



结晶器电磁搅拌对 Q355NE $\Phi 800$ mm 圆坯 凝固组织及偏析的影响

周伟基¹, 姚玉东¹, 刘佳伟², 岳峰², 史建凯²

(1 东北特钢集团股份有限公司总工办, 大连 116105; 2 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘要:以钢厂 $\Phi 800$ mm 圆坯连铸机为研究对象, 研究结晶器电磁搅拌电流和频率对电磁扭矩以及 Q355NE 钢圆坯等轴晶率和碳偏析的影响规律。研究发现, 电磁扭矩随着结晶器电磁搅拌(M-EMS)电流的增加而增加, 且增加幅度逐渐加大。电流越高, 频率对电磁扭矩的增强效果越显著。电流在 0~200 A 时, 等轴晶率随电流和电磁扭矩的增加而增加, 且等轴晶率和电磁扭矩呈线性关系。电流为 150 A 时出现皮下负偏析, 相比较于电流为 50 A, 电流为 150 A 时出现了更为严重的晶间转变正偏析。

关键词:结晶器电磁搅拌; 电磁扭矩; Q355NE 圆坯; 等轴晶率; 宏观偏析

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. 2022-00147

Effect of Crystallizer Electromagnetic Stirring on Solidification Organization and Segregation of Round Billets Q355NE $\Phi 800$ mm

Zhou Weiji¹, Yao Yudong¹, Liu Jiawei², Yue Feng², Shi Jiankai²

(1 Chief Engineer office, Dongbei Special Steel Group Co., Ltd., Dalian 116105; 2 School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract: Taking a steel mill $\Phi 800$ mm round billet continuous casting machine as the research object, the influence of crystallizer electromagnetic stirring current and frequency on electromagnetic torque and Q355NE steel round billet equiaxed crystal rate and carbon segregation was studied. It was found that the electromagnetic torque increased with the increase of the crystallizer electromagnetic stirring, and the increase was gradually increased. The higher the current intensity, the more significant the effect of frequency on the torque enhancement. The current intensity ranges from 0 to 200 A, the isometric crystal rate increases with the increase of current strength and electromagnetic torque, and the isometric crystal rate and electromagnetic torque is linearly related. Negative subcutaneous segregation occurs at a current intensity of 150 A. Compared to a current intensity of 50 A, a more severe positive segregation of intergranular transformation occurs at a current intensity of 150 A.

Key Words: Crystallizer Electromagnetic Stirring; Electromagnetic Torque; Q355NE Billet; Equiaxial Crystal Rate; Macroscopic Segregation

Q355NE 作为低碳低合金高强钢, 具有优异的综合力学性能和较好的抗腐蚀性能^[1-2]。工业上将 Q355NE 钢大圆坯用于生产风电法兰盘^[3], 作为风电设备的结构件对其均质性要求较高。轧制和热处理过程对消除组织宏观偏析效果十分有限, 因此, 要求铸坯凝固组织有良好的均质性。

电磁搅拌是改善铸坯凝固组织及宏观偏析的重要冶金技术, 国内外学者开展了许多电磁搅拌对铸坯凝固组织及宏观偏析的研究工作。胡亮^[4]研究小方坯连铸电磁搅拌对高碳钢铸坯质量的影响规

律, 发现电磁搅拌工艺对于改善高碳钢铸坯的中心缩孔、中心疏松、中心偏析问题以及提高等轴晶率都有很好的效果, 能够提高高碳钢铸坯质量。张康晖^[5]等人研究结晶器电磁搅拌对 ML40Cr 钢小方坯凝固组织的影响, 发现施加结晶器电磁搅拌有利于改善中心偏析, 但 CET 转变区出现较宽负偏析区域, 不利于均质化。王亚栋^[6]研究电磁搅拌对连铸大方坯宏观偏析的影响, 发现随着结晶器电磁搅拌电流增强, 铸坯等轴晶率增加, 偏析点个数和密度明显增加, 铸坯凝固组织均质性变差。

众多学者研究结晶器电磁搅拌对凝固组织及宏观偏析的影响提出了不同的结晶器电磁搅拌工艺,主要是由于研究的钢种、铸坯断面尺寸以及连铸机的差异性^[7-8]。因此,依据特定的钢种、铸坯截面和连铸机制定合理的结晶器电磁搅拌工艺才能有效改善铸坯质量。结晶器电磁搅拌作用于Q355NE钢大圆坯的研究鲜有报道,本文对钢厂结晶器电磁搅拌电流和频率对电磁扭矩以及Q355NE Φ800 mm圆坯凝固组织及宏观偏析影响进行研究,该研究对生产高品质Q355NE钢大圆坯具有指导意义。

