

# 冷挤压三层组合凹模的优化设计

徐小兵

(江汉石油学院 机械工程系,湖北 荆州 434023)

[摘要] 应用厚壁圆筒的弹性解,分析了冷挤压三层组合凹模具有最大弹性极限时的优化设计,推导了三层组合凹模的最大承压、各层分界面半径和分界面过盈量的优化设计计算公式。利用所推导的计算公式,可实现三层组合凹模几何参数的最佳设计。

[关键词] 冷挤压;组合凹模;优化设计;弹性极限;厚壁圆筒

中图分类号: TG375.41 文献标识码: A 文章编号: 1000-8446(2003)03-0059-03

## The Optimum Design on Three-layers Assembled Cavity Die of Cold Extrusion

XU Xiaobing

(Jiangnan Petroleum College, Jingzhou 430023, China)

**Abstract:** Using elastic solution of thick-wall cylinder, it is analyzed that the optimum design on three-layers assembled cavity die of cold extrusion under the elastic limit stress. It is inferred that the optimum design formulae of limit pressure-bearing capacity, diameter and interference-fit capacity of boundary between different layers. It is carried out that the optimum design of geometric parameters on three-layers assembled cavity die of cold extrusion by interfered formulae.

**Key words:** cold extrusion; assembled cavity die; optimum design; elastic limit; thick-wall cylinder

冷挤压模具中,凸模的强度和寿命通常比凹模大。因此,冷挤压模具的强度和寿命,往往取决于凹模的强度和寿命。为提高凹模的强度和寿命,除了正确选择其材料和热处理方法,正确设计凹模的结构形状、优化设计参数尤其重要。凹模通常有整体式和组合式,采用组合凹模可有效提高凹模的强度和寿命。这是由于组合凹模各层的配合具有一定的过盈量,所以装配后,内层产生切向压应力,这一切向压应力与冷挤压时引起的切向拉应力方向相反,从而抵消或降低了凹模内层的切向拉应力,达到了提高凹模强度和寿命的目的。

由于组合凹模强度比整体式凹模强度高,所以当冷挤压单位挤压力较小时,采用整体式凹模;当单位挤压力较大时,则采用双层或多层组合凹模。经

验表明,三层组合凹模是最好的结构形式,进一步增加层数,可以使凹模中的应力分布趋于更均匀,但给制造和装配带来了困难<sup>[1]</sup>。

笔者从组合凹模的弹性解入手,讨论了使三层组合凹模在实现承受最大挤压应力时,组合凹模设计参数的计算。

### 1 三层组合凹模的弹性解

如图1所示,通常凹模导向角  $\alpha = 30^\circ$ ,配合角和  $\beta$  约为  $1^\circ 30'$ ,所以三层组合凹模可视为三层厚壁圆筒。

若凹模内半径为  $r_i$ ,外半径为  $r_0$ ,分界面半径为  $r_1$  和  $r_2$ ,凹模所受内压力为  $p_i$ ,分界面间的配合

收稿日期:2002-11-27

作者简介:徐小兵(1962-),男,硕士,副教授,主要从事通用机械和模具设计及制造的教学和研究工作。

力为  $p_1$  和  $p_2$ , 根据弹性力学<sup>[2]</sup> 解答, 当只受有内压力  $p_i$  作用时, 三层组合凹模所受应力为:

$$\begin{aligned} r &= \frac{r_i^2 p_i}{r_0^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) \\ &= \frac{r_i^2 p_i}{r_0^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2}\right) \end{aligned} \quad (1)$$

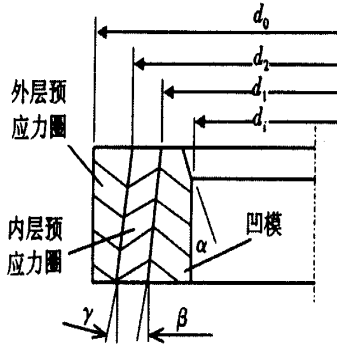


图1 三层组合凹模

当只考虑凹模与内层预应力圈的配合力  $p_1$  时, 凹模的应力为:

$$\begin{aligned} r &= \frac{-r_1^2 p_1}{r_1^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_i^2}{r^2}\right) \\ &= \frac{-r_1^2 p_1}{r_1^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_i^2}{r^2}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

