

DOI:10.13228/j.boyuan.issn1005-4006.20220176

异型坯连铸机 Q235B 生产实践及工艺

宁英衣

(福建罗源闽光钢铁有限责任公司, 福建 福州 350000)

摘 要: 为给型钢提供优质的铸坯,减少腹板裂纹、中心疏松等质量缺陷发生,研究了 Q235B 生产过程中的工艺条件,掌握了铸坯腹板裂纹和中心疏松产生的机理。通过控制钢水成分和洁净度、优化结晶器冷却及二次冷却工艺、优化保护渣工艺及水口插入深度等措施,保证铸坯在凝固过程中实现冷却均匀,降低铸坯表面温降,有效杜绝了铸坯表面腹板裂纹的发生,铸坯中心疏松等级控制在 1.0 以下。

关键词: Q235B; 保护渣; 结晶器冷却; 二次冷却; 腹板裂纹; 中心疏松

文献标志码: A **文章编号:** 1005-4006(2023)01-0118-06

Practice and process research of Q235B on beam blank caster

NING Ying-yi

(Fujian Luoyuan Minguang Iron and Steel Co., Ltd., Fuzhou 350000, Fujian, China)

Abstract: In order to provide high quality casting billet for section steel and reduce the occurrence of quality defects such as web crack and center loose, the technological conditions in the production process of Q235B were studied, and the mechanism of web crack and center loose of casting billet was mastered. By controlling the composition and purity of molten steel, optimizing the mold cooling and secondary cooling process, optimizing the slag protection process and the water outlet insertion depth, the casting billet can achieve uniform cooling during the solidification process, reduce the surface temperature drop of the casting billet, effectively eliminate the web cracks on the surface of the casting billet, and control the center porosity level of the casting billet below 1.0.

Key words: Q235B; protective slag; crystallizer cooling; secondary cooling; web cracks; loose center

H 型钢是一种经济断面型材,在基础建设的各个领域得到了越来越广泛的应用^[1-6]。近终形异型连铸坯是生产 H 型钢最理想的坯料,填补了福建省内轧制成材的 H 型钢生产空白,2022 年在罗源闽光新建投产了一台五机五流异型坯连铸机,该铸机由奥钢联普瑞特公司设计,年生产能力 150 万 t。异型坯截面形状比较复杂,在其生产过程中容易存在较多的内部质量和表面质量缺陷,易造成 H 型钢万能轧机轧制后成品出现批量质量问题^[7-10]。

本文以罗源闽光异型坯连铸生产线为基础,从铸坯存在的中心缩孔、皮下裂纹、中间裂纹、中心疏松等级高和夹杂物等质量问题入手,结合异型坯连铸机的工艺特点采用试验研究和数值模拟相结合的方法对铸坯出现的质量问题的原因和预防措施进行了分析和探讨^[11],从根本上查找问题根源,并提出工艺优化措施^[12]。具体措施,(1)优化钢水成分,提高异型坯钢水的洁净度和可浇性、降低缺陷发生率^[13]。(2)优化异型坯连铸机冷却工艺制度,对结晶器冷却水量^[14]和连铸二冷各段配水量^[15]进行了多目标智能优化,降低铸坯质量缺陷发生率,

提高生产率。(3)分析因保护渣问题而导致异型坯发生表面裂纹缺陷的原因,并根据检测结果和生产实际提出了保护渣性能调整建议^[16-19]。(4)通过数值模拟,对异型坯结晶器内的钢水(温度场^[20-21]、流场^[22])进行了仿真,分析了拉速、浸入式水口参数(插入深度)等工艺参数对结晶器内钢液的涡心位置、冲击深度、钢水流场的影响规律,从而优化结晶器内钢液流动^[23-24],促进夹杂物的去除,提高钢水洁净度。(5)采用全过程保护浇注,降低钢水浇注温度,提高铸坯内部质量^[25-29]。经后续实际生产证明,本文所采用的措施对异型坯的质量控制科学、合理、有效。