1 试验材料及方法

Φ800 mm的Q355NE钢圆坯采用结晶器电磁搅拌(M-EMS)+末端电磁搅拌(F-MES)组合的方式,Q355NE钢主要成分见表1,连铸机及生产工艺参数见表2。

表1 Q355NE钢化学成分(质量分数)
Table 1 Chemical composition of Q355NE steel %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	N	Nb
0.155	0.25	1.35	0.015	0.005	0.015	0.035	0.010	0.035

1.1 电磁扭矩

电磁搅拌本质是搅拌器线圈产生变化的磁场,载流钢液与磁场作用产生电磁力,驱动铸坯内钢液流动,增加热量的传递和物质传输^[9]。M-EMS生产的电磁力大小主要取决于电流和频率。本文采用日本CEDAR企业研发的DIS-RL2型电磁扭矩仪研究M-EMS电流和频率对电磁扭矩的影响规律,电磁扭矩仪如图1所示。

1.2 等轴晶率和碳偏析

本次研究M-EMS电流对等轴晶率和碳偏析的影响,工业试验方案见表3。铸坯试样均来源于连

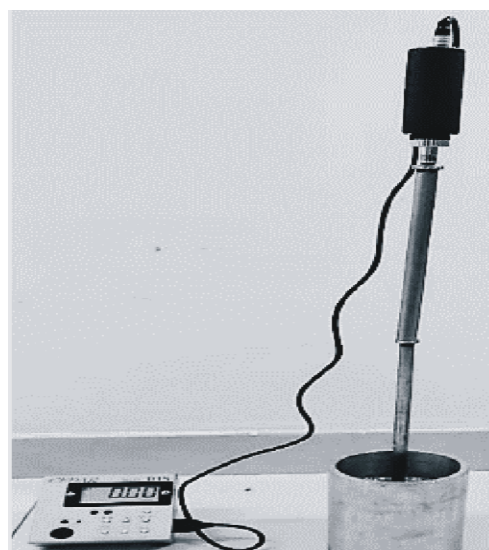


图1 电磁扭矩仪

Fig. 1 Electromagnetic torque meter

铸机1流,将连铸坯加工成厚度20 mm的横断面试样,按照GB/T 226-2015钢的低倍组织及缺陷酸蚀检验法中热酸法腐蚀,铸坯低倍等轴晶区和碳偏析取样点如图2所示。

采用Φ5 mm的钻头按图2所示碳偏析取样点对Φ800 mm的Q355NE钢圆坯进行钻孔取样,每个取样点约取1克试样,采用碳硫分析仪对碳含量进行检测分析。为了直观显示碳偏析的规律,根据式(1)计算偏析指数。

$$R_i = \frac{nC_i}{\sum_{i=1}^n C_i} \quad (1)$$

式中: R_i 表示碳的偏析指数; C_i 表示某取样点的碳含量,%; n 表示取样点的个数。

表2 连铸机及生产工艺参数

Table 2 Continuous casting machines and production process parameters

连铸机	工艺参数
机型,流数	全弧型,2机2流
浇注断面	Φ800 mm
连铸机半径	16.5 m
结晶器有效高度	560 mm
结晶器冷却水流量	2 300 L·min ⁻¹
二冷区比水量	0.19 L·kg ⁻¹
拉速	0.16 m·min ⁻¹
M-EMS距弯月面距离,参数范围	275 mm,0~500 A/0~3.5 Hz
F-EMS距弯月面距离,参数范围	15.5 m,0~800 A/0~12 Hz

表 3 试验方案
Table 3 Test programme

实验编号	结晶器电磁搅拌		末端电磁搅拌		拉速 $/(m \cdot min^{-1})$	二冷比水量/ $(L \cdot kg^{-1})$	过热度 $/^{\circ}C$
	电流/A	频率/Hz	电流/A	频率/Hz			
第 1 组	0	1.5	500	4.5	0.16	0.19	28
第 2 组	50	1.5	500	4.5	0.16	0.19	37
第 3 组	150	1.5	500	4.5	0.16	0.19	45
第 4 组	200	1.5	500	4.5	0.16	0.19	42

