

锥齿轮冷挤压成形加工数值模拟研究*

潘 隽¹, 陈文彪², 孟 彬¹, 鲍官军¹, 杨庆华^{1*}

(1. 浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 浙江 杭州 310014;
2. 东风日产柴汽车有限公司, 浙江 杭州 310015)

摘要: 为了解决人工设计锥齿轮冷挤压模具过度依赖经验的问题,将数值模拟应用到锥齿轮模具设计中。设计了一套用于冷挤压加工锥齿轮的三层组合凹模,制定了相应的工艺措施,利用 Deform-3D 软件对锥齿轮的冷挤压加工过程进行了数值模拟,分析了加工过程中的载荷曲线、速度场、应力场和温度场,获得了有关锥齿轮变形规律的基本情况。研究表明,通过改善润滑条件、优化模具几何参数可以提高冷挤压加工锥齿轮的成形质量,并对锥齿轮冷挤压加工工艺流程定制、模具设计具有一定的指导意义。

关键词: 冷挤压;模具;锥齿轮;数值模拟

中图分类号: TG376.3; TH132.421

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)02-0167-04

Numerical simulation analysis of cold extrusion forming for bevel gear

PAN Jun¹, CHEN Wen-biao², MENG Bin¹, BAO Guan-jun¹, Yang Qing-hua¹

(1. Key Laboratory of E & M, Ministry of Education & Zhejiang Province, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. Dongfeng Nissan Diesel Motor Co., Ltd., Hangzhou 310015, China)

Abstract: In order to study the cold extrusion forming of the bevel gear, a three-layers assembled cavity die and its technological measures were designed. Numerical simulation of the cold extrusion forming process was applied, its load curve, velocity field, stress field and temperature field were analyzed. After the analysis of numerical simulation, the basic knowledge of the bevel gear deformation was obtained. In order to solve the remaining problems of the current cold extrusion forming, subsequent targets for optimization were introduced. The experiment results show some significance in guiding how to design a die and plan its technological measures.

Key words: cold extrusion forming; die; bevel gear; numerical simulation

0 引言

二战后,冷挤压加工技术在发达国家的汽车、摩托车、家用电器等制造行业得到了迅猛发展,同时,新材料、新工艺和性能更优设备的出现在很大程度上又加快了该技术的发展速度。据有关行业数据显示,国际上现阶段每辆汽车上采用的冷锻件质量日本为 50 kg,美国和欧洲分别为 40 kg; 最重冷锻件质量达到 22.7 kg。而目前我国每辆汽车上采用冷锻加工件的质量只有 10 kg,最大件质量也只有 1.5 kg^[1]。

笔者拟采用冷挤压成形方法加工锥齿轮。与一般用于加工锥齿轮的铣齿法、滚齿法和数控机床磨齿法相比^[2],采用冷挤压成形方法加工锥齿轮具有成形件力学性能好、加工成本经济、加工过程节能和产能高等优点^[3-4]。冷挤压技术的关键是分析研究金属成形过程的规律,据此优化成形件和模具的结构,规划冷挤压加工工艺,以使设备吨位充分发挥其效用。成形件挤压饱满,则模具磨损低、寿命高、温度场分布均衡^[5]。

本研究针对锥齿轮成形件设计一套冷挤压加工模具,旨在通过 Deform-3D 有限元软件模拟仿真冷挤

收稿日期: 2011-09-23

基金项目: 浙江省自然科学基金杰出青年团队资助项目 (R1090674); 浙江省特种装备制造与先进加工技术重点实验室开放基金资助项目 (2011EM007)

作者简介: 潘 隽 (1987-), 男, 浙江浦江人, 主要从事金属塑性成形及数值仿真方面的研究。E-mail: juniuspan@gmail.com

通信联系人: 杨庆华, 男, 教授, 博士生导师。E-mail: king@zjut.edu.cn

压真实的塑性变形过程,对变形过程中的应力、应变及温度进行分析,了解各参数对模具寿命的影响,并据此提出优化冷挤压加工的措施,确定后续模具优化需要修改的参数,以提高模具寿命^[6],为后续锥齿轮的实际冷挤压加工试验做好前期工作。

