基于分流法的大模数半轴伞轮冷精锻工艺研究

王岗超，王刚，石文超，薛克敏
（合肥工业大学 材料科学与工程学院，合肥 230009）

摘要：针对半轴圆锥直齿轮冷锻载荷大、模具寿命低、齿腔难充填等技术难题，采用分流法的封闭式锻造工艺冷锻半轴圆锥齿轮。研究了型腔充填规律、载荷曲线特点等，并分析了模具运行方式、冲孔连皮位置、坯料尺寸对成形结果的影响。结果表明：分流法能大幅度地降低成形载荷；闭塞式锻造工艺对成形结果没有改善；冲孔连皮的位置及坯料直径对成形结果影响较大。

关键词：半轴伞齿轮；分流法；冷精锻
中图分类号：TG316 **文献标识码**：A
文章编号：1674-6457(2010)04-0052-05

Cold-close Precision Forging of Half Axle Bevel Gear with Big Modulus Based on Divided Flow Method

WANG Gang-chao, *WANG Gang*, *SHI Wen-chao*, *XUE Ke-min*
(School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Aiming at resolving the technical problems of cold forming process of axle half bevel gear such as excessive forming force, short life of die and insufficient corner filling, cold-close forging based on divided folw method was adopted. Rule of cavity filling, feature of curve of displacement-forging loads were studied. Factors which affect forming result such as the way of die's moving, the sketch of web position, the diameter of blank, were analysed. The results shows that divided flow method is in favor of decreasing the forming force significantly. Process with separable cavity die has no active effect. While the sketch of web position and the diameter of blank can affect forming results seriously.

Key words: half axle bevel gear; divided flow method; cold-close precision forging

精锻成形工艺通常用来制造一些外形较为复杂且要求净成形或近净成形的零部件[1]。用精锻工艺生产齿轮，不仅具有节材、节能、低成本、高效率等显著优势，而且有助于在齿轮内部形成致密、均匀的材料组织，沿齿形轮廓具有连续合理的金属流线，形成表面加工硬化层及圆滑过渡的齿根，从而大大提高齿轮的耐磨损、抗腐蚀能力及根部的弯曲强度，明显改善齿轮的疲劳性能[2]。

冷锻齿轮具有齿腔充填困难、变形抗力大、模具寿命低等技术难题[3-5]。为了解决齿轮冷锻的技术难题，日本学者 Kondo. K 和 Ohga. K 提出采用分流法冷精锻圆柱直齿轮[6]，为圆柱直齿轮冷精锻的实用化进程奠定了基础。大模数半轴圆锥齿轮与圆柱直齿轮冷精锻存在同样的难题，文中引进分流工艺，采用 DEFORM3D 有限元模拟软件，系统分析大模数半轴圆锥直齿轮的冷精锻工艺，并分析了各

收稿日期：2010-05-20
基金项目：安徽省二 00 八科技攻关计划面上项目(08010202132)
作者简介：王岗超(1985—)，男，河北邯郸人，硕士研究生，主要研究方向为精密塑性成形工艺。

种因素对半轴圆锥直齿轮成形效果的影响。

1　工艺分析

分析的锥齿轮零件三维如图 1 所示。齿轮基本

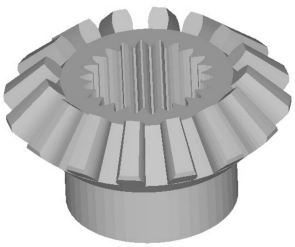


图 1　半轴锥齿轮零件

Fig. 1　Half axle bevel gear

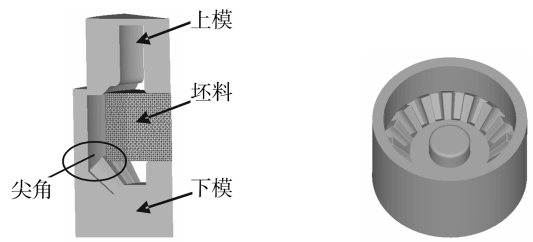
参数为:齿轮模数 7.8 mm,齿数 16,压力角22.5°,分锥角 58°,齿高 14 mm,凸台高度 32 mm,齿顶圆直径 124.8 mm,带内齿。由于齿轮模数大,且带小模数内齿,因而锻件成形困难。主要表现在锥齿腔难以充填,内直齿难以成形,锻件体积较大导致所需成形力大。零件凸台过高,内齿齿根圆直径大,凸台型腔深且窄,锻件充填极其困难。另外,采用实心棒料成形时,内齿部分有冲孔连皮,所以即使锻出内齿,齿面仍需要后续机加工。故文中设计工艺时不锻内齿,相应部位仅成形出小于内齿齿顶圆直径、带冲孔连皮的孔。

