局部加载约束分流冷锻直齿轮工艺研究

石文超[1]，王岗超[1]，许锋[1]，薛克敏[1]，储晓武[2]
(1. 合肥工业大学材料科学与工程学院,合肥 230009;
2. 六安江淮汽车齿轮制造有限公司,安徽 六安 237010)

摘要：针对直齿轮冷锻过程中齿腔充填困难、成形载荷大、模具寿命低的特点,提出了基于局部加载-约束分流冷锻圆柱直齿轮新工艺。在浮动凹模基础上,利用有限元软件对新工艺进行数值模拟。对工艺成形过程中速度场、成形载荷等规律进行了分析,并对比分析了多种成形工艺。结果表明:局部加载-约束分流终锻成形工艺可以较好地成形大模数圆柱直齿轮,能避免齿轮成形时产生的折叠缺陷,同时可以显著地降低成形载荷,为此类齿轮冷锻工艺的应用与生产实践提供了理论依据。

关键词：局部加载；约束分流；冷锻；圆柱直齿轮；数值模拟
中图分类号：TG316 **文献标识码**：A
文章编号：1674-6457(2010)02-0047-04

Study on Cold Forging of Spur Gear Based on Local Loading Process and Restrained Divided Flow Method

SHI Wen-chao[1], *WANG Gang-chao*[1], *XU Feng*[1], *XUE Ke-min*[1], *CHU Xiao-wu*[2]
(1. School of Material Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. Liuan Jianghuai Automotive Gear Manufacture Co. Ltd., Liuan 237010, China)

Abstract: Aimed at resolving the technical problems such as insufficient filling of the tooth cavity, large resistance of deformation and short life of dies, a new cold forging technology of spur gear based on local loading process and restrained divided flow method is proposed. Floating die system was used and spur gear precision forging processes were simulated by using metal forming finite element code. Then the velocity field and load-stroke curve are investigated. The results show that the new forging technology has the greatest advantages in spur gear forming. It can virtually reduce the forming force, but also avoid the deforming collapses. The research results provide a theoretical basis for the production practice.

Key words: local loading; restrained split-flow; cold forging; spur gear; numerical simulation

齿轮是一种典型的机械传动零件,被广泛应用于航空、航天、汽车、仪表等重要行业领域。直齿圆柱齿轮是各种齿轮中应用最为广泛的一种齿轮。传统生产直齿轮的切削加工方法,材料利用率低,生产率低,产品成本高,同时加工时齿形部分的纤维被切断,齿轮强度不高,影响其承载能力[1-3]。

采用冷锻工艺加工圆柱直齿轮,可以显著提高零件的内在和表面质量，提高材料的利用率，减少加工工时,降低能耗,同时可获得合理的金属流线分布,提高承载能力。由于圆柱直齿轮的高精度要求和渐开线齿形的充填困难、变形抗力大,模具寿命低等许多因素的影响，使得这类零件的冷锻成形至今

收稿日期：2010-01-15
基金项目：安徽省二00八科技攻关计划项目(08010202132);合肥工业大学大学生创新性实验计划项目(2009CXSY092);国家大学生创新性实验计划项目(091035909)
作者简介：石文超(1988-),男,湖北黄冈人,在读本科生,主要研究方向精密塑性成形工艺与仿真。

仍是塑性加工领域的难题[4]。

文中研究的齿轮模数为 3 mm,齿数为 25,齿宽为 27 mm,法向压力角 20°,上端带 5 mm 高,直径为 56 mm 的凸台,中心孔直径为 26 mm,如图 1 所示。

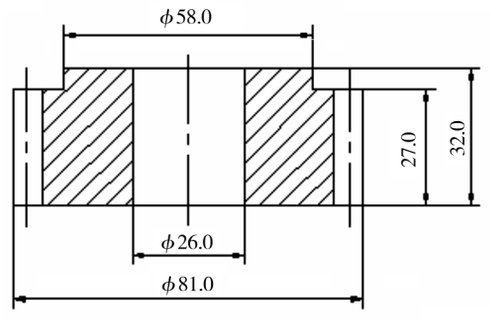


图 1　直齿轮零件

Fig. 1　Part drawing of spur gear

目前采用闭塞式精锻成形对圆柱直齿轮的成形工艺进行研究的齿轮模数一般均小于 2 mm,模数越大其齿形的成形难度越大[5]。针对所研究齿轮的自身特点,提出局部加载-约束分流冷锻成形工艺(后文出现均用 LR 替代),对该工艺过程进行了数值模拟研究,为此类齿轮冷锻工艺的应用与生产实践提供了依据。

