

楔横轧无料头热剪切制坯工艺参数对端部堆料的影响研究

荣权升¹, 王英^{1*}, 陶德华¹, 周贤¹, 束学道¹, 杨玲玲²

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 杭州松下家用电器有限公司, 浙江 杭州 310018)

摘要: 基于 Deform-3D 软件建立了楔横轧无料头热剪切制坯的有限元模型, 在分析了热剪切制坯过程中端部堆料产生原因的基础上, 采用正交试验的方法, 分析了棒料剪切温度、剪切摩擦系数和刀具径向进给速度对端部堆料的影响, 结果表明剪切温度和剪切速度对端部堆料的影响显著, 摩擦系数对端部堆料有一定影响, 且端部堆料随着剪切温度、剪切速度和摩擦系数的增加而减小。进而以端部堆料值最小为目标, 在考虑加工效率、生产成本和设备能耗的情况下, 优选出了一组最佳工艺参数。该研究结果为完善楔横轧无料头热剪切制坯工艺, 实现无料头楔横轧提供了工程应用依据和技术支持。

关键词: 楔横轧; 无料头; 热剪切制坯; 工艺参数; 正交试验

中图分类号: TG335.19

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2018) 04-0011-05

楔横轧是一种轴类零件的新型近净成形加工工艺^[1], 因其轧制性能好, 生产效能高, 能源消耗低, 所以被广泛应用于各种轴类零部件的生产^[2-3]。零件轧制过程中棒料表层金属比心部金属流动快所造成的端部凹心是制约楔横轧工艺净成形的常见缺陷之一^[3]。实际生产中必须切除凹心部分才能得到所需轧件, 故楔横轧工艺的材料利用率通常在 85% 以下^[4]。为消除凹心缺陷, 实现无料头轧制, 魏新红、刘桂华等^[5-6]提出改变棒料端部形状的方法, 将棒料端部加工成锥形或圆台形, 该方法能明显抑制轧件端部凹心的产生, 是目前最有效且通用性最强的实现无料头楔横轧的工艺方法。

采用传统的车削、锻造等工艺来将棒料端部加工成锥形或圆台形, 同样会造成材料的浪费。针对这种情况, 胡斌、柳传等^[7-8]提出了辊剪制坯工艺, 采用一对表面装有楔形块的上下轧辊绕自身轴线同向等速旋转, 径向等速进给, 在轧辊带动下使加热后的棒料被动反向旋转, 棒料在辊剪区域产生端部径向压缩、轴向延伸变形, 最终形成所需的棒料端面形状。该方法工作过程中棒料由上下轧辊

带动旋转, 由于棒料自重影响, 每次辊剪加工时棒料长度较短, 无法实现较长棒料的高效连续加工。为此, 本文提出了楔横轧无料头热剪切制坯工艺, 热剪切制坯过程中, 上下刀具绕棒料旋转转动的同时沿径向逐步进给, 无需棒料自身旋转, 通过设计和调整刀具形状, 可实现不同端部形状的剪切加工。采用该工艺对加热后的棒料完成一次热剪切后, 可沿轴向推进棒料, 继续进行下一次热剪切, 不用提前将长棒料分割成多段, 减化了工序。由于热剪切制坯和辊剪制坯一样, 都是对加热后的棒料进行加工, 因此棒料剪切端面也会产生金属堆积现象, 即端部堆料^[9-10]。在楔横轧实际加工中, 棒料与上下轧辊之间一般会预留 3.5 mm 以内的间隙, 棒料端部堆料值过大会阻碍楔横轧工艺的正常轧制流程, 影响楔横轧工艺净成形的实现。

为阐明楔横轧无料头热剪切制坯工艺中端部堆料的产生机理, 以及为消除端部堆料提供理论依据和技术支持, 本文通过 Deform-3D 软件建立热剪切制坯有限元模型, 在分析热剪切制坯工艺中端部堆料产生原因的基础上, 采用正交试验方

收稿日期: 2017-09-10.

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

基金项目: 国家自然科学基金(51505239); 浙江省自然科学基金(LQ15E050003); 宁波市自然科学基金(2015A610099)。

第一作者: 荣权升(1993—), 男, 湖北荆州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 塑性成形工艺与装备。E-mail: 497075209@qq.com

*通信作者: 王英(1989—), 女, 河南邓州人, 博士/副教授, 主要研究方向: 机构学与装备。E-mail: wangying5@nbu.edu.cn

法研究工艺参数对棒料端部金属堆料值的影响.

