

# 直齿圆柱齿轮冷精锻工艺 对比分析及数值模拟

合肥工业大学 (安徽 230009) 王岗超 许 锋 李 琦 薛克敏

齿轮作为传递运动和动力的最基本零件之一,在工业领域有着非常广泛的应用。直齿圆柱齿轮是各种齿轮中应用最为广泛的一种。当前,直齿轮的加工方式大多仍是采用切削加工,该方法加工周期长,生产效率低,浪费原材料,并且在加工时齿形部分的纤维被切断,导致齿轮强度不高。因此,迫切需要一种优质、高效、节材、节能的齿轮生产新工艺。

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。这种方法加工的齿轮只需少量或不需要切削加工即能直接应用,生产效率高,节省材料,且金属纤维沿齿廓连续合理分布,齿轮强度高,是一种真正的优质、高效、节材、节能的齿轮生产新工艺。但齿轮冷精锻也存在变形抗力大、齿腔充填困难、模具寿命低等技术难题。本文通过模拟对比,分析了浮动凹模、轴分流及其改进工艺的齿腔充填效果及载荷大小。

隙均匀;在齿槽工作面上、中、下三层部位设置渗碳检测试样。③填充渗碳剂,要求均匀、密实,适当加以捣固,不得有空洞、塌陷。④按技术要求组装上端盖,与轴头紧密牢固连接。⑤对上下端盖缝隙处进行耐火密封涂料涂刷,使用高温耐火材料隔绝渗碳剂与外界空气的一切通道。⑥瓦楞辊的外露轴头部分与环抱背负的渗碳筒体表面整体涂刷高温抗氧化涂料。⑦在井式加热炉的钢制炉口处设置耐热钢横担,将瓦楞辊悬挂吊装于炉膛内,根据炉膛直径的大小,可同时装入数根,以提高生产效率。⑧按照制定的渗碳温度、时间等工艺参数进行加热保温操作。⑨渗碳过程完成后取出瓦楞辊,检测渗碳质量,切除工艺吊环,清理辊面齿槽,即可转入中频淬火工序。

(4)操作要点 操作程序中的④⑤两项决定了瓦楞辊固体渗碳处理的成败与否,必须精心可靠地完成;⑥项则可以防止渗碳筒在高温反复加热时的氧化起皮,采用RS型抗氧化涂料成本低廉,效果明显,可将渗碳筒的实际使用寿命延长3~5倍,降低了热处理企业的生产成本,相应地提高了瓦楞辊固体渗碳处理的可行性。⑧项可参照一般的固体渗碳工艺参数;渗碳温度920~940℃;为了最大限度地减小瓦楞辊的整体变形,应缓慢

分阶段升温、均匀透热;保温后降温出炉;根据渗碳层深的不同要求,一个工艺周期需要20~24h。

(5)瓦楞辊固体渗碳处理的技术效果 对随炉试样进行金相检测,齿槽工作面三个部位的试样的渗碳层碳浓度较高,达到1.0%~1.2%,含有少量细小的网状碳化物(在随后的处理中被消除而形成弥散的颗粒状合金碳化物);层深1.8~2.2mm,较均匀、一致;在齿槽部位的实体火花检测也基本相符;辊身整体变形较小,在技术要求范围之内。渗碳后的瓦楞辊经过中频淬火处理后,齿面硬度高达64HRC左右,同时渗碳淬火层的硬度梯度比较平缓,在精磨齿形时不易产裂纹,达到了较好的预期效果。

### 3. 结语

整体渗碳淬火处理的瓦楞辊以超高的表面硬度、优良的耐磨性和整体的强韧性,装机应用后,较普通辊工作寿命提高80%以上,使用周期大大延长,维修成本减少;同时因采用固体渗碳技术,设备要求降低,操作简便实用,综合成本增加有限,使其具有很高的性价比,广受用户好评,市场竞争力极强,现已有数百支成品推向市场,使瓦楞辊制造厂家和热处理企业均取得了可观的经济效益。MW (20090218)