1　局部加载约束分流成形工艺特点

局部加载是指仅向材料某个局部区域施加变形力,来完成整个工件成形的加载方法。局部加载时,在变形体内沿加载方向上受力面积是逐渐增大的,其应力的绝对值逐渐减小[6-7]。在圆柱直齿轮中心和齿形上端两部分进行局部加载成形,由于在局部加载过程中,主作用力方向上接触面积较整体加载要小很多,故所需载荷能得到较大幅度的降低,并可以较好地充填齿形和凸台角隅部位。约束分流成形圆柱直齿轮时,在保证齿腔部分充满的前提下,既可有效的分流,减小成形载荷,又可迫使金属流入需充填的部位,保证齿形和凸台角隅部位充填良好[6]。

2　有限元分析模型的建立

现利用建模软件完成锻件(所成形锻件中锥形凸台尺寸:上圆周直径为 59 mm,高 6 mm,拔模角为 30°)、上模、浮动凹模和下模的三维造型如图 2 所示。坯料为圆柱体,在利用有限元软件进行数值模

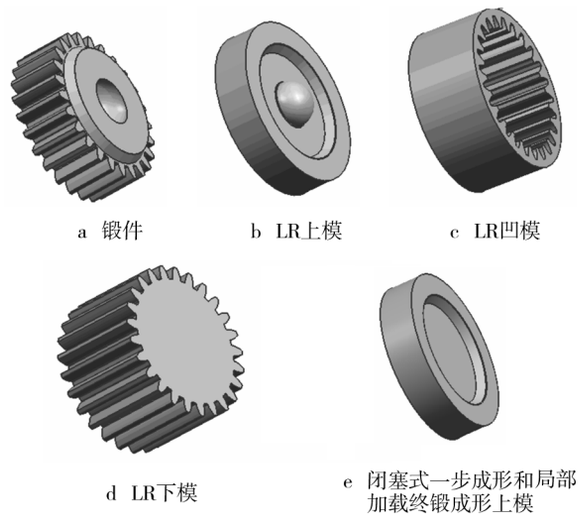


图 2　圆柱直齿轮锻件及模具三维造型

Fig. 2　Forging drawing of spur gear and 3D model

拟前,根据冷锻前后体积不变条件及考虑冷锻后必要的切削余量而给予修正的原则[8],确定毛坯的尺寸,现设计坯料为 ϕ33.5 mm×37 mm。

考虑到齿轮本身的几何对称性,为减小计算规模,提高计算效率,只模拟 2 个齿的成形过程。模型建立完后,运用有限元模拟软件进行数值模拟。在齿轮冷锻成形过程中,模具设为刚性,坯料选用美国标准 AL-1100,坯料视为塑性体,模具与坯料之间为剪切摩擦,摩擦系数为 0.12,上模和浮动凹模速度为 1 mm/s。

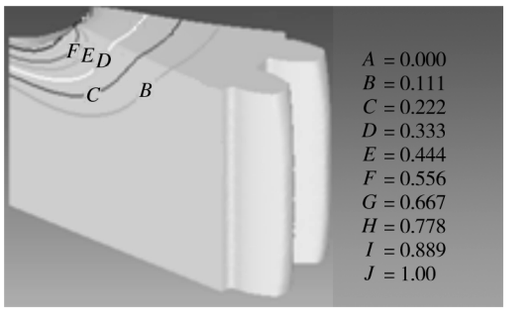
3　圆柱直齿轮模拟成形

在采用局部加载-约束分流终成形之前,采用闭塞式预锻制坯,预锻设置成形载荷急剧上升时停止运行。经过预锻后,材料在齿腔中得到积聚,为终锻局部加载-约束分流成形齿顶端奠定基础。然后对坯料进行退火处理,再将锻坯放入终锻模腔内,通过局部加载-约束分流终锻成形锻件。

