



改善弹簧钢小方坯中心偏析及线材性能工艺优化

孙 剑¹, 李 杰^{1*}, 张彩东¹, 李 杰¹, 赵海涛², 任 刚³

(1 河钢材料技术研究院, 石家庄 050023; 2 北京科技大学碳中和研究院, 北京 100083;

3 河钢集团邯钢公司, 邯郸 056000)

摘 要: 针对某钢厂生产的 55SiCr 弹簧钢, 用户加工后的油淬火钢丝断面收缩率在 40% 以下, 影响后续卷簧过程和弹簧的使用寿命, 通过低倍酸洗试验, 拉伸试验, 油淬火调质处理, 钻屑试验等方法对铸坯和线材进行评价检测, 发现铸坯中心偏析是导致拉拔性能差的主要原因, 通过开展连铸工艺优化试验, 研究结果表明: 高过热度控制对铸坯偏析及线材拉拔性能有显著影响, 过热度为 35 °C 相较于过热度 18 °C, 断面收缩率和伸长率分别提高 2% 和 0.8%; 结晶器电磁搅拌电流从 150 A 增加到 320 A, 中心等轴晶率由 8%~8.5% 增加到 10.5%, 但是中心碳平均偏析指数也随之增加; 相同结晶器电磁搅拌工艺时, 降低凝固末端电磁搅拌强度有利于改善中心偏析; 铸坯中心碳平均偏析指数由 1.10 降低到 1.02 时, 油淬火调质态线材断面收缩率由 39% 增加到 47%。

关键词: 弹簧钢; 过热度; 电磁搅拌; 中心偏析; 断面收缩率

DOI:10.20057/j.1003-8620.2023-00196 **中图分类号:** TF777.3

Process Optimization on Improving Center Segregation of Spring Steel Billet and Properties of Wire Rod

Sun Jian¹, Li Jie^{1*}, Zhang Caidong¹, Li Jie¹, Zhao Haitao², Ren Gang³

(1 HBIS Group Technology and Research Institute, Shijiazhuang, 050023 China; 2 Institute for Carbon Neutrality of University of Science and Technology Beijing, Beijing, 100083 China; 3 HBIS GROUP Hansteel Company, Handan, 056000 China)

Abstract: For a steel factory production of 55SiCr spring steel, the reduction of area of the oil quenched and tempered treatment wire rod after processing is less than 40%, which affects the subsequent spring coiling process and the service life of the spring. The casting billet and wire rod were evaluated by methods of low-magnification pickling test, tensile test, oil quenched and tempered treatment, drill cuttings test, etc., it was found that the center segregation of the casting billet was the main cause of poor drawing performance. Through the optimization test study of continuous casting process, the results showed that high superheat had a significant effect on the segregation of billet and the drawing performance of wire rod. When the superheat was 35 °C compared with 18 °C, the reduction of area and elongation increased by 2% and 0.8% respectively. The electromagnetic stirring current of the mold was increased from 150 A to 320 A, and the center equiaxed grain rate was increased from 8%~8.5% to 10.5%, but the average center carbon segregation index also increased. When using the same mould electromagnetic stirring technology, reducing the electromagnetic stirring intensity at the solidified end was beneficial to improve the center segregation. When the average center carbon segregation index of the slab decreased from 1.10 to 1.02, the reduction of area of the oil quenched and tempered treatment wire rod increased from 39% to 47%.

Key Words: Spring Steel; Superheat; Electromagnetic Stirring; Center Segregation; Reduction of Area

55SiCr 弹簧钢主要用于制作汽车悬架弹簧和气门弹簧等零部件, 因其严苛的服役环境, 需要有较高的强度、疲劳寿命和足够的塑性^[1-3]。国内某钢厂利用 150 mm×150 mm 小方坯生产的 55SiCr 弹簧钢盘条产品, 在用户加工后的油淬火钢丝断面收缩率在 40% 以下, 影响后续卷簧过程和弹簧的使用寿命。研究表明, 55SiCr 弹簧钢两相区宽度较大, 在凝固过程中易产生偏析, 而中心偏析已成为目前影响弹簧钢性能的主要因素, 特别是对经调质工艺处理

