

钩舌闭式模锻的数值模拟研究及工艺优化

李 丽¹ 孟凡响² 唐振兴¹ 张海沧³ 张富军⁴

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司机电装备分公司, 130062, 长春;
2. 吉林大学材料科学与工程学院, 130022, 长春; 3. 中车长春轨道客车股份有限公司工程技术中心,
130062, 长春; 4. 中车长春轨道客车股份有限公司城铁事业部, 130062, 长春)

摘 要 [目的] 为了保证铁路钩舌满足严格的力学性能要求, 并克服传统铸造与开式模锻工艺在成型质量、工艺流程复杂度等方面的局限性, 本研究旨在探索一种更高效、质量更可控的制造工艺。[方法] 选取铁路货车钩舌作为研究对象, 设计并实施了一次预成形过渡的闭式模锻工艺。采用刚黏塑性有限元法, 对闭式模锻成形过程进行了详尽的数值模拟, 以深入分析钩舌在闭式模锻过程中可能出现的缺陷类型及温度场分布特征。研究了锻件及模具初始预热温度对成形质量的具体影响, 并以锻件填充率作为核心评价指标, 通过数值分析获得了优化的工艺参数。在此基础上, 结合锻件成形过程中金属流动的详细情况及成形缺陷的具体位置、成因, 对钩舌闭式模锻工艺进行了再优化设计。随后, 依据优化调整后的闭式模锻工艺进行了试验验证, 并对终锻件进行了全面的成形误差分析。[结果及结论] 优化后的闭式模锻工艺显著提升了钩舌锻件的成形质量, 整体偏差分布均匀, 锻件填充情况良好, 表面光洁度高且平坦, 未观察到任何成形缺陷。数值模拟结果与试验结果高度一致, 验证了数值模型的准确性。工艺改进成效显著, 所得锻件质量优良, 完全满足实际生产需求。

关键词 铁路车辆; 钩舌锻件; 闭式模锻; 工艺优化; 成形缺陷

中图分类号 U260.34

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.02.024

Numerical Simulation Study and Process Optimization of Closed-die Forging for Coupler Knuckle

LI Li¹, MENG Fanxiang², TANG Zhenxing¹, ZHANG Haicang³, ZHANG Fujun⁴

(1. Mechanical and Electrical Equipment Branch, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China; 2. College of Materials Science and Engineering, Jilin University, 130022, Changchun, China; 3. Engineering Technology Center, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China; 4. Urban Transit Division, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062,

Changchun, China)

Abstract [Objective] To ensure that railway coupler knuckles meet strict mechanical performance requirements and to overcome the limitations of traditional casting and open-die forging processes in terms of forming quality and process complexity, it is aimed to explore a more efficient and quality-controlled manufacturing process. [Method] Taking the railway freight train coupler knuckle as research object, a closed-die forging process with a preforming transition is designed and implemented. The rigid-viscoplastic finite element method is used for an in-depth numerical simulation of the closed-die forging process to analyze potential defect types and temperature field distribution characteristics during the forging process. The specific impact of the initial preheating temperature of both the forging and the die on forming quality is studied, with the forging filling rate as the core evaluation criterion, and the optimized process parameters are obtained through numerical analysis. On this basis, the closed-die forging process is further refined by considering detailed metal flow characteristics and the specific locations and causes of forming defects during the forging process. A validation test is then conducted using the adjusted optimized process, followed by a comprehensive error analysis of the final forging. [Result & Conclusion] The optimized closed-die forging process significantly improves the forming quality of the forged coupler knuckle, with uniform overall deviation distribution, good filling, high surface smoothness, and no forming defects are observed. The numerical simulation results are highly consistent with the experimental results, confirming the accuracy of the numerical model. The process improvements are proved effective, yielding high-quality forgings that fully meet actual production requirements.

Key words railway vehicle; forged coupler knuckle; closed-die forging; process optimization; forming defect

车钩缓冲装置, 作为铁路运输系统中连接各车厢并传递载荷的核心组件, 其重要性不言而喻^[1]。特别是钩舌, 作为相邻车厢间唯一的接触与传力部

件,长期承受配对钩舌的强烈冲击与摩擦作用,极易导致裂纹萌生、变形累积及磨损加剧,进而引发失效,这对铁路运输的安全性构成了严峻挑战,同时也对钩舌的力学性能提出了更为严苛的标准。目前,钩舌的制造主要依赖于铸造或开式模锻工艺,然而,铸造钩舌在力学性能上表现不佳,使用寿命有限;而开式模锻则伴随着材料利用率低、精度控制难度大及工艺流程繁琐等问题。因此,深入探索钩舌的闭式模锻工艺显得尤为重要。

现有的研究大多聚焦于结构简单锻件的闭式模锻工艺,而对于钩舌这类结构复杂的大型锻件,相关研究则显得相对匮乏。例如,文献[2]利用 ANSYS 软件对轮毂轴承内圈的锻造过程进行了数值模拟,详细分析了锻件成形过程中的应力应变分布及模具载荷变化规律,并对上模芯的关键参数进行了深入探讨。文献[3]则通过 Deform 软件模拟了三通阀体的热锻模具充填过程,探究了冲头速度对锻件温度场的影响,以及坯料初始温度与模具最大成形载荷之间的关联,并据此确定了优化的工艺参数组合。此外,文献[4]采用 Deform-2D 软件对 TC17 钛合金叶盘的等温 β 模锻过程进行了数值模拟,分析了锻件的应变分布特征,并研究了工艺参数对叶盘各部位组织性能的具体影响规律。

本研究拟采用有限元数值模拟技术,针对铁道车辆钩舌的闭式模锻过程开展深入分析,旨在揭示金属流动规律及成形缺陷的产生机制,进而优化工艺参数,改进预成形设计,以期实现钩舌闭式模锻的无缺陷高质量成形。最终,将通过试验验证所提出工艺改进方案的实际效果与可行性。

1 闭式模锻工艺及有限元模型

钩舌锻件以其复杂的几何形状和多样的曲面特征而著称,整体结构由基本对称的头部与非对称的尾部构成。各部位截面尺寸变化显著,特别是钩舌内腕面呈现出高度的弯曲形态,局部结构间的过渡较为急促,且包含多个凸台结构,这些特点使得钩舌锻件的制造必须通过多道工序方能完成。针对此问题,本文提出了一种经一次预成形过渡的闭式模锻成形方法。该方法能显著降低工序道次,提高了生产效率。

钩舌的闭式模锻工艺属于热加工领域,其工艺特性使得刚粘塑性有限元方法成为模拟该过程的优选方案^[5]。在模拟过程中,采用了剪切摩擦因数

来描述金属坯料与模具之间的摩擦行为,具体的计算公式可参见文献^[6]。此外,由于金属坯料在成形过程中会与模具及外界环境发生热交换,导致温度场不断变化,这种温度变化对变形金属和模具的性能具有显著影响。因此,在模拟过程中必须考虑热传导的影响,其传热情况满足热对流和热辐射的第二、三类边界条件。有限元模型及初步预锻件示意图如图1所示。

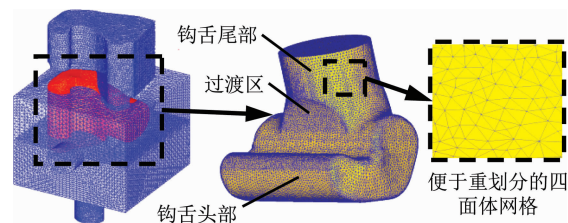


图1 有限元模型及初步预锻件示意图

Fig. 1 Diagram of finite element model and preliminary pre-forging parts

钩舌的终锻过程被视为一个大变形问题,在模拟过程中极易遭遇网格畸变现象,进而引发体积损失。鉴于此,本研究采用有限元软件 Deform-3D 对钩舌的终锻过程进行了详尽的模拟。模拟中,选用的单元类型为四面体单元。

预锻件的始锻温度设定为 $1\ 200\ ^\circ\text{C}$,其部件类型被定义为塑性体,采用的材料为 25MnCrNiMoA 型合金结构钢,相关的主要参数如表1所示^[7-8]。终锻模具则主要由上模、下模、冲头及反向冲头构成,材料选用 AISI-H-13 型模具钢,并预热至 $250\ ^\circ\text{C}$,其部件类型被定义为刚性体。

表1 25MnCrNiMoA 力学性能^[7-8]

Tab. 1 25MnCrNiMoA mechanical performance^[7-8]

材料	弹性模量/ MPa	泊松比	拉伸模量/ MPa	抗拉强度/ MPa	屈服极限/ MPa
25MnCrNiMoA	195	0.3	2×10^5	910	792

依据实际生产中的润滑条件,本研究将摩擦因数设定为 0.3。将环境温度保持在 $20\ ^\circ\text{C}$,环境与坯料、模具之间的热对流系数被设定为 $0.02\ \text{N}/(\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})$,而坯料与模具间的热传导系数则高达 $5\ \text{N}/(\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})$ 。在模拟中,冲头被定义为主模具,并在液压机的作用下以 $10\ \text{mm/s}$ 的恒定速度进行直线运动。

2 成形缺陷的数值模拟分析

2.1 铁道车辆钩舌的成形缺陷分析

针对闭式模锻工艺,充型不满、折叠及纵向毛

刺等缺陷时有发生,尤其在复杂锻件的制造过程中更为显著。鉴于此,系统研究钩舌锻件闭式模锻过程中缺陷的产生及其演变机制显得尤为重要。

图2为钩舌锻件的成形缺陷,展示了初步设计预成形件在终锻模拟完成后的缺陷分布情况。由图2 a)可知:在终锻件与模具型腔的接触状态中,阴影区域代表接触区域,而亮色区域(非阴影区)则指示了充型不满的缺陷。特别是在钩舌尾部的上、下承载台以及钩锁承台区域,出现了多处程度不同的充型不满现象,其中承载台处的缺陷尤为明显。图2 b)表明:在钩舌头部充型完成后,随着冲头的持续挤压,其端面边缘产生了多处纵向毛刺缺陷。

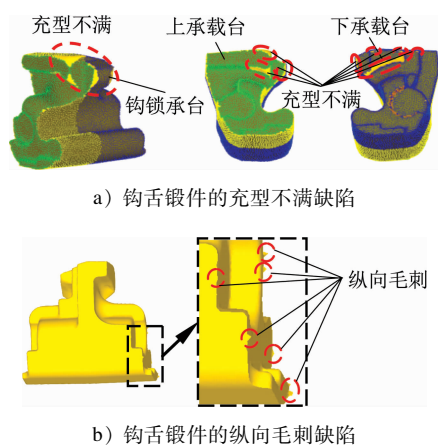


图2 钩舌锻件的成形缺陷

Fig. 2 Forming defects of forged coupler knuckle

图3为终锻过程中缺陷产生前的金属流动情况。经观察发现,在分析步300和分析步313阶段,钩舌头部区域已基本充满,而钩舌尾部则继续填充。随着冲头的持续下压,金属不仅流向钩舌头部模具型腔的角隙区域,还开始向钩舌肩部和尾部流动。至分析步323时,钩舌肩部已完全充满,多余的金属在冲头的挤压作用下,一部分继续流向钩舌尾部未完全填充的型腔角隙;另一部分则因流动阻力与模锻力的共同作用,流向冲头与上模之间的间隙,从而形成纵向毛刺,如图3 d)所示。

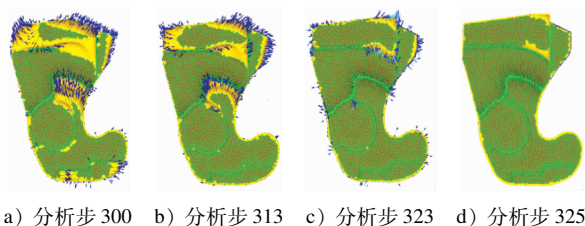


图3 终锻过程金属流动情况

Fig. 3 Metal flow in the final forging process

究其本质,充型不满与纵向毛刺的产生主要归因于初始预锻件的体积分配不当,导致终锻过程中金属流动不充分。具体而言,预锻件尾部的金属分配不足,而其他区域的金属流入受阻,从而引发充型不满;同时,预锻件头部的金属分配过剩,多余金属未能有效流向其他区域,而是在模锻力的作用下形成纵向毛刺。

