

楔横轧无料头辊剪制坯端部质量研究

胡 斌^{1,2}, 束学道^{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: 为解决辊剪工艺中的端面堆料缺陷, 实现楔横轧无料头轧制, 运用 DEFORM-3D 软件建立了辊剪制坯的有限元模型, 通过位移法阐明了辊剪过程中堆料缺陷的产生机理, 并通过改变工艺参数和创新模具设计的方法来抑制堆料, 提高坯料端面的成形质量. 结果表明: 在设备功耗范围内, 堆料值随着轧辊旋转速度的减小而减小, 随着进给速度的增大而降低; 在模具外圆周处添加挡块能有效地消除堆料缺陷. 该研究结果为完善辊剪制坯工艺, 实现楔横轧无料头轧制提供了技术支持和理论依据.

关键词: 无料头; 辊剪制坯; 堆料; 挡块

中图分类号: TG335.19

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2014) 03-0103-05

楔横轧是一种高效的金属塑性成形技术, 是国内外近几十年来发展起来的近净成形工艺^[1], 它具有静压成形、金属材料利用率高、生产质量稳定、生产效率高等优点, 因而受到加工业界的广泛关注^[2-4].

楔横轧成形工艺主要有心部和端部缺陷两种, 端面凹心缺陷是制约楔横轧工艺近净成形的常见缺陷之一(图 1)^[5]. 在楔横轧成形过程中, 表层金属比心部金属的轴向流速快, 使轧件端部产生较大凹心^[6]. 在实际轧制完成后, 必须切除毛坯两端 10~20 mm 的料头来保证坯料整体质量. 为消除凹心缺陷, 实现无料头轧制, 马振海等^[7]分析了成形角、展宽角、断面收缩率, 段万泽分析了精整角、预留端头体积等工艺参数对凹心的影响规律^[8], 但由于旋转条件和轧制力矩等设备参数的限制, 凹心降低幅度较小. 祖汪明采用多楔模具设计的侧楔来抑制端部凹心^[9], 但多楔轧制模具偏转角及端面移动量计算准确度不高, 导致模具创新法实际应用的价值有限, 且通用性不足. 魏新红等^[6]采用改变坯料端部形状为圆台形方法是最有效的方法之一, 而无料头辊剪制坯工艺通过选择不同形状

的轧辊可以实现特定形状端面坯料的剪切, 与传统的切削工艺相比, 其具有高效节材等显著优点. 但在辊剪工艺中, 坯料端面的金属堆积现象, 制约了楔横轧工艺的正常轧制流程, 阻碍了楔横轧近净成形的实现.



图 1 轧件凹心缺陷

综上所述, 完善无料头辊剪制坯工艺, 消除堆料缺陷, 提高坯料端部辊剪质量, 是楔横轧研究急需解决的问题. 笔者通过 DEFORM-3D 软件, 建立无料头辊剪制坯有限元模型, 并用位移法分析了辊剪制坯工艺中堆料缺陷的产生机理, 且提出通

收稿日期: 2013-11-18.

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(51075216); 浙江省杰出青年基金项目(R1110646); 宁波大学优秀论文培育基金(PY2013017).

第一作者: 胡斌(1989-), 男, 浙江兰溪人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 塑性加工工艺与设备. E-mail: hb984244906@163.com

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

过改变工艺参数和创新模具两种方法来提高端面成形质量,为楔横轧无料头轧制的实现提供了技术支持和理论依据。

1 有限元模型的建立

1.1 辊剪有限元模型的建立

无料头坯料辊剪的原理是2个具有楔形模具的轧辊同向旋转,且以相同速度径向向心进给,带动坯料反向旋转,使坯料辊剪截面产生径向压缩和轴向延伸,获得异形端面的坯料形状。辊剪过程中,坯料塑性变形大,轴向约束难以施加,故采用坯料两端的导向套来保证辊剪过程的稳定性。在辊剪成形过程中,存在大变形的径向压缩和横向扩展,既有材料的非线性,又有几何的非线性,边界条件极其复杂。因此建模时应该考虑各种影响因素,以确保有限元仿真的工程价值。文中模型采用四面体自由网格划分,坯料初始网格为80 000。模型中坯料材料为45号钢,弹性模量 $E=206\text{ GPa}$,泊松比为 $\nu=0.3$,坯料直径为40 mm,轧辊直径为200 mm,辊剪温度为 $1\,050\text{ }^{\circ}\text{C}$,采用剪切摩擦模型,摩擦系数为2.0。最后得到无料头辊剪有限元模型如图2所示。

