

引文格式: PATER Zbigniew, 李子轩, 郑家斌, 等. 铁路车轴锻轧复合成形数值模拟研究 [J]. 塑性工程学报, 2026, 33 (5): 75–81. PATER Zbigniew, LI Zixuan, ZHENG Jiabin, et al. Numerical simulation study on composite forging-rolling forming process of railway axle [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2026, 33 (5): 75–81.

铁路车轴锻轧复合成形数值模拟研究

PATER Zbigniew¹, 李子轩², 郑家斌², 束学道²

(1. 波兰卢布林工业大学 机械工程学院, 波兰 卢布林 20-618;

2. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 314211)

摘要: 铁路车轴作为重型轴类零件, 单件重量超过 400 kg, 目前主要采用开式模锻和旋锻工艺进行批量生产。然而, 上述工艺存在效率低、材料利用率低等局限性, 三辊楔横轧工艺凭借其高效、节材以及高质等优点, 被视为替代传统锻造工艺的新兴成形技术。针对铁路车轴的完整成形过程进行了数值分析, 该过程包括: 机械手将坯料从进料装置转移至锻造工位、对工件端部进行四模锻造、机械手将工件转移至三辊楔横轧机进行成形, 以及将成形后的车轴从轧机中取出等工序。基于有限元方法, 采用 Forge 软件对所述车轴制造工艺进行了数值模拟分析。建立了完整的机械手转移-预锻-轧制-取件全工序数值模型; 提出了 V 形锻模分步预锻工艺解决端部凹陷问题; 优化了三辊楔横轧工艺参数, 实现了高效精确成形。研究结果表明, 该工艺可实现每小时 60 件的生产效率, 成形载荷低于 2.7 MN, 扭矩小于 450 kN·m, 工件心部区域损伤函数值不超过 0.3, 有效避免了内部开裂缺陷。

关键词: 三辊楔横轧; 数值模拟; 有限元分析; 铁路车轴

中图分类号: TG132.3; TG306 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2012 (2026) 05-0075-07

doi: 10.3969/j.issn.1007-2012.2026.05.009

Numerical simulation study on composite forging-rolling forming process of railway axle

PATER Zbigniew¹, LI Zi-xuan², ZHENG Jia-bin², SHU Xue-dao²

(1. Faculty of Mechanical Engineering, Lublin University of Technology, Lublin 20-618, Poland;

2. Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 314211, China)

Abstract: Railway axles are heavy axial components with individual weights exceeding 400 kg, currently manufactured in mass production primarily through open die forging and swaging processes. However, these conventional processes suffer from limitations such as low production efficiency and poor material utilization. The three-roll cross-wedge rolling (3R-CWR) process, with its advantages of high efficiency, material saving, and superior product quality, has emerged as a promising alternative forming technology to replace traditional forging for railway axle manufacturing. Numerical analysis of the complete forming process of railway axles was carried out, which includes transfer of the billet from the feeding device to the forging station by manipulator, preforming of the workpiece ends using four dies, transfer of the workpiece to the three-roll cross-wedge rolling mill by manipulator for forming, and removal of the formed axle from the rolling mill. Numerical simulation analysis of the described axle manufacturing process was conducted using Forge software based on finite element method. A complete numerical model covering the entire process of manipulator transfer-preforming-rolling-removal was established; a V-shaped forging die step-by-step preforming process was proposed to solve the end concavity problem; the three-roll cross-wedge rolling

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52205403; 52375346); 国家自然科学基金区域联合基金资助项目 (U23A20629); 国家自然科学基金面上项目 (52375346); 浙江省自然科学基金资助项目 (LY24E050002); 宁波甬江人才计划项目 (2023A-157-G); 宁波市重点研发计划项目 (2023Z011); 中国-中东欧国家高校联合教育项目 (2023320); 宁波大学“力学+”交叉学科拔尖创新青年基金资助项目 (ZX2025000396)

通信作者: 束学道, 男, 1968 年生, 博士, 教授, 主要从事轧制工艺及装备研究, E-mail: shuxuedao@nbu.edu.cn

第一作者: PATER Zbigniew, 男, 1965 年生, 博士, 教授, 主要从事轧制工艺及装备研究, E-mail: z.pater@pollub.pl