为了保证齿形精密成形,提高材料利用率,减少成形工序,拟采用基于分流法的闭式模锻工艺成形,并研究各种工艺参数对其成形的影响。

2　数值模拟分析

2.1　有限元模型建立

根据零件形状建立如图 2 所示的有限元模型。凹模内壁型腔很深,锻件始终处于下模内。由于模型的凹模齿腔具有尖角部位(如图 2 所示),在冷锻当中很容易发生磨损及齿腔崩裂现象,所以必须对锻件进行改进,以保证下模的强度。改进工艺方案后的模型如图 3 所示,凹模齿腔齿形连接型腔壁,不存在尖角突出现象,但是锻件在相应部位就有了少量的机加工余量。另外,凸台型腔深度高于凸台高

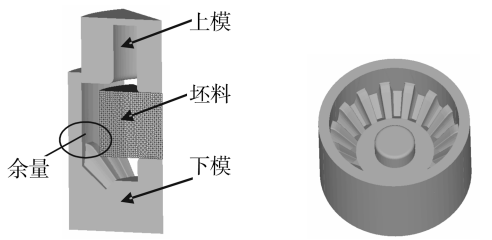


a　模型　　b　下模(凹模)

图 2　闭式模锻工艺

Fig. 2　Cold close forging process

度 10 mm 作为分流降压型腔,这样可以起到平衡坯料体积偏差的作用,如图 3 所示。



a　模型　　b　下模(凹模)

图 3　改进后闭式模锻工艺

Fig. 3　Cold close forging process improved

考虑到齿轮几何形状的对称性,只取 2 个齿进行有限元分析。运用 DEFORM3D 软件采用刚塑性有限元数值模拟技术。坯料视为塑性材料,选用美国标准 AISI-4120,采用软件自带的本构关系模型,设计坯料尺寸为 ϕ100 mm×50 mm。模具视为刚性材料,成形温度选为室温 20 ℃,忽略温度效应[7]。圆柱直齿轮冷精锻属于有润滑的冷态塑性成形,采用剪切摩擦模型,摩擦因子设置为 0.1(磷化皂化处理后)。上模下行速度为 10 mm/s。

2.2　模拟结果分析

闭式模锻工艺各个阶段的等效应变分布如图 4 所示。压下量为 30%的成形结果如图 4a 所示,变形主要集中在坯料与齿腔接触的部位及内孔上端,最大等效应变为 5.0。与下模接触的坯料接触面积小,自由表面多,容易发生屈服,所以先发生变形,而与上模接触的部位只有凸台型腔为自由表面,所以比较难变形。压下量为 60%的成形结果如图 4b 所示,齿形部分由上而下进行充填,没有大模数锥齿轮型腔充填时常见的折叠缺陷。随着齿腔的充填,坯

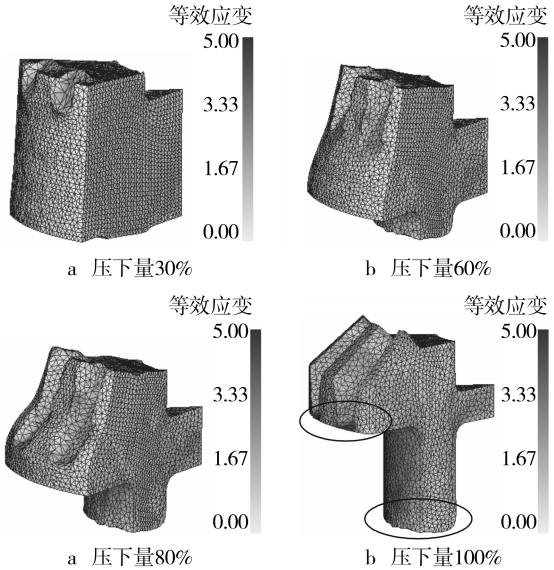


图 4 不同压缩量下的等效应变分布

Fig. 4 Equivalent strain under different press ratios

料的自由面越来越少，充填难度变大，根据最小阻力定律[8]，凸台部分开始充填。等效应变最大的区域为成形的齿槽及冲孔连皮部位。压下量为 80%时的成形结果如图 4c 所示，随着上模的下移，坯料中间部分没有模具的约束，充填先于齿腔部分，所以在齿形下端和上端的充填先于中间部分。中间部分出现很大的内凹，但是凹弧半径比较大，不会出现折叠缺陷。最终充填结果如图 4d 所示，内孔及齿形部分充填良好。凸台顶端及锥齿顶端需要后续车削或磨削加工。

