圆柱斜齿轮冷精锻成形工艺模拟研究

合肥工业大学材料科学与工程学院 （安徽 230009） 王岗超 薛克敏 许 锋 王 刚 石文超

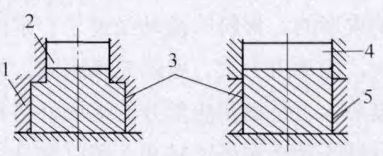
【摘要】针对圆柱斜齿轮冷精锻成形的困难性，提出了两种成形工艺——圆柱形上凸模加载方式和直齿轮形上凸模加载方式。通过数值模拟的方式分别对这两种工艺进行了研究。结果表明，圆柱形上凸模加载方式不仅成形性差，而且模具单位压强过大；而直齿轮形上凸模加载方式配合上下齿端分流工艺，不仅角隅部位充填性能好，而且能极大地降低单位压强。另外，还提出了径向推力轴承式锻件出模方式。

圆柱斜齿轮是汽车及机械行业中应用极为广泛的重要传动零件，其形状复杂，对尺寸精度、表面质量及综合力学性能均要求很高。目前，国内外采用先粗锻制坯，再切削精加工齿形的方法生产该类型齿轮。而传统的切削加工方法不仅材料利用率低、生产效率低，而且切削加工破坏了齿形表面的纤维流线分布，使得齿轮锻件的强度不高。这就迫切需要新的加工技术来制造圆柱斜齿轮以适应当前的发展趋势。

圆柱斜齿轮冷精锻技术就是针对切削工艺的缺点提出来的。冷精锻技术不仅大幅提高了材料利用率，而且齿轮锻件纤维流线沿齿形分布，使得斜齿轮强度很高。斜齿轮冷精锻技术是一种具有很大的经济与社会价值的新型加工技术。国内外很多专家学者都已开始对其进行研究。但是圆柱斜齿轮由于其螺旋角的存在不仅使得齿形很难充填完整，成形载荷过大，模具寿命低，还使得锻件脱模极为困难。针对以上难点，本文提出了两种模具运动方式，重点研究了分流法工艺在降低成形载荷，提高充填性方面的优越性，同时提出了合理的锻件脱模方式。

一、工艺介绍

斜齿轮螺旋角的存在，使得在锻造时模具的运动很难实现。对此，设计了两种模具加载方式，如图1所示。图1a是凸模为圆柱形的加载方式。整个凹模一般为一体，上面为圆柱形凹腔，下面为斜齿轮凹腔，冲头只在圆柱形凹腔内移动，其不足是模具加工困难。图1b是凸模为直齿轮形状的加载方式。凹模一般是分开的，也可以是整体的，上面为直齿轮凹腔，下面为斜齿轮凹腔。冲头为直齿轮形状，只在上面的直齿轮凹腔内运动，运行至斜齿轮型腔时停止加载，成形出斜齿轮锻件。此种加载方式模具制造方便。



（a）圆柱形加载　　（b）直齿轮形加载

图1　两种模具加载方式

1、5.斜齿轮凹腔 2.圆柱形凹腔 3.毛坯 4.直齿轮凹腔

二、有限元模型分析

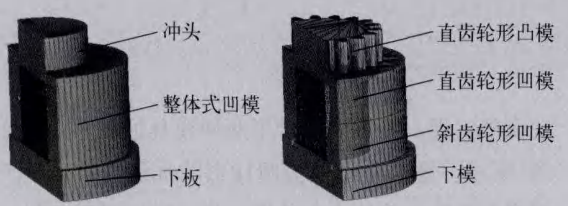
1. 有限元模型的建立

斜齿轮几何参数：模数为2，齿数为18，螺旋角为12.5°，压力角为20°，齿顶高系数为1，顶隙系数为0.25，高度为15mm。

运用Deform－3D软件采用刚塑性有限元数值

万方数据

模拟技术对其进行数值模拟。模具可视为刚性，坯料视为塑性材料，选用美国标准AISI－4120。采用软件库中自定义的本构关系模型。用刚塑性有限元法分析金属塑性成形问题时，材料满足下列假设：①忽略材料的弹性变形。②不计体积力和惯性力。③材料均质，且各向同性。④材料变形过程中体积不变。材料服从Mises屈服准则，且等向强化。⑤材料同时存在应变强化和应变速率强化。根据体积不变原则计算毛坯尺寸为ϕ30mm×25.78mm。对毛坯外围变形剧烈的部分进行局部网格划分。成形温度选为室温20℃，忽略温度效应。采用Newton-Raphson迭代法进行求解。斜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0.08。有限元模型见图2。冲头在上凹模腔中运动，下行速度为10mm/s。