1 热剪切制坯工艺工作原理

热剪切制坯工艺工作原理如图1所示,中间为夹具夹持的加热后的圆形棒料,上下刀具绕棒料以转速 ω_H 周向旋转的同时,以速度 v 沿径向进给.当2个有“V”型刀口的盘形刀具绕棒料旋转且沿径向向棒料中心进给时,刀具对棒料剪切端面产生径向压缩并使其轴向延伸,得到预设棒料端部形状.剪切过程中棒料金属会产生流动,所以夹具仅约束棒料的周向运动,棒料可沿轴向自由移动.

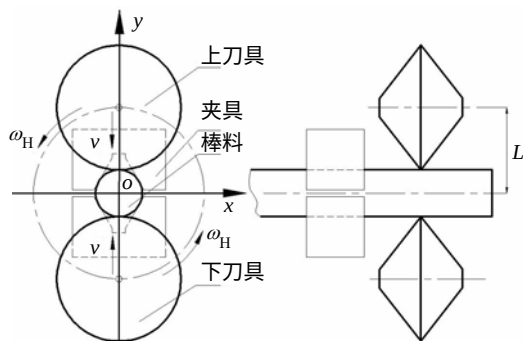


图1 热剪切制坯工艺原理

2 热剪切制坯有限元模型的建立

2.1 模型的简化及假设

楔横轧无料头热剪切制坯在剪切端面处存在着大变形的径向压缩和轴向延伸,既有材料的非线性,又有几何的非线性,边界条件较为复杂.根据棒料的成形特点,假设:(1)刀具视为刚体,棒料视为刚塑性体,因为在剪切成形过程中,棒料自身的塑性变形量极大且弹性变形量极小,而刀具相较棒料的弹性变形基本可以忽略,故视刀具为刚体而棒料为刚塑性体;(2)忽略棒料的自重,因为热剪切工艺过程中棒料自由度受到限制,棒料只有轴向无约束;(3)将刀具与棒料的摩擦简化为剪切摩擦,因为在剪切过程中棒料与刀具接触区域存在较大的塑性变形且棒料在剪切过程中承受较大的径向力和切向力,采用剪切摩擦模型更接近实际情况;(4)温度设为恒温,因为剪切过程中棒料与刀具的热交换损失和塑性变形功转化的热能相近.

2.2 有限元模型的建立

在UG三维建模软件中建立棒料、上下刀具的几何模型,然后以STL格式导入至Deform-3D软

件中,对棒料采用相对网格划分.

棒料在热剪切过程中仅可沿轴向自由移动,在有限元软件中可通过设置棒料边界约束来实现,最后得到有限元剪切模型(图2).模型中棒料材料为45号钢,弹性模量 $E=206\text{ GPa}$,泊松比 $\nu=0.3$,棒料直径为40 mm,刀具直径为80 mm.

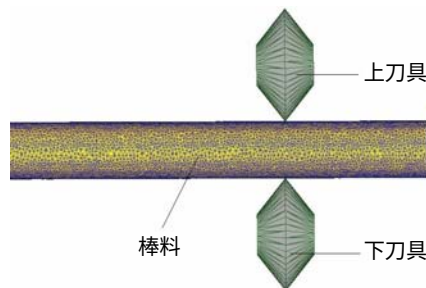


图2 热剪切制坯有限元模型

3 热剪切制坯端部堆料产生过程

通过Deform-3D软件观察热剪切制坯过程中棒料剪切端面处金属变形过程及特点.将棒料的热剪切制坯过程分为切入段、延展段、结束段3个阶段,选取这3个阶段棒料剪切端面处某时刻的成形图,如图3所示.

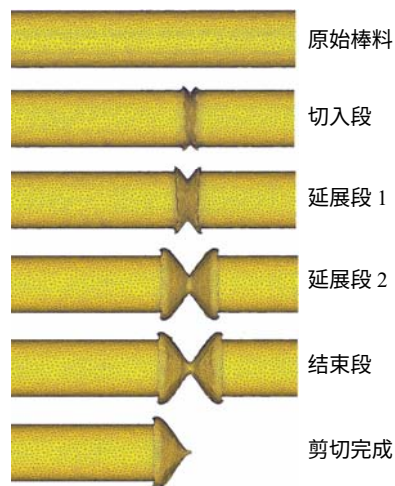


图3 棒料剪切端面堆料产生过程

在切入段,上下刀具切入棒料,棒料在刀具的径向挤压和轴向拓展作用下,外圆周局部发生塑性变形,剪切端面处表面金属开始沿径向、轴向流动,而棒料中心部位金属基本未发生流动.此过程中棒料圆周不同位置处刀具沿径向切入深度不同,因此与之所对应的棒料外圆周处金属在径向的排开量各不相同,故棒料的成形边界呈现不均匀状