1 锥齿轮冷挤压工艺分析

1.1 挤压成形件说明

本研究采用的齿轮零件如图 1 所示。该齿轮大端模数 2.5 mm,齿数 22,齿形角为 20°,采用 45 号钢。

在加工过程中,采用冷挤压技术加工的零件要承受三向压应力,因此在设计冷挤压件时,冷挤压件在其加工方向上的径向尺寸必须逐渐变小。若不满足该条件,则模具和坯料之间的空隙会造成坯料在冷挤压加工过程中出现较大拉应力现象,当这一拉应力超过坯料材料的抗拉极限时,坯料就会开裂,塑性过程就会被破坏,冷挤压加工就无法继续进行下去了。即使拉应力未超过材料的抗拉极限,由于坯料缺少了冷挤压加工时“两压一拉”变形过程,成形件也会不可避免地出现各种缺陷,如气孔、夹杂、缩孔、空洞等^[7]。

图 1 中的欲成形锥齿轮结构复杂,同时周向小模数齿形、齿轮大端倒角和小端凹陷又进一步加大了冷挤压加工的变形难度。为了提高凸模的强度,通常凸模压头平整或者中部较为突出,图中大端倒角设计无法满足冷挤压加工三向受压的条件;齿轮小端凹陷使得外围尖角突出,冷挤压成形困难。若不对此成品零件图作一些适合冷挤压加工的改动,在加工过程中齿轮大端极易开裂;同时为了成形饱满的小端尖角,加工过程中的变形抗力会在此部位急剧升高,从而破坏模具。

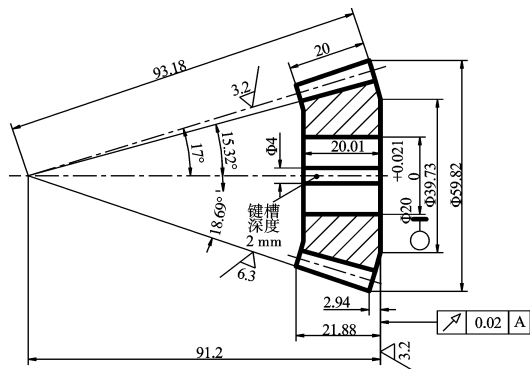


图 1 成品零件图

因此,本研究根据成品零件图修改设计出了冷挤压件修改后得到的冷挤压件给齿轮大小端填上了一定的余料,以使冷挤压件上下端平整,利于加工过程中金属的流动,最终获得性能优良的挤压件。

