1995 年创刊
公开发行(双月刊)

宽 厚 板

KUAN HOU BAN

2025 年 2 月 28 日出版
第 31 卷第 1 期(总第 178 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·

Ti 含量对 460 MPa 级微合金钢组织和性能的影响
…… 徐海健　韩楚菲　王海丹　车　欣　马正阳(1)

Nb 对 2 000 MPa 级桥索钢热变形行为的影响
…… 黄世伟(6)

基于差温轧制抗层状撕裂 Q355MD－Z35 特厚钢板的研究与开发
…… 李　思　孟庆勇　李晓东(12)

Q500qE 桥梁钢板的开发与探讨
…… 吴俊平(16)

·生产实践·

LF 精炼炉底吹氩模型的优化与应用
…… 王武仙　赵思宇　张学峰　刘玉峰　毕凤山　孟　滨(19)

中厚板瓢曲缺陷产生原因分析与控制
…… 庞　凯　黄春柳　袁修强(24)

炼钢低铁耗高效率技术的研究与应用
…… 么敬文　刘志远　王重君　栾文林　刘　涛　张俊海　朱海旭(27)

硅钡脱氧剂在 LF 精炼过程中的应用研究
…… 王重君　刘志远　郭文斌　么敬文　朱海旭　陈孟伟　宋稳强(31)

·技术讨论·

连铸钢包回转台回转支承服役末期劣化过程分析
…… 付　霆　盛　涛　杨明清　周立生　姚钧耀(35)

吹气管内径对管线钢 RH 精炼过程的影响
…… 陈从俊(41)

滚切式剖分剪关键技术及分析
…… 孙嵩楠　王月婷(45)

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. 1 February 2025

steel, and
ium – rich
portion of
he basis of
plate with

steel strengthened by Ti microalloy meet the standards of the same grade building structure steel and pipeline
the performance indexes are excellent. With the increase of Ti contents, the number of high – density titan
nano – precipitates gradually increases, the size of polygonal ferrite decreases, the pearlite decreases, the pr
uniform fine acicular ferrite increases, the strength and toughness of the material are obviously improved. On t
significant cost reduction, Angang has successfully developed Ti microalloyed 460 MPa grade microalloy steel
excellent microstructure properties.

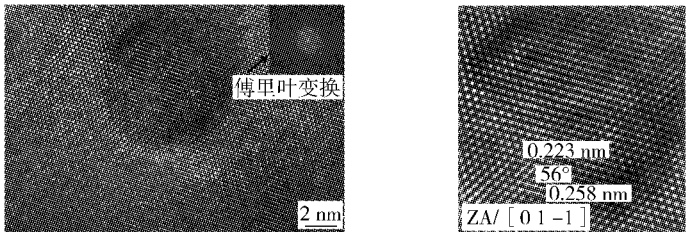
Keywords Microstructure, Microalloy steel, Ti microalloy strengthening, Strength and toughness

钢铁行业竞
降低合金成
合金成分设
于此原因，在

0 前言

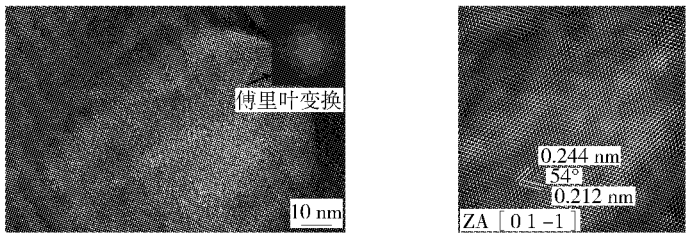
近年来，建筑结构及能源运输领域快速发展，对中厚板应用的强度级别从之前的设计使用标准355 MPa级发展到460 MPa和550 MPa级甚至更

加[6-8]。随着合金价格快速上涨，在
争激烈、产能过剩的环境下，各企业以
本为产品开发宗旨，即采用低成本的
计体系，来保证产品市场竞争力。基



(a)高分辨像 (b)FFT过滤的高分辨像

图4 小尺寸NbC析出相的晶体结构分析

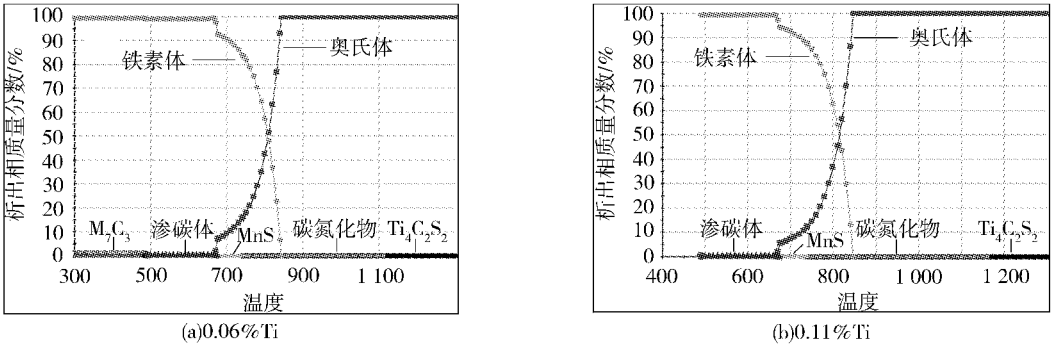


(a)高分辨像 (b)FFT过滤的高分辨像

图5 大尺寸TiN析出相的晶体结构分析

图4(a)为8 nm尺寸的圆形小尺寸析出相形貌。图4(b)为其经过傅里叶过滤FFT的HRTEM原子晶格像,对应的原子面间距分别为0.258 nm和0.223 nm,晶带轴及晶面夹角分别为[0 1 -1]和56°,经过晶体结构解析这些小尺寸纳米析出相为立方结构的NbC相。图5(a)为70 nm尺寸的椭圆形析出相形貌。图5(b)为其经过FFT的HRTEM原子晶格像,对应的原子面间距为0.244 nm和0.212 nm,面夹角为54°,析出相的晶带轴为[0 1 -1],经过晶体结构解析这些大尺寸析出相为立方结构的TiN相。从HRTEM标定结果可以看出,TiC析出相的尺寸明显大于NbC。

图6为不同Ti含量的460 MPa级微合金钢析出相热力学模拟图,从图6的JMatPro相图模拟结果可以看出,2组样品中渗碳体相析出温度在680 ℃左右,而TiC和NbC析出温度则在860 ℃左右,因此,在轧制及冷却过程中C元素首先与Ti和Nb作用,形成TiC和NbC,且随着Ti含量增加,析出的TiC相数量增多,渗碳体数量减少。此外,随着珠光体中C含量降低,珠光体中渗碳体不再呈现层状排列,减少了外加载荷下应力集中所造成的微裂纹,改善了钢板强韧性,与图1、图2观察结果一致[10]。由于TiC与NbC两种相析出温度相近,但是Ti和C原子结合力更强,在轧制及冷却过程中,TiC首先析出并长大,而NbC析出温度较低,导致其尺寸较小。