1 异型坯连铸机工艺简介

异型坯连铸机属于近终型连铸机,其生产的 H 型钢铸坯具有独特的断面形状,兼具薄板坯、圆坯、大方坯的特点,凝固过程很难实现均匀冷却,导致铸坯表面温度梯度大,铸坯腹板处于低温脆性区容易产生腹板裂纹^[30]、中心疏松等质量缺陷,铸坯质量控制难度大。

1.1 连铸机生产工艺流程

罗源闽光异型坯连铸机生产工艺流程:120 t 顶底复吹转炉→LF 炉精炼→异型坯连铸机→H 型万能轧机。

1.2 异型坯连铸机主要技术参数

异型坯连铸机主要技术参数见表 1。

表 1 异型坯连铸机主要技术参数
Table 1 Main technical parameters of heterotype billet caster

项目	参数
铸机弧形半径/m	12
流间距/m	2 100
生产钢种	Q235B、Q355B 等
生产断面/ (mm×mm×mm)	BB1:450×350×100; BB2:750×370×100
定尺长度/m	6.5~13.6
结晶器铜管长度/mm	800
铸机长度/m	34.8
钢包钢水重量/t	150
工作拉速范围/ (m·min ⁻¹)	BB1:0.8~1.35;BB2:0.8~1.2;
结晶器型式	板式(组合式)
结晶器液面控制	Cs137 检测,拉速控制
振动型式	液压振动双单元
引锭杆形式	柔性引锭杆
二冷形式	单流 13 个冷却回路(足辊全水、其他区 气雾冷却),共 65 个冷却控制回路
拉矫机	单流 4 台独立机架、3 个托辊
自动定尺	红外定尺+编码器定尺

1.3 异型坯冷却工艺特点

异型坯连铸在工艺和设备方面与现代传统的连铸工艺有很多相似之处,但因其断面的特殊性,具有和其他传统连铸不同的工艺特点。异型坯断面形状复杂,兼具薄板坯、圆坯、大方坯的特点,工艺控制难度大。异型坯断面大而不规则,钢水进入结晶器内形成的流场非常复杂,钢水流动无序,注流位置钢水流动性好,腹板中心位置钢水流动性差,导致铸坯在结晶器冷却过程中温度场及应力分布极不均匀,如保护渣选型和浸入式水口的插入深度不当,加剧了温度场和应力场的不均匀分布,使得铸坯的凝固组织控制困难,腹板裂纹容易出现,如图 1 和图 2 所示。

异型坯在二冷区内的冷却情况与结晶器内有很大的不同。在二冷区,铸坯除了向周围辐射和向

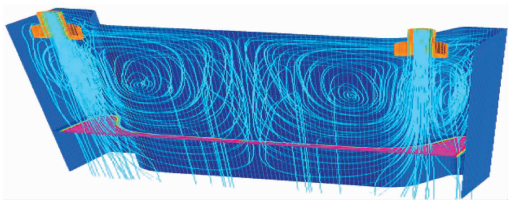


图 1 流场图
Fig. 1 Flow field diagram



图 2 温度场图
Fig. 2 Temperature field diagram

支撑辊导热之外,主要的散热方式是冷却水和铸坯表面的热交换即表面喷水强制冷却。因此影响二冷区传热的因素主要取决于喷嘴的结构和布置、喷水密度、喷嘴压力、喷淋水滴速度和雾化效果及比水量^[31-35]。

2 生产情况

罗源闽光异型坯连铸机 2022 年 5 月份投产以后,Q235B 生产工艺制度及工序质控点在不断摸索和不断完善中,Q235B 批量生产后,经取铸坯低倍组织样酸洗后,铸坯中心疏松级别偏高,并伴有中心缩孔、皮下裂纹、中间裂纹等缺陷,H 型钢轧制成品质量缺陷也较多,铸坯低倍酸洗结果情况见表 2。

