

热轧 H 型钢冷却过程残余应力数值模拟及雾化冷却优化



黄振洋, 曾伟杰, 阮文俊, 徐颖, 李红斌*

华北理工大学冶金与能源学院, 河北唐山 063210

摘要: H 型钢断面呈“工”字形, 空冷时腹板与翼缘冷却速率差异较大, 易在截面内产生较大的残余应力, 影响构件的尺寸精度与承载能力。为探究残余应力的形成规律及翼缘雾化冷却的调控效果, 以 Q235B 热轧 H 型钢为研究对象, 采用 SolidWorks 建立三维几何模型, 并基于 Abaqus 平台建立热-力耦合有限元模型。模拟了自然空冷以及翼缘外表面对流换热系数分别为 $100\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 和 $150\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 两种雾化冷却工况下的温度场演变与残余应力分布。结果表明: 自然空冷条件下, 冷却速度较慢, 最大残余应力约为 98MPa , 主要集中在翼缘与腹板交接处, 腹板中部残余应力约为 16MPa ; 采用翼缘雾化冷却后, 冷却效率明显提高, 温度场分布更加均匀, 残余应力大幅降低——当换热系数为 $100\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 时, 最大残余应力降至 0.1114MPa ; 当换热系数提高至 $150\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 时, 进一步降至 0.0591MPa 。无论何种冷却方式, 残余应力均在冷却初期 (前 3000s) 温度变化最剧烈的阶段出现剧烈波动, 当温度降至 $300\sim 400^\circ\text{C}$ 后逐渐趋于稳定。综合考虑冷却效率与残余应力控制, 建议雾化冷却的换热系数控制在 $50\sim 200\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 范围内。研究结果可为热轧 H 型钢控冷工艺优化提供理论依据。

关键词: 热轧 H 型钢; 残余应力; 雾化冷却; 数值模拟; 温度场

DOI: 10.57237/j.mater.2026.01.001

Numerical Simulation of Residual Stress and Atomization Cooling Optimization for Hot-Rolled H-Beam

Huang Zhenyang, Zeng Weijie, Ruan Wenjun, Xu Ying, Li Hongbin*

College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China

Abstract: The I-shaped cross-section of hot-rolled H-beam leads to a significant difference in cooling rate between the web and flange during air cooling, which tends to generate large residual stress within the section, affecting the dimensional accuracy and load-bearing capacity of the member. To investigate the formation mechanism of residual stress and the control effect of flange atomization cooling, Q235B hot-rolled H-beam was taken as the research object. A three-dimensional geometric model was established using SolidWorks, and a thermo-mechanical coupled finite element model was built on the Abaqus platform. The temperature field evolution and residual stress distribution under natural air cooling and two atomization cooling conditions (with convective heat transfer coefficients of $100\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ and $150\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$)

基金项目: 华北理工大学大学生创新创业训练计划项目 (No. X2024106)

*通信作者: 李红斌, lihongbinxp@126.com

收稿日期: 2026-06-19; 接受日期: 2026-06-22; 在线出版日期: 2026-07-20

<http://www.materialsrd.com>

on the flange surface) were simulated. The results show that under natural air cooling, the cooling rate is relatively low, the maximum residual stress is about 98 MPa, mainly concentrated at the junction of the flange and web, and the residual stress in the middle of the web is about 16 MPa. After adopting flange atomization cooling, the cooling efficiency is significantly improved, the temperature field becomes more uniform, and the residual stress is greatly reduced. When the heat transfer coefficient is $100 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, the maximum residual stress drops to 0.1114 MPa; when it is increased to $150 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, it further decreases to 0.0591 MPa. Regardless of the cooling method, the residual stress fluctuates most severely during the initial cooling stage (the first 3000 s) when the temperature changes most drastically, and gradually stabilizes after the temperature drops to $300\text{--}400^\circ\text{C}$. Considering both cooling efficiency and residual stress control, it is recommended to control the heat transfer coefficient of atomization cooling in the range of $50\text{--}200 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. The research results can provide a theoretical basis for optimizing the controlled cooling process of hot-rolled H-beam.

Keywords: Hot-rolled H-beam; Residual Stress; Atomization Cooling; Numerical Simulation; Temperature Field

1 引言

在“双碳”战略背景下，钢铁行业正加快向绿色化、智能化方向转型升级。热轧 H 型钢作为一种高效经济断面钢材，具有截面模数大、承载能力强、自重轻和节约金属材料等优点，被广泛应用于工业厂房、高层建筑及桥梁工程等[1]。

热轧 H 型钢断面结构复杂，其控轧控冷工艺的发展相较于带钢、棒材等简单断面钢材相对滞后。周剑波等开发了热轧 H 型钢快速冷却技术，提高了产品性能和生产效率[2]；郭星晔等通过热力耦合模拟研究了大型 H 型钢轧制过程中的温度场与变形行为，为 H 型钢缺陷控制提供了理论依据[3]；崔海伟等研究了控轧控冷工艺对 H 型钢组织性能的影响[4]；贾玉萍等提出在线气雾控冷技术，认为强化冷却能够改善组织均匀性并提高力学性能[5]；谈群峰等进一步研究了热轧 H 型钢控制冷却工艺，指出合理调节不同部位冷却强度有利于改善产品质量[6]。

目前热轧 H 型钢轧后冷却主要采用空气冷却工艺，由于翼缘与腹板厚度不同，各部位冷却速度存在明显差异，容易形成较大的温度梯度和热应力，从而导致残余应力积累以及冷却变形等[7, 8]。

随着有限元技术的发展，数值模拟已成为研究热轧 H 型钢冷却过程的重要方法。刘巧等采用有限元方法研究了 H 型钢控制冷却过程中的温度场及热应力演化规律，结果表明温度梯度是影响热应力形成的重要因素。王新宇等利用有限元方法分析了换热系数对 H 型钢冷却变形行为的影响[9]；刘辰昊等总结了重型热轧 H 型钢材料性能与残余应力研究进展，指出温度梯度是影响残余应力形成的重要因素之一[10]；裴暖暖等

开展了 H 型钢全轧程数值模拟研究[11]；赵宪明等研究了超快冷条件下 H 型钢的冷却变形行为[12]。

然而，由于 H 型钢尺寸较大且残余应力形成机理复杂，其内部残余应力难以通过实验方法进行准确测量和定量表征[13, 14]。因此，采用数值模拟方法研究冷却过程中温度场与残余应力场的演化规律具有重要意义。本文以 Q235B 热轧 H 型钢为研究对象，建立热—力耦合有限元模型，研究不同翼缘换热条件下温度场和残余应力场的变化规律，为热轧 H 型钢控冷工艺优化提供理论参考[15, 16]。

2 数值模型与研究方法

2.1 几何模型建立

根据实际热轧 H 型钢尺寸建立三维实体模型。模型长度为 1000 mm，翼缘宽度 150 mm，翼缘厚度 10 mm，腹板厚度 7 mm。采用 SolidWorks 完成建模，并导入 Abaqus 后续计算分析。模型示意图如图 1 所示。

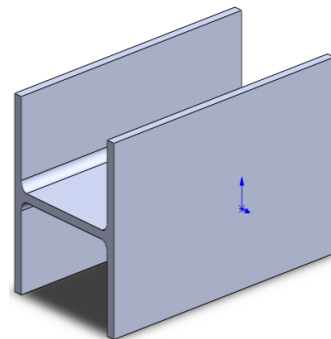


图 1 H 型钢建模示意图

2.2 材料参数设置

材料选用工程中常用的 Q235B 钢。其密度、热导

率、弹性模量、屈服强度、比热容、热膨胀系数等随温度变化的参数如表 1 所示。

表 1 Q235B 钢力学性能随温度变化

温度 $t/^{\circ}\text{C}$	密度 $\rho \times 10^{-9}/\text{t}\cdot\text{mm}^3$	热导率 $\lambda/\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	弹性模量 $E \times 10^{-5}/\text{MPa}$	泊松比 ν
20	7.85	51.9	2.14	0.270
200	7.78	46.1	2.08	0.264
400	7.72	41.0	2.06	0.266
500	7.68	37.5	2.12	0.264
700	7.61	30.6	2.13	0.269
850	7.66	25.5	2.13	0.250

