

1995 年创刊
公开发行人(双月刊)

宽 厚 板
KUAN HOU BAN

2024 年 4 月 30 日出版
第 30 卷第 2 期(总第 173 期)

《宽厚板》杂志编委会

编委会主任:

李建朝

编委会委员(按姓氏笔画为序):

韦 明 韦 昇 王全胜

郝小强 龙 杰 刘建国

刘建磊 李 杰 庞辉勇

李朝玺 吴 明 吴俊平

何绪友 杨增国 陈子刚

周庆升 赵国昌 黄大军

谢良法 彭世宝 廖仕军

戴文笠

目 次

· 试验研究 ·

TiC 粒子尺寸对增强马氏体耐磨钢磨损性能的影响

..... 杨建华(1)

低温容器用 13MnNi6-3 钢板奥氏体静态连续冷却转变曲线的测定

..... 高亚磊 姚 尧 尹卫江 管秀兵 徐腾飞 王甜甜(7)

稀土元素 Ce 对大型矿用高强度钢板 Q620E 的影响研究

..... 卢晓禹 袁晓鸣 黄 利 王少炳(10)

超大厚度 Q345R(R-HIC)钢板的研制开发

..... 吴立松 李祥兵 霍圆圆(14)

· 生产实践 ·

120 t 转炉热态渣循环利用工艺研究

..... 栾文林 刘志远 王重君 么敬文 郭文斌

..... 刘 涛 张俊海 张云鹏(18)

莱钢厚板生产线加热炉提产能降燃耗技术分析

..... 王新龙(23)

电极接口松动对 LF 精炼过程的影响及优化措施

..... 王重君 刘志远 么敬文 郭文斌 王武仙

..... 栾文林 宋稳强 王 飞(27)

· 技术讨论 ·

模拟焊后热处理对压力容器用 Q690E 钢板的影响

..... 王 飞 肖春江 刘彦强 姚远方 李 峥(31)

400HBW 级商用低合金耐磨钢的耐磨性能研究

..... 孙 煜 林江海 姜少宁(34)

NM500 级高强度低合金耐磨钢的研制开发

..... 李 行 尹绍江 訾文胜 秦 坤 张学 郝 鑫 李可斌(39)

马钢 120 t LF 精炼炉钢液温度预测模型的应用与优化实践

..... 孙 涛 孙 波 王 勇(43)

主 管:舞阳钢铁有限责任公司
主 办:舞阳钢铁有限责任公司
主 编:龙 杰
编辑部主任:杜 游
编辑出版:《宽厚板》编辑部
印 刷:郑州豫兴印刷有限公司
发 行:《宽厚板》编辑部

刊 号:ISSN 1009-7864
CN 41-1242/TF
地 址:河南省舞钢市湖滨大道西段
电 子 信 箱:wykhhb2003@163.com
邮 编:462500
电 话:(0375)8111575/8113765
国内定价:10.00 元 国内公开发行

Wide and Heavy Plate

Vol. 30 ,No. 2

April 2024

CONTENTS

• Test and Research •

- Effect of TiC Particle Size on Wear Properties Reinforcement of Martensitic Wear – resistant Steel
..... *Yang Jianhua*(1)
- Determinating the Static Austenite Continuous Cooling Transformation Curve of 13MnNi6 – 3 Steel Plate for Low Temperature Vessel
..... *Gao Yalei, Yao Yao, Yin Weijiang, Guan Xiubing, Xu Tengfei and Wang Tiantian*(7)
- Effect of Rare Earth Element Ce on High Strength Steel Plate Q620E for Large Mining Vehicle
..... *Lu Xiaoyu, Yuan Xiaoming, Huang Li and Wang Shaobing*(10)
- Research and Development of Extra – heavy Q345R(R – HIC) Steel Plate
..... *Wu Lisong, Li Yangbing and Huo Yuanyuan*(14)

• Production Practice •

- Study on 120 t BOF Steelmaking Process for Thermal State Slag Recycling
..... *Luan Wenlin, Liu Zhiyuan, Wang Chongjun, Yao Jingwen, Guo Wenbin, Liu Tao, Zhang Junhai and Zhang Yunpeng*(18)
- Technical Analysis of Increasing Output Capacity and Decreasing Fuel Consumption of the Reheating Furnace in Laigang Heavy Plate Production Line
..... *Wang Xinlong*(23)
- The Influence of Electrode Coupling Looseness on LF Refining Process and Optimization Measures
..... *Wang Chongjun, Liu Zhiyuan, Yao Jingwen, Guo Wenbin, Wang Wuxian, Luan Wenlin, Song Wenqiang and Wang Fei*(27)

• Technical Discussion •

- Effect of Simulated Post Weld Heat Treatment on Q690E Steel Plate for Pressure Vessels
..... *Wang Fei, Xiao Chunjiang, Liu Yanqiang, Yao Yuanfang and Li Zheng*(31)
- Study on the Wear Resistance of 400HBW Grade Commercial Low Alloy Wear – resistant Steel
..... *Sun Yu, Lin Jianghai and Jiang Shaoning*(34)
- Research and Development of NM500 Grade High Strength Low Alloy Wear – resistant Steel
..... *Li Hang, Yin Shaojiang, Zi Wensheng, Qin Kun, Zhang Xue, Hao Xin and Li Kebin*(39)
- The Application and Optimization Practice of Prediction Model for Molten Steel Temperature in Masteels 120 t Ladle Furnace
..... *Sun Tao, Sun Bo and Wang Yong*(43)

Competent Unit: Wuyang Iron and Steel Co. Ltd.

Sponsored by: Wuyang Iron and Steel Co. Ltd.

Edited and Published by: Editorial Office of WIDE AND HEAVY PLATE

Address: Wugang City, Henan. **Post Code:** 462500

· 试验研究 ·

TiC 粒子尺寸对增强马氏体耐磨钢磨损性能的影响

杨建华

(湖南华菱湘潭钢铁有限公司)

摘 要 采用不同凝固速率获得相同成分的铸坯,按不同压缩比将铸坯热轧,经过热处理后,获得成分相同、硬度在450HV左右、TiC粒子尺寸在1.88~3.20 μm 之间的TiC粒子增强马氏体耐磨钢。对比研究TiC粒子增强马氏体耐磨钢在不同载荷往复滑动磨损条件下的磨损行为,结果表明:随着磨损载荷的增加,最佳耐磨

