

# 高铁空心车轴三辊斜轧成形仿真及分析

许 畅<sup>1,2</sup>, 束学道<sup>1,2\*</sup>, 朱 颖<sup>1,2</sup>

(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:** 针对目前高铁空心车轴成形工艺投资大、成本高、材料利用率低等问题, 采用三辊斜轧成形高铁空心车轴工艺, 利用 Simufact 有限元软件, 对 1:5 的高铁空心车轴进行三辊斜轧成形仿真, 分析其成形过程中金属流动规律, 应变场、温度场及轧制力的变化规律, 阐明其成形机理。在轧制同等尺寸的空心车轴时斜轧的力能参数明显小于楔横轧的。研究结果表明三辊斜轧成形高铁空心车轴工艺可行, 为短流程低成本实现高铁空心车轴精确成形及其国产化奠定理论基础。

**关键词:** 三辊斜轧; 高铁空心车轴; 仿真; 可行性

中图分类号: TG335.11

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2018) 04-0016-04

随着国内高铁行业的飞速发展, 高质量的高铁和动车空心车轴需求量持续增加。空心车轴是高速列车的核心部件, 其成形方法与质量直接决定着高铁的装备技术水平<sup>[1-2]</sup>。目前的车轴生产, 国内主要用自由锻和楔横轧, 国外主要用自由锻和精锻。由于工艺原因, 自由锻的轴心容易产生裂纹, 成品率较低, 锻件单边余量一般 10~15 mm, 使得后续加工费时, 材料利用率仅为 58%~65%, 锻造噪音大于 100 dB, 对环境污染极大<sup>[3]</sup>。楔横轧是一种轴类件塑性成形新工艺和新技术, 具有高效、节材、低成本、无污染等优点, 是我国正着力发展的关键技术。表 1 以火车 RD2 轴为例对比楔横轧成形与精锻成形的效率与外形质量。相比精锻, 楔横轧具有生产率高、材料利用率高、成形质量好等优点, 但楔横轧的轧机及模具大而且复杂, 工艺调整较为复杂, 轧制力能参数偏大, 模具不具备通用性<sup>[1]</sup>。波兰卢布林工业大学的 Pater 教授在三辊斜轧减径工艺与仿形螺旋轧制车轴工艺的基础上, 提出一种三辊斜轧成形轴类件的新工艺<sup>[4-5]</sup>, 该工艺不仅具备楔横轧的优点, 而且相对于楔横轧轧制具有模具小而简单、工艺调整简单、轧制力能参数小等优点。本文将此工艺应用于高铁空心车轴的轧制。

表 1 RD2 轴楔横轧成形与精锻成形的效率与质量指标

| 成形方法 | 生产率/(件·min <sup>-1</sup> ) | 材料利用率/% | 径向尺寸公差/mm | 径向单边余量/mm | 表面粗糙度/ $\mu\text{m}$ |
|------|----------------------------|---------|-----------|-----------|----------------------|
| 精锻   | 0.3                        | 65~73   | $\pm 1$   | < 3       | 12.5~200             |
| 楔横轧  | 2~5                        | 78~82   | $\pm 0.8$ | 2~3       | 6.3~100              |

## 1 三辊斜轧高铁空心车轴原理

三辊斜轧就是 3 个轧辊同向旋转带动圆形轧件旋转, 由于轧辊轴线与轧件轴线交叉, 故轧件除旋转运动外还有向前的轴向运动。模具主要参数有轧辊中心线相对于工件的中心线的偏转角度即送进角  $\alpha$ , 轧辊端面与轧件的中心线组成的角度即辗轧角  $\beta$ , 3 个轧辊相对于工件轴线成 120°对称分布,  $a$  为轧制方向, 三辊斜轧原理<sup>[6-7]</sup>如图 1 所示。

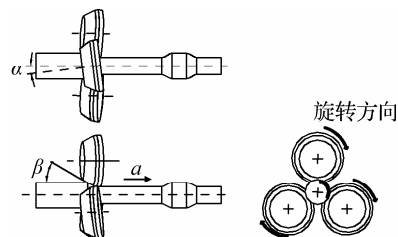


图 1 三辊斜轧原理图

三辊斜轧轧制过程由 3 个运动组成: (1) 轧辊绕自身轴线的旋转运动, 轧辊的旋转运动带动轧件

收稿日期: 2017-09-27.