(a)0.06%Ti (b)0.11%Ti

图6 不同Ti含量的460MPa级微合金钢析出相热力学模拟

2.3 Ti含量对460 MPa级微合金钢力学性能的影响

实验钢性能结果如表3所示。由表3可知,随着Ti含量增加,试样的强度有所增大,-20 ℃冲击功和-10 ℃时的DWTT落锤剪切面积百分数平均值显著增大,2#样品满足API 5L—2007标

准。由于 Ti 在钢中固溶度较低,以 TiC 形式弥散析出。依据 TiC 在奥氏体中固溶度积公式可知[13],1#和 2#样品中 TiC 的开始析出温度分别为 1 085 ℃和 1 128 ℃。含 Ti 的 460 MPa 级微合金钢在加热及轧制过程中,未溶的 TiC 相或重新析出的 TiC 相能够对奥氏体晶粒长大起到阻碍作用。由于 2#样品的 TiC 开始析出温度较高,且析出数量多,导致其转变铁素体晶粒尺寸更细小,珠光体 P 转变量降低,针状铁素体 AF 转变量增加,对于钢板强韧性改善更明显。

表 3　不同 Ti 含量下 460 MPa 级微合金钢力学性能对比

样品编号	$R_{p0.2}$/MPa	R_m/MPa	冲击温度/℃	KV_2/J	-10 ℃DWTT 剪切面积百分数/%
1#	472	552	-20	165	73
2#	521	573	-20	243	95
技术协议	460 ~ 575	545 ~ 660	-20	≥180	≥85

3　结论

(1)Ti 含量(质量分数)在 0.06% ~ 0.11% 时,460 MPa 级微合金钢组织为由多边形铁素体 PF、珠光体 P 和针状铁素体 AF 组成的复相组织。随着 Ti 含量增加,铁素体晶粒变细,珠光体形态退化、比例降低,均匀细小的 AF 比例增加,进而改善钢板低温韧性。

(2)2 组样品的析出相尺寸主要分布在 5 ~ 70 nm 之间。随着 Ti 含量增加,1#和 2#样品析出相的密度分别为 $1.1\times10^{22}/m^3$ 和 $3.7\times10^{22}/m^3$,2#样品中析出相的密度明显大于 1#样品中析出相密度。尺寸在 5 ~ 15 nm 的小尺寸析出相为 NbC,尺寸在 15 ~ 70 nm 的较大尺寸析出相为 TiN,占比超过 50%。

(3)Ti 含量在 0.06% ~ 0.11% 时,钢板强韧性随着 Ti 含量增加而提高,Ti 含量为 0.11% 时,钢板的性能满足技术标准。

(4)相对传统的高 Nb、Mo 成分设计的 460 MPa 级微合金钢,采用 Ti 微合金化的钢板在保证强韧性条件下,降低了制造成本。

参考文献

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

2　裘韶均,闫江辉,唐　辉,等. 460 MPa 级耐火耐候建筑用钢的组织和性能研究[J]. 热加工工艺,2024,53(16):129 - 133.

3　Kang M, Kim H, Lee S, et al. Effect of dynamic strain hardening exponent on abnormal cleavage fracture occurring during drop weight tear test of API X70 and X80 linepile steels[J]. Metallurgical and Materials Transactions A,2013.

4　Kim Y M, Lee H, Kim N J. Transformation behavior and microstructural characteristics of acicular ferrite in linepipe steels[J]. Materials Science and Engineering A,2008,478(1 - 2):361 - 370.

5　Shanmugam S, Ramisetti N K, Misra R D K, et al. Microstructure and high strength - toughness combination of a new 700 MPa Nb microalloyed pipeline steel[J]. Materials Science and Engineering A,2008,478(1 - 2):26 - 37.

6　Shanmugam S, Misra R D K, Hartmann J, et al. Microstructure of high strength niobium - containing pipeline steel[J]. Materials Science and Engineering A,2006.

7　Qiu J A, Wu K M, Li J H, et al. Effect of silicon on ultra - low temperature toughness of Nb - Ti microalloyed cryogenic pressure vessel steels [J]. Materials Characterization, 2013, 83: 123 - 128.

8　郑　中,赵　迪,禹文涛. 本钢高 Nb X70 管线钢的生产实践[J]. 焊管,2008,31(5):54 - 58,95.

9　Hu J, Du L X, Wang J J. Effect of cooling procedure on microstructures and mechanical properties of hot rolled Nb - Ti bainitic high strength steel[J], Materials Science and Engineering A. 2012, 554:79 - 85.

10　王超逸,洪晓莉,严　玲,等. 460 MPa 极地船舶用钢及焊接接头低温力学性能[J]. 中国冶金,2024,34(7): 58 - 67.

11　李少坡,麻庆申,李家鼎,等. Nb - Ni 系 X70 管线钢基础参数研究[J]. 轧钢,2009,26(5):5 - 8.

12　王志勇,李少坡,李　群,等. 经济型 X80 管线钢的研制开发[J]. 中国冶金,2016,26(11):64 - 68.

13　霍向东,夏继年,李烈军,等. 钛微合金化高强钢的研究与发展[J]. 钢铁钒钛,2017,38(4): 105 - 112.