性TiC粒子尺寸由1.88 μm 增加至3.20 μm 。随着磨损理论磨损量、实际磨损量和磨损率的增加,最佳耐磨

40 N 载荷下的摩擦系数在严重磨损阶段上升明显,而 50 N 载荷下的摩擦系数则上升较慢。

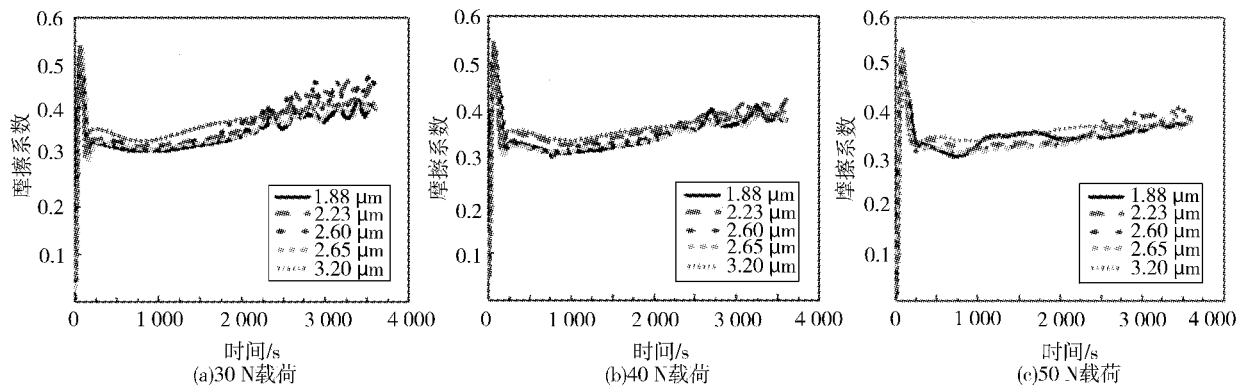


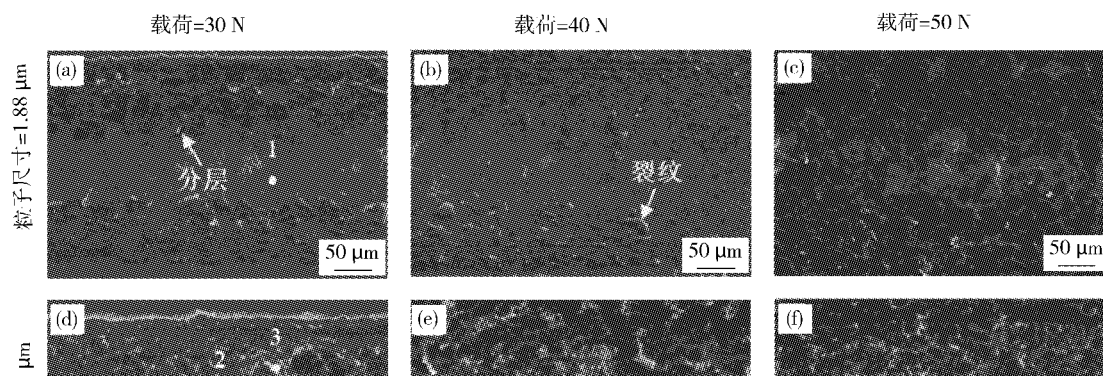
图 3 TiC 粒子增强马氏体耐磨钢磨损过程中的摩擦系数

图 4 显示了 TiC 粒子增强马氏体耐磨钢在不同载荷下的磨损体积。当外加载荷为 30 N 时,磨损体积随着 TiC 粒子尺寸的增大而增加,粒子尺寸为 1.88 μm 的 TiC 粒子增强马氏体耐磨钢具有最佳耐磨性;当外加载荷为 40 N 时,磨损体积随

貌如图 5 所示。根据磨损形貌可以观察到, TiC 粒子尺寸为 3.20 μm 的 TiC 粒子增强马氏体耐磨钢磨痕宽度明显比其余 4 种实验钢磨痕宽度大,说明其耐磨性最差。TiC 粒子增强马氏体耐磨钢磨损形貌由沟槽、分层、磨屑、裂纹和剥落坑组成。不同实验钢之间的磨损形貌有一定差异,例如

作为磨料容易形成磨损沟槽,损伤实验钢材,此时的粒子会对耐磨性提升具有损害作用,因此提高

粒子与基体的界面结合力可以提高粒子增强马氏体耐磨钢的耐磨性。



冷却转变曲线的测定

王磊¹ 姚尧² 尹卫江¹ 管秀兵¹ 徐腾飞¹ 王甜甜¹

高

(1 河钢集团舞钢公司; 2 冶金工业教育资源开发中心)

测定低温容器用 13MnNi6-3 钢板的临界点及连续冷却转变曲线, 并研究冷却速度更度的影响。结果表明: 当冷却速度为 0.2~1 °C/s 时, 试验钢板的转变组织为铁素体和珠光体; 当冷却速度为 2~5 °C/s 时, 试验钢板得到铁素体、珠光体以及少量粒状贝氏体的混合组织; 当冷却速度为 10~75 °C/s 时, 试验钢板的相变组织为粒状贝氏体和少量铁素体。

3 钢板 组织 奥氏体 连续冷却转变曲线

摘要 利用膨胀计对试验钢板显微组织及硬度的测定, 研究了冷却速度对试验钢板显微组织及硬度的影响。结果表明: 当冷却速度为 0.2~1 °C/s 时, 试验钢板的转变组织为铁素体和珠光体; 当冷却速度为 2~5 °C/s 时, 试验钢板得到铁素体、珠光体以及少量粒状贝氏体的混合组织; 当冷却速度为 10~75 °C/s 时, 试验钢板的相变组织为粒状贝氏体和少量铁素体。

关键词 13MnNi6-3 钢板 组织 奥氏体 连续冷却转变曲线

Determining the Static Austenite Continuous Cooling Transformation Curve of 13MnNi6-3 Steel Plate for Low Temperature Vessel

Determining the Static Austenite Continuous Cooling Transformation Curve of 13MnNi6-3 Steel Plate for Low Temperature Vessel

王磊², Yin Weijiang¹, Guan Xiubing¹, Xu Tengfei¹ and Wang Tiantian¹Gao Yalei¹, Yao Yao², Yin Weijiang¹, Guan Xiubing¹, Xu Tengfei¹ and Wang Tiantian¹

(1 HBIS Group Wusteel Company; 2 Metallurgical Industry Education Resource Development Center)

(1 HBIS Group Wusteel Company; 2 Metallurgical Industry Education Resource Development Center)

al point and continuous cooling transformation curve of 13MnNi6-3 steel plate for low temperature vessel are measured by dilatometer, and the effect of cooling rate on the microstructure and microhardness of the test steel plate are studied. The results show that when the cooling rate is 0.2~1 °C/s, the transformation structure of the test steel plate is ferrite and pearlite. When the cooling rate is 2~5 °C/s, the test steel plate can get a mixed structure of ferrite, pearlite and a small amount of granular bainite. When the cooling rate is 10~75 °C/s, the phase transformation structure of the test steel plate is granular bainite and a small amount of ferrite structure.

13MnNi6-3 steel plate, Microstructure, Austenite, Continuous cooling transformation curve

Abstract The critical point and continuous cooling transformation curve of 13MnNi6-3 steel plate for low temperature vessel are measured by dilatometer, and the effect of cooling rate on the microstructure and microhardness of the test steel plate are studied. The results show that when the cooling rate is 0.2~1 °C/s, the transformation structure of the test steel plate is ferrite and pearlite. When the cooling rate is 2~5 °C/s, the test steel plate can get a mixed structure of ferrite, pearlite and a small amount of granular bainite. When the cooling rate is 10~75 °C/s, the phase transformation structure of the test steel plate is granular bainite and a small amount of ferrite structure.

Keywords 13MnNi6-3 steel plate, Microstructure, Austenite, Continuous cooling transformation curve

通用的低温钢板,同时也用于制造低温容器,被广泛用来制作丙烷、乙烯等液化石油气储罐,通常在-40 °C以下有优良的低温韧性及良好的焊接性能。随着我国对低温钢材

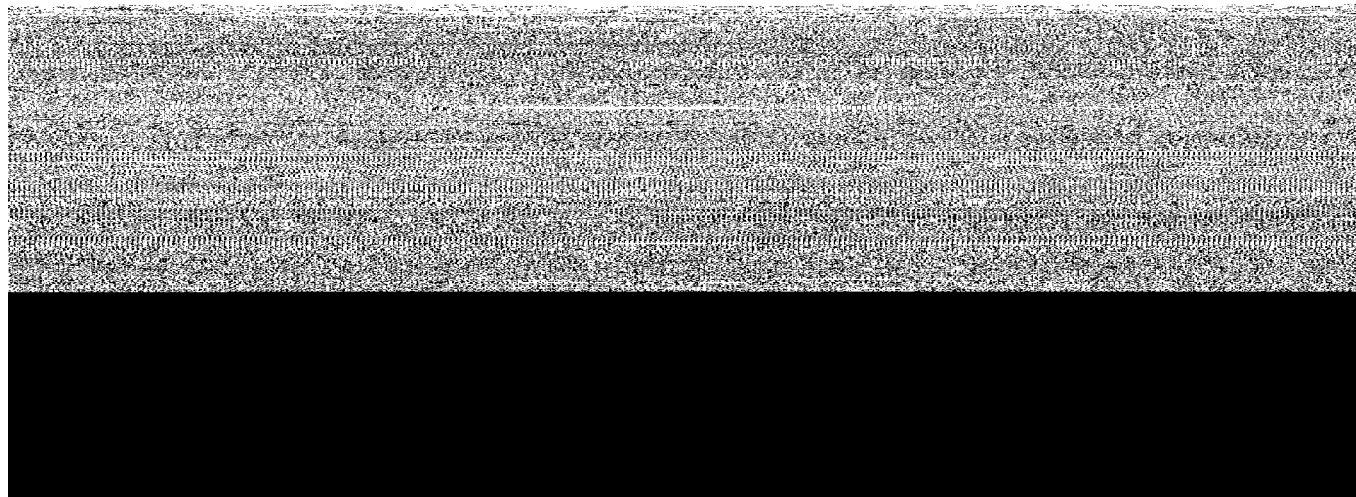
特点,为工业化生产的热处理工艺制定提供理论依据。

1 试验材料及方法

试验材料取自舞钢生产的 13MnNi6-3 钢板,其化学成分如表 1 所示。从钢板上取样并制成 Φ4 mm×10 mm 尺寸的试样,利用膨胀仪检测

0 前言

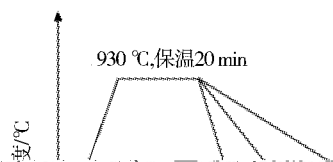
13MnNi6-3 是欧洲标准 EN 10028-2 中规定的属于 0.5% 镍低温容器用钢,属于 0.5% 镍低温容器用钢,广泛用于液化石油气储罐、丙烯等液化石油气储罐的低温环境服役,要求具有良好的内部质量^[1]。近年来