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

基金项目: 国家自然科学基金(51475247); 浙江省科技计划(2016C31018); 浙江省自然科学基金(LZ17E050001)。

第一作者: 许畅(1994-), 男, 安徽黄山人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 三辊斜轧成形技术。E-mail: 714237792@qq.com

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

旋转; (2) 轧辊沿工件径向的进给运动, 轧辊的径向进给运动达到控制轧辊间距的目的, 使得轧件径向压缩, 从而达到成形不同直径尺寸的阶梯轴要求; (3) 工件在夹具的牵引下做轴向运动, 使得工件可以轴向延伸. 轧辊的旋转运动、径向进给运动与工件的轴向运动同步, 3 项运动合成从而轧制成需要的轴的阶梯形. 高铁空心车轴的轧制工艺过程如图 2 所示. 将毛坯加热至  $1\,000\sim 1\,200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 轴向推料装置(液压缸、夹具)将坯料通过导轨送入三辊斜轧机, 使得 3 个轧辊同时咬合轧件, 轧件在推料装置的作用下轴向运动, 当轧件触碰到引料装置的感应器时, 夹具 2 夹紧轧件, 在液压缸的带动下轧件轴向运动, 同时夹具 1 放开轧件回归初始位置. 轧件在模具间前进, 直到轧制完成. 在轧制过程中, 轧辊可根据火车车轴的不同断面收缩率改变轧辊的径向速度  $v_r$ , 以改变 3 个轧辊的中心距, 进而实现火车车轴的不同直径要求. 轧辊的径向速度  $v_r$  可由夹具带动轧件的轴向速度  $v_x$  以及轧辊的送进角  $\alpha$ 、碾轧角  $\beta$  确定, 轧辊的径向速度  $v_r$  及工件的轴向速度  $v_x$  可用 CNC 控制.

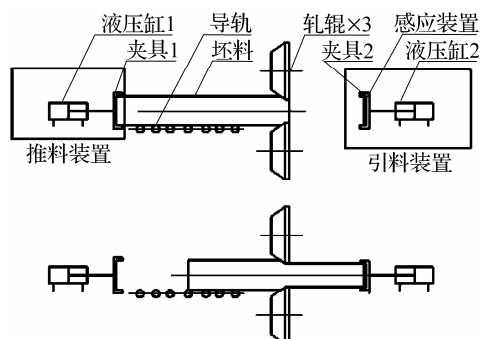


图2 三辊斜轧轧制过程示意图

## 2 高铁空心车轴三辊斜轧有限元模型的建立

本文以 1:5 的 RD2 高铁空心车轴为例, 尺寸如图 3 所示, 模拟将采用直径为 44 mm, 长为 300 mm, 内径为 12 mm 的圆柱形坯料, 及采用大径为 100 mm, 小径为 70 mm,  $\alpha=30^{\circ}$ ,  $\beta=7^{\circ}$ , 整形区长度为 4 mm 的盘形轧辊.

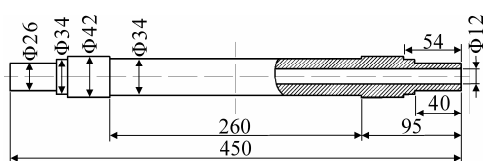


图3 1:5 RD2 空心车轴(mm)

利用相对运动原理, 用轧辊的轴向运动代替轧件的轴向运动, 从而将轧件左边设置为固定端, 右边设置为自由端, 同时给予轧件轴向旋转的自由度, 轧辊的运动由轧辊轴向旋转、轴向进给、径向进给 3 个运动合成. 毛坯定义为弹塑性体; 轧辊、夹具、芯棒均定义为刚性体; 夹具与坯料粘接在一起, 坯料与芯棒、轧辊相接触; 摩擦系数为 0.95; 环境温度设置为  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 坯料温度为  $1\,150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 仿真过程中轧辊的转速  $v=60\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 轴向速度  $v_x=20\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ , 径向速度  $v_r$  与时间的关系如图 4 所示.

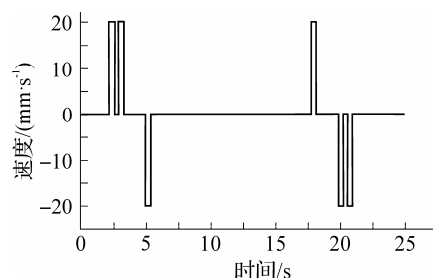


图4 轧辊径向速度分配图

采用 42CrMo4 作为坯料的材料, 该材料的属性取决于以下公式(源自于有限元软件 Simufact 13.3):

$$\begin{aligned} \sigma_p &= 3\,968.99 e^{-0.003\,545\,747 T} \cdot \\ &\quad \varphi^{-0.000\,181\,918 T + 0.187\,877} \cdot \\ &\quad e^{(6.356\,51 \times 10^{-5} T \pm 0.109\,16) / \varphi} \cdot \\ &\quad \dot{\varphi}^{7.457\,24 \times 10^{-6} + 0.060\,129\,2}, \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $\sigma_p$  为流变应力, MPa;  $\varphi$  为应变强度;  $\dot{\varphi}$  为应变速率,  $s^{-1}$ ;  $T$  为温度,  $^{\circ}\text{C}$ .