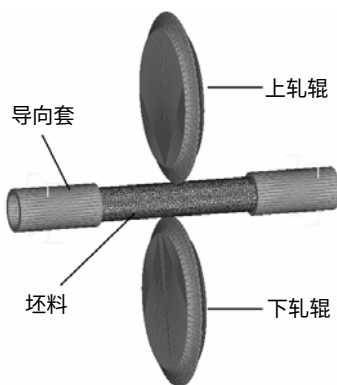


图2 辊剪有限元模型

1.2 材料的断裂准则

辊剪工艺的完成是以材料最终断裂为参考标准。文中以45号钢辊剪断裂判定,采用Cockcroft-Latham韧性断裂准则,该准则认为最大拉应力是材料破坏的主要因素,其表达式如下:^[10]

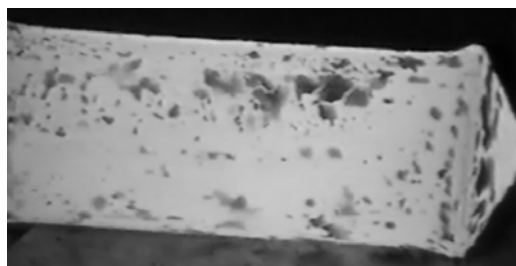
$$\int_{\bar{\epsilon}_f}^{\bar{\epsilon}} (\sigma_1 / \bar{\sigma}) d\bar{\epsilon} = C, \quad (1)$$

其中, $\bar{\epsilon}_f$ 为断裂发生处的等效应变; σ_1 为最大主应力; $\bar{\sigma}$ 为等效应力; $\bar{\epsilon}$ 为等效应变; C 为与损伤材

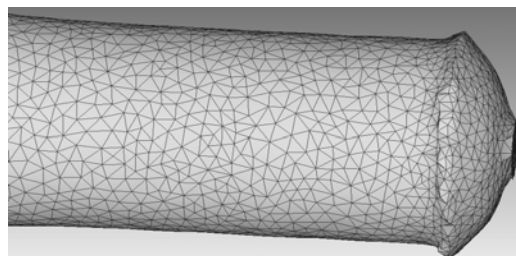
料相关的材料常数,对于45号钢,取 $C=0.5$ 。

2 坯料辊剪端面堆料产生机理

在辊剪过程中,坯料端部会出现明显的金属堆积,即堆料缺陷(图3)。



(a) 实际生产



(b) 有限元模拟

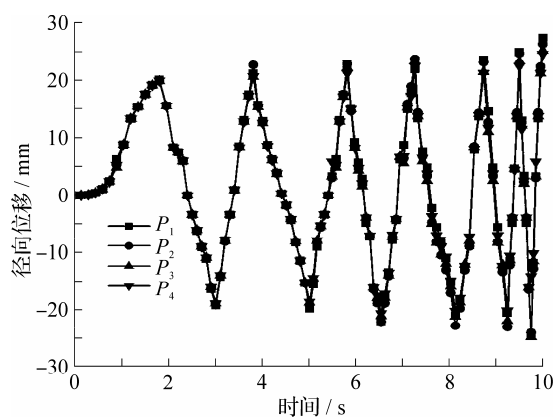
图3 实际生产与有限元模拟辊剪堆料缺陷

而在轧制工艺中,轧件与上下轧辊的预留间隙一般控制在3.5 mm以内,堆料值过大会阻碍轧件轧制时金属的轴向流动,导致堵料发生,影响轧制工艺的正常进行。为消除坯料端面处的堆料缺陷,避免轧制缺陷,笔者用位移法来说明端面金属堆积的产生机理。堆料位置一般只发生在辊剪端面处,故在坯料表面沿轴向选取靠近辊剪截面的4个点进行研究,轴向初始位置分别为: $P_1:Z=0$, $P_2:Z=5$, $P_3:Z=10$, $P_4:Z=15$ 。