内、外预应力圈的应力为:

$$\begin{aligned} r &= \frac{r_1^2 p_1}{r_0^2 - r_1^2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) \\ &= \frac{r_1^2 p_1}{r_0^2 - r_1^2} \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

当只考虑内、外层预应力圈间的配合力  $p_2$  时, 凹模与内层预应力圈的应力为:

$$\begin{aligned} r &= \frac{-r_2^2 p_2}{r_2^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_i^2}{r^2}\right) \\ &= \frac{-r_2^2 p_2}{r_2^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_i^2}{r^2}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

外层预应力圈的应力为:

$$\begin{aligned} r &= \frac{r_2^2 p_2}{r_0^2 - r_2^2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) \\ &= \frac{r_2^2 p_2}{r_0^2 - r_2^2} \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

在弹性范围内, 将应力叠加, 那么三层组合凹模在内压力  $p_i$  作用下的凹模应力为:

$$\begin{aligned} r &= \frac{r_i^2 p_i}{r_0^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) - \frac{r_1^2 p_1}{r_1^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_i^2}{r^2}\right) - \\ &\quad \frac{r_2^2 p_2}{r_2^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_i^2}{r^2}\right) \\ &= \frac{r_i^2 p_i}{r_0^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) - \frac{r_1^2 p_1}{r_1^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_i^2}{r^2}\right) - \\ &\quad \frac{r_2^2 p_2}{r_2^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_i^2}{r^2}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

内层预应力圈的应力为:

$$\begin{aligned} r &= \frac{r_i^2 p_i}{r_0^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) + \frac{r_1^2 p_1}{r_0^2 - r_1^2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) - \\ &\quad \frac{r_2^2 p_2}{r_2^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_i^2}{r^2}\right) \\ &= \frac{r_i^2 p_i}{r_0^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2}\right) + \frac{r_1^2 p_1}{r_0^2 - r_1^2} \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2}\right) - \\ &\quad \frac{r_2^2 p_2}{r_2^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_i^2}{r^2}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

外层预应力圈的应力为:

$$\begin{aligned} r &= \frac{r_i^2 p_i}{r_0^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) + \frac{r_1^2 p_1}{r_0^2 - r_1^2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) + \\ &\quad \frac{r_2^2 p_2}{r_0^2 - r_2^2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) \\ &= \frac{r_i^2 p_i}{r_0^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2}\right) + \frac{r_1^2 p_1}{r_0^2 - r_1^2} \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2}\right) + \\ &\quad \frac{r_2^2 p_2}{r_0^2 - r_2^2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

## 2 三层组合凹模的优化设计

若设三层组合凹模的各组成部分的弹性模量和泊松比分别相等, 即:  $E_1 = E_2 = E_3 = E$ ,  $\nu_1 = \nu_2 = \nu_3 = \nu$ , 则由凹模与内层预应力圈之间的过盈量  $\delta_1$  及内、外层预应力圈之间的过盈量  $\delta_2$  引起的配合力  $p_1$  及  $p_2$  分别为<sup>[3]</sup>。

$$p_1 = \frac{E \cdot \delta_1}{r_1} \cdot \frac{(r_1^2 - r_i^2)(r_0^2 - r_1^2)}{2 r_1^2 (r_0^2 - r_i^2)} \quad (9)$$

$$p_2 = \frac{E \cdot \delta_2}{r_2} \cdot \frac{(r_2^2 - r_i^2)(r_0^2 - r_2^2)}{2 r_2^2 (r_0^2 - r_i^2)} \quad (10)$$

将(9)、(10)式代入(6)、(7)、(8)式中, 可得:

