

基于挡楔与二次闭式的闭开联合楔横轧有限元数值模拟

姬开宇^{1,2}, 束学道^{1,2*}, 孙宝寿^{1,2}, 彭文飞^{1,2}, 王 英^{1,2}

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211;

2. 浙江省零件轧制成形技术研究重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为解决轴类件楔横轧过程中的凹心问题, 提高材料的使用效率, 采用 DEFORM-3D 软件建立闭开联合楔横轧的有限元模型, 并通过网格法对闭开联合楔横轧过程中的金属流动规律进行了阐释, 分析了轧件各阶段应力应变分布. 创新使用挡楔和二次闭式轧制的方法, 通过闭式阶段塑造坯料端部形状, 为开式阶段轧制提供凹心补偿. 模拟结果表明, 基于挡楔和二次闭式的闭开联合楔横轧可以有效减少甚至消除轧后端部凹心, 为实现楔横轧的无料头生产提供了理论依据.

关键词: 闭开联合; 楔横轧; 挡楔; 二次闭式; 无料头

中图分类号: TG335.19

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2016) 02-0073-04

楔横轧是国内外近几十年来发展起来的近净成形工艺^[1], 由于其具有性能好、效率高、能源消耗率低等优点, 被广泛应用于许多产业的生产制造, 如汽车、火车等轴类件^[2]. 近年来我国有近 300 条楔横轧生产线建成运营^[3], 技术不断突破.

在楔横轧成形过程中, 由于表层金属比心部金属的轴向流速快, 往往会在端部形成凹心(图 1), 也就是料头. 在实际生产中, 设计坯料时必须在两端预留出足够大小的尺寸来满足生产的需要, 形成的料头需要通过切削等方式来消除, 从而使楔横轧生产进入瓶颈, 材料利用率往往只有 80%^[4]. 因此, 寻找合适的方法, 避免料头产生, 提高楔横轧的材料利用率具有重要的意义.



图 1 楔横轧生产中产生的凹心

为减少生产中的凹心问题, 实现零件精确成形, 国内外学者做了许多研究. 马振海等^[5]分析工艺参数对端部凹心的影响; 段万泽^[6]尝试改变精整角、留出部分端头等方式, 得出凹心值随预留端头体积增大而减少; 程超^[7]研究了闭式楔横轧, 较好地控制了凹心, 但由于闭式楔横轧存在轴向凸起与横向变形, 轧制质量仍不理想; 刘桂华等^[8]采用轧制锥形坯料的方法, 而魏新红^[9]则研究了圆台形坯料的轧制, 结果较为理想. 但加工坯料端部形状需采用传统方式, 仍会造成材料的损失. 因此, 找到一种合适的新型成形工艺, 提高楔横轧的材料利用率是研究中的一项难题.

本文通过 DEFORM-3D 软件, 建立了闭开联合楔横轧有限元模型, 通过挡楔和二次闭式轧制的方法塑造闭式阶段端头形状. 采用网格法对闭开联合楔横轧过程中的金属流动规律进行阐释, 并对轧件各阶段的应力应变场进行讨论分析, 为完善楔横轧工艺, 实现无料头生产提供理论依据.

1 有限元模型的建立

1.1 闭开联合楔横轧有限元模型的建立

闭开联合楔横轧, 即轧制过程先进行闭式轧

收稿日期: 2015-07-03.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.lg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(60874083); 浙江省杰出青年基金(R1110646); 宁波市自然科学基金(2015A610099).