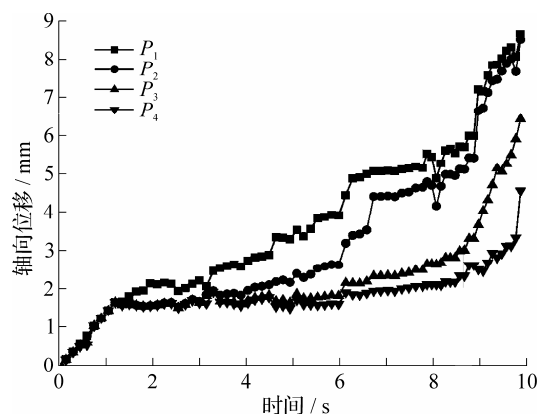
测得它们在整个辊剪成形过程中的径向位移和轴向位移(图4)。由径向位移图4(a)可知,辊剪制坯过程中,该4点的径向位移基本相同,但随着轧辊的压下,坯料表面的金属发生径向流动,且速度逐渐增大,最大径向位移达到26.1 mm。由于坯料自身随着轧辊的旋转而反向旋转,该4点的径向位移呈周期性的变化,且转动频率逐渐减小。这主要是轧辊逐渐向心进给,轧辊与轧件的接触深度不断增加,导致旋转周期减少。

由轴向位移图4(b)可知,此4点的轴向位移呈逐渐增大的趋势,且越靠近辊剪截面的点,轴向位

移越大。在远离成形面的表层金属对成形区的表层金属有抑制作用,且随着距离的靠近抑制效果越大。辊剪 8.0 s 后,轧辊顺利向心进给,辊剪端面金属排开体积量增大,轴向速度局部快速增大。



(a) 径向位移变化



(b) 轴向位移变化

图4 4个点的径向和轴向位移变化

坯料在辊剪端面处轴向位移变化最大,且有未变形区金属的轴向抑制作用,使得该端面处的金属不能及时轴向排开,导致了金属径向流动作用明显,产生了辊剪端面的堆料缺陷。该缺陷会严重影响楔横轧无料头轧制的顺利实现,因此在辊剪过程中,必须降低堆料体积,提高辊剪坯料的端面成形质量。

3 辊剪端部质量优化分析

3.1 工艺参数对辊剪端部质量的影响

轧辊的旋转速度和进给速度是辊剪工艺的主要参数。了解它们对坯料端面成形质量的影响规律,选择合适的设备参数值是一个有效抑制堆料值的方法。

为了解决坯料端面堆料问题,提高辊剪工艺的坯料质量,笔者采用 w 来反映堆料情况(图 5),计算式为(2)式。由于堆料截面是不规则的圆形,所以 H_1 选该截面的最大直径。

$$w = (H_1 - H_0) / H_1 \quad (2)$$

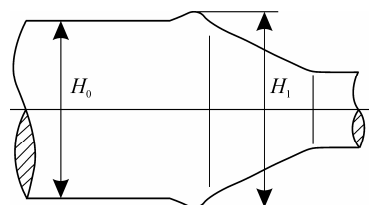


图5 堆料说明

且为避免因网格畸变造成的局部直径突变,最大直径为截面等分的 18 个直径值中最大 9 个的平均值。

文中有限元模拟实验采用的坯料其具体的参数见表 1。

表1 有限元模拟参数表

参数	数值
毛坯直径/mm	40
轧辊直径/mm	200
轧辊锥角/°	76
旋转速度/(rad·s ⁻¹)	5, 10, 15, 20
毛坯长度/mm	300
轧辊宽度/mm	40
辊剪温度/°C	1 050
进给速度/(mm·s ⁻¹)	1.0, 1.5, 2.0