温度 $t/^{\circ}\text{C}$	屈服强度 σ_s/MPa	塑性应变 ε	比热容 $Q \times 10^{-9}/\text{mJ}/(\text{t}\cdot^{\circ}\text{C})$	热膨胀系数 $\alpha \times 10^5/1/\text{K}$
20	334.0	0	5.02	1.15
200	343.0	0.004	5.40	1.25
400	358.3	0.008	5.80	1.40
500	316.4	0.012	6.20	1.48
700	323.0	0.012	8.50	1.18
850	338.0	0.016	7.50	1.36

2.3 网格划分与边界条件

采用 Abaqus 软件进行热-力耦合数值模拟。网格类型为 C3D8RT(八节点热力耦合六面体单元,缩减积分),网格尺寸 5mm。模型网格如图 2 所示。求解策略:首先进行温度场模拟,获得冷却过程中温度随时间的变化规律;然后将温度场结果作为载荷进行热应力分析,获得残余应力分布及大小。

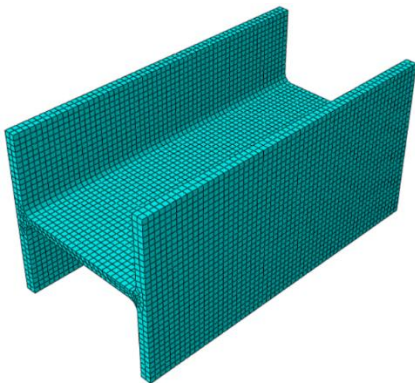


图 2 网格划分示意图

2.4 冷却工况设计

初始工件温度设为 850℃(模拟热轧后温度),环境温度设为 20℃,模拟总时长为 9000s。设置三种对况:

- (1) 自然空冷, 换热系数 15W/(m² K);
- (2) 翼缘雾化冷却, 换热系数 100W/(m² K);
- (3) 翼缘雾化冷却, 换热系数 150W/(m² K)。

通过比较不同工况下温度场与残余应力场变化规律,分析翼缘换热强度对残余应力的影响。

3 结果

3.1 温度场演变规律

自然空冷条件下,H 型钢整体降温过程较为缓慢,在模拟时间达到 5000s 左右时,温度下降至 60℃附近。由于冷却主要依靠空气自然对流,热量散失速度有限,因此整体冷却时间较长。

采用翼缘雾化冷却后,试样降温速度明显加快。当换热系数为 100W/(m² K)时,达到相同温度所需时间约为 4000s;当换热系数增加至 150 W/(m² K)时,冷却时间进一步缩短至 3300s 左右。说明提高翼缘区域换热能力能够增强热量向外传递的速度,从而缩短冷却周期。

从温度场分布情况来看,冷却初期翼缘区域温度下降较快,而腹板区域由于厚度较薄且受周围热量传导影响,降温速度相对较慢,因此截面内部会出现一定的温度差异。随着冷却过程持续进行,各区域温度逐渐接近,最终趋于一致。

3.2 残余应力分布特征

图 3~图 5 分别给出了自然空冷以及两种雾化冷却工况下的残余应力分布情况。

自然空冷时,较大的残余应力主要出现在翼缘与腹板连接位置,最大残余应力约为 98 MPa,而腹板中

部应力水平相对较低, 仅为 16 MPa 左右。这是因为不同部位冷却速度存在差异, 在冷却收缩过程中产生了不协调变形, 从而形成应力集中现象。

在翼缘区域施加雾化冷却后, 应力分布状态发生了明显变化。当换热系数为 $100 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ 时, 最大残余应力下降至 0.1114 MPa; 换热系数提高至 $150 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$

