



PMO 作用下高品质 H13 热作模具钢生产实践

赵 健, 杨仁强, 王立青, 黄 雁
(芜湖新兴铸管有限公司, 芜湖, 241002)

摘 要:为开发出高品质 H13 热作模具钢连铸坯,并解决连铸坯偏析、缩孔等质量问题,采用转炉+LF+RH+连铸+轧制工艺,通过转炉滑板双挡、精炼全程扩散脱氧、控制精炼炉渣碱度,在连铸过程中进行全程保护浇铸并使用脉冲磁致振荡(PMO)凝固均质化技术等连铸配套辅助方法,成功在 $\phi 300$ mm 连铸机实现 H13 热作模具钢工业生产。结果表明,工艺试验可实现 H13 热作模具钢的高纯净度、低偏析与均匀组织生产,钢化学成分控制准确,低倍组织、元素偏析及夹杂物等相应指标均满足技术要求。当 PMO 电压为 185 V,功率为 42 kW 条件下可以有效降低 H13 钢铸坯缩孔等级,缩孔等级由 2.0 级降低至 1.0 级以下,改善 H13 钢铸坯心部碳偏析,心部碳偏析指数平均由 1.2 降低至 1.1 以下。

关键词:脉冲磁致振荡(PMO); H13 热作模具钢; 连铸; 保护浇铸

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. 2025-00127 **中图分类号:**TF763. 2

Productive Practice of High Quality H13 Hot Work Die Steel under the Action of PMO

Zhao Jian, Yang Renqiang, Wang Liqing, Huang Yan
(Wuhu Xinxing Pipe Casting Co., Ltd., Wuhu 241002, China)

Abstract: To develop high-quality H13 hot work die steel continuous-casting billets and address quality issues such as segregation and shrinkage cavities, a process involving converter + LF + RH + continuous casting + rolling was adopted. By employing dual-block slide gate in the converter, full-process diffusion deoxidation during refining, and controlling the basicity of refining slag, as well as utilizing full-process protective casting and pulse magnetic oscillation (PMO) solidification homogenization technology and other auxiliary methods during continuous casting, industrial production of H13 hot work die steel was successfully achieved on a $\phi 300$ mm continuous casting machine. The results showed that the process test could achieve high purity, low segregation, and uniform microstructure production of H13 hot work die steel. The steel chemical composition was accurately controlled, and corresponding indicators such as macrostructure, element segregation, and inclusions all met the technical requirements. When the PMO voltage was 185 V and the power was 42 kW, the shrinkage cavity grade of H13 steel billets could be effectively reduced from grade 2.0 to below grade 1.0, improving the carbon segregation in the core of H13 steel billets, with the average carbon segregation index in the core decreasing from 1.2 to below 1.1.

Key Words: Pulse Magneto Oscillation(PMO); H13 Hot Work Die steel; Continuous Casting; Protective Casting

模具制造工艺作为装备制造业的核心环节,其技术水平直接制约着整个行业的发展进程。其中,模具钢作为模具制造的关键基础材料,其性能优劣直接影响模具的加工精度和使用寿命,成为决定制造业发展水平的重要战略要素^[1-4]。H13 钢(4Cr5MoSiV1)作为国内外应用最广泛且最具有代表性的热作模具钢种,因其高强度、高韧性、高淬透性和优良的抗回火软化性能,广泛应用于压铸、热锻和热挤压等模具的制造^[5-8]。

H13 钢属于中碳中合金钢,含有 8%~10% 的 Cr、

Mo、V 等合金元素,在凝固过程中合金元素极容易偏析,严重削弱材料的性能,导致模具早期失效,缩短使用寿命。随着现代制造业对精密化、高效化要求的不断提升,模具钢的研发与应用已成为推动制造业转型升级的关键突破口。本研究采用国内某厂生产 H13 热作模具钢的冶炼工艺流程和生产工艺,试验对比分析了有、无脉冲磁致振荡(PMO)凝固均质化技术两种工艺条件下的铸坯质量,为改善铸坯质量提供了依据。

作者简介: 赵 健(1985—),男,本科,工程师; **E-mail:** xxzg_zj@163.com; **收稿日期:** 2025-04-29

通信作者: 黄 雁(1986—),男,博士,高级工程师; **E-mail:** 18119875881@163.com

Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

1 试验材料及方法

H13 热作模具钢的具体生产工艺流程为: 120 t 顶底复吹转炉→120 t LF 精炼炉→120 t RH 真空脱气炉→ $\phi 300$ mm 连铸机。其具体化学成分见表 1, 实际成分满足协议要求。