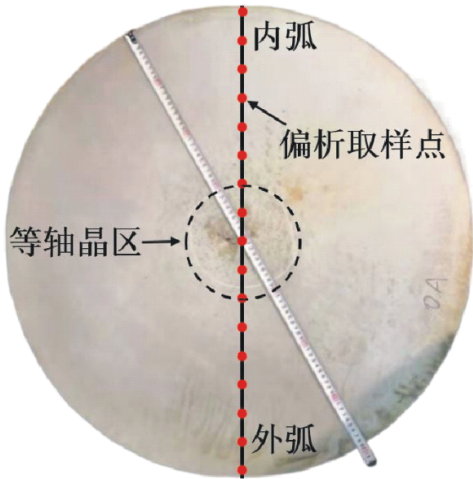


图 2 铸坯低倍等轴晶区和碳偏析取样点

Fig. 2 Sampling locations for low-frequency equiaxed crystal-line zones and carbon segregation in cast billets

2 试验结果与讨论

2.1 M-EMS 对电磁扭矩影响

M-EMS 电流对电磁扭矩的影响如图 3 所示, M-EMS 电流在 50 ~ 500 A 时, 电磁扭矩随着 M-EMS 电流的增加而, 且幅度逐渐加大。M-EMS 电流在

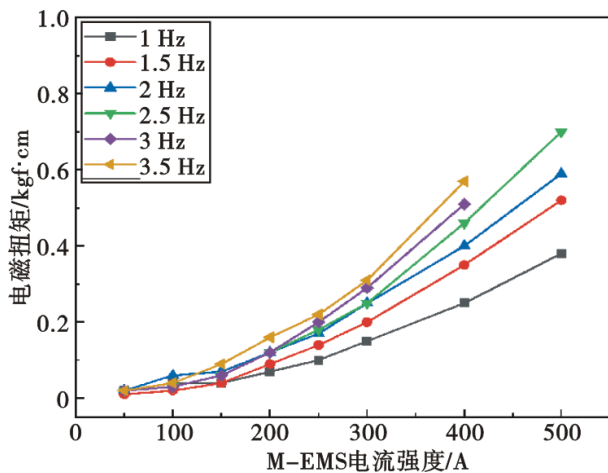


图 3 不同频率下 M-EMS 电流对电磁扭矩的影响

Fig. 3 Effects of M-EMS current strength on electromagnetic torque at different frequencies

0 ~ 150 A, 电磁扭矩平均增加 $4 \times 10^{-2} \text{ kgf} \cdot \text{cm} \cdot (100 \text{ A})^{-1}$, 200 ~ 300 A 时, 电磁扭矩平均增加 $12.1 \times 10^{-2} \text{ kgf} \cdot \text{cm} \cdot (100 \text{ A})^{-1}$, 400 ~ 500 A 时, 电磁扭矩平均增加 $15.3 \times 10^{-2} \text{ kgf} \cdot \text{cm} \cdot (100 \text{ A})^{-1}$ 。

M-EMS 频率对电磁扭矩的影响如图 4 所示。M-EMS 电流越高, M-EMS 频率对电磁扭矩的增强效果越显著。在 0 ~ 150 A 范围内, M-EMS 频率基本对电磁扭矩无影响, M-EMS 电流在 200 ~ 300 A 时, 电磁扭矩随频率的增加而平均增加 $4.9 \times 10^{-2} \text{ kgf} \cdot \text{cm} \cdot \text{Hz}^{-1}$, 电流 400 A 时, 电磁扭矩随频率的增加而平均增加 $12.8 \times 10^{-2} \text{ kgf} \cdot \text{cm} \cdot \text{Hz}^{-1}$, 电流 500 A 时, 电磁扭矩随频率的增加而平均增加 $21.3 \times 10^{-2} \text{ kgf} \cdot \text{cm} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。