态. 当热剪切进入延展段, 棒料剪切端面处外圆周直径不断扩大, 这是因为刀具沿径向逐步进给, 棒料塑性变形域逐步扩大, 端面处金属径向向外圆周不规则扩展加大, 且由于刀具剪切的速度较快, 使得剪切端面处的金属不能及时轴向流动, 同时棒料两端未变形端面的表面金属具有一定的轴向限制作用, 导致端部出现堆料, 且随着切剪的深入, 端面金属堆料越来越多. 在剪切结束段, 随着上下刀具在径向的继续进给, 刀具与棒料的接触面达到最大, 此时棒料剪切端面已基本成型, 棒料两端已基本排开, 当棒料完全被刀具剪切为两部分时, 整个热剪切制坯工艺完成.

棒料端部金属堆料会严重影响楔横轧无料头轧制的实现, 因此, 热剪切制坯过程中必须通过合适的方法降低堆料体积, 以提高端部成形质量.

4 工艺参数对端部堆料的影响

在热剪切制坯工艺中, 工艺参数是影响棒料热剪切成形过程的主要因素, 其中剪切温度直接影响着棒料的力学性能, 棒料力学性能的变化将影响剪切成形过程中其金属的流动性; 剪切摩擦系数直接影响棒料所受切向力, 切向力的变化将影响棒料剪切端面处金属向外圆周切向的不规则扩散程度, 从而对棒料剪切端面处金属堆料值产生影响; 端部堆料产生的直接原因是刀具剪切的速度大于剪切端面处的金属流动速度, 使棒料剪切端面处金属不能及时轴向流动, 因此在刀具绕棒料周向转速一定的情况下, 刀具径向进给速度大小会影响剪切端面处金属堆料情况. 基于此, 本文在有限元仿真模拟分析的基础上采用正交试验的方法来研究棒料的剪切温度、剪切摩擦系数和上下刀具的径向进给速度这 3 个工艺参数对端部堆料的影响. 采用的棒料及其具体的工艺参数见表 1.

表 1 有限元模拟参数

棒料直径/mm	棒料长度/mm	刀具直径/mm	刀具锥角/(°)	剪切摩擦系数
40	300	80	76	0.18, 0.30, 0.70
刀具径向进给速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$		刀具公转速度 $\omega_{\text{H}}/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$		棒料剪切温度/°C
5.1, 6.4, 7.8		10.2		950, 1 050, 1 150

4.1 试验设计

正交实验因素剪切温度(A)、摩擦系数(B)、剪切速度(C)(即刀具径向进给速度)分别选取 3 个水平, 如表 2 所示, 选取正交表 $L_9(3^4)$ 安排试验方案. 金属棒料加热之后刚度会明显降低, 塑性明显增强, 但若加热温度过高, 棒料奥氏体晶粒尺寸过大会导致转变后的组织粗大对棒料性能造成影响^[11], 若棒料加热温度过低则金属刚度增加, 棒料过高的刚度会增加设备的力能损耗, 同时考虑到楔横轧工艺中毛坯轧制温度一般在 900~1 200 °C 之间, 因此剪切温度选择 950, 1 050 和 1 150 °C 这 3 个水平; 45 号钢在压力加工过程中, 当成形温度在 900~1 200 °C 范围内时, 其与模具之间的摩擦系数在碳末润滑剂条件下约为 0.18, 在石墨润滑剂条件下约为 0.30, 无润滑剂条件下约为 0.70^[12-13], 本文选择这 3 种摩擦情况来研究剪切摩擦系数对棒料端部堆料值的影响; 热剪切制坯成形过程中, 刀具的径向进给速度过小, 整个热剪切制坯工艺所消耗的时间增加, 热剪切制坯加工的效率降低, 而刀具的径向进给速度过大, 热剪切工艺所需的设备动力会急剧增加, 可能出现设备无法满足热剪切工艺的要求, 现设定刀具绕棒料周向转速为 $10.2 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, 在合理的热剪切时间和设备动力条件下, 刀具的径向进给速度最小约为 $5.1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, 最大约为 $7.8 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, 选取二者的中间值 $6.4 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, 分析这 3 种不同进给速度对端部堆料的影响.