凹模 ( $r_i$   $r$   $r_1$ ) 应力:

$$r = \frac{r_i^2 p_i}{r_0^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) - \frac{E \cdot \delta_1}{2 r_1} \cdot \frac{r_0^2 - r_1^2}{r_0^2 - r_i^2} \cdot$$

$$\begin{aligned}
 & \left(1 - \frac{r_i^2}{r^2}\right) - \frac{E \cdot 2}{2 r_2} \cdot \frac{r_0^2 - r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \cdot \left(1 - \frac{r_i^2}{r^2}\right) \\
 &= \frac{r_i^2 p_i}{r_0^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2}\right) - \frac{E \cdot 1}{2 r_1} \cdot \frac{r_0^2 - r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \cdot \\
 &\left(1 + \frac{r_i^2}{r^2}\right) - \frac{E \cdot 2}{2 r_2} \cdot \frac{r_0^2 - r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \cdot \left(1 - \frac{r_i^2}{r^2}\right) \quad (11)
 \end{aligned}$$

内层预应力圈(  $r_1$   $r$   $r_2$  ) 应力:

$$\begin{aligned}
 r &= \frac{r_i^2 p_i}{r_0^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) - \frac{E \cdot 1}{2 r_1} \cdot \frac{r_1^2 - r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \cdot \\
 &\left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) - \frac{E \cdot 2}{2 r_2} \cdot \frac{r_0^2 - r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \cdot \left(1 - \frac{r_i^2}{r^2}\right) \\
 r &= \frac{r_i^2 p_i}{r_0^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) + \frac{E \cdot 1}{2 r_1} \cdot \frac{r_1^2 - r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \cdot \\
 &\left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) - \frac{E \cdot 2}{2 r_2} \cdot \frac{r_0^2 - r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \cdot \left(1 - \frac{r_i^2}{r^2}\right) \quad (12)
 \end{aligned}$$

外层预应力圈(  $r_2$   $r$   $r_0$  ) 应力:

$$\begin{aligned}
 r &= \frac{r_i^2 p_i}{r_0^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) - \frac{E \cdot 1}{2 r_1} \cdot \frac{r_1^2 - r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \cdot \\
 &\left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) + \frac{E \cdot 2}{2 r_2} \cdot \frac{r_2^2 - r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \cdot \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) \\
 &= \frac{r_i^2 p_i}{r_0^2 + r_i^2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) + \frac{E \cdot 1}{2 r_1} \cdot \frac{r_1^2 - r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \cdot \\
 &\left(1 + \frac{r_0^2}{r^2}\right) + \frac{E \cdot 2}{2 r_2} \cdot \frac{r_2^2 - r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \cdot \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2}\right) \quad (13)
 \end{aligned}$$

对于凹模(  $r_i$   $r$   $r_1$  ), 由(11) 式得:

$$\begin{aligned}
 -r &= \frac{r_i^2 p_i}{r_0^2 - r_i^2} \cdot \frac{2 r_0^2}{r^2} - \frac{E \cdot 1}{2 r_1} \cdot \frac{r_0^2 - r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} - \frac{E \cdot 2}{2 r_2} \cdot \\
 &\frac{r_0^2 - r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \cdot \frac{r_i^2}{r^2} \quad (14)
 \end{aligned}$$

当  $r = r_i$  时, (14) 式右边达最大值。使用屈雷斯加屈服条件, 得:

$$p_i^e = \frac{s_1}{2} \cdot \frac{r_0^2 - r_i^2}{r_0^2} + \frac{E \cdot 1}{2 r_1} \cdot \frac{r_0^2 - r_i^2}{r_0^2} + \frac{E \cdot 2}{2 r_2} \cdot \frac{r_0^2 - r_i^2}{r_0^2} \quad (15)$$