表 2 低倍组织酸洗检测结果
Table 2 Low power tissue pickling test results 级

序号	偏析	疏松	缩孔	中心裂	中间裂	皮下裂纹	非金属夹杂
第 1 组	1	3	1	1	1	0	1
第 2 组	0	2	2	0	0	2	2

3 生产工艺控制

3.1 成分优化

异型坯连铸机钢水成分设计见表 3。

表 3 钢水成分表(质量分数)
Table 3 Molten steel composition table

成分要求		C	Si	Mn	P	S	微量元素	CEQ
标准范围	上限	≤0.20	≤0.35	≤1.40	≤0.045	≤0.045	Ni≤0.30;Cr≤0.30;Cu≤0.30	—
	下限							
成品范围	上限	0.20	0.35	1.40	≤0.045	≤0.045	Ni≤0.30;Cr≤0.30;Cu≤0.30	≥0.21
	下限	0.15	0.10	0.35				
精炼内控范围	上限	0.17	0.30	0.60				0.30
	下限	0.15	0.20	0.50	≤0.025	≤0.010	Ni≤0.30;Cr≤0.30;Cu≤0.30	0.26
	目标	0.16	0.22	0.55				0.28

异型坯铸坯裂纹产生主要受钢水中 $w([C])$ 、 $w([S])$ 和 $w([H])$ 等元素影响。当钢水中 $w([C])$ 为 0.09%~0.14% 时,铸坯裂纹敏感性强,因为 $w([C])=0.12\%$ 时,钢水凝固时易发生包晶反应,相变过程中初生坯壳极剧收缩,坯壳与结晶器壁间的空隙变大,冷却效果减弱,导致坯壳生长不均匀,铸坯表面容易产生裂纹, $w([S])$ 是钢中有害元素,钢水中 $w([S])$ 越高,铸坯内部裂纹倾向急剧增加,钢水中的 $w([Mn])$ 能有效抵消 $w([S])$ 的有害作用,因此钢水中 $w([S])$ 越高、锰硫比越低,铸坯在高温下的强度塑性越差,坯壳产生裂纹概率越高^[36]。钢水中 $w([H])$ 在铸坯凝固过程中不断以氢气泡的形式逸出并进入液渣膜,最终在坯壳与结晶器铜板之间不断累积,阻碍传热,铸坯坯壳生长变薄容易形成裂纹。

罗源闽光生产 Q235B 时,成分设计避开 $w([C])$ 为 0.09%~0.14% 的裂纹敏感区,转炉钢水全精炼的方式控制钢水中的 $w([H])$ 小于 0.000 5%;钢水中 $w([S])$ 在 0.01% 以下, $w([Mn])$ 在 1.40%,保证锰硫比;为连铸提供优质洁净的钢水,保证钢水的可浇性,控制铸坯裂纹的产生。

3.2 结晶器冷却制度优化

异型坯连铸采用组合式铜板结晶器,内外弧面为圆孔型水槽,翼缘面为条形水槽。组合式铜板结晶器冷却效果更加均匀,能有效防止铸坯腹板表面及 R 角处的裂纹产生。结合异型坯结晶器内温度场和应力场的试验结果,并与生产现场对照可知,异型坯连铸铸坯在结晶器内同一时刻,R 角处温度值偏高,翼缘两端温度值偏低,腹板、窄面及翼板处温度差值较小;在结晶器出口处,R 角坯壳厚度最薄,翼缘两端坯壳最厚,铸坯凝固过程在结晶器内腹板、R 角、翼缘中心与窄面中心易产生裂纹^[37]。结晶器冷却制度中,结晶器热流密度对铸坯表面裂

纹的产生取决定性作用,在保证出结晶器下口坯壳厚度的情况下、要减少铸坯裂纹的产生,需最大程度降低结晶器的热流密度。

在实际生产中,保证拉坯阻力不大于 20 kN 时,通过增大结晶器流量,控制结晶器单流支管进水压力在 0.8 MPa 以上,进出水压差大于 0.3 MPa,结晶器水流速不小于 10 m/s,进水温度为 30~35 ℃,进出水温差为 4~7 ℃,使得结晶器冷却水充分带走钢水热量,降低结晶器内的热流密度,有效减少铸坯表面裂纹和铸坯中心疏松等缺陷的产生。

