1995 年创刊
公开发行(双月刊)

# 宽 厚 板

KUAN HOU BAN

2025 年 4 月 30 日出版
第 31 卷第 2 期(总第 179 期)

《宽厚板》杂志编委会

**编委会主任:**

吝章国

**编委会委员**(按姓氏笔画为序):

王少义　韦　明　邓想涛
龙　杰　帅　勇　刘建磊
李　杰　杨俊锋　杨增国
吴俊平　吴　铠　张　朋
陈子刚　庞辉勇　赵向政
赵国昌　郝小强　袁忠业
徐海健　黄大军　彭世宝
廖仕军　戴文笠

## 目　　次

**·试验研究·**

X80M 级别管线钢铸坯表面质量提升与工业实践
…… 李　恩　孟庆勇　路博勋　潘宏伟　温巨文　祖　刚　秦铁玉(1)

147 mm 特厚正火型低温压力容器用 SA516Gr70N 钢板的开发与生产
…… 胡冠群　韩雪冬　张兆明　刘彦强　牛　涵(6)

临氢设备用特厚特宽 12Cr2Mo1VR 钢板的研制与开发
…… 杨鸿宇　员强鹏　吕富强　王　震(9)

100 mm 及以上特厚海上风电用钢 DH36－Z35 的研发与生产
…… 陈敏侠　孙小平　易春洪(13)

**·生产实践·**

Te 处理对非调质钢中硫化物形态的影响
…… 杨　敏　邓　伟　周　蕾　储晓明(17)

转炉炉衬修补技术的开发与应用
…… 安海瑞　刘　涛　张学峰　康　锁　张　丹　赵本强　么敬文(21)

工业固废渣铁转炉回收利用的生产实践
…… 张仕洋　潘　军　王　勇　解文中(27)

钢包滑板连用技术的研究和应用
…… 朱斐斐　王重君　张　杰　董　杰　宋稳强　么敬文(32)

**·技术讨论·**

390 MPa 级耐候钢板性能不合格原因分析及解决措施
…… 齐　燕　葛　洋(36)

板坯热送过程表面快冷工艺数值模拟研究
…… 杨金虎　李继峰　葛阳阳　韩竞雄　冯俊鹏(39)

洁净钢生产中耐火材料的功能设计及技术
…… 王爱东　孔祥凤　徐海芳(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:**孔祥丽
**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:**wykhb2003@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. 31, No. 2 April 2025

## CONTENTS

**· Test and Research ·**

Slab Surface Quality Improvement and Industrial Practice of X80M Grade Pipeline Steel
..... *Li Si, Meng Qingyong, Lu Boxun, Pan Hongwei, Wen Juwen, Zu Gang and Qin Tieyu* (1)

Development and Production of 147 mm Extra Heavy Normalized Type SA516Gr70N Steel Plate for Low – temperature Pressure Vessel
..... *Hu Guanqun, Han Xuedong, Zhang Zhaoming, Liu Yanqiang and Niu Han* (6)

Research and Development of Extra Heavy and Extra Wide 12Cr2Mo1VR Steel Plate for Hydrogen Service Equipment
..... *Yang Hongyu, Yuan Qiangpeng, Lyu Fuqiang and Wang Zhen* (9)

Research and Production of 100 mm Thickness and Greater Extra Heavy Steel DH36 – Z35 for Offshore Wind Power
..... *Chen Minxia, Sun Xiaoping and Yi Chunhong* (13)

**· Production Practice ·**

Influence of Te Treatment on the Morphology of Sulfides in Non – quenched and Tempered Steel
..... *Yang Min, Deng Wei, Zhou Lei and Chu Xiaoming* (17)

The Development and Application of Converter Lining Repair Technology
..... *An Hairui, Liu Tao, Zhang Xuefeng, Kang Suo, Zhang Dan, Zhao Benqiang and Yao Jingwen* (21)

Production Practice of Industrial Solid Waste Slag Iron Recovery and Utilization in Converter Steelmaking Production
..... *Zhang Shiyang, Pan Jun, Wang Yong and Xie Wenzhong* (27)

Research and Application of Continuous Operation Technology for Ladle Sliding Plate
..... *Zhu Feifei, Wang Chongjun, Zhang Jie, Dong Jie, Song Wenqiang and Yao Jingwen* (32)

**· Technical Discussion ·**

Causes Analysis and Countermeasures of Mechanical Properties Nonconformity for 390 MPa Grade Weathering Steel Plate
..... *Qi Yan and Ge Yang* (36)

Numerical Simulation of Surface Rapid Cooling Process in Slab Hot Delivery Process
..... *Yang Jinhu, Li Jifeng, Ge Yangyang, Han Jingxiong and Feng Junpeng* (39)

Function Design and Technology Application of the Refractories in Clean – Steel Production
..... *Wang Aidong, Kong Xiangfeng and Xu Haifang* (43)

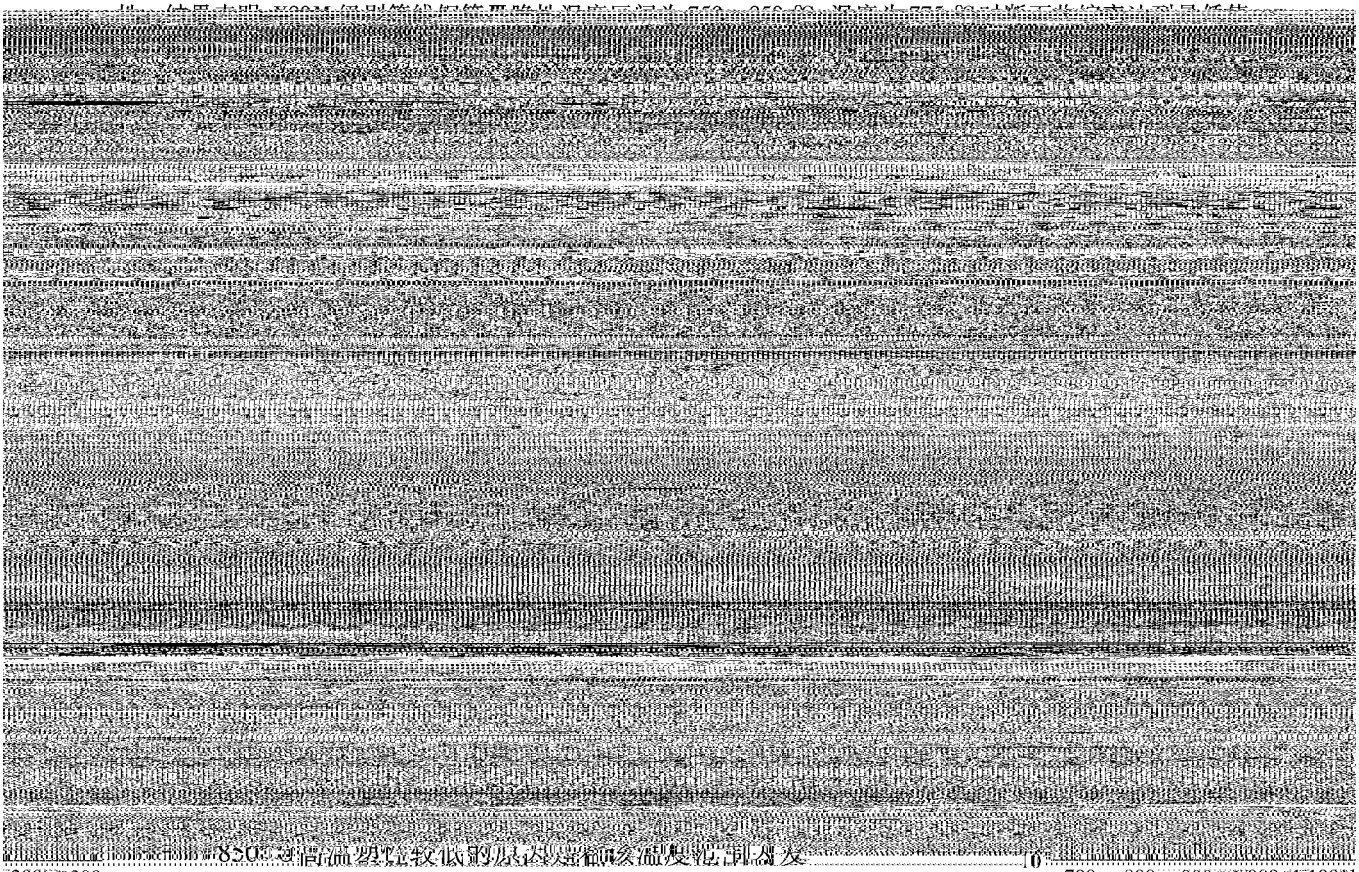
**Competent Unit**: Wuyang Iron and Steel Co., Ltd.
**Sponsored by**: Wuyang Iron and Steel Co., Ltd.
**Edited and Published by**: Editorial Office of WIDE AND HEAVY PLATE
**Address**: Wugang City, Henan. **Post Code**: 462500

·试验研究·

# X80M 级别管线钢铸坯表面质量提升与工业实践

李　思　孟庆勇　路博勋　潘宏伟　温巨文　祖　刚　秦铁玉
（唐山钢铁集团有限责任公司）

**摘　要**　根据 X80M 高级别管线钢服役环境需要，采用 C－Mn－Si－Cr－Nb－Ti－V－Mo－Ni 成分设计，冶炼过程严格控制 S、P 等有害元素含量。通过 Gleeble 3500 热模拟试验机测定 X80M 级别管线钢的高温热塑