1.2 成形工艺规划

为了最终加工得到成品锥齿轮,需要事先制定零

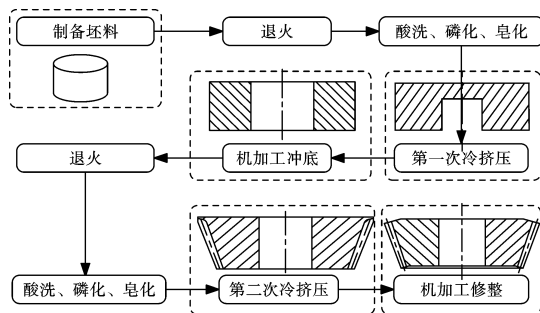


图 2 成形工艺规划

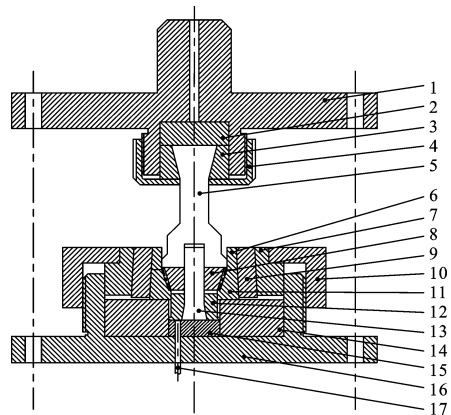
件的成形工艺,如图 2 所示。

冷挤压原材料采用 45 号钢棒料,经退火和酸洗、磷化、皂化后进行第一次冷挤压,得到带底的中空坯料。第一次冷挤压加工的目的是减少材料的浪费,并且通过冷挤压把原本需要通过机加工车削掉的材料转移到坯料的其他区域。由于冷挤压无法将坯料中部的底料完全挤压至坯料外围,第一次冷挤压后得到的坯料需要再通过机加工,将中心加工为通孔,得到可用于成形齿轮的坯料。在第二次冷挤压前,需要再次通过退火和酸洗、磷化、皂化等预处理工序以改善坯料塑性,并且给坯料附着一层润滑支层以减小摩擦系数,防止模具擦伤与破碎,然后经第二次冷挤压得到齿轮成形件。然后将成形件通过机加工修整齿轮的大小端,最终得到锥齿轮的成品。

整个成形工艺的关键是第二次冷挤压齿形成形。第一次冷挤压采用反挤压加工中空凹槽比较简单,且变形抗力较小,因此不在本次研究范围之内。

1.3 模具结构及材料选择

锥齿轮冷挤压模具结构图如图 3 所示。



1—上模板;2—上垫块;3—压圈;4—圆形螺母;5—凸模;6—上凹模;7—外压套;8—锥齿轮;9—内压套;10—圆形螺母;11—下凹模;12—顶套;13—反向凹模;14—齿模垫块;15—下垫块;16—模座;17—顶杆

图 3 锥齿轮冷挤压模具结构

锥齿轮采用正挤压加工。为了减小挤压终了时的变形抗力,锥齿轮小端最终并未与模具接触形成闭合

型腔(如图3所示),成形后的锥齿轮8与顶套12之间留有一定的间隙。组合凹模设计必须根据单位挤压力确定压套数,根据实验公式可计算得到挤压力^[8]:

$$P = A_0 \cdot x \cdot n \cdot \sigma_b \quad (1)$$

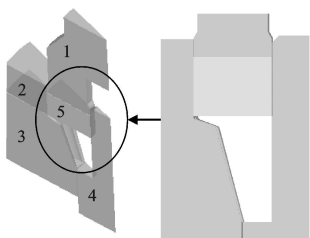
式中: A_0 —坯料的横断面积, x —模具的形状系数, n —挤压系数, σ_b —材料的抗拉强度。

由式(1)计算得到的单位挤压力为1 897.5 MPa,根据经验总结,若单位挤压力在1 600 MPa和2 500 MPa之间,须将该模具设计为3层组合凹模,并将最里层的凹模镶块分割为上下凹模,以提高疲劳强度。挤压的过程是:将坯料放入凹模6、11后,凸模5向下运动挤压坯料冷成形,待挤压完成,凸模上升返回复位状态,接着顶杆17将成形好的锥齿轮8顶起,然后取出锥齿轮,从而完成一个工作循环。

由于冷挤压加工过程三向受压加大了坯料塑性变形的抗力,冷挤压的单位压力约是冷拉拔的单位拉伸力的2倍。为了提高模具的寿命,必须选择合理的模具材料。本研究中,组合凹模中的上下凹模6、11的材料采用强度较高的WC系硬质合金,WC含量为87%;2个压套7、9的材料采用42CrMo合金结构钢。

2 锥齿轮冷挤压数值模拟模型

在保证模型具有准确的加工条件下,应尽量减少零件数量从而降低计算量,以获得较高的计算效率。本研究将图3中的模具简化为有限元模型,如图4所示。



1—凸模;2—上凹模;3—下凹模;4—反向凹模;5—坯料

图4 有限元模型

(1) 几何模型简化。本研究选取1个齿形,即1/22模型用于数值模拟,两个轴对称面作为对称边界。将模具设为刚体,坯料5设置为塑性体,由于刚体本身不作为有限元分析的对象,在模型中只是起到设定模拟边界条件的作用,因此简化后的模型只是导入了加工过程中与坯料相接触的模具零件1、2、3、4。

(2) 单元划分。数值模拟采用Deform软件默认的四面体单元网格,采用相对网格设置方法,网格数为38 219个。由于成形斜齿轮时形变主要发生在坯料外侧,需要将外侧网格划分得更加细密,径向内侧与外侧单元尺寸比为2。材料选用Deform材料库中的AISI-1045,该美标钢号与我国的45号钢相对应。