绘制出试验钢的连续冷却转变曲线。利用显微镜分析奥氏体不同冷却速度转变后的显微组织,利用维氏硬度计测试试验钢的维氏硬度。试验钢静态 CCT 曲线测试工艺示意图如图 1 所示。

表 1 试验钢板的化学成分(质量分数)

											%
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Al	Mo	V	Nb
0.1	0.38	1.45	0.009	0.002	0.69	0.07	0.02	0.034	0.03	0.003	0.024



2 试验结果与分析

2.1 试验钢的临界点

利用膨胀仪测定出试验钢板的临界点,结果

为: $A_1: 696.9^{\circ}\text{C}$; $A_{cm}: 865.9^{\circ}\text{C}$

度。随着试样冷却速度的升高,试验钢板所获得的显微组织与对应维氏硬度值如表2所示。

表2 试验钢板不同冷却速度的显微组织与维氏硬度

冷却速度/ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$)	显微组织	晶粒度/ 级	平均硬度 (HV5)
0.2	F + P	8.5	146
0.5	F + P	8.5	164
1	F + P	9.0	178
2	F + P + B _少	9.5	187
5	F + B + P _少	10.0	199
10	B + F	10.5	210
15	B + F	11.0	216
20	B + F _少		234
30	B + F _少		238
50	B + F _少		244
75	B + F _少		247

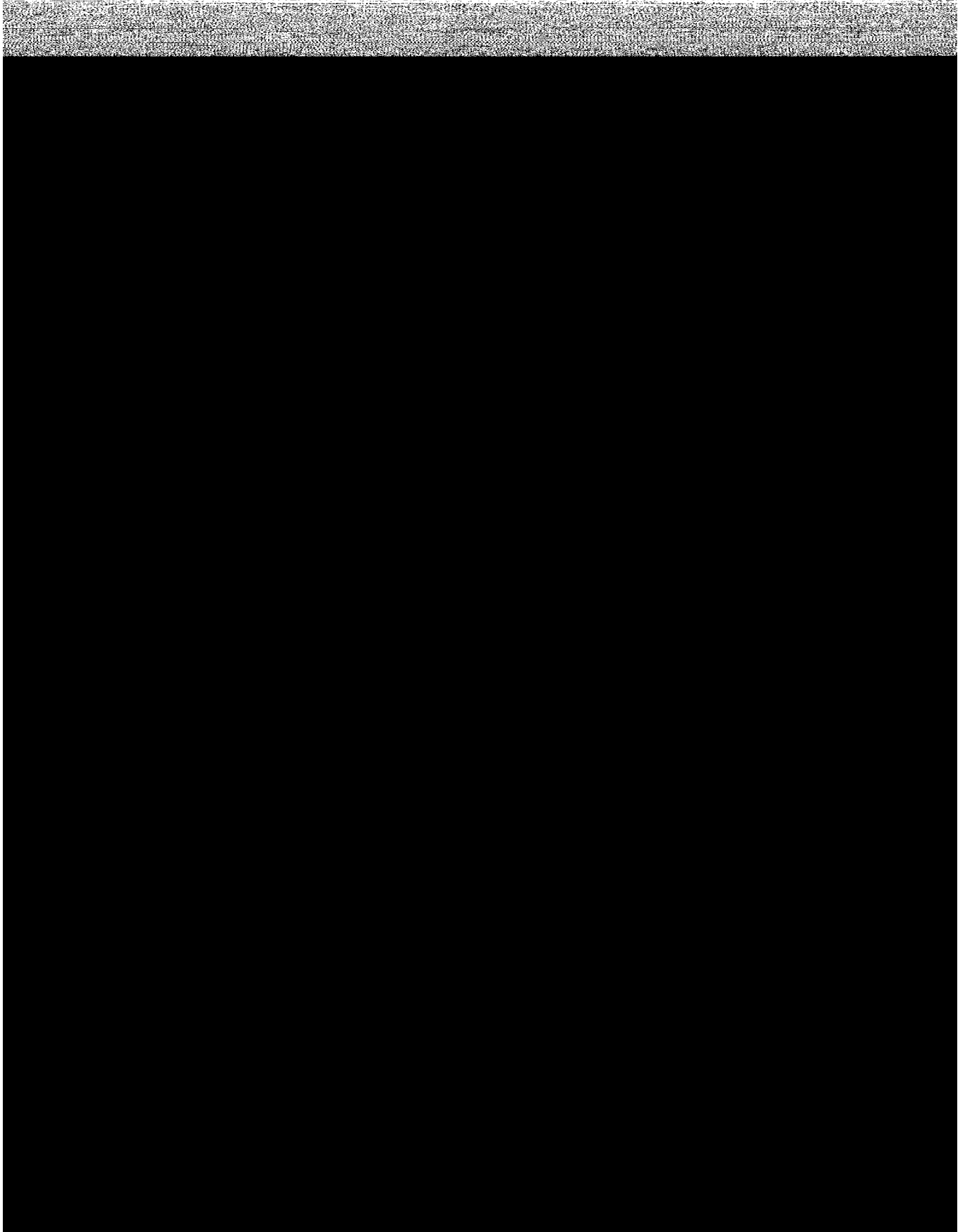
度范围内,冷却后试样得到铁素体和珠光体组织,硬度比较低,随着冷却速度的增加,珠光体含量逐渐增多,试样的硬度逐渐增大;在2~5 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 冷却速度,粒状贝氏体开始生成并逐渐增多,试样的硬度也逐渐增大;在10~15 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 冷却速度,得到铁素体和粒状贝氏体的混合组织,硬度进一步增大;冷却速度增至20 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,试验钢得到贝氏体和少量铁素体的混合组织,试样的硬度继续增大。因此,试验钢以不同冷却速度冷却时,随着冷却速度的增加,试样的维氏硬度呈现逐渐上升趋势。