200 300

700 800 900 1 000 1 100

温度/℃

性曲线

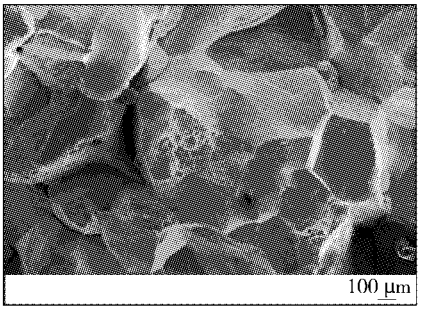
750 ~ 850 ℃

针对750、800

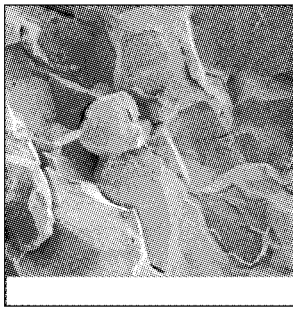
生奥氏体→铁素体转变，生成的铁素体膜造成晶界弱化，成为高温塑性薄弱环节。此外，钢中合金元素种类较多，冷却过程伴有不同物相析出，综合作用导致此温度区间的高温热塑性偏低。

图 2　X80M 级别管线钢高温热塑

为了分析 X80M 级别管线钢在温度范围高温热塑性偏低的原因，




(b)800 ℃



(a)750 ℃

图4为X80M级别管线钢浇铸过程曲线。由图4可知，浇铸过程全程恒拉速，结晶器液位的波动≤±3 mm，塞棒曲线平稳。从浇铸曲线可知，X80M级别管线钢单浇次9炉连浇，经过钙处理后钢水可浇性良好，钢中O≤0.001 2%，钢水纯净度较好，停浇水口无明显结瘤，液位保持稳定。

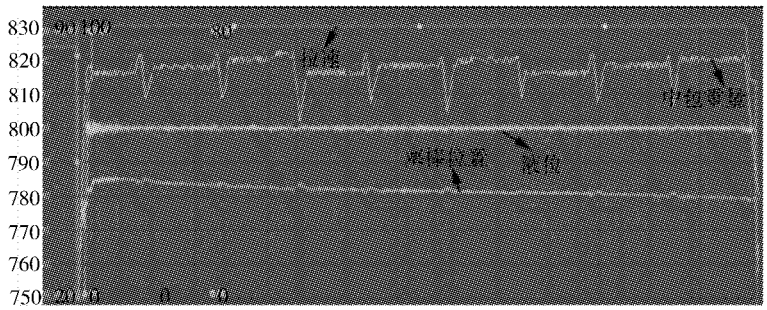
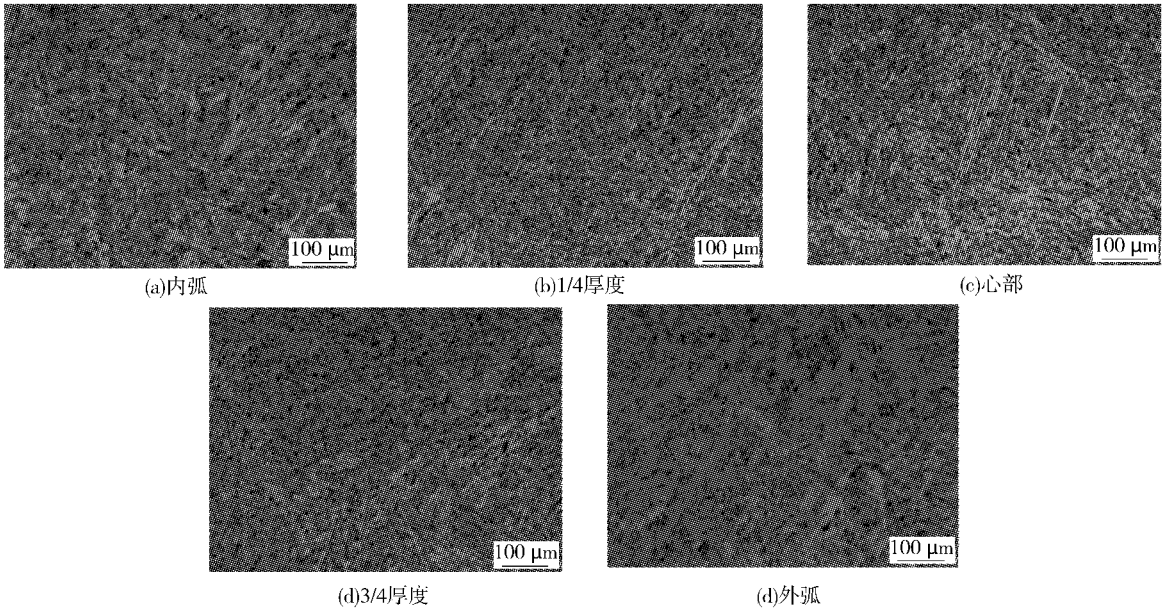



图4　X80M级别管线钢浇铸过程曲线

## 4　铸坯表面质量分析

为了进一步分析X80M级别管线钢铸坯角部质量，针对铸坯窄面厚度方向凝固组织进行分析，如图5所示。



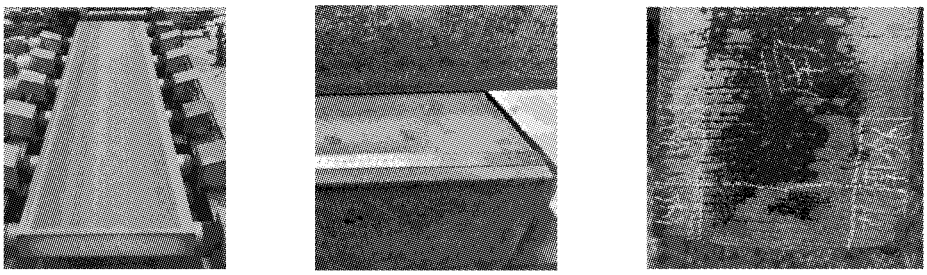

(a)内弧　(b)1/4厚度　(c)心部　(d)3/4厚度　(d)外弧

图5　X80M级别管线钢铸坯窄面厚度方向组织形貌

由图5可知，铸坯厚度方向不同位置处凝固组织均较为细小且致密，主要为针状铁素体，见

坯角部裂纹的风险。

为了明确工艺优化对铸坯表面质量的影响



(a)热态铸坯　　(b)冷态铸坯　　(c)铸坯泡酸

图 7　X80M 级别管线钢铸坯的热态、冷态及角部泡酸情况

由图 6、图 7 可知,在热态铸坯、下线冷检铸坯上,低倍质量检验和铸坯角部泡酸试验中均未发现裂纹缺陷,铸坯表面质量良好,为后续轧制热轧卷板表面质量提升奠定基础。

## 5　X80M 级别管线钢热轧卷板表面质量

X80M 级别管线钢铸坯经过工艺优化后进行热轧试验,热轧卷板的表面质量如图 8 所示。由图 8 可知,热轧卷板的表面质量良好,边部无裂纹缺陷,也从侧面验证经过工艺优化的 X80M 级别管线钢铸坯表面质量得到显著改善,为后续热轧卷板表面质量提升以及提供满足探伤要求的优质铸坯创造了有利条件,解决了因热轧卷板边部裂纹缺陷造成制管后探伤不合格的质量问题。

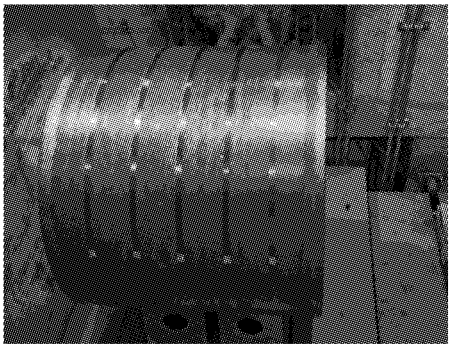


图 8　X80M 级别管线钢热轧卷板表面质量

## 6　结论

(1)X80M 级别管线钢的第Ⅲ脆性区温度为 750 ~ 850 ℃,当温度为 775 ℃时断面收缩率达到最低值 29.6%,连铸矫直阶段铸坯存在产生角部裂纹的风险。

(2)在优化二冷模型基础上采用强冷模式,比水量为 1.1 L/t,铸坯矫直段角部温度稳定控制在 720 ~ 750 ℃,成功避开第Ⅲ脆性区。

(3)经过工艺优化后,X80M 级别管线钢铸坯表面质量良好,热态铸坯、下线冷检铸坯、低倍检验和铸坯角部泡酸试验等多重手段检验均未发现裂纹缺陷。

(4)铸坯厚度方向凝固组织均细小且致密,主要为针状铁素体 + 贝氏体组织,这种类型的组织强度高、韧性好,具有良好的抵抗裂纹扩展能力,有助于降低产生铸坯角部裂纹的风险。

### 参考文献


1　郑　磊,傅俊岩. 高等级管线钢的发展现状[J]. 钢铁,2006,41(10):1 - 10.

2　赵显鹏,齐天圣,王振华,等. 超快冷技术生产 X80 级管线钢组织和性能的研究[J]. 宽厚板,2022,28(3):43 - 48.

3　张彩军,蔡开科,袁伟霞,等. 管线钢的性能要求与炼钢生产特点[J]. 炼钢,2002,18(5):40 - 46.

4　王复越,任　毅,张　帅,等. 我国管线钢生产技术的进步[J]. 轧钢,2024,41(5):79 - 86.

5　张伟卫,熊庆人,吉玲康,等. 国内管线钢生产应用现状及发展前景[J]. 焊管,2011,34(1):5 - 8.

6　廖　波,肖福仁. 针状铁素体管线钢组织及强韧化机理研究[J]. 材料热处理学报,2009,30(2):57 - 62.