收稿日期: 2025-06-27; **修订日期:** 2026-03-05

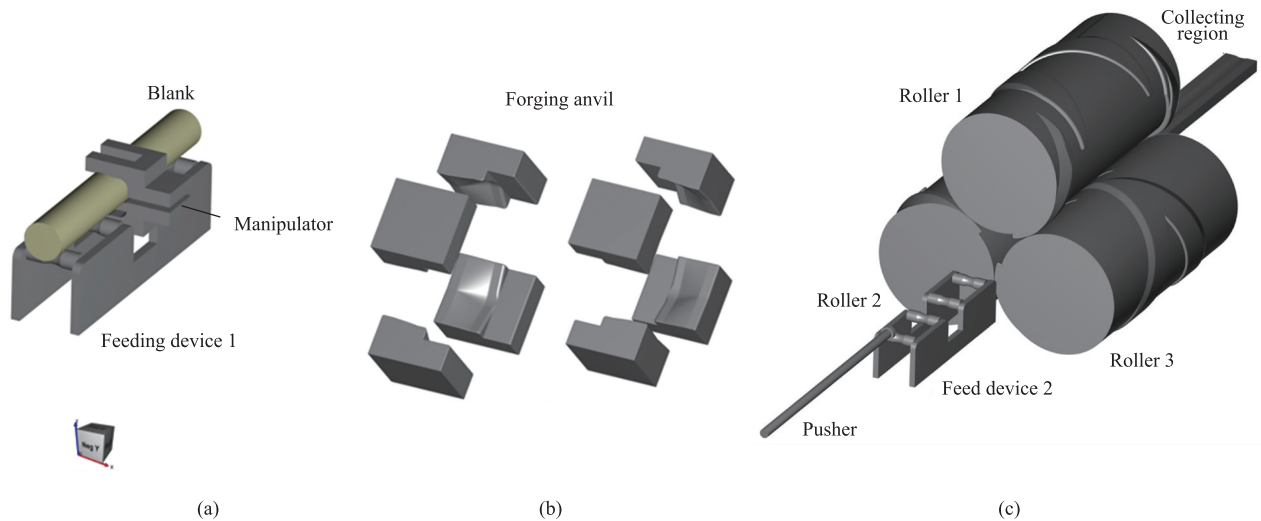


图 2 Forge 中的铁路车轴成形过程的几何模型

(a) 机械手上料 (b) 预锻 (c) 轧制

Fig. 2 Geometric model of railway axle forming process in Forge

(a) Manipulator feeding (b) Preforging (c) Rolling

括 2 个进料装置、1 个端部翻转工位、1 台三辊楔横轧机和 1 个成品接收槽，各工位间的工件转移由机械手完成。预锻工序采用 8 个相同的 V 形锻模，按成对方式安装在压力机滑块上。楔横轧工序采用 3 个相同的楔形辊，其中单个轧辊的结构如图 3 所示。3 个轧辊的轴线呈 120° 均匀分布，轧辊轴线与工件轴线的径向距离为 665 mm。每个轧辊上设置 3 个楔

形块：中央楔形块的成形角 $\alpha = 15^\circ$ 、楔形展开角 $2\beta_1 = 44.6^\circ$ ，位于轧辊中心位置；两个侧面楔形块的成形角 $\alpha = 19^\circ$ ，侧面展开角 $\beta_2 = 18.8^\circ$ ，分别位于中央楔形块的两侧。轧辊上还配备了导向槽，用于工件的准确定位。楔形块采用条带式设计，中央楔形块宽度为 380 mm，侧面楔形块宽度为 240 mm，以控制工具与工件的接触范围。在数值模拟中，所