3.3 二次冷却制度优化

五机五流异型坯连铸机二次冷却采用气水雾化冷却,比水量为 0.6~1.4 L/kg,二冷段分为 5 区,即足辊区、二冷一段一区、二冷一段二区、二冷二段一区、二冷二段二区(1 个全水冷却区,4 个气雾冷却区),足辊区采用全水冷却,其余各区均采用气雾二次冷却,气雾冷却采用双介质喷淋系统。5 区共分为 13 个回路,每个回路均设流量控制,保证冷却过程中铸坯表面温度均匀,控制目标准确。

二冷强弱的选择和内外弧水量的分配对铸坯的内部质量和中心疏松影响很大^[38-44]。比水量的大小是用来衡量连铸机二冷区的冷却强度,因此二冷强弱的选择其实就是选择一个合适的比水量,比水量过大,冷却太强,异型坯表面积大,易散热,且铸坯内弧表面温度处于低温脆性区,易产生表面裂纹;比水量过小,冷却太弱,坯壳厚度薄,液相穴深度加长,若带液芯矫直,易产生内部裂纹^[45]。

通过研究 Q235B 钢种的二冷制度、比水量和矫直温度对铸坯内部质量特别是对中心疏松的影响,生产中二次冷却采用不同的冷却模式(强冷、中冷、弱冷),具体见表 4,发现二冷模式采用弱冷,内外弧水量分配比为 60:40,比水量为 0.7~0.8 L/kg 时,铸坯的内部质量最佳,可以有效控制铸坯的中心疏松、裂纹等内部质量缺陷。

表 4 二冷制度对比表

Table 4 Secondary cooling system comparison table			
序号	冷却模式	拉速/(m·min ⁻¹)	比水量/(L·kg ⁻¹)
第 1 组	强冷	1.0	1.06
第 2 组	中冷		0.89
第 3 组	弱冷		0.76

此外异型坯铸坯表面呈凹槽状,二次冷却雾化水分在出二冷室之前不能完全蒸发,蒸发部分水滴会沿铸坯内弧面下流,造成铸坯表面局部过冷,恶化铸坯表面质量,容易形成腹板裂纹。因此,罗源闽光在二冷区内弧侧安装喷吹排水装置,使铸坯内弧表面的积水在出二冷室之前吹扫干净,保证铸坯均匀冷却,减少裂纹的发生。同时也保证火焰切割的安全。

3.4 保护渣选型

保护渣冶金效果主要是改善传热、润滑、隔绝空气防止二次氧化、隔热保温和吸收钢水中的夹杂物^[46-50]。

根据罗源闽光异型钢种成分设计存在两大特点, $w([C])$ 含量处于亚包晶区,铸坯凝固收缩量大;微合金元素钒又是裂纹敏感元素。钢水发生包晶反应时,铸坯收缩量大且不规则,保护渣液渣的流入在缝隙大处聚集,出现沟槽,致使凝固收缩和传热不均,加上钒裂纹敏感性元素作用,从而容易导致铸坯表面的微裂纹产生。想要有效避免铸坯产生皮下裂纹,需提高液渣的形成速度和流入均匀性,保证铸坯与结晶器之间的传热效果。

生产时使用了西保和威保利德两个厂家的保护渣,具体见表 5。

表 5 保护渣指标
Table 5 Slag protection index

厂家	型号	黏度/(Pa·s)	熔点/℃	碱度
西保	WBB LM-2	0.41	1 141	1.13
威保利德	HDK-235	0.22	1 136	1.04

实际效果来看,使用这两种型号的保护渣铸坯表面质量都比较理想,HDK-235 型号的保护渣的铸坯表面质量要略好于 WBB LM-2。保护渣碱度在 1.0~1.2,保护渣结晶温度和凝固温度高,可以有效减少玻璃体比例,减缓传热,从而达到减少纵裂的目的;黏度在 0.20~0.45 Pa·s,渣黏度低,流入的熔渣多,形成的渣膜厚,有利于增加热