7　王新华,李秀刚,李　强,等. X80 管线钢板中条串状 CaO - $Al_2O_3$ 系非金属夹杂物的控制[J]. 金属学报,2013,49(5):553 - 561.

8　文新理,蒋　波,刘　翔,等. 管线钢 X80 卷板横裂纹成因与轧制工艺改进[J]. 材料热处理学报,2014,35(11):91 - 96.

9　陈从俊,刘　丹. 连铸坯轧制中厚板探伤不合格原因分析与改进措施[J]. 宽厚板,2023,29(6):35 - 37.

10　孔君华. 高钢级 X80 管线钢工艺、组织与性能的研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2005.

11　韩孝永. 铌、钒、钛在微合金钢中的作用[J]. 宽厚板,2006,12(1):39 - 41.

12　黄开文. X80 和 X100 钢级管线钢的合金化原理和生产要点[J]. 轧钢,2004,21(6):55 - 58.



李　思,女,2013 年毕业于东华理工大学软件工程专业,工程师。

孟庆勇,男,博士,正高级工程师,通讯作者。


收稿日期:2025 - 02 - 16

# 147 mm特厚正火型低温压力容器用SA516Gr70N钢板的开发与生产

胡冠群 韩雪冬 张兆明 刘彦强 牛 涵
（河钢集团舞钢公司）

**摘 要** 针对正火型低温压力容器用SA516Gr70N钢板的性能及使用要求，通过成分设计优化，适量添加Nb、V等微合金元素，结合两阶段控制轧制技术，发挥微合金元素固溶强化、细晶强化和沉淀析出强化作用，成功开发出147 mm大厚度正火型低温压力容器用SA516Gr70N钢板，其力学性能得到提高，尤其是-46 ℃低温冲击性能良好，硬度分布均匀，满足客户需求。

**关键词** 大厚度 压力容器钢 控制轧制 低温冲击性能

# Development and Production of 147 mm Extra Heavy Normalized Type SA516Gr70N Steel Plate for Low – temperature Pressure Vessel

Hu Guanqun, Han Xuedong, Zhang Zhaoming, Liu Yanqiang and Niu Han
(HBIS Group Wusteel Company)

**Abstract** Aiming at the properties and application requirements of normalized type SA516Gr70N steel plate for low – temperature pressure vessel, through the optimization of composition design, the appropriate addition of microalloying elements such as Nb and V, combined with the two – stage controlled rolling technology, the solid solution strengthening, fine grain strengthening and precipitation strengthening effects of microalloying elements are brought into play. The 147 mm extra heavy normalized type SA516Gr70N steel plate for low temperature pressure vessel is successfully developed. These plates are of excellent mechanical properties with good impact resistance at -46 ℃ and uniform hardness distribution, meeting customer requirements.

**Keywords** Large thickness, Pressure vessel steel, Controlled rolling, Low – temperature impact properties

## 0 前言

SA516Gr70N钢板广泛应用于石油、化工、发电、锅炉等行业的装备制造，主要制作反应器、换热器、分离器、球罐、煤气罐、液化气罐、核能反应堆压力壳、锅炉汽包、水电站高压水管、水轮涡壳等设备及构件，作为美国ASTM SA 516/A516M标准中规定的一种碳素钢板材料，SA516Gr70N钢板通常以热轧或正火状态交货，要求拉伸强度

## 1 成分设计及性能要求

成分是实现钢板最终力学性能 刻。河钢集团舞钢公司在Nb、V微合金化成分设 能[1]，因此，化学

计优化的基础上，配合控轧控冷技术成功生产出147 mm特厚低温压力容器用SA516Gr70N钢板，保证板厚1/2处-46 ℃低温冲击性能以及表面硬度≤200HBW的要求，以开发、生产具有良好抗冲击性能、抗疲劳性能、抗层状撕裂性能、较小温度形变、优异焊接性能且纯净度高、碳当量低、抗硫化氢能力强的钢板，满足客户的应用要求。

的基础。根据化学成分中各元素对钢板力学性能的影响，在成分设计时对成分配比进行优化，同时考虑成本控制、力学性能要求、轧制、热处理和焊接性能等因素。经过成分优化，SA516Gr70N 钢板设计成分为中 C、高 Mn 和添加适量 Nb、V 的成分体系。Mn 元素能够降低奥氏体转变为铁素体的相变温度，细化晶粒；Nb 元素能够在轧制过程中使变形渗透到轧件心部，同时保证钢板以较低碳当量获得较高的强度，并提高冲击韧性；而 V 元素在铁素体中有沉淀强化的效果，可以提高强度，改善韧性[2]。SA516Gr70N 钢板的设计成分见表 1。

**表 1　SA516Gr70N 钢板的化学成分范围（质量分数）**　　%

| C | Mn | Nb | V | Si | S | P |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.16 ~ 0.18 | 1.4 ~ 1.5 | 0.015 ~ 0.020 | 0.02 ~ 0.03 | 0.15 ~ 0.40 | ≤0.005 | ≤0.015 |

### 1.2　性能要求

147 mm 特厚 SA516Gr70N 钢板要求板厚 1/2 处交货态和模拟焊后热处理态 -46 ℃低温冲击功值 ≥ 41 J，且交货态表面硬度 ≤ 200HBW。SA516Gr70N 钢板力学性能要求见表 2，模拟焊后热处理的工艺制度为：(610 ± 10) ℃ ×9/12 h。

**表 2　SA516Gr70N 钢板的力学性能要求**

| $R_{eH}$/ MPa | $R_m$/ MPa | $A$/ % | 冲击温度/ ℃ | $KV_2$/ J |
|---|---|---|---|---|
| ≥260 | 485 ~ 620 | ≥17 | -46 | 41 |

## 2　生产工艺

SA516Gr70N 钢板生产工艺流程为：初炼→VD 真空脱气处理→浇铸→钢锭温送、温清→钢锭加热→控轧控冷→表面检查→探伤→正火→检验入库。

### 2.1　炼钢及钢锭浇铸控制

由于钢板成品厚度较大，为保证大厚度钢板低温冲击性能和不同位置力学性能的均匀性，将

[illegible]钢水纯净度并降低夹杂物[illegible]理，改善夹杂物形态；在钢[illegible]较低的过热度，减轻钢板[illegible]热，经充分奥氏体化后出[illegible]式轧制。在高压水除鳞箱[illegible]改善成品钢板的内部疏松[illegible]压下率控制在 30% 以上，[illegible]冷装置冷却中间坯，增大

阶段终轧温度 800 ~ 850 ℃，轧制后利用 ACC 装置进行加速冷却，返红温度控制在 670 ~ 720 ℃。5 块 147 mm 厚度 SA516Gr70N 钢板控轧控冷的主要工艺参数见表 3。

**表 3　147 mm 厚度 SA516Gr70N 钢板控轧控冷的主要工艺参数**

| 钢板编号 | 终轧温度/℃ | ACC 返红温度/℃ |
|---|---|---|
| 1# | 810 | 680 |
| 2# | 820 | 680 |
| 3# | 835 | 690 |
| 4# | 825 | 710 |
| 5# | 830 | 670 |

### 2.3　热处理工艺

热处理工艺路线如图 1 所示。

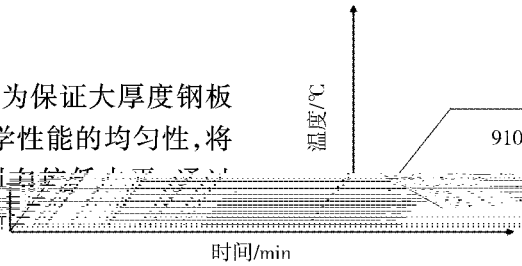



图 1　147 mm 特厚正火型 SA516Gr70N 钢板热处理工艺路线

为了实现最佳的强韧性能匹配，确保钢板表面硬度分布均匀，在生产中采用两阶段控轧控冷工艺，并优化热处理工艺。利用车底炉对 SA516Gr70N 钢板进行正火处理，正火温度范围 900 ~ 930 ℃，保温时间 2.0 ~ 2.5 min/mm，保证钢板加热均匀，使得钢板厚度 1/2 处充分奥氏体

[illegible]VD 真空脱气处理提高[illegible]含量；将钢水进行钙处[illegible]锭浇铸过程中保持钢水[illegible]内部元素偏析程度[3]。

### 2.2　控轧控冷工艺

钢锭在均热炉中加[illegible]炉，采用两阶段控轧方[illegible]进行钢锭表面除鳞，为[illegible]缺陷，粗轧前 3 个道次[illegible]暗钢过程中利用中间水

# 临氢设备用特厚特宽12Cr2Mo1VR钢板的研制与开发

杨鸿宇[1] 员强鹏[1] 吕富强[2] 王 震[2]
（1 南京钢铁股份有限公司;2 山东钢铁股份有限公司制造管理部）

**摘 要** 为了满足临氢设备用特厚特宽钢板的市场需求,南京钢铁股份有限公司依托5 000 mm宽厚板轧机,成功量产(150×4 500) mm特厚特宽12Cr2Mo1VR钢板。生产实践表明:采用低碳、低锰、超低硫磷成分设计,结合Cr、Mo、V、Ni等多元合金化,在保证焊接性能与低温韧性的同时,增强抗高温回火性能与心部冲击性能;运用纯净钢冶炼技术严控钢水成分,通过低偏析连铸降低铸坯夹杂物数量与偏析量;采用大压下量高渗透轧制以细化晶粒,利用调质热处理获得理想的回火贝氏体组织,实现强韧性匹配,其室温与高温拉伸、冷弯、冲击等性能优异,模拟焊后热处理性能稳定,打破了国外技术垄断,为临氢设备制造提供坚实的材料保障。

**关键词** 压力容器 临氢12Cr2Mo1VR钢板 大压下量 贝氏体

# Research and Development of Extra Heavy and Extra Wide 12Cr2Mo1VR Steel Plate for Hydrogen Service Equipment

Yang Hongyu[1], Yuan Qiangpeng[1], Lyu Fuqiang[2] and Wang Zhen[2]
(1 Nanjing Iron and Steel Co., Ltd.; 2 Manufacturing Management Department, Shandong Iron and Steel Co., Ltd.)