的弹簧钢丝的断面收缩率有着较大的影响^[4-5]。有研究表明, 通过采用电磁搅拌、低过热度浇注等技术措施可增加铸坯中心等轴晶率, 从而改善铸坯的中心偏析^[6-10]; 对此持不同观点的学者研究指出^[11-15], 中心等轴晶区有利于 V 形偏析的形成, 不利于中心偏析的控制。针对中碳低合金钢小方坯, 过热度和电磁搅拌对中心偏析影响尚无明确结论, 因此, 对小方坯生产 55SiCr 弹簧钢所需的关键工艺控制技术尚需进一步研究和优化。

作者简介: 孙 剑(1994—)男, 硕士, 工程师; **E-mail:** sunjian03@hbisco.com; **收稿日期:** 2023-09-13

通信作者: 李 杰*(1983—)男, 博士, 高级工程师; **E-mail:** lijie@hbisco.com

1 试验材料及方法

某钢厂采用 150 mm×150 mm 小方坯生产 $\phi 11$ mm 的 55SiCr 弹簧钢线材的主要工艺为:120 t 转炉→LF→RH→连铸→热轧,其主要成分要求见表 1。热轧盘条加工汽车悬架弹簧主要工艺:盘条→拉丝→矫直→油淬火(900 ℃左右)→回火(500 ℃左右)→成品包装。

表1 55SiCr 钢的主要成分要求(质量分数)

C	Si	Mn	Cr	P	S
0.54~0.57	1.40~1.50	0.62~0.72	0.60~0.70	≤0.015	≤0.010

1.1 不同过热度工业试验

为了研究不同过热度对连铸坯中心偏析和线材性能影响,设定拉速为 1.80 m/min,二冷比水量为 0.50 L/kg,电磁搅拌参数为 320 A, 2.5 Hz,末端电磁搅拌参数为 300 A, 9 Hz,分别取过热度为 18、35、42 ℃炉次的铸坯试样,去掉热影响区后沿着纵向截取厚度为 25 mm 左右的切片,经机加工后进行低倍酸洗试验,试验采用 GB/T226—2015 中的热酸侵蚀法。分别取过热度为 18 ℃和 35 ℃对应的 $\phi 11$ mm 线材进行油淬火调质处理,在 10kW 碳管炉 900 ℃保温 1 h 进行油淬火,之后 450 ℃保温 0.5 h 回火,油淬火调质后的线材经矫直后通过 ZWICK-Z600E60 KN 电子拉力试验机进行拉伸试验,同时,截取油淬火调质线材为 10 mm 的小段,沿 1/2 纵截面剖开,通过自动热镶样机进行镶样,样品经过磨抛后使用 4% 的硝酸酒精溶液进行侵蚀,通过 AXio Imager.M2 m 正立全自动显微镜进行组织观察。

1.2 不同电磁搅拌工业试验

该厂 150 mm×150 mm 方连铸机配置了结晶器和凝固末端电磁搅拌装置,其中,结晶器电磁搅拌为内置式,工作电流和频率分别为:0~550 A 和 1~6 Hz;凝固末端电磁搅拌装置的工作电流和频率分别为:0~400 A 和 6~16 Hz。为了研究不同电磁搅拌工艺参数对连铸坯中心偏析和线材性能的影响,设计了表 2 的试验方案,其中拉速为 1.80 m/min,二冷比水量为 0.50 L/kg,过热度控制在 35 ℃左右。

对不同试验方案的连铸坯试样,在宽度中心线位置沿着厚度方向进行切割,得到铸坯纵向中心剖面,然后对铸坯进行钻屑取样,每个铸坯试样钻取 13 个位置,取样间距为 15 mm,取样方案如图 1 所示。