第一作者: 姬开宇(1992-), 男, 山东泰安人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 塑型加工成形. E-mail: langke405917336@qq.com

*通信作者: 束学道(1968-), 男, 安徽舒城人, 教授, 主要研究方向: 塑性加工成形. E-mail: shuxuedao@nbu.edu.cn

制, 然后再进行开式轧制. 闭式轧制是由轴向两端向轴向内侧轧制, 轧件在模具封闭孔型作用下径向和轴向压缩变形. 在成形楔一侧设置 V 形槽, 闭式阶段完成后, 坯料挤入 V 形槽中, 完成端部塑形. 随后进行开式轧制, 模具将轧件内侧向两端轴向展宽, 直至轧制结束. 由于在闭式轧制楔入段, 轧件表层金属会在模具孔楔作用下率先发生轴向移动而产生凹心, 同时也为了端部塑形, 在模具一侧设置挡楔, 模具设定如图 2 所示, 其中 θ_1 设计为 30° , θ_2 设计为 40° . 考虑到开式轧制时断面收缩率不宜过小, 同时也为降低闭式轧制造成的轴向凸起问题, 在闭式模具一侧留有台阶.

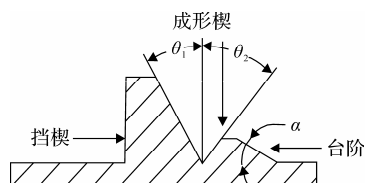


图2 闭式展宽段中心剖面

在 ProE 中建立坯料、轧辊、挡板的几何模型, 然后以 STL 格式导入 DEFORM-3D 软件中进行仿真模拟. 本研究模型采用四面体自由网格划分, 坯料初始网格为 60 000, 材料选择 42CrMo, 直径为 42 mm, 轧制温度为 $1\ 050\ ^\circ\text{C}$, 闭式阶段成形角为 29° , 展宽角为 8° , 开式阶段成形角为 32° , 展宽角为 10° , 最终闭开联合楔横轧有限元模型如图 3 所示.

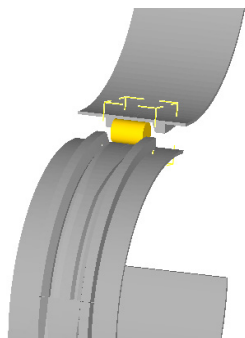
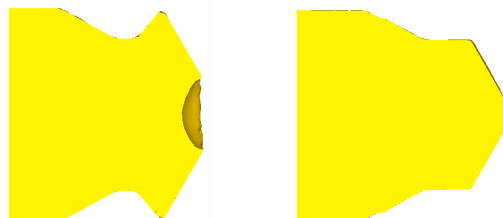


图3 闭开联合楔横轧有限元模型

1.2 二次闭式轧制对端头形状的影响

设置挡楔对于抑制闭式轧制楔入段凹心的生成有一定的效果, 但坯料在轴向延伸过程中, 由于受到挡楔挤压, 金属轴向移动困难而发生横向变形, 塑形效果较差. 为改善轧制质量, 笔者对闭式轧制结束后的坯料端头部分进行二次闭式轧制, 设置挡楔与成形楔的共同作用. 第一次闭式轧制

中产生挤入 V 形槽和横向变形的金属受到挤压轴向压缩, 心部金属轴向展宽, 端面凹心部分得到金属补偿, 如图 4 所示. 通过对比可知该方法可有效解决闭式阶段凹心问题, 明显改善端部塑形质量.