徐海健,男,2017 年毕业于东北大学金属材料及热处理专业,博士,正高级工程师。

韩楚菲,女,高级工程师,通讯作者。

收稿日期:2024 - 10 - 22

Nb 对 2 000 MPa 级桥索钢热变形行为的影响

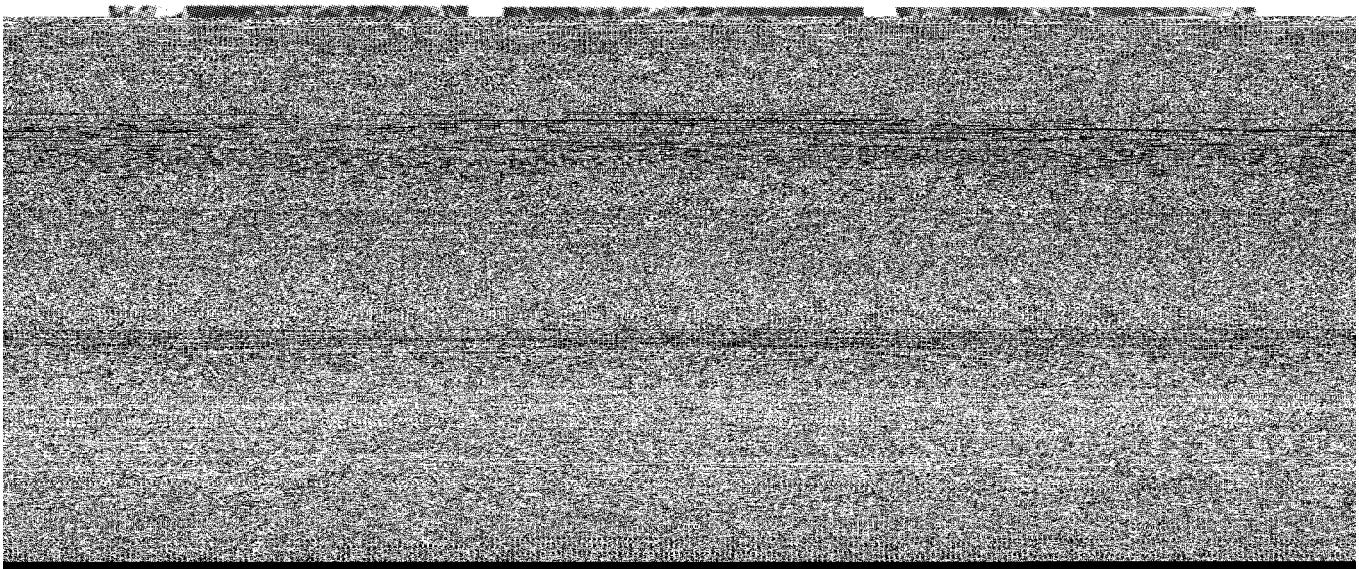
黄世伟
（同圆设计集团股份有限公司）

摘　要　对含 Nb 和无 Nb 两种高碳桥索钢进行连续冷却相变与等温相变试验，通过光学显微镜、扫描电子显微镜和宏观硬度计等手段分析相变试样。连续冷却相变试验结果表明：随着冷却速度的加快，高碳桥索钢的硬度增加，同时马氏体组织增多，Nb 元素通过抑制碳元素的扩散并细化晶粒，延缓相变过程，导致 CCT 曲线右移；此外，由于 Nb 元素的固溶作用可强化材料的晶格结构，因此导致马氏体相变点的提高。等温相变试验结果表明：随着终冷温度的提升，马氏体含量增多，导致材料的硬度增大，但无 Nb 钢的硬度大于含 Nb 钢；同

可以显著降低珠光体的相变温度,并使 CCT 曲线向右下方移动;铌对珠光体晶核的生长速度有双重影响,尽管平均生长速度不变,转变温度区间宽度变化不大,但铌的加入通过增大过冷度来减小珠光体的片层间距[7]。冯路路等人研究了 Nb 对高碳桥索钢,为了研究 Nb 元素对高碳桥索钢微观组织变化的影响,唯一的控制变量是 Nb 元素含量,试验钢的化学成分如表 1 所示。

表 1　试验钢的化学成分(质量分数)　　%

类别	C	Si	Mn	S	P	Cr	V	Nb



用,此时,无 Nb 钢硬度大于含 Nb 钢,反之当冷却速度 >10 ℃/s 时,含 Nb 钢硬度大于无 Nb 钢。

2.1.3　CCT 曲线分析

CCT 曲线是描述材料在不同冷却速度下相变情况的重要工具,反映了材料的相变点温度、相变过程以及过冷奥氏体的稳定性等关键因素,因此,通过 DIL805 相变仪进行了两种钢的热膨胀试验,得到相应的膨胀曲线。根据膨胀曲线的变化,结合图 2、图 3 显微组织的变化,确定了不同冷却速度下珠光体和马氏体的相变点,见表 2。

表 2　试验钢的相变点

冷却速度/(℃ · s^{-1})	组织		珠光体开始温度/℃		珠光体结束温度/℃		马氏体开始温度/℃	
	无 Nb 钢	含 Nb 钢	无 Nb 钢	含 Nb 钢	无 Nb 钢	含 Nb 钢	无 Nb 钢	含 Nb 钢
0.5	P	P	731	724	650	644		
1.0	P	P	718	711	639	628		
2.0	P	P	695	690	606	593		
5.0	P + M	P + M	644	633	544	521	163	165
10.0	M	M					158	162
20.0	M	M					154	159

由表 2 可以发现,两种钢的显微组织变化与相变点的变化趋势基本一致,值得注意的是,含 Nb 钢的珠光体相变点比无 Nb 钢的稍低,而马氏体的相变点稍高,这是由于 Nb 固溶在基体中,抑制了马氏体的生成,使 CCT 曲线右移导致。

图 5 为无 Nb 和含 Nb 两种试验钢的 CCT 曲线图。从图 5 中可以明显看到,加入 Nb 元素后,高碳桥索钢的 CCT 曲线右移,这主要归因于 Nb 元素通过与碳形成 NbC,抑制碳的扩散,同时 NbC 阻碍原始奥氏体晶粒的长大,导致奥氏体的稳定性增加,因此推迟奥氏体到珠光体的相变。此外,Nb 元素还通过固溶强化提高钢的强度,增加马氏

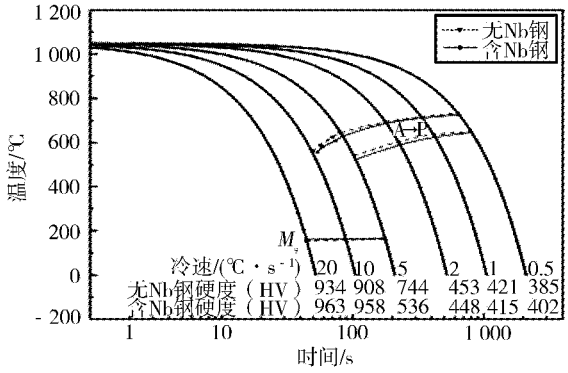


图 5　两种试验钢的 CCT 曲线

2.2　Nb 对桥索钢等温相变的影响

2.2.1　显微组织分析

基于差温轧制抗层状撕裂Q355MD－Z35特厚钢板的研究与开发

李 思 孟庆勇 李晓东
（唐山钢铁集团有限责任公司）

摘 要 抗层状撕裂特厚钢板通常拥有严格的Z向性能要求，而由于铸坯凝固偏析严重、轧制过程特厚钢板心部轧制变形渗透力差等多重因素耦合作用，极易造成特厚钢板心部组织粗大和带状组织超标等缺陷，致使特厚钢板的心部力学性能受到严重影响，特别是降低钢板的Z向性能。以碳锰钢为基体材料添加Nb、Ti微合金化元素，选择连铸凝固末端重压下连铸坯作为母材，在粗轧前3道次通过冷却设备进行高强度瞬时冷却，实现铸坯心部和表面温差250～300 ℃，利用差温轧制工艺生产100 mm厚度钢板，轧制后检测特厚钢板的力学性能和显微组织。结果表明：在压缩比为2.5低压缩比条件下成功开发出100 mm厚度Q355MD－Z35特厚钢板。利用连铸凝固末端重压下－差温轧制工艺生产的特厚钢板，相较于常规工艺生产的特厚钢板，其心部组织明显细化、中心偏析级别显著降低。

关键词 特厚钢板 抗层状撕裂 凝固末端重压下 差温轧制

Research and Development of Q355MD－Z35 Extra Heavy Steel Plate with Lamellar Tearing Resistance Based on Differential Temperature Rolling

Li Si, Meng Qingyong and Li Xiaodong
(Tangshan Iron and Steel Group Co., Ltd.)

Abstract Extra heavy steel plate with lamellar tearing resistance generally requires Z－directional properties, but due to the coupling effects of multiple factors including the severe strand solidification segregation and the poor penetration of rolling deformation into the center of extra heavy steel plate during rolling, the defects of coarse microstructure and excessive banded structure at the center of extra heavy steel plate are easily caused, which severely affects the mechanical properties at the center, especially reduces the Z－directional properties. Microalloying elements of Nb and Ti are added on the basis of C and Mn steel as the base material, the slab cast by solidification end heavy reduction technique is selected as the raw material, the temperature difference from 250 ℃ to 300 ℃ is achieved between the center and the surface of the slab by instant cooling with high intensity at the instant cooling device during the first three roughing passes, the mechanical properties and microstructure of the extra heavy steel plate are tested after rolling. The results show that the 100 mm thickness extra heavy steel plate is successfully developed under the condition of the lower reduction ratio at 2.5. Compared with those produced by the conventional process, the extra heavy steel plate produced by continuous casting solidification end heavy reduction－differential temperature rolling technology possesses significantly refined central microstructure and remarkably reduced center segregation level.

Keywords Extra heavy plate, Lamellar tearing resistance, Solidification end heavy reduction, Differential temperature rolling

0 前言

随着基础建设持续向更深层次推进和结构的转型升级，特厚钢板的应用场景越来越广泛，且需求量与日俱增，因此对特厚钢板的内部和外部质量、组织均匀性和力学性能等指标要求更为严格，例如海洋工程用特厚钢板需要良好的低温韧性、耐腐蚀性能和焊接性能，建筑用特厚钢板则需要具备低的屈强比和良好的抗层状撕裂性能（Z向

性能)[1-6]。特厚钢板通常指厚度≥60 mm 的钢板[7],建筑用特厚钢板由于其自身连接特点,连接部位容易出现层状撕裂,因此,将建筑用特厚钢板的厚度方向性能均匀性和抗层状撕裂能力作为关键指标,是高端特厚钢板生产及应用领域研究的焦点,但也是制约特厚钢板发展的瓶颈。开发新

速冷却。

1.2　成分设计

Q355MD－Z35 特厚钢板对抗层状撕裂性能有特殊的要求,GB/T 5313—2023《厚度方向性能钢板》标准明确要求钢中 S≤0.005%,因此结合 GB/T 1591—2018《低合金高强度结构钢》标准对

凸型辊形貌如图 1 所示。

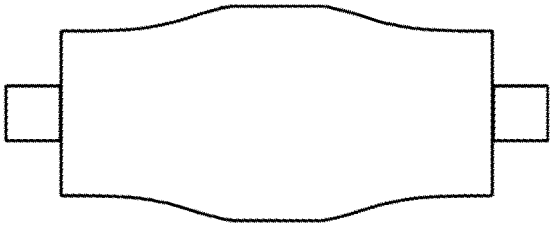
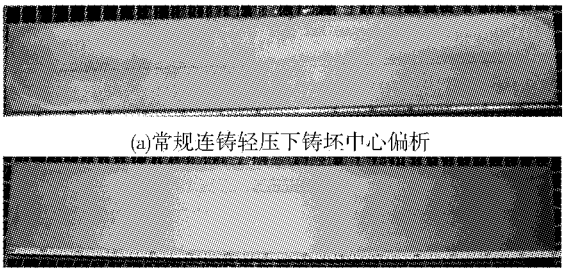


图 1 凝固末端重压下凸型辊示意图

图 2 为总压下量 5 mm 的常规连铸轻压下和连铸凝固末端重压下铸坯中心偏析情况。采用常规连铸轻压下的铸坯中心偏析评级为 B 类 1.5 级，如图 2(a)所示，采用凝固末端重压下的铸坯中心偏析评级为 C 类 0.5 级，如图 2(b)所示。试验表明：采用凝固末端重压下手段浇注铸坯的中心偏析较常规连铸轻压下显著改善，中心偏析的改善主要得益于凝固末端精准确定以及大压下量促使凝固末期浓化钢液稀释效应。此外，凝固末端大压下量促使应力应变有效向铸坯中心传递，破碎树枝晶、降低元素在枝晶间富集，进而促进中心偏析的改善。



(a)常规连铸轻压下铸坯中心偏析

(b) 连铸凝固末端重压下铸坯中心偏析

图 2 常规连铸轻压下和连铸凝固末端重压下铸坯中心偏析情况

2.2 差温轧制

用Ⅱ阶段控制轧制 + 超快速冷却工艺生产。将铸坯置于加热炉加热直至奥氏体化温度，均热温度 1 140 ~ 1 180 ℃。在Ⅰ阶段粗轧纵轧前 3 道次，开启冷却装置的高强度冷却模式进行冷却，8 组冷却水全负荷开启，冷却水量达到 1 000 L/min，实现差温轧制工艺要求的铸坯心部和表面之间 250 ~ 300 ℃差温[9,10]，粗轧纵轧前 3 道次单道次压下率 > 10%；Ⅱ阶段精轧中间坯开轧厚度 158 mm，在未再结晶区轧制，二次开轧温度≤860 ℃，精轧终轧温度为 800 ~ 820 ℃。精轧后特厚钢板采用超快冷高强度冷却，冷却后特厚钢板表面返红温度 640 ~ 660 ℃。轧制 100 mm 厚度抗层状撕裂 Q355MD - Z35 特厚钢板的详细轧制道次分配如表 3 所示。

表 3 100 mm 厚度抗层状撕裂 Q355MD - Z35 特厚钢板轧制规程

道次数	设定辊缝/mm	压下率/%
1	222	11.2
2	194	12.6
3	170	12.4
4	165	2.9
5	158	4.2
6	138	12.7
7	123	10.9
8	110	10.6
9	100	9.1

3 力学性能和组织分析

3.1 力学性能

表 4 为不同工艺条件下 100 mm 厚度

接触,降低脱氧效率[11]。精炼渣脱硫的一个重要指标为硫的分配系数 L_S[12],计算公式见式(6)。

$$L_S = (S)/[S] \tag{6}$$

由式(6)可知,L_S 与渣中硫含量成正比,与钢液中硫含量成反比。L_S 随炉渣碱度以及钢 – 渣

程中,未能得到充分搅拌,合金中的成分分布不均匀,在之后的浇铸过程中,形成的金相组织结构不够致密,造成冶炼出的成品钢在性能上有较大的缺陷。图 2(b)中金相组织的致密度较图 2(a)中的金相组织致密度高,且出现的针状马氏体较多,

