

# 利用局部加载法冷精锻圆柱直齿轮

王岗超, 聂爱琴, 薛克敏, 许峰, 李琦

(合肥工业大学材料科学与工程学院, 合肥 230009)

**摘要:** 冷精锻圆柱直齿轮具有齿腔充填困难、成形力大及模具寿命低等技术难题。对此, 提出了传统封闭式冷锻-局部加载终锻二步锻造工艺。利用数值模拟方法分析了局部加载终锻的变形过程、等效应变和成形载荷, 并与封闭式冷锻成形圆柱直齿轮进行了对比, 结果表明: 利用局部锻造工艺作为终锻, 不但齿腔充填良好, 而且能极大地降低成形力和单位压强; 局部加载成形的齿轮齿形部分变形大、组织好。

**关键词:** 圆柱直齿轮; 局部加载; 冷精锻; 数值模拟

**中图分类号:** TG316

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1671-8798(2009)03-0249-03

## Cold closed-die forging of spur gear by local loading process

WANG Gang-chao, NIE Ai-qin, XUE Ke-min, XU Feng, LI Qi

(School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Aiming at resolving the technical problems such as large resistance of deformation, insufficient filling of the tooth cavity and short life of dies, a two-step forging process is proposed. The first step is conventional closed die forging, and the second step is the process utilizing local loading. Finite element method is used to simulate this two-step process, and equivalent strain field and load-stroke curve are investigated. Compared with the process that both steps are conventional closed die forging, the process we proposed is in favor of improvement of the corner filling condition and decreases the forming force and specific loading significantly. The deformation of the tooth that forged by local loading process are more severe, and so, this tooth have higher quality.

**Key words:** spur gear; local loading process; cold closed-die forging; numerical simulation

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<sup>[1]</sup>。20 世纪 80 年代末, 国内外提出了用塑性成形的方法直接成形齿轮。齿轮冷精锻就是其中比较先进的一种。与其他

成形工艺及切屑加工相比, 冷精锻成形具有节省材料、减少加工工序、节省工时及锻件质量高等优点。

但是齿轮冷精锻具有变形抗力大、齿腔充填困难及模具寿命低等技术难题。为了解决这些难题,

收稿日期: 2009-06-11

基金项目: 安徽省科技攻关计划项目(08010202132)

作者简介: 王岗超(1985—), 男, 河北邯郸人, 硕士研究生, 研究方向为精密塑性成形工艺及成形过程数值模拟。

通讯作者: 薛克敏, 教授, 博士生导师, 主要从事精密塑性成形工艺与仿真研究。

国内外提出了一些先进的工艺,例如浮动凹模和分流法等,但是这些工艺在解决降低成形力和提高模具寿命方面依然不是很理想。为此,本文研究了局部加载法<sup>[2]</sup>配合浮动凹模冷精锻直齿轮工艺,并通过有限元模拟与只采用浮动凹模的闭式冷锻工艺进行了对比。

## 1 局部加载工艺介绍

本文提出的局部加载工艺是先采用封闭式冷锻(利用浮动凹模)进行预锻,之后将预锻件放入精锻模腔内,在齿形部位局部加压(配合浮动凹模)。如图 1 所示,先用封闭式冷锻作为预锻,预锻达到一定载荷时停止加载以保护模具,使毛坯在齿形部分得到一定的材料聚集,进行中间退火以消除加工硬化,然后放入图 1(b)的精锻型腔内,只对齿形部分进行加压<sup>[3]</sup>。这就相当于只锻粗齿形部分,最终的成形载荷由反挤凸台所需的力来决定。工艺流程为:下料(圆柱形毛坯)→封闭式预锻→中间退火→局部加载终锻。