## 3 仿真结果与分析

RD2 高铁空心车轴三辊斜轧轧制过程各阶段的模拟仿真结果如图 5 所示. 为了增大轧辊与坯料的接触面积, 便于轧辊咬合, 故将坯料端部设计成锥形. 0~30% 阶段的成形效果较好, 阶梯较为明显, 但是由于轧辊形状的特点以及本工艺的轧辊路径决定了无法成形直角阶梯. 随着轧制的进行, 在轧制中间长轴段时, 前段阶梯轴发生阶梯由明显到不明显的变化过程, 但是阶梯轴的主要特征没有发生变化, 产生此现象的原因有 2 点: (1) 本模型是缩小比例的阶梯轴, 阶梯轴半径差为 4 mm 左右, 相对于 400 mm 长的阶梯轴而言, 直径变化特征相

对不明显;(2)轧辊轴向分速度  $v_x$  与轧制方向相反,摩擦力方向与轧制方向相反,轧件会有一部分金属沿着3个轧辊的间隙向反方向流动,从而覆盖在原有阶梯轴的表面,使得阶梯不明显化。

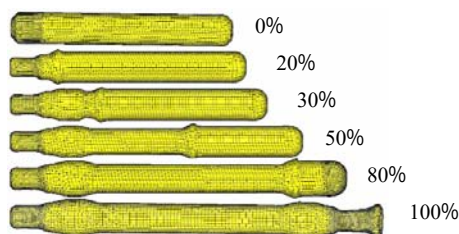


图5 斜轧过程中主轴形状的连续变化

图6为仿真结果与要求形状结果对比,形状基本符合轧制要求。由于这种成形方法的成形精度依赖于轧辊的辊形设计以及轧辊的轨迹,在合理的条件下调节轧辊的辊形尺寸以及轧辊的轨迹路线将有效地提高轧制的成形效果。



图6 轧件仿真结果形状与要求形状对比

图7为轴表面和轴纵截面的等效塑性应变分布图,应变以直线方式分布,在表面附近的值最大,在轴心区域最小。因为轧辊与工件表面接触,在轧辊的作用下工件表面的材料发生流动,工件表面的等效塑性应变较大,轧件芯部与芯棒接触,在摩擦力的作用下发生等效塑性应变,在轴的端部由于直径较小,材料流动较大,轧制力相对较大,所以阶梯轴端部的等效塑性应变较大。

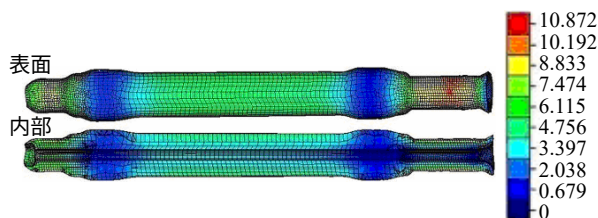


图7 斜轧过程中轧件等效塑性应变

图8为斜轧过程中轧件温度分布。在成形过程中,轧辊与坯料产生局部接触,在坯料的整个加工过程中,只有在轧件的端部与夹具接触处出现一定降温,但轧件整体的温度保持在金属成形过程的合适范围内,基本维持在  $1050^{\circ}\text{C}$ ,有利于轧件的塑性成形。

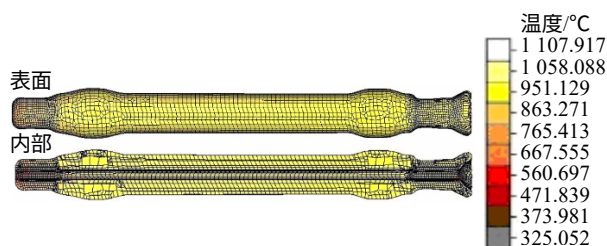


图8 斜轧过程中轧件温度变化

图9为轧件在轧制过程中所受的轴向力与径向力随时间的变化,可见径向力和轴向力很大程度上取决于横截面减缩,横截面面积减小得越大,力参数越大,因为横截面越小,轧制过程中所需转移的金属越多。当轧辊往轧制方向移动时,轧件固定端对轧辊的牵引作用增大,所以轴向力与径向力是沿着轧制方向缓慢上升的,即轴向力和径向力的2个峰值出现在工件右端直径最小的端部轴长区域,最小值出现在工件左端直径最大处。对比三辊斜轧工艺和楔横轧多楔轧制工艺轧制同等尺寸大小的空心车轴,斜轧最大径向力为  $38.5\text{ kN}$ ,轴向力为  $20\text{ kN}$ ,远小于楔横轧多楔轧制最大径向力  $3000\text{ kN}$ ,轴向力  $300\text{ kN}$ <sup>[1]</sup>。