仅增多了矫直次数,还会使钢板矫直后不平度难以控制,表面辊印较多,影响钢板的表面质量[1]。

1.2　精轧末道次压下率过大

轧辊在修磨时会预留 0.2 mm 的凸度,即轧辊中间半径比边部大 0.2 mm,在轧制初期,钢板中间与边部厚度存在一定差异,当精轧末道次压

2　控制措施

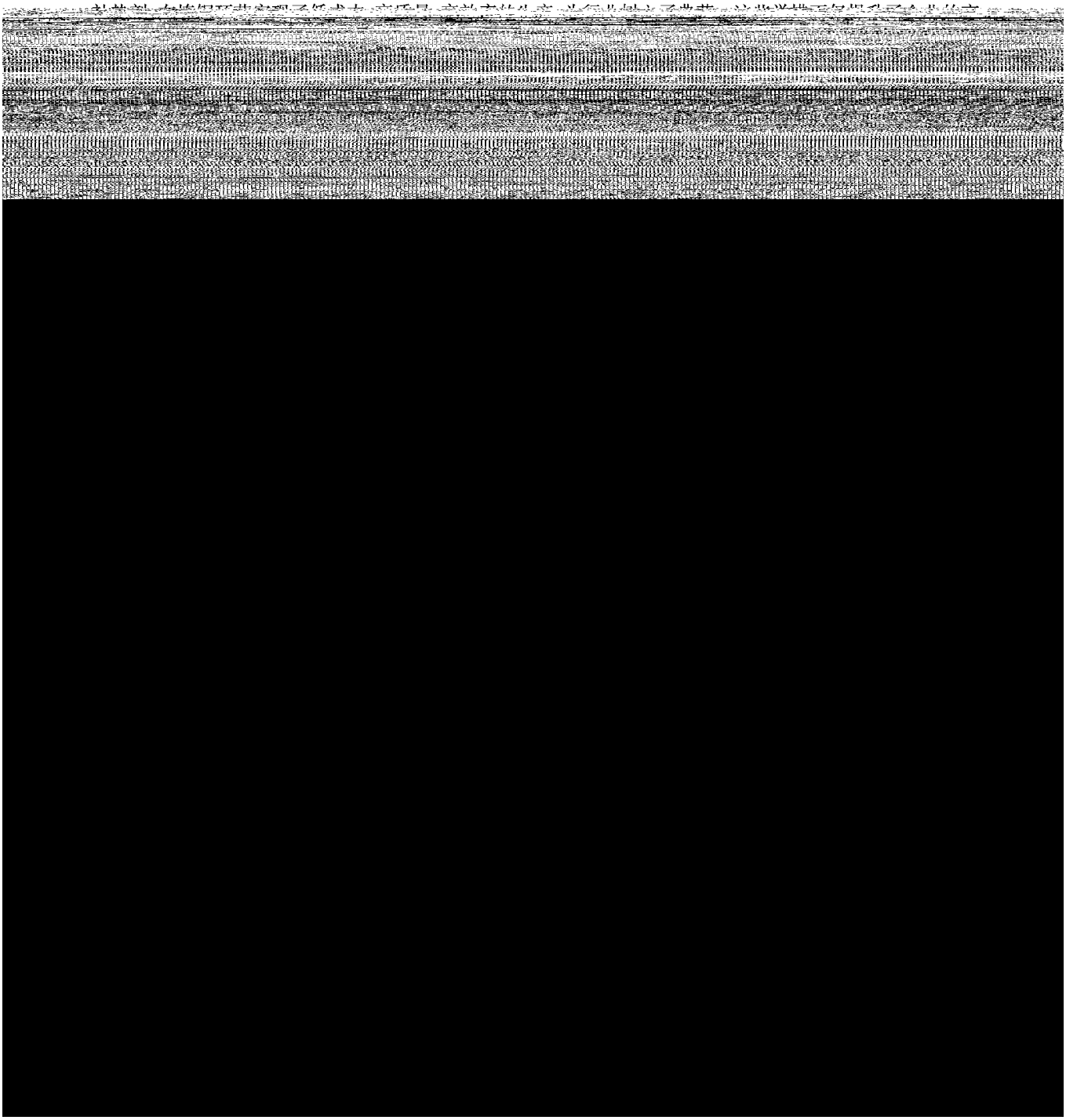
2.1　调整精轧终轧温度

由于钢板的物理性质,当精轧终轧温度较低时,钢板矫直温度低、强度大,难以进行有效矫直;当精轧终轧温度较高时,矫直后钢板温度较高,在

炼钢低铁耗高效率技术的研究与应用

么敬文 刘志远 王重君 栾文林 刘 涛 张俊海 朱海旭
（唐山中厚板材有限公司）

摘 要 唐山中厚板材有限公司致力于通过技术创新提升生产效率，紧密围绕生产操作控制进行工艺技术开发。为了达到提高产品质量、降低生产成本、提升劳动生产率的核心目标，中厚板公司成功实施了铁水包加盖技术，有效减少了热量损失；通过采用二次燃烧氧枪技术、应用超高功率纯氧燃枪预热系统以及研发新型



1 生产工艺条件

中厚板公司目前以生产低合金船板钢、高强建筑用钢和耐磨钢为主，主要冶炼设备有 3 座 120 t 顶底复吹转炉、3 座 120 tLF 精炼炉和 3 座板坯连铸机，生产工艺流程为：高炉炼铁→铁水预处理→转炉初炼→LF 炉精炼→板坯连铸→钢坯热装。在正常情况下，铁水和铁块满足转炉吹炼要求，铁水及铁块目标成分如表 1、表 2 所示。

表 1 1 348 ℃铁水主要成分指标(质量分数) %

C	Si	Mn	P	S	Ti
3.8 ~ 4.5	0.42	0.42	0.131	0.029	0.117

表 2 铁块主要成分指标(质量分数) %

C	Si	Mn	P	S
3.8 ~ 4.5	0.49	0.42	0.131	0.021

水包加盖技术还能够提高能源利用效率，降低生产成本。

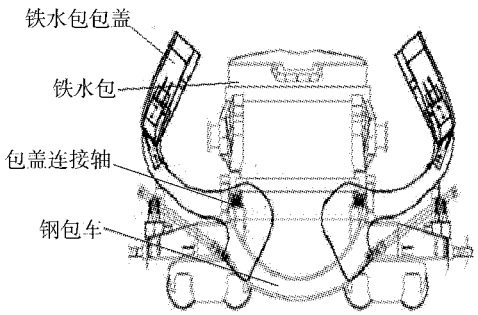


图 1 铁水包加盖设计示意图

2.2 二次燃烧氧枪技术的应用

二次燃烧氧枪技术是在炉腔内部利用高温燃气进行重新燃烧的方法，其原理是在炉腔内通过喷吹氧气和燃气的混合物，使其在炉内快速燃烧，并释放出大量热能[8]。这种高温热能可以进一

图 2 所示二次燃烧氧枪的主要指标为二次燃烧率,二次燃烧率每提高 10%,废钢比可以在原来基础上相应提高 3% ~4%。由于二次燃烧率提高而引起的废钢比提高最大不超过 10%,一般在 5% 以内。