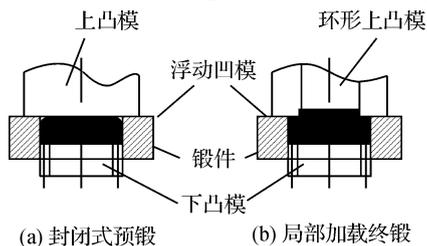


图 1 局部加载工艺

Fig. 1 Cold forging by local loading process

为了体现局部加载工艺的优越性,采用数值模拟的方法,将局部加载工艺(以下简称方案 1)和封闭式冷锻工艺(以下简称方案 2)进行对比。从成形效果和单位压强两方面来分析局部加载工艺的优越性,并详细研究锻件变形过程。为了形成对比,将封闭式冷锻也分为预-终锻二步。2 种工艺的预锻完全相同,都是将载荷加到普通冷锻模具材料能够承受的范围时停止加载。2 种工艺均配合浮动凹模。

本文研究的工件是高度为 12 mm,模数为 2,齿数为 18,压力角为 20°,上端带高度为 1.5 mm 凸台的圆柱直齿轮。材料选用 10 号钢。

## 2 三维造型及有限元模型建立

利用 UG 三维造型软件分别建造 2 个模拟方案的上、下凸模,浮动凹模和毛坯。根据锻件尺寸,取端面车削余量为 3%,设计坯料为  $\phi 30 \times 19.4$ 。为了快速进行运算,利用齿轮的对称性,本研究只模拟 2

个齿的成形。运用 Deform3D 软件采用刚塑性有限元数值模拟。坯料可视为塑性材料,选用美国标准 AISI-1010,采用软件库中自定义的本构关系模型。模具可视为刚性材料,成形温度选为室温 20 °C,忽略温度效应<sup>[4]</sup>。直齿圆柱齿轮冷精锻属于有润滑的冷态塑性成形,摩擦因子设置为 0.12。上模和浮动凹模下行速度均为 5 mm/s。

2 种方案的预终锻模型如图 2 所示。区别是方案 1 终锻上凸模是环形的,只对齿锻进行加载,而方案 2 终锻最后阶段是全部加载(上凸模与锻件全部接触)。



图 2 2 种方案模型图

Fig. 2 3D model of two processes for FE analysis

## 3 数值模拟结果分析

### 3.1 预锻模拟结果

在预锻中设置载荷达到 15 t 时停止运行。载荷为 15 t 时单位压强为 1 364 MPa。对于一般的冷锻模具钢来说,这种压强是允许的。其模拟结果见图 3。可以看出,经过整体预锻之后,材料在齿形部分得到了一定的聚集,为局部加载锻粗齿形奠定了基础。

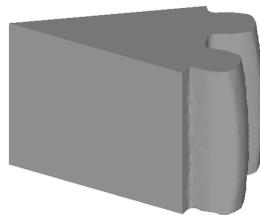


图 3 预锻模拟结果

Fig. 3 Filling of FEM analysis for dummyming

### 3.2 2 种终锻模拟结果分析

3.2.1 成形效果 图 4 是 2 种工艺的成形效果。从模拟的结果可以看出,2 种工艺均能很好地成形出齿形。齿形角隅部分充填完整。但是,在齿形的下端都有一些毛刺。这是因为 2 种工艺的浮动凹模是和上凸模一起向下运动的。这样在齿形充填的最后阶段,锻件和凹模基本上全部接触,导致浮动凹模和锻件之间的有利轴向摩擦很大<sup>[5]</sup>,使得齿形下部

分能得到很好的充填,直至出现毛刺。再看等效应变分布,方案1齿形部分的变形比方案2大。这样成形出来的齿轮齿形部分组织好、质量高。图4(b)的凸台高度明显高于图4(a)的凸台。这说明在齿轮零件凸台成形时,上凸模还需继续向下运动以完成齿腔充填,这时方案1的优越性就得到了体现。图5是方案2在齿轮凸台基本充满时所得到的齿形图。很明显,齿形上、下顶端都没有充填完整。

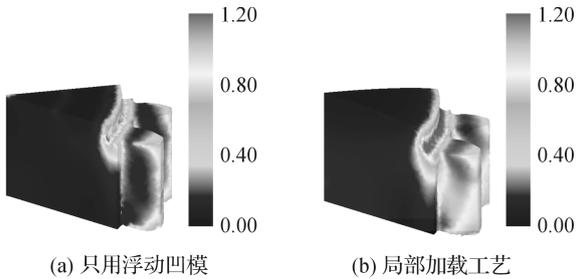


图4 2种工艺终锻等效应变图

Fig.4 Strain-effective of FEM analysis for two process

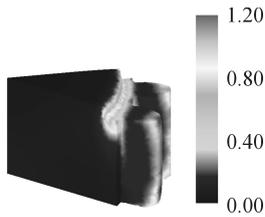


图5 方案2上凸台基本充满时的等效应变图

Fig.5 Strain-effective of FEM analysis for plan B when the boss is almost full filled