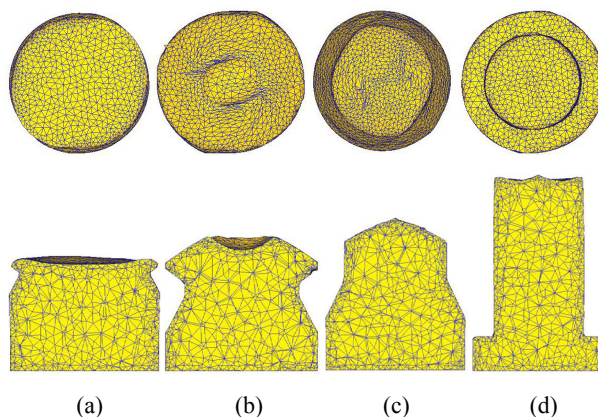


(a) 第一次闭式轧制结束 (b) 第二次闭式轧制结束

图4 第一次闭式和第二次闭式轧制结果对比

2 闭开联合楔横轧金属流动规律

利用 DEFORM-3D 软件的网格划分法, 可以观察到闭开联合轧制过程中坯料金属变形的特点, 从而得出该过程对轧件金属流动的影响, 阐明金属流动规律. 根据对称性, 取坯料的一半进行分析, 选取轧制过程中楔入开始段、第一次闭式轧制段、第二次闭式轧制段、开式轧制段 4 个阶段的坯料中间纵截面、端部横截面网格图, 如图 5 所示. 在楔入开始段, 坯料最外侧发生塑性变形, 端部出现圆台, 凹心开始形成, 靠近圆台外圆周处网格较为密集且变形均匀, 内部网格较为粗大. 这是由于坯料受到成形楔的作用, 最外层金属率先发生轴向位移而挤入模具锥形槽中, 心部金属基本上未产生流动, 从而产生凹心, 此时的轧制力矩较小, 坯料形变较为均匀. 在第一次闭式轧制段, 坯料端部



(a) 为楔入开始段, (b) 为第一次闭式轧制段, (c) 为第二次闭式轧制段, (d) 为开式轧制段

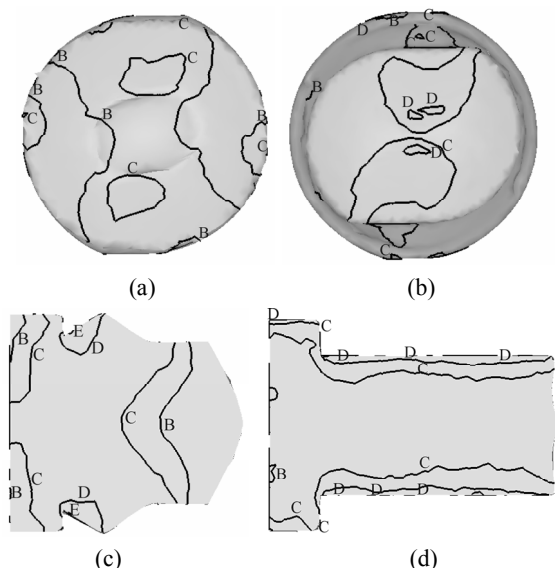
图5 闭开联合楔横轧端部横截面与中间纵截面网格

塑性变形成椭圆台形, 凹心扩大, 凹心周围网格密集, 这是因为金属流动过程中受到挡楔挤压, 造成坯料端部受力过大, 在挤入锥形槽的过程中发生横向变形, 表层金属开始向凹心处流动, 但是由于存在横向变形无法完全补偿凹心. 在第二次闭式轧制段, 坯料外层网格较为细密, 内部网格较第一次闭式轧制段分布更为均匀, 坯料端部塑形为圆锥形, 凹心完全消失. 这是因为二次闭式轧制使坯料圆台处的金属被轴向压缩, 表层金属反向流动致使心部金属流动速度加快, 同时端部金属在挡楔作用下向凹心处流动, 凹心得到金属补偿, 端部受力相对均匀. 在开式轧制段, 坯料轴向延伸, 表层金属较心部金属流动速度快, 坯料端部的凸起部分逐渐用于弥补变形所产生凹陷, 轧件完成时, 网格整体分布较为均匀, 端部趋于平整.

3 闭开联合轧制应力应变分析

3.1 应力分析

轧件在各成形段等效应力分布如图6所示. 从图6(a)可以看到, 在第一次闭式轧制段, 轧件与挡楔接触局部应力较大, 未接触区也有一定应力. 这主要是由于接触区金属在轴向展宽过程中受到挡



