

齿轮温锻组合凹模设计

陈晓伟, 池成忠, 白庆平

(太原理工大学 材料科学与工程学院, 太原 030024)

摘要: 运用 Pro/E 4.0 构建齿轮模型得出齿轮横截面积, 把凹模齿形部分看成当量圆, 通过齿轮横截面积得到当量直径, 从而利用 Lamé 公式理论计算与经验数据的有效结合, 对齿轮温锻成形的组合凹模进行优化设计和强度校核。

关键词: 温锻; 组合凹模; 强度校核

中图分类号: TG315.2 **文献标识码:** A

文章编号: 1674-6457(2011)03-0038-04

Design of Combined Die of Warm Forging of Gear

CHEN Xiao-wei, CHI Cheng-zhong, BAI Qing-ping

(College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The model of gear is constructed by Pro/e 4.0 to get the cross sectional area of gear. Taking tooth form of female die as equivalent circle, the equivalent diameter is obtained through the cross sectional area of gear, so that optimal design and strength check of the combined die in warm forging of gears can be carried out by effective combination of theoretic calculation of formula of Lamé and experiential data.

Key words: warm forging; combined die; strength check

齿轮精锻成形, 与传统的切削加工相比, 拥有加工效率高、生产成本低、材料利用率高等显著优势, 而且可以获得更好的材料组织从而提高齿轮的机械性能, 因而受到人们的广泛关注^[1-4]。尤其是分流原理和浮动凹模原理在这一领域的应用^[5-6], 更加推进了齿轮精锻成形的发展, 为其在实际生产中的应用奠定了坚实的基础。

齿轮精锻分为冷锻、热锻、温锻。对于冷锻成形, 变形抗力大、材料流动性差, 尤其是机械强度高、冷作硬化敏感的材料成形困难; 对于热锻成形, 产品的尺寸精度低、表面质量差、钢件表面氧化严重、模具寿命低、生产条件差。温锻成形是在冷锻基础上发展起来的一种成形新工艺, 是在再结晶温度之下

某个合适温度成形的精密锻造工艺。温锻精密成形技术既突破冷锻成形中变形抗力大, 零件形状不能太复杂, 需增加中间热处理和表面处理工步的局限性, 又克服了热锻中因强烈氧化作用而降低表面质量和尺寸精度的问题。它同时具有冷锻和热锻的优点, 克服了二者的缺点^[7-8]。齿轮温锻成形尽管相对于冷锻、热锻来说优势明显, 但是由于温度、成形力、凹模应力集中等影响, 对凹模强度来说依旧是一个严峻的考验^[9], 所以对凹模进行强度校核是重要的也是必要的。组合凹模内层形状为齿形结构, 其强度的校核计算不能直接运用 Lamé 公式, 关键是凹模内径的选取。文中利用 Pro/E 4.0 软件构建齿轮的三维实体模型, 从而得到齿轮的横截面积, 利用

收稿日期: 2011-01-08

作者简介: 陈晓伟(1983-), 男, 河北邯郸人, 硕士研究生, 主要研究方向为金属塑性成形与模具设计。

圆面积公式计算凹模的当量直径,然后利用 Lamé 公式理论计算与经验数据的有效结合对组合凹模进行几何设计和强度校核。

1 利用 Pro/E 4.0 构建齿轮的三维实体模型

1.1 齿轮参数

齿轮材料为 20CrNiMo, 齿轮工艺参数见表 1。

表 1 齿轮基础参数

Table 1 The basic parameter of gear

模数	齿数	齿顶圆	齿顶高	顶隙系数	变位系数	齿厚
m	z	压力角 α	系数 h_a	c	x	b
3	28	20	1	0.25	0.1	20

1.2 渐开线圆柱齿轮的齿廓分析

齿轮轮廓曲线如图 1 所示,它实际上是齿轮横

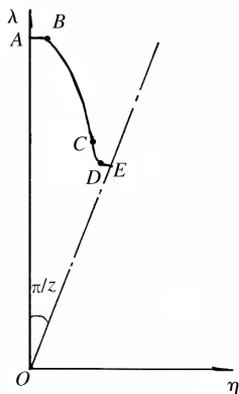


图 1 齿轮的轮廓曲线

Fig. 1 Profilogram of gear

截面曲边多边形的一个曲边, (η, λ) 为齿廓曲线上各点的位置坐标值。一般地, 轮廓曲线是由 4 段简单曲线组成的, 即齿顶圆圆弧 AB、渐开线 BC、齿根过渡曲线 CD 及齿根圆圆弧 DE。