3.2.2 局部加载工艺变形规律 图6是局部加载终锻工艺锻件变形过程图。压下量为40%时,齿形部分的变形集中在上端,下端基本上没有变形。只对齿形部分进行加载,齿形部分的材料受到其他部分材料的约束,所以上端没有基本充满时,下端很难得到充填。压下量为80%时,齿形上、下端除了角隅部位外基本上充填完整。上端充填仍然优于下端。继续下压,在反挤凸台的同时充填角隅部位,直至齿形充填完整。从等效应变可以看出,在齿形完全充填时,基本上整个齿形部分都有很大变形。这样锻出来的齿轮齿形部分质量高。

3.2.3 2种工艺载荷 图7是2种终锻工艺行程-载荷曲线。方案1的最终载荷明显要小于方案2。在终锻的初始阶段,由于方案2上凸模有一个用以成形齿轮凸台的型腔,所以在凸台成形阶段2种工艺完全一样。但是当凸台基本充满时,方案2锻件基本没有自由面。在充填的最后阶段多余的材料没

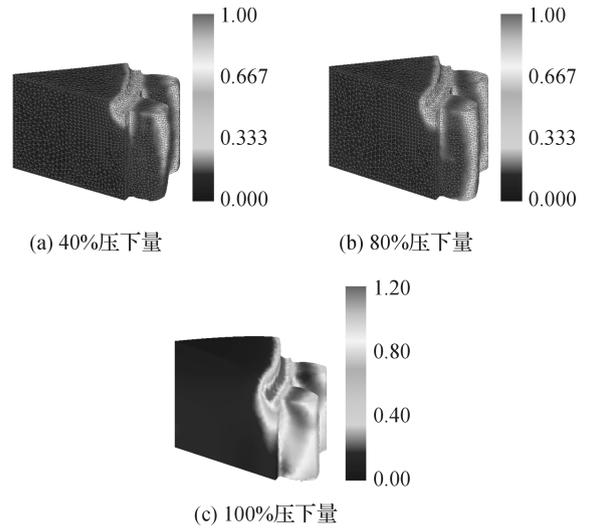


图6 局部加载工艺齿形变形过程(等效应变)

Fig.6 Filling of the tooth cavity by local loading process (Strain-effective of FEM analysis)

有地方流动,模具和坯料几乎全部接触,尽管静水压力很大,但3个主应力间的差值很小,不满足屈服准则,不能塑性变形和流动。这样在充填的最后阶段载荷就会迅速上升。而在方案1中,整个凸台部分都是自由面,载荷大小取决于反挤凸台所需的载荷。方案2最终载荷为356 000 N,上凸模单位压强为3 232 MPa。方案1最终载荷为63 000 N,上凸模单位压强为1 517 MPa,单位压强不足方案2的1/2。

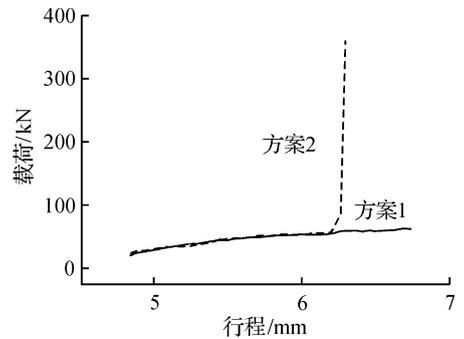


图7 2种工艺终锻行程-载荷曲线

Fig.7 Stroke-forming load curves of two processes

### 4 结语

提出了传统封闭式冷锻-局部加载终锻2步锻造法成形圆柱直齿轮。通过有限元模拟的方法,分析了局部加载工艺终锻圆柱直齿轮的变形过程,并与只用浮动凹模的封闭式冷锻进行了对比,得出结论: