

铸坯纵裂纹缺陷在线预测模型开发与应用

邓小旋^{*}，李海波，周海忱，李洋龙，季晨曦，刘柏松

首钢集团有限公司技术研究院，北京 100043

Development and applications of online prediction of longitudinal cracks

Deng Xiaoxuan^{*}, Li Haibo, Zhou Haichen, Li Yanglong, Ji Chenxi, Liu Baisong

Shougang Group Co., Ltd., Research Institute of Technology, No. 69, Beijing 100043, China

1. 前言

随着汽车轻量化的高速发展，提高汽车用钢的强度成为发展的主要方向。碳作为强化元素具有低成本的优势，但碳含量过高会恶化焊接性能，因此较多高强钢采用亚包晶成分体系，将碳含量设计范围为 0.09%~0.17%。亚包晶钢由于其自身凝固特性，在高温铁素体向奥氏体转变过程中伴随体积收缩，导致铸坯与结晶器壁之间产生气隙，降低了凝固坯壳向结晶器的传热^[1]。由于气隙分布的不均匀性，造成坯壳向结晶器传热不均匀，在热应力、摩擦力与钢水静压力等综合作用下，坯壳的薄弱处易发生裂纹的形核和扩展。

首钢京唐与股份公司亚包晶钢产量接近总产量的 1/3。由于纵裂纹缺陷导致的产品降级产生了较大经济损失。另一方面，亚包晶钢拉速提高后漏钢风险和纵裂纹发生率增大，因此常规厚度板坯连铸亚包晶钢拉速一般控制在 1.4m/min 以下，限制了板材生产企业效率的提升。较多学者开展了减少亚包晶钢纵裂纹的工艺技术研究，比如日本住友金属公司^[2]开发了高碱度保护渣，生成枪晶石控制结晶器传热，降低裂纹发生率。宝钢^[3]报道增加结晶器铜板上部镀层厚度降低热流，减弱结晶器冷却等措施，纵裂纹发生率降低至 1%以下。梅钢^[4]采用宽面螺栓曲线水缝替代直水缝，提高了铜板传热能力和均匀性。

随着计算机性能的高速发展和人工智能技术的普及，相关学者采用数据驱动等方法研究并预测纵裂纹。比如日照钢铁公司^[5]报道采用数据通信技术、人工智能技术与 Matlab 混合编程技术，建立了智能化铸坯质量在线判定系统。该方法能辅助工艺工程师优化连铸工艺、提高铸坯质量。大连理工大学^[6]采用基于动态时间弯曲和 k 近邻分类预测铸坯纵裂纹，建立的模型对纵裂纹和正常工况样本均具有较高的识别准确率。

首钢京唐公司一期连铸机设计为高拉速铸机，低碳钢最高拉速达到 2.5m/min，结晶器铜板宽面安装了 6 排 9 列热电偶，具备了数据检测分析能力。本文简要报道基于结晶器铜板温度检测与裂纹形成机理预测纵裂纹的进展。

2. 预测模型的建立与验证

2.1. 预测模型的算法

在现场一共提取超过 100 张板坯纵裂纹图像，并追溯其连铸过程参数与结晶器铜板温度数据之间的变化规律。图 1 展示了典型纵裂纹的照片以及发生纵裂纹时热电偶温度曲线，本文称之为

为“带偏移的连续凹槽曲线”。此外，进一步分析还发现：部分曲线连续 6 排热电偶均存在明显凹陷，部分曲线仅有 3 排、4 排或者 5 排出现凹槽特征。热电偶温度出现以上特征的原因在于：由于亚包晶钢或者碳含量较高的低碳钢（0.06%~0.08%）凝固收缩的特点，导致其在弯月面或者结晶器上部出现凹陷，气隙存在致使铜板传热受阻，坯壳温度升高，铜板热面温度降低，热电偶检测温度随之降低。随着带有凹陷的坯壳继续往下移动，运行至下一个热电偶位置时铜板温度重复出现以上规律。随着坯壳逐渐增厚，其抵抗钢水静压力能力也越强，部分凹陷逐渐变平，部分铸坯凹陷在出结晶器后依然保持着凹陷形态，在二冷区扩展形成纵裂纹。

