

弧形连铸机生产 S355NL/Q355NE 钢 Φ1 200 mm 连铸圆坯的工艺实践

周开明,董娟

(江阴兴澄特种钢铁有限公司,江阴 214429)

摘要: Φ1 200 mm S355NL/Q355NE 钢 (Ceq 0.38~0.41) 连铸圆坯的生产流程为 100 t KR-BOF-LF-RH-R18 m 连铸。采用全保护浇注、精确冷却工艺、三段式电磁搅拌、缓冷工艺等技术措施,过热度控制在 15~45 ℃,拉速为 0.14~0.20 m/min,电磁搅拌 300 A/2 Hz,二冷比水量 0.20 L/kg,圆坯入坑缓冷时间 ≥72 h,出坑温度 ≤300 ℃。检测结果表明, [O] ≤0.001 8%、[H] ≤0.000 08%;铸坯中心疏松 ≤1.5 级、中心裂纹 ≤1.5 级、缩孔 ≤0.5 级;全截面碳含量极差 ≤0.07%;圆坯成分、低倍、表面均满足标准要求。圆坯经用户锻造成壁厚 450~550 mm 的风电法兰后,夹杂物、力学性能、内部探伤等质量指标检测结果,完全符合技术规范及用户使用要求。

关键词: Φ1 200 mm;大截面连铸圆坯;弧形连铸机

Process Practice of Arc Caster Producing Φ1 200 mm S355NL/Q355NE Steel Continuous Casting Round Bloom

Zhou Kaiming, Dong Juan

(Jiangyin Xingcheng Special Steel Works Co., Ltd., Jiangyin 214429)

Abstract: Φ1 200 mm S355NL/Q355NE steel (Ceq 0.38-0.41) continuous casting round bloom is manufactured by 100 t KR-BOF-LF-RH-R18M continuous casting process. Full protective casting, precise cooling process, three-stage electromagnetic stirring, slow cooling process and other technical measures are adopted. The superheat is controlled at 15-45 ℃, the drawing speed is 0.14-0.20 m/min, the electromagnetic stirring is 300 A/2 Hz, the secondary cooling water ratio is 0.20 L/kg, the slow cooling time into the pit is ≥72 h, and the pit exit temperature is ≤300 ℃. The results show that [O] ≤0.001 8%, [H] ≤0.000 08%; the central porosity of cast bloom ≤1.5 rating, the central crack ≤1.5 rating, the shrinkage cavity ≤0.5 rating, and the carbon content range of the whole section ≤0.07%. Chemical composition, macrostructure, surface quality all meet the standard requirements. After the round bloom is forged into wind turbine flanges with wall thickness of 450-550 mm by customer, the test results of inclusions, mechanical properties, internal flaw detection and other quality indexes are satisfactory, which fully meet the technical specifications and user requirements.

Key Words: Φ1 200 mm; Large Section Round Bloom; Arc Continuous Caster

随着国家“双碳”战略的推进,风能作为资源广阔的理想可再生清洁能源,转型升级已经是大势所趋:风力发电由陆上到海上,单机兆瓦从 2MW→6MW→12MW→16MW 不断革新,装备制造技术更是向大型化不断突破,其大型锻件对超大规格坯料的需求更加迫切。由于当时市场连铸圆坯直径的限制(≤Φ1 000 mm),许多大壁厚法兰用钢都是使用大型钢锭锻造,在锻造前,钢锭需切除头尾,锻造过程中必须对钢锭进行滚圆处理,才能满足环件制坯的需要。

兴澄特钢为满足市场需要,成功开发了 Φ1 200 mm 直径的连铸圆坯,大幅减少了下游锻造厂用户的锯切成本、提高了锻造效率和成材率。

1 试验材料及设备

1.1 钢种

风电法兰用 Φ1 200 mm 连铸大圆坯为 S355NL/Q355NE 钢,化学成分见表 1。

1.2 生产工艺流程

工艺路线:铁水(KR 预处理)→100 t BOF 转炉→LF 精炼→RH 真空处理→连铸→缓冷→表面精整→检测→入库→发货。

1.3 主要装备

Φ1 200 mm 大圆坯弧形连铸机为三机三流,流间距为 3 m,弧形半径 R18 m,生产规格 Φ600~1 200 mm,浇铸模式为浸入式浇注,具有三段式电磁

表 1 S355NL/Q355NE 钢化学成分/%
Table 1 Chemical composition of S355NL/Q355NE steel/%

项目	C	Si	Mn	P	S	Nb	Ti	V	Al	N	O	H	Ceq
标准	0.12 ~	0.15 ~	1.25 ~	≤	≤	0.005 ~	≤	0.005 ~	0.02 ~	≤	≤	≤	0.38 ~
	0.17	0.35	1.50	0.015	0.010	0.050	0.05	0.050	0.05	0.011	0.002 0	0.000 2	0.41
内控	0.14 ~	0.25 ~	1.27 ~	≤0.013	≤	0.005 ~	≤	0.005 ~	0.025 ~	≤	≤	≤	0.39 ~
	0.16	0.30	1.40		0.005	0.040	0.04	0.040	0.040	0.010	0.001 8	0.000 15	0.41

注:其它元素:Cr≤0.30%、Cu≤0.20%、Ni≤0.30%。

搅拌,中间包容量 28 t,拉速为 0.03 ~ 2.7 m/min。

2 生产难点

$\Phi 1200$ mm 连铸大圆坯相较于小截面的圆坯存在更多工艺控制和质量保障的难点,由于截面增加带来径向距离的增加,坯料内外温度梯度接近 600 °C,使得应力分布更为复杂,冷却和矫直过程的内部裂纹风险有所增加^[1];同样周向长度增加,使得结晶器和二冷区的周向冷却均匀性控制要求更高^[2];坯料截面增大带来矫直量增加需求,增加了表面矫直横裂纹产生的风险^[3]。截面增大,冶金长度增加,补缩难度增加,中心疏松、裂纹和缩孔的倾向性更强。直径 $\Phi 1000$ mm 以上超大截面弧形连铸生产技术,世界上没有先例^[4],是现代连铸生产模式进一步取代传统模铸的壁垒。S355NL/Q355NE 钢 $\Phi 1200$ mm 连铸大圆坯除控制好钢水洁净度、温度外,最主要的还是要确保连铸大圆坯的中心质量致密、全截面碳含量极差≤0.07%,钢中氧含量≤ 20×10^{-6} ,表面没有目视可见的纵向裂纹、横向裂纹、纵向塌凹、夹渣、结疤、气孔等缺陷。经用户锻造后夹杂物要求见表 2,低倍组织要求见表 3。

表 2 非金属夹杂物要求/级

Table 2 Requirements for non-metallic inclusions /rating	
非金属夹杂物	A _细 A _粗 B _细 B _粗 C _细 C _粗 D _细 D _粗 D _s
要求	≤2.0 ≤1.5 ≤2.0 ≤1.5 ≤1.5 ≤1.5 ≤1.5 ≤1.0 ≤2.0

表 3 低倍组织评级要求/级

Table 3 Macro-structure rating requirements/rating					
中心疏松	缩孔	中心裂纹	中间裂纹	皮下气泡	皮下裂纹
≤2.0	≤2.0	≤2.0	≤1.0	≤1.0	≤1.0

3 工艺控制要点及技术措施

兴澄特钢采用先进炼钢技术并持续创新^[5],炼钢流程控制一直稳定。针对 $\Phi 1200$ mm 圆坯质量控制难点,采取以下工艺过程控制:

3.1 全过程保护浇注

为了减少钢水二次氧化和温降,整个浇注过程

采用全保护浇注^[6]。钢包中加入碱性覆盖剂进行保温操作,防止钢包中的钢水二次氧化;钢水从钢包通过长水口流到中间包,长水口吹氩密封,浇注过程中加入中间包覆盖剂,成分为 Al₂O₃:29.1%、MgO:3%、CaO:52.8%;SiO₂:6.9%,起到绝热保温、隔绝钢水与空气接触、吸收上浮的夹杂物的作用;钢水从中间包到结晶器通过整体浸入式水口,结晶器中加入低碳保护渣,减少浇注过程的温降促进夹杂物上浮吸收。

3.2 拉速控制

大规格连铸圆坯的拉速控制至关重要,拉速过快或拉速过慢对于连铸圆坯的中心质量和表面质量都有影响。S355NL/Q355NE 钢生产过程中,根据过热度的不同,采取不同的拉速控制。通过钢包中加覆盖剂和中间包烘烤制度等措施降低钢包与中间包的温降,确保拉浇过程中温降在很小的范围内。为了方便的调节拉速,把过热度按照 10 °C 为一档,拉速按照 0.02 m/min 为一档与过热度进行搭配,过热度控制在 15 ~ 45 °C、拉速为 0.14 ~ 0.20 m/min。

3.3 精准冷却工艺

S355NL/Q355NE 钢是含 V、Nb、Al 微合金化碳锰钢,该钢种为亚包晶钢,产生横向裂纹倾向性大。 $\Phi 1200$ mm 连铸大圆坯横截面大,在冷却的过程中温度梯度大,容易产生热应力表面裂纹和内部裂纹等缺陷。若二冷过强,造成 $\Phi 1200$ mm 大圆坯表面反复回温,受到应力作用在大圆坯表层奥氏体晶界会形成应变诱导铁素体,反复回温导致 $\gamma \rightarrow \alpha \rightarrow \gamma$ 的反复相变,加速钢中 Al、Nb、V 等各种碳、氮化物在粗大的奥氏体晶界沉淀,引起晶界脆化,加剧了横向裂纹的敏感性^[7]。为了确保 $\Phi 1200$ mm 连铸大圆坯的中心质量与表面质量,在二冷区分 2 个独立控制的区域,由一级自动化或二级自动化系统单独控制,为保证冷却的均匀性,整个二冷区气雾喷嘴均匀布置,避免死角和重叠,同时结合 S355NL/Q355NE 钢的热塑性曲线(如图 1 所示),采用气雾冷却的方式,执行弱冷参数,调整比水量为 0.20 L/kg,避开此钢种的热脆性温度区间。在生产过程中实施动态控

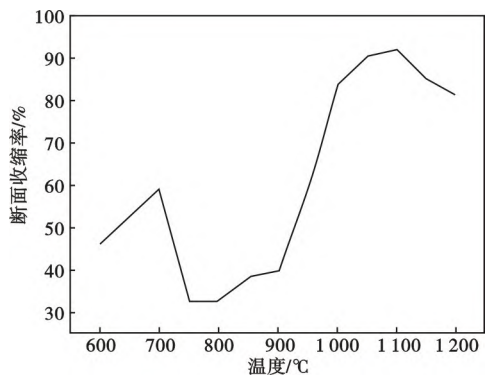


图 1 S355NL/Q355NE 钢热塑性曲线

Fig.1 Thermoplastic curve of S355NL/Q355NE steel

制冷却,建立了铸坯凝固传热模型,如图 2 所示。

3.4 电磁搅拌工艺

采用连铸工艺优化和设备精确调整还不能解决连铸大圆坯中心缺陷、偏析等问题,应用电磁搅拌是改善连铸大圆坯中心缺陷、获得高质量坯料的有效技术。连铸圆坯横截面越大,中心缺陷和碳偏析的倾向性越大^[8]。S355NL/Q355NE 钢的生产采用了三段式电磁搅拌,分别为结晶器电磁搅拌(M-EMS)、二冷段电磁搅拌(S-EMS)、凝固末端电磁搅拌(F-EMS)。三段电磁搅拌的组合使用,打碎树枝晶,加速柱状晶向等轴晶过渡;加速凝固传热和过热

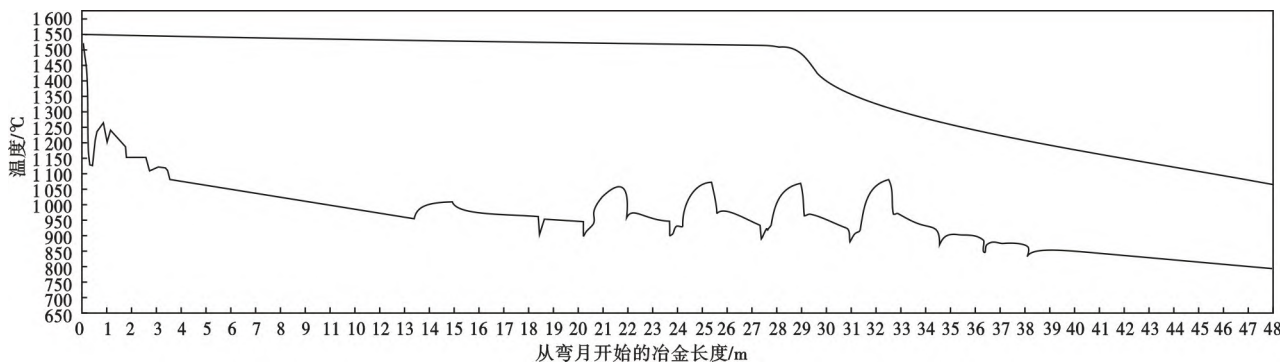


图 2 Φ1 200 mm 铸坯凝固传热模型显示界面

Fig.2 Display interface of Φ1 200 mm casting bloom solidification heat transfer model

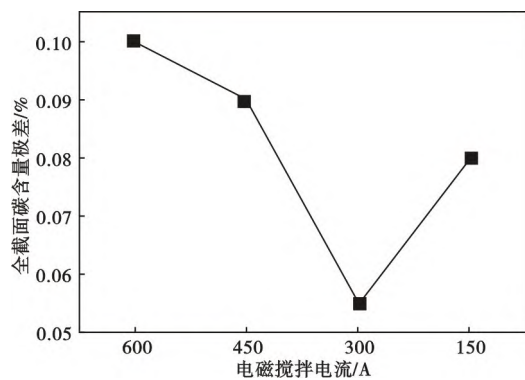


图 3 电磁搅拌电流与连铸圆坯全截面碳含量极差的关系

Fig.3 Relationship between electromagnetic stirring current and ultimate difference of carbon content in whole section of cast round bloom

度消除、改善 Φ1 200 mm 连铸大圆坯固液界面溶质再分配,减轻中心偏析^[7];改善中心凝固组织,改善铸坯中心质量;消除中心区等轴晶滑移、塌落引起的“V”型偏析^[9]。生产初期,三段式电磁搅拌采用多种频率、电流大小进行组合试验,在钢水拉浇过程中不同拉浇流设置不同的电流,通过全截面碳含量极差数据对比,如图 3,最终选择最佳的三段式电磁搅拌参数为电流 300 A、频率为 2.0 Hz 最佳组合,

Φ1 200 mm 连铸大圆坯全截面碳含量极差控制最好。

3.5 大圆坯缓冷工艺

大圆坯横截面越大,内部热应力释放速度越慢。为防止 Φ1 200 mm S355NL/Q355NE 钢连铸大圆坯冷却速度过快造成内部裂纹缺陷,连铸大圆坯火切后直接下线进入缓冷坑冷却,缓冷坑上加盖保温盖,缓冷时间控制 ≥72 h,出坑温度 ≤300 ℃。

4 连铸大圆坯质量控制水平

随机抽取 30 炉 S355NL/Q355NE 钢 Φ1 200 mm 连铸大圆坯批量生产后,圆坯进行 O、H 含量、低倍组织、表面、全截面碳含量等检测。

4.1 O、H 含量

经检测 O 含量在 0.001 0% ~ 0.001 7%、H 含量在 0.000 05% ~ 0.000 08%,O、H 含量统计分别如图 4、图 5 所示,均满足表 1 内控要求:

4.2 低倍组织及表面质量

Φ1 200 mm S355NL/Q355NE 钢连铸大圆坯低倍检测方法按照 GB/T 226-2015,试验方法采用酸浸法,低倍缺陷评级按照 YB/T 15-2015 不同规格等比例缩放进行评定,低倍取样位置图示如图 6(a),

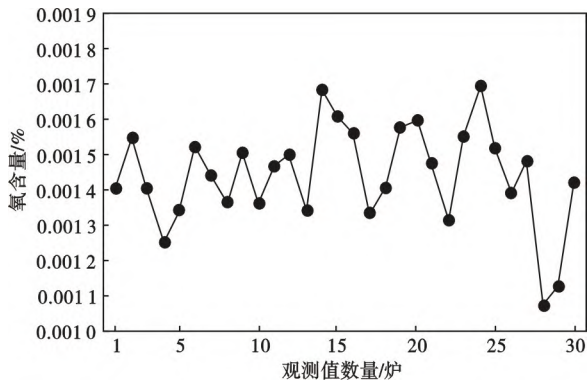


图 4 30 炉 S355NL/Q355NE 钢铸坯 O 含量分布/%

Fig. 4 Distribution of oxygen content in 30 heats S355NL/Q355NE steel cast bloom/%

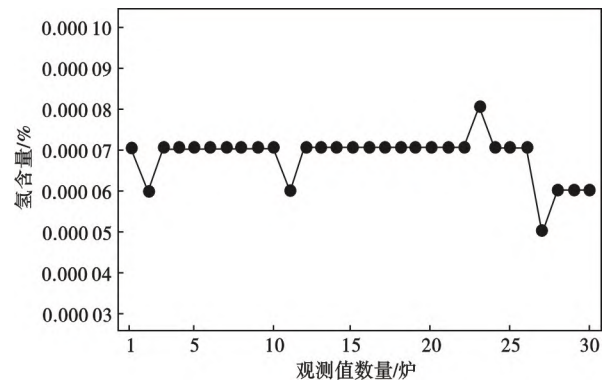


图 5 30 炉 S355NL/Q355NE 钢铸坯 H 含量分布/%

Fig. 5 Distribution of hydrogen content in 30 heats S355NL/Q355NE steel cast bloom/%

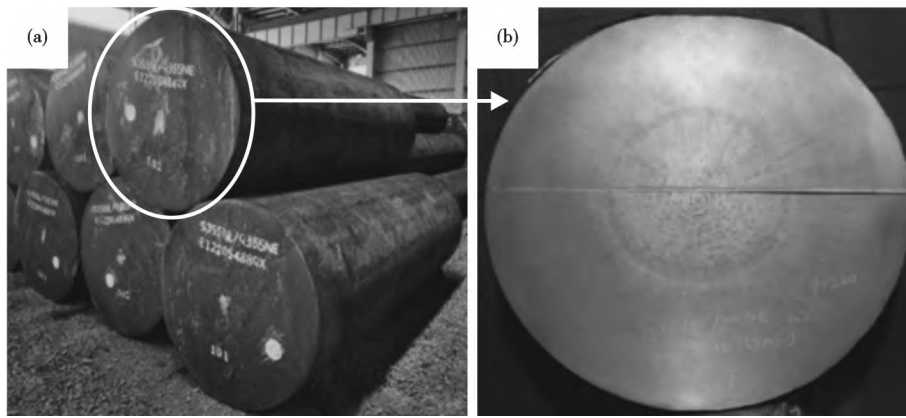


图 6 $\Phi 1200$ mm 连铸坯低倍取样位置(a)和低倍组织(b)

Fig. 6 Sampling position of macrostructure (a) and morphology of macrostructure of $\Phi 1200$ mm cast bloom (b)

表 4 30 炉 $\Phi 1200$ mm 铸坯低倍评级数据统计

Table 4 30 heats $\Phi 1200$ mm cast bloom macroscopic examination rating data statistics

检测项目	0 级/炉	0.5 级/炉	1.0 级/炉	1.5 级/炉
中心疏松	0	9	21	0
缩孔	28	2	0	0
中心裂纹	14	8	5	3
中间裂纹	30	0	0	0
皮下气泡	30	0	0	0
皮下裂纹	30	0	0	0

横向低倍组织如图 6(b), 表面无目视可见的纵向裂纹、横向裂纹、纵向塌凹等缺陷。

30 炉 $\Phi 1200$ mm S355NL/Q355NE 钢低倍评级数据统计见表 4, 都满足表 3 的低倍评级要求。

4.3 全截面碳含量分布

从 $\Phi 1200$ mm S355NL/Q355NE 钢连铸大圆坯的内弧到外弧, 使用 $\Phi 5$ mm 钻头、间隔 20 mm 钻孔

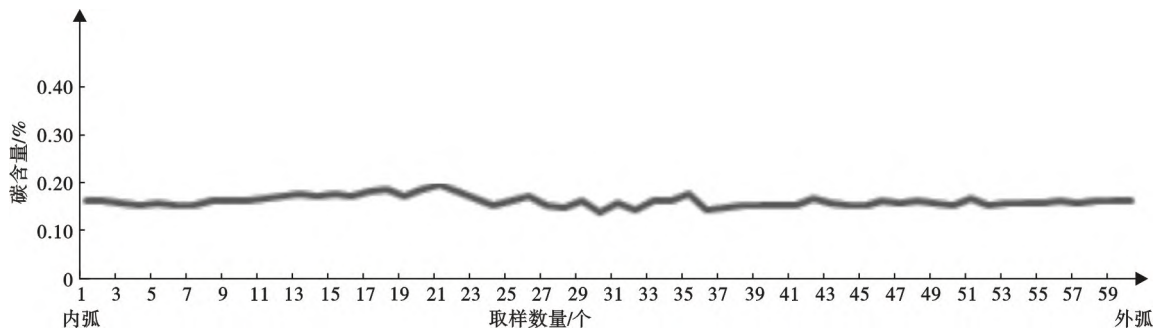


图 7 $\Phi 1200$ mm 铸坯内弧至外弧碳含量分布

Fig. 7 Carbon content distribution in $\Phi 1200$ mm cast bloom from inner arc to outer arc

取样,做碳硫分析,共计取样 60 个,全截面碳含量分布如图 7 所示,极差为 0.055%。

4.4 用户使用情况

Φ1 200 mm S355NL/Q355NE 钢连铸大圆坯,用户用于锻造壁厚 450 ~ 550 mm 的风电法兰,其锻造工艺为:下料-加热-锻造-中心冲孔-碾环-热处理-机