**Abstract** In order to meet the market demand of extra heavy and extra wide steel plate for hydrogen service equipment, Nanjing Iron and Steel Co., Ltd. successfully produces extra heavy and extra wide 12Cr2Mo1VR steel plate of (150×4 500) mm by means of 5 000 mm wide and heavy plate rolling mill. The production practice shows that by adopting a composition design of low-carbon, low-manganese, ultra-low sulfur and phosphorus contents in combination with multiple alloying elements such as chromium, molybdenum, vanadium and nickel, the weldability and low-temperature toughness are ensured, while the high-temperature tempering properties and the impact properties of the plate center are enhanced. The molten steel composition is strictly controlled by applying clean steel metallurgical technology, the amounts of inclusions and segregation are reduced by means of low segregation continuous casting. The grains are refined by heavy draft high penetration rolling, the desired tempering bainite is attained by quenching and tempering treatment, the matching of strength and toughness is achieved with excellent properties of high temperature tensile strength, cold bending performance, impact toughness and stable simulated post welding heat treatment properties, which breaks the foreign technology monopoly and provides the solid material guarantee for the hygrogen service equipment manufacturing.

**Keywords** Pressure vessel, 12Cr2Mo1VR steel plate for hydrogen service, Heavy draft, Bainite

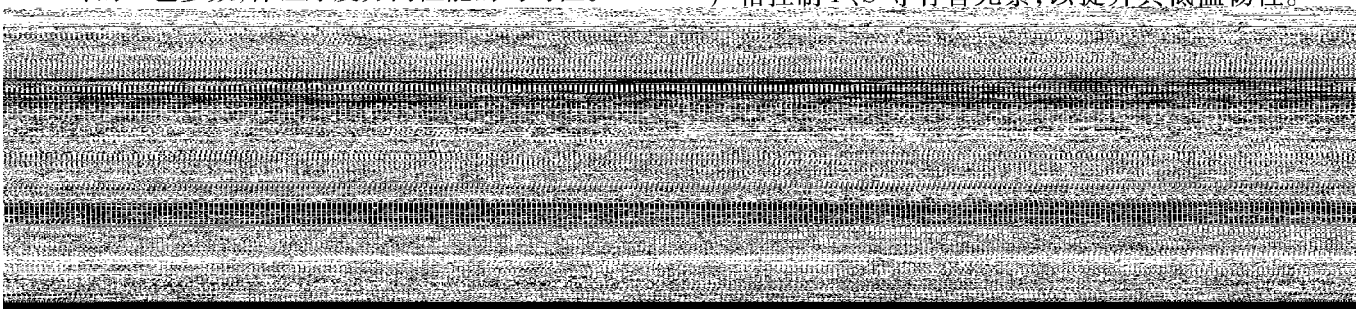
## 0 前言

随着世界经济的快速发展,全球石化装备制造业规模不断扩张,临氢设备用厚钢板的市场需求呈现出迅猛增长的态势。临氢设备长期处于高温、高压、富氢的极端服役环境,对厚钢板的组织和性能提出更高要求。12Cr2Mo1VR钢作为中温临氢设备的专用材料,不仅要具备卓越的抗氢脆特性,防止在富氢环境下发生氢致损伤,还要在复杂工况下保持稳定的强度与韧性,研发的技术门槛较高[1,2]。

在国际市场上,德国Dillinger公司、法国Arcelor集团旗下Industeel公司以及日本的JFE新

强度及冲击韧性;通过优化正火 + 快冷工艺中快冷的工艺参数,保证厚度方向性能的均匀性。

成分体系,添加 Nb、V、Ti 微合金元素细化晶粒,严格控制 P、S 等有害元素,以提升其低温韧性。



理对其硫化物形态的影响。

## 1 试验钢成分及生产工艺流程

试验材料选用汽车曲轴用非调质钢 C38 + N，在相同冶炼工艺条件下进行 Te 处理试验，研究 Te 处理对钢中硫化物形貌的影响，其化学成分要求如表 1 所示。

表 1 C38 + N 钢化学成分要求(质量分数) %

| 炉次 | C | Si | Mn | S | P | Cr | N | Te |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 0.37 | 0.58 | 1.47 | 0.058 | 0.014 | 0.16 | 0.016 5 | |
| B | 0.36 | 0.60 | 1.49 | 0.061 | 0.013 | 0.15 | 0.017 1 | 0.002 8 |
| C | 0.38 | 0.61 | 1.46 | 0.059 | 0.012 | 0.16 | 0.015 8 | 0.003 0 |

汽车曲轴用非调质钢 C38 + N 的生产工艺流程为：电炉冶炼→LF 精炼→VD 精炼→连铸→加热→轧制→锯切→矫直→探伤。

## 2 试验方法与结果

沿轧制方向取金相试样，经过磨制、抛光处理后，通过金相显微镜观察未添加 Te 炉次和添加 Te 炉次的钢中硫化物形态，并采用扫描电子显微镜对硫化物夹杂进行观察、面扫及能谱分析。

由金相显微镜观察发现，不同 Te 质量分数试验钢轧材中硫化物形貌如图 1 所示。未经 Te 处理试验钢中存在着大量的链状硫化物夹杂物，也有少量的近球形硫化物夹杂物见图 1(a)，研究表明，链状 MnS 夹杂物对钢材的切削性能和力学性能有害[2]。经过 Te 处理后，试验钢中 MnS 夹杂物的形貌和分布明显改变，链状 MnS 夹杂物大幅度减少，夹杂物形态由链条状向短杆状、近球状转变，颗粒尺寸也明显减小，弥散分布程度也明显提高见图 1(b)、(c)。

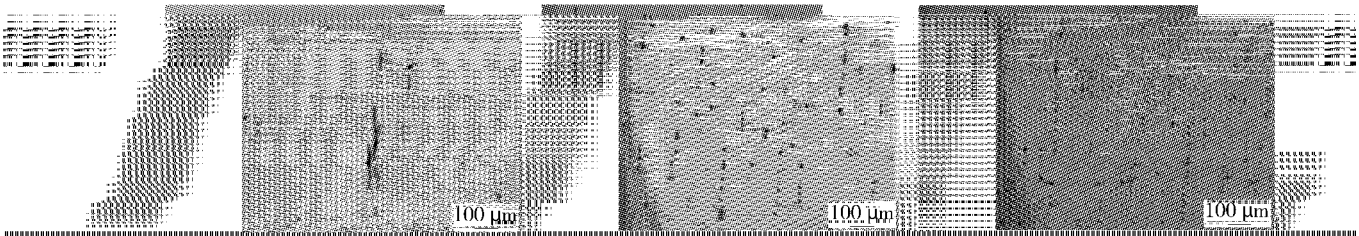



图 1 不同 Te 质量分数试验钢中的硫化物形貌

不同 Te 质量分数钢硫化物检测结果见表 2。

## 3 分析与讨论

表 2 硫化物检测结果

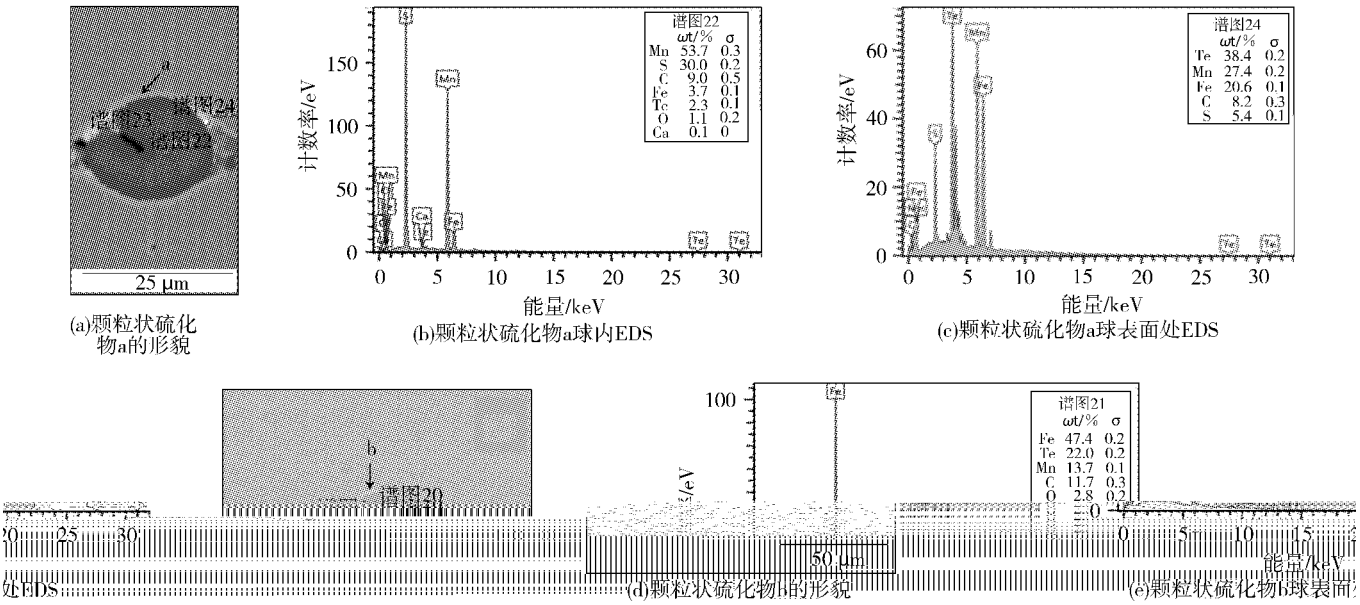
| 炉次 | Te 质量分数/% | K4(S)* |
|---|---|---|
| A | | 55 |
| B | 0.002 8 | 12 |
| C | 0.003 0 | 8 |