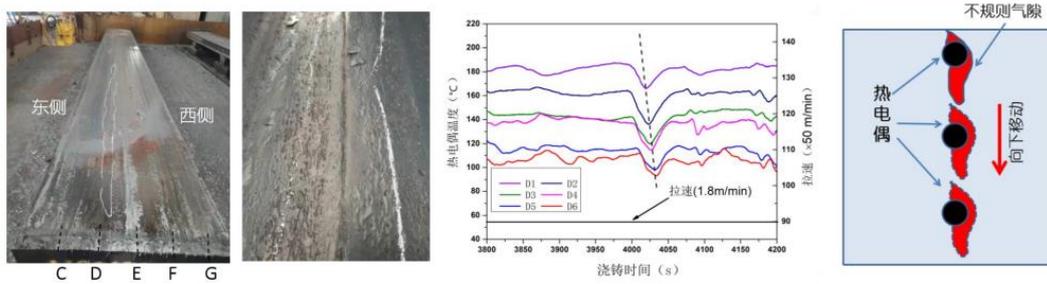


图 1 裂纹敏感钢种的典型照片、对应的铜板热电偶温度曲线与形成机理示意图

Figure 1 Typical image of longitudinal cracks of crack-sensitive grade, typical temperature curve of thermocouples embedded in the mold and their formation mechanism.

2.2. 预测模型建立与验证

利用以上机理分析，建立了基于纵裂纹形成机理与铜板热电偶温度的纵裂纹离线与在线预测模型，定义了几个关键参数：(1) 结晶器在线数据读取周期，用于表征热电偶数据读取与分析的范围；(2) 温度判定差值 δH ，用于间接表征凹陷的深度；(3) 偏移系数，用于表征凹陷从上一排热电偶运行至下一排热电偶的时间。预测系统一共分成五部分，包含主界面、预测结果显示界面、历史查询界面、参数设置界面和结果输出界面。预测模型的系统主界面和预测结果见图 2 所示。开展了大量模型调试工作，消除了拉速与其他工艺参数变动对模型预测准确度的影响，提高了模型准确性。

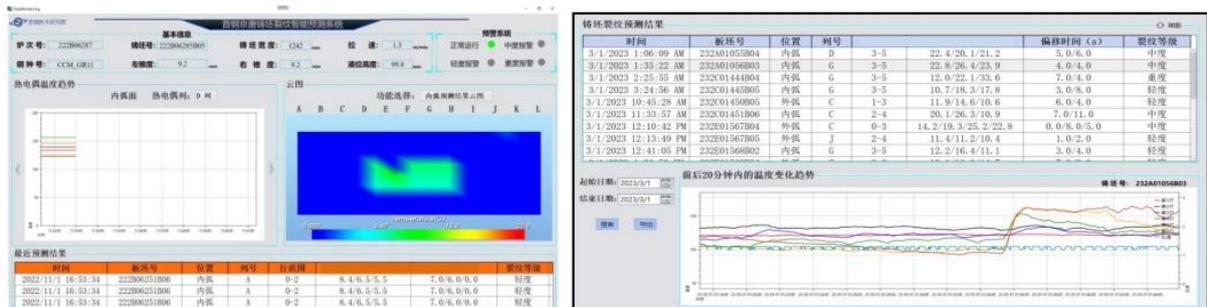


图 2 纵裂纹预测系统主界面与预测结果

Figure 2 Main interface and prediction results in developed longitudinal crack prediction system (LCPS).

3. 预测模型的应用

将得到的预测模型应用于实际连铸过程，预测到了一次由于保护渣性能波动问题引起的批量纵裂纹事故，通过对预测出来的板坯进行人工或机器清理，避免有缺陷的铸坯流入至热轧工序，降低了热轧板缺陷 降级比例。此外，利用该模型还可在线优化连铸工艺，避免出现批量质量事故。

4.结论

本文简要介绍了利用结晶器铜板温度变化预测纵裂纹的模型算法开发、预测及其应用，预测模型准确 度较高，可应用于现场工艺优化与质量改进。

参考文献

- [1] 朱志远, 王新华, 王万军. 亚包晶钢板坯表面纵裂及影响因素[J]. 连铸, 2000, (06): 31-36.
- [2] M. Hanao, M. Kawamoto, M. Hara, T. Murakami, H. Kikuchi, K. Hanazaki. Mold Flux for High Speed Continuous Casting of Hypoperitectic Steel Slabs[J]. Tetsu-to-Hagane, 2002, 88(1): 23-28.
- [3] 张立, 徐国栋, 王新华, 等. 集装箱用钢连铸坯表面纵裂纹的研究[J]. 钢铁, 2002, 37(1): 19-25.
- [4] 江中块, 李俊杰, 张森森, 等. 板坯连铸结晶器铜板冷却水槽结构优化[J]. 材料与冶金学报, 2019, 18(02): 101- 105.
- [5] 杨立安, 米进周, 李涛,等. 连铸板坯表面纵裂纹预测模型智能化定制方法[J]. 连铸, 2022, (06): 16-20.
- [6] 段海洋, 王旭东, 姚曼. 基于动态时间弯曲和 k 近邻分类预测铸坯纵裂纹[J]. 连铸, 2021, (04): 66-71.