数

渐开线齿轮传动的可分性是变位的理论依据。在实际设计时，齿轮变位主要考虑四个因素：一是改善齿根强度，二是调整装配中心距，三是利于修正齿形干

涉，四是调整滑动率使之接近或相等<sup>[1]</sup>。对于塑料齿轮而言，这些都是选择变位系数的重要依据。另外，基于塑料齿轮“结构定模数”的设计思想，在塑料齿轮变位系数选择时还要考虑与模数相结合，防止因变位致使齿形变形过大，而且这也有利于齿形的收缩设计。对于塑料齿轮，推荐的变位系数取值范围是：

$$0 \leq x \leq \frac{m}{2}。$$

### 3.1.5 齿顶高系数

在塑料齿轮设计时，齿顶高系数可以根据使用状况选择长齿制 ( $h_a^* > 1$ )、正常齿制 ( $h_a^* = 1$ ) 和短齿制 ( $h_a^* < 1$ )。长齿制利于提高齿轮副的重合度，降低噪音、提高承载能力；短齿制则重在提高齿根的弯曲强度。

### 3.1.6 顶隙系数

顶隙的主要作用是利于润滑油的流动，并避免两齿之间的碰撞。在金属小模数齿轮设计标准中规定顶隙  $c^* = 0.35$ 。由于塑料齿轮多工作在无润滑环境中，而且某些塑料具有自润滑性能，故顶隙的选择根据实际情况进行选择，推荐顶隙系数的选择范围是： $c^* = 0.1 \sim 0.35$ 。

### 3.1.7 传动质量指标验算

传动质量指标主要包括重合度和滑动率。在塑料齿轮副理论设计时，由于塑料是一种粘弹性体材料<sup>[4]</sup>，它组合了固体的弹性和液体的粘性两者的特征，在承载运动时，齿形变形受加载方式、温度、湿度等影响较大，故而推荐重合度适当取大一些，而滑动率数值比较相近即可。

### 3.1.8 齿轮公差选取原则

目前，国内对塑料齿轮精度还没有成文的标准可以参考。在设计过程中，对齿轮公差（此处不含齿形检测公差）的选择也多以经验为主。下面我们以表格的形式给出齿轮常用尺寸公差的选择原则，如表 1 所示。

表 1 塑料齿轮公差选择原则

尺寸名称	公差选择原则	示例
齿顶圆直径	以负偏差为主，即上偏差为零，下偏差为负值。	$d_{a-0.05}^0$
齿顶圆跳动	一般取 0.05mm	

公法线长度	以负偏差为主，即上偏差为零，下偏差为负值。	$W_k^0$
中心距	以正偏差为主，即上偏差为正数，负偏差为零。	$a_0^{+0.05}$

注：

- (1) 表中 1~3 的尺寸公差可参考 JIS 等相关的齿形精度标准；
- (2) 啮合齿轮副中心距公差选取的主要目的是在保证齿轮正确啮合的前提下便于齿轮的装配。此公差选取的经验公式为： $a'_{\min} = a + 0.05m$ ，式中： $a'$  为啮合齿轮副的实际中心距； $a$  为啮合齿轮副的理论中心距； $m$  为啮合齿轮副的模数。另外，中心距调整的估算公式还可文献【5】。

### 3.2 齿轮结构设计

塑料齿轮本质上是一种塑料结构件，但其主要功能则是用于动力与运动传递。因此，塑料齿轮结构必须遵循传动零件设计和塑料结构件设计两个方面的规律进行综合设计。根据结构功能的不同，塑料齿轮可以划分为传动和辅助结构两大部分。其中，传动部分是指轮齿，辅助结构部分包括轮缘、轮毂和加强筋四部分。塑料齿轮结构如图 4 所示。

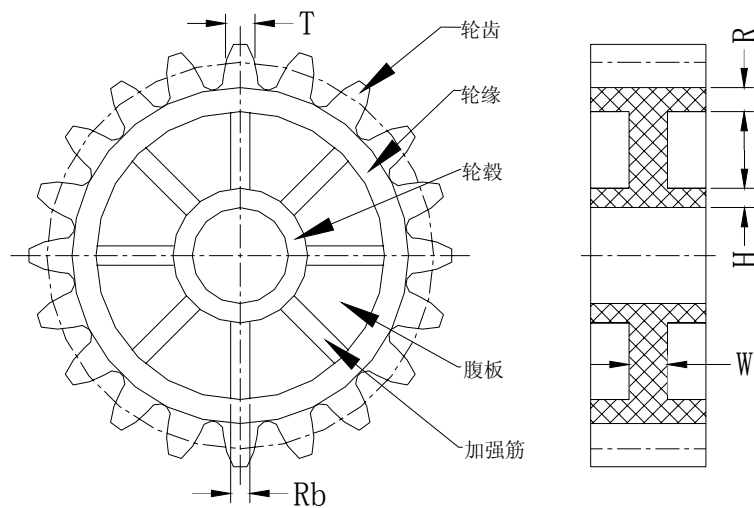


图 4 塑料齿轮结构图

#### 3.2.1 轮齿设计

轮齿是齿轮实现传动的重要工作部分，是整个齿轮的核心。塑料齿轮的轮齿设计应注意两个方面：一是齿形修正，二是平衡齿厚。

### 3.2.1.1 齿形修正

塑料齿轮采用模塑法加工时，齿形成型依靠模具型腔的形状来保证。由于型腔多采用线割方式加工，因此不存在金属齿轮范成法加工中的根切现象。但没有根切并不意味着齿形不会产生干涉，所以要保证塑料轮齿拥有良好的啮合齿廓就必须进行齿形的修正。这也是轮齿设计必须要重视的问题。