后, 最大残余应力进一步降低至 0.0591 MPa。与此同时, 高应力区域范围也明显缩小, 应力分布较自然空冷更加均匀。

从整体变化趋势来看, 雾化冷却能够改善冷却过程中温度分布不均的问题, 从而减弱由热收缩差异引起的应力集中现象, 对降低残余应力具有积极作用。

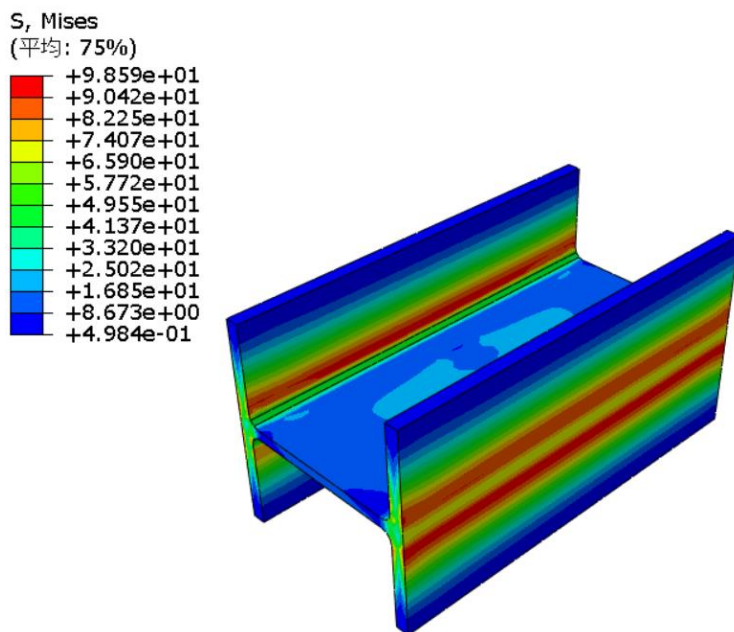


图 3 空冷状态残余应力分布图

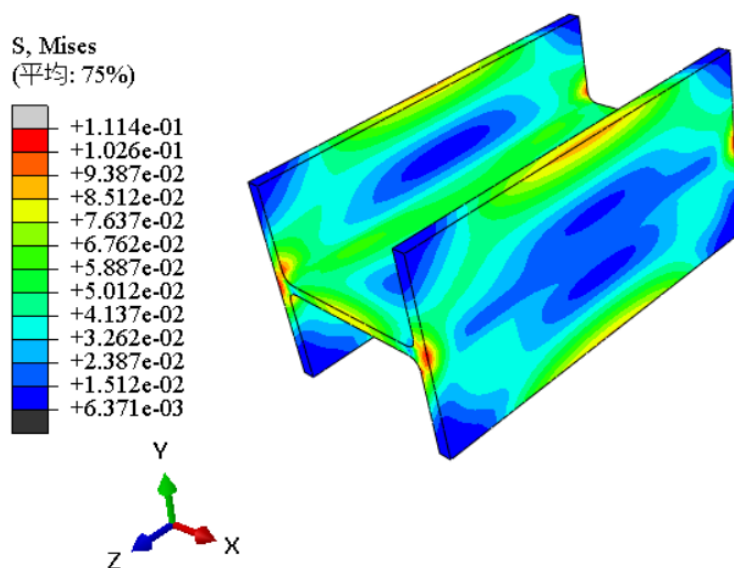


图 4 第 1 组雾化冷却状态下残余应力分布图

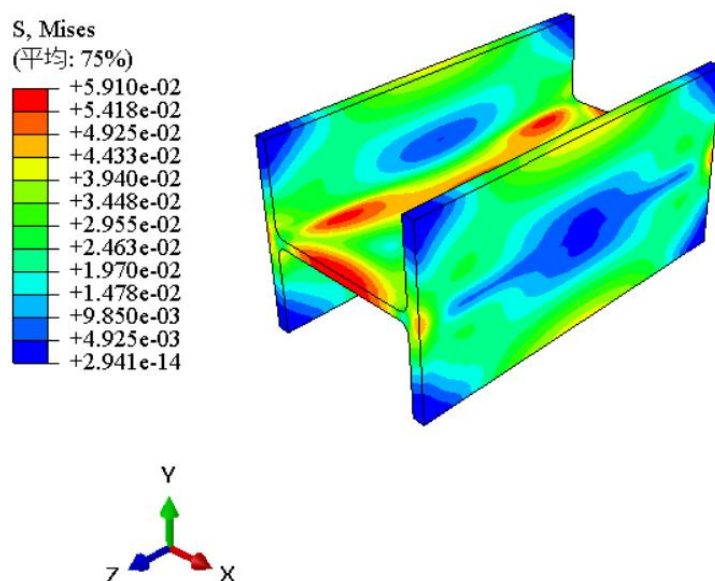


图5 第2组雾化冷却状态下残余应力分布图

3.3 残余应力随温度变化规律

温度梯度是影响残余应力形成的重要因素。图6给出了自然空冷状态下残余应力与温度随时间的变化曲线。冷却初期温度下降较快,不同区域热收缩程度差异明显,应力迅速积累。在前3000s内,温度下降剧烈,残余应力急剧升高并出现波动;当温度降至约400°C后,