表2 电磁搅拌工艺试验方案

试验号	过热度/℃	结晶器电磁搅拌参数		凝固末端电磁搅拌参数	
		频率/Hz	电流/A	频率/Hz	电流/A
1 [#]	39	2.5	320	9	300
2 [#]	36	2.5	150	9	300
3 [#]	34	2.5	150	9	200

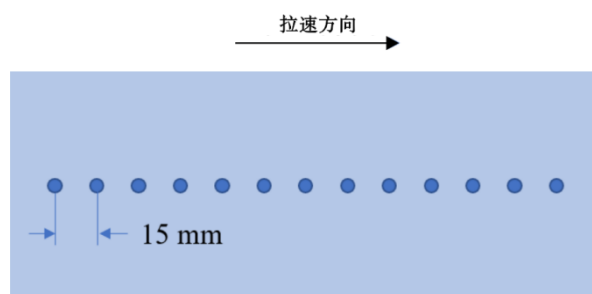


图1 钻屑取样方案

Fig. 1 Drill sampling scheme

使用碳硫分析仪检测每个位置的碳元素含量,并根据碳偏析指数计算公式计算不同位置碳偏析指数。

$$I = C_i / C_0 \quad (1)$$

式中:I为碳偏析指数, C_i 为钻孔*i*位置处的碳含量, C_0 为中间包钢液的碳含量。根据用户的实际反馈,得到试验炉次的铸坯对应的线材经油淬火调质处理试验后的拉伸试验结果数据,获得不同电磁搅拌工艺生产的铸坯对应线材的断面收缩率。

2 试验结果与分析

2.1 过热度对铸坯低倍及线材性能的影响

不同过热度下铸坯低倍组织如图 2 所示,发现铸坯经过酸洗后裂纹、缩孔、中心疏松现象较为明显,不同过热度下铸坯均出现不同程度的缩孔、中心疏松、中心偏析,过热度为 35 ℃和 42 ℃时,铸坯横截面出现中心裂纹现象,从铸坯纵截面看,铸坯中心呈现 V 型偏析。不同过热度下的铸坯低倍评级结果见表 3,不同过热度下铸坯的缩孔、中心疏松差异较小,等轴晶率随过热度升高而减小。

过热度分别为 18 ℃、35 ℃对应的油淬火调质态线材力学性能见表 4,取 4 个平行样的平均值进行比对,发现与高过热度控制相比,低过热度控制对线材力学性能有明显的提升,断面收缩率和伸长率分别比高过热度控制提高了 2% 和 0.8%。

过热度分别为 18 ℃和 35 ℃油淬火调质态线材沿 1/2 处纵截面切割后的金相组织,如图 3 所示,通

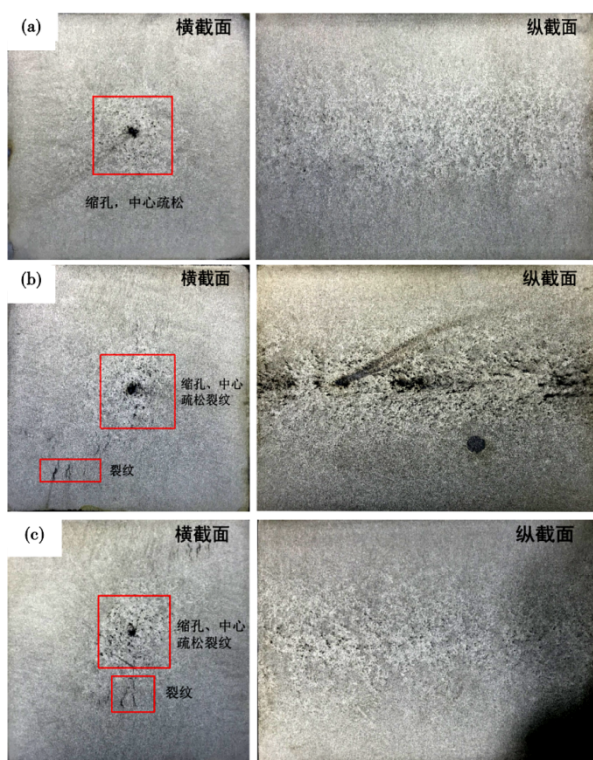


图2 不同过热度下铸坯低倍组织:(a)过热度 18 °C, (b)过热度 35 °C, (c)过热度 42 °C

Fig. 2 Macrostructure sample of casting billet under different superheat: (a) superheat 18 °C, (b) superheat 35 °C, (c) superheat 42 °C