## 1. 工艺方案

针对齿轮冷精锻变形抗力大、齿腔充填困难等技术难题,本文提出采用以下三个工艺方案来成形直齿轮。

方案一:只用浮动凹模工艺。

方案二:采用浮动凹模和轴向分流工艺。

方案三:采用浮动凹模和轴向分流的改进工艺,分流型腔设置在齿形上端顶部。

以模数为2、齿数为20、压力角为 $20^\circ$ 、厚度为10mm、材料为10号钢的平端面直齿圆柱齿轮为例,对这三种工艺分别进行模拟分析。

三种工艺方案上凸模形状如图1所示。方案二利用轴向分流,所以上凸模(见图1b)中间有一个用于分流的孔。本文取其直径为10mm。方案三改进了轴向分流,将分流型腔设置在了齿形上端顶部。其上凸模形状如图1c所示。分流腔宽3mm、深5mm。



图1 三种方案上凸模形状

## 2. 三维造型及有限元模型的建立

利用UG三维造型软件分别建造3个模拟方案的上、下凸模,浮动凹模和毛坯。根据锻件尺寸,设计坯料为 $\phi 34\text{mm} \times 13.5\text{mm}$ 。为了快速进行运算,利用齿轮的对称性,本文只模拟一个齿的成形。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,模具可视为刚性材料,成形温度选为室温 $20^\circ\text{C}$ ,忽略温度效应。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。

三种方案定位后的模型如图2所示,上凸模没有齿形,带动浮动凹模一起向下运动。上凸模与浮动凹模和下齿形凸模共同形成齿腔。

## 3. 三种方案对比模拟分析

(1) 三种方案的齿腔充填情况 三种方案进行相同的前处理之后进行模拟,运行结果如图3所示。

方案一齿形充填效果如图3a所示,采用了浮动凹模,有效地利用了轴向摩擦力,所以改善了齿轮下端顶

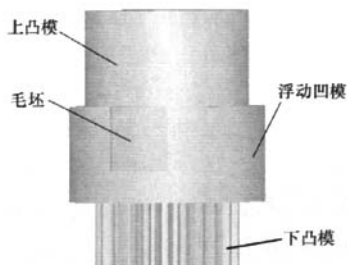
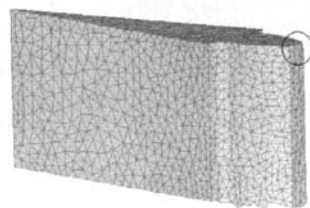
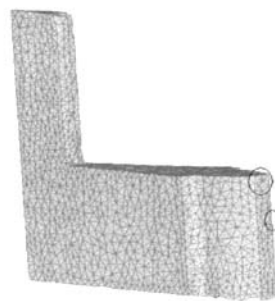