2.3　超高功率纯氧燃枪预热系统的开发应用

2.3.1　纯氧燃烧技术

传统的焦炉煤气燃烧是利用空气进行燃烧配比,因空气中含有氮气,导致此燃烧方式具有火焰温度低,燃烧效果差,燃烧不充分等缺点[9]。纯

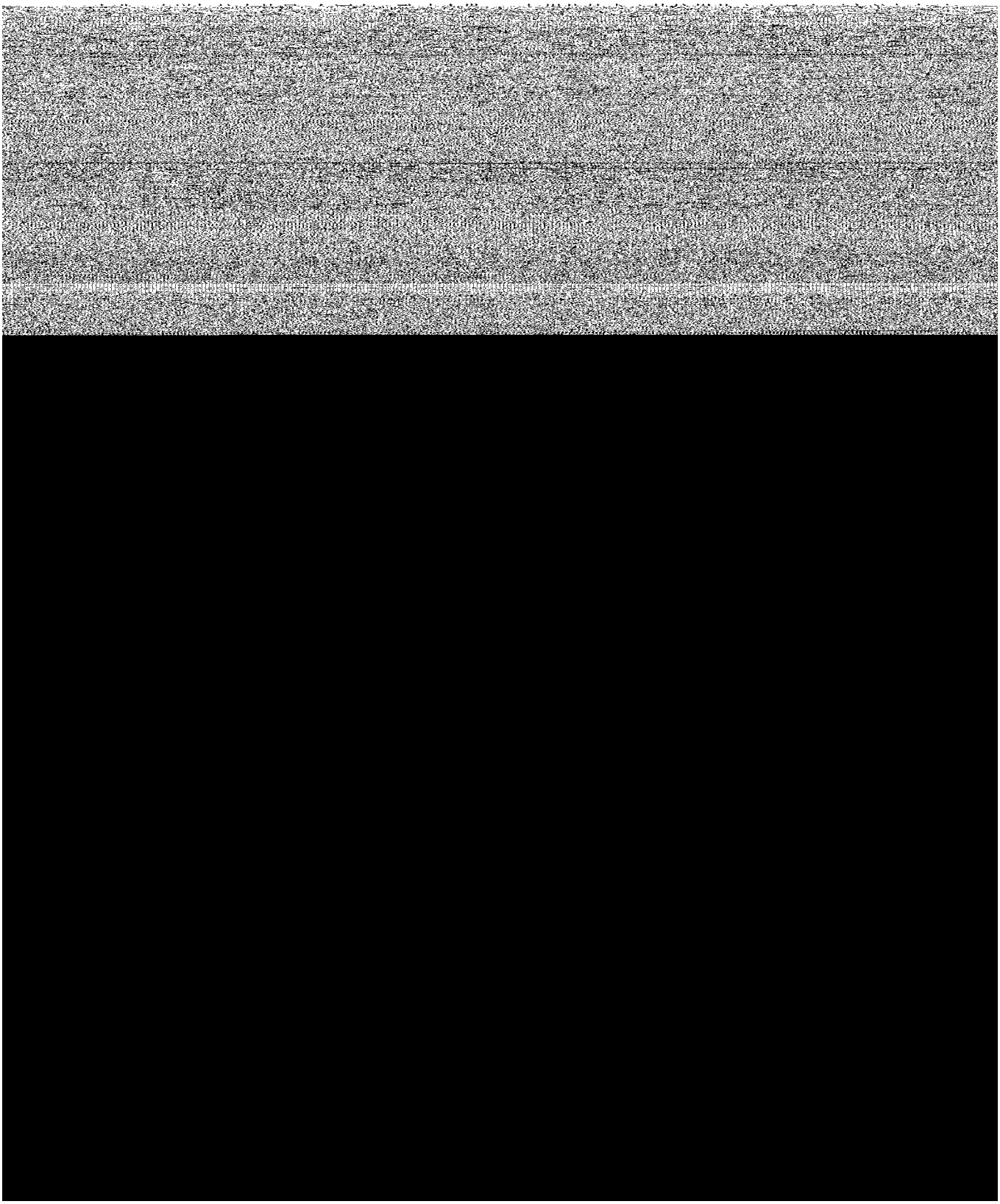


图3所示超高功率纯氧燃枪的主要特点有枪体为多层管式结构，设有专用的配套枪座，进出水及气体的管路连接使用法兰接头，在枪体内增加旋转加速装置，减少枪体局部受热，提高冷却效果。

2.4 新型补热剂研发

开发新型补热剂，作为转炉加煤炼钢技术中最简单易行的方法之一，不仅不需要改造现有转炉设备，而且可利用废钢槽或与加石灰相同的方法加入。其优势还在于可增加煤气产量，但在冶炼过程中加入块状煤会增加钢的含硫量。试验表明，煤中所含的硫有55%左右留在钢水中，19%进入渣中，其余随炉气排出转炉。选定补热剂类型后，进行成分设计、实验，最终选取石墨碳球及其相匹配加入的物料作为新型补热剂，其化学成分和其相匹配加入的物料冷却效果如表4、表5所示。

表4 石墨碳球主要成分(质量分数) %

C	MgO	SiC	H_2O
≥40	≥15	≤25	≤2.5

表5 物料冷却效果

物料	白云石	石灰	钢渣	小型废钢	废钢	铁皮球	石墨碳球
冷却系数[1]	1.2	1.2	1	1	1.0	2.2	1.9
差值[2]	-241.0	355.0	1 145	-396	-0.4	-207.0	580.0

注：1、以废钢冷却效果为基数，即废钢冷却效果为13 ℃/t。

2、试验炉次与正常生产炉次差值，对比试验炉次与正常炉次在加入相同物料时，温

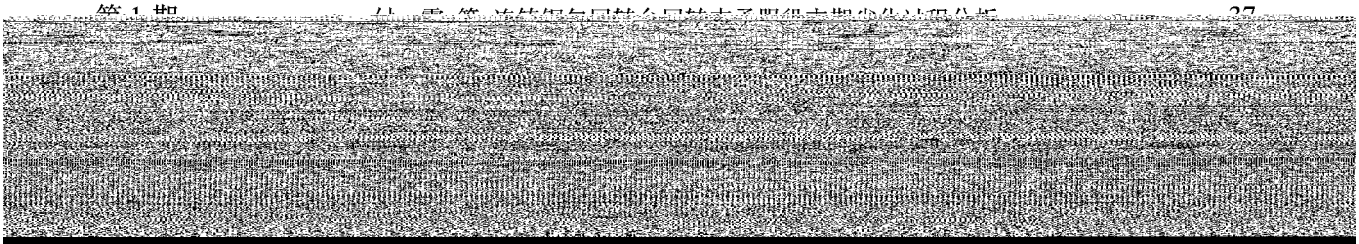
·技术讨论·

连铸钢包回转台回转支承服役末期劣化过程分析

付 霆[1] 盛 涛[2] 杨明清[1] 周立生[1] 姚钧耀[1]
（1 宁波钢铁有限公司;2 安徽工业大学）

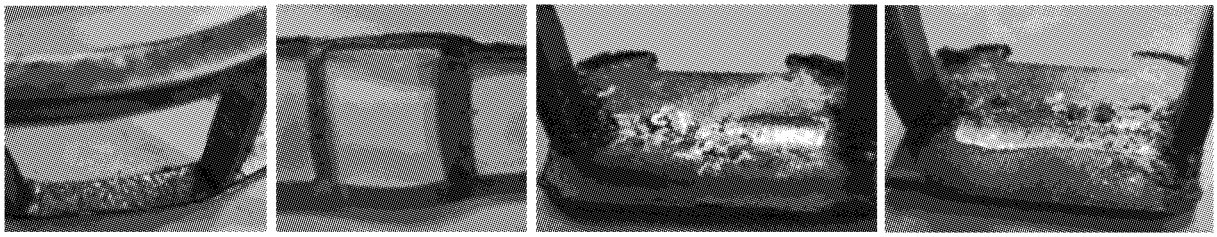
摘 要 通过拆解某钢厂服役期满的 2#连铸机钢包回转台回转支承,深入分析其零部件的破损失效原因,探究回转支承在服役末期的退化过程。分析结果揭示了疲劳磨损对其性能劣化的影响,为连铸设备的全寿命周期管理以及设备的稳定运行提供指导性建议。

