

贯通内齿轮冷挤压成形工艺仿真与试验

孙世保^{1,2}, 韩 豫¹, 刘全坤¹, 陈忠家¹

(1. 合肥工业大学 材料科学与工程学院, 合肥 230009; 2. 合肥紫金制管有限公司, 合肥 230009)

摘 要: 根据贯通内齿轮的结构特点, 提出了适合内齿轮冷挤压成形的工艺方案。运用数值模拟技术着重分析冲头入口角对内齿轮成形质量的影响, 得到满足内齿轮成形质量的合理冲头入口角度, 并通过物理试验对数值模拟结果进行了验证。结果表明, 提出的适用于贯通内齿轮冷挤压成形工艺方案合理可行。

关键词: 内齿轮; 冷挤压; 数值模拟; 贯通; 工艺

中图分类号: TG376.3

文献标识码: A

文章编号: 1671-8798(2009)03-0169-04

Simulation and experimental study on cold extrusion forming technology of hole-through internal gear

SUN Shi-bao^{1,2}, HAN Yu¹, LIU Quan-kun¹, CHEN Zhong-jia¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Hefei Zijin Steel Tube Manufacturing Co., Ltd., Hefei 230009, China)

Abstract: A process scheme of cold extrusion which applies to internal gear forming is put forward according to the structure characteristics of hole-through internal gear. By the method of numerical simulation, the forming quality of gear affected by the approach angle of punch is analyzed emphatically, and reasonable angle to meet the requirements of forming quality of internal gear is obtained. A corresponding physical experiment is carried out to verify the numerical simulation results. The results show that the proposed cold extrusion process which is suitable for hole-through internal gear forming is reasonable and feasible.

Key words: internal gear; cold extrusion; numerical simulation; hole-through; process

随着行星机构在机械传动系统的运用越来越普遍, 内齿轮的加工成为机械行业最大的工艺难题^[1]。通常内齿轮的加工主要通过金属切削加工方法, 其生产成本低且加工费时^[2]。齿轮冷挤压成

形是一种精密成形技术, 与传统切削加工相比, 具有节省原材料、节约能源和提高生产效率等优点^[3], 尤其是通过冷挤压成形方式生产的内齿轮, 金属内部的纤维不被切断, 可大大提高其机械强度。

收稿日期: 2009-04-26

基金项目: 安徽省教育厅自然科学基金资助(重点)项目(KJ2007A064); 华中科技大学塑性成形模拟及模具技术国家重点实验室资助项目(07-07)

作者简介: 孙世保(1965—), 男, 安徽合肥人, 高级工程师, 硕士研究生, 主要从事板料成形及体积成形研究。

贯通内齿轮是内齿轮上端面和下端面截面形状完全一致且不附带有其他结构,其三维几何造型如图 1 所示。

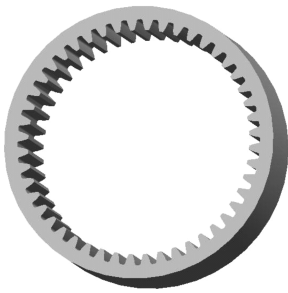


图 1 贯通内齿轮
Fig. 1 Hole-through internal gear

1 工艺分析

1.1 齿形冲头设计

在贯通内齿轮冷挤压成形模具中,齿形冲头是最重要的工作零件且设计难度最大。为了能使内齿轮冷挤压成形过程顺利进行,需要对通常采用的平端面冲头进行改进,改进后的齿形冲头如图 2 所示。该齿形冲头带有导向结构,其导向部分的直径比环形坯料的内孔直径稍小,这样能够保证导向部分顺利进出坯料内孔。

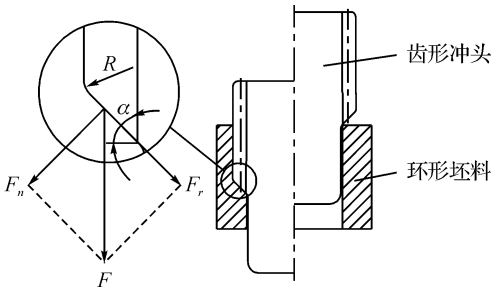


图 2 齿形冲头
Fig. 2 The tooth-shape punch

在挤压过程中,坯料受到来自齿形冲头的力 F 作用,力 F 可以分解为沿齿形冲头入口斜面的力 F_r 和垂直于齿形冲头入口斜面的力 F_n ,如图 2 的局部放大图所示。 F_r 使坯料沿冲头斜面沿轴向流动,完成齿腔的充填; F_n 迫使材料一直处于压应力状态,整个变形材料始终受到三向压应力作用,是较理想的挤压方法。