2.2 铁道车辆钩舌的温度场分析

为避免过热、过烧等问题的前提下,锻件的温度对其金属的流动能力具有显著影响。终锻模拟结束时,锻件的温度场分布如图4所示。总体而言,锻件各部分的温差较大。高温区域主要集中在钩舌尾部、肩部,这主要是由于这些区域与模具型腔的接触时间较晚,热量损失相对较少。此外,钩锁承台与承载台等区域因存在充型不满缺陷,锻件与模具型腔未充分接触,导致温度较高,最高温度可达约1 100 ℃。相比之下,钩舌头部区域的温度较低,最低温度为598 ℃。这是由于钩舌头部的S面、钩舌背部与模具的接触时间较早,接触面积较大,热传导速度快,因此温度显著降低。同时,钩舌头部两个端面上的温差较大,这是由于钩舌锻件的上端面首先与冲头接触,且接触时间较长所致。

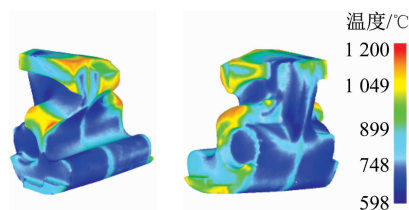


图4 锻件的温度场分布

Fig. 4 Temperature field distribution of forging

3 工艺参数优化及成形试验

为有效控制钩舌闭式模锻工艺的成形缺陷,需对其工艺参数进行优化。金属坯料初始预热温度是热成形中的重要工艺参数,对锻件的成形质量有着较大影响,参考25MnCrNiMoA的可锻温度范围,选定初始预热温度为800 ℃、900 ℃、1 000 ℃、1 100 ℃及1 200 ℃。不同的锻件初始预热温度下的接触面积如图5所示。

由图5可知,锻件的填充能力受金属初始预热温度影响显著,随着预热温度增加,锻件与模具型腔的接触面积不断增大,且增大的幅度也越来越高。当温度提升至1 200 ℃时,接触面积比800 ℃

时提升了2%左右,主要原因是随着金属坯料的预热温度不断升高,金属变形抗力降低,流动性显著提高。

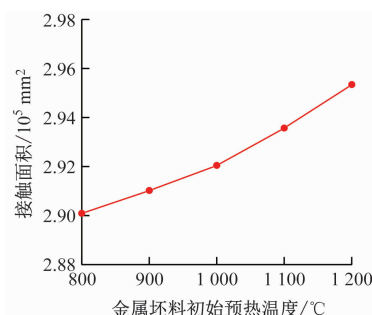


图5 不同的锻件初始预热温度下的接触面积

Fig. 5 Contact area at different forging initial preheating temperatures

合理的模具预热温度可以削弱锻件与模具间的传热作用,降低锻件表面与内部温差,利于金属流动,降低关键部位的应力集中^[9]。图6为不同的模具初始温度下的接触面积。由图6可知,随着模具预热温度的提高,锻件的充型能力也随之提高,但充型能力对温度的敏感度逐渐降低。模具温度由200℃提升至300℃,锻件的填充能力提升0.34%。当模具的温度达到300℃以上时,随着模具温度的继续提升,填充能力提升逐渐趋于平稳,提升幅度仅为0.10%。

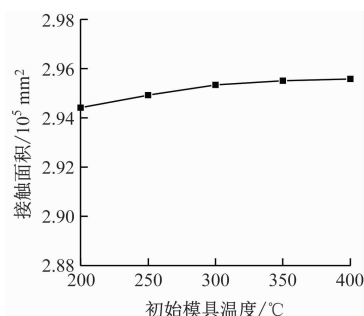
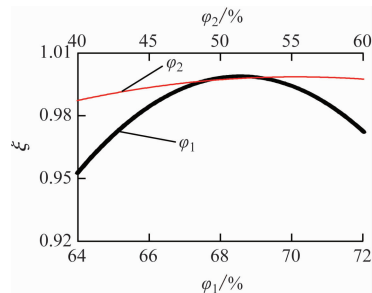