在转炉冶炼过程中, 采用高拉补吹的方式来控制出钢成分 $w[\text{C}]$ 为 0.06%~0.10%、 $w[\text{P}] \leq 0.007\%$ 。研究表明, 钢中碳含量和氧含量有一定的比例关系, 当终点 $w[\text{C}]$ 小于 0.05% 时, 钢水就存在过氧化现象, 钢水过氧化会降低钢水的纯净度。因此, 将转炉终点 $w[\text{C}]$ 控制在不低于 0.07%, 避免钢水过氧化。待到冶炼完成以后, 采用出钢双挡的模式, 有效控制钢水下渣量, 回 $w[\text{P}] \leq 0.001\%$ 。根据生产要求, 对应的出钢时间需要控制在 4 min 以内, 且出钢过程中要保证钢包内全程吹氩, 确保钢水成分和温度均匀, 防止出钢过程中钢水吸氮和二次氧化。转炉出钢过程中, 鉴于转炉料仓单次加入量的限制, 合金采用双加料的模式, 即出钢过程中加入 2/3 合金, 出钢完毕后再次加入 1/3 合金, 合金加入过程中加入 Al 块及原辅料, 不加入石灰。

精炼工序钢包进站后, 加入适量低钛预熔精炼渣、石灰、碳化硅、化渣剂, 及时调整渣况, 并保证精炼渣良好的流动性, 控制渣碱度 $R \geq 3.0$, 白渣时间保持 20 min 以上。在冶炼过程中要注意气体含量的控制, 因此, 除调整成分外, 禁止底吹氩气强搅拌。待温度升至 1 630~1 650 °C 时, 加入 2~4 t 低钛高碳铬铁、低钛硅铁、硅锰、钼铁合金化, 合金化期间加入电石、铝粒、碳化硅等脱氧剂维护渣系, 待白渣之后开始加入钒铁。精炼过程中, 加入适量铝粒、SiC 强化渣面脱氧, 全程进行扩散脱氧。同时保证出站

$w[\text{Al}]$ 控制在 0.020%~0.030% 之间。对于 RH 抽真空操作, 必须要保证时间在 20 min 以上, 以使真空度达到所要求的极限真空度 67 Pa, 抽真空期间需要测温以确保上连铸浇注时中间包温度符合要求。破空完毕后, 为改善夹杂物类型, 抑制钢中氧化铝在连铸过程中水口的蓄积结瘤, 参考钢水成分喂入钙线进行夹杂物的变性处理, 接着进行软吹氩搅拌, 至少需要进行 20 min 以上的操作。除此之外, 在整个真空脱气的过程中, 需要高度重视钢液当中的气体含量, 可采用定氧仪、定氢仪进行检测。

在 6 流连铸生产过程中采用全程保护浇铸, 开浇前进行氩气置换, 同时, 对中间包包盖、钢包套管、结晶器套管、浸入式水口等关键部位进行密封, 避免钢水在浇铸的过程中由于二次氧化造成钢水夹杂物含量升高。连铸过程中增加脉冲磁致振荡 (PMO) 凝固均质化技术, 保证铸坯内部质量, 为了验证该技术的实际效果, 在生产过程关闭 1 流 PMO 技术装备, 该流次生产的铸坯作为对比坯, 其余 5 流开启 PMO 技术装备, 生产的铸坯作为 PMO 处理坯, 生产取样后进行对比分析, 连铸主要技术参数见表 2。连铸时钢液过热度控制在 25~35 °C 之间, 拉速控制在 0.65~0.75 m/min, 尽可能减少在浇铸过程中钢液的温降速度。加强钢包和中间包的烘烤, 加入合适的覆盖剂确保中间包温度波动小, 控制连铸过程液面波动在 ± 5 mm 以内, 拉速保持恒定, 避免出现卷渣现象。

采用连铸生产的 $\phi 300$ mm 规格圆坯轧制成 $\phi 140$ mm 规格的棒材, 热送铸坯入炉温度不低于 500 °C, 预热段温度 ≤ 800 °C, 第一段加热段温度为 600~900 °C, 第二段加热段温度为 1 050~1 130 °C,

表 1 H13 模具钢化学成分 (质量分数)

Table 1 Chemical composition of H13 hot die steel T

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Al
目标范围	0.36~0.42	0.80~1.10	0.25~0.55	≤ 0.010	≤ 0.005	5.00~5.30	1.20~1.40	0.90~1.00	0.015~0.025
实际值	0.371	1.103	0.453	0.011	0.002	5.08	1.268	0.937	0.022

表 2 H13 模具钢不同工艺条件下连铸主要技术参数

Table 2