通过 DEFORM-3D 软件模拟后处理得到上述 12 组工况的堆料值,结果如图 6 所示。由图可知,旋转速度和进给速度对于坯料的堆料值都有一定的影响,且该值随着旋转速度的增大而增大,随着进给速度的增大而降低。旋转速度的增大,使得坯料表层的金属轴向流动时间减少,且由于未变形表层金属的抑制作用,使得辊剪截面的金属径向流动速率增大。旋转速度的增加增大了轧辊与坯料在单位时间内旋转摩擦功,而其中大部分的功转化为热能被坯料吸收,提高了坯料辊剪端面的局部温度,降低了坯料塑性,阻碍了金属的轴向流动,加大了金属径向流动速率,增大了堆料值。进给速度的增大,缩短了整个辊剪工艺的过程,在单位时间内,径向压下作用明显,使得金属轴向流速大于横向流速,金属堆积显现减弱。

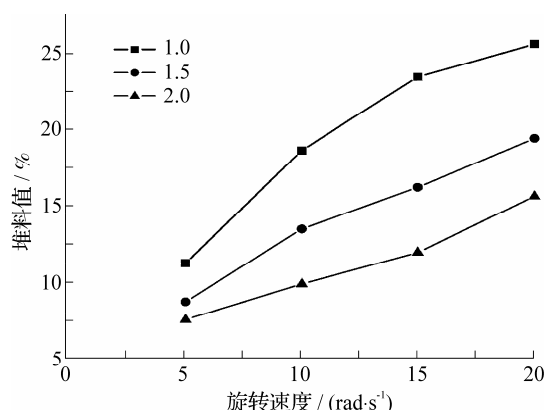


图6 旋转速度和进给速度对堆料值影响规律

3.2 挡块对辊剪端部质量的影响

通过改变轧辊的旋转速度和进给速度,对抑制堆料缺陷有一定效果,但受到辊剪设备自身力能参数的限制,工艺参数的调节范围十分有限。为了更有效地解决堆料缺陷,笔者采用模具创新的方法,通过在轧辊的边缘添加挡块,来消除堆料情况。如图7所示,当轧辊不断压下逐渐接触到堆料区时,挡块对坯料产生了挤压作用,使得端部的金属横向压缩流动,在很大程度上,抑制了端面堆料的产生。

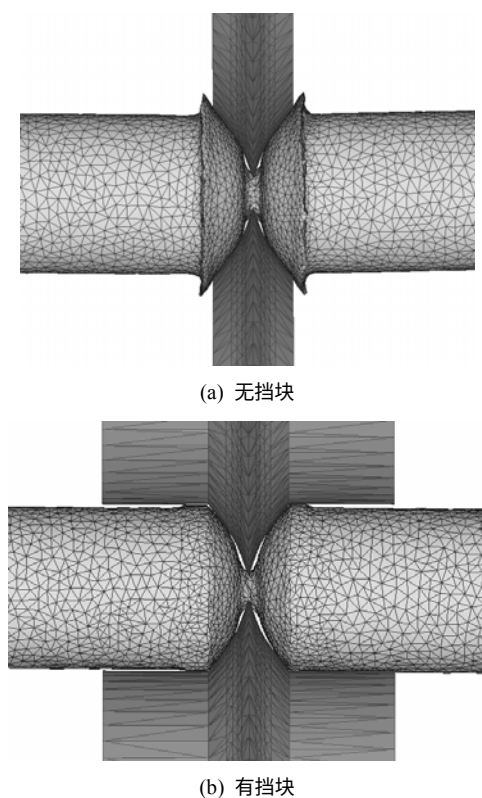


图7 有无挡块对堆料的影响对比

由图7可知,添加挡块能有效地解决堆料缺陷,但同样也存在不足。轧辊所受轴向力是辊剪工艺重要的力能参数之一。选择进给速度为 $1.0 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、旋转速度为 $15 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 等相同的工艺参数,对比添加挡块与未添加挡块两种工况下,上轧辊受到的轴向力。如图8所示,在未添加挡块的工况下,平均轴向力为 2396.88 N ,最大轴向力为 4822.38 N ;在添加挡块的工况下,平均轴向力则为 3338.98 N ,最大处的为 9707.49 N 。两种工况在辊剪的楔入段和展宽段中,轴向力变化基本相同,都是随着轧辊的逐步压下而变大。进入辊剪的结束段,未加挡块的工况轴向力逐渐减低,而加了挡块的轴向力局部剧增。这是因为未加挡块的,在辊剪的结束段,轧辊不断压下,端部金属排开速度增大,在轧辊的锥部与金属产生了间隙,降低了轴向力;而添加了挡块情况下,轧辊与端面堆料区的金属逐渐接触,产生了较大的轴向摩擦力,使得轧辊整体的轴向力局部剧增。