阻。但黏度存在一适宜范围,保护渣黏度过低,液渣易分布不均,润滑和冷却效果不佳,严重时在局部堆集导致初生坯壳受压产生凹陷引发漏钢。保护渣黏度过高,液渣流动性差,液渣流入填充至结晶器壁和坯壳之间的空隙量减少,形成液渣膜较薄,传热效果差。结合异型坯生产特点,应选用高碱度、低黏度的保护渣,既能保证坯壳与结晶器之间的润滑和传热效果,形成足够的厚度的坯壳,又避免坯壳与结晶器壁之间发生粘结,防止漏钢。

3.5 优化浸入式水口插入深度

钢水浇注进入结晶器后会形成很深的冲击流,由于浸入式水口位置距铸坯内缘和窄面近,所以这两处出生坯壳受到的冲刷力最严重。冲击流在结晶器 0.5 m 处,钢液会形成一个明显的回流区,小部分钢液进入液相穴深处,大部分则沿横向流入腹板,向上形成回流区。

浸入式水口设计与插入深度将影响结晶器的流场,进而影响出生坯壳是否均匀。浸入式水口插入深度太深,钢水注流冲击太深,钢水中的细微夹杂物上浮难且下部坯壳冲刷严重,坯壳厚度得不到保证;结晶器上部传热不足坯壳过早形成,不利于化渣;出结晶器铸坯断面温度分布不均,内缘和铸坯窄面中心存在高温区,尤其是内缘处,极易发生漏钢事故;浸入式水口插入太浅,冲击流回流明显,易造成结晶器液面波动,容易卷渣^[51]。

异型坯连铸机采用单孔直筒型水口,为进一步优化浸入式水口插入深度,结合生产实际对 50、60、70、80、90 mm 等插入深度进行了跟踪,发现插入深度在 70~80 mm 时,结晶器液面平稳,无卷渣现象,保护渣液渣层厚度稳定在 8~10 mm,渣面活跃度也较好,保证了结晶器上部的传热,有利于化渣,同时又有充足的液渣填充至铸坯与铜板之间缝隙,保证传热效果。

3.6 低过热度浇注

钢水过热度太高,铸坯易发生中心偏析、中间裂纹等缺陷。浇注温度是影响柱状晶生长的重要因素,浇注温度高,连铸坯柱状晶发达;浇注温度低,连铸坯等轴晶发达^[52]。异型坯因其形状特点,对浇注温度更加敏感,过热度低易冻水口,过热度高,易漏钢。罗源闽光异型坯连铸机生产钢水全部经精炼炉处理,钢水洁净度高,温度均匀。连铸机生产在不发生水口冻结的情况下,尽可能地采用低过热度进行浇注,并严格保护浇注工艺制度,尽可

能降低中间包内钢水温度,保证过热度浇注,罗源闽光现在实行过热度考核温度控制在 $18\pm5\text{ }^{\circ}\text{C}$,铸坯内部质量得到明显改善。

4 实施效果

实施上述措施后的两组 Q235B 批量生产,通过跟踪铸坯实物质量情况,铸坯表面良好,无皮下裂纹、夹渣等缺陷发生,取铸坯低倍组织样酸洗后铸坯内部无明显裂纹,如图 3 所示,低倍组织酸洗检测结果见表 6,由表 6 可知,中心疏松等级小于 1 级,