这 4 段轮廓曲线在利用 Pro/E 进行参数化设计过程中, 重点是对渐开线 BC 进行精确设计。Pro/E 软件中可以运用从方程生成曲线, 从而生成精确的渐开线。

1.3 齿轮实体模型构建

选取主菜单中的【工具】→【参数】命令, 进入参数菜单, 将表 1 所示齿轮基础参数输入; 然后通过【工具】→【关系】命令, 对齿顶圆、齿根圆、分度圆、基圆的尺寸关系进行约束, 通过【插入基准曲线】按钮, 选择【从方程】选项, 生成渐开线; 最后, 利用【拉伸】→【实体】、【拉伸】→【去除材料】以及【阵列】命令, 生成最终的齿轮实体模型, 如图 2 所示。

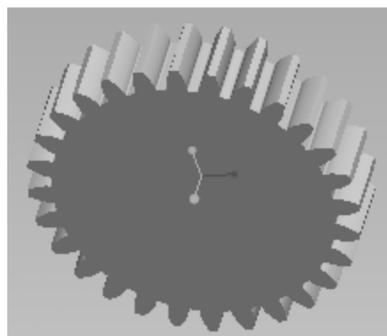


图 2 齿轮实体模型

Fig. 2 Solid model of gear

1.4 计算当量直径

通过【分析】→【测量】可以得到齿轮横截面积为 $5\,462.73\text{ mm}^2$ 。

根据公式 $s = \frac{\pi}{4} d_1^2$ 可以得到齿轮的当量直径 $d_1 = 83.40\text{ mm}$ 。

2 组合凹模强度

2.1 组合凹模材料

通过畸变能量强度理论和最大切应力理论计算可知, 当使用单层凹模时, 不管怎样加大凹模的外径, 即使模壁非常厚, 能维持的最大压力也只能是模具材料屈服极限的一半。所以通过对模具施加预应力的办法, 使其与工作内压引起的切向拉应力部分或全部抵消, 使凹模内的应力趋于均匀, 模具材料得到充分利用, 模具强度大大提高。文中组合凹模采用双层结构, 凹模内层使用硬质合金 YG20, 预应力圈使用 40Cr。

2.2 组合凹模几何尺寸设计

基于经验方法和优化理论方法相结合的设计。组合凹模示意如图3所示,其中压合面的角度 $\gamma =$

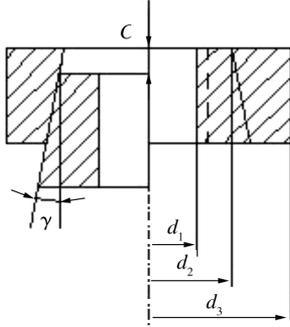


图3 双层组合凹模

Fig. 3 Combined die of double layers

$1^\circ 30'$ 。图3中,左边表示双层组合凹模压合前的配合情况,右边表示压合后的状态。

凹模用硬质合金制造,为防止破裂,内壁不允许出现拉应力。在这一前提下,优化的目标函数是:当承受最大的单位挤压力时,凹模内壁不出现拉应力,而预应力圈处于许用应力状态下,需优选的设计变量为凹模外径 d_2 ,过盈量 Δd_2 及预应力圈外径 d_3 ,并且满足 $4 \leq d_3/d_2 \leq 6$ 。

$$d_2 = d_1 / \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ \frac{[\sigma_2]}{p_1} - 1 \right\}} = 174.94 \text{ mm} \quad (1)$$

$$d_3 = d_2 / \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ 1 - \frac{p_1}{[\sigma_2]} \right\}} = 442.57 \text{ mm} \quad (2)$$