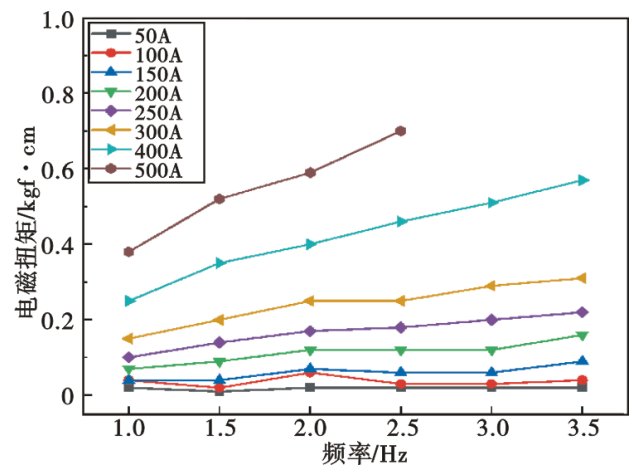


图 4 不同电流下 M-EMS 频率对电磁扭矩的影响

Fig. 4 Effects of M-EMS frequency on electromagnetic torque at different current

M-EMS 电流低于 150 A 时, M-EMS 频率对电磁扭矩基本无影响, M-EMS 电流在 200 ~ 300 A 时, M-EMS 频率和电流对电磁扭矩的增强效果基本相同, M-EMS 电流在 400 ~ 500 A 时, M-EMS 频率对电磁扭矩的增强效果高于电流。

2.2 M-EMS 对等轴晶率的影响

铸坯低倍组织如图 5 所示, 铸坯低倍组织评级见表 4, 按照等轴晶率为等轴晶区面积所占铸坯面

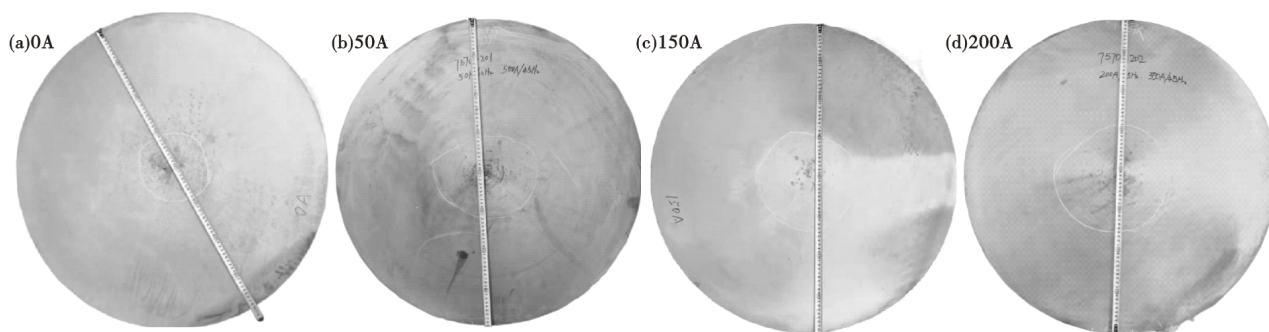


图5 铸坯低倍组织

Fig. 5 Macrostructure of cast billets

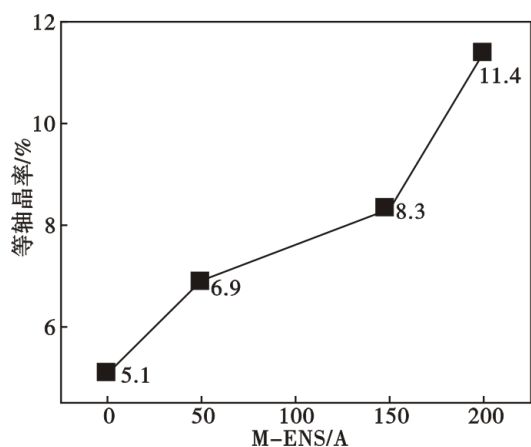


图6 M-EMS电流对等轴晶率的影响

Fig. 6 Effects of M-EMS current intensity on isometric crystal rate

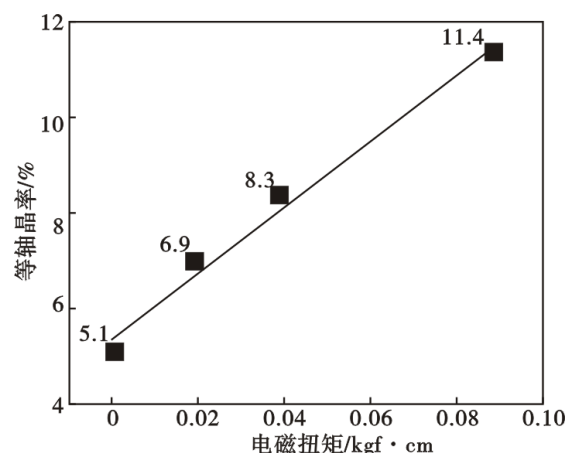


图7 M-EMS电磁扭矩对等轴晶率的影响

Fig. 7 Effects of M-EMS electromagnetic torque on isometric crystallinity

表4 铸坯低倍组织评级/级

Table 4 Rating of the macrostructure of cast billets /rating

M-EMS 电流/A	中心疏松	缩孔	中心裂纹	皮下裂纹	夹杂、卷渣
0	1.0	1.0	0	0	0
50	1.0	0.5	0.5	0	0
150	1.0	0.5	0	0.5	0
200	1.5	0.5	0	0.5	1