表3 不同过热度连铸坯低倍组织评级

Table 3 Macrostructure sample rating of casting billet under different superheat

过热度/°C	缩孔/级	中心疏松/级	中间裂纹/级	中心等轴晶率/%
18	1	0.5	—	9
35	1	0.5	1	7.11
42	1	0.5	1	6.42

过淬回火后的组织由于碳化物的析出,在光学显微镜呈现为黑色的回火马氏体组织,而白亮带形成是由于元素偏析富集增强了组织的回火抗力^[16],从而保留淬火后形成的白亮马氏体组织。图3中低过热度白亮偏析带范围更宽,高过热度白亮偏析带主要集中在轧材中心部位,说明高过热度线材上的偏析现象相较低过热度更为集中在中心位置。根据铸坯低倍组织发现中心偏析主要集中在等轴晶区内,由于高过热度得到了较低的铸坯等轴晶比例,从而有效控制中心偏析区域大小,继而有效控制偏析对铸坯质量的影响,较好的铸坯质量又遗传至线材,提高线材的力学性能指标。

表4 不同过热度铸坯对应 $\phi 11$ mm油淬火调质态线材的力学性能

Table 4 Mechanical properties of $\phi 11$ mm oil quenched and tempered treatment wire rod of casting billet under different superheat

过热度/°C	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断面收缩率/%	伸长率/%
18	1 302	1 569	34.5	10.3
35	1 388	1 585	36.5	11.1

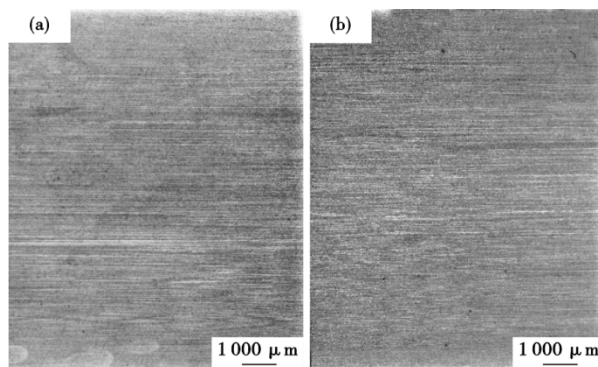


图3 不同过热度油淬火调质态线材 1/2 处纵截面金相组织:(a)过热度 18 °C, (b)过热度 35 °C

Fig. 3 The longitudinal section metallography at 1/2 of oil quenched and tempered treatment wire rod under different superheat: (a) superheat 18 °C, (b) superheat 35 °C

2.2 电磁搅拌工艺对铸坯低倍及线材性能的影响

试验铸坯低倍组织如图4所示,低倍评级结果见表5,可以看出,1#试验的铸坯中心等轴晶率最大,为10.5%,2#试验和3#试验的中心等轴晶率接近,分别为8.0%和8.5%。试验结果表明,结晶器电磁搅拌强度与中心等轴晶率呈现正相关趋势,并且随着等轴晶率的提升,中心缩孔现象不断改善,这是因为随着电流的增强,凝固前沿的钢液流速增加,对凝固前沿的冲刷作用增强,促使晶核向中心位置转移,促进非均质形核,另外,电磁搅拌导致的钢水旋转运动促使铸坯轴心温度降低,加速了过热的耗散,能够快速促进等轴晶粒长大,提高铸坯心部致密性,从而有效抑制缩孔形成^[17-19]。随着凝固末端电磁搅拌强度的增加,对铸坯内未凝固的钢液搅拌完全,使心部等轴晶分布均匀,细化铸坯中心位置的凝固组织,中心缩孔和中心疏松得到了一定的改善^[20-21]。