对于内层预应力圈(  $r_1$   $r$   $r_2$  ), 由(12) 式得:

$$\begin{aligned}
 -r &= \frac{r_i^2 p_i}{r_0^2 - r_i^2} \cdot \frac{2 r_0^2}{r^2} + \frac{E \cdot 1}{2 r_1} \cdot \frac{r_1^2 - r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \cdot \\
 &\frac{r_0^2}{r^2} - \frac{E \cdot 2}{2 r_2} \cdot \frac{r_0^2 - r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \cdot \frac{r_i^2}{r^2} \quad (16)
 \end{aligned}$$

当  $r = r_1$  时, (16) 式右边达最大值。同理可得:

$$p_i^e = \frac{s_2}{2} \cdot \frac{r_0^2 - r_i^2}{r_0^2} \cdot \frac{r_1^2}{r_i^2} - \frac{E \cdot 1}{2 r_1} \cdot \frac{r_1^2 - r_i^2}{r_i^2} + \frac{E \cdot 2}{2 r_2} \cdot \frac{r_0^2 - r_i^2}{r_0^2} \quad (17)$$

对于外层预应力圈(  $r_2$   $r$   $r_0$  ), 由(13) 式得:

$$\begin{aligned}
 -r &= \frac{r_i^2 p_i}{r_0^2 - r_i^2} \cdot \frac{2 r_0^2}{r^2} + \frac{E \cdot 1}{2 r_1} \cdot \frac{r_1^2 - r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} + \frac{r_0^2}{r^2} + \frac{E \cdot 2}{2 r_2} \cdot \\
 &\frac{r_2^2 - r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \cdot \frac{r_0^2}{r^2} \quad (18)
 \end{aligned}$$

当  $r = r_2$  时, (18) 式右边达最大值。同理可得:

$$p_i^e = \frac{s_3}{2} \cdot \frac{r_0^2 - r_i^2}{r_0^2} \cdot \frac{r_1^2}{r_i^2} - \frac{E \cdot 1}{2 r_1} \cdot \frac{r_1^2 - r_i^2}{r_i^2} - \frac{E \cdot 2}{2 r_2} \cdot \frac{r_0^2 - r_i^2}{r_i^2} \quad (19)$$

上述(15)、(17)、(19) 式中的  $s_1$ 、 $s_2$  和  $s_3$  分别为凹模、内层预应力圈和外层预应力圈材料的屈服极限。

因为(15)、(17)、(19) 式代表同一组合凹模的弹性极限载荷, 因此, 上述 3 式的  $p_i^e$  相等, 由此可得:

$$1 = \frac{r_1}{E} (s_2 - s_1 \cdot \frac{r_1^2}{r_i^2}) \quad (20)$$

$$2 = \frac{r_2}{E} (s_3 - s_2 \cdot \frac{r_1^2}{r_i^2}) \quad (21)$$

将(20)、(21) 式代回到(15)、(17)、(19) 式的任一式中, 得:

$$p_i^e = \frac{s_1}{2} \left(1 - \frac{r_i^2}{r_1^2}\right) + \frac{s_2}{2} \left(1 - \frac{r_1^2}{r_2^2}\right) + \frac{s_3}{2} \left(1 - \frac{r_2^2}{r_0^2}\right) \quad (22)$$

由  $\frac{\partial p_i^e}{\partial r_1} = 0$  和  $\frac{\partial p_i^e}{\partial r_2} = 0$  得:

$$\text{当 } r_1 = \sqrt[6]{\frac{2 s_1}{s_2 \cdot s_3} \cdot r_i^4 \cdot r_0^2} \quad (23)$$

$$r_2 = \sqrt[6]{\frac{s_1 \cdot s_2}{s_3} \cdot r_i^2 \cdot r_0^4} \quad (24)$$

时,  $P_i^e$  达到极大值, 即

$$p_i^e \max = \frac{s_1 + s_2 + s_3}{2} - \frac{3}{2} \cdot \sqrt[3]{s_1 \cdot s_2 \cdot s_3 \cdot \frac{r_i^2}{r_0^2}} \quad (25)$$