温度变化趋缓,热收缩趋于一致,残余应力逐渐减小并趋于稳定。雾化冷却工况下呈现相似规律,且换热系数越大,前期残余应力变化越剧烈。图7和图8分别给出了雾化冷却工况1和工况2下残余应力与温度随时间的变化曲线。

结果表明,合理控制翼缘区域换热强度能够减小截面温差,从而有效降低残余应力水平。

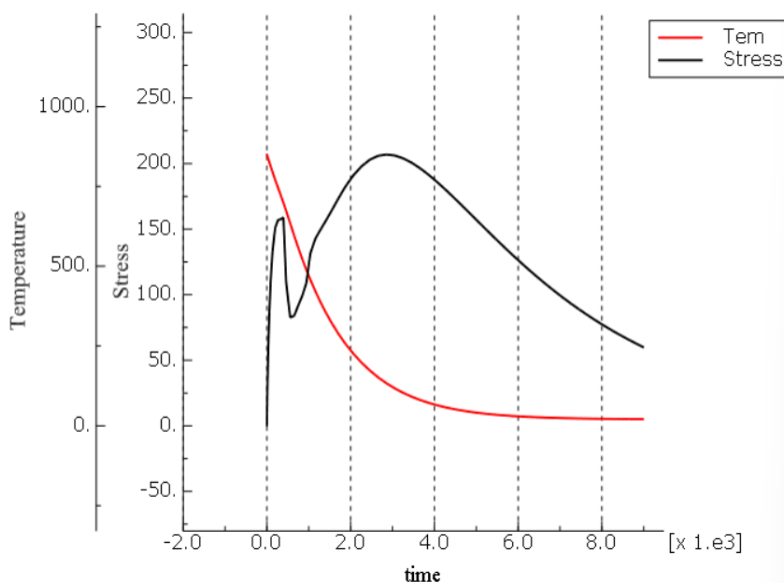


图6 空冷状态下残余应力和温度随时间变化曲线

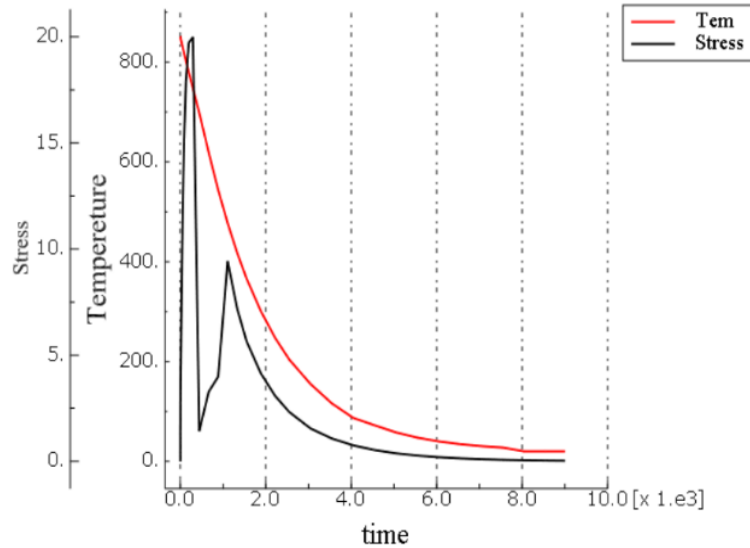


图 7 雾化冷却下应力和温度随时间变化曲线

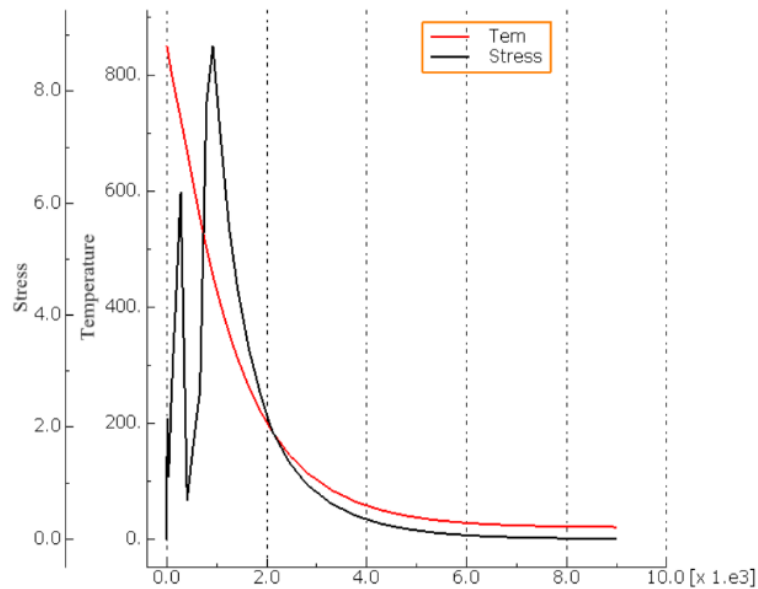


图 8 雾化冷却应力、温度随时间变化曲线 2

4 讨论

通过对不同冷却工况的模拟结果进行比较可以发现，翼缘区域对 H 型钢整体冷却行为具有较大影响。由于翼缘和腹板在几何尺寸上存在差异，两者在冷却过程中散热条件并不完全一致，因此容易形成温度梯度。温度梯度越大，各区域热收缩差异越明显，残余应力也越容易产生。刘巧等研究表明，在 H 型钢翼缘外侧和内侧 R 角部位实施喷雾冷却，可获得较均匀的温度场，残余热应力显著降低[17]。李静等研究发现，在快速冷

却条件下，翼缘区域由于冷却速度差异容易产生附加变形和应力集中现象[18]。马劲红等针对 H 型钢轧后冷却过程开展研究，指出喷雾冷却强度变化会导致截面温差发生改变，从而影响热应力分布[19]。