表 2 因素水平表

水平	剪切温度/°C	摩擦系数	剪切速度/ $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$
1	950	0.18	5.1
2	1 050	0.30	6.4
3	1 150	0.70	7.8

4.2 正交试验结果与分析

由于 Deform-3D 软件后处理中无法直接测量堆料的大小, 且堆料发生在剪切界面的端部, 因此定义堆料值 ω 作为指标来描述棒料剪切端部处堆料情况^[7,10].

$$\omega = (H_1 - H_0) / H_0,$$

(1)

式中, H_0 为棒料剪切成形后平直段最大直径; H_1 为堆料截面最大直径, 如图 4 所示. 为避免软件测量误差所造成的失误, 最大直径为界面等分的多

个直径值中最大的 10 个的平均值.

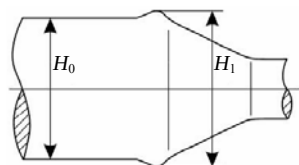


图 4 堆料示意图

热剪切制坯端部堆料值正交试验结果见表 3, 正交试验结果方差分析见表 4.

表 3 端部堆料正交试验结果

试验号	A	B	C	端部堆料/%
1	1	1	1	22.80
2	1	2	3	21.23
3	1	3	2	21.51
4	2	1	3	20.73
5	2	2	2	20.95
6	2	3	1	20.68
7	3	1	2	20.52
8	3	2	1	20.63
9	3	3	3	19.31
$\overline{K_1}$	21.85	21.35	21.37	
$\overline{K_2}$	20.79	21.03	20.99	
$\overline{K_3}$	20.15	20.50	20.42	
R	1.70	0.85	0.95	

表 4 端部堆料方差分析

方差来源	离差平方和	自由度	均方	F	P
剪切温度	4.39	2	2.20	63.08	0.016
摩擦系数	1.08	2	0.54	15.57	0.060
剪切速度	1.36	2	0.68	19.58	0.049
误差	0.07	2	0.035		

从表 3 可以看出, 端部堆料值随着剪切温度的升高而减小, 产生该现象的原因主要是剪切温度的提升增大了棒料金属的塑性, 使得热剪切制坯过程中棒料金属的轴向流动速度增加, 棒料剪切端面处堆料金属更多地沿轴向流动, 降低了棒料的端部堆料值. 端部堆料值随着剪切摩擦系数的增大而减小, 产生该现象的原因主要是随着剪切摩擦系数的增大, 上下刀具与棒料之间摩擦力增大, 即棒料所受切向力增加, 棒料剪切端面处金属切向流动增强, 其扩散不规则程度降低, 故棒料剪切端面处堆料值降低. 端部堆料值随着剪切速度的增加而降低, 造成该现象的主要原因是随着刀

具径向进给速度的增加, 整个剪切制坯工艺的时间减少, 即在单位时间内, 随着刀具径向进给速度的增加, 刀具的径向进给量增大的同时对棒料的轴向排开效果越来越明显, 使棒料金属在剪切端面处的轴向流动速率增加趋势大于其径向流动速率增加趋势, 从而降低了金属的端部积累现象, 降低了棒料剪切端部的堆料值.

由表 4 方差分析 P 值可以看出, 剪切温度对端部堆料影响显著($P=0.016<0.05$), 摩擦系数对端部堆料有一定的影响($P=0.060<0.10$), 剪切速度对端部堆料影响显著($P=0.049<0.05$). 所以在楔横轧无料头热剪切制坯工艺中影响端部堆料的主要因素是剪切温度和剪切速度, 摩擦系数为次要因素. 为得到较小的端部堆料, 可优先控制棒料的热剪切温度和刀具的径向剪切速度.

4.3 正交试验结果讨论

楔横轧无料头热剪切制坯工艺中棒料的端部堆料越小越好. 由正交试验分析可知, 剪切温度越高端部堆料越小, 但实际加工中温度太高会对棒料的固有力学性能造成影响, 且造成过多的能耗, 所以在保证零件轧制(楔横轧)温度的前提下, 可优先选择剪切温度为 1150°C , 既能获得较小的端部堆料, 又对棒料自身力学性能无影响. 热剪切制坯工艺中摩擦系数对端部堆料的影响程度较低, 若从经济角度出发, 在合理控制加工成本的情况下, 可不添加任何润滑剂来改善热剪切制坯过程中的摩擦情况, 即棒料剪切摩擦系数为 0.70. 刀具剪切速度对端部堆料影响显著, 且随着剪切速度的增加而降低, 因此在满足设备动力要求的前提下, 可优先选择较高的剪切速度, 即当刀具绕棒料周向转速为 $10.2\text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 优选剪切速度为 $7.8\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$.