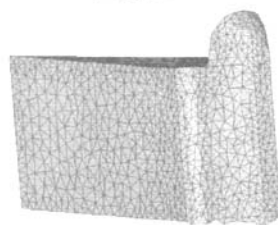
图2 模型图



(a) 方案一



(b) 方案二



(c) 方案三

图3 齿形充填效果

部的成形。但是齿形的上端顶部却有少量未充满的现象。

方案二充填效果如图3b所示,轴向分流孔已经被充填了很高,但在齿形的上顶端和中间部分仍有未充满现象,可见轴向分流工艺充填缺陷严重。

方案三充填效果如图3c所示,方案一和方案二中都不存在充填缺陷的齿形上端顶部,而在方案三中充填很好。方案三将分流型腔设置在最难充填的部分,所以在充填

的最后阶段, 多余的材料都流到了这个地方, 从而在这个地方形成了飞边, 只需通过少量的后续加工就能获得高质量的齿轮。

从成形效果图可以看出, 方案三优于方案一和方案二。

(2) 三种方案载荷和单位应力 三种方案模拟后的行程-载荷曲线如图 4 所示。

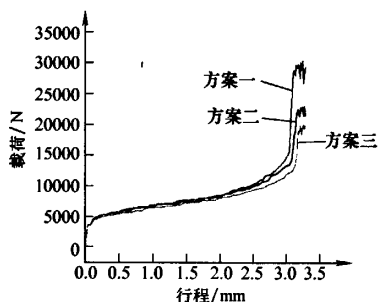


图4 三种方案行程-载荷曲线

可以看出, 只用浮动凹模工艺存在载荷过大的缺陷。材料为 10 号钢的齿轮, 单齿变形载荷就达到 30 600N。而单齿截面积为 44. 03mm<sup>2</sup>, 所以单位压应力为 694. 98MPa。单位压应力过大, 不仅增加设备的吨位, 而且还会大幅降低模具的寿命, 这在生产上是不允许的。

而方案二, 利用浮动凹模和轴向分流, 使成形载荷大大降低, 单齿变形载荷为 20 800N, 单位压应力为 472. 41MPa, 与方案一相比下降了 32%。由此可见, 方案二在降低载荷和单位压应力方面效果显著。

再看方案三, 单齿变形载荷为 22 500N, 单位压应力为 511. 02MPa。和方案二相比, 虽然单位压应力略有回升, 但是相对于方案一, 单位压应力下降了 26. 5%。这说明方案三的分流工艺在降低成形载荷和单位应力方面也有很大的成效。

从行程-载荷曲线可以看出, 方案二和方案三的成形载荷都远小于方案一, 方案三略大于方案二。

综合齿形成形效果和行程-载荷来看: 方案一不仅存在充不满的缺陷, 而且载荷过大; 方案二大大降低了成形载荷, 但是充填缺陷严重; 方案三既克服了齿腔不能完全充满的缺陷, 又解决了载荷过大的难题, 是可以用于实际生产的好方案。

(3) 三种工艺方案分析 方案一和方案二存在充填缺陷, 因为在充填上端顶部的时候摩擦力过大, 使得材

料不能充填到顶部的角落。摩擦分布如图 5a 所示。浮动凹模和上凸模一起向下运动, 毛坯的各个部分相对于浮动凹模都是向上运动的, 所以浮动凹模对毛坯有向下的摩擦力。而且上凸模对毛坯也有阻碍其运动的摩擦力。这样就使得图 5a 中所示的角落很难充填完整。而且方案二的分流腔不在齿形最难充填的地方, 所以其充填缺陷最为严重。而方案三将分流型腔设置在最难充填的角落(如图 5b 所示), 所以在这个角落的充填过程中就不存在上凸模对毛坯的阻碍摩擦, 从而使这个角落很容易就能充填完整。

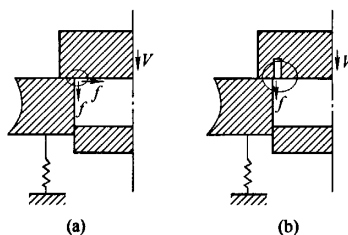


图5 摩擦分布

在载荷方面: 方案一没有分流型腔, 在充填的最后阶段多余的材料没有地方流动, 模具和坯料几乎全部接触, 尽管静水压力很大, 但三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; 方案二和方案三都设置了分流型腔, 多余的材料有充填的空间, 很容易满足屈服准则, 所以载荷下降很多。但是方案二的分流型腔没有设置在最难充填的部分, 虽然降低了载荷, 但是不能保证齿轮能够充填完整。方案三则将分流型腔设置在了最难充填的部分, 不仅使最难充填的角落少了半边摩擦力, 而且缓解了载荷过高的趋势。

#### 4. 结语

三个方案的对比模拟分析表明:

(1) 只用浮动凹模工艺不但有缺肉现象, 而且还存在载荷过大的缺陷。

(2) 浮动凹模配合轴向分流工艺能有效地降低成形载荷, 但是充填缺陷最为严重。

(3) 浮动凹模配合改进的轴向分流工艺, 由于将分流腔设置在了最难充填的地方, 所以既能有效地改善齿腔充填性能, 又能大大降低成形载荷。第三方案是冷精锻直齿圆柱齿轮的合理方案。MW (20090310)