也就是说, 三层组合凹模的最佳设计为: 当三层组合凹模内外半径  $r_i$ 、 $r_0$  取一定值时, 三层组合凹模分界面半径  $r_1$ 、 $r_2$  和分界面过盈量  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  分别满足(23)、(24) 式和(20)、(21) 式时, 三层组合凹模具有最大的弹性极限, 此时, 三层组合凹模所能承受的最大内压则由(25) 式决定。

### 3 算例

某三层组合凹模,承受内压  $p_i = 1450\text{MPa}$ ,凹模内半径为  $r_1 = 20\text{mm}$ ,凹模和内、外层预应力圈的屈服极限分别为  $\sigma_{s1} = 2000\text{MPa}$ ,  $\sigma_{s2} = 1600\text{MPa}$ ,  $\sigma_{s3} = 1300\text{MPa}$ ,弹性模量  $E = 2.1 \times 10^5\text{MPa}$ ,试决定此三层组合凹模的尺寸。

根据三层组合凹模的最佳设计公式(25)、(23)、(24)、以及(20)、和(21)式,可求得该三层组合凹模的外半径  $r_0$ 、分界面半径  $r_1$ 、 $r_2$  以及分界面过盈量  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  分别为:  $r_0 = 74.9\text{mm}$ ,  $r_1 = 34.6\text{mm}$ ,  $r_2 = 53.6\text{mm}$ ,  $\delta_1 = 0.154\text{mm}$ ,  $\delta_2 = 0.162\text{mm}$ 。

### 4 结论

应用(20)、(21)、(23)、(24)和(25)各计算公式,可求解三层组合凹模在最大弹性极限时的最佳几何参数和最大承压。上述公式的计算结果对模具几何参数的选择和优化模具承压能力具有重要指导意义。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 丁松聚. 冲模设计[M]. 北京:机械工业出版社,1994: 211 - 228.
- [2] 徐芝伦. 弹性力学(上册)[M]. 北京:高等教育出版社, 1986:85 - 88.
- [3] 许定奇,孙荣文. 过盈联接的设计、计算与装配[M]. 北京:中国计量出版社,1992:17 - 18.

(上接第 58 页)

标用原始值,保证与其它与此圆弧共点的线索不会  
有间断点

End Sub

### 3 应用实例

以“佳通”轮胎上的字母标识为例,经过本次开发后的图案如图 3 所示,可以快速实现整块字的完全圆弧化(包括 25°倾角的完全圆弧化),且可以对诸如安全标志等小而多字母实现快速、精确调整间距。经过本程序的运行,可实现所有字母间距的

精确调整、字体旋转和完全圆弧化,并且运行后的字母是线条文字,易于编写代码和 NC 加工。

### 4 结束语

VB 是现在较为流行的可视化编程之一,利用 AutoCAD 提供的 ActiveX Automation 技术,使 VB 成为 AutoCAD 的又一个强有力的二次开发工具,应用 VB 针对轮胎模上字母排布问题对 AutoCAD2000 进行二次开发,可以实现字间距的精确调整、字体旋转和完全圆弧化,有利于编写代码和加工,实际应用效果良好。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 盛忠起,赵立杰,刘永贤. 基于 ActiveX 技术用面向对象方法进行 AutoCAD 二次开发[J]. 电脑开发与应用, 2000,13(4):24 - 26.
- [2] 郭朝勇. AutoCAD R14(中文版)二次开发技术[M]. 北京:清华大学出版社,1999:384 - 385.

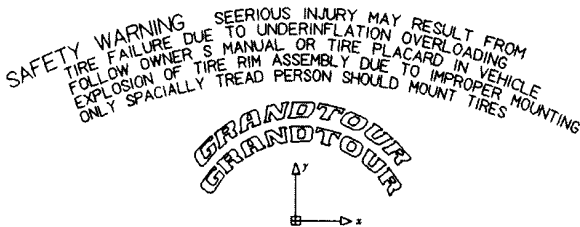


图 3 “佳通”标志圆弧化旋转示意