5 结论

(1) 楔横轧无料头热剪切制坯过程中, 随着刀具径向逐步进给, 棒料剪切端面处金属径向向外圆周不规则扩展, 且由于刀具剪切的速度较快, 使得剪切端面处的金属不能及时轴向流动, 同时棒料两端未变形端面的表面金属具有一定的轴向限制作用, 导致棒料剪切端面出现堆料缺陷.

(2) 棒料剪切温度对端部堆料影响显著($P=0.016<0.05$), 摩擦系数对端部堆料有一定的影响

($P=0.060<0.10$), 刀具径向进给速度对端部堆料影响显著($P=0.049<0.05$), 且端部堆料值随着剪切温度、剪切速度和摩擦系数的增大而减小。

(3)在考虑加工效率、生产成本和设备能耗的情况下, 对于材料为 45 号钢, 直径为 40 mm 的棒料, 在楔横轧无料头热剪切制坯过程中, 保持剪切温度为 1150 °C, 摩擦系数为 0.70, 刀具径向进给速度为 $7.8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 可获得较小的端部堆料。

参考文献:

- [1] 束学道, 孙宝寿. 楔横轧理论与成形技术[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [2] Pater Z. Theoretical and experimental analysis of cross wedge rolling[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40(1):49-63.
- [3] 刘桂华, 任广生, 徐春国. 楔横轧变形过程中内部空心缺陷产生机理的模拟研究[J]. 机械工程学报, 2004, 40(2):151-156.
- [4] 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.
- [5] 魏新红, 束学道. 楔横轧轧件端头凹心影响研究[J]. 热加工工艺, 2011, 40(21):61-63.
- [6] 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]. 特种轧制学术交流会, 昆明, 2010:71-74.
- [7] 胡斌, 束学道. 横轧无料头辊剪制坯成形机理研究[J]. 热加工工艺, 2014, 43(13):92-98.
- [8] 柳传, 束学道, 胡斌. 楔横轧辊剪制坯力的研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(11):128-132.
- [9] 胡斌, 束学道. 楔横轧无料头辊剪制坯端部质量研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2014, 27(3):103-107.
- [10] 胡斌. 无料头楔横轧辊剪制坯成形机理及其端部质量研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2014.
- [11] 游红. 45#优质碳素结构钢的热变形行为研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [12] 戴钧陶. 金属压力加工的接触摩擦及其摩擦系数的确定[J]. 锻压技术, 1984, 11(5):48-54.
- [13] Natasha A R, Othman H, Ghani J A, et al. Chip formation and coefficient of friction in turning S45C medium carbon steel[J]. International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering, 2014, 14(6):89-92.

The influence of technological parameters on end stack in hot shear blank forming without stub bar for cross wedge rolling

RONG Quan-sheng¹, WANG Ying^{1*}, TAO De-hua¹, ZHOU Xian¹, SHU Xue-dao¹, YANG Ling-ling²

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

2.Panasonic Appliances Washing Machine (Hangzhou) Co., Ltd., Hangzhou 310018, China)

Abstract: The finite element model of the end stack in hot shear blank forming without stub bar for cross wedge rolling was established in Deform-3D software. Based on the analysis on the forming mechanism of the end stack in the process of hot shear blank forming, the influences of different cutting temperatures, shear friction coefficients and cutting tool radial feed speeds on end stack were analyzed by the method of orthogonal experiment. The results shows that the cutting temperature and cutting tool radial feed speeds have significant influence on the values of end stack, and the shear friction coefficients has a certain influence on values of end stacking. The values of end stacking decreases with the increase of cutting temperatures, shear friction coefficients and cutting tool radial feed speeds. Taking processing efficiency, production cost and equipment energy consumption into consideration, a set of technological parameters were identified with the objective of producing the least amount of end stack. The research in this paper will provide engineering application and technical support for the integrity of the technology of hot shear blank forming and realization of cross wedge rolling without stub bar.

Key words: cross wedge rolling; no stub bar; hot shear blank forming; technological parameters; orthogonal experiment

(责任编辑 韩 超)