

供冷轧低碳钢氧化铁皮形成因素分析及控制措施

Analysis of the Formative Factors and Control Measures of Oxide Scale on Low Carbon Steel for Cold Rolling

供稿|左远鸿, 栾崧琳, 由宇 / ZUO Yuanhong, LUAN Songlin, YOU Yu

内
容
导
读

供冷轧低碳类产品表面氧化铁皮缺陷是热轧生产过程中常见且重要的问题之一,也是困扰热轧工序的第一大质量难题。本文对供冷轧低碳类产品氧化铁皮成因进行深入探讨,结合本钢 2300 热轧机组实际情况,通过优化轧制温度、高压水除鳞压力、水嘴布置、冷轧拉矫延伸率等一系列关键参数,有效降低了供冷轧低碳钢表面氧化铁皮缺陷的发生概率。

冷轧低碳钢具有良好的成形性能,广泛用于汽车面板及结构件,随着钢铁行业市场竞争的加剧,汽车工业对冷轧低碳钢的表面质量要求越来越严,热轧产品的表面质量对冷轧成品的表面质量有重要影响,而氧化铁皮的生成是降低冷轧成品表面质量的重要原因之一。作为鞍钢集团的汽车板生产基地,为了提高冷轧成品在市场上的竞争力,本钢一直在努力提高冷轧板的表面质量。本钢 2300 热轧机组是重要的供冷轧钢产品生产线,其采用半连续式热轧带钢轧机,粗轧机组由 2 架高刚度、高压下、高速度的可逆式粗轧机 R1、R2 组成,同时配备全液压压下可互换的 2 台立辊轧机。在 R1 及除鳞机之间装配用于大减宽的定宽压力机,精轧机组由 F1~F7 七机架四辊精轧机串联布置组成,如图 1 所示。本文就本钢 2300 热轧线生产现状,对影响

供冷轧低碳钢的热轧产品表面氧化铁皮生成因素进行分析,并给出相应的优化措施,获得了良好效果,使氧化铁皮不良品率由最初的 0.20% 降低到 0.09%。

氧化铁皮成因分析

鉴于目前国内外对于氧化铁皮产生机理及结构研究比较成熟,这里不做赘述,本文主要结合本钢 2300 热轧机组现状对氧化铁皮缺陷成因进行分析。供冷轧低碳钢的热轧过程是利用高温高压下量,将板坯加工成钢带的压力加工过程,由于板坯温度高达 1110~1300 °C,高温加工过程中必然伴随氧化铁皮的生成。氧化铁皮根据生成的时机与环境,可分为一次氧化铁皮、二次氧化铁皮、三次氧化铁皮及四次氧化铁皮。其中,一次氧化铁皮为炉生氧化铁

作者单位:鞍钢集团本钢板材股份有限公司热连轧厂,辽宁 本溪 117000

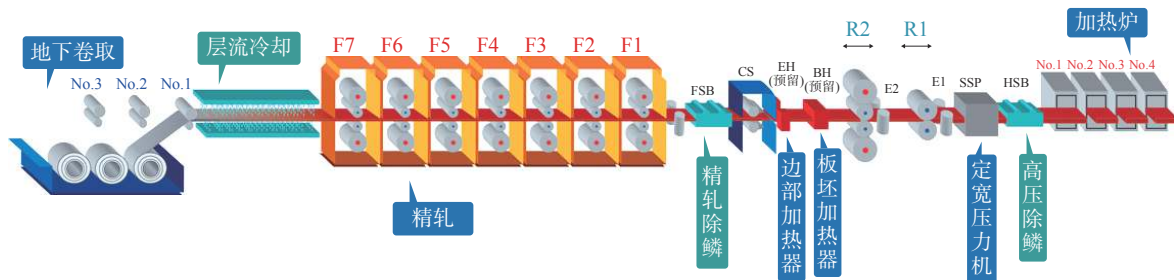


图1 2300线工艺布置示意图

皮，颜色多为黑色，形成温度为1100~1270℃，形成时间为2~4 h，厚度为1~3 mm，可由粗除鳞去除。二次氧化铁皮在粗轧区域形成，为一次氧化铁皮去除后钢板表面与空气接触后再次氧化生成的铁皮，多为红色，可由精除鳞去除。三次氧化铁皮在