式中: $[\sigma_2]$ ——预应力圈的许用应力;

p_1 ——凹模所受的内压力。

径向过盈系数 Δd_2 可以通过参考文献[10]查得其值为0.79 mm。

运用 Manning 曲线对直径比进行校核,可以得到: $a_{21} = d_2/d_1 = 2.10$, $a_{31} = d_3/d_1 = 5.31$,所以直径尺寸均符合工程要求。

2.3 利用Lame公式对组合凹模进行受力分析

2.3.1 预应力分布

凹模受到预应力圈的接触压力 p_{2k} ,将产生切向预应力 σ'_t 和径向预应力 σ'_r ,分别为:

$$\sigma'_t = -\frac{r_2^2 p_{2k}}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 + \frac{r_1^2}{r^2} \right) \quad (3)$$

$$\sigma'_r = -\frac{r_2^2 p_{2k}}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 - \frac{r_1^2}{r^2} \right) \quad (4)$$

式中: $r_1 \leq r \leq r_2$, p_{2k} 通过式(5)计算:

$$p_{2k} = \frac{\Delta r_2}{r_2 \left[\frac{1}{E_2} \left(\frac{r_3^2 + r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} + \mu_2 \right) + \frac{1}{E_1} \left(\frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} - \mu_1 \right) \right]} = 412.07 \text{ MPa} \quad (5)$$

式中: $\Delta r_2 = \frac{1}{2} \Delta d_2$; E_1, E_2 分别为凹模镶块、预应力圈的弹性模量; μ_1, μ_2 分别为凹模镶块、预应力圈的泊松比。

σ'_t 和 σ'_r 的压应力分布如图4所示。

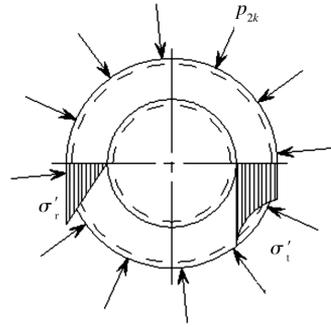


图4 凹模内预应力分布

Fig. 4 Initial prestress distribution in female die

预应力圈同凹模压配后,其接触压力 p'_{2k} 为内压力,与 p_{2k} 为作用力和反作用力,所产生的切向应力 σ'_t 和径向应力 σ'_r 分别为:

$$\sigma'_t = \frac{r_2^2 p'_{2k}}{r_3^2 - r_2^2} \left(1 + \frac{r_3^2}{r^2} \right) \quad (6)$$

$$\sigma'_r = \frac{r_2^2 p'_{2k}}{r_3^2 - r_2^2} \left(1 - \frac{r_3^2}{r^2} \right) \quad (7)$$

式中: $r_2 \leq r \leq r_3$, σ'_t 为拉应力, σ'_r 为压应力,其分布情况如图5所示。

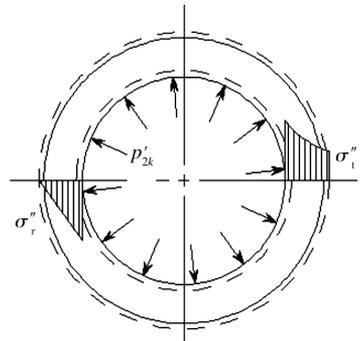


图5 预应力圈内预应力分布

Fig. 5 Initial prestress distribution in prestress circle

凹模与预应力圈压配后的组合体的切向预应力和径向预应力分别等于凹模内和预应力圈内相应的预应力叠加,其分布情况如图6所示。

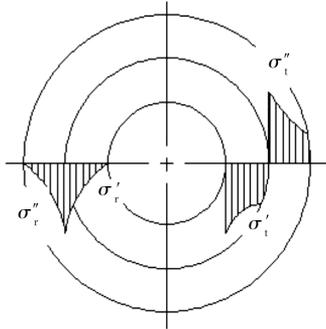


图6 组合体内预应力分布

Fig.6 Initial prestress distribution in combination

2.3.2 工作应力分布

首先把组合凹模当做整体凹模,仅考虑有挤压力 p_1 所产生的切向应力 σ_t'' 和径向应力 σ_r'' ,分别为:

$$\sigma_t'' = \frac{r_1^2 p_1}{r_3^2 - r_1^2} \left(1 + \frac{r_3^2}{r^2} \right) \quad (8)$$

$$\sigma_r'' = \frac{r_1^2 p_1}{r_3^2 - r_1^2} \left(1 - \frac{r_3^2}{r^2} \right) \quad (9)$$