### 3.2.1.2 平衡齿厚

当两个齿轮啮合时，由于两个齿轮齿数不等而模数和压力角相等，导致计算出来的两个齿轮齿根部分宽度差别较大。这样在齿轮副承载运动时，齿根宽度较小的小齿轮成为该齿轮副的强度最弱处。为避免这一现象，我们可以通过调整变位系数和齿形修正等方法使两齿轮齿根处宽度比较接近或相等。若采用调整变位系数来平衡齿厚，则可以让小齿轮正变位、大齿轮负变位来实现。这种平衡齿厚的塑料齿形在PGT塑料齿形中是常见的，如图5所示。<sup>[5]</sup>

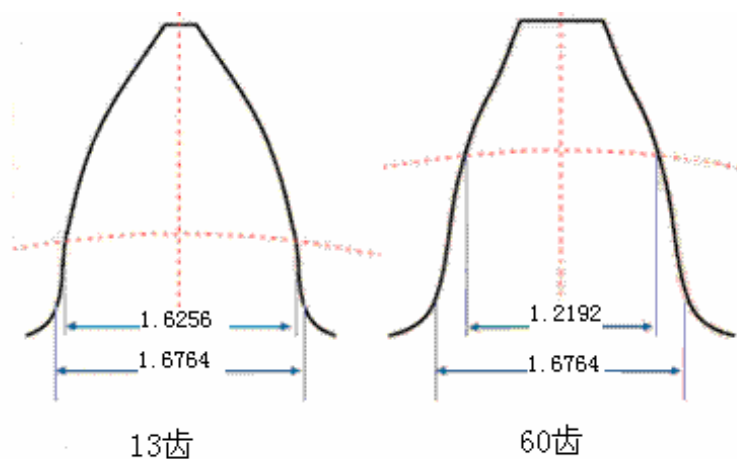


图 5 啮合齿轮副的两齿轮齿厚图

### 3.2.2 辅助结构设计

塑料齿轮辅助结构部分设计的指导原则是：在保证齿轮整体强度要求的前提下，力求整体结构壁厚均匀，以利于注塑生产。为便于结构设计，我们选取齿轮分度圆齿厚作为标称壁厚（T），辅助结构的壁厚都以标准壁厚为基准进行选择。辅助结构的壁厚选择经验公式如表2所示。

表 2 塑料齿轮辅助结构壁厚设计

名称	符号	壁厚计算经验公式
----	----	----------

轮缘厚度	R	$R = (1.25 \sim 3)T$
腹板厚度	W	最佳取值： $W = R$ ；若考虑强度因素，则 $W \leq (1.25 \sim 3)R$ 。
轮毂厚度	H	最佳取值： $H = R$ ；若考虑强度因素，则 $H \leq (1.25 \sim 3)R$ 。
加强筋厚度	Rb	$Rb \approx T$

另外，塑料齿轮不同结构过渡处圆角的取值也应考虑壁厚是否均匀的问题。对过渡处倒圆角时可参考图 6 所示方法进行设计。图中， $t$  为壁厚，内角  $R_1 = 0.5t$ ，外角  $R_2 = 1.5t$ 。

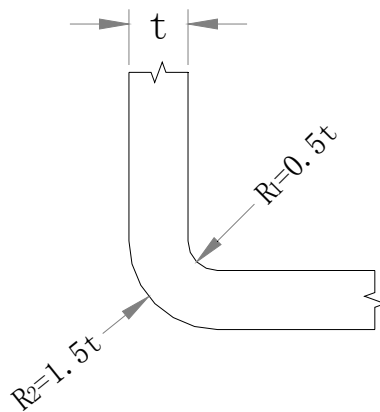


图 6 圆角设计

### 3.3 齿轮力学设计

齿轮力学设计主要是指对齿轮力学指标的校核计算。塑料齿轮主要有表面磨损、热失效和轮齿过载折断三种失效形式，由于塑料为粘弹性体材料，温度对塑料的强度等力学性能具有很大影响，故而温度在塑料齿轮失效影响因素中占主导地位，所以塑料齿轮的力学设计主要考虑两个方面的因素：一是温度，二是强度。