图6 不同的模具初始温度下的接触面积

Fig. 6 Contact area at different initial die temperatures

确定合理的工艺参数后,为实现钩舌锻件的无缺陷成形,需要进一步进行工艺调整,导致成形缺陷的最根本原因是预锻件的结构设计与终锻件不相匹配,终锻件结构固定,故须对预成形工艺进行修正以抑制成形缺陷的产生。

预成形改进模拟结果,锻件填充率随单个变量的变化情况如图7所示。



注:ξ—锻件填充率,ξ=1时,完全充型;φ₁—预锻件头部体积与预锻件体积之比;φ₂—预锻件尾部体积与除预锻件头部以外其余部分总体积之比。

图7 锻件填充率随单个变量的变化情况

Fig. 7 Variation of forging filling rate with single variable

基于钩舌锻件充型不满缺陷的形成机理对预锻件头、尾及过渡区的体积进行重新分配。其中, $\varphi_1 = V_{\text{头}}/V_{\text{总}}$, $\varphi_2 = V_{\text{尾}}/(V_{\text{总}} - V_{\text{头}})$,以锻件完全充满模具型腔为目标函数,确定预锻件最佳体积分布 $V_{\text{头}}:V_{\text{尾}}:V_{\text{过渡}} = 0.69:0.17:0.14$ 。

预成形工艺改进后的模拟结果,如图8所示。

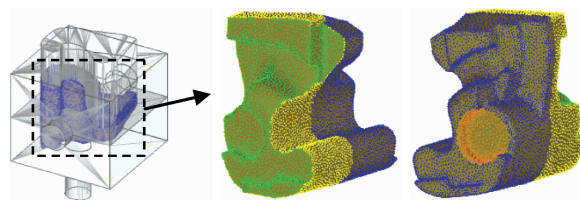


图8 预成形工艺改进后的模拟结果

Fig. 8 Simulation result of improved preforming process

图8为预成形工艺改进后的模拟结果,成形件质量良好,铁道车辆钩舌的钩锁承台、上下承载台及钩舌的各细小结构处金属填充良好,轮廓清晰,细节结构饱满,无缺陷产生。

为验证预成形工艺改进方案的可行性,对经优化的钩舌预锻件实施了试验,并采用 Geomagic Qualify 软件对试验所得样本进行了误差分析。图9为工艺优化后的钩舌成形件及整体形状误差分布。由图9可知:试验样本的误差范围整体介于0~4.0 mm之间,整个锻件表面未出现负偏差现象(即不存在充型不足缺陷);超过95%的区域误差处于0.4~3.3 mm的区间内;锻件整体误差分布呈现均匀性,填充状况良好,表面光滑无折叠缺陷,显示出较高的成形质量,且数值模拟结果与实际情况相符。