(3) 边界条件。模具与坯料之间采用剪切摩擦模型,取摩擦系数为0.12。

挤压过程伴随热量变化,热量导致的温度变化会改变塑性材料的流变曲线^[9],进而影响到挤压过程中的变形抗力及应力分布,因此采用热力耦合分析。该模拟设置室温为20℃,坯料与模具之间的热量传递可以通过设置接触条件中的热传递系数来实现,选择热传递系数为11。

模拟时挤压速度设置为60 mm/s。

(4) 终止条件。本研究选择凸模位移作为终止条件,根据成形需要,设定凸模位移为15.26 mm。模拟步数为139,步长选择0.11 mm,即最小网格尺寸的1/3。

3 变形过程分析

3.1 锥齿轮各成形过程分析

通过对冷挤压成形的过程进行有限元数值模拟,可得到凸模的行程载荷曲线如图5所示。图5中,从O到A再到B点,坯料形状变化如图6所示。挤压一个齿形所需载荷16.01 t,整个齿轮挤压成形则需要压力机能够提供352.22 t的载荷。

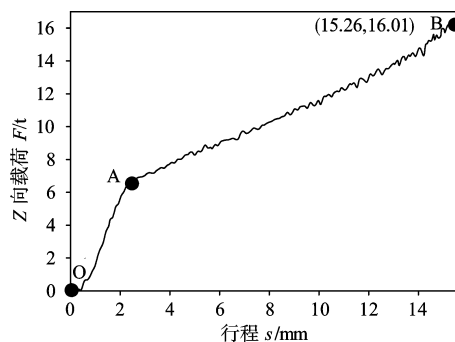


图5 行程载荷曲线

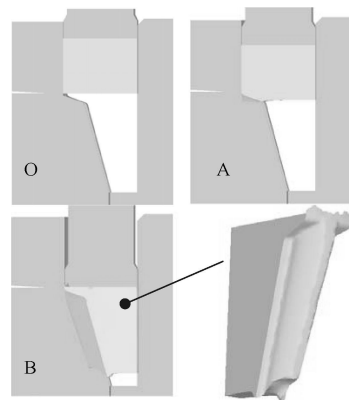


图6 坯料形状变化图

整个冷挤压成形的过程可以分为两个阶段:

(1) OA阶段。在该阶段的短暂初期,由于坯料还未与下凹模型腔斜面部分相接触,受到的阻力仅来自坯料与上凹模之间的摩擦力,以及克服下凹模斜面与

凹模过渡圆角变形抗力,凸模的载荷上升缓慢。之后,坯料与下凹模斜面正式接触,金属流动受到阻碍,材料变形率急剧增加,变形抗力急剧增大,载荷也相应地急剧提高。该阶段是正式开始齿形成形前的过渡阶段。

(2) AB 阶段。坯料开始进入稳定的齿形成形阶段,由于齿形成形主要发生在下凹模齿形成形槽顶部的斜面处,经历上一阶段的过渡变形,因此此处形变而增加的载荷达到最大值。后续的挤压载荷增量主要来自于挤压坯料向下及向中心成形过程,由于这一过程变形率较小,载荷增加放缓。

3.2 锥齿轮各部位变形程度分析

在金属塑性成形的过程中,坯料不同部位的金属速度大小和方向始终发生变化。OA 阶段坯料克服下凹模顶部斜面的抗力挤压,进入齿形成形槽内以及沿着斜面流入凹模的中心。因此,从被挤压至斜面的材料运动接近停滞,在大挤压力下,材料改变运动方向向中心和成形槽内加速运动。

在 AB 阶段时,坯料内外侧材料的流动速度发生了变化。OA 阶段坯料外侧的变形部位材料的流动速度大于坯料内侧,原因是冷挤压初期坯料变形主要发生在凹模的前进方向,没有足够的材料流入中心,以致坯料外侧齿轮成形槽中贴壁的材料速度相对较高。当材料变形进入 AB 阶段时,经挤压的材料开始较多地往凹模中心转移,且坯料与凹模内壁较大的摩擦阻碍了坯料外侧向下流动,综合以上两个因素可知,该阶段坯料内侧下部的材料速度逐渐超过外侧材料的速度。后续优化若能改善坯料和模具间的润滑状态,减小摩擦系数,则可以显著改变坯料材料形变分布的不均衡。