[redacted]



2.3.2 保持架啃噬

如图 10 所示，在回转支承回转过程中滚动体会对保持架内侧、端部立板、中间副梁产生压迫、啃噬作用。主梁内侧两面均有明显的切削痕迹，中间 4 根副梁与两侧立板表面均有滚动体挤压痕迹。

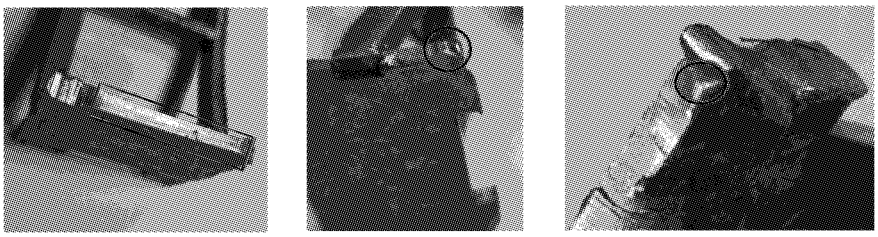


(a)内侧啃噬 (b)受挤压迫的副梁 (c)端部立板挤压1 (d)端部立板挤压2

图 10 主推力滚动体保持架啃噬情况

2.3.3 保持架立板上表面产生磨损

如图 11 所示，可观察到两侧立板的上表面存在均匀的磨损痕迹，而下表面原本 5 mm 的沉槽经过测量后发现仅剩 3 mm，两侧的倒角也出现倾翻现象。这表明两侧立板上、下表面与滚道面发生不应有的接触和磨损。



(a)立板上表面磨损均匀 (b)立板倾翻的倒角 (c)放大5倍的倾翻倒角

图 11 主推力滚动体保持架磨损情况

2.3.4 焊接处脱焊和裂纹

如图 12 所示，保持架在受到外力挤压变形过程中，保持架立板与主梁焊接部位发生断裂，焊点脱焊或开裂。

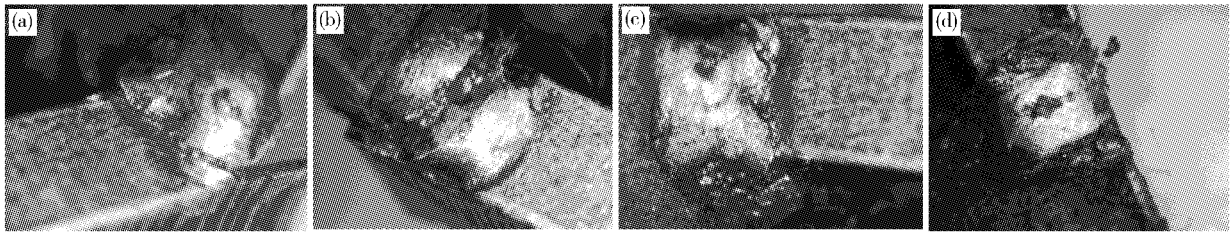
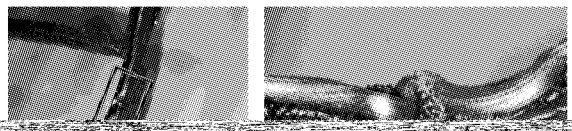


图 12 主推力滚动体保持架焊点脱焊和裂纹

2.3.5 主梁外侧磨损

如图 13 所示，保持架的主框架主梁靠近圆心一侧断面磨损严重，主框架主梁宽度仅为 6 mm，而最大磨损量却达到 2.5 mm，并伴随有金属熔融现象。



某钢厂2#连铸机钢包回转台的回转支承所更换新的回转支承已选择了加大主推力滚动体直径和钢质包覆式保持架的综合设计方案，在单臂满载300 t、一臂空载的极限偏载、重载下，钢包回转台匀速运行段驱动电流仅20～30 A，承载能力得到增强。

5 结语

钢包回转台回转支承的劣化是由循序渐进的疲劳磨损，向服役中期的磨粒磨损[4]，再向服役末期零件破损、大颗粒卡阻推进的复杂劣化过程，在回转支承更新选型中，材料的选择、滚道面耐磨性、保持架结构与刚性、滚动体的数量与外形尺寸、润滑通道的排屑能力均是选择回转支承寿命长的关键因素，需要采取多措施综合性的改进方案才能达到延长使用寿命的目的。