本文模拟结果显示，在自然空冷条件下，翼缘与腹板连接位置出现了较明显的应力集中现象，而采用雾化冷却后，应力水平整体下降。这说明适当增强翼缘区域散热能力，能够改善截面温度分布状态，从而减弱应力集中。朱国明等的研究也指出，通过翼缘外侧强制冷却以及改善终轧断面温度分布，可以有效降低 H 型钢腹板压应力和整体残余热应力水平[20]。

另一方面,冷却强度并非越大越好。如果局部区域降温过快,也可能产生新的温差,从而影响最终应力分布。因此,在实际生产过程中需要结合产品规格、设备能力以及性能要求,对冷却参数进行合理调整,以获得较好的控冷效果。

总体来看,采用翼缘雾化冷却是一种较为有效的残余应力控制方法,对提高热轧 H 型钢产品质量具有一定参考价值。

5 结论

- (1) 自然空冷条件下,热轧 H 型钢最大残余应力约为 98 MPa, 主要分布在翼缘与腹板连接区域;腹板中部应力相对较小,约为 16MPa。
- (2) 采用翼缘雾化冷却后,残余应力明显减小。当换热系数分别为 $100\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 和 $150\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 时,最大残余应力分别降至 0.1114MPa 和 0.0591MPa, 应力分布均匀性有所改善。
- (3) 冷却过程中残余应力的形成与温度变化密切相关。温度快速下降阶段是残余应力增长最明显的时期,当温度降低至 $300\sim 400^\circ\text{C}$ 后,应力逐渐趋于稳定。
- (4) 在本研究设定条件下,适当提高翼缘区域换热能力有助于降低残余应力水平,对热轧 H 型钢冷却工艺优化具有一定参考意义。