积比例, M-EMS 电流对等轴晶率的影响如图6所示, 等轴晶率随 M-EMS 电流的增加而增加, 等轴晶率和 M-EMS 电流呈非线性变化。图7为电磁扭矩对等轴晶率的影响, M-EMS 电流在 0~200 A 时, 等轴晶率和电磁扭矩呈线性关系, 其关系如式(2):

$$\lambda_e = 5.35 + 68.66T \quad (2)$$

式中 λ_e 表示等轴晶率, %, T 表示电磁扭矩, $\text{kgf} \cdot \text{cm}$ 。电磁扭矩是 M-EMS 影响等轴晶率的直接因素, 可以基于 M-EMS 电流和电磁扭矩的作用关系控制等轴晶率, 当然铸坯中心等轴晶比例是在一定范围内变化的, 存在极值。在凝固末端形成网状等轴晶组

织, 凝固和冷却收缩产生的抽吸力使等轴晶向连铸坯中心运动, 等轴晶间空隙较大, 为浓缩的钢液形成通道, 浓缩的钢液随着等轴晶共同沿浇注方向移动进而形成 V 形偏析^[10-11]。同时等轴晶形成过程中的网状结构也更容易形成疏松缺陷。因此适当降低等轴晶率可以有效减少 V 型偏析和疏松。

2.3 M-EMS对碳偏析的影响

M-EMS 电流对碳偏析的影响如图8所示。未采用 M-EMS 时, 从铸坯边部到距中心 150 mm 范围内碳偏析指数缓慢降低, 在中心 150 mm 范围内陡然升高, 中心碳偏析指数为 1.25。M-EMS 电流为 50 A 时, 从铸坯边部到距中心 200 mm 范围内, 碳偏析指数缓慢升高, 在中心 200 mm 范围内呈现降低的趋势, 中心碳偏析指数为 0.8。M-EMS 电流为 150 A 时, 在铸坯边部出现皮下负偏析。在电磁力的作用下驱动钢液流动, 将初生坯壳凝固前沿排出的高浓度溶质带走, 连铸坯皮下形成负偏析, 皮下负偏析会随着电磁力的增大而严重。在距离中心 350 mm

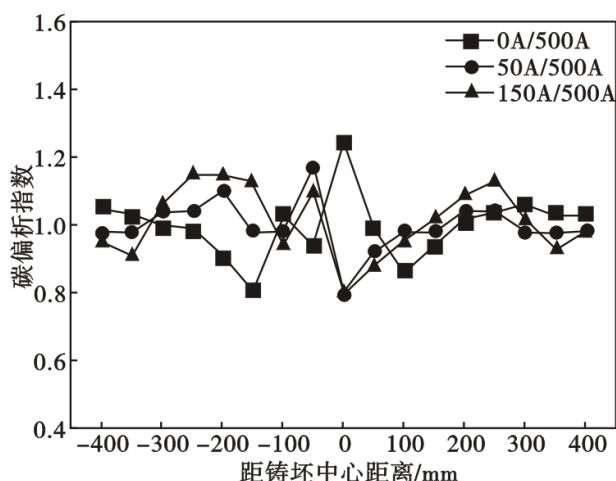


图 8 M-EMS 电流对碳偏析的影响

Fig. 8 Effects of M-EMS current intensity on carbon segregation

到 250 mm 范围内,碳偏析指数陡然升高,在中心 250 mm 范围内陡然降低,中心碳偏析指数为 0.8。

中心碳偏析指数沿连铸方向呈现周期性波动变化,因此,三种电流条件下铸坯中心同时出现正负两种偏析状态。M-EMS 电流为 150 A 时出现皮下负偏析,相比较于 M-EMS 电流为 50 A, M-EMS 电流为 150 A 时在柱状晶向等轴晶转变的过渡区也出现了更为严重的晶间转变正偏析。M-EMS 电流 50 A 时,在距中心 200 mm 出现晶间转变正偏析,偏析指数为