精轧过程中形成，多为精轧内工作辊粗糙剥落，氧化铁皮压入导致。四次氧化铁皮为终轧后产生，是室温下钢板表面铁皮的最终状态，与终轧温度和环境温度有关，也与一、二、三次铁皮的遗传相关^[1]，氧化铁皮的产生过程如图2所示。

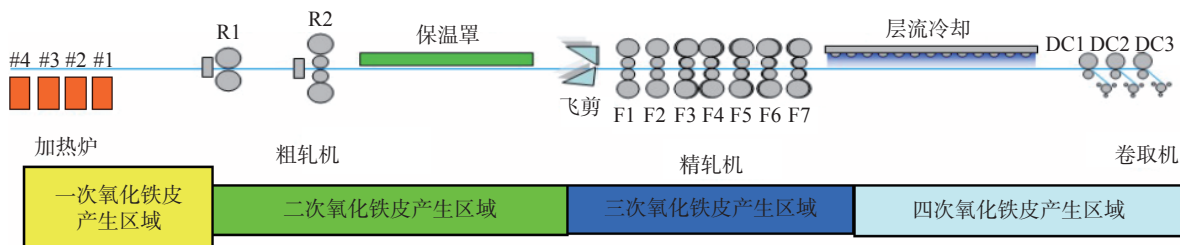


图2 2300线氧化铁皮产生区域示意图

出炉温度影响

出炉温度是热轧的核心工艺，也是影响氧化铁皮的主要因素之一，对供冷轧低碳钢不同出炉温度下的氧化铁皮厚度进行测量。选出炉温度为1230和1200℃的供冷轧产品各1卷，沿板宽等间距截取7个试样，每个试样选取3个点测量氧化铁皮层厚度。出炉温度为1230℃产品的7个试样平均氧化铁皮厚度9.3 μm，出炉温度1200℃产品的7个

试样平均氧化铁皮厚度7.0 μm，平均铁皮厚度相差2.3 μm，试样在不同出炉温度下氧化铁皮形貌如图3所示。氧化铁皮的生成过程是一个铁与氧的相对扩散过程，高温有利于加快扩散，在同样的加热时间下，会使氧化铁皮更厚。结合检验结果分析，出炉温度越低，钢坯表面与高温炉气氧化反应生成的一次氧化铁皮越薄，最终成品带钢表面铁皮厚度越薄，更有利于酸洗去除氧化铁皮过程^[2]。

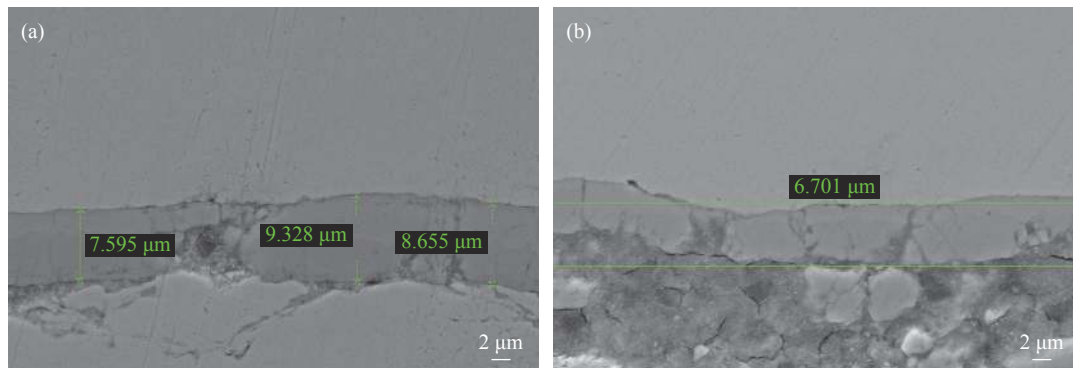


图3 不同出炉温度试样氧化铁皮厚度示意图: (a) 1230℃; (b) 1200℃

炉内气氛影响

通过对 2022 和 2023 年的铁皮缺陷数据统计分析, 本钢 2300 热轧机组发生氧化铁皮缺陷的低碳钢卷主要集中于轧制周期前端, 尤其是轧制周期的 1.2 km 以内, 轧制周期内氧化铁皮缺陷情况如图 4 所示。随着钢卷在轧制周期内所处位置向后端移动, 氧化铁皮缺陷率逐渐下降并趋于稳定。结合数据统计分析, 在轧制周期前端的钢卷, 因为换辊、点检设备等因素的影响, 在炉门附近停留的时间更长。统计表明: 轧制周期前端钢卷比轧制周期后端钢卷在炉门附近停留时间一般长 10~15 min, 虽然加热炉时刻保持微正压, 炉内形成还原性气氛, 但在出炉端炉门附近氧气含量仍然较高, 存在局部的“氧化性”气氛。距离炉门越近氧气含量越高, 高温板坯长时间与氧气接触得更充分, 表面氧化铁皮的厚度、结构和性质发生改变, 影响除鳞效果, 更容易导致氧化铁皮缺陷。

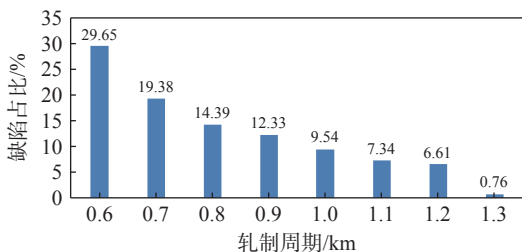


图 4 轧制周期内氧化铁皮缺陷占比

中间坯厚度影响

根据 2022 和 2023 年氧化铁皮缺陷与产品和中间坯厚度变化趋势的数据分析结果, 发现氧化铁皮缺陷主要集中于产品厚度 ≥ 4.0 mm, 即中间坯厚度 ≥ 40.0 mm。产品厚度 4.5 mm (中间坯厚度 40.0 mm) 氧化铁皮缺陷数量开始出现激增, 产品厚度 5.0 mm (中间坯厚度 46.0 mm) 氧化铁皮缺陷率最高, 如图 5 所示。随着产品厚度逐渐增加, 热轧中间坯厚

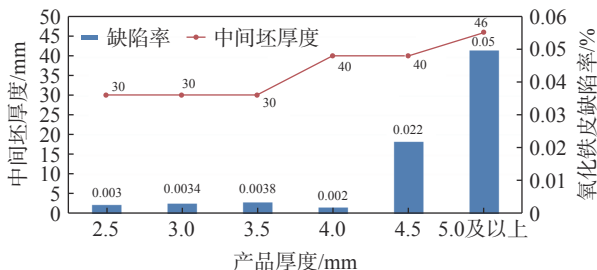


图 5 氧化铁皮缺陷与中间坯厚度变化趋势

度逐步增加, 在其它工艺不变的前提下, 中间坯厚度越厚, 板坯的热损失越小, 进入精轧前的温度越高, 促进高温下氧化铁皮的生成, 增加了精轧前除鳞难度, 因此中间坯厚度对二次氧化铁皮有间接影响。

除鳞能力的影响

高压水除鳞是利用高压水的机械冲击力来去除氧化铁皮, 主要涉及高压水射流的冲蚀和剥离作用, 以及热爆效应。高压水射流冲击板坯表面时, 由于基体和氧化铁皮层冷却收缩率不同而产生的剪切力, 以及水渗入基体材料和氧化铁皮之间产生的蒸汽膨胀爆裂, 使氧化铁皮快速从基体表面脱落。

高压水除鳞作为最直接去除氧化铁皮的工艺, 除鳞能力与产品表面质量存在最直接的关系。热轧除鳞在生产过程中起着至关重要的作用, 不仅能提高钢材的表面质量, 还能延长轧辊的使用寿命, 降低酸洗难度和酸液消耗。除鳞能力主要体现在除鳞压力及单位面积打击力, 除鳞能力不足将导致钢坯表面氧化铁皮残留, 氧化铁皮随轧制被压入板坯基体, 影响后续产品质量。为了进一步提高产品表面质量, 除鳞能力也需要进一步提升。

其它方面影响

供冷轧低碳钢产品热轧过程终轧温度一般为 880℃ 左右, 终轧温度越高, 四次氧化铁皮厚度越厚, 对钢板附着力越大^[3], 难以被机架间冷却水消除, 并且冷轧酸洗时氧化铁皮难以洗净。

层流冷却输出辊道影响, 部分层冷辊道边部的镀铬层随着生产逐步出现脱落, 粗糙的下表面与带钢发生相对位移, 导致带钢表面光洁度下降。而氧化铁皮与带钢粗糙部位的结合能力更强, 不利于后续酸洗过程, 同时对冷轧成品的表面质量也会造成一定影响。

氧化铁皮控制措施

降低出炉温度

以低碳钢作为实验对象开展降低出炉温度实验, 出炉温度降低 30~50℃, 如图 6 所示。通过降低出炉温度, 氧化铁皮缺陷得到有效地控制, 缺陷率明显减少。

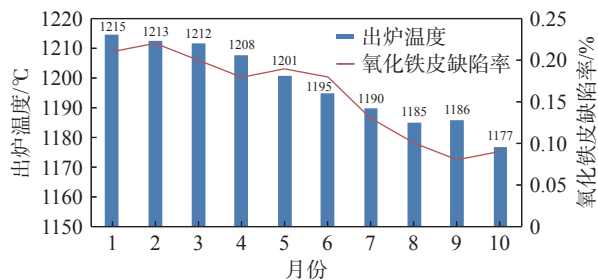


图6 低碳钢出炉温度与氧化铁皮缺陷率关系图

减少加热炉冷风吸入

如图7所示，在降低出炉温度的同时，通过增加炉门停中位功能，减少外界冷风吸入，降低加热炉炉门附近板坯与空气中氧气接触的机率，可延缓氧化铁皮生成速度，减小氧化铁皮生成厚度，使粗轧除鳞机更易去除氧化铁皮。同时将加热炉热负荷前移，提高预热段加热能力，提高板坯预热、一加及二加温度，控制均热段温度低于二加温度，避免均热段继续升温，给板坯以充分的氧化时间形成铁皮层，提高一次氧化铁皮的剥离性，使氧化铁皮更容易被去除，如图8所示。

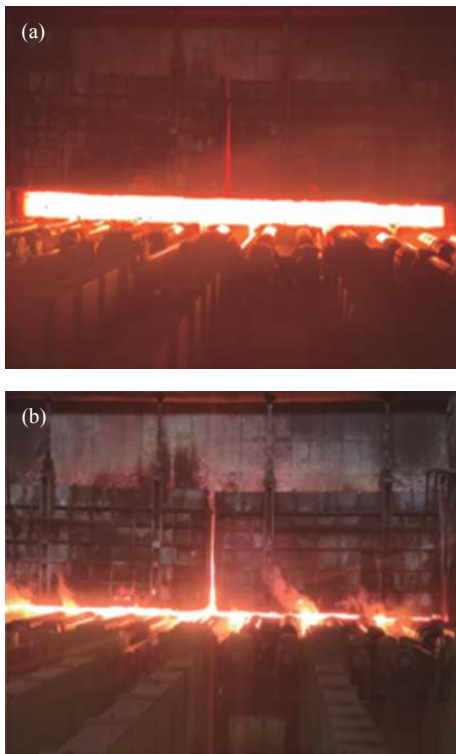


图7 炉门停中位功能的变化：(a) 改进前；(b) 改进后

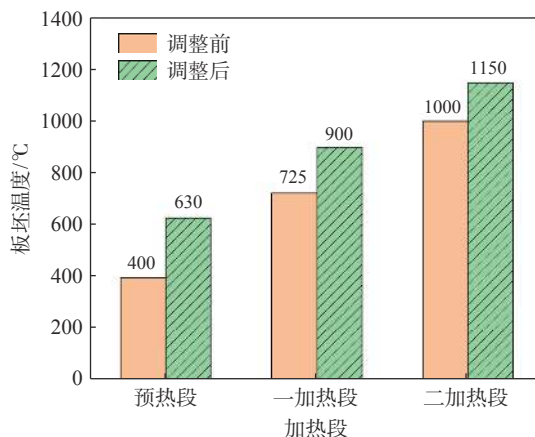


图8 热负荷调整前后对比图

提升粗轧除鳞能力

通过对除鳞泵组能力的评估，对粗轧除鳞喷嘴进行调整，喷嘴等效直径增加，单位面积打击力提升约20%。同时对粗轧除鳞前、后排水嘴位置进行重新进行调整，前排水嘴搭接位置与后排水嘴对应，避免除鳞过冲效应叠加，进一步提升对一次氧化铁皮的除鳞能力。

热轧除鳞是对板坯上、下表面进行除鳞，实际生产过程中可见板坯侧面留有明显的氧化铁皮未除净，后续加工过程中氧化铁皮因宽展机理会翻转至带钢表面，形成边部氧化铁皮缺陷。因此，在粗轧除鳞后排集管位置，增加侧方向除鳞，提高对边部氧化铁皮的除鳞效果，如图9所示。实际应用过程

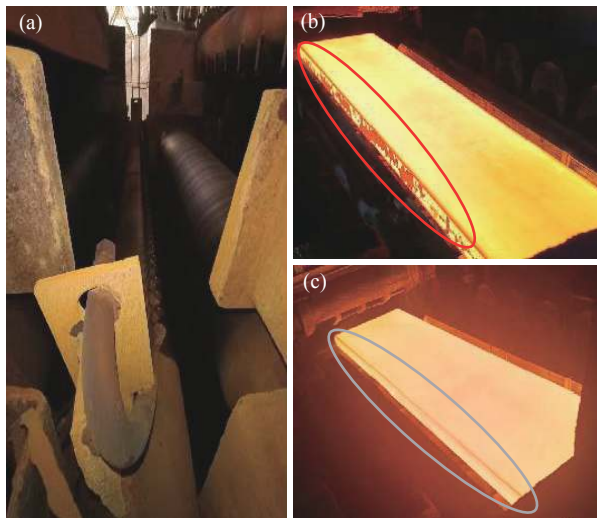


图9 增加粗轧侧方向除鳞效果图：(a) 设备改进；(b) 改进前；(c) 改进后

中效果良好，可将边部氧化铁皮彻底去除。同时经过测试，该方法对边部温度几乎无影响，不会造成边部温降过大，影响生产稳定和边部质量。

优化冷轧拉矫工艺

冷轧拉矫可以有效破鳞，供冷轧低碳钢在经过拉矫机时，同时受到弯曲和拉伸力，因此冷轧拉矫工艺是影响带钢酸洗效果的关键因素。由于氧化铁皮与基体塑性不同，氧化铁皮将会不同程度地从带钢表面上剥落下来或产生裂缝，明显地增加酸洗速度，对后续酸洗过程极为有利^[4-5]。拉矫机破鳞效果与拉矫工艺直接相关，不同程度的变形对氧化铁皮的破碎效果存在差异。因此，制定合理的张力、压下量和延伸率，充分利用拉矫机破鳞能力，是优化拉矫工艺的主要研究方向^[4-5]。

通常为了保护设备，冷轧拉矫延伸率设定参数仅可满足校正板形的基本要求。为了充分发挥拉矫机能力，综合考虑带钢拉窄量、设备能力、焊接工艺及焊缝质量等，将拉矫延伸率设定范围由 0.1%~1.5% 提高至 0.5%~1.7%。调整后铁皮缺陷率随拉矫延伸率变化趋于平缓，如图 10 所示。通过充分的破鳞作用，表层疏松的氧化铁皮层脱落，同时增加基体附近氧化铁皮层中的裂隙，使酸液更容易渗入氧化铁皮层中，提高酸洗的效果和速率，此外还可提升酸洗机组效率，释放酸洗机组的产能。

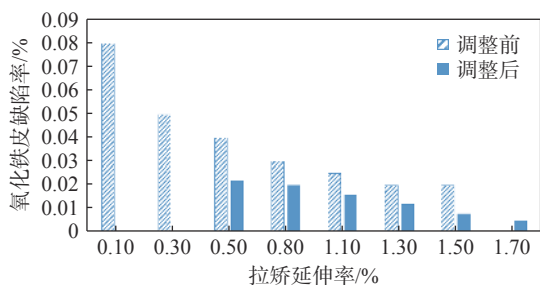


图 10 拉矫延伸率调整前后氧化铁皮缺陷率对比

其它方面优化措施

(1) 降低中间坯厚度的影响：中间坯厚度通过影响进精轧温度间接影响氧化铁皮缺陷，因此降低中间坯厚度可以改善氧化铁皮缺陷。为减少二次氧化铁皮层厚度，使铁皮更易被除净，在降低出炉温度的基础上，将中间坯厚度降低 3~6 mm，进精轧温度和氧化铁皮缺陷数量明显降低。

(2) 热轧终轧温度的影响：从铁的氧化过程来看，当温度超过 800℃ 时，氧化铁皮阻碍铁及氧原子扩散能力大大降低，低碳类产品终轧温度在 880℃ 以上，终轧结束后形成的四次氧化铁皮相对较厚。考虑到产品机能，通过保持精轧轧制速度，适当降低终轧温度，按照目标值公差下限控制，以降低轧后四次氧化铁皮层厚度^[6]。