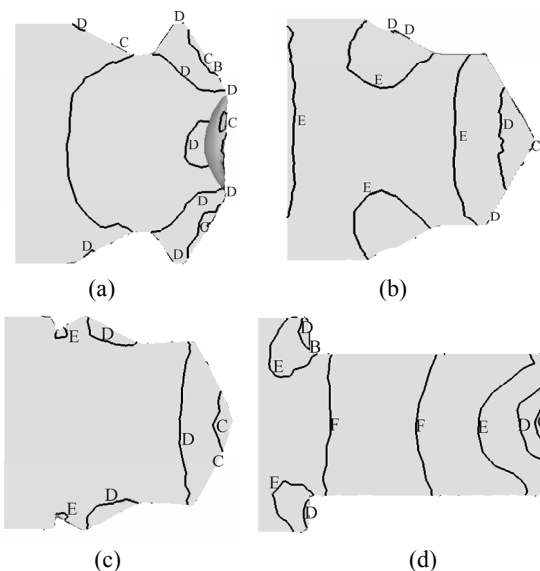
(a)为第一次闭式轧制段横截面, 其中 $B=113 \text{ MPa}$, $C=187 \text{ MPa}$; (b)为第二次闭式轧制段横截面, 其中 $A=40.9 \text{ MPa}$, $B=108 \text{ MPa}$, $C=174 \text{ MPa}$; (c)为开式楔入段中间纵截面, 其中 $B=60.7 \text{ MPa}$, $C=113 \text{ MPa}$, $D=164 \text{ MPa}$, $E=216 \text{ MPa}$; (d)为开式展宽段中间纵截面, 其中 $B=81.1 \text{ MPa}$, $C=154 \text{ MPa}$, $D=226 \text{ MPa}$

图6 闭开联合楔横轧各成形段等效应力分布

楔的直接作用, 端部表层金属轴向移动受阻而向径向和横向流动, 对非接触金属产生作用力. 从图6(b)可知, 在第二次闭式轧制段, 接触区应力较高, 未接触区应力则较为均匀, 这是因为第二次闭式轧制将轧件端部表层金属轴向压缩, 接触区金属受到挡楔作用的压应力而向凹心处流动, 未接触区受力较小. 在开式楔入段(图6(c)), 靠近成形楔接触区应力较大, 端部应力较小且分布均匀, 这是由于端部金属离接触区较远, 受模具作用力较小, 而接触区受成形楔直接作用. 中心台阶处局部应力较大, 是由于轧件在闭式轧制阶段, 表层金属受挤压向台阶处移动, 台阶受到横向拉动而椭圆化, 在开式阶段会受到轧辊的作用(图6(d)). 在开式展宽段, 表层金属应力较大而心部金属应力较小, 表层金属流动速度较快, 坯料锥角逐渐向内凹陷, 端部趋于平整.

3.2 应变分析

应变场对轧件金属变形情况起到决定性作用, 而轴向应变决定了轧制完成时轧件端部凹心的大小. 轧件在各成形段中间纵截面轴向应变分布如图7所示. 图7(a)中轧件端部与挡楔接触局部受压应变作用, 心部受到拉应变, 这是因为轧件在轴向展宽过程中受到挡楔阻碍, 进而拉动了心部金属



(a)为第一次闭式轧制段, 其中 $B=-1.0 \text{ MPa}$, $C=-0.216 \text{ MPa}$, $D=0.568 \text{ MPa}$; (b)为第二次闭式轧制段, 其中 $C=-1.02 \text{ MPa}$, $D=-0.135 \text{ MPa}$, $E=0.749 \text{ MPa}$; (c)为开式楔入段, 其中 $C=-0.73 \text{ MPa}$, $D=0.188 \text{ MPa}$, $E=1.11 \text{ MPa}$; (d)为开式展宽段, 其中 $B=-1.21 \text{ MPa}$, $C=-0.682 \text{ MPa}$, $D=-0.153 \text{ MPa}$, $E=0.376 \text{ MPa}$, $F=0.905 \text{ MPa}$