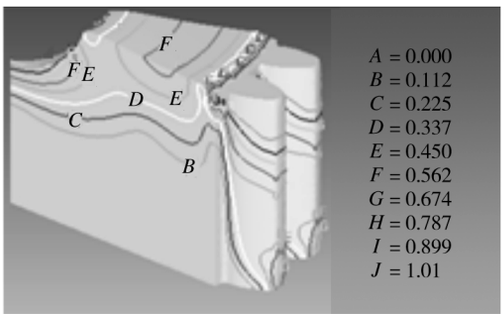
3.1　速度场分析

从图 3a 可知,当终锻上模压下量为 5.00 mm,在球冠的局部加载作用下,此时上模环形部分还没

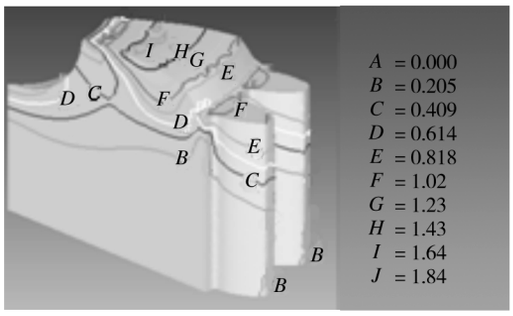
有接触到齿端部分,材料向凸台和上下齿端整体流动。在齿端部分聚集较多的材料后,在上模环形部分局部加载的作用下,开始对上齿端进行镦粗平整作用,材料开始向凸台和下齿端流动,有利于下齿端部分的充填,如图 3b 所示。由于球冠约束分流作



a 终锻压下量为5.00 mm



b 终锻压下量为8.00 mm



c 终锻压下量为10.00 mm

图 3 速度场分布

Fig. 3 Velocity field diagram

用,凸台在此时聚集了部分材料。成形终了阶段如图 3c 所示,此时上模环形部分对上齿端材料局部加载使材料流向凸台,同时可以对上下齿端进行修整,可以避免齿形角隅部分充不足现象。

3.2 成形载荷分析

成形载荷是成形方案选择的重要条件之一,若成形载荷过大,很容易导致模具负载过重从而影响模具的使用寿命[9],模拟后终锻行程-载荷曲线如图 4 所示。

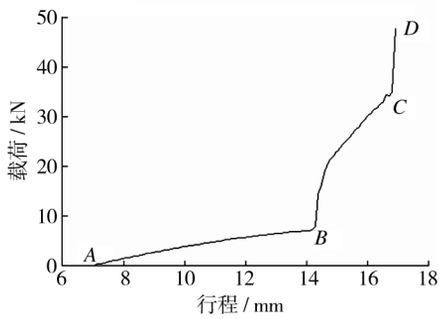


图 4 LR 行程-载荷曲线

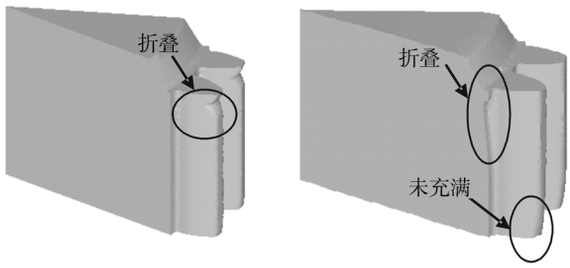
Fig. 4 Load-displacement curve

在终锻成形过程中,此时球冠部分对坯料中心部分进行局部加载,成形载荷上升缓慢(*AB* 段),材料开始向凸台和齿端进行堆聚。当上模环形部分接触坯料进行局部加载平整成形时载荷线性上升速度快(*BC* 段),此时主要成形上下齿端部分。随着上模继续下行,载荷上升相对缓慢(*CD* 段),此时球冠约束分流作用,在保证齿端部分的良好充填情况下,多余的材料流入凸台,载荷上升速度缓慢。当锥形凸台部分角隅充填时,因为锥形凸台部分尺寸大于零件尺寸,即进入成形终了阶段,可避免载荷急剧上升。