注：* 依据标准 DIN 50602—1985，K4(S)为硫化物夹杂物指数。

由表 2 可知，经过 Te 处理的试验钢中，硫化物夹杂物的 K4(S)值 <20，比未添加 Te 时的试验钢中硫化物 K4(S)值 55 下降明显，硫化物形态和尺寸显著改善。

### 3.1 硫化物球化机制

Te 处理后钢中 MnS 由链状或长条状转变为短杆状或近球状，Te 质量分数为 0.002 8% 的炉次 B 中颗粒状硫化物 a 的电子显微镜(SEM)及能谱分析(EDS)见图 2(a)、(b)、(c)，炉次 C 即 Te 质量分数为 0.003 0% 中颗粒状硫化物 b 的电子显微镜及能谱分析图见图 2(d)、(e)。由图可知，在大颗粒状夹杂物边缘观察到白色物质，白色薄层包裹灰色夹杂物，经过能谱仪分析，灰色物质为 MnS，白色物质为 MnTe，在 MnS 夹杂物中存在固溶 MnTe。



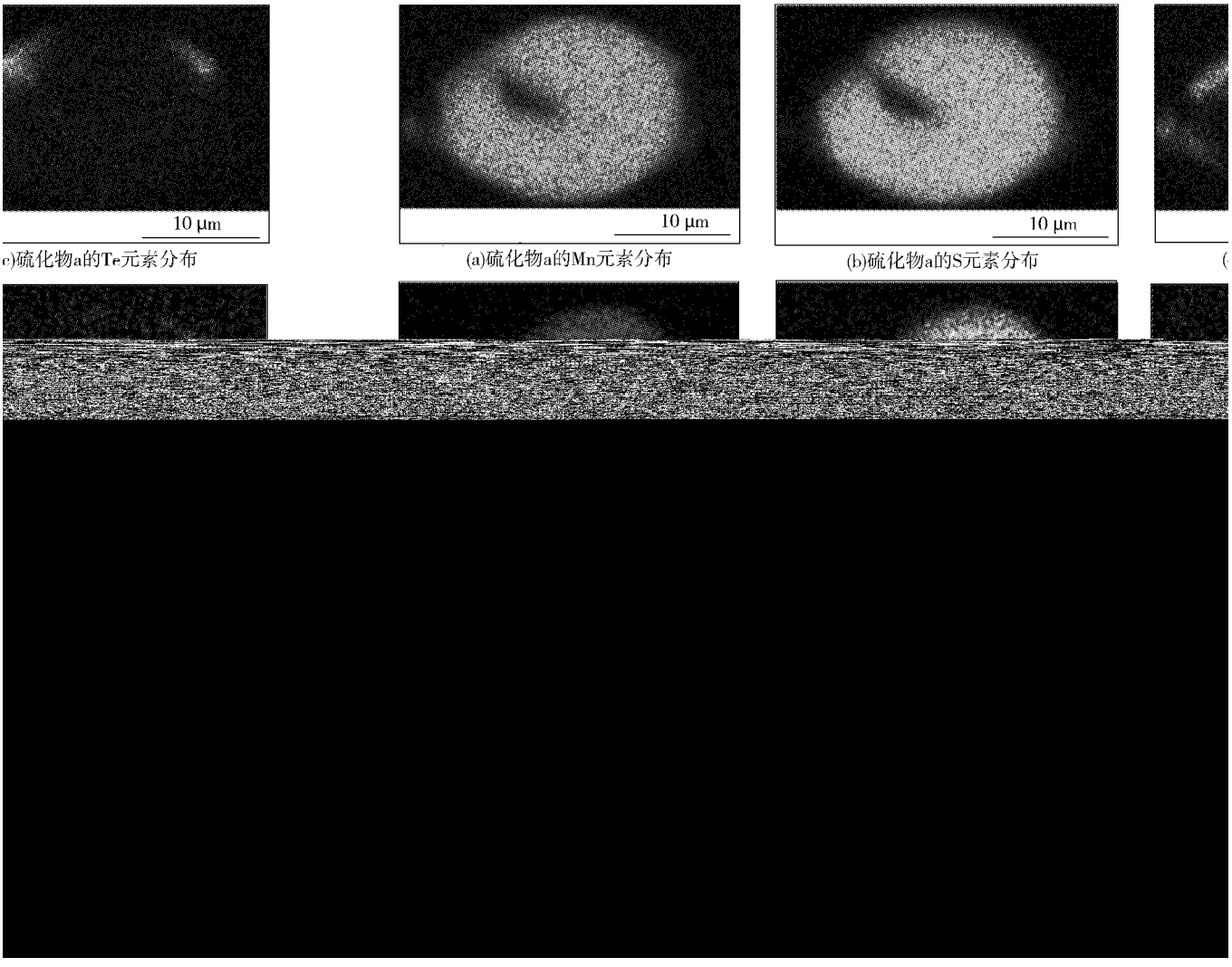

(a)颗粒状硫化物a的形貌　(b)颗粒状硫化物a球内EDS　(c)颗粒状硫化物a球表面处EDS

处EDS　(d)颗粒状硫化物B的形貌　(e)颗粒状硫化物b球表面

图 2　颗粒状硫化物夹杂物的 SEM 及 EDS 图

物的外层或固溶在其中，

通过扫描电子显微镜对典型夹杂物进行面扫描，表征出夹杂物的化学元素分布，从中发现 MnTe 包裹在 MnS 夹杂如图 3 所示。




c)硫化物a的Te元素分布　(a)硫化物a的Mn元素分布　(b)硫化物a的S元素分布

# 转炉炉衬修补技术的开发与应用

安海瑞 刘 涛 张学峰 康 锁 张 丹 赵本强 么敬文
（唐山中厚板材有限公司）

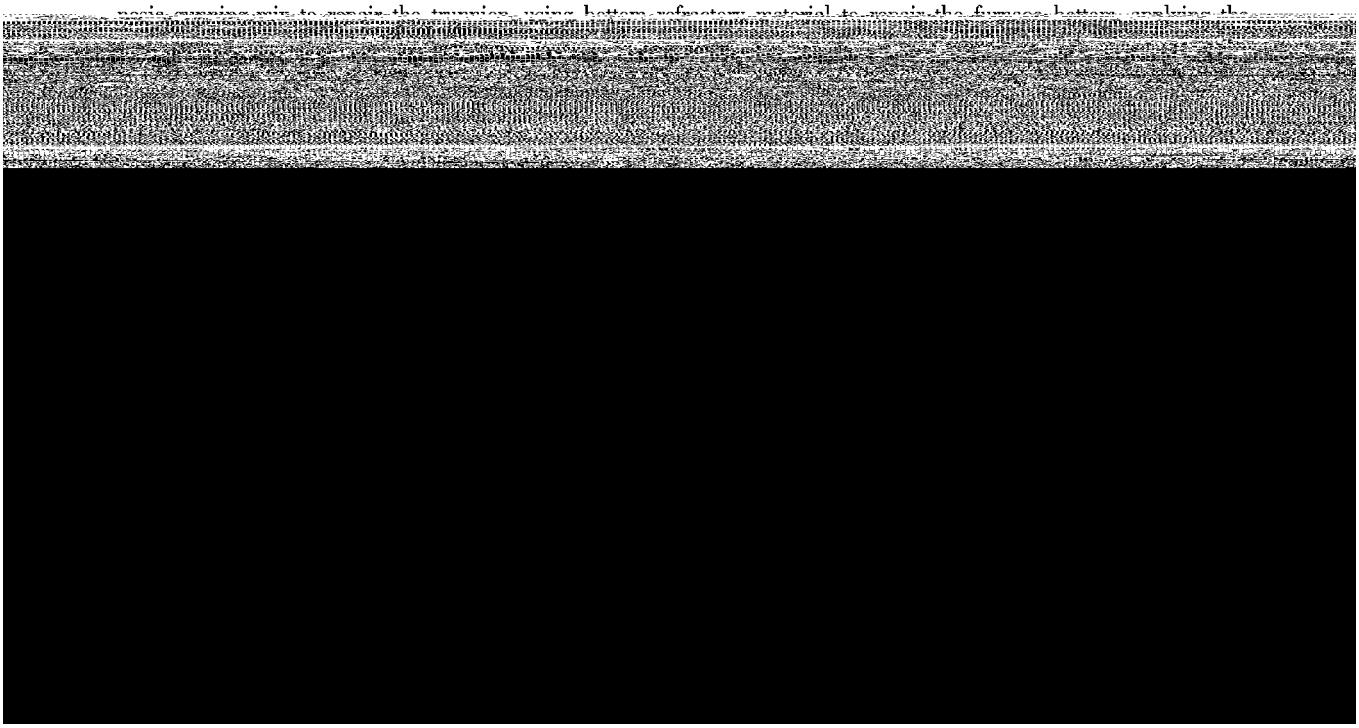
**摘 要** 转炉炉衬修补技术的关键在于对生产过程中转炉运行状况的实时监控，并针对炉衬不同部位的缺陷选择不同材料和方式，在不影响生产节奏的前提下进行修补。通过分析转炉炉衬寿命的影响因素，对比各种炉衬修补技术的实际应用效果，提出更经济的方式来延长转炉炉龄。具体方法有使用湿法水系结合镁碳质修补料修补转炉大面，选择镁质喷补料修补耳轴，投放炉底料维护炉底，采用以镁砂为主的镁铬、镁碳质灌浆料填补出钢口。付诸实施后，大大提高了转炉大面的使用寿命，提升了耳轴修补的黏结效果，延长了转炉炉衬使用寿命；从整体上优化转炉炉衬修补技术的工艺流程，在一定程度上提升了转炉生产效率。

**关键词** 炉衬修补 优化修补工艺 镁质修补料

# The Development and Application of Converter Lining Repair Technology

An Hairui, Liu Tao, Zhang Xuefeng, Kang Suo, Zhang Dan, Zhao Benqiang and Yao Jingwen
(Tangshan Medium and Heavy Plate Co., Ltd.)