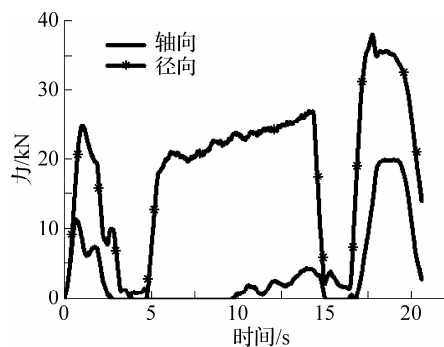


图9 轴向力与径向力

图10为三辊斜轧空心车轴过程中轧制力矩的变化过程。

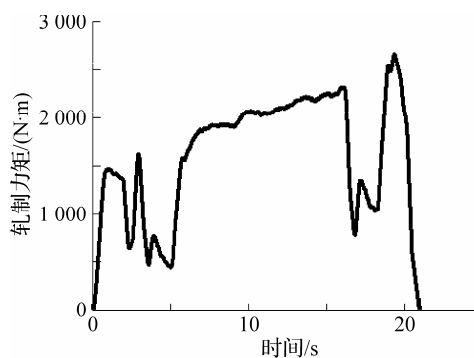


图10 轧制力矩

通过对轧制力矩分布的分析可以得出类似结论, 力矩分布与轴径的减小密切相关, 与轴向力和径向力分布一致, 力矩最大值为  $2\,675\text{ N}\cdot\text{m}$ , 远小于同等轧件尺寸下楔横轧多楔轧制力矩  $14\text{ kN}\cdot\text{m}^{[1]}$ , 这意味着在斜轧过程中可以有效减少轧辊磨损, 轧机可以进行轻量化施工, 延长轧机的使用寿命。

从以上结果来看, 三辊斜轧空心车轴是可行的。下一步将讨论送进角  $\alpha$  的大小、辗轧角  $\beta$  的大小、轧辊成形区的长度、轧辊旋转速度、轧件断面收缩率大小、温度、轧辊半径等工艺参数对三辊斜轧空心车轴成形的影响规律, 从而提出优化方案。

#### 4 结论

(1) 将三辊斜轧成型轴类件的新工艺应用于高铁列车空心车轴的成形, 通过对比空心车轴模拟仿真结果图与轧件成形尺寸要求发现符合轧制要求, 同时分析其成形过程的金属流动规律, 应变场、温度场及轧制力的变化规律, 论证了三辊斜轧轧制高铁空心车轴工艺的可行性, 研究结果为短流程低成本实现高铁空心车轴精确成形及其国产化奠定理论基础;

(2) 在轧制同等尺寸的空心车轴时斜轧的力能参数明显小于楔横轧的力能参数, 这意味着在斜轧过程中可以有效减少轧辊的磨损, 使得轧机可以进行轻量化施工, 有效增加轧机的使用寿命。

#### 参考文献:

- [1] 俞澎辉. 高速列车空心车轴楔横轧多楔轧制成形关键技术研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2013.
- [2] 李传民, 束学道, 胡正寰. 铁道车辆用车轴成形方法现状与研究[J]. 冶金设备, 2006(6):5-8.
- [3] 秦敏, 李继光, 房娃, 等. 空心车轴径向锻造工艺的模拟研究[J]. 太原科技大学学报, 2008(5):373-376.
- [4] Pater Z. Theoretical and experimental analysis of cross wedge rolling[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000(40):49-63.
- [5] Pater Z, Tomczak J, Bulzak T. Numerical analysis of the skew rolling process for main shafts[J]. Metallurgy, 2015, 54(4):627-630.
- [6] 贾尚武, 王召林, 刘松, 等. 三辊斜轧空心减径的辊形设计及实验验证[J]. 精密成形工程, 2013(5):18-23; 28.
- [7] 张小平, 秦建平. 轧制理论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.

## Simulation and analysis of three-roll skew rolling forming of the railway hollow shaft

XU Chang<sup>1,2</sup>, SHU Xue-dao<sup>1,2\*</sup>, ZHU Ying<sup>1,2</sup>

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

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

**Abstract:** Aiming at the existing problems in high-speed railway hollow shaft forming process, e.g. large investment, high cost, and low utilization rate of materials, the paper puts forward a new process of forming high-speed rail hollow axle by three-roll skew rolling. The three-roll skew rolling forming of 1:5 high-speed rail hollow shaft is simulated by Simufact 13.3 finite element software. The law of metal flow, the variation regulation of strain field, temperature field and rolling force are analyzed, and the forming mechanism is clarified. The energy parameter of three-roll skew rolling is obviously smaller than that of cross wedge rolling when rolling the hollow shaft of the same size. The results show that the forming process of high-speed rail hollow axle by three roll skew rolling is feasible. This study lays a theoretical foundation for the realization of accurate forming and localization of high-speed rail hollow axle with short process flow and low cost.

**Key words:** three-roll skew rolling; railway hollow shaft; simulation; feasibility

(责任编辑 韩超)