闭式模锻工艺的载荷-行程曲线如图 5 所示。

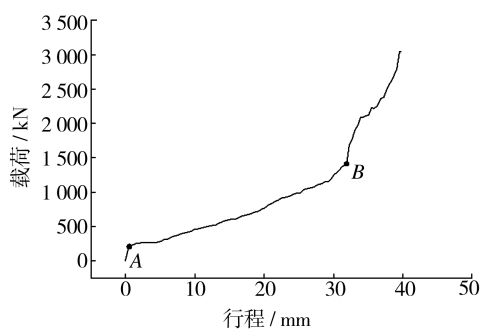


图 5 载荷-行程曲线

Fig. 5 Curve of displacement-forging loads

曲线分为 3 个阶段，A 点以前，坯料开始进入塑性变形状态，载荷上升；A 点到 B 点阶段时，坯料在充填齿腔的同时也在充填凸台部位，锻件的自由面逐渐减少，所以载荷缓慢平稳增加；B 点以后，坯料大面积地与模具齿腔接触，导致齿腔部位的自由面急剧减少，所以载荷上升较为急剧。载荷最大值为 3 040 kN，整个锥齿轮锻造载荷为 24 320 kN，模具单位压强为 1 848.6 MPa。普通冷作模具钢即可满足强度要求。

而对于没有采用分流法的封闭式冷锻工艺（凸台型腔的高度即为凸台高度），成形载荷为 36 000 kN。分流法使载荷下降了 32.4%。

3 影响成形结果的因素分析

影响半轴锥齿轮成形效果及成形载荷的因素及参数很多，文中着重分析模具结构、冲孔连皮的位置、坯料直径等主要因素的影响。

3.1 模具结构及运行方式对成形的影响

闭式模锻工艺为了降低成形载荷，降低成形对设备吨位的要求，还可以设计为闭塞式锻造工艺，如图 6 所示。即将凹模设计为可分结构，凹模上模先

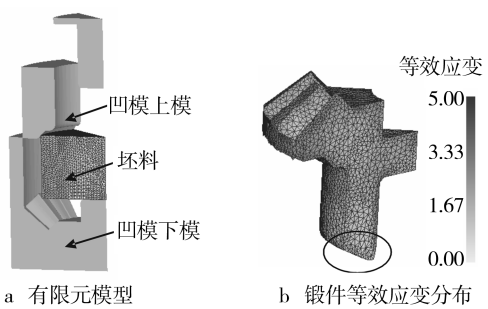


图 6 闭塞式锻造模型及锻件

Fig. 6 FE model for cold close forging process with separable cavity die and its forging

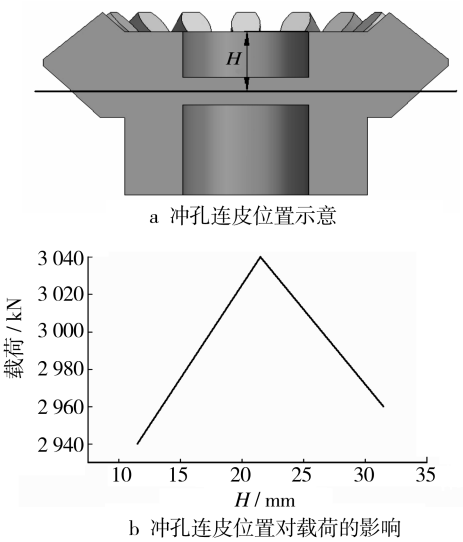
下行，闭合之后，冲头下行成形锻件。为了进行对比，对于这种模型同样选用 ϕ100 mm×50 mm 的棒料作为坯料。模拟结果的等效应变分布如图 6b 所示。锻件充填良好，无缺陷。凸台端面平整度不及封闭式锻造工艺，机加工余量大。这是因为凹模闭合后，冲头主要起到反挤凸台及充填锥齿角隅部位的作用，所以凸台部位内孔多余的材料外流，堆积在凸台内孔一侧，导致端面极不平整。凹模闭合载荷为19 840 kN，冲头载荷为 8 480 kN。