**Abstract** The key to the repair technology of the converter lining is to monitor the converter operation condition in real time during production, repair the defects and the depressions at the different parts of the lining by selecting different materials and modes without affecting the production pacing as the precondition. By analyzing the factors affecting the service life of the converter lining, the actual application effect of the lining repair technology is compared. The specific proposals to prolong the converter compaign in a more economic way are raised and put into action, repairing the major lining of the converter using a wet process aqueous binding magnesia - carbon repair material, selecting the mag-



需要建立科学的维护计划，以及时发现并处理潜在问题，确保转炉始终处于最佳工作状态。而在转炉的实际冶炼过程中，由于炉体各部位工作条件不同，承受的压力各异，因此，炉衬的蚀损量并不一致，需要改进各部位的修补工艺。为了延长转炉的使用寿命，唐山中厚板材有限公司（以下简称“中厚板公司”）炼钢厂，拟选择转炉大面、耳轴、炉底和出钢口等炉体各部位适合的耐火材料进行修补工艺试验，以确定转炉炉体各部位最终的修补工艺。

## 1 转炉工况条件

炉衬修补技术的开发与应用主要在中厚板公司 1 座 120 t 顶底复吹转炉上进行，吹炼氧枪为 5 孔拉瓦尔氧枪，外径 299 mm，最大冶炼用氧流量 36 000 $Nm^3/h$，工作氧压 0.8 ~ 1.2 MPa。120 t 顶底复吹转炉的砌筑剖面示意图如图 1 所示，其主要参数如表 1 所示，冶炼铁水成分及温度波动范围见表 2。

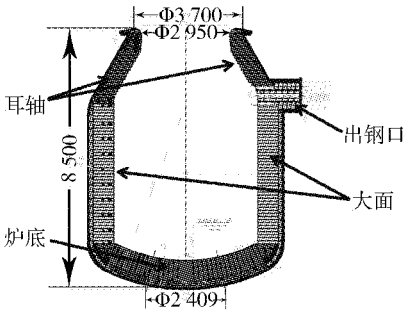



图 1 120 t 转炉砌筑剖面示意图

表 1 120 t 转炉主要参数

| 有效容积/$m^3$ | 炉容比 | 高宽比 | 炉口直径/mm | 熔池直径/mm | 熔池深度/mm | 炉底厚度/mm | 炉衬厚度/mm |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 111.4 | 0.928 | 1.328 | 2 800 | 4 652 | 1 303 | 910 | 804 |

表 2 入炉铁水成分及其温度波动范围

| 成分（质量分数）/% | | | | | 温度波动范围/℃ |
|---|---|---|---|---|---|
| C | Si | Mn | P | S | ≤6 |
| 4.0 ~ 4.5 | ≤2.0 | ≤0.40 | ≤0.070 | ≤0.250 | ≤6 |

## 2 转炉炉衬损伤机理分析

以上，直接导致炉衬表面材料软化甚至熔融，极大地削弱其结构强度。

镁碳砖工作层表面在碳元素氧化脱除的过程中，其组织结构逐渐变得疏松、脆化，这一变化使得炉衬砖体在面对液渣、高温烟气的持续冲刷时更加脆弱。这些冲刷力致使砖体表面及内部产生孔隙和裂纹，为熔渣的渗透提供了通道。一旦熔渣通过这些孔隙或裂纹渗入砖体内部，便会与其中的氧化镁成分发生化学反应，生成如钙镁橄榄石和 $MgO \cdot Fe_2O_3$ 等低熔点固溶体。这一系列复杂的氧化 - 脱碳 - 冲刷过程不断削弱镁碳砖的结构强度，导致镁砂颗粒逐渐被侵蚀并从砖体中流失，最终熔化进入熔渣之中。因此，控制氧化反应、增强砖体的抗冲刷能力以及优化熔渣成分，是减缓镁碳砖损坏、延长转炉炉衬使用寿命的关键措施。

改质沥青复合结合剂，减少了塌料，但烧结时间延长，影响修补料寿命。优化修补技术旨在平衡修补效果，同时提高转炉寿命。

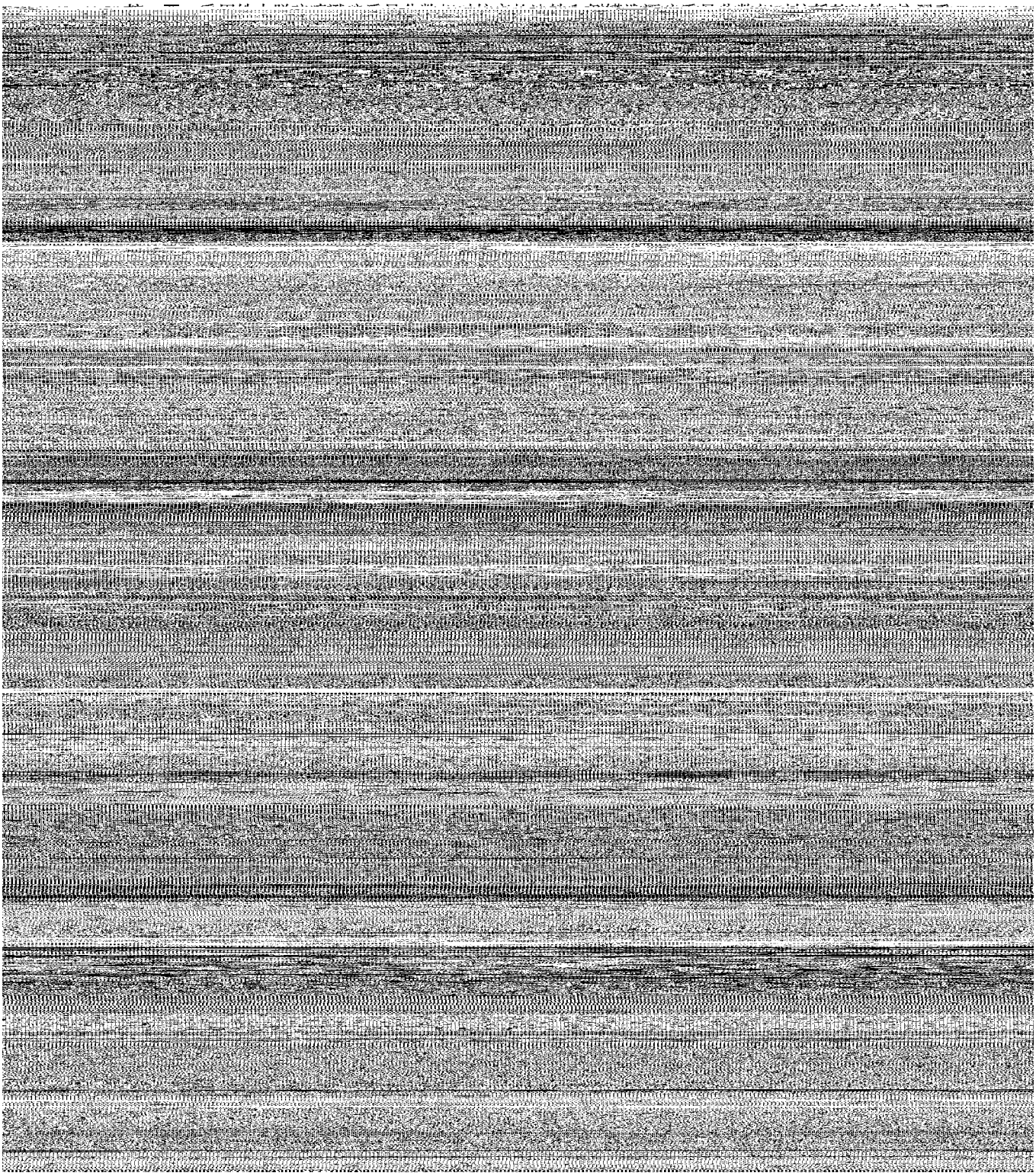
### 3.1　转炉大面修补

转炉大面区域在吹炼过程中历经多重严峻考验，包括钢水的强烈冲刷、炉渣的持续侵蚀。此外，定期的洗炉底作业进一步加剧大面的磨损状况，增加了补炉料受到的冲刷侵蚀，使得大面成为转炉最为频繁的修补区域。因此，探索更加有效的护炉与修补策略，以应对这些复杂工况，成为提升转炉运行效率与稳定性的关键。

转炉大面修补料选择大面自流料，其理化性能及废弃镁碳砖的理化性能如表 3 所示，镁碳质

# 工业固废渣铁转炉回收利用的生产实践

张仕洋 潘 军 王 勇 解文中
（马鞍山钢铁有限公司长材事业部）



外售卖会产生经济损失,而弃排则不仅造成资源浪费,还会污染环境。

马鞍山钢铁有限公司长材事业部(以下简称为“马钢长材”)在65 t转炉炼钢生产中,为有效回收渣铁中的含铁资源,采用铁水脱硫喷溅硫质量分数相对较高的渣铁和倒罐泼洒硫质量分数相