试验铸坯中心碳的偏析指数如图5所示,从图5中可以看到,1#试验铸坯的碳偏析指数为1.01~1.19,平均偏析指数为1.10;2#试验铸坯的碳偏析指数为0.95~1.17,平均偏析指数为1.06;3#试

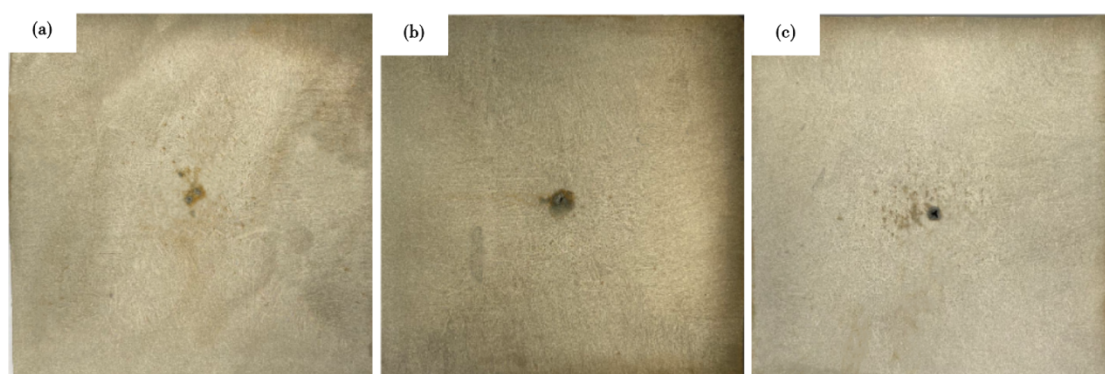
图4 不同试验方案铸坯低倍组织:(a) 1[#], (b) 2[#], (c) 3[#]Fig. 4 Macrostructure sample of casting billet under different test schemes: (a) 1[#], (b) 2[#], (c) 3[#]

表5 不同试验方案铸坯低倍组织评级

Table 5 Macrostructure sample rating of casting billet under different test schemes

试验号	中心缩孔/级	中心疏松/级	中心等轴晶率/%
1 [#]	0.5	1.0	10.5
2 [#]	1.0	0	8.0
3 [#]	1.5	1.0	8.5

验铸坯的碳偏析指数为0.96~1.08,平均偏析指数为1.02。三个试验中,1[#]试验铸坯碳的平均偏析指数最大,3[#]试验铸坯碳的平均偏析指数最小。从试验结果可以得到,随着结晶器和末端电磁搅拌强度的增加,铸坯中心碳偏析指数呈现上升趋势。

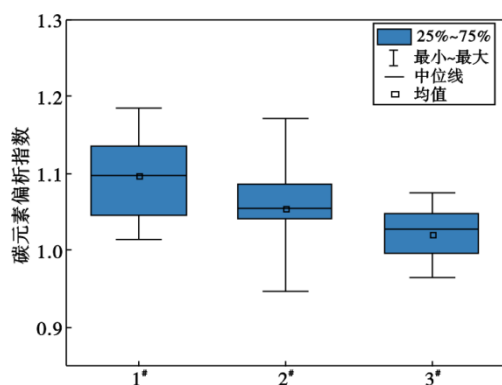


图5 铸坯中心碳偏析指数

Fig 5 Center carbon segregation index of casting billet

铸坯中心碳的平均偏析指数与油淬火调质态线材的断面收缩率之间的关系曲线如图6所示,从图6中可以看到,铸坯中心碳平均偏析指数与断面收缩率呈现明显的负相关性,当中心碳平均偏析指数由1.10降至1.02时,断面收缩率由39%增加到47%,力学性能有明显提升,试验说明铸坯的中心碳