与上述封闭式锻造工艺相比，闭塞式锻造工艺锥齿充填效果也很好，但是锻件凸台端面机加工余

量大,工艺的实现必须选用双动液压机,而且凹模的闭合载荷为 19 840 kN,与封闭式锻造工艺相比降幅不大,所以不宜采用闭塞式锻造工艺。

3.2　冲孔连皮的位置对成形结果的影响

冲孔连皮的位置如图 7a 所示。为了研究冲孔



a 冲孔连皮位置示意

b 冲孔连皮位置对载荷的影响

图 7　冲孔连皮位置对成形的影响

Fig. 7　The sketch of web position's effect on forming

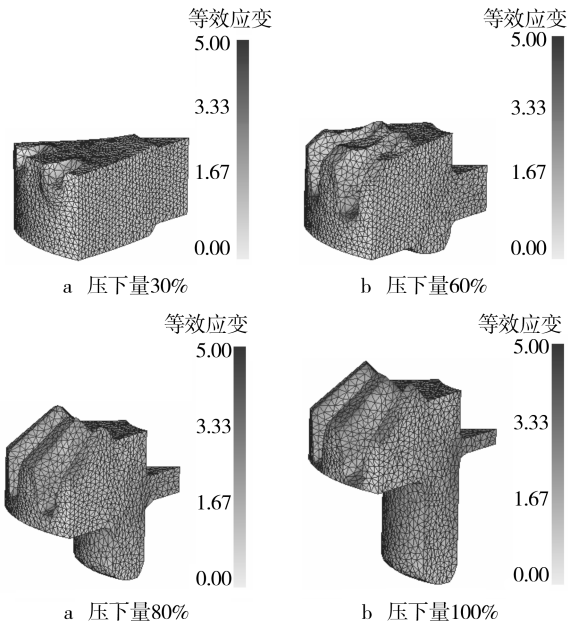
连皮的位置对锻件成形结果的影响,在其他参数不变(坯料尺寸为 ϕ100 mm×50 mm,上模运行速度均为 5 mm/s,冲孔连皮厚度均为 8 mm)的情况下,分别取 H 为 11.5,21.5,31.5 mm 进行模拟研究。结果表明:冲孔连皮的位置对齿腔充填结果无影响,无论冲孔连皮在何位置,均无成形缺陷,但是冲孔连皮位置不同,对锻件的成形载荷有较大的影响。如图 7b 所示,冲孔连皮在中间某一位置成形载荷最大,而在锻件两头时载荷则降低。

冲孔连皮厚度对载荷的影响是连皮越厚,材料越容易流动,载荷越低。

3.3　坯料直径对成形结果的影响

坯料直径的大小对锥齿轮锻造成形有很大的影响,直径不同直接影响齿腔先充填的位置。针对闭式模锻工艺,对直径分别为 ϕ125,ϕ100,ϕ90 mm 的坯料成形进行研究,采用凸模运行速度为 5 mm/s。

坯料直径为 ϕ125 mm 时的等效应变分布如图 8 所示。从各个阶段的变形过程可以看出,齿形部位与凸台部位同时充填,当压下量为 80%时齿腔充



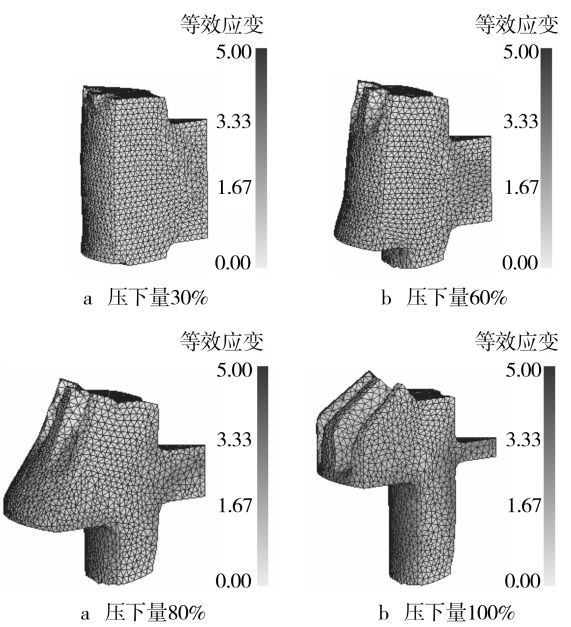
a 压下量30%　　b 压下量60%

a 压下量80%　　b 压下量100%

图 8　坯料直径为 ϕ125 mm 时不同压缩量下的等效应变分布

Fig. 8　Equivalent strain under different press ratios when the diameter of blank is 125 mm