满足 H 型钢轧制工艺需求,表明工艺优化方向完全正确。

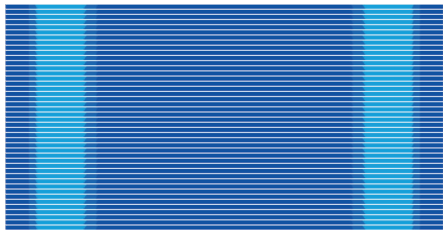


图 3 低倍组织坯酸洗实物图

Fig.1 Low power tissue billet pickling picture

表 6 低倍组织酸洗检测结果

Table 6 Low power tissue pickling test results

									级
项目	部位	偏析	疏松	缩孔	中心裂	中间裂	角裂	皮下裂纹	非金属夹杂
第三组	左翼缘	0	0.5	0	0	0	0	0	0
	腹板	0	1	0	0	0	0	0	0
	右翼缘	0	0.5	0	0	0	0	0	0
第四组	左翼缘	0	0.5	0	0	0	0	0	0
	腹板	0	0.5	0	0	0	0	0	0
	右翼缘	0	1	0	0	0	0	0	0

5 结论

(1)通过控制钢种的成分,避开包晶区,转炉钢水全部经精炼炉处理,进一步去除钢水中的有害元素和非金属夹杂物,提高锰硫比,为连铸机提供优质的钢水,提高钢水的可浇性,有效避免铸坯非金属夹杂物缺陷发生,改善铸坯内部质量。

(2)通过增大结晶器流量,控制结晶器单流支管进水压力在 0.8 MPa 以上,进出水压差大于 0.3 MPa,结晶器水流速不小于 10 m/s,进水温度在 $30\sim35\text{ }^{\circ}\text{C}$,进出水温差在 $4\sim7\text{ }^{\circ}\text{C}$,可以减少铸坯表面裂纹和铸坯中心疏松等缺陷的产生。

(3)二次冷却区采用弱冷制度,比水量控制在 $0.7\sim0.8\text{ L/kg}$,保证扇形段的工艺要求精度,喷嘴通畅无堵塞现象,喷枪对中良好,可有效减少铸坯裂纹的产生。

(4)采用高碱度、低黏度的保护渣,增加保护渣的使用过程中吨钢消耗量,保证液渣形成速度及液渣层厚度,坯壳与结晶器之间渣膜增厚,结晶器内导热热阻变大,结晶器弱冷,可有效降低铸坯表面纵裂及皮下裂纹的产生。

(5)采用直筒型水口浇铸,优化浸入式水口插入深度,避免结晶器液面波动过大导致卷渣,同时保证了结晶器上部的传热,有利于化渣,有充足的

液渣填充至铸坯与铜板之间缝隙,保证传热效果,改善铸坯质量。

(6)连铸机全过程采用低过热度浇注,中间包浇注过热度控制在 $18\pm5\text{ }^{\circ}\text{C}$,有效降低了铸坯中心偏析及中间裂纹的发生,改善铸坯质量。

(7)通过优化钢种成分设计、结晶器冷却制度、二次冷却工艺制度、保护渣选型、浸入式水口插入深度、低过热度浇注等措施,Q235B 铸坯实物质量得到改善,铸坯表面质量良好,铸坯内部质量处中心疏松外无其他质量缺陷,且中心疏松等级小于 1.0。

参考文献:

[1] 龚殿尧,高志宇,徐建忠,等. 小型 H 型钢超快冷“内并外扩”的有限元模拟[J]. 钢铁, 2022, 57(1): 102.

[2] 郭年琴,郭晟,文铁琦. H 型钢万能轧机轧辊调整装置运动学动力学分析[J]. 钢铁, 2015, 50(3): 91.

[3] 王克锋,宋介中,李明贤,等. SS400 热轧 H 型钢翼缘开裂成因及控制措施[J]. 钢铁, 2011, 46(9): 96.

[4] 石雷,张丽娜,肖克勇,等. 热轧 H 型钢翼缘斜度控制方法及措施[J]. 中国冶金, 2021, 31(4): 74.

[5] 赵培林,韩文习,杨志杰,等. 夹杂物对海工用 H 型钢冲击韧性影响及分析[J]. 中国冶金, 2020, 30(2): 74.