(3) 层流冷却辊道表面影响：层流冷却辊道长时间使用后，表面镀铬层脱落，辊道基体逐渐暴露，直接刮蹭带钢下表面，导致带钢表面粗糙度增加。金属表面的不平整性会增加氧化铁皮与金属基材之间的机械咬合作用，从而增强氧化铁皮与基体之间的附着力。定期更换磨损的输出辊道，保证辊面光滑，镀铬层完整无缺，可避免带钢刚蹭导致的铁皮压入缺陷。

(4) 除鳞压力提升：当除鳞压力提升时，高压水流的冲击力增强，能够更有效地剥离中间坯的二次氧化铁皮，特别是对于一些较难去除的、较为顽固的氧化铁皮，提升除鳞压力可以显著增加除鳞效果，确保产品表面更加光洁。采用超高压除鳞系统可有效去除带钢表面二次氧化铁皮，减少精轧轧制时带钢表面的氧化铁皮厚度，避免铁皮压入。

结束语

(1) 供冷轧低碳钢氧化铁皮形成原因较为多元化，需要结合各厂实际情况综合考量。由于热轧生产特性，氧化铁皮不可能完全消除，只能通过不断提升自身工艺，从细节入手，依托一贯制控制要求，以点带面，制定有效可行的改善措施，不断提高控制手段。

(2) 降低板坯的加热温度是控制低碳钢氧化铁皮生成的最有效手段之一，在提高产品表面质量的同时，减少炉门附近气氛的氧含量，可避免板坯在炉门位置表层氧化铁皮发生结构性的改变，提高氧化铁皮整体的剥离性。

(3) 减少中间坯厚度，可以增加板坯在粗轧区域的热损失，降低板坯进入精轧机的温度，降低二次铁皮的形成速度及厚度。

(4) 除鳞能力与热轧带钢表面质量息息相关，除鳞能力的提升需要综合考虑除鳞压力、喷嘴型号

及泵组能力；超高压除鳞的应用也是未来热轧生产的趋势之一。

(5) 拉矫作为冷轧工序的重要工艺，对热轧产品表面质量影响显著，需要结合氧化铁皮结构、产生机理，对插入量、延伸率等参数进行优化，实现充分破鳞。在提高产品表面质量的同时，还可以提升酸轧机组的生产效率。

参考文献

- [1] 徐海卫, 李飞, 王全礼. 热轧薄板表面氧化铁皮类缺陷的形成机理与控制//2009年全国高品质热轧板带材控轧控冷与在线、离线热处理生产技术交流研讨会文集. 宜兴, 2009: 271
- [2] Krzyzanowski M, Beynon J H, Farrugia D C J. *Oxide Scale Behavior in High Temperature Metal Processing*. Germany: Wiley-VCH, 2010
- [3] 王岑. 中国热轧宽带钢轧机及生产技术. 北京: 冶金工业出版社, 2002
- [4] 傅玉勇. 拉矫工艺参数对热轧带钢破鳞效果的影响分析. *冶金设备*, 2016(6): 17
- [5] 康阳, 王路兵, 李跃兴, 等. 首钢 1450 酸轧机组拉伸弯曲矫直

机的结构分析及应用. *钢铁研究学报*, 2012, 24(S1): 120

- [6] 陈连生, 卢珺玮, 宋进英, 等. 钢板表面氧化铁皮缺陷形貌及产生原因分析. *钢铁钒钛*, 2013, 34(1): 86

作者简介: 左远鸿 (1978—), 女, 黑龙江省伊春市人, 高级工程师。2002 年毕业于鞍山科技大学轧钢专业, 主要研究方向: 热轧轧制工艺研究和产品质量提升。通信地址: 辽宁省本溪市平山区人民路 16 号; E-mail: zyh88776@163.com。

栾崧琳 (1988—), 男, 辽宁省本溪市人, 工程师。2009 年毕业于沈阳航空工业学院金属材料专业, 主要研究方向: 热轧轧制工艺研究和产品质量提升。通信地址: 辽宁省本溪市平山区人民路 16 号; E-mail: ls166@163.com。

由宇 (1987—), 男, 辽宁省鞍山市人, 工程师。2010 年毕业于辽宁科技大学材料加工专业。主要研究方向: 热轧轧制工艺研究和产品质量提升。通信地址: 辽宁省本溪市平山区人民路 16 号; E-mail: 284262313@qq.com。