2.3 临界点确定及转变类型的鉴别

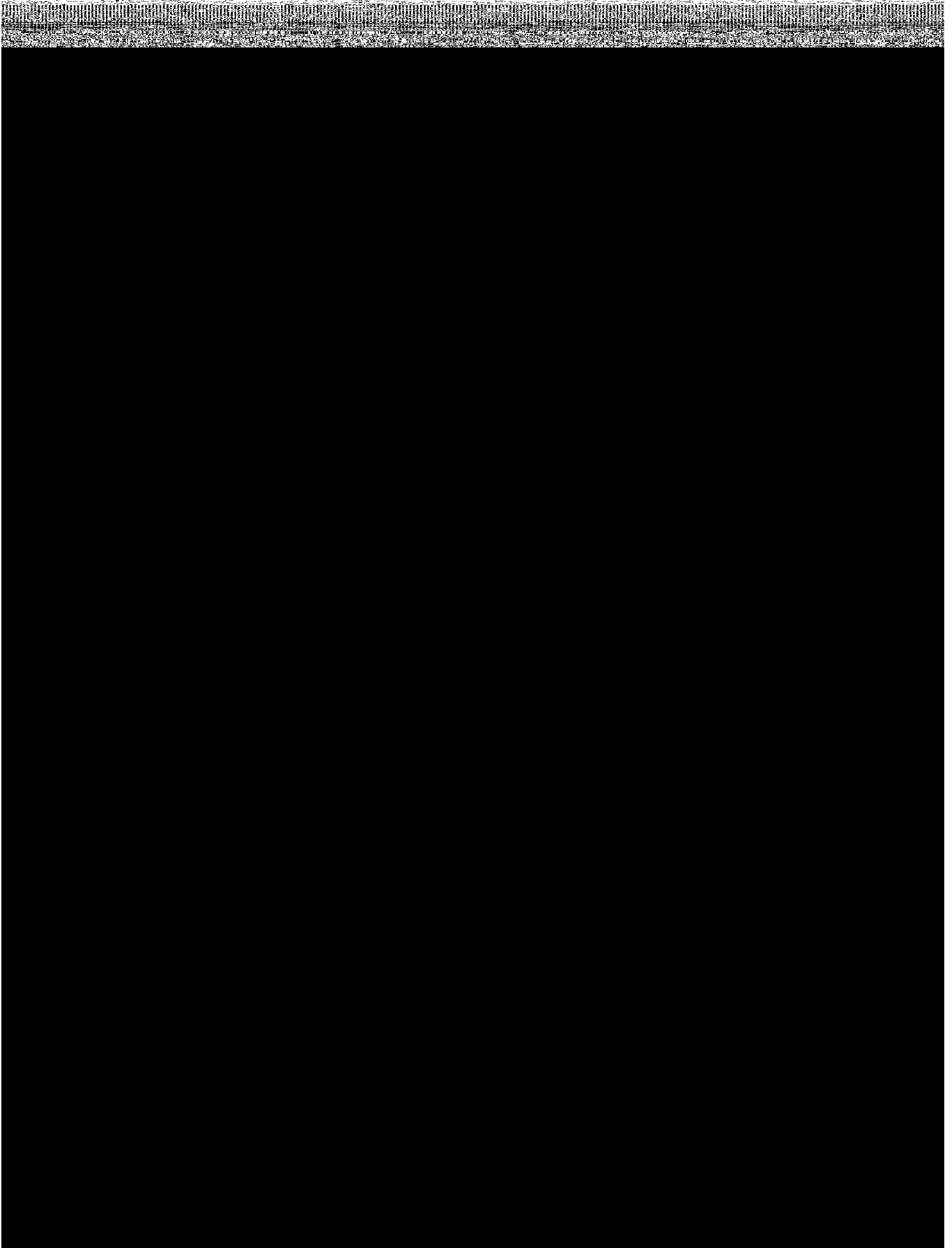
随着试验钢冷却速度的不断增加,铁素体含量明显下降。当冷却速度增加至5 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,试验钢得到铁素体、珠光体以及少量粒状贝氏体的混合组织;当试验钢冷速增加至10 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,试验钢

从表 3 可以看出,实验钢力学性能均符合标准要求。将表 3 用图 2 表示,可以看出,随着稀土

稀土元素 Ce 含量达到 0.009 2% 时,强度有所降低,冲击功出现低值,可能原因是出现了较大夹杂



炼过程中白渣时间 $> 30 \text{ min}$, 并通过换渣冶炼技 度 $(920 \pm 10) ^\circ\text{C}$, 保温时间系数 $1.8 \sim 2.5 \text{ min/mm}$,



热处理态强度分布在 480 ~ 560 MPa 之间,最小模拟焊后热处理态冲击功单值均在 108 J 及以上,相比技术要求均有较大富余量;钢板交货态 Z 向性能均值 > 40% 交货态全厚度硬度分布在 160 ~ 193HB 之间,表明钢板全厚度性能均匀,完全能够满足力学性能的苛刻要求。

法国阿赛洛是长期生产湿硫化氢环境用特厚

钢板的专业厂家,产品实物质量代表国际先进水平,将舞钢研发的 201 mm 厚度 Q345R(R-HIC)钢板与法国阿赛洛相近规格、技术要求钢板主要性能指标进行对比,如表 4 所示。从表 4 可以看出,舞钢公司研发的 201 mm 厚度 Q345R(R-HIC)钢板的综合性能达到法国阿赛洛钢板实物水平。

表 4 钢板力学性能及硬度情况对比

厂家	厚度规格/mm	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	冲击温度/℃	KV_2 /J(横向)	Z/%	硬度(HB)
舞钢	201	480 ~ 560	294 ~ 361	-20	108 ~ 248	39.2 ~ 57.5	160 ~ 193
阿赛洛	202	488 ~ 527	306 ~ 337	-20	105 ~ 170	67.0 ~ 70.0	153 ~ 171

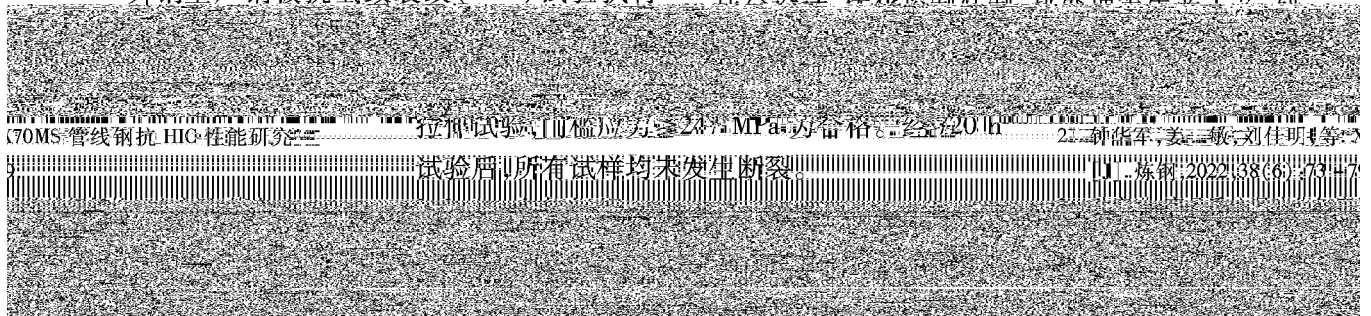
2.2.3 HIC、SSCC 性能

2.2.3.1 钢板抗氢致裂纹(HIC)试验

舞钢生产钢板抗氢致裂纹(HIC)试验执行

3 结语

舞钢按照设计院提出的技术要求,采用改进



70MS 管线钢抗 HIC 性能研究三.....拉伸试验(屈服强度为 235 MPa, 预备热处理 20 h..... 21 钟德军,姜三敏,刘佳明等
试验后,所有试样均未发生断裂。..... 1 炼钢 2022(38(6)):73-77