图7 闭开联合楔横轧各成形段中间纵截面轴向应变分布

的轴向变形。从图 7(b)可知, 轧件端部与接触区金属均受压应变作用, 而非接触区受较弱的拉应变, 这是由于接触区金属基于闭式轧制的特点而轴向压缩, 轴向拉动心部金属, 但由于端面受到挡楔作用, 阻碍了心部金属的轴向变形。从图 7(c)可以看出, 进入开式轧制以后, 靠近成形楔处金属受到一定压应变作用, 未成形区所受应变较为均匀, 这是因为在开式轧制楔入过程中, 成形区金属受到成形楔的直接作用, 金属变形较大, 但未成形区金属变形较小, 所受的作用力与金属之间的阻碍作用较小, 因此应变也较小。开式轧制进入展宽段后, 如图 7(d)所示, 轧件端部中心处受到压应变, 而且越靠近中心处应变越大, 外圆周则受拉应变作用, 这是因为表层金属受到成形楔的直接作用, 流动速度较快, 而越靠近心部, 金属流动速度越慢, 表层金属对心部金属产生阻碍作用。远离端部的已成形区所受拉应变分布较为均匀, 保证了金属的整体移动。

4 结论

(1)建立了无料头闭开联合楔横轧的有限元模型, 提出二次闭式轧制的方法, 有效改善了闭式轧制阶段端部形状与端面质量, 为开式轧制提供凹心补偿。(2)对闭开联合楔横轧进行了数值模拟, 通过网格法分析了闭开联合楔横轧的金属流动特点,

进而阐明了其金属流动规律。(3)通过分析轧件各阶段应力应变场, 进一步验证了闭开联合楔横轧工艺的可行性, 为实现无料头楔横轧成形提供了理论依据, 具有十分重要的现实意义和应用价值。

参考文献:

- [1] 胡正寰, 张康生, 王宝雨, 等. 楔横轧零件成形技术与模拟仿真[M]. 北京: 冶金出版社, 2004:58-65.
- [2] 胡斌, 束学道. 楔横轧无料头辊剪制坯成形机理研究[J]. 热加工工艺, 2014, 13:92-94; 98.
- [3] 刘桂华, 赵培峰, 徐春国, 等. 大变形量楔横轧成形过程中内部缺陷的预防[J]. 中国机械工程, 2006(S1): 150-153.
- [4] 张晓英. 无端头凹心楔横轧件精确成形机理数值模拟[J]. 锻压技术, 2013(2):156-159.
- [5] 马振海, 杨翠苹, 胡正寰. 楔横轧轧件端头凹心影响因素的研究[J]. 锻压技术, 2002, 27(1):29-30.
- [6] 段万泽. 楔横轧轧件料头损耗规律的研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2010.
- [7] 程超. 闭式楔横轧成形轴类件及其端部质量研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2013.
- [8] 刘桂华, 蒋智. 无端头凹心楔横轧精确成形机理及工艺研究[C]//中国机械工程学会塑性工程分会特种轧制学术委员会. 特种轧制学术交流会议文集. 2010:71-74.
- [9] 魏新红. 楔横轧轴类件端部轧制质量研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2012.

Finite Element Numerical Simulation of Closed-open Cross Wedge Rolling Basing on Block-wedge and Twice Closed Rolling

Ji Kai-yu^{1,2}, SHU Xue-dao^{1,2*}, SUN Bao-shou^{1,2}, PENG Wen-fei^{1,2}, WANG Ying^{1,2}

(1.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Zhejiang Provincial Key Laboratory of Part Rolling Technology, Ningbo 315211, China)

Abstract: In order to solve the problems with concaves found in the shaft-part cross wedge rolling process, and improve the material utilization, the finite element model of closed-open cross wedge rolling is established using software Deform-3D. The metal flow characteristics of the closed-open cross wedge rolling is elucidated using the grid method, and the stress and strain at various stages of the piece are analyzed. Using the new methods of block-wedge and twice closed rolling, the billet end is shaped in the closed rolling which provides compensation to the concaves in the open rolling. The results show that the closed-open cross wedge rolling based on the block-wedge and twice closed rolling can mitigate and even eliminate the side concaves, which provides a theoretical basis for the cross wedge rolling production free of concaves defects.

Key words: closed-open; cross wedge rolling; block-wedge; twice closed rolling; without concaves

(责任编辑 史小丽)