式中: $r_1 \leq r \leq r_3$;切向应力 σ_t'' 为拉应力;径向应力 σ_r'' 为压应力,其分布情况如图7所示。

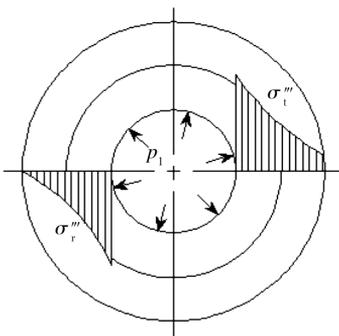


图7 组合凹模工作应力分布

Fig.7 Work stress distribution of combined die

2.3.3 总的应力分布

将工作应力与相应的预应力进行叠加,即可得到组合凹模内总的切向应力和径向应力。对于凹模:

$$\sigma_{t_1} = \sigma_t' + \sigma_t'' \quad (10)$$

$$\sigma_{r_1} = \sigma_r' + \sigma_r'' \quad (11)$$

对于预应力圈:

$$\sigma_{t_2} = \sigma_t'' + \sigma_t''' \quad (12)$$

$$\sigma_{r_2} = \sigma_r'' + \sigma_r''' \quad (13)$$

其应力分布如图8所示。

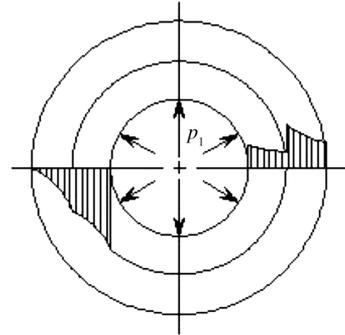


图8 组合凹模总的应力分布

Fig.8 Total stress distribution of combined die

2.3.4 组合凹模强度校核

由图8可以看出,当 $r=r_1$ 时,凹模所受切向应力和径向应力最大,其值为:

$$\begin{aligned} \sigma_{t_1 \max} &= -\frac{2r_2^2 p_{2k}}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{r_1^2 p_1}{r_3^2 - r_1^2} \cdot \left(1 + \frac{r_3^2}{r_1^2} \right) \\ &= 114.22 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\sigma_{r_1 \max} = \frac{r_1^2 p_1}{r_3^2 - r_1^2} \cdot \left(1 - \frac{r_3^2}{r_1^2} \right) = -1100 \text{ MPa}$$

其等效应力 $\sigma_{e_1} = \sqrt{\sigma_{t_1 \max}^2 + \sigma_{r_1 \max}^2} = \sqrt{114.22^2 + (-1100)^2} = 1161.33 \text{ MPa} < [\sigma_1]$ 。 $[\sigma_1]$ 为凹模镶块许用应力。

当 $r=r_2$ 时预应力圈所受切向应力和径向应力最大,其值为:

$$\begin{aligned} \sigma_{t_2 \max} &= \frac{r_2^2 p_{2k}}{r_3^2 - r_2^2} \left(1 + \frac{r_3^2}{r_2^2} \right) + \frac{r_1^2 p_1}{r_3^2 - r_1^2} \left(1 + \frac{r_3^2}{r_2^2} \right) \\ &= 276.01 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{r_2 \max} &= \frac{r_2^2 p_{2k}}{r_3^2 - r_2^2} \left(1 - \frac{r_3^2}{r_2^2} \right) + \frac{r_1^2 p_1}{r_3^2 - r_1^2} \left(1 - \frac{r_3^2}{r_2^2} \right) \\ &= -530.76 \text{ MPa} \end{aligned}$$

其等效应力 $\sigma_{e_2} = \sqrt{\sigma_{t_2 \max}^2 + \sigma_{r_2 \max}^2} = \sqrt{276.01^2 + (-530.76)^2} = 710.20 \text{ MPa} < [\sigma_2]$ 。其中, $[\sigma_2]$ 为预应力圈许用应力。