1.2 退料环结构设计

对于反挤压成形,其一次成形范围应该满足的条件是:底厚 \geq 壁厚。为了增加冲头的最大行程以便节省材料,这里对通常采用的退料环结构作了改

进,改进前后的结构对比如图 3 所示。改进后的退料环Ⅱ与原来的退料环Ⅰ相比,在其上端面设计了一个斜面,有了这个斜面,使得原先满足一次成形范围的最小底厚 S 变为 S' 。这样可以使冲头的行程比未改进前多出了 ΔS 的距离,增大了冲头的最大行程,从而可以增加最终成形的内齿轮的有效齿高,即可以在保证齿轮高度满足制造要求的前提下节省材料。同时,改进后的退料环结构存在一个斜面,在挤压过程中可以使一部分材料沿斜面方向向下流动,即材料在向上和向下两个方向都可以流动,与未改进前材料在轴向只能向上流动相比,金属材料的流动性更好。

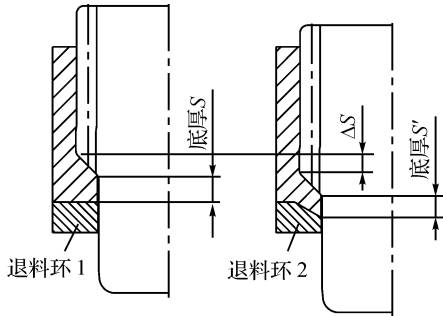


图 3 改进前后的退料环比较
Fig. 3 Comparison of improvement prior and after material returned ring

2 数值模拟

有限元算例中的内齿轮参数:模数 $m = 1.25$,齿数 $z = 40$,压力角 $\alpha = 20^\circ$,齿顶高系数 $h_a = 1.0$,顶系系数 $c = 0.25$;挤压工艺参数:加载速度 $v = 6 \text{ mm/s}$,摩擦系数 $\mu = 0.12$,由于是冷成形,温度设定为室温 20°C ;材料为 20CrMnTi,是一种常见的齿轮钢。

2.1 坯料孔径对内齿轮成形质量的影响

齿轮冷挤压中存在的一个重要缺陷是齿充不满,如何合理选取工艺参数对于齿轮成形质量的好坏至关重要。环形坯料内孔直径的尺寸对内齿轮冷挤压成形质量好坏至关重要,它直接影响冷挤压件的充填质量^[4]。选择不同大小的坯料内径对内齿轮成形质量的数值模拟结果如图 4 所示。当坯料内孔直径过小($\phi 55 \text{ mm}$),从图 4(a)可以看出,在挤压过程中会造成过多的材料堆积在下部,导致变形死区过大,不利于材料的流动,同时齿件上端的塌角高度 l_1 较大,使得后续机加工部分较多;当内孔直径取接近或等于冲头齿顶圆直径($\phi 57.5 \text{ mm}$)时,如图 4(b)和(c)所示,齿件上端的塌角高度 l_2 和 l_3 均远远小于 l_1 ,且主要变形区域的材料没有堆积,成形质量良好,是合理的坯料内径。

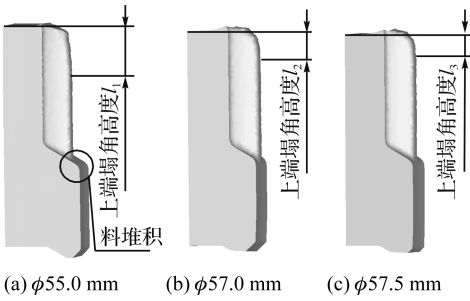


图4 不同坯料孔径对内齿轮成形质量的影响

Fig. 4 The impact of forming quality by different internal diameter of workpiece

2.2 冲头入口角对挤压成形力的影响

冲头入口角是内齿轮挤压成形工艺中最重要的模具结构参数,对内齿轮的成形载荷、成形质量及模具寿命都有很大的影响。这里选取坯料孔径 φ57.0 mm,冲头入口角分别取 10°,30°,45°进行模拟,研究冲头入口角度对内齿轮挤压成形载荷的影响。模拟结果如图 5 所示。从图 5 中可以看出,挤压力变化的总体趋势是:在挤压初始阶段,坯料上端面受到冲头压力逐渐屈服,挤压力急剧上升;当材料进入塑性变形状态后,挤压力趋于稳定,已成形的材料作刚性平移,挤压力比较平稳,直至最终完成齿轮的成形。冲头入口角度的变化对整个挤压过程的载荷影响趋势是随着角度的增大而减小。