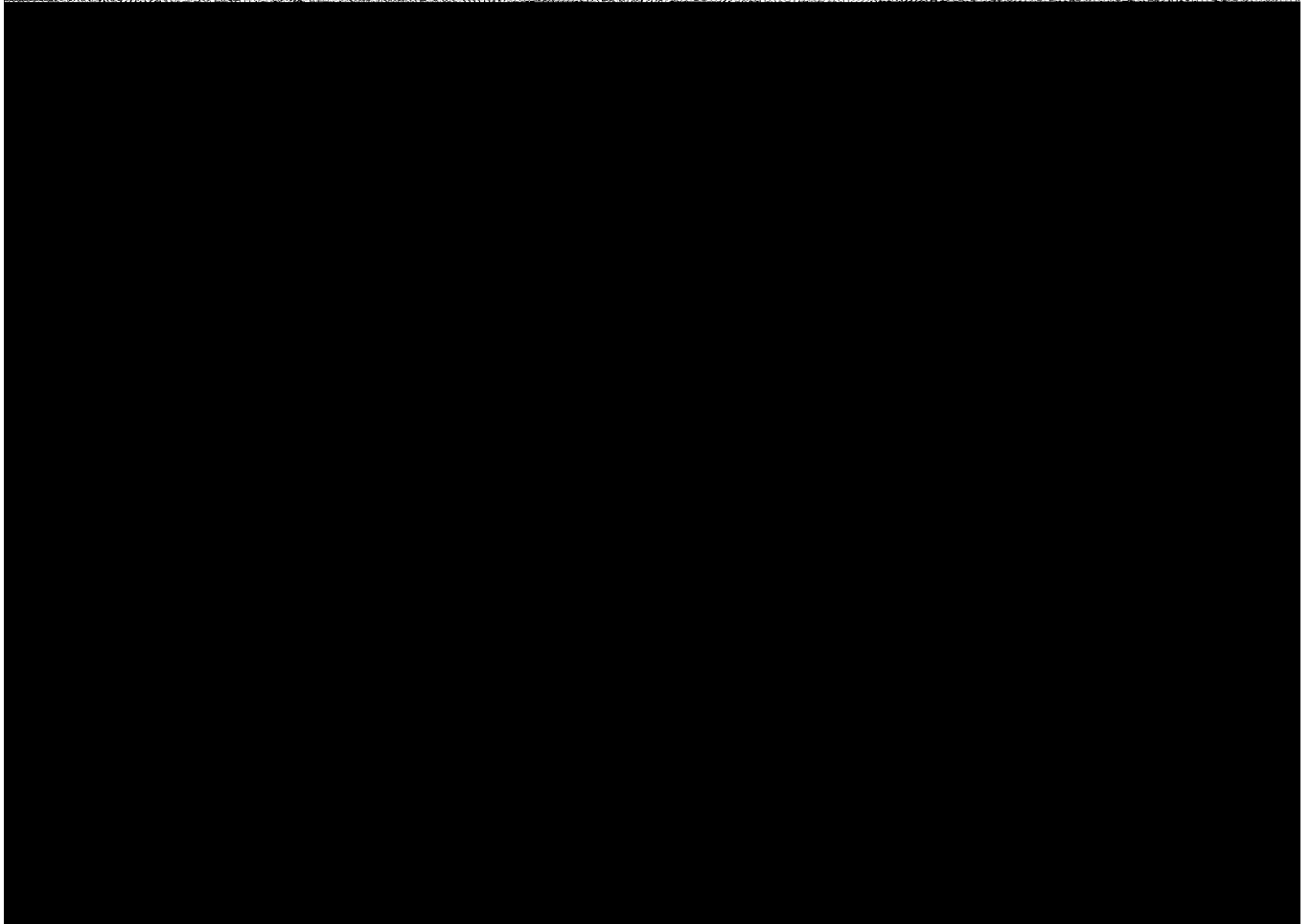
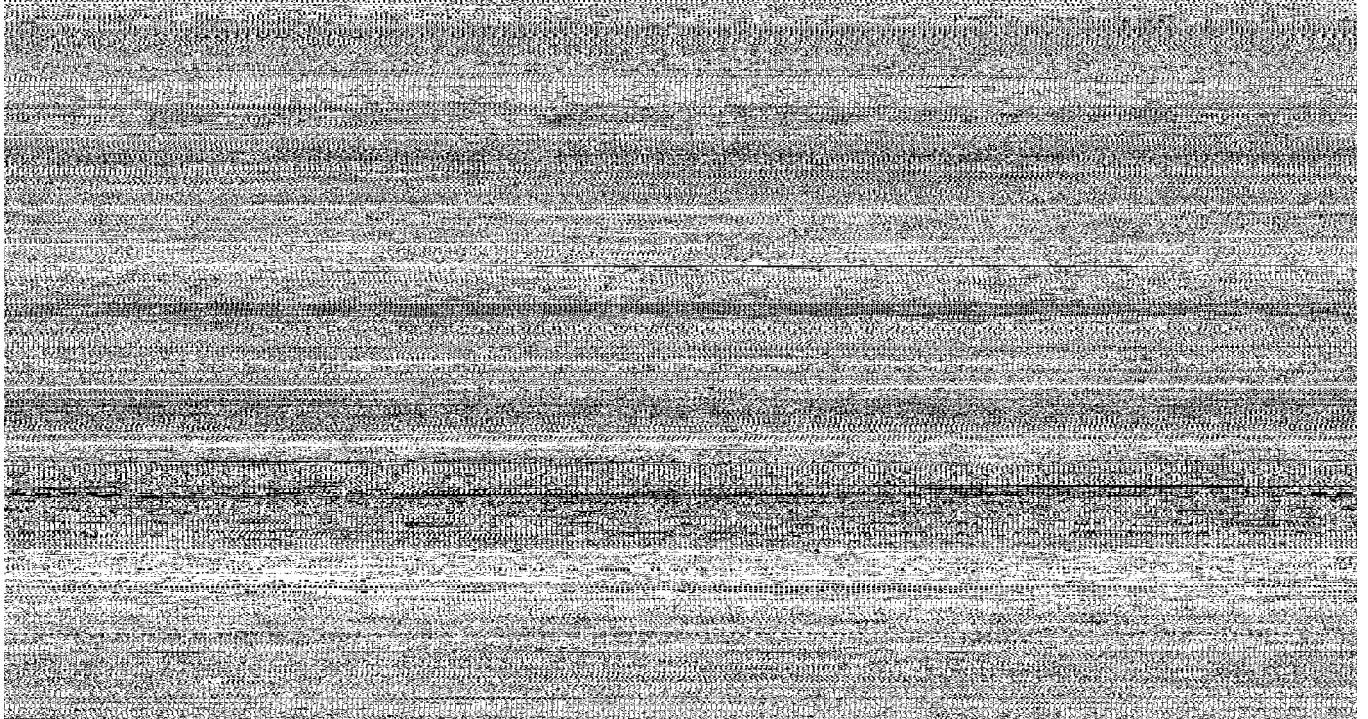
4 结语

唐山中厚板材有限公司为提高转炉热态渣的利用率,对转炉热态渣的循环利用方式进行探索

2011,29(3):29-32.

5 孙礼明. 转炉双联法治炼工艺及其特点[J]. 上海金属,2005,27(2):44-46,51.

6 Inoue R, Suito H. Mechanism of dephosphorization with CaO -



莱钢厚板生产线加热炉提产能降燃耗技术分析

王新龙
(山钢股份莱芜分公司板带厂)

摘 要 为了快速有效地降低加热炉能耗,针对莱钢厚板生产线能源消耗大户加热炉的燃料消耗影响因素进行分析,结合现场实际情况实施技术改造。装钢时序优化提高了装钢节奏,拓展热送热装坯型结构增加了板坯单重、提高了热送热装率;通过加热工艺优化、停轧降温制度、炉体节能技术等方面的措施,延长了加热炉维修周期和使用寿命。莱钢厚板线年产能提高到 172.3 万 t,煤耗指标降低到 1.424 CJ/t,达到了提高产能、降低能耗的预期效果。

关键词 燃料消耗 加热炉 热送热装 辐射 产能

Technical Analysis of Increasing Output Capacity and
Decreasing Fuel Consumption of the Reheating Furnace
in Laigang Heavy Plate Production Line

Wang Xinlong
(Strip Mill of Shandong Iron and Steel Co. ,Ltd. Laiwu Branch)

Abstract In order to reduce the energy consumption of reheating furnace rapidly and effectively ,the factors influencing the fuel consumption of the reheating furnace,the heavy energy consumer in Laigang heavy plate production line,are analyzed,the technical revamp is performed on the basis of the actual condition at site. The charging sequence optimization improves the charging pace,the single piece weight and the hot charging rate are increased by expanding hot charging and hot delivering slab type structure,the maintenance cycle and service life of the reheating furnace are extended by the corresponding measures of reheating process optimization,the temperature decreasing mechanism at rolling interruptions and furnace body energy conservation. The annual production capacity of Laigang heavy plate pro-