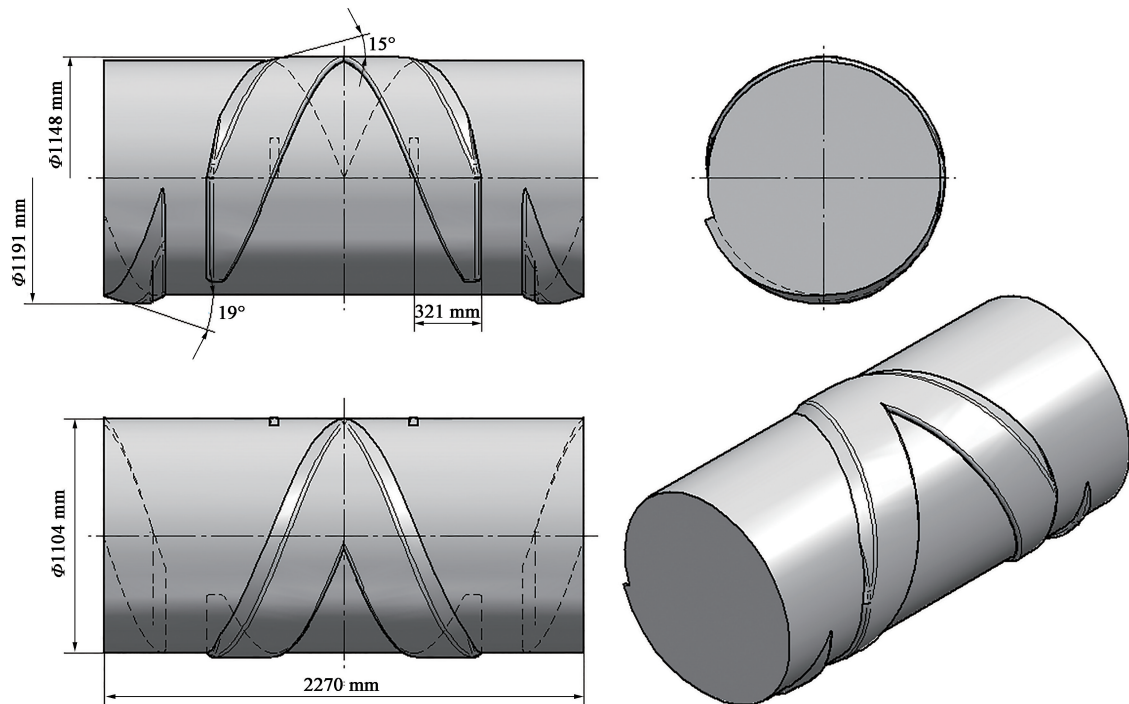


图 3 用于 BA302 铁路车轴的轧制模具

Fig. 3 Rolled die used in BA302 railway axle rolling process

有工具均视为刚体, 工件视为塑性变形体。采用 Forge 软件进行了数值模拟。前述研究采用该软件已多次成功地应用于套筒穿孔^[19-20]、斜轧^[21-22]、环轧^[23-24]和楔横轧^[25-26]等成形过程的分析。这些模拟得到的结果与实验研究的结果具有很好的一致性。仿真采用的坯料尺寸为 $\Phi 216 \text{ mm} \times 1590 \text{ mm}$, 材料为 42CrMo4 钢。其材料模型由式 (1) 描述。

$$\sigma_p = 1827.07e^{-0.00289T} \varepsilon^{-0.1123} e^{-0.4879/\dot{\varepsilon}} \dot{\varepsilon}^{0.14368} \quad (1)$$

式中: σ_p 为流动应力 (MPa); T 为温度 ($^{\circ}\text{C}$); ε 为等效应变; $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率 (s^{-1})。

成形前将坯料加热至 1240°C , 轧辊和锻模预热至 350°C 。模具与工件间的传热系数设定为 $10 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, 接触界面摩擦采用恒定摩擦模型, 摩擦因数取值为 0.9。各运动部件的工艺参数设定如下: 顶杆工作速度 $50 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (V 形锻模以 $200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度实现合拢和分离), 送料装置将工件送入轧机的速度为 $300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 轧辊转速 $2 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 机械手移动速度 $500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 机械手旋转速度 $10 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。数值模拟中工件采用四节点四面体单元进行网格划分, 计算过程中启用自适应

网格重划分功能, 当节点应变增量超过 0.4 时自动触发重划分。

2 研究结果

通过有限元数值模拟实现了对铁路车轴完整成形过程的精确跟踪, 单根车轴的成形周期为 71.7 s 。在连续生产中, 由于各工序时间的重叠安排, 下一根车轴的成形过程在前一周期的第 60.4 s 时刻即可开始。基于此时序优化, 该制造工艺的生产效率可达每小时 59.6 件。成形周期从机械手在进料装置 1 取料开始。经过 1240°C 加热的坯料被转移至翻转工位, 转移时间为 5.6 s 。