1.1, M-EMS 电流 150 A 时,在距中心 250 mm 出现晶间转变正偏析,偏析指数为 1.15。M-EMS 电流过高同时会带来结晶器卷渣的风险^[12-13]。

3 结论

通过研究 M-EMS 电流和频率对电磁扭矩以及 $\Phi 800$ mm 的 Q355NE 钢圆坯等轴晶率和碳偏析的影响规律,发现如下结论:

(1) M-EMS 电磁扭矩随着电流的增加而增加,且增加幅度逐渐加大。M-EMS 电流越高,频率对电磁扭矩的增强效果越显著。

(2) M-EMS 电流低于 150 A 时, M-EMS 频率对电磁扭矩基本无影响, M-EMS 电流在 200~300 A 时, M-EMS 频率和电流对电磁扭矩的增强效果接近, M-EMS 电流在 400~500 A 时, M-EMS 频率对电磁扭矩的增强效果高于电流。

(3) 等轴晶率随 M-EMS 电流和电磁扭矩的增加而增加, M-EMS 电流在 0~200 A 时,等轴晶率和电磁扭矩呈线性关系,其关系为 $\lambda_e = 5.35 + 68.66T$ 。

(4) M-EMS 电流为 0、50、150 A 时,中心碳偏析指数分别为 1.25、0.8、0.8。M-EMS 电流为 150 A 时出现皮下负偏析,相比较于 M-EMS 电流为 50 A, M-EMS 电流 150 A 时在柱状晶向等轴晶转变的过渡区也出现了更为严重的晶间转变正偏析。

参考文献

- [1] 张宝金,郭立波,张志兴,等. Q355NE 风电法兰圆坯探伤不合格原因分析[J]. 金属材料与冶金工程, 2021, 49(6): 13-16.
- [2] 杨文志,王双双,陈 钊,等. 正火轧制 Q355NE 低温钢板的工艺性能研究[J]. 金属材料与冶金工程, 2021, 49(3): 43-48.
- [3] 周开明,董 娟. 弧形连铸机生产 S355NL/Q355NE 钢 $\Phi 1200$ mm 连铸圆坯的工艺实践[J]. 特殊钢, 2023, 44(1): 52-56.
- [4] 胡 亮. 小方坯连铸电磁搅拌工艺技术对高碳钢铸坯质量的影响[J]. 有色金属文摘, 2015, 30(5): 110-111.
- [5] 张康晖,马建超,李 强,等. 结晶器电磁搅拌对 ML40Cr 小方坯凝固组织及偏析的影响[J]. 现代交通与冶金材料, 2021, 1(2): 84-88.
- [6] 王亚栋. 电磁搅拌对连铸大方坯宏观偏析的影响研究[D]. 北京:北京科技大学, 2022.
- [7] 俞 峰,陈兴品,杜松林,等. 圆坯连铸 GCr15SiMn 的成分偏析和接触疲劳寿命研究[J]. 特殊钢, 2022, 43(6): 13-20.
- [8] 张洪才,林 鹏,翟万里,等. 50CrMo 钢 $\Phi 600$ mm 连铸圆坯中心裂纹分析及工艺改进[J]. 特殊钢, 2022, 43(5): 43-46.
- [9] Jiang D, Zhang L, Wang Y. Effect of mold electromagnetic stirring on solidification structure and solute segregation in continuous casting bloom[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2022, 29(1): 124-131.
- [10] 黄 拓,马忠伟,任金朝,等. 82B 连铸坯 V 型偏析现象及控制[J]. 钢铁钒钛, 2014, 35(6): 108-112.
- [11] Ma X, Li D. Characterization, Mechanism and Control Measures of V Segregation in Continuous Casting Billet of C-Mn Steel[J]. Metallurgical and materials transactions. B, Process metallurgy and materials processing science, 2019, 50(3): 1161-1170.
- [12] 陈远清. 连铸大圆坯宏观碳偏析的控制研究[D]. 北京:钢铁研究总院, 2019.
- [13] 龚志翔,陈 刚,焦兴利,等. 结晶器电磁搅拌对 $\Phi 450$ mm 连铸圆坯组织和夹杂物的影响[J]. 特殊钢, 2004, 25(4): 35-37.