[6] 汪杰,吴保桥,张建,等. Nb-V、Nb-Ti 对重型热轧 H 型钢强韧性的影响[J]. 中国冶金, 2020, 30(11): 47.

[7] 刘崇,胡春林,吴坚,等. 钕微合金化异型坯高温热塑性的研

究[J]. 河北冶金, 2021(7): 26.

[8] 陈伟, 于兴旺, 王嘉琦, 等. 异型连铸坯结晶器内表面纵裂萌生区域[J]. 钢铁, 2017, 52(3): 36.

[9] 徐宇, 张峻纲, 林小祥, 等. 单点非平衡异型坯连铸配水优化的数值模拟[J]. 中国冶金, 2022, 32(4): 77.

[10] 邓爱军, 蒲雪峰, 左小坦, 等. H 型钢 V 形开裂的缺陷研究与优化[J]. 钢铁, 2019, 54(8): 161.

[11] 董鹏莉, 尚海霞, 王华. 铸坯及板卷典型质量缺陷成因与控制技术[J]. 中国冶金, 2017, 27(6): 7.

[12] 蔡开科. 连铸坯质量控制[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.

[13] 杨春政. 高效低成本洁净钢生产实践探索[J]. 钢铁, 2021, 56(8): 20.

[14] 杨丽, 柴锋, 罗小兵, 等. 连铸结晶器内板坯传热凝固行为建模和模拟[J]. 连铸, 2019(4): 68.

[15] 陈伟, 和保民, 郭高翔, 等. Q235B 连铸二冷配水分析[J]. 铸造技术, 2019, 40(2): 213.

[16] 李殿明, 邵明天, 杨宪礼, 等. 连铸结晶器保护渣应用技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.

[17] 翟俊, 李欢, 陈法涛, 等. 保护渣对 430 不锈钢铸坯边部凹陷缺陷的影响[J]. 中国冶金, 2022, 32(5): 102.

[18] 赵烁, 李祖树, 朱雨逸, 等. 低碳热轧板卷的表面黑线和翘皮缺陷形成机制[J]. 中国冶金, 2021, 31(4): 37.

[19] 毛文文, 路博勋, 郭银涛, 等. 中碳高铝钢表面缺陷研究及控制[J]. 中国冶金, 2021, 31(3): 111.

[20] 李四军, 彭永香, 李萍, 等. 超薄大断面异型坯结晶器非对称流场和温度场的优化[J]. 连铸, 2021(6): 9.

[21] 王晓晨, 孙齐松, 邸全康, 等. 薄板坯近终形异形坯连铸温度场数值模拟[J]. 钢铁, 2013, 48(12): 36.

[22] 张建伟, 苏旺, 崔衡, 等. PIV 测速技术分析异形坯连铸结晶器流场[J]. 连铸, 2019(1): 54.

[23] 刘颜彬, 唐海燕, 王凯民, 等. 水口结构对板坯结晶器液面流动行为的影响[J]. 连铸, 2022(3): 1.

[24] 武鸿杰, 徐宇, 储成阳, 等. 吹气情况下异型坯结晶器水口结构的物理模拟[J]. 连铸, 2021(3): 45.

[25] 陈正阳, 杨树峰, 谢锦丽, 等. 钛合金异形薄壁壳体铸造工艺数值模拟及优化[J]. 中国冶金, 2022, 32(10): 105.

[26] 常朋飞, 俞学成, 孙亮, 等. 板坯连铸机全保护浇注工艺优化[J]. 河北冶金, 2021(12): 51.

[27] 石树东, 胡显堂, 张虎成, 等. 薄板坯连铸保护浇注工艺研究[J]. 河北冶金, 2021(09): 39.

[28] 章印, 姜敏, 王新华. Q345D 钢精炼过程夹杂物生成及演变行为[J]. 钢铁, 2022, 57(2): 63.

[29] 赵紫玉. 连铸工艺参数调整对连铸坯中心偏析的影响[J]. 中国金属通报, 2020(2): 27.