坯料就位后开始端部预锻成形, 该工序分为两个行程完成 (图 4)。第 1 次锻造 ($t = 5.6 \sim 12.1 \text{ s}$) 中, 运动的 V 形锻模对坯料端部进行镦粗, 使其呈椭圆形截面; 第 2 次锻造 ($t = 12.1 \sim 18.6 \text{ s}$) 中, V 形锻模沿垂直于第 1 行程的方向运动, 将端部成形为锥形结构。两步成形工艺有效避免了直接从圆柱形坯料轧制车轴时可能出现的端部切断缺陷。整个锻造过程中, 机械手始终保持工件的

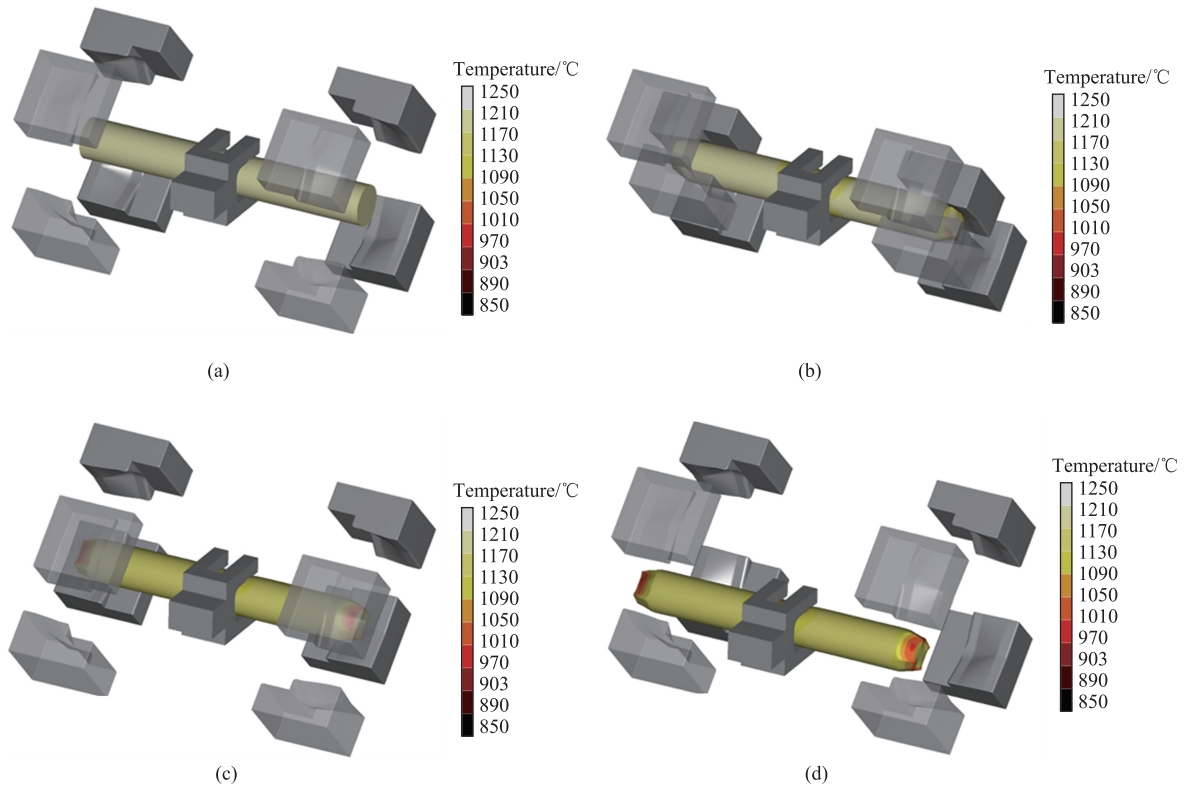


图 4 采用 V 形锻模成形工件端部

(a) 上料阶段 (b) 第 1 次锻造 (c) 第 2 次锻造 (d) 工件转移

Fig. 4 Ends forging of workpiece using V-shaped forging die

(a) Workpiece loading (b) The first forging (c) The second forging (d) Workpiece transfer