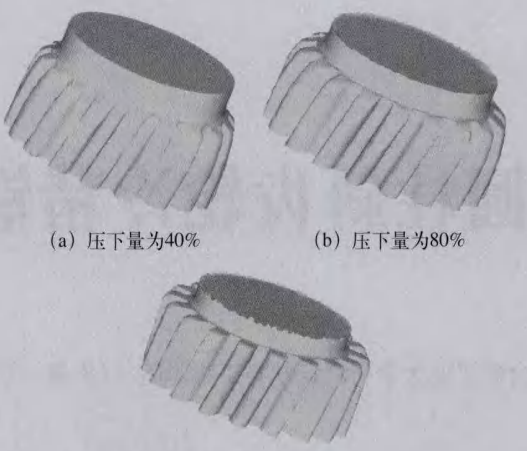
(a) 圆柱形加载方式　　(b) 直齿轮形加载方式

图2　有限元模型

2. 圆柱形加载方式模拟结果分析

图3是圆柱形加载方式的模拟结果。图3a是凸模压下量为40%时的成形结果。毛坯各部分的充填明显不均匀。齿形下端优先充填，上端则远远落后。这是因为上端充填是毛坯上部圆柱部分材料的转移流动成形的。材料的流动经过了一定的转角，变形量大，流动阻力大，所以充填困难。而齿形下端的充填基本上是由相应部分的毛坯材料径向流动形成，材料流动没有经过转角，所以容易充填。图3b是压下量为80%时的充填效果，下端已基本完全充满，但是上端仍有很大的圆弧。图3c是压下量为98%时的充填结果。可以看出，齿形上顶端仍有一定的圆弧存在。而此时锻造载荷已达到2.9MN，单位压强约为4100MPa。远远超过了冷锻模具的承受能力。

由此可见，这种加载方式不仅存在材料充填不均匀、充填不满的缺陷，而且还存在单位压强过大的弊端。故而很难应用于实际生产。



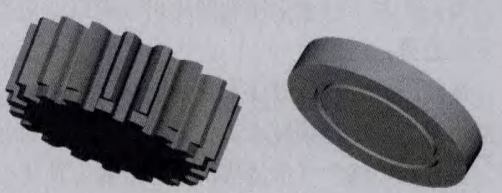
(a) 压下量为40%　　(b) 压下量为80%

(c) 压下量为98%

图3　变形结果

3. 直齿轮形加载方式模拟结果分析

（1）工艺措施　从圆柱形加载方式的模拟结果得出，斜齿轮锻件的成形与直齿轮的成形相似，都是齿形的上下端面最难成形，尤其是上端。而且斜齿轮的成形比直齿轮更难，不能采用浮动凹模来改善上下角隅部位的充填。本文直接采用上下齿端分流工艺措施来提高角隅部位的充填性能。图4是直齿轮形加载方式的上下模。图4a是上凸模。在上凸模的底面有一个宽度为2mm，高度为2mm的凹槽来减少齿形上端充填时所受的径向摩擦阻力。图4b是下板，在其上端面也有一个2mm×2mm的环形槽，其作用与上凸模的环形槽相同。



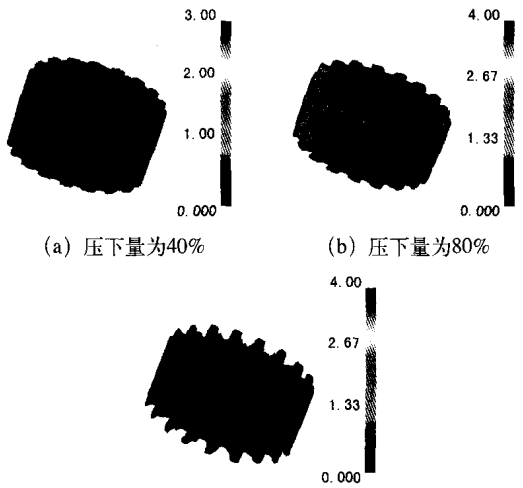
(a) 上凸模　　(b) 下板

图4　直齿轮形加载方式工艺

（2）模拟结果　图5是直齿轮形加载方式的变形结果。斜齿轮锻件成形无缺陷，齿形部分变形量大，锻件质量好。图5a是压下量为40%时的等效应变分布。由于凸模（见图2b）为直齿轮凹腔，所以锻件上部为直齿轮形状。锻件充填均匀，上下端基本同步。图5b是压下量为80%时的等效应变分布。锻件各部分的充填依然均匀，上端仍有一部分为直齿轮。此时锻件上下端面的充填还没有达到上下模的环形槽部分。由此可见，上下齿端分流工艺在充

