

小方坯连铸二冷区冷却制度优化及应用研究

刘海清

山东石横特钢有限公司, 山东 临沂 271600

DOI:10.61369/ADA.2026010033

摘 要： 小方坯连铸是一项复杂工艺，受二冷区冷却制度影响，可能出现内部裂纹、中心偏析等质量问题。为了保证小方坯连铸质量，加强二冷区冷却制度优化是必然选择。文章围绕小方坯连铸二冷区冷却制度优化展开论述，根据凝固原理以及传热学理论，分析影响小方坯连铸二冷区冷却的因素，包含冷却水量、冷却水压以及喷雾强度、二冷区隔断冷却长度与喷淋间距、不合理的冷却制度、铸坯拉速与钢种成分、环境温度与冷却水质等，在此基础上，从优化冷却水量、优化喷雾系统、建立冷却制度动态调整机制、引入辅助措施角度提出制度优化策略，阐述具体应用效果。结果表明，二冷区冷却制度优化后，可显著提高铸坯质量和生产效率，为相关企业小方坯连铸工艺优化提供借鉴与参考。

关 键 词： 小方坯连铸；二冷区；冷却；制度优化；应用

Research on the Optimization and Application of the Secondary Cooling System in Billet Continuous Casting

Liu Haiqing

Shandong Shiheng Special Steel Co., Ltd., Linyi, Shandong 271600

Abstract： Billet continuous casting is a complex process that can be affected by the secondary cooling system, potentially leading to quality issues such as internal cracks and center segregation. To ensure the quality of billet continuous casting, optimizing the secondary cooling system is an inevitable choice. This article discusses the optimization of the secondary cooling system in billet continuous casting. Based on solidification principles and heat transfer theory, it analyzes factors influencing the secondary cooling of billet continuous casting, including cooling water volume, cooling water pressure, spray intensity, the length of segmented cooling and spray spacing in the secondary cooling zone, unreasonable cooling systems, casting speed and steel composition, ambient temperature, and cooling water quality. Building on this analysis, the article proposes optimization strategies from the perspectives of optimizing cooling water volume, enhancing the spray system, establishing a dynamic adjustment mechanism for the cooling system, and introducing auxiliary measures, and elaborates on their specific application effects. The results indicate that optimizing the secondary cooling system can significantly improve billet quality and production efficiency, providing references for the optimization of billet continuous casting processes in relevant enterprises. .

Keywords： billet continuous casting; secondary cooling zone; cooling; system optimization; application

连铸作为钢铁冶炼中的一项核心工艺，其质量高低很大程度上影响最终钢材品质。小方坯连铸凭借其比表面积大以及断面尺寸小的优势特点，在钢铁生产中得到了广泛应用，但相应的对二冷区冷却控制有着更为复杂的标准和要求。二冷区主要用于铸坯冷却，冷却强度是否达标关系着铸坯的表面裂纹敏感温度区以及凝固组织。但具体生产过程中，部分中小断面连铸机受限于原始设计和使用磨损等问题，存在喷嘴雾化效果不佳和二冷配水不合理等问题，以至于铸坯受反复回温影响出现开裂。若冷却梯度不合理，同样会增加铸坯变形的几率，影响整体质量。故此，加强二冷区冷却制度优化改进是必然选择，对于提升。

一、小方坯连铸二冷区冷却机理

二冷区大多处于结晶器底部位置，是为铸坯提供凝固与冷却功能的重要区域。小方坯连铸的断面尺寸较小，二冷区的冷却效率和是否均匀，很大程度影响铸坯的凝固速度以及整体质量^[1]。小方坯在进入二冷区前表面存在一层初始坯壳，厚度大概在

8mm ~ 15mm之间，其内部中心位置高温钢液尚未完全凝固。而进入二冷区后，铸坯的热量传递主要经由强制对流换热、辐射换热、接触换热等方式实现。其中强制对流换热方式占据着主导作用，向铸坯表面喷洒一定的冷却水用于降温散热，而水流密度 q 、水滴速度 v 等因素对换热系数有着直接影响，同时还会受 T_w （水温）以及 T_s （表面温度）等因素影响。具体公式如下：

$$h_w = a \cdot q^b \cdot (T_s - T_w)^c$$

公式中的 a、b、c 为喷嘴相关参数。

由于小方坯具有角部二维传热效应，该区域的换热系数普遍略高于宽面中心点，若忽视这一因素影响，很容易出现冷裂纹影响整体铸坯质量。

辐射换热是铸坯向环境散发的辐射热量，占总热量中 10% ~ 15%，在二冷区上部地区，这一因素需要高度重视，后期随着铸坯温度逐步下降，辐射换热量将逐步递减。

接触换热是指铸坯的热量传递给支撑辊道的辊子，但由于二者接触时间较短，所传递的热量较小，但在计算铸坯变形几率时需要充分考虑这一因素^[2]。

二、影响小方坯连铸二冷区冷却的因素

（一）冷却水量

小方坯连铸过程中，二冷区的冷却过程主要划分为 3、4 个阶段，根据不同阶段的散热需求调整冷却水量。通常情况下，传统前强后弱的配水方式多是在第一个阶段加大冷却水量，后期逐步减弱，此种方式可加快坯壳生长，有效避免漏钢问题出现。但经过大量实践经验证明，小方坯连铸中前期冷却水量过多，可能导致其表面温度骤降诱发开裂问题，经过优化改良后，当下更注重冷却水量的平稳过渡，以更为平缓的方式逐步减少各阶段冷却数量，保证冷却效率同时，避免温度骤降而开裂。除了做好各阶段的水量配比外，小方坯连铸的比水量普遍在 0.8L/kg ~ 1.5L/kg 范围内，过低会加剧液芯增长，反之则会降低铸坯表面温度，铸坯后期开裂几率大幅提升^[3]。

（二）冷却水压以及喷雾强度

水压和喷雾强度是影响小方坯连铸质量的主要因素。冷却水压直接关系喷嘴雾化效果，0.3MPa 以下区域水粒均匀度不足，可能产生水垫问题，影响换热效果；0.4MPa ~ 0.8MPa 压力区域，多选择雾化效果较为理想的扁平喷嘴，可突破蒸汽膜与铸坯表面直接接触；1.0MPa 以上的高压区域即便具有较强的穿透力，但总体能耗大，长期接触高压水流冲击容易损伤铸坯^[4]。

喷雾强度方面，单位面积水流密度关系换热效果，而小方坯角部二维传热需要更高的水流密度补偿散热；有效覆盖率是指水雾是否能够全面覆盖铸坯，若喷嘴喷雾角度调整不合理可能出现覆盖盲区，未接受冷却水冷却的区域与其他区域出现明显的温度差异，诱发严重的中心偏析问题^[5]。

（三）铸坯拉速与钢种成分

拉速与钢种属于影响小方坯连铸质量的主要因素之一。拉速与二冷水量密切相关，二冷区域的钢液停留时间越短，越需要增加水压和水量保证足够的冷却强度，但冷却水量不足容易增加漏钢风险。连铸生产环节复杂，往往需要结合生产需要频繁调整拉速，需要二冷水量动态匹配拉速变化，若无法动态匹配，则会导致铸坯表面温度频繁波动，诱发严重的裂纹^[6]。不同钢种的裂纹敏感度、导热系数等存在明显差异，如低碳合金钢具有较强的裂

纹敏感度，冷却制度优化重点在于冷却均匀、缓慢，控制冷却强度以匹配回温速率；高碳钢具有凝固区间宽的特点，冷却制度优化重点在于增加冷却水量和强度，以便加快冷却速度，避免出现中心偏析问题^[7]。

三、小方坯连铸二冷区冷却制度优化及应用

（一）制度优化方案

1. 优化冷却水量

针对二冷区回温大的问题，应注重对水量分配比以及比水量的全面优化重构。

（1）水量分配比。打破传统固定比例分配各阶段冷却水量的限制，搭建分段函数与平滑过渡的水量分配模型，从而实现各阶段冷却水量的合理分配。在足辊段适当降低冷却数量，避免初期冷却速率过高诱发开裂，铸坯从结晶器离开后的表面温度稳步下降；二冷段适当增加冷却水量，为铸坯冷却提供足够密度的水量，加快液芯收缩速度；三冷段增加 20% 的冷却水量，遏制铸坯过快回温速度^[8]。