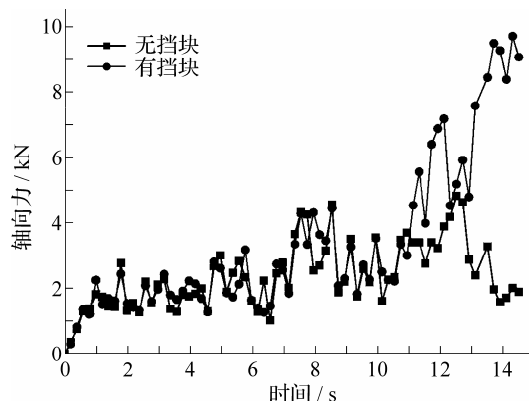


图8 有无挡块轴向力对比

综合2种方法可得,当在辊剪设备力能参数允许的情况,可以优先选用添加挡块的方法来抑制堆料缺陷;反之,为了降低设备的功耗,可以通过选择合适的工艺参数来改善堆料情况。

4 结论

(1) 建立了无料头辊剪制坯的有限元模型,通过位移法阐明了辊剪过程中,堆料缺陷的产生机理,为完善无料头辊剪制坯工艺,消除堆料缺陷,提高坯料端部辊剪质量,实现无料头轧制,提供了理论依据。

(2) 提出通过改变工艺参数来改善堆料情况。

在工艺参数允许的情况下,堆料值随着旋转速度的减小而减小,随着进给速度的增大而降低。

(3) 提出创新模具,添加挡块的方法,来改善堆料情况,并通过有限元模拟验证了该方案的可行性,且通过对比添加挡块和未添加挡块两种工况的轴向力,得到了轧辊的轴向力变化情况。

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:冶金工业出版社,2004:58-65.
- [2] Pater Z. Theoretical and experimental analysis of cross wedge rolling[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2000, 40:49-63.
- [3] 彭文飞,陈乐平,束学道,等.非对称楔横轧轴向平衡与轴向窜动机理研究[J].北京理工大学学报,2012, 32(6): 575-579.
- [4] 胡正寰,张康生,王宝雨,等.楔横轧理论与应用[M].北京:冶金工业出版社,1996:156-193.
- [5] 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.
- [6] 魏新红,束学道.坯料端部形状对楔横轧轧件凹心影响研究[J].热加工工艺,2011, 40(21):61-63.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 祖汪明.楔横轧多楔成形汽车半轴理论研究[D].北京:北京科技大学,2008.
- [10] 刘红涛.基于 DEFORM-3D 平台不锈钢板材热轧工艺模拟研究[D].兰州:兰州理工大学,2011.

On End Quality for Roll-cutting Billet without Stub Bar in Cross Wedge Rolling

HU Bin^{1,2}, SHU Xue-dao^{1,2*}

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

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

Abstract: In order to remove the stacking defects on the end cross-section in the roll-cutting billet process and implement the cross wedge rolling without the stub bar, in this paper a roll-cutting billet finite element model is established using DEFORM-3D software. The forming mechanism of the stacking defects is clarified using the displacement method, and the forming quality of the billet end cross-section is improved through adjusting the process parameters and using the innovated mould to suppress the stacking. It is found that the stacking value decreases along with the decrease of the rotational velocity and the increase of the feed velocity. In addition, adding the stop block to the outer annulus in the mould proves to be an effective means to solve the problem of stacking defects. The proposed approach provides a technical support and a theoretical basis for further improving the roll-cutting billet process leading to the cross wedge rolling production without the stub bar.

Key words: non-stub-bar; roll-cutting billet; stacking; stop block

(责任编辑 章践立)