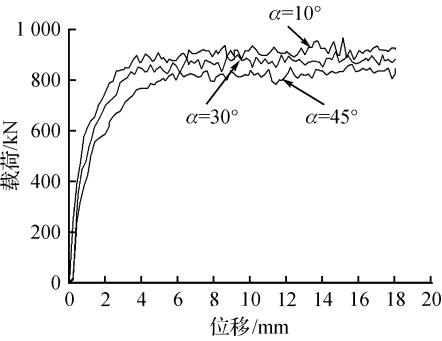


图5 冲头入口角对应的位移-载荷曲线

Fig. 5 Load-stroke curves with approach angle of punch

2.3 冲头入口角对冲头承载的影响

从冲头入口角的变化对内齿轮挤压成形载荷影响的分析发现,尽管总体趋势是载荷随冲头入口角度的增大而减小,但变化幅度并不明显。因此有必要分析对应的齿形冲头承载情况。为分析冲头的实际受力情况,需要在有限元模型中把冲头也定义为变形体,冲头材料选用软件材料库中提供的冷作模具钢 AISI D2,其性能近似于国产冷作模具钢 Cr12MoV。对应不同角度的冲头受到的等效应力如图 6 所示,当 α 分别取 10°,30°,45°的时候,与坯料

主要变形区发生接触的冲头工作斜面部分受到的等效应力的最大值分别为 3 720,2 890,2 750 MPa。从中可以发现,尽管不同的入口角度对挤压成形载荷大小的影响并不十分明显,但是冲头受到的等效应力则有很大的区别,过小的冲头入口角受到的等效应力较大,这对于提高模具寿命是不利的。因此在保证齿轮充填饱满的条件下,为提高冲头的使用寿命,冲头不宜选用过小的入口角度。

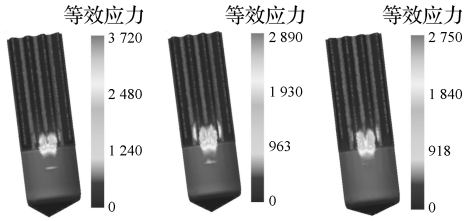


图6 挤压过程中冲头所受的等效应力(MPa)

Fig. 6 Effective stress of punch during extrusion

2.4 冲头入口角对有效齿高的影响

基于目前工艺的局限性,一次挤压成形得到的齿件尚不能被直接使用,需要对不符合设计要求的部分进行机加工修整,修整后得到的满足设计要求的齿轮高度称之为有效齿高,即实际内齿轮产品的轮齿高度。对贯通内齿轮,如图 7 所示,其有效齿高 l_0 可以由式(1)表示:

$$l_0 = L - l_1 - l_2 \tag{1}$$

式(1)中: L 为挤压成形后齿件的总高度; l_1 为挤压后齿件头部未充满齿腔的高度; l_2 为挤压后齿件底部需切除的高度。

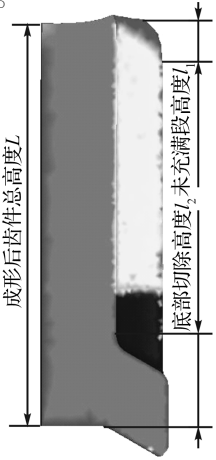


图7 贯通内齿轮有效齿高

Fig. 7 Effective tooth height of hole-through internal gear

不同的冲头入口角也会对最终成形的内齿轮有效齿高产生影响。表 1 以具体数据列出了采用不同冲头入口角得到的内齿轮有效齿高,从中可以看到,随着冲头入口角的增大,对应的内齿轮件的有效齿

高减少了近 5 mm,占齿件总高度的 27.8%。因此,在满足模具寿命的条件下尽量选择入口角小的齿形冲头,这样能在保证所需的有效齿高条件下尽可能地节省原材料。

表 1 不同的冲头入口角对应的有效齿高

Table 1 Effective tooth height with different approach angle of punch

冲头入口角 $\alpha/(^{\circ})$	成形后齿坯总长度	上端面未充满长度	下端面切除长度	有效齿高 l_0/mm
	L/mm	l_1/mm	l_2/mm	
10	23.98	1.95	4.66	17.37
30	23.88	3.14	5.31	15.43
45	23.78	4.98	6.25	12.55