参考文献

- [1] 李同敬. 热轧 H 型钢的轧制及其工程应用 [J]. 冶金与材料, 2018, 38(5): 130-132.
- [2] 周剑波, 郭新文, 吴杰. 热轧 H 型钢快速冷却技术开发与应用 [J]. 山西冶金, 2025, 48(10): 186-188.
<https://doi.org/10.16525/j.cnki.cn14-1167/tf.2025.10.065>
- [3] 郭星晔, 朱国明, 吕超, 等. 大型 H 型钢轧制热力耦合模拟及腹板波浪分析 [J]. 中国冶金, 2013, 23(3): 26-32.
<https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn1006-9356.2013.03.001>
- [4] 崔海伟, 李杨齐. 热轧 H 型钢控轧控冷工艺技术 [J]. 轧钢, 2025, 42(02): 101-108.
<https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn1003-9996.20250214>
- [5] 贾玉萍, 吴迪, 郭娟, 等. 热轧 H 型钢的在线控冷 [J]. 钢铁, 2006, (7): 45-48.
<https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.2006.07.011>
- [6] 谈群峰. 热轧 H 型钢控制冷却工艺研究 [J]. 山西冶金, 2021, 44(1): 38-39+65.
<https://doi.org/10.16525/j.cnki.cn14-1167/tf.2021.01.11>
- [7] 朱国明, 康永林, 马光亭. 热轧大型 H 型钢残余应力相关研究 [J]. 塑性工程学报, 2010, 17(5): 88-92.
- [8] 郭喜平, 李银平, 冯云鹏. 大型 H 型钢矫后残余应力分析与检测研究 [J]. 机械设计与制造, 2015, (12): 115-117+121.
<https://doi.org/10.19356/j.cnki.1001-3997.2015.12.033>
- [9] 王新宇, 邱春林. 腹板换热系数对 H 型钢冷却后变形的影响 [J]. 轧钢, 2023, 40(1): 65-71+84.
<https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn1003-9996.20230111>
- [10] 刘辰昊, 赵华田, 施刚, 等. 重型热轧 H 型钢材料性能与残余应力研究进展 [J]. 工业建筑, 2025, 55(8): 32-38.
- [11] 裴暖暖, 朱国明, 李波, 张思勋 & 康永林. (2014). 小型 H 型钢全轧程数值模拟及斜轧孔型轧制力模型研究. 轧钢, 31(02), 25-30.
<https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn1003-9996.2014.02.008>
- [12] 赵宪明, 郭飞, 王丽娜, 等. 超快冷对 H 型钢冷却变形的影响 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2012(7): 40-43.
- [13] 冯岩青, 吴娟, 王厚昕, 等. 热轧 H 型钢腹板裂纹周围异质颗粒形成规律研究 [J]. 包钢科技, 2023, 49(01): 50-54.
<https://doi.org/10.13647/j.cnki.btgkj.2023.01.005>
- [14] 陈昊, 周锋, 陈晓明. 重型热轧 H 型钢力学性能与残余应力分布研究 [J/OL]. 建筑钢结构进展, 1-13 [2026-03-29].
<https://doi.org/10.13969/j.jzgjgiz.20250909004>
- [15] 丁发兴, 余志武, 温海林. 高温后 Q235 钢材力学性能试验研究 [J]. 建筑材料学报, 2006, (02): 245-249.
- [16] 王李生, 张文满, 谢石峰, 等. 控冷工艺对高强 H 型钢力学性能及外形影响 [J]. 四川冶金, 2025, 47(5): 21-25.
- [17] 刘巧, 臧勇, 秦勤, 等. H 型钢控制冷却过程的温度变化及热应力分析 [J]. 冶金设备, 2008, (1): 17-20+28.
- [18] 李静, 石雷, 张丽娜, 等. 高强热轧 H 型钢轧后快速冷却翼缘变形的成因分析与改进 [J]. 安徽冶金科技职业学院学报, 2024, 34(4): 33-34.
- [19] 马劲红, 姚晓晗, 陶彬, 等. H 型钢轧后冷却对热应力的影响 [J]. 热加工工艺, 2014, 43(13): 121-123.
<https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.2014.13.010>
- [20] 朱国明, 康永林, 陈伟, 等. 降低 H 型钢残余热应力的三维有限元仿真分析 [J]. 轧钢, 2007, (4): 22-26.
<https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn1003-9996.2007.04.006>