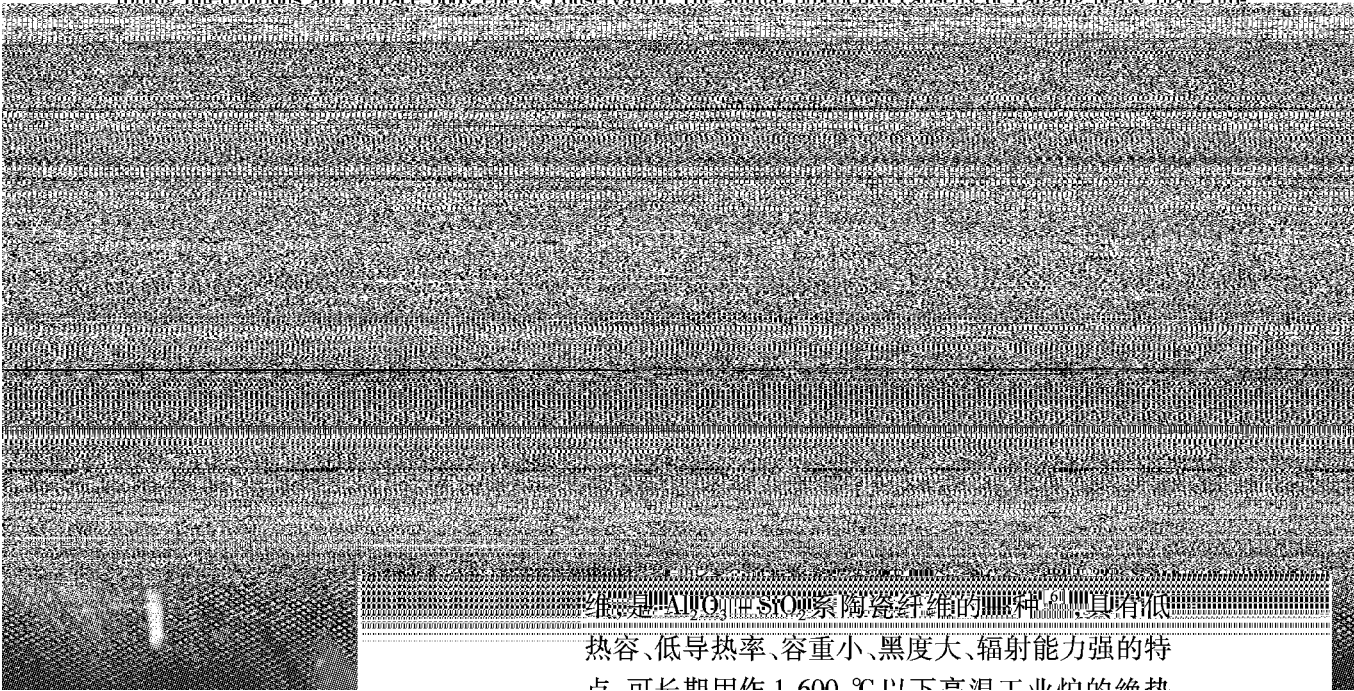


图 1 ALN-SiO₂ 系陶瓷纤维的理化性能
维是 ALN-SiO₂ 系陶瓷纤维的理化性能
热容、低导热率、容重小、黑度大、辐射能力强的特
点,可长期用在 1 600 ℃ 以下高温工业炉的绝热

热量的传递方式有对流、传导和辐射,当炉内温度高于 1 000 ℃时,炉气与金属工件之间的传热主要依靠辐射,加热炉辐射传热约占整个加热炉传热的 70% ~ 80%,可通过提高辐射传热效率来提高加热炉整体传热效率^[7]。辐射传热量除与绝对温度 4 次方成正比外,还与炉衬内壁黑度的大小有关^[8],因此可以通过增加炉衬耐火材料的黑度来提高辐射能。高温远红外喷涂可在耐火材料表面涂上具有高发射率的材料,改变耐材表面的物理性能、形态、组织结构和应力状态,使炉衬表面具有很强的热辐射能力和吸收能力,提高辐射传热的效率,进而提高加热炉热效率,同时保护耐材,延长炉体使用寿命。辐射传热公式见式(1),高温远红外节能喷涂性能见表 2。

$$Q_{\text{辐}} = C_{\text{气壁料}} \left[\left(\frac{T_{\text{气}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{料}}}{100} \right)^4 \right] F_{\text{料}} \quad (1)$$

式中: $Q_{\text{辐}}$ —辐射投热量/W; $T_{\text{气}}$ —炉气温度/℃; $C_{\text{气壁料}}$ —炉气、炉壁向物料传热综合辐射换热系数/(W·m⁻²·℃⁻⁴); $T_{\text{料}}$ —物料温度/℃

热送坯型以来,热送热装率由 2021 年的 55.55% 提高到 2023 年的 66.93%,年度累计待温时间 2021 年 12 372 min,2023 年缩短到 5 688 min,板坯在炉平均加热时间 2021 年 255.11 min,2023 年降低到 226.86 min。2021 年炉体耐材大修以后至今未出现大范围耐材脱落情况,炉况运行良好,延长了加热炉维修周期和使用寿命。

3 结语

莱钢厚板生产线加热炉提产能、降能耗是长期系统的工程,从现场实际情况出发,通过装钢时序优化、拓展新热送坯型、提高热送热装率、优化加热燃烧工艺、炉体节能改进等措施,取得了一定效果。莱钢厚板生产线 2021 年轧制总成品量为 153.6 万 t,煤耗 1.507 GJ/t,2023 年轧制总成品量创历史新高,达到 172.3 万 t,而煤耗则降低到 1.424 GJ/t,煤耗指标降低,节约成本 397.12 万元。2021 年~2023 年莱钢厚板生产线在提高产能、降低能耗方面取得了预期效果,但对标国内外

电极接口松动对 LF 精炼过程的影响及优化措施

王重君 刘志远 么敬文 郭文斌 王武仙 栾文林 宋稳强 王 飞
(唐山中厚板材有限公司)

摘 要 电极接口松动是 LF 精炼过程中的一个常见问题,会导致温度分布不稳定、废气处理效果差、精炼时间和能耗增加,以及产品质量和生产效率下降。为了解决电极接口松动问题,进行生产数据分析,提出优化措施,通过电极紧固技术应用,改善电极接口稳定性。结果表明:电极接口稳定性提高,有效改善了电极导

应力,使其硬度下降,热影响区的冲击韧性显著提高^[2]。但有研究表明,模拟焊后热处理态钢板强度和交货态钢板强度并未发生大的变化^[3],也有报道称模拟焊后热处理态强度与回火态相比进一步降低^[4],这说明对于不同成分体系的母材,进行相应模拟焊后热处理后,所产生变化不一定相同。不同状态 Q690E 试验钢板拉伸性能见图 2。

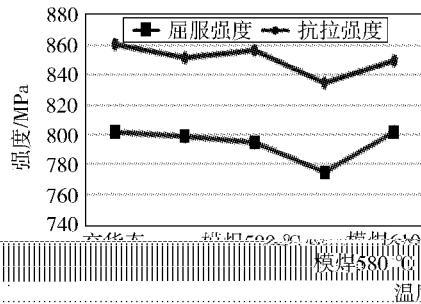


图2 不同状态 Q690E 钢板拉伸性能

从图2中看出,随着模拟焊后热处理温度的提高,Q690E 钢板屈服强度和抗拉强度呈降低趋势,但由于其交货态屈服强度和抗拉强度有较大富余量,则模拟焊后热处理态强度仍有足够的富余量,远高于标准要求。

4.2 模拟焊后热处理对冲击性能的影响

对于调质型高强钢,受设备精度、回火程度等因素的影响,不同试板交货态冲击功存在一定的

4.3 模拟焊后热处理对组织的影响

试验钢板交货态和 610℃ 模拟焊后热处理态试验钢板的显微组织如图 3 所示。

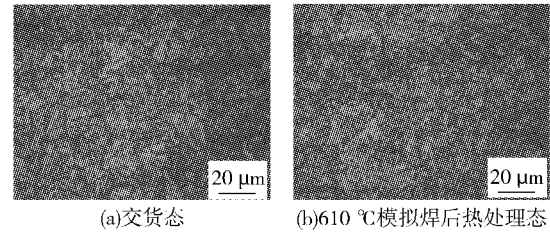


图3 试验钢板交货态、模拟焊后热处理态显微组织

由图3可知,试验钢板交货态和 610℃ 模拟焊后热处理态金相组织都为回火马氏体和回火贝氏体的混合组织,经过高温回火后,残余奥氏体分

解,基体内析出细小渗碳体。由于交货态已经过高温回火并充分分解,再次进行模拟焊后热处理,整体组织变化不明显。温度的模拟焊后热处理对冲击韧性影响

5 结论

(1)研发的 Q690E 钢具有高强度、良好的焊接性,交货态和模拟焊后热处理冲击韧性都满足技术要求。

(2)模拟焊后热处理对 Q690E 钢板性能影响不大,主要因为设计成分中添加

通过对比两种同等级硬度的 27MnTiB 和 35CrMo 耐磨钢板,分析影响材料耐磨性的因素。为了消除热处理过程对耐磨性的影响,对两种钢板采用相同的方法进行热处理,随后进行摩擦磨损实验,对比分析影响两种商用耐磨钢的耐磨性的因素。