## 1 工况条件

马钢长材钢一区主要装备包括:2座70 t铁水倒罐站、2座70 t单喷石灰粉脱硫站、4座65 t顶底复吹转炉、4座吹氩合金微调站、2座70 t LF钢包精炼炉、2台六机六流全弧形(150×150)

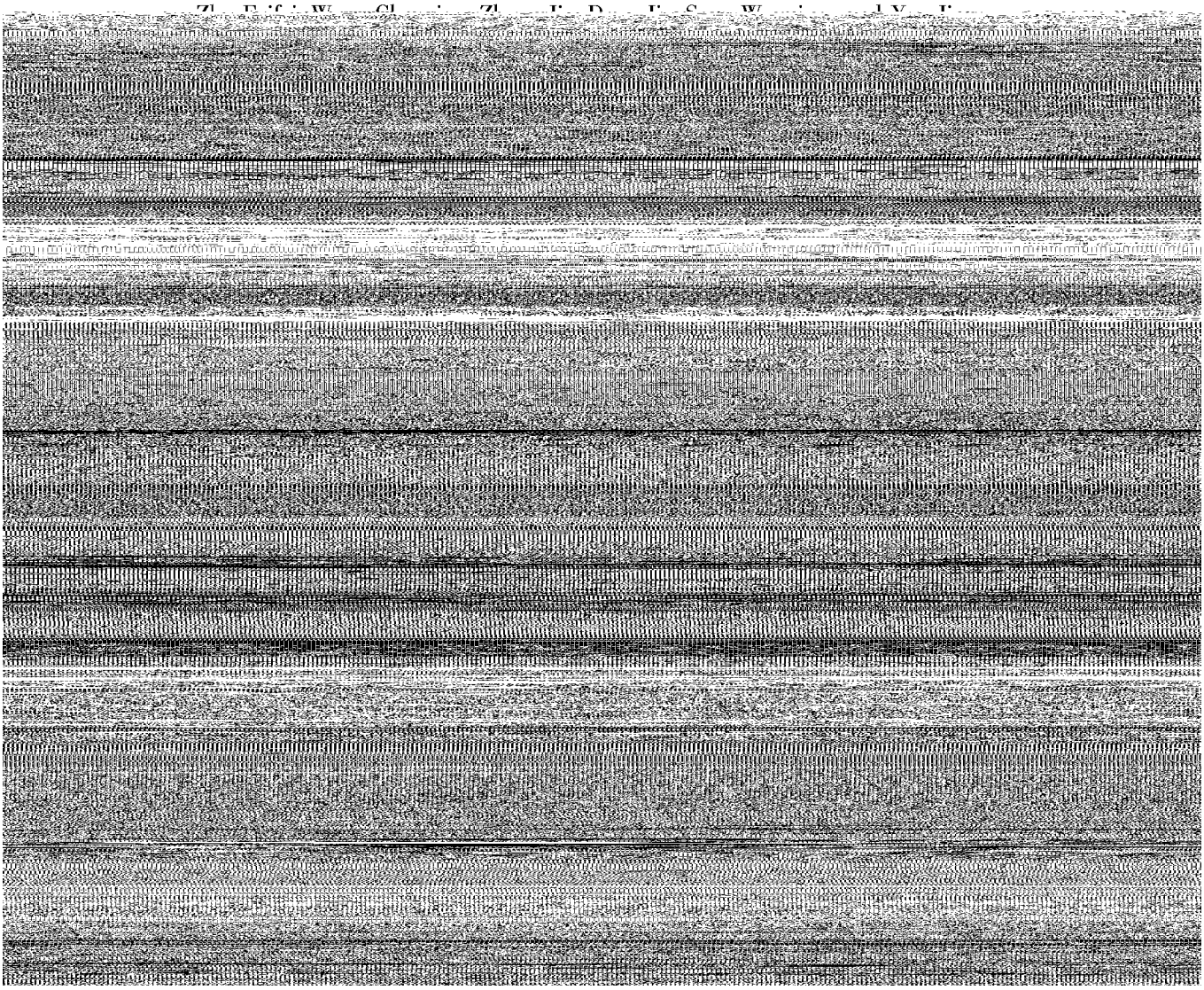
# 钢包滑板连用技术的研究和应用

朱斐斐 王重君 张 杰 董 杰 宋稳强 么敬文
（唐山中厚板材有限公司）

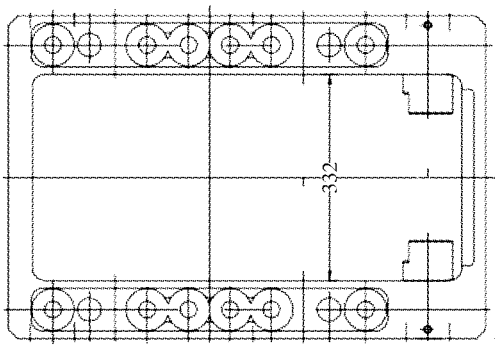
**摘 要** 滑板作为钢包滑动水口系统的核心部件，其使用寿命直接关系到钢包滑动水口的使用成本、现场工人的劳动强度以及钢包的周转效率。通过优化炼钢过程工艺参数和钢包周转制度，改进滑板材质及结构，有效提升滑板的抗热震性能、耐磨性和抗侵蚀能力，显著提高了滑板的连续使用次数，并延长其使用寿命。实践表明，改进后的滑板在降低使用成本、减轻工人劳动强度以及提高钢包周转效率方面取得了显著成效，为炼钢厂的高效、稳定生产提供了有力支持。

**关键词** 耐磨性 滑板机构 铝锆碳质滑板 钢包周转

# Research and Application of Continuous Operation Technology for Ladle Sliding Plate



制定精炼时间,可压缩普通钢种的生产周期,并有效减少钢包的空置时间。这些措施不仅提高了生产效率,还有助于减轻滑板所承受的冷热应力,从而延长其使用寿命。




2.2 优化滑板结构设计

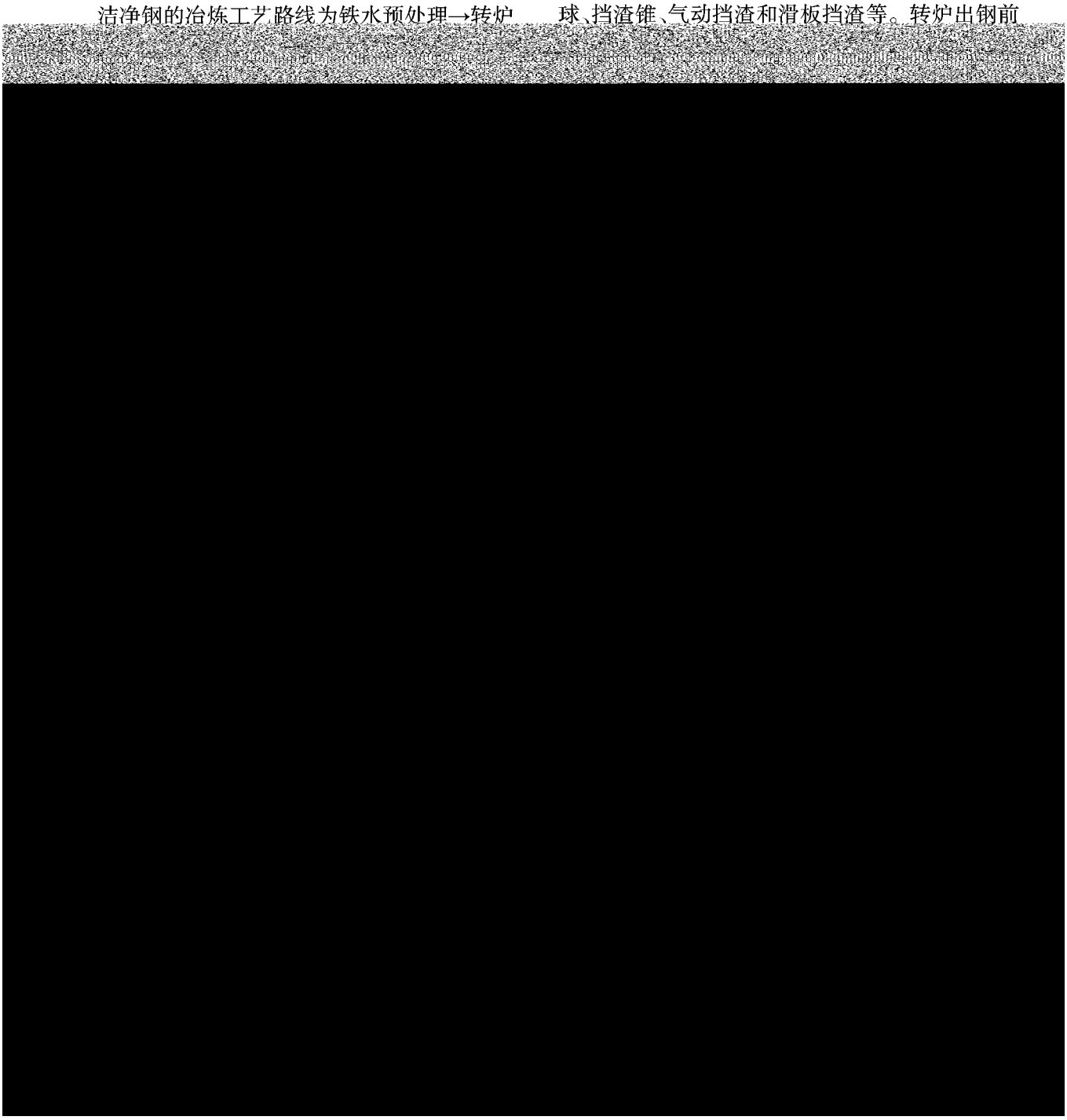
滑板的结构设计对滑板使用寿命影响显著,通过分析滑板不同设计形状的热应力模拟云图[9],对滑板结构不断优化,提高铸孔周围尤其