[30] 梁军, 孙彪. 异形坯表面纵裂纹产生原因及控制措施[J]. 安徽冶金科技职业学院学报, 2021, 31(3): 47.

[31] 韩延申, 张江山, 邹雷雷, 等. 喷嘴喷淋距离对连铸小方坯二冷均匀性的影响[J]. 工程科学学报, 2020, 42(6): 739.

[32] 钱志友, 汪德富, 邓俊棕, 等. 厚板坯角部凹陷裂纹的控制措施[J]. 连铸, 2022(5): 76.

[33] 刘涛, 陈永峰, 王东兴, 等. 含硼钢铸坯表面裂纹缺陷控制[J]. 连铸, 2022(5): 62.

[34] 赵阳. 提高铸坯表面温度的节能工艺技术[J]. 河北冶金, 2020(12): 54.

[35] 王勇, 杨树峰, 李京社, 等. 精冲钢连铸坯角部横裂纹产生原因及控制措施[J]. 连铸, 2022(1): 49.

[36] 公斌. 微合金化近终型异形坯 R 角纵裂纹控制与应用[J]. 连铸, 2022(1): 62.

[37] 李超, 任素波, 胡正才, 等. 连铸结晶器内坯壳安全凝固的研究[J]. 重型机械, 2020(1): 33.

[38] 李伟, 谈正军, 程锦君, 等. 基于二冷优化的高拉速方坯质量改善及实践[J]. 连铸, 2022(2): 95.

[39] 杨鑫, 张媛媛, 何志军, 等. 基于电脉冲技术抑制连铸水口结瘤堵塞的研究[J]. 钢铁, 2021, 56(4): 52.

[40] 牛亮, 赵俊学, 仇圣桃, 等. 偏心 M-EMS 作用下连铸圆坯流动-传热模拟[J]. 钢铁, 2020, 55(9): 49.

[41] 马樊, 刘青, 张江山, 等. 喷嘴射流特征对连铸二冷区蒸汽膜穿透行为的影响[J]. 钢铁, 2022, 57(10): 101.

[42] 刘喜锚, 史伟宁. 连铸二冷系统喷嘴堵塞物来源分析和控制措施[J]. 中国冶金, 2022, 32(9): 73.

[43] 王亚涛, 朱小勇, 阎建武. 板坯连铸机二次冷却水分分配策略分析[J]. 连铸, 2022(1): 67.

[44] 吴晨辉, 李阳, 谢鑫, 等. 板坯连铸过程凝固传热数值计算与工艺优化[J]. 中国冶金, 2022, 32(3): 92.

[45] 潘文峰, 蔡兆镇, 王少波, 等. 连铸板坯二冷高温区传热均匀性研究与优化[J]. 中国冶金, 2021, 31(8): 23.

[46] 何宇明. 连铸结晶器保护渣功能发挥和稳定质量的系统思维[J]. 连铸, 2019(2): 14.

[47] 钱志友, 汪德富, 邓俊棕, 等. 厚板坯角部凹陷裂纹的控制措施[J]. 连铸, 2022(5): 76.

[48] 袁志鹏, 朱立光, 王杏娟, 等. 高拉速薄板坯连铸保护渣剪切变稀性质[J]. 钢铁, 2022, 57(12): 97.

[49] 韩秀丽, 刘盈盈, 刘磊, 等. 含钛型连铸保护渣性能及应用研究进展[J]. 钢铁, 2022, 57(10): 10.

[50] 刘长伟, 邹卓明. 机器人自动加保护渣技术在宁波钢铁的应用[J]. 连铸, 2022(3): 71.

[51] 周秋月, 朱坦华, 张立峰, 等. 非稳态浇铸对结晶器卷渣定量影响的大涡模拟[J]. 钢铁, 2022, 57(4): 68.

[52] 东滨, 张立峰, 陈天明, 等. 连铸坯宏观与半宏观偏析行为表征[J]. 连铸, 2021(4): 31.