#### 3.3.1 温度估算

对塑料齿轮工作时的轮齿温度计算可以采用 Henri Yelle 提出的无润滑状态轮齿温度计算公式： $T = T_a + k\omega^x v^y$ ，式中： $T$  为轮齿温度， $T_a$  为周围环境温度， $k$ 、 $x$ 、 $y$  为材料相关系数， $\omega$ 、 $v$  代表切向力和节圆线速度。该方法是在综合考虑速度、载荷和周围环境的影响下给出的，可用来估算塑料齿轮工作时轮齿的工作温度。显然，该方法计算出的温度值偏大，但对设计而言是可以采用的。

另外，文献【4】指出塑料齿轮工作过程中热量产生主要有两个来源：一是



摩擦生热，二是滞后能耗生热。文献中还给出了相应的计算公式，本文在此不再赘述。

### 3.3.2 强度校核

由于塑料与金属在材料本质上存在较大的差异，所以完全照搬金属齿轮的强度校核方法来校核塑料齿轮是不可取的。目前，对塑料齿轮强度校核的方法还未形成统一成熟的理论方法。在此，本文仅列出直齿圆柱塑料齿轮的校核公式<sup>[6]</sup>，以供工程人员设计时参考。公式如下：

$$\left\{ \begin{array}{l} P = \sigma_b \cdot b \cdot m \cdot y' \dots\dots\dots(1) \\ T = \frac{\sigma_b \cdot b \cdot d^2 \cdot y'}{2000z} \dots\dots\dots(2) \\ \sigma_b = \sigma'_b \times \frac{K_V \times K_T \times K_L \times K_M \times K_G}{C_s} \dots\dots\dots(3) \\ S_c = \sqrt{\frac{P}{b \cdot d_1} \cdot \frac{i+1}{i} \cdot \frac{1.4}{\left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}\right) \sin 2\alpha}} \dots\dots\dots(4) \end{array} \right.$$

式中：

- $P$ ——作用于齿上的切向负载，单位：N；
- $\sigma_b$ ——在有问题的运转条件下的最大弯曲应力，单位：MPa；
- $b$ ——齿距，单位：mm；
- $m$ ——模数，单位：mm；
- $y'$ ——在节点附近的齿形参数；
- $T$ ——扭矩，单位：N·m；
- $d$ ——分度圆直径，单位：mm；
- $z$ ——齿数；
- $\sigma'_b$ ——标准条件下的最大弯曲许用应力，单位：mm；
- $C_s$ ——使用状态系数；
- $K_V$ ——速度修正系数；
- $K_T$ ——温度系数；
- $K_L$ ——润滑系数；
- $K_M$ ——材质系数；

$K_G$ ——材料强度修正系数;

$S_c$ ——面压, 单位: MPa;

$d_1$ ——小齿轮的分度圆直径, 单位: mm;

$i$ ——齿数比,  $i = \frac{z_2}{z_1}$ ;

$E$ ——齿轮材料的弹性系数, 单位: MPa;

$\alpha$ ——压力角, 单位: 角度 ( $^\circ$ );

该计算过程中涉及许多经验参数的选择, 具体推导过程及参数选择方法以及其他形式的齿轮的校核方法请参考文献【6】, 在此不再赘述。

## 4 结束语

随着产品轻量化设计理念的深入人心, 塑料齿轮的应用范围得到了极大的拓展, 同时塑料齿轮的市场需求的也在急剧膨胀。鉴于国内塑料齿轮的设计制造技术还处于起步阶段, 并且国内还没有一份关于塑料齿轮的设计标准, 故而加强塑料齿轮设计制造技术的研究已成为国内工程设计及科研工作者亟待解决的重要课题。基于此点, 本文根据我公司多年塑料齿轮设计制造的实践经验对塑料齿轮的设计进行了初步分析, 以期能为广大塑料齿轮设计人员提供一点借鉴。

### 参考文献:

1. 齿轮手册编委会. 齿轮手册. 北京: 机械工业出版社, 2006.
2. 高慧. 渐开线齿轮的最少齿数设计及根切控制. 山东交通科技, 2006 (3).
3. AGMA STANDARD . Tooth Proportions for Plastic Gears . ANSI/AGMA 1106-A97. 1997.
4. 陆松, 孟惠荣. 塑料齿轮的热分析. 塑料, 2003 (5).
5. A Guide to Plastic Gearing. LNP Corporation, 1996.
6. 日本宝理塑料株式会社. 塑料齿轮设计精要.

### 关于作者:

马瑞伍 (1979.10-), 男, 山东潍坊人. 工学硕士. 2006.07 毕业于广东工业大学材料加工工程专业计算机模拟与控制&模具 CAD/CAE/CAM 方向. 现就职于深圳市海翔铭实业有限公司, 主要从事塑料齿轮及传动系统的设计与开发工作。

信箱: mrmrw@sohu.com

电话: 0755-28095805

地址: 深圳市宝安区龙华镇上塘宇丰城工业区 3 栋, 深圳市海翔铭实业有限公司研发部

邮编: 518131