钩舌锻件的公差及机械加工余量依据国家标准 GB/T 12362—2003《钢质模锻件公差及机械加工余量》设定为普通级,试验样本表面的误差分布完

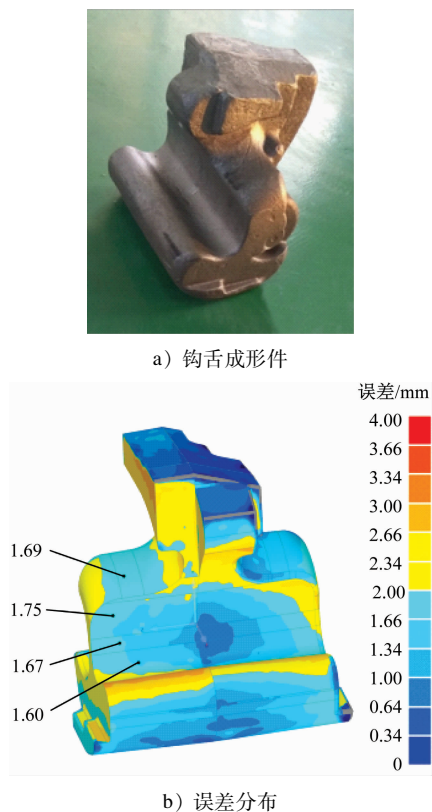


图9 钩舌成形件及整体形状误差分布

Fig.9 Forged coupler knuckle and overall shape error distribution

全符合公差规定。实施预成形工艺改进后,锻件质量表现优异,各类缺陷得到有效控制。

4 结语

1) 已明确界定钩舌锻件成形过程中的缺陷形成、金属流动特性及温度场分布机制,并基于锻件填充完整性的最大化作为目标函数,完成了工艺参数的优化工作,最终确定金属坯料及模具的初始预热温度分别为 $1\ 200\ ^\circ\text{C}$ 和 $300\ ^\circ\text{C}$ 。

2) 依据终锻阶段缺陷形成的机理及金属流动规律,对预锻件结构进行了调整。经过改进的预成形工艺,在终锻模拟中未观察到成形缺陷的产生。

3) 实施了钩舌锻件的成形试验,并获取了终锻试验件的整体误差分布数据。试验结果显示,数值模拟结果与实际情况高度一致,钩舌锻件的误差处于规定范围内,成形质量优异,符合既定的工艺标准。

参考文献

[1] 周恩惠,高峰. 铁路货车车钩及缓冲装置[J]. 铁道知识,

2017(3): 54.

ZHOU Enhui, GAO Feng. Railway freight car coupler and buffer device[J]. Railway Knowledge, 2017(3): 54.

[2] 李楠. 基于 ANSYS 轮毂轴承内圈锻造数值模拟分析[J]. 煤矿机械, 2019, 40(10): 172.

LI Nan. Numerical simulation analysis of forging of hub bearing inner ring based on ANSYS[J]. Coal Mine Machinery, 2019, 40(10): 172.

[3] 赵洁,闫洪波,侯永亮. 基于 Deform 的三通阀体热锻成形工艺优化[J]. 热加工工艺, 2019, 48(21): 96.

ZHAO Jie, YAN Hongbo, HOU Yongliang. Optimization of hot forging process for three-way valve body based on deform[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(21): 96.

[4] 王波伟,唐军,曾卫东,等. TC17 合金整体叶盘等温锻造过程数值模拟及工艺参数影响[J]. 锻压技术, 2017, 42(6): 7. WANG Bowei, TANG Jun, ZENG Weidong, et al. Influence of process parameters and numerical simulation on isothermal forging for integral blisk of alloy TC17[J]. Forging & Stamping Technology, 2017, 42(6): 7.

[5] 马琳伟,孙乐民,张巧芳,等. 数值模拟在锻造成形中的应用[J]. 锻压装备与制造技术, 2003, 38(6): 9.

MA Linwei, SUN Lemin, ZHANG Qiaofang, et al. Application of numerical simulation in metal forging [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2003, 38(6): 9.

[6] 罗善明,方媛. 弧齿锥齿轮精锻成形工艺的数值模拟[J]. 中国机械工程, 2009, 20(4): 485.

LUO Shanming, FANG Yuan. Numerical simulation on precision forging of spiral bevel gears[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(4): 485.

[7] XU J Y, JU H, TAO C G, et al. Analysis on the fracture of 17-type coupler[J]. Foundry, 2012, 61(11): 1358.

[8] YU S J, JING L S, WU J M, et al. Improvement on casting process and production practices in railway passenger train with tight lock couplers[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2014(6): 10.

[9] 戴护民,金俊松. 工艺参数对液压活塞缸套温锻质量的影响[J]. 热加工工艺, 2019, 48(17): 96.

DAI Humin, JIN Junsong. Influence of process parameters on warm forging quality of hydraulic piston cylinder liner[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(17): 96.

· 收稿日期:2024-08-05 修回日期:2024-09-05 出版日期:2025-02-10

Received:2024-08-05 Revised:2024-09-05 Published:2025-02-10

· 第一作者:李丽,工程师,lili43131125@163.com

通信作者:孟凡响,助理实验师,15844800002@163.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license