准确定位。

预锻完成后，进入工件转移阶段（转移时间为 $t=18.6\sim25.6\text{ s}$ ），机械手将工件转移至三辊楔横轧机旁的进料装置 2。随后推料装置将工件推入轧机工作区域，推料装置随即退出。与此同时，从 $t=33.2\text{ s}$ 开始，机械手返回初始位置（进料装置 1），准备下一根坯料的转移。

进入轧制阶段后（ $t=34\text{ s}$ 时），轧制过程持续 30 s 。如图 5 所示，该轧制工艺能够获得几何形状准确、无内外缺陷的车轴产品。成形过程中首先形成中部台阶，随后成形两侧台阶。在轧制即将完成时（即 $t=60.4\text{ s}$ 时），下一根车轴的制造周期开始启动。轧制完成后进入出料阶段（推送时间为 $t=64\sim71.7\text{ s}$ ），车轴由推料器推送至成品接收槽。推料器随后回退至初始位置（ $t=85\text{ s}$ 时到位）。约 1 s 后，新的坯料进入进料装置 2，开始新一轮的轧制循环，整个复合成形工艺中各工序时间分配如表 1 所示。

表 1 各成形工艺时间分配

Tab. 1 Time allocation for each forming process

Process	Time frame/s	Duration/s	Explanation
Feeding transfer	0–5.6	5.6	Manipulator takes and transfers material from feeder 1
The first forging	5.6–12.1	6.5	V-shaped forging die forges end of axle into an oval shape
The second forging	12.1–18.6	6.5	Conical end is formed vertically
Workpiece transfer	18.6–25.6	7.0	Transfer to mill feeder
Preparing for rolling	25.6–34	8.4	Push into rolling mill, manipulator back
Cross wedge rolling	34–64	30.0	Main forming process
Finished product discharge	64–71.7	7.7	Push to receiving slot
Reset	71.7–85	13.3	Die reset
Next cycle begins	86	—	Achieve overlapping production

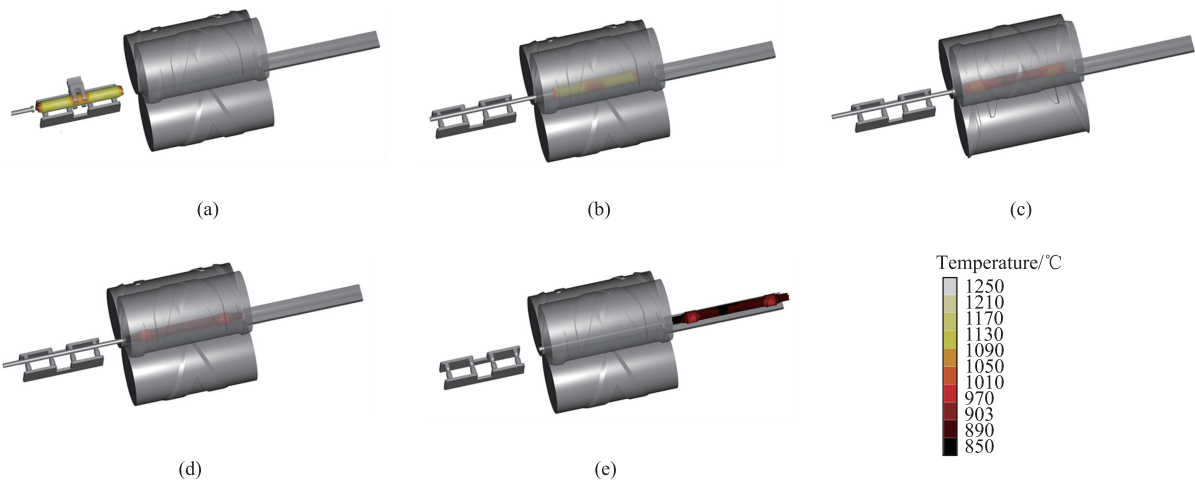


图 5 铁路车轴三辊楔横轧成形过程中的温度变化

(a) 准备轧制 (b) 轧制开始 (c) 中心台阶成形 (d) 端部台阶成形 (e) 出料阶段

Fig. 5 Temperature variation during railway axle three-roll cross wedge rolling process