1 实验材料及方法

27MnTiB 钢板和 35CrMo 钢板的设计成分如

表 1 所示,工艺流程:120 t 转炉冶炼→LF 钢包炉外精炼→RH 真空处理→板坯连铸→板坯缓冷→步进式加热炉加热→高压水除鳞→轧制→钢板探伤→缓冷→剪切(火焰)切割→取样。对耐磨钢板试样进行淬火+中低温回火热处理。淬火+中低温回火热处理工艺制度:加热温度 880 ℃,保温时间 80 min,水冷至室温;回火温度 450 ℃,保温时间 80 min,空冷。

表 1 27MnTiB 和 35CrMo 耐磨钢的设计成分(质量分数)

钢种	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Cu	B	Ti	Al
27MnTiB	0.26~0.31	0.15~0.35	1.10~1.45	<0.03	<0.03	0.53	<0.001	<0.3	0.000 5~0.003	0.018~0.05	0.015~0.04
35CrMo	0.40	0.28	0.48	0.013	0.014	0.97	0.15	0.11			

通过线切割制取尺寸为(5×5×10) mm 的

后进行抛光处理,直至样品表面光亮无划痕。同

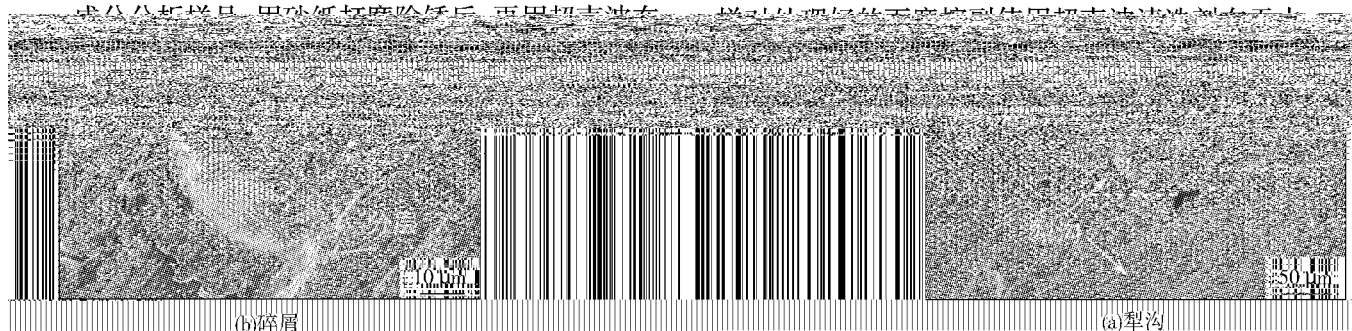
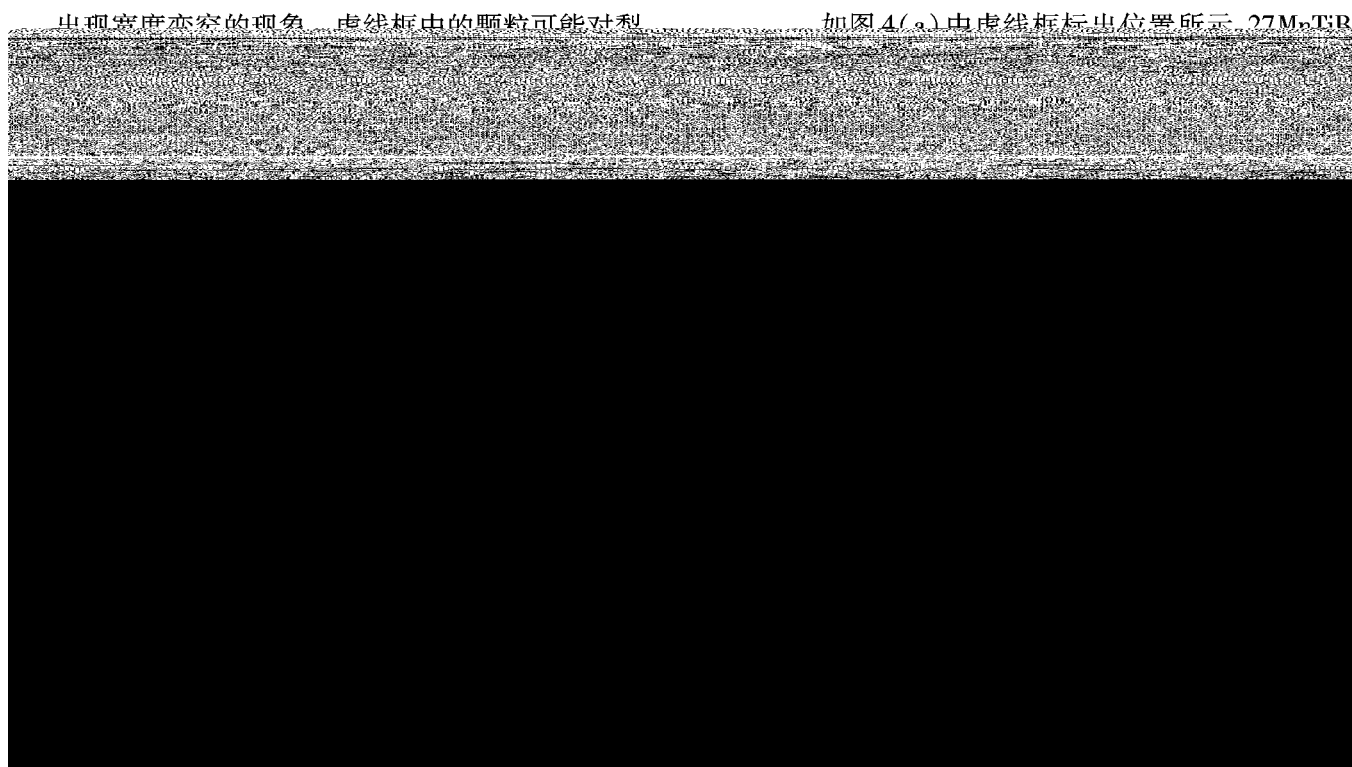


图 5 35CrMo

钢板磨痕形貌



如图 4(a)中虚线框标出位置所示,27MnTiB

马钢 120 t LF 精炼炉钢液温度预测模型的应用与优化实践

孙涛¹ 孙波² 王勇²

(1 马鞍山钢铁股份有限公司制造管理部; 2 马鞍山钢铁股份有限公司长材事业部)

摘 要 针对 LF 精炼炉钢液温度控制过度依赖人工经验的问题, 马钢长材事业部以 120 t LF 精炼炉为研究对象, 基于能量平衡原理, 计算分析 LF 精炼过程中输入电能、合金化、炉渣热效应、钢包内衬散热、渣面辐射、吹氩搅拌和烟气热损失等热量对钢液温度的影响, 建立 LF 精炼钢液温度的预测模型。经过跟踪实际生产试验、测温校正并优化模型, 使模型取得了良好的应用效果。模型预测温度与实际测量值偏差绝对值 ≤ 5 °C 的比例为 97.73%, 偏差绝对值 ≤ 6 °C 的比例为 100%。

关键词 LF 精炼 钢液 温度控制 传热计算 预测模型

The Application and Optimization Practice of Prediction Model for Molten Steel Temperature in Masteels 120 t Ladle Furnace

Sun Tao¹, Sun Bo² and Wang Yong³

(1 Manufacturing Management Department of Ma'anshan Iron and Steel Co., Ltd. ;

ABSTRACT In view of the excessive dependence of molten steel temperature control on artificial experience, Ma'anshan Iron and Steel Long Product Division takes 120 t ladle furnace as the research object, computes and analyzes effects of input electrical energy, alloying, thermal effect of furnace slag, heat dissipation of ladle lining, slag surface radiation, argon blowing and stirring, heat loss of flue gas on the molten steel temperature in accordance with the principle of thermal balance and establishes the prediction model of LF refining molten steel temperature. After actual production testing and racking, temperature measurement calibrating and model optimizing, the model achieves a good application result. The proportion for the absolute deviation value less than or equal to 5 °C between the predicted temperature and measured temperature accounts for 97.73%, the proportion for the absolute deviation value less than or equal to 6 °C between the predicted temperature and measured temperature accounts for 100%.