加工-探伤-性能检测-包装。经热处理后,在环件不同位置取样做非金属夹杂物、力学性能检测,抗拉强度、屈服强度、-50 °C 冲击等都完全满足用户的使用要求,最终环件探伤合格。力学性能检测结果见表 5、非金属夹杂物检测结果见表 6。

通过对成分、低倍、表面、全截面碳含量检测,大

表 5 S355NL/Q355NE 钢锻件力学性能

Table 5 Mechanical properties of forgings bar S355NL/Q355NE steel

项目	抗拉强度(R_m)/MPa	屈服强度(R_e)/MPa	断后伸长率(A)/%	断面收缩率(Z)/%	-50 °C 冲击(KV ₂)/J
标准要求	450 ~ 600	≥285	≥21	没有要求	≥54
最大值	540	335	37	77	119
最小值	497	293	31	67	57

表 6 S355NL/Q355NE 钢锻件非金属夹杂物/级

Table 6 Non-metallic inclusions of forgings bar S355NL/Q355NE steel/rating

项目	A _细	A _粗	B _细	B _粗	C _细	C _粗	D _细	D _粗	D _s
标准要求	≤2.0	≤1.5	≤2.0	≤1.5	≤1.5	≤1.5	≤1.5	≤1.0	≤2.0
最大值	1.5	1.0	1.5	1.0	0	0	1.5	1.0	1.5
最小值	0	0	0	0	0	0	0	0	0

圆坯各项指标完全满足用户标准,经用户锻造后非金属夹杂物、力学性能、探伤等检测结果,全部满足用户标准,得到用户的认可,由此说明,制订的关键生产工艺参数能够有效保证产品质量。

5 结论

(1) 分析了 Φ1 200 mm S355NL/Q355NE 连铸大圆坯的关键控制难点,采用全保护浇注、控制拉速精确冷却工艺、三段式电磁搅拌、缓冷工艺等技术措施,过热度控制在 15 ~ 45 °C,拉速为 0.14 ~ 0.20 m/min,电磁搅拌参数 300 A/2 Hz,二冷比水量 0.20 L/kg,连铸圆坯入坑缓冷时间 ≥ 72 h,出坑

温度 ≤ 300 °C。经产品检测结果证明制定工艺有效,保证了产品的内外质量良好。

(2) 检测结果表明, [O] ≤ 0.001 8%、[H] ≤ 0.000 08%;铸坯中心疏松 ≤ 1.5 级、中心裂纹 ≤ 1.5 级、缩孔 ≤ 0.5 级;全截面碳含量极差 ≤ 0.07%;化学成分、低倍组织、表面质量等各项指标均达到标准要求。

(3) Φ1 200 mm 连铸圆坯经用户锻造成壁厚 450 ~ 550 mm 的风电法兰后,夹杂物、力学性能、内部探伤质量指标检测结果理想,完全符合技术规范及用户使用要求,得到用户认可。

参考文献

- [1] 马交成,祖陵宇,刘文红,等. 连铸方坯热应力模型的研究及应用[J]. 东北大学学报(自然科学版),2009,30(10):1445-1448.
- [2] 王 博,张炯明,肖 超,等. 连铸板坯轻压下过程中间裂纹产生机理[J]. 工程科学学报,2016,38(3):351-356.
- [3] 兰 鹏,杜辰伟,陈培莉,等. 微合金钢连铸表面横裂纹形成机理与控制技术研究现状[J]. 钢铁研究学报,2017,29(1):1-12.
- [4] 吴国庆,阚国院,陈卫强,等. 特大断面圆坯连铸机的设计特点及应用[J]. 连铸,2018,43(6):77-82.
- [5] 徐国庆,许晓红,钱 刚. 兴澄钢铁公司 100 t 直流 EBT 电弧炉高效生产实践[J]. 特殊钢,2004,25(3):50-51.
- [6] 张志宏,刘伟平,李国光,等. Φ500 mm 大圆坯连铸机的生产实践[J]. 特殊钢,2011,32(5):53-55.
- [7] 蔡开科. 连铸坯质量控制[M]. 北京:冶金工业出版社,2010. 5.
- [8] 胡汉起. 金属凝固原理(第 2 版)[M]. 北京:机械工业出版社,2012.
- [9] 杨吉春. 电磁搅拌重轨钢连铸大方坯质量研究[D]. 北京:北京科技大学 2003. 6.