（2）比水量。结合不同钢种，设定合理的比水量。以 HRB400E 钢种为例，比水量设定为 1.15L/KG，在 2.8m/min 高拉速状态下控制液芯长度不超过二冷区。

2. 优化喷雾系统

针对喷雾系统的优化，本质目标在于解决冷却覆盖不均的问题。根据小方坯连铸各项参数，对喷嘴类型和空间合理化改造配置。原有扁平喷嘴的穿透力较弱，喷射角度大，难以实现均匀、全面覆盖，甚至在拉速过高情况下出现无法打破蒸汽膜的问题^[9]。故此，可将原有的扁平喷嘴替换为广角实心锥喷嘴，保持同等水量下获得更高的水滴动能以及射流强度，穿透蒸汽膜接触铸坯表面，使铸坯表面的换热效率大幅提升；喷嘴布置方式经过优化，消除覆盖盲区，从而保证铸坯整体冷却均匀。增设专门的角部喷嘴，并结合小方坯角部二维传热特性动态调整喷嘴角度，确保水雾均匀覆盖；调整二冷段的喷嘴布设间距为 100mm，避免喷嘴间距过大而出现喷雾覆盖不均的问题，小方坯连铸温度标准差不超过 10℃^[10]。

3. 建立冷却制度动态调整机制

基于目标表面温度反馈搭建动态二冷控制模型，结合小方坯连铸冷却需要动态调整，以此规避拉速波动以及钢种变化带来的负面影响，精准匹配生产需要。该模型设置铸坯表面目标温度 T_{target} 约束条件，精准计算冷却各阶段的水量 Q_i 。计算公式如下：

$$Q_i = K_i \cdot V n_c \cdot f(T_{surf} - T_{target})$$

公式中的 n 代表拉速指数， K_i 、 $f(\cdot)$ 分别代表各段修正系数和 PID 反馈调节函数。

小方坯连铸过程中，模型识别拉速增长，自动判定为强冷模式，根据非线性比例适当增加冷却各阶段的水量，有效遏制液芯增长；识别拉速下降，系统自动切换为弱冷模式，以免铸坯表面温度过快下降诱发开裂问题。与此同时，根据不同钢种调整不同

的工艺参数，与连铸冷却需要动态匹配，能有效避免人工调节不及时诱发质量问题。

4. 引入辅助措施

除了上述措施外，为了保证小方坯连铸质量，还可以引入其他辅助措施优化冷却制度。具体如下：

（1）气-水雾化系统，该技术将空气压缩至0.4MPa~0.6MPa压力下，将冷却水破碎为微米级液滴，实现雾化比表面积进一步扩大。相较于传统的冷却水喷雾系统而言，此项技术射流穿透力较强，以软冷却的方式提升换热系数，避免铸坯表面温度波动过大诱发开裂问题。

（2）蒸汽排放与强制通风系统，将轴流风机安装在二冷区域的顶部位置，并配备专门的挡水板与导水槽，将高温蒸汽引出，从而保证喷嘴喷出的水雾能够均匀全面覆盖铸坯的表面，提升冷却效率的同时，避免对设备产生严重腐蚀效应。

（3）水质处理和在线监测，在冷却区域安装电磁除垢仪和反冲洗过滤器，用于清洗冷却水中的悬浮颗粒物，降低冷却水硬度，避免堵塞喷嘴。同时，安装在线监测仪器，若发现冷却水质超标立即切换备用水，避免喷嘴结垢堵塞而影响铸坯质量。

（二）应用效果分析

某钢厂采用小方坯连铸机生产HRB400E螺纹钢时，由于二冷区冷却制度影响，导致钢材表面出现疏松以及开裂等问题，资源损耗大，为钢厂带来了重大的负担。故此，为了解决这些问题，该钢厂采用上述二冷区冷却制度优化措施，经过为期3个月的试验分析，实践中取得了较为理想的成果。