(a) Rolling preparation (b) Rolling beginning (c) Center step forming (d) End step forming (e) Unloading stage

图 6~图 8 为端部台阶成形阶段的仿真结果，该铁路车轴制造工艺的成形周期相对较长，约为 72 s 。尽管成形时间较长，但如图 6 所示的温度分布结果表明，工件温度仍能维持在热塑性成形的适宜范围内。最低温度出现在与工具接触的工件表层，而工件心部温度保持较高水平，超过 $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这种有利

的温度分布主要归因于工件较大的热容量以及轧制过程中塑性变形功和摩擦功向热能的转化。

图 7 显示了车轴中等效应变的分布规律。该分布特征符合楔横轧成形的典型规律：应变呈层状分布，最大值出现在工件表层，这是由于摩擦力作用使材料产生周向流动所致。随着截面收缩率的增加，

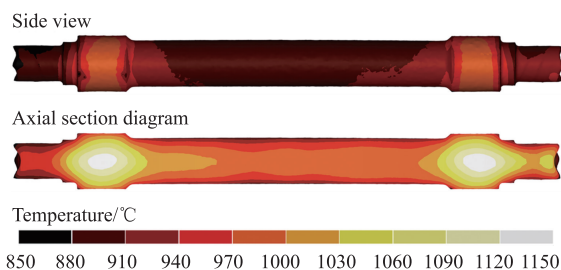


图 6 轧制成形后的铁路车轴中的温度分布

Fig. 6 Temperature distribution in railway axle after rolling process

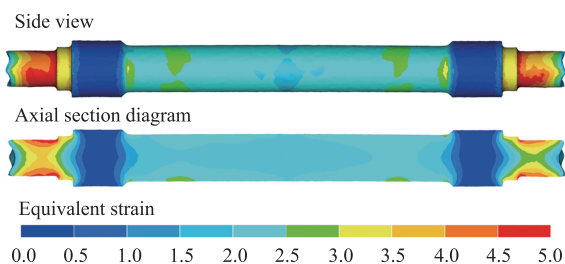


图 7 轧制成形后的铁路车轴等效应变分布

Fig. 7 Effective strain distribution in railway axle after rolling process

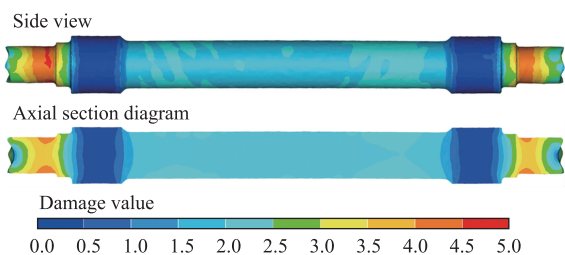


图 8 归一化 Cockcroft-Latham 准则计算得到的损伤函数在轧制成形后铁路车轴中的分布情况

Fig. 8 Distribution of damage function calculated according to normalized Cockcroft-Latham criterion in railway axle after rolling process

等效应变相应增大。楔横轧工艺的技术难点之一是工件轴向区域可能产生内部开裂缺陷。

图 8 显示了基于 Cockcroft-Latham 准则计算的损伤函数分布。损伤函数的最大值（可达 0.6）出现在截面收缩最大的台阶过渡区域，而工件中心区域的损伤函数分布较为均匀，数值不超过 0.3。根据文献 [27] 的数据，42CrMo4 钢在 950 °C 下的临界损伤值为 1.3。对比分析表明，在所研究的成形工艺中，工件轴向区域不会发生材料开裂失效。

图 9 显示了铁路车轴各成形工序的载荷分布规律。端部锻造时受力呈短峰形式，第 1 道次和第 2 道次压下量分别达到 2042 和 2607 kN。楔横轧过程中力的分布较为复杂，具有阶梯状特征，可分为 3 个典型阶段：（1）轧制初期（34~38 s），载荷逐渐上升至约 2000 kN，对应工件进入楔形辊和初始变形阶段；（2）中部台阶轧制阶段（38~50 s），载荷