4 工艺对比分析

文中研究的大模数直齿轮,如果采用如图 2e 所示的上模结构闭塞式一步成形时,局部加载成形区较小,在模拟过程中,出现上模只对坯料上部分进行加载成形,材料充填完凸台部分和小部分上齿腔后,再利用充填完好的凸台对坯料整体成形,成形后会在齿腔上部分发生明显的折叠,无法成形出正常的齿形如图 5a 所示。

如果使用局部加载-约束分流终成形工艺的预锻坯料,且只使用局部加载终锻成形工艺时,凸台部分直径较大,材料同时充填上齿腔和凸台。当充填齿腔部分阻力大时,材料大量流向凸台,而使上半部分齿根出现缺料现象,在后期的成形过程中会出现金属折叠现象,下齿端部分较难充填,如图 5b 所示,同时成形载荷比局部加载-约束分流成形工艺大,如



a 闭塞式一步成形工艺　　b 局部加载终锻成形

图 5　锻件缺陷

Fig. 5　Forging flaw

图 6 所示。

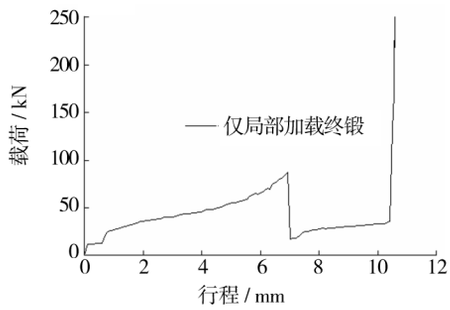


图 6　局部加载终锻成形行程-载荷曲线

Fig. 6　Load-displacement curve of local loading process

采用文中提出的局部加载-约束分流成形工艺,成形过程中球冠的局部加载作用先在齿端部分聚集大量的材料后,上模环形部分进行局部加载时可以在较小的成形载荷作用下完成齿端部分的平整充填,后期主要是凸台部分的约束分流充填,所以该工艺通过改变金属的流动方向,先成形传统闭塞式工艺难成形区域即齿形角隅部分,然后成形尺寸较零件大的凸台部分。

5　结语

通过对圆柱直齿轮局部加载-约束分流终锻成形工艺数值模拟分析可知:预锻制坯和球冠的局部加载作用在齿端部分聚集大量的材料。在上模局部加载过程中,齿端部分成形过程类似镦粗平整过程,凸台部分成形过程类似反挤过程。该工艺可以较好地成形文中研究的圆柱直齿轮,避免齿形部分材料折叠,角隅部分充不满的的现象。该工艺还可以有效地降低成形载荷,避免成形载荷急剧上升,与终锻过程只使用局部加载成形工艺相比可下降近 50%。

参考文献:

[1]　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.

[2]　薛勇,张治民,王科. 圆柱齿轮镦挤成形约束分流的数值模拟[J]. 锻压技术,2007,32(3):115-119.

[3]　刘克铭,刘恒丽,赵磊生. 齿轮泵齿轮参数的可视化计算[J]. 广西大学学报(自然科学版),2005,30(1):22-23.

[4]　陈丰,陈次昌. 直齿圆柱齿轮冷精锻成形的实验研究[J]. 锻压技术,2007,32(2):60-62.

[5]　张丽辉,薛克敏. 大模数高凸台圆柱直齿轮净成形试验研究[J]. 锻压技术,2007,32(3):30-33.

[6]　李春峰,薛克敏,单德彬,等. 金属塑性成形工艺及模具设计[M]. 北京. 高等教育出版社,2008:23-24.

[7]　吕炎. 精密塑性体积成形技术[M]. 北京:国防工业出版社,2003:138-139,141-142.

[8]　高锦张. 塑性成形工艺与模具设计[M]. 北京:机械工业出版社,2001:382-386,390-391,414-415,435-438.

[9]　金俊松,夏巨谌,王新云,等. 螺旋圆柱齿轮冷挤压成形三维有限元分析与工艺优化[C]. 江苏盐城. 第 3 届全国精密锻造学术研讨会论文集,2008:85-91.