3.3 锥齿轮应力分析

最理想的冷挤压是坯料三向受压。为了确定坯料的拉压应力分布,本研究采用 Deform 后处理中的最大主应力场来分析坯料加工过程中的受压状态。最后一个工作步的最大主应力为 2 470 MPa,其原因在于坯料顶部边沿有一定飞边出现较大的拉应力,属于正常现象。而由于前文所述,坯料内外侧速度相差较大,坯料下端齿形和齿轮主体相接处有较长的拉应力带,在 600 MPa~700 MPa 之间,需要后续优化来均衡坯料内外侧的速度,尽量减小拉应力带。图 6 中,坯料顶部斜面由于材料流动受到阻碍几近停滞,导致此处压应力过大,达到 3 640 MPa,容易对模具造成损伤,需要优化模具斜面处的几何参数来减小压应力的数值。

3.4 成形过程热分布对成形质量的影响

成形終了时的最高温度在 600 ℃~700 ℃之间,从温度场效果图上可以很明显地看出加工过程中坯料

外侧温度比内侧温度高,平均温度差可达 100 ℃。挤压变形主要发生在坯料外侧,变形产生的热量聚积在外侧导致温度急剧升高,特别是坯料顶部成形过渡区热量聚积尤为明显。这会带来两个问题:①高温坯料与模具接触会导致模具材料产生回火效应,会使模具强度、硬度下降,造成模具严重磨损;②成形过程中不同部位温差过大会造成挤压成品留有残余应力,从而造成挤压成品的强度下降,降低齿轮的寿命。

后续优化需要修改模具顶部斜面几何参数(斜度、倒角)来均衡热量分布、选择回火温度较高的模具材料以及选择合理的挤压速度。

4 结束语

本研究分析了欲成形齿轮的结构特点及成形难度,设计了符合冷挤压工艺要求的冷挤压件,并安排了完整生产欲成形齿轮的一整套工序,设计了一套三层组合凹模来冷挤压加工锥齿轮齿形。

通过对冷挤压锥齿轮进行数值模拟,分析了锥齿轮成形过程中的载荷曲线、速度场、应力场和温度场,并根据仿真结果确定了后续优化的目标,即后续研究需要改善润滑状态。

通过优化方法确定并修改下凹模顶部斜面几何尺寸(斜度、倒角),选择合理的挤压速度,并最终制造出优化后的模具用于冷挤压加工试验,为后续研究作了铺垫,对实际工作具有指导意义。

参考文献(References):

- [1] 曾健华. 装备制造业之塑性成形技术 [J]. 现代机械, 2010 (2):1-4.
- [2] 季 萍. 汽车主减速器螺旋锥齿轮机械加工工艺 [J]. 汽车工艺与材料, 2009(2):53-55.
- [3] 孙宏巍. 浅析金属塑性成形技术的特点 [J]. 科学咨询, 2007(5):65.
- [4] 杨 煜. 国内外冷挤压技术发展综述 [J]. 锻压机械, 2001, 36(1):3-5.
- [5] MAEGAARD V. Cold forging of net or near-net shape components [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1992, 35(3-4):429-438.
- [6] DENG Xiao-bin, HUA Lin, HAN Xing-hui, et al. Numerical and experimental investigation of cold rotary forging of a 20CrMnTi alloy spur bevel gear [J]. *Materials & Design*, 2011, 32(3):1376-1389.
- [7] 洪慎章. 冷挤压实用技术 [M]. 北京:机械工业出版社, 2005.
- [8] 杨长顺. 冷挤压模具设计 [M]. 北京:国防工业出版社, 1994.
- [9] GEORGE E D. Mechanical metallurgy [M]. 3rd ed. McGraw-Hill, 1986.

[编辑:罗向阳]