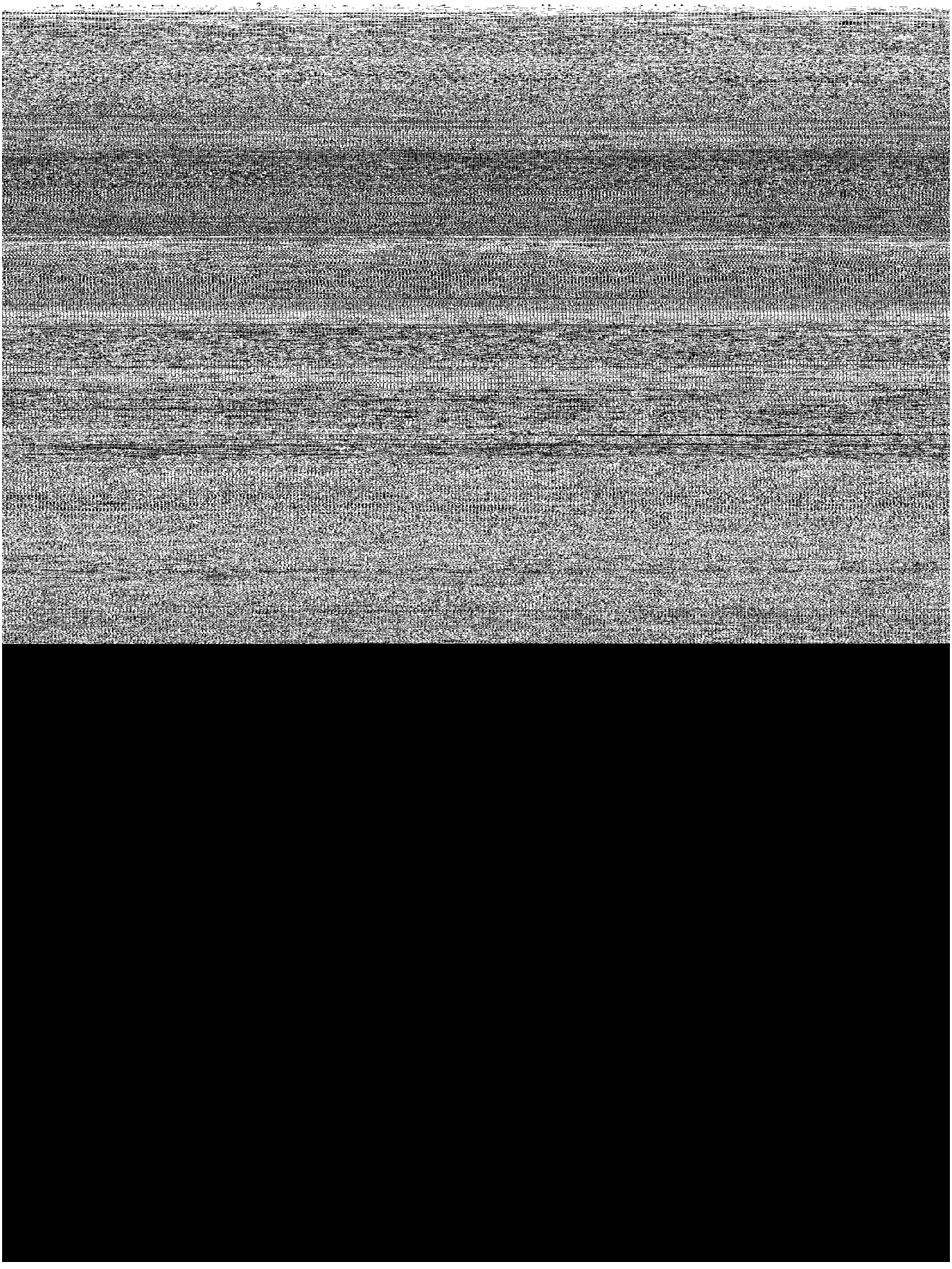
参考文献

1 任学平，刘嘉鑫. 钢包回转台回转支承的接触强度有限元分析[J]. 冶金设备，2023(6)：47－52，28.

2 叶永祥. 连铸钢包回转台回转轴承故障分析[J]. 冶金设备，2008(4)：75－77.

3 范伟刚，蹇 华，马 克，等. 连铸钢包回转台回转支承故障原

来看,钢液飞溅情况已与使用 3 mm 吹气管内径、　　使用 5 mm 吹气管内径时真空室内喷溅情况明显



结合表 2、表 3 可知将 1#、2#,两工位进站及真空结束氢进行时间折算后,当提升气体流量为 130 Nm^3/h 时,1#工位吹气管内径为 5 mm 时的抽真空效果相当于 2#工位的 3 mm 吹气管内径延长约 1 min 的抽真空时间所达到的效果,与其他两个方案效果相差不大,当提升气体流量较大时,吹气孔内径大小对抽真空效果的影响更加明显。从脱氢效果来看,使用 5 mm 吹气管内径时相比于吹气管内径为 3 mm 时而言,脱氢效果并无明显提升,结合喷溅与抽真空情况来看,使用 5 mm 吹气管内径反而使得喷溅严重,真空槽内冷钢结瘤速度加快,而真空槽内的冷钢将减少真空室内有效面积,降低精炼效果,因此综合来看,使用 5 mm 吹气管内径可能带来不利影响。

3 结论

(1)吹气管内径由 3 mm 增大至 5 mm 后,抽真空时间延长,真空度变差,抽真空能力稳定性较差。

RH process using mathematical modelling[J]. ISIJ International, 2004,44(1):82 – 90.

8 Kuwabara T, Umezawa K, Mori K, et al. Investigation of decarburization behavior in RH – reactor and its operation improvement[J]. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 1988, 28(4): 305 – 314.

9 Luo Y, Liu C, Ren Y, et al. Modeling on the fluid flow and mixing phenomena in a RH steel degasser with oval down – leg snorkel [J]. Steel Research International, 2018, 89(12).

10 Baokuan, Li, Fumitaka, et al. Modeling of circulating flow in RH degassing vessel water model designed for two – and multi – legs operations[J]. ISIJ International, 2000, 40(12): 1203 – 1209.

11 樊世川,李宝宽,赫冀成. 多管真空循环脱气系统循环流动模型[J]. 金属学报,2001,37(10):1100 – 1106.

12 齐凤升,王承阳,李宝宽. RH 真空循环脱气装置水模型循环流量的实验分析[J]. 材料与冶金学报,2002,1(4):271 – 276.

13 Zhang Z, Ma P, Dong J, et al. Effects of different RH degasser nozzle layouts on the circulating flow rate[J]. Materials, 2022, 15(23): 8476.

14 Wang J, Ni P, Chen C, et al. Effect of gas blowing nozzle angle on multiphase flow and mass transfer during RH refining process [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials

量仅为偏心量 10 mm，相较于剪刃长度来说，对剪切的影响可以忽略不计。

由于偏心套的特性，剪刃重叠量变化值是非线性的。针对这个情况，如何根据钢板厚度 h 精准调整剪刃重叠量 μ，具有重要的理论价值和应用价值[9-11]。应用 Solidworks 进行计算机仿真模拟，分析偏心套转角与剪刃重叠量的关系，并绘制滚切式剖分剪剪刃重叠量变化图，如图 4 所示。从计算机仿真分析模拟的结果可以看出，滚切式剖分剪剪刃重叠量的调整行程为 20 mm。当使用剖分剪剪切 50 mm 厚度钢板时，剪刃重叠量最大为 13 mm；当剪切 5 mm 厚度钢板时，剪刃重叠量最小为 -7 mm。

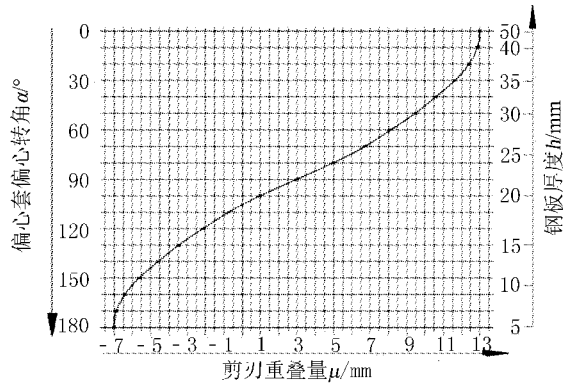


图 4 剪刃重叠量的调整曲线

图 4 中曲线方程式解析见式(1)。

$$\mu = 3 + \cos(\alpha) \times e \quad (1)$$

剖分剪设备及剖分剪剪切生产工艺不熟悉，参照滚切式定尺剪和滚切式双边剪的操作习惯，经常忽略对剖分剪剪刃重叠量的调整，导致较厚钢板的剪刃重叠量设置不合理，在剖分剪剪切过程中产生较大的非正常冲击力。因此，在具体的钢板剖分剪切作业中，可以参照图 4 给出的不同厚度钢板对应剖分剪剪刃重叠量推荐值进行设置，对生产实践具有重要的指导价值。

3 结语

通过对滚切式剖分剪剪切原理、功能机构及剖分剪切能力进行分析，有利于丰富中厚板轧钢生产线精整剪切机组生产产品规格，并提高钢板生产效率。围绕滚切式剖分剪“两轴两偏心”关键技术，应用 Solidworks 等计算机辅助设计手段，对滚切式剖分剪剪切运动进行仿真分析，揭示了滚切式剖分剪 2 根偏心曲轴相位角之间关系及剪刃重叠量调整规律，为提升滚切式剖分剪剖分剪切质量提供理论支撑与技术参考，对提升中厚板精整剪切剖分剪切效率和延长设备使用寿命具有重要的应用和指导价值。

参考文献

1 李雷生. 滚切式剖分剪原理与结构研究[J]. 冶金设备，2018(5)：20-25，48.

2 李 磊. 提高中厚板成材率的方法与实践[J]. 宽厚板，2018，24(2)：31-35.