Keywords LF refining, Molten steel, Temperature control, Heat transfer calculation, Prediction model

引言

LF 精炼炉的主要功能是对转炉初炼钢液进行次精炼, 即钢液升温、成分调整、脱氧、脱硫、去夹杂、均匀钢液成分和温度等处理。LF 作为炼钢和连铸之间的弹性连接工序, 其钢点温度的精确控制对炼钢生产节奏、连铸拉坯质量等都有重要影响^[1-3]。钢液温度低, 液黏度大、流动性差, 易发生低温蓄流, 造成停浇回炉; 钢液温度高, 不仅会降低耐材使用寿命, 增加钢中非金属夹杂物, 影响连铸坯质量。

高温冶金物理、化学反应, 且受传热、传质、传动等因素影响, 现场操作人员仅凭借人工经验进行粗略估计, 无法精确控制钢液温度, 需要通过频繁测温取样调整钢液成分、温度, 在增加劳动强度的同时, 也导致生产节奏变慢及成本升高^[7]。

以马钢公司长材事业部 120 t LF 精炼炉为研究对象, 基于能量守恒原理, 计算分析 LF 精炼过程中输入电能、合金化、炉渣热效应、钢包内衬散热、渣面辐射、底吹氩和烟气热损失等热量对钢液温度的影响, 并建立 LF 炉精炼过程钢液温度预测模型。LF 炉设备的主要工艺参数、钢包容量为

0 引言

行二
去气
精炼
液终
速、包
则钢
钢液
寿命

表 3 钢包各层耐火材料及外壳物性参数

材料	密度/(g · cm ⁻³)	比热容/(J · kg ⁻¹ · °C ⁻¹)	导热系数/(W · m ⁻¹ · °C ⁻¹)
镁碳砖	3.06	1 200	$2.4 \times 10^{-3}t_1 + 0.591 0$
刚玉尖晶石预制块	3.20	1 023	$1.9 \times 10^{-3}t_1 + 0.183 9$
刚玉质浇注料	3.03	1 066	$1.4 \times 10^{-3}t_1 + 0.451 1$
高铝质浇注料	2.40	1 028	$3.0 \times 10^{-4}t_1 + 1.018 8$
复合反射绝热板	0.40	1 340	0.056(600 °C)
钢壳	7.80	483.5	46.667

钢包的外壳温度一般在 160 ~ 280 °C 之间,钢壳与周围环境之间主要以辐射散热为主,计算见式(12)。

$$q_{\text{shell}} = C_s \varepsilon_s \sigma [(t_s + 273)^4 - (t_a + 273)^4] \quad (12)$$

式中: q_{shell} —钢包外壳辐射热通量/(W · m⁻²); C_s —钢壳辐射系数,取值 0.9^[12]; ε_s —钢壳黑度系数,取值 0.8^[13]; t_s —钢包外壳温度/°C; t_a —环境温度/°C; σ —斯蒂芬-玻尔兹曼常数,取值 5.67×10^{-8} W/(m² · K⁴)。根据文献[14]可知,静置和浇铸过程中钢液热量主要损失于钢包包壁。包底散热做简化处理,只计算辐射传热,得出 120 t LF 炉钢包内衬散热量引起的钢液温降约为 0.15 ~ 0.30 °C/min。

1.5 渣面热损失

由于 LF 炉精炼渣面温度一般比较高,渣面辐射传热占主导作用,计算时可以忽略影响较小的对流传热过程^[8],渣面辐射散热量 Q_f 可以通过式(13)进行计算。

$$Q_f = C_{sl} \varepsilon_{sl} \sigma A [(t_{sl} + 273)^4 - (t_a + 273)^4] \quad (13)$$

其中: C_{sl} —渣面辐射系数,取值 0.9^[14];

裸露面积越大,钢液向大气散失的热量就越多,钢液裸露面积最终由氩气流量决定,文献[16]中建立的模型给出了钢液裸露面积与氩气流量、渣层厚度等之间关系如式(17)所示,吹氩产生的热量损失 Q_{gas} 见式(14) ~ 式(17)。

$$Q_{\text{gas}} = Q_{\text{Ar}} + Q_{\text{st}} \quad (14)$$

$$Q_{\text{Ar}} = \frac{M_{\text{Ar}}}{22.4} \cdot C_{\text{pAr}} \cdot V_{\text{Ar}} \cdot (t_{\text{st}} - t_{\text{Ar}}) \quad (15)$$

$$Q_{\text{st}} = A_{\text{st}} \varepsilon_{\text{st}} \sigma [(t_{\text{st}} + 273)^4 - (t_a + 273)^4] \quad (16)$$

$$\frac{A_{\text{st}}}{H^2} = -0.76 \times \left(\frac{Q}{g^{0.5} \times H^{2.5}} \right)^{0.4} + 7.15 \times \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_l} \right)^{-0.5} \times \left(\frac{Q}{g^{0.5} \times H^{2.5}} \right)^{0.73} \times \left(\frac{h}{H} \right)^{-0.5} \quad (17)$$

式中: Q_{Ar} —氩气吸热量/kJ; Q_{st} —钢液辐射散热量/J; M_{Ar} —氩气的摩尔质量/(g · mol⁻¹); C_{pAr} —氩气比热容/(kJ · kg⁻¹ · °C⁻¹); V_{Ar} —氩气体积/Nm³; t_{st} —钢液温度/°C; t_{Ar} —氩气初始温度/°C; A_{st} —钢液裸露面积/m²; ε_{st} —钢液黑度系数,取值 0.4^[14]; σ —斯蒂芬-玻尔兹曼常数,取值 5.67×10^{-8} W/(m² · K⁴); t_a —环境温度/°C。

参考文献

- 1 王 强,孙文强,徐宪东,等. 钢包精炼炉(LF)作为可削减负荷的灵活性评估[J]. 材料与冶金学报,2022,21(2):150-156.
- 2 Xu X D, Sun W Q, Abeysekera M, et al. Quantifying the flexibility from industrial steam systems for supporting the power grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(1):313-322.
- 3 任铁良,王卫红,刘 硕,等. LF 钢水温度预报和最优供电模型[J]. 冶金能源,2020,39(3):48-52.
- 4 孙 波,张良明,吴耀光,等. 马钢 CSP 流程 RH 精炼钢液温度预测模型[J]. 中国冶金,2018,28(8):48-52.
- 5 王 星,王国连,杨荣光,等. 中间包钢水温度控制研究及优化[J]. 中国冶金,2018,28(8):48-52.
- 10 梁英教,车荫昌,刘晓霞,等. 无机物热力学数据手册[M]. 沈阳:东北大学出版社,1993:17-33.
- 11 宋 健,孙 波,刘前芝,等. 120 t 复合反射绝热板钢包试验研究[J]. 安徽工业大学学报:自然科学版,2022,39(4):371-376.
- 12 王卫华,钟 凯,曹 勇. 复合反射绝热板在 210 t 钢包上的传热效果[J]. 炼钢,2014,30(5):70-74.
- 13 江成斌. 40 t 钢包底吹氩过程流热耦合的数值模拟[J]. 上海金属,2018,40(4):99-104.
- 14 朱光俊,杨治立,张 威,等. 重钢炼钢厂 80 t 钢包热分析[J]. 特殊钢,2006,22(4):40-43.
- 15 曹 贺. LF 精炼过程钢液成分与温度控制模型的开发与应用[D]. 沈阳:东北大学,2013:42-44.