偏析会遗传到线材上,并影响到其力学性能。

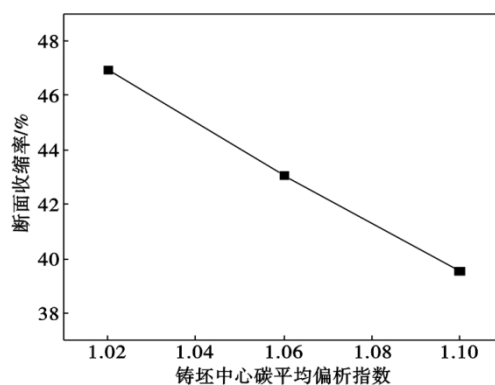


图6 铸坯中心碳偏析指数与油淬火调质态线材断面收缩率关系

Fig 6 Relation between center carbon segregation index of casting billet and reduction of area of oil quenched and tempered treatment wire rod

结晶器电磁搅拌强度的提高在铸坯上表现为低倍组织明显改善,结晶器电磁搅拌强度与中心等轴晶率呈正相关,可以有效抑制缩孔现象,然而,铸坯中心碳偏析指数随着结晶器电磁搅拌强度增加反而有恶化的趋势,这是因为结晶器电磁搅拌强度的提高增加了中心等轴晶率,反而有利于V形偏析的形成,而铸坯中心碳偏析指数又显著影响线材的力学性能,所以,从提高线材力学性能角度出发,电磁搅拌强度的调控应主要以控制中心偏析为主,结晶器电磁搅拌强度不宜过大,但为了防止穿晶现象导致铸坯中心“搭桥”形成线状偏析,仍需保留部分等轴晶比例。

末端电磁搅拌电流的增加,能改善中心疏松和缩孔现象,但当末端电磁搅拌电流强度由200 A增加至300 A时,碳元素平均偏析指数由1.02增加至

1.06, 油淬火调质态线材断面收缩率也由 47% 降至 43%。凝固末端电磁搅拌电流的增加会增大搅拌的强度, 当电流较弱时, 搅拌的强度较小, 无法明显改善铸坯的中心偏析; 但是, 当电磁搅拌的电流过大时, 搅拌强度过大, 将会导致液芯钢液过快过多地流动, 反而清洗了凝固前沿, 容易造成快速凝固的负偏析, 最终导致中心碳偏析增加^[22]。

综上所述, 150 mm×150 mm 小方坯生产 55SiCr 弹簧钢, 过热度控制在 35 ℃ 左右, 结晶器电磁搅拌电流 150 A, 末端电磁搅拌电流 200 A 可以有效控制中心碳偏析指数到 1.02, 轧材经油淬火调质态线材的断面收缩率可达 47% 以上, 满足用户需求。

3 结论

(1) 高的过热度通过降低铸坯等轴晶率可以有效控制中心偏析, 保证较好的铸坯质量, 显著提高

线材的力学性能指标, 过热度为 35 ℃ 相较于过热度 18 ℃, 油淬火调质态线材断面收缩率和伸长率分别提高 2% 和 0.8%。

(2) 结晶器电磁搅拌强度增大, 有利于等轴晶率的增加, 电流由 150 A 增加到 320 A, 中心等轴晶率由 8% 增加到 10.5%。中心等轴晶率高的铸坯, 其中心缩孔有减小的趋势, 但中心碳平均偏析指数有增加趋势。

(3) 凝固末端电磁搅拌电流过大, 会增大中心偏析程度, 过热度控制在 35 ℃ 左右, 结晶器电磁搅拌电流 150 A, 末端电磁搅拌电流控制在 200 A, 有利于中心偏析的改善。

(4) 连铸坯中心碳平均偏析指数对弹簧钢的断面收缩率有着显著的影响, 碳元素平均偏析指数由 1.10 降低到 1.02 时, 油淬火调质态线材断面收缩率由 39% 增加到 47%。