2.5 摩擦的影响

在金属成形的过程中,摩擦往往伴随有金属的塑性流动,而且变形金属沿着接触面上各点的塑性流动情况各不相同,因而情况十分复杂^[5]。在大多数情况下,摩擦都产生消极的作用,引起变形力和变形功的增大,加剧工具的磨损,降低使用寿命,引起坯料变形的不均匀,降低变形材料的工艺塑性^[6]。针对前面的分析,取冲头入口角 $\alpha = 30^{\circ}$ 来讨论当摩擦因子分别取 0.05,0.12,0.20 时对内齿轮冷挤压成形载荷的影响。不同摩擦因子下内齿轮挤压载荷如图 8 所示,挤压载荷随着摩擦因子的增大而增大。因此为了降低挤压力,减少模具磨损,提高制件的成形质量,挤压前毛坯必须进行良好的润滑处理。

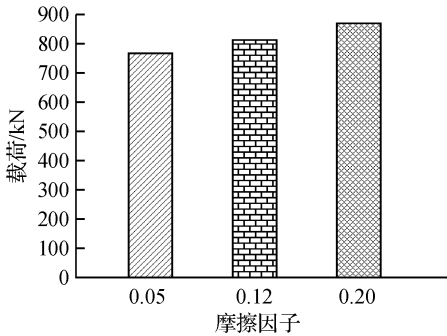


图 8 不同摩擦因子下的载荷峰值

Fig. 8 Pick values with different friction factors

3 物理试验

为了进一步对上述工艺进行研究,物理试验是很有必要的。试验采用简易模具,以工业纯铅作为试样材料,在 50 kN 的万能试验机上完成。试验模具装置及试验所得内齿轮件的实物图分别如图 9 和图 10 所示。可以看到,试验得到的内齿轮件齿形饱满,成形质量良好。这表明数值模拟的可靠性得到

了良好的验证,从而说明本研究提出的贯通内齿轮冷挤压工艺是合理可行的。

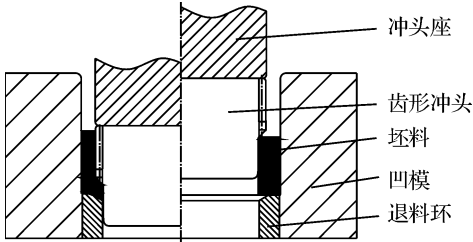


图 9 试验模具图

Fig. 9 Diagram of experimental die

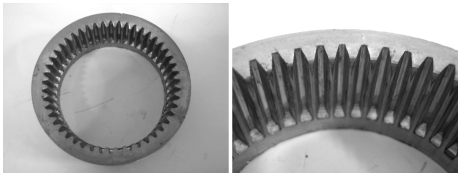


图 10 试验得到的内齿轮件

Fig. 10 Internal gear part obtained from experiment

4 结 语

提出一种适用于贯通内齿轮的冷挤压成形工艺,并采用数值模拟方法分析了相关工艺参数对内齿轮成形质量的影响,得到了合理的工艺参数范围。同时还通过物理试验进一步验证了数值模拟结果的可靠性,表明该工艺可以对实际生产提供一定的指导作用。

参考文献:

[1] 佚名. 齿圈的加工难点[J]. 现代零部件,2008(12): 86-87.

[2] ALVES M L, RODRIGUES J M C, MARTINS P A F. Cold forging of gears: experimental and theoretical investigation[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2001,37:549-558.

[3] HU Cheng-liang, WANG Ke-sheng, LIU Quan-kun. Study on a new technological scheme for cold forging of spur gears[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007(187/188):600-603.

[4] 伍太宾. 坯料形状尺寸对齿轮冷挤压成形的影响[J]. 现代制造工程,2008(8):68-70.

[5] 彭巍,赵玉民,杨金娥. 花键管冷挤压成形挤压力的影响因素分析[J]. 机械制造,2006,44(8):36-36.

[6] 魏志刚,汤文成,刘德仿. 星形套冷挤压成形有限元方法研究[J]. 中国机械工程,2006,17(16):1752-1755.