（1）铸坯表面温度场优化。在二冷区域引入红外测温仪设备，用于精准扫描铸坯表面温度，为后续工艺优化提供数据依据。钢厂工艺优化前，铸坯表面存在不规则的黑白条纹，区域温

差最高达到150℃，钢材容易开裂。工艺优化后，铸坯表面温度分布较为均匀，温差不超过10℃，小方坯的角部温度始终处于900℃，有效躲避裂纹敏感区，后期开裂几率大大下降。

（2）铸坯表面裂纹被消除。经过优化改造，下线铸坯可获得全方位的探查检测，相较于人工探查方式效率和精度更高。工艺改造前，该钢厂铸造的HRB400E铸坯表面的裂纹出现几率较高，而经过工艺改造后，表面开裂缺陷出现几率控制在0.2%，铸坯表面质量大幅提升。究其根本，铸坯冷却制度优化后，其表面回温速率下降至30℃/m，这种改变可避免应力集中断裂。

（3）铸坯内部致密度提高。工艺改造后，采用1:1的盐酸热蚀对铸坯进行检验，内部的缩孔现象几乎消失殆尽；Mn与C元素偏析指数下降至1.05。而且根据冷却需要实现冷却水的动态匹配，液芯长度大幅缩短，有效抑制中心偏析问题出现。

（4）生产效率显著提升。通过工艺改造优化，HRB400E钢材铸坯质量不受影响前提下，其拉速已然提升至2.9m/min，可大幅提高产量。即便初期受限于种种因素发生漏钢预警，但经过一段时间稳定运行后，漏钢误报问题出现几率大幅下降，有效保障铸坯生产活动的安全、连续进行。

四、结论

综上所述，小方坯连铸机作为钢厂生产的主要机械设备之一，面对不断提升的产品质量要求，加强二冷区冷却制度优化是必然选择。在分析影响冷却效果的因素基础上，采取优化冷却水量、优化喷雾系统、建立冷却制度动态调整机制以及其他辅助措施全面改造升级，可有效解决冷却不均匀、钢材表面开裂等问题，保障钢厂安全、稳定生产。

参考文献

[1] 李东华, 崔猛. 微合金钢小方坯连铸凝固传热行为的模拟研究 [J]. 山西冶金, 2025, 48 (12): 131-134+137.
[2] 张康郁, 刘强, 孔意文, 等. 高拉速小方坯连铸二冷模型的构建与质量优化实践 [J]. 连铸, 2025, 44 (03): 108-113.
[3] 陈阳, 王芳, 钱亮, 等. 高拉速小方坯连铸二冷支撑导向技术 [J]. 铸造技术, 2024, 45 (12): 1189-1195.
[4] 周剑波, 郭新文, 吴杰, 等. 小方坯连铸机直轧品种钢的工艺装备优化 [J]. 山西冶金, 2024, 47 (09): 163-165.
[5] 郑原首, 谢长川, 马桂华, 等. 小方坯连铸6.0 m/min高拉速技术改善与生产实践 [J]. 连铸, 2023, (04): 61-67.
[6] 刘静. 小方坯连铸凝固动态行为与缺陷关联研究 [D]. 大连理工大学, 2023.
[7] 张红军. 小方坯连铸机高拉速技术改造和生产实践 [J]. 冶金与材料, 2022, 42 (05): 127-129.
[8] 彭建昌. 福建三钢小方坯连铸高拉速工艺研究与应用 [J]. 福建冶金, 2022, 51 (05): 54-58.
[9] 吕迺冰, 高航, 刘珂, 等. 冷却强度对超高硫中碳钢方坯凝固过程 MnS 生长的影响 [J]. 钢铁, 2022, 57 (06): 50-56.
[10] 范世超, 李志敏, 刘列喜. 小方坯连铸拉矫机的维修保养及改进实践 [J]. 山西冶金, 2020, 43 (05): 89-91.