能否创造有利于洁净钢生产的友好环境。陈肇友等根据热力学,研究了一些耐火氧化物、复合耐火氧化物在钢水中溶解平衡时其金属元素的含量与钢水中平衡氧活度之间的关系,对钢水的增氧作用由大到小的顺序为:$Cr_2O_3 > SiO_2 > Al_2O_3 > MgO > ZrO_2 > CaO \cdot MgO \cdot Cr_2O_3 > ZrO_2 \cdot SiO_2 > 3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 > 2MgO \cdot SiO_2 > 2CaO \cdot SiO_2 > MgO \cdot Al_2O_3 > CaO \cdot Al_2O_3$[4]。由此可知,使用碱性材料或碱性复合材料有利于减少钢水污染,起到净化钢水的作用。

洁净钢的冶炼工艺路线为铁水预处理→转炉

节。如何降低转炉出钢过程的下渣量是炼钢工艺的技术难题,也是转炉冶炼特殊钢、优质钢的制约因素。为了实现少渣、无渣炼钢,开发了各种挡渣技术和设备。通过采取有效挡渣操作不仅可以减少夹杂物,防止回磷、回硫,改善钢水的洁净度,还可以为后续精炼创造条件。转炉出钢期间,根据转炉倾角大小将整个出钢过程分为前期渣、过程渣和后期渣3个下渣阶段,大体上分别占转炉出钢到钢包下渣量的30%、30%和40%[6,7]。

目前,转炉挡渣方法有挡渣塞、挡渣帽、挡渣球、挡渣锥、气动挡渣和滑板挡渣等。转炉出钢前



比较理想的是实现双辊流而不是单辊流，既可以稳定结晶器弯月面，又可以保证足够的液面温度；单辊流可以获得比较稳定的结晶器弯月面，但会存在明显的夹杂物卷入（角部），与之相反，双辊流结晶器液面会有一定波动，但不会卷渣。

防止浸入式水口堵塞可以从水口形状和内衬设计两个方面采取措施。随着水口向下内壁附着物的增厚，可以设计阶梯内壁，打破絮流物形成，减少絮流，圆柱形设计好于扁平型水口；防絮流浸入式水口内衬设计成无碳低硅、硅质材料以改善絮流；上水口的吹氩设计也可以改善絮流倾向。

## 2 洁净钢生产用耐火材料新技术

洁净钢生产用耐火材料的选材首先考虑耐火材料本身材质对钢水有无污染的问题，其次是通过耐火材料的功能设计来改善炼钢生产中保护浇注、精炼等效果，以促进耐火材料新技术的应用。

### 2.1 耐火材料材质选择与设计

传统碳复合耐火材料中 $\omega$(C) 为 10% ~ 20%，随着冶炼技术对耐火材料提出新的要求，碳复合耐火材料面临挑战。国内、外研究者为此进行了大量的研究工作，例如，在材料中引入纳米碳源并在基质中高度分散，提高其与骨料接触界面，形成碳网络结构；或采用多种碳源复合，形成多种能量耗散机制，充分发挥其抗渣侵蚀能力和吸收应力、抵抗裂纹扩展的能力；改变抗氧化剂与碳源间的赋存状态，提高碳的抗氧化性；提高结合剂环保性，优化结合剂次生碳结构，在改善其抗氧化性的同时进一步改善材料的结合强度；通过调整基质化学和粒度组成，优化气孔结构，控制原位陶瓷相形成与形貌，利用颗粒增强、晶须拔出、桥联和裂纹偏转等机制改善材料的韧性及抗热震性[11]。

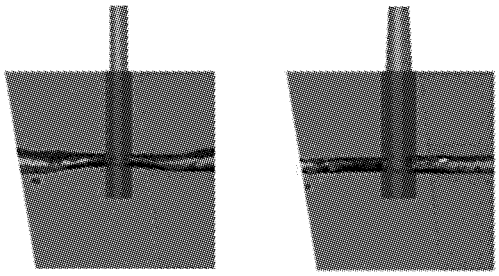
碳复合耐火材料的研究为洁净钢生产创造了有利条件，可以减少增碳、耐火材料的混入等，比如无碳刚玉 - 尖晶石预制块、机压刚玉 - 尖晶石无碳砖、低碳镁碳砖、刚玉 - 尖晶石浇注料、镁钙砖等。无碳刚玉 - 尖晶石预制块在武钢三炼钢的300 t 钢包使用，寿命达 250 次；刚玉 - 尖晶石浇注料具有不含碳、纯度高、使用寿命长的优点，在宝钢 300 t 钢包使用达到 250 炉的水平[12]。

另外，试验表明，MgO - CaO 涂料可明显降低铝镇静钢的总氧含量；在 MgO - CaO 材料为容器的试验中，当 CaO 质量分数为 20% ~ 25% 时，钢中的硫、磷也明显降低。综合考虑，控制水化、施工、吸收夹杂等因素，镁钙涂料中 CaO 质量分数控制在 20% 左右较为适宜。

国内耐火材料厂家研制开发了软质挡渣塞，该挡渣塞有别于普通挡渣塞，具有可塑性，更适合用于不规则出钢口，可以 100% 挡住转炉前期渣，且在山钢集团、首钢公司使用效果良好，可以延长出钢口寿命 5 ~ 8 炉。不同的钢种采用不同的体积密度和锥体形状设计，导杆的稳定性、加入时机等均影响着挡渣锥的具体效果，依据出钢口前期与后期形状差异，设计两种形状的挡渣锥来满足不规则出钢口的挡渣要求。

### 2.2 保护浇注技术

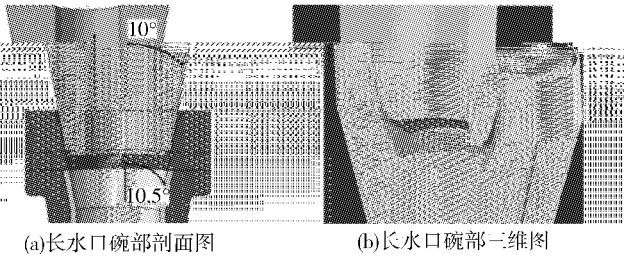
钢包到结晶器全程保护浇注是避免钢水二次污染的有效途径，针对保护浇注，许多冶金专家研究认为，在钢包到中间包钢水保护浇注方面，长水口形状、碗部和氩气密封设计很关键。长水口的形状设计对缓解中间包冲击区湍流、控制浇钢液面裸露和卷渣有重要影响，瓶形变径长水口好于筒形长水口，图 3 展示出了使用不同形状长水口开浇 6.5 s 后中间包液面的状况，可以看出筒形长水口液面波动大，存在卷渣风险。



(a)筒形长水口 (b)瓶形长水口

图 3 不同形状长水口的浇注状态

维苏威公司认为球形的碗部结构可以更好地实现钢包下水口和长水口碗部的结合，有利于面接触和改善保护浇注效果，如图 4 所示。




(a)长水口碗部剖面图 (b)长水口碗部三维图

图 4 长水口碗部结构

成的渣层对反应没有影响，不仅能降低耐火材料对钢液的污染，甚至可能在一定程度上起到净化钢液的作用；合理控制连铸中间包寿命可以避免浇钢后期过多耐火材料剥落污染以及渣层影响等。

## 4 结语

耐火材料作为炼钢用辅料，除了发挥其基本


料，1997，31(1)：7－12.

罗艳，张瑩，张觉峰，等. 高洁净钢连铸过程中间包冶金效果评价[C]//中国金属学会. 中国冶金——“创新创意，青年先行”第七届中国金属学会青年学术会论文集. 北京科技大学冶金与生态工程学院，首钢迁安钢铁有限责任公司. 2014：204－208.

陈肇友，田守信. 耐火材料与洁净钢的关系[J]. 耐火材料，2004，38(4)：219－225.

李晓强，蒋晓放，龙川江等. 宝钢一炼钢铁水预处理工艺实践[C]//中国金属学会. 第九届中国钢铁年会论文集. 宝山钢铁股份有限公司炼钢厂. 2013：1045－1048.

丁瑞锋，王艳红，冯士超，等. 大中型转炉出钢挡渣工艺技术研究现状[J]. 上海金属，2014，36(6)：40－47，48.


的控制。

(11)细化综合砌筑方案。评估不同部位耐火材料损毁机理，进行耐火材料的综合设计与砌筑，比如钢包包壁的材质分为渣线、非渣线两部分，然而透气砖侧的条件较为苛刻，多数情况下透气砖侧包壁首先达到下线终点，如果进一步细化综合砌筑，强化透气侧，则可以减少此部位耐火材料的侵蚀和溶蚀的耐火材料进入钢水。

(2)提高砌筑质量，包括耐火材料本身的修砌质量、技术标准和修砌后洁净度等。耐火材料砌筑质量只有符合设计要求，才能发挥其应有的


12 张兴勤，李宗英，杨欣，等. 洁净钢炉外精炼与连铸用耐火材料及其发展[J]. 耐火材料，2012，46(2)：81－86，95.

13 赵晶晶，程树森. 精炼时利用小气泡搅拌去除钢液中的氢和夹杂物[J]. 特殊钢，2010，31(2)：29－32.

14 张兴业，李宗英. 我国钢包用耐火材料的品种及应用[J]. 山东冶金，2007，29(2)：11—15.

15 戴文斌，于景坤. 纯净钢冶炼用耐火材料[J]. 材料与冶金学报，2003，2(1)：3－9.