参考文献

- [1] 马志军, 耿恒亮, 李艳梅, 等. 改善 55SiCr 盘条组织的工艺研究[J]. 轧钢, 2021, 38(1): 46-50.
- [2] 孙光涛, 黄永生, 安航航, 等. 改善弹簧钢 55SiCr 小方坯中心碳偏析的试验研究[J]. 连铸, 2018, 43(2): 36-40.
- [3] 安绘竹, 车安, 刘祥, 等. 55SiCr 弹簧钢盘条组织偏析对拉拔断裂的影响[J]. 鞍钢技术, 2021(2): 23-25+35.
- [4] 邢献强, 曹文全, 王存宇. 汽车悬架系统用 55SiCr 弹簧钢丝带状组织[J]. 钢铁, 2020, 55(3): 68-73.
- [5] Guang-Tao S, Yong-Sheng H, Hang-Hang A N, et al. Experimental study on improvement of center carbon segregation in 55SiCr spring steel billet[J]. Continuous Casting, 2018, 37(2): 36-40.
- [6] 杨文, 张彦辉, 张立峰, 等. 硬线钢拉拔断裂机理及连铸工艺优化[J]. 钢铁, 2021, 56(9): 74-79+87.
- [7] An H H, Bao Y P, Wang M, et al. High-efficiency continuous casting of GCr15 bearing steel bloom based on cooperative control technique of complex electromagnetic stirring and soft reduction[J]. Metallurgical Research & Technology, 2019, 116(6): 621.
- [8] 吴建永, 于湛, 汪静静, 等. 小方坯高碳钢改善中心偏析连铸工艺优化实践[J]. 冶金管理, 2021(17): 11-12.
- [9] 周力, 高书成, 蒋栋初, 等. 小方坯连铸机末端电磁搅拌位置及连铸工艺优化实践[J]. 炼钢, 2018, 34(2): 38-43.
- [10] 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.
- [11] An H H, Bao Y P, Wang M, et al. Effects of electromagnetic stirring on fluid flow and temperature distribution in billet continuous casting mould and solidification structure of 55SiCr[J]. Metallurgical Research & Technology, 2017, 115(1): 103.
- [12] 王日红. 连铸坯中心碳偏析的特点及其控制技术[J]. 江苏冶金, 1998, 26(1): 48-50.
- [13] 田陆, 包燕平, 黄郁君. 凝固组织对连铸板坯中心偏析的影响[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(S1): 164-167.
- [14] Tomono H, Hitomi Y, Ura S, et al. Mechanism of formation of the V-shaped segregation in the large section continuous cast bloom[J]. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 1984, 24(11): 917-922.
- [15] Yong H Z, Hua C X, Ping T, et al. Effect of superheat on carbon segregation in continuous casting billet of cord steel[J]. Continuous Casting, 2017, 36(5): 12-16.
- [16] 闫志波, 贺会敏, 王向明. 718 塑料模具钢锯切表面不平原因[J]. 机械工程材料, 2021, 45(3): 98-102.
- [17] Zhang W J, Luo S, Chen Y, et al. Numerical simulation of fluid flow, heat transfer, species transfer, and solidification in billet continuous casting mold with M-EMS[J]. Metals, 2019, 9(1): 66.
- [18] 刘泳, 王恭亮, 刘瑞宁. 结晶器电磁搅拌对轴承钢小方坯碳偏析影响[J]. 连铸, 2012, 37(5): 43-46.
- [19] 王韬, 陈伟庆, 王宏斌, 等. 连铸参数和末端电磁搅拌对 82B 钢小方坯中心碳偏析的影响[J]. 特殊钢, 2013, 34(1): 49-51.
- [20] 葛洪硕, 任一峰, 张广军. 8620 系齿轮钢 300 mm×340 mm 铸坯宏观偏析改善[J]. 特殊钢, 2023, 44(3): 69-73.
- [21] 毕胜, 宫哲, 王鑫, 等. 优化连铸工艺改善 SWRH82 A 钢 150 mm×150 mm 铸坯中心碳偏析实践[J]. 特殊钢, 2022, 43(4): 24-27.
- [22] 岳铁军, 张宝全. 首钢 3 号铸机凝固末端电磁搅拌技术应用研究[J]. 连铸, 2011, 36(4): 8-12+16.