万方数据

填最后阶段才能起到作用。图5c是压下量为100%时的等效应变分布。斜齿轮锻件充填完整，无缺陷。每个齿的上下端面都有一个小凸台，不仅平衡了下料体积的偏差，而且也改善了上下齿端的充填性能。冷锻最后阶段锻件仍有一定比例的自由表面，所以其成形载荷必将大幅降低。



(a) 压下量为40%　(b) 压下量为80%

(c) 压下量为100%

图5　等效应变分布图

图6是直齿轮加载方式的载荷－行程曲线。与直齿轮冷锻类似，载荷曲线也分为三个部分：①毛坯开始贴模之前的自由镦粗变形阶段（图6中1点以前），这个阶段毛坯相当于镦粗，为了克服毛坯的变形抗力，载荷从0迅速上升。②毛坯均匀变形、载荷缓慢上升阶段（1点至2点）。这时毛坯开始均匀充填型腔，随着齿腔深处的充填载荷缓慢上升。③载荷少量的急剧上升阶段（图6中2点以后），这个阶段是毛坯角隅部位的充填导致载荷上升。但是由于采取了上下齿端分流工艺，所以载荷只有少量的急剧上升。载荷最大值为2.88MN，单位压强为2300MPa。与圆柱形加载方式相比，单位压强下降了43.9%。

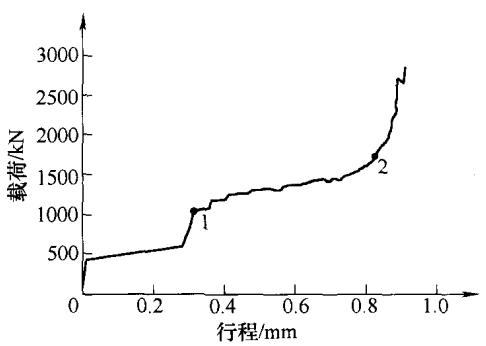


图6　载荷—行程曲线

由此可见，直齿轮形加载方式与圆柱形加载方式相比，不仅有很好的角隅充填性能，而且能极大地降低单位压强。

三、锻件出模方式

斜齿轮冷锻工艺的另一个关键性难点就是锻件的出模方式。斜齿轮具有螺旋角，不能直接出模，必须设计专门的出模装置进行锻件出模。本文设计了径向轴承式凹模脱模方式，如图7所示，径向推力轴承上端固定，下端与凹模接触。顶杆向上顶出锻件，锻件出模的过程中会对凹模有一定的扭矩作用，使得凹模随着锻件自由旋转，从而使得锻件顺利脱模。径向推力轴承只对凹模产生轴向力。凹模可以自由转动，来适应锻件的螺旋角。

此脱模方式脱模方便，模具结构简单，容易实现，不需专门的设备，降低了成本。

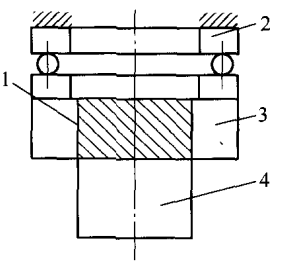


图7　斜齿轮脱模装置示意

1.斜齿轮锻件 2.径向推力轴承 3.斜齿轮凹模 4.顶杆

四、结语

针对圆柱斜齿轮冷锻成形，提出了两种成形工艺——圆柱形加载方式和直齿轮形加载方式。通过数值模拟研究表明：

（1）圆柱形加载方式齿形充填不均匀，角隅部位充填不满，且成形单位压强过大，不适合冷锻圆柱斜齿轮；直齿轮形加载方式配合上下齿端分流工艺，不仅能很好地提高角隅充填性能，锻件充填均匀，而且能极大地降低单位压强，与圆柱形加载方式相比，单位压强下降了43.9%。

（2）提出了径向推力轴承式斜齿轮锻件出模方式，使得锻件出模不需专门的设备，模具结构简单，成本低，值得推广借鉴。MW

（20111206）

万方数据