达到最高值 2382 kN，对应车轴中部大截面的成形，此时变形抗力最大；（3）外台阶轧制阶段（50~64 s），载荷降至约 1700 kN，比中部台阶轧制载荷低约 30%，这是由于外台阶断面收缩率较小，变形量相对较少。考虑到车轴的大尺寸特点，上述载荷水平相对较低，这表明采用本工艺的生产设备可实现相对轻量化的结构设计。

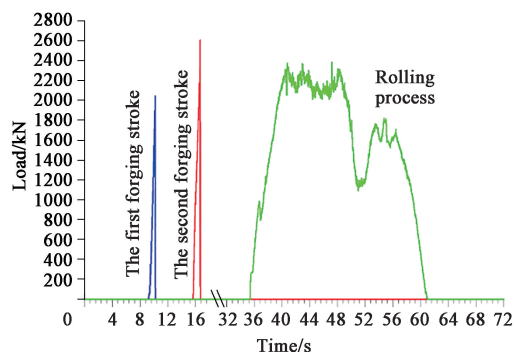


图 9 BA302 型铁路车轴在各成形工艺中的载荷分配

Fig. 9 Load distribution in each forming process of BA302 railway axle

图 10 显示了三辊楔横轧过程中的扭矩分布。楔横轧过程中扭矩变化同样呈现阶梯状特征，与载荷变化规律基本一致：（1）轧制初期扭矩逐渐上升至约 250 kN·m；（2）中部台阶轧制阶段达到最大扭矩值 441.8 kN·m，这与该阶段最大的变形抗力相对应；（3）外台阶轧制阶段扭矩降至约 300 kN·m。结合该扭矩值和轧辊转速，可确定轧机的驱动功率需求。考虑 60% 的功率余量，该楔横轧机可采用 3 台 150 kW 直流电机进行驱动。

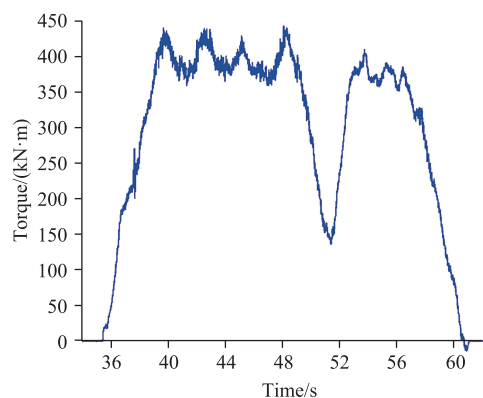


图 10 BA302 铁路车轴楔横轧过程中轧辊上的扭矩分布

Fig. 10 Torque distribution on roll during BA302 railway axle cross wedge rolling process

3 结论

（1）建立了完整的机械手转移-预锻-轧制全工

序数值模型, 仿真结果表明采用三辊楔横轧工艺可以有效制备实心铁路车轴; 采用 V 形锻模分步预锻方法抑制了工件端部凹心问题, 避免了轧制后的端部切除工序, 提高了材料利用率。

(2) 虽然该工艺的成形周期相对较长, 但坯料温度能够保持在热塑性成形的适宜温度范围内。通过损伤函数分析表明, 工件心部损伤函数值处于较低水平, 在楔横轧成形过程中不会产生内部裂纹缺陷。

(3) 采用三辊楔横轧工艺可将单个轧辊的扭矩控制在 $450 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 以下, 各成形工序的载荷水平相对较低 (小于 2.7 MN), 为实现设备轻量化设计提供了条件。

参考文献:

- [1] GRONOSTAJSKI Z, PATER Z, MADEJ L, et al. Recent development trends in metal forming [J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2019, 19 (3): 898–941.
- [2] PATER Z, TOMCZAK J, LIS K, et al. Forming of rail car axles in a CNC skew rolling mill [J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2020, 20 (3): 1–13.
- [3] PATER Z. Cross-wedge rolling [J]. *Comprehensive Materials Processing*, 2014, 3: 211–279.
- [4] PATER Z, TOMCZAK J, BULZAK T. Numerical analysis of the skew rolling process for rail axles [J]. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2015, 60 (1): 415–418.
- [5] XU C, SHU X D. Influence of process parameters on the forming mechanics parameters of the three-roll skew rolling forming of the railway hollow shaft with 1: 5 [J]. *Metallurgija*, 2018, 57 (3): 153–156.
- [6] PATER Z, TOMCZAK J, BULZAK T. Problems of forming stepped axles and shafts in a 3-roller skew rolling mill [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9 (5): 10434–10446.
- [7] WANG J T, SHU X D, ZHANG S. Effect of process parameters on average grain size and microscopic uniformity of the three-roll skew rolling forming of the railway hollow shaft [J]. *Metallurgija*, 2020, 59 (1): 47–50.
- [8] PATER Z. A comparative analysis of forming railway axles in 3- and 4-roll rolling mills [J]. *Materials*, 2020, 13 (14): 3084.
- [9] PATER Z, TOMCZAK J. A new cross wedge rolling process for producing rail axles [J]. *MATEC Web of Conferences*, 2018, 190: 11006.
- [10] BULZAK T. Ductile fracture prediction in cross-wedge rolling of rail axles [J]. *Materials*, 2021, 14 (21): 6638.
- [11] PATER Z. Numerical analysis of the cross-wedge rolling process of a railway axle [J]. *Mechanik*, 2020, 93 (2): 18–21.
- [12] PATER Z. A comparison of two-roll and three-roll cross wedge rolling processes [J]. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 2023, 17 (1): 252–266.
- [13] SHU X D, WEI X H, CHEN L P. Influence analysis of block wedge on rolled-piece end quality in cross wedge rolling [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 1468 (203): 1055–1058.
- [14] PATER Z, TOMCZAK J, BULZAK T. New forming possibilities in cross wedge rolling processes [J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2018, 18: 149–161.
- [15] ZENG J, XU C, REN W, et al. Study on the deformation mechanism for forming shafts without concavity during the near-net forming cross wedge rolling process [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 91 (1–4): 127–136.
- [16] YANG C, ZHENG Z, HU Z. Simulation and experimental study on the concavity of workpiece formed by cross wedge rolling without stub bar [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 95 (1–4): 707–717.
- [17] HAN S, SHU X, SHU C. Study on near-net forming technology for stepped shaft by cross-wedge rolling based on variable cone angle billets [J]. *Materials*, 2018, 11 (8): 1278–1278.
- [18] EN 13261: 2024, Railway applications—Wheelsets and bogies—Axles—Product requirements [S].
- [19] AGHAJANI H D, EDUARDO G, ALBERTO M. Effects of skew rolling piercing process friction coefficient on tube twisting, strain rate and forming velocity [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 25: 7254–7272.
- [20] AGHAJANI H D, GARCÍA E G, ALBERTO M. Analysis of super Cr13 stainless-steel internal fracture growth effects during skew mill piercing process [J]. *Results in Engineering*, 2024, 21: 101682.
- [21] BAJOR T, KULAKOWSKA A, DYJA H. Analysis of the rolling process of alloy 6005 in a three-high skew rolling mill [J]. *Materials*, 2020, 13 (5): 1114.
- [22] STEFANIK A, SZOTA P, MRÓZ S, et al. Analysis of the Aluminum bars in three-high skew rolling mill rolling process [J]. *Solid State Phenomena*, 2015, 220–221: 892–897.
- [23] SALEM M, HEYDARI M. A new approach in modeling of guide and conical rolls in the ring rolling process [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 81 (9–12): 1831–1843.
- [24] LEE K, KIM B. Advanced feasible forming condition for reducing ring spreads in radial-axial ring rolling [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2013, 76: 21–32.
- [25] KRUSE J, JAGODZINSKI A, LANGNER J, et al. Investigation of the joining zone displacement of cross-wedge rolled serially arranged hybrid parts [J]. *International Journal of Material Forming*, 2019, 13: 1–13.
- [26] COORS T, PAPE F, KRUSE J, et al. Simulation assisted process chain design for the manufacturing of bulk hybrid shafts with tailored properties [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 108: 1–9.
- [27] PATER Z, TOMCZAK J, BULZAK T, et al. Conception of a three roll cross rolling process of hollow rail axles: Forming processing and thermomechanical treatment [J]. *ISIJ International*, 2021, 61 (3): 895–901.