填完毕,最后充填凸台。锻件成形良好,成形载荷为 3 100 kN,与坯料直径为 ϕ100 mm 时的 3 040 kN 几乎相等。坯料直径为 ϕ90 mm 时各个阶段的等效应变分布如图 9 所示。凸台部位先充填,齿形部位



a 压下量30%　　b 压下量60%

a 压下量80%　　b 压下量100%

图 9　坯料直径为 ϕ90 mm 时不同压缩量下的等效应变分布

Fig. 9　Equivalent strain under different press ratios when the diameter of blank is 90 mm

由上及下充填。凸台内孔附近的材料充填最慢，远远落后于凸台外径部位。锻件成形同样饱满，所需载荷为 2 780 kN，与其它 2 种坯料的成形载荷相比，下降了 8.6%。

由此可见，坯料直径对锻件的充填质量影响不大，但是对锻件的成形载荷影响很大。坯料直径为 ϕ90 mm 时成形载荷最低。

4 结语

采用有限元模拟的方法对大模数半轴圆锥直齿轮的冷锻成形进行研究，分析了不同工艺参数及坯料尺寸对成形结果的影响，得出以下结论。

1) 采用分流法的闭式模锻工艺不仅能很好锻出无充填缺陷的半轴锥齿轮，而且载荷不大，模具单位压强仅为 1 848.6 MPa；

2) 闭塞式锻造工艺与闭式模锻工艺相比，载荷降幅不大，而且需要双动压力机；

3) 冲孔连皮的位置及坯料尺寸影响模膛优先充填的部位和模膛充填的顺序，对成形载荷有很大的影响。

参考文献：

[1] LANGE K. Some Aspect s of the Development of Cold Forging to High-tech Precision Technology[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1992, 35(3－4): 245－257.

[2] 张猛，黄尚宇，赵玉民，等. 汽车螺旋伞齿轮封闭模锻造成形的变形特性[J]. 中国有色金属学报，1999，9(3)：567－572.

[3] 张清萍，崔焕勇，王玉增. 锥齿轮精锻成形工艺及有限元分析[J]. 机床与液压，2009，37(11)：32－37.

[4] 王华君，夏巨谌，程培元，等. 从动螺旋伞齿轮精密锻造数值仿真[J]. 华中科技大学学报：自然科学版，2005，33(9)：94－96.

[5] 杨慎华，寇淑清，徐成林. 轿车差速器行星与半轴齿轮冷闭塞锻造成形研究[J]. 锻压技术，2004，29(1)：9－12.

[6] KONDO K. Development of New Precision Cold Die Forging Processes[C]. Advanced Technology of Plasticity, Proc 1st ICTP Tokyo, 1984：701－709.

[7] 方泉水，辛选荣，刘汀，等. 直齿圆柱齿轮浮动凹模冷闭式镦挤成形数值模拟分析[J]. 锻压技术，2007，32(2)：122－125.

[8] 刘全坤. 材料成形基本原理[M]. 北京：机械工业出版社，2004：373－374.

(上接第 31 页)

5 结语

文中对造成成形件着色误差的各种可能的原因如树脂黏度、收缩率、光束扫描速度、固化时间、树脂循环部分的影响等进行了分析，提出了改变激光束扫描路径，改进光敏树脂的性能，采用更合适的着色剂，控制喷射着色与扫描同步等提高精度的措施。

参考文献：

[1] 赵国群，王广春，贾玉玺. 快速成形与制造技术的发展与应用[J]. 山东工业大学学报. 1999，29(6)：536－543.

[2] 刘伟军. 快速成形技术及应用[M]. 北京：机械工业出版社，2005：8－141.

[3] 李名良. 喷墨打印技术的发展与应用[J]. 上海造纸，2002，33(4)：32－37.

[4] 储昭荣，徐国财. 激光快速成形及其固化树脂[J]. 热固性树脂，2004，19(1)：32－35.

[5] 吴幼军，褚衡. 激光光固化快速成形用光敏树脂的研制[J]. 塑料科技，2003，6(3)：7－11.

[6] 王运赣. 快速成形技术[M]. 武汉：华中理工大学出版社，1999：28－36.