从而得出结论:组合凹模的尺寸设计以及材料选择都符合工程要求。

有效的防止方法是:凹模、凹模镶块及顶出杆放入凹模套时注意清理凹模套内的异物。

4 结语

1) 进行了 AZ31D 镁合金电动螺丝刀刀把的工艺分析,提出了可行的等温复合挤压成形工艺,设计了挤压件和坯料,研制了试验模具。

2) 试验表明:反挤压杯充填阻力小于正挤压杯,导致过多坯料金属反挤压向上流动,从而使正挤压杯充填不满。

3) 凹模镶块与凹模没完全对中会导致废次品的产生,故模具安装时应检查其对中。

参考文献:

- [1] 王渠东,丁文江. 轿车用阻燃镁合金的研制[J]. 材料导报,2000,14(特刊):53-56.
- [2] 张津,章宗和. 镁合金及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2004:1-6.
- [3] 曹荣昌,何伟,徐永波,等. Mg 合金的最新进展及应用

前景[J]. 金属学报,2001,37(1):2-13.

- [4] 余琨,攀文献,李松瑞,等. 变形镁合金材料的研究进展[J]. 轻合金加工技术,2001,29(7):6-11.
- [5] 胡亚民. 材料成形技术基础[M]. 重庆:重庆大学出版社,2008.
- [6] 胡亚民. 精锻模具手册[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
- [7] 王昶,胡亚民,王萍,等. 镁合金射钉枪端盖等温体积成形及数值模拟[J]. 中国机械工程,2009,20(9):1115-1118.
- [8] 贾宪安,胡九锡. 热挤压工艺与模具设计[M]. 北京:机械工业出版社,1986:17-19.
- [9] 杨长顺. 冷挤压模具设计[M]. 北京:国防工业出版社,1994:58-62.
- [10] 中国机械工程学会中国模具设计大典编委会. 中国模具设计大典(第4卷)[M]. 南昌:江西科学技术出版社,2003:1005-1012.
- [11] HU Y M, LAI Z Y, ZHANG Y C. The Study of Cup-Rod Combined Extrusion Processes of Magnesium Alloy(AZ61)[J]. Journal of Material Processing Technology,2007,60(12):649-652.

(上接第41页)

3 结语

1) 利用 Pro/E 4.0 三维实体软件构建齿轮三维模型,从而得到齿轮当量直径,其与齿顶圆、齿根圆、分度圆相比,更具有合理性,使模具设计精度更高。

2) 齿轮成形组合凹模设计过程中,利用理论计算和经验数据的有效结合,使得组合凹模的几何设计更精确。

参考文献:

- [1] CHOI J C, CHOI Y, HUR K D, et al. A Study on The Forging of Spur Gears[J]. Int J Mech Sci,1996,38(12):1333-1347.
- [2] DEAN T A. The Net-shape Forming of Gears[J]. Materials and Design,2000(12):271-278.

- [3] 伍太宾. 精密锻造成形技术在我国的应用[J]. 精密成形工程,2009,1(2):12-18.
- [4] 陈晓伟,池成忠,白庆平. 圆柱直齿轮精锻成形毛坯体积的工程计算[J]. 锻压技术,2010,35(5):28-31.
- [5] HAFERKAMP H, BACH F W. Advances in Gear Wheel Manufacturing[J]. Industrial Electronics,1999(3):1355-1360.
- [6] 石文超,王岗超,许锋,等. 局部加载约束分流冷锻直齿轮工艺研究[J]. 精密成形工程,2010,2(2):47-50.
- [7] 王忠雷,赵国群. 精密锻造技术的研究现状及发展趋势[J]. 精密成形工程,2009,1(1):32-38.
- [8] 李更新,杨永顺,王治军,等. 圆柱直齿轮温挤压精密成形工艺研究[J]. 精密成形工程(原金属成形工艺),2004,22(2):73-75.
- [9] TATSURO Iwama, YASUHIRO Morimoto. Die Life and Lubrication in Warm Forging[J]. Journal of Materials Process Technology,1997,71(1):43-48.
- [10] 杨长顺. 冷挤压模具设计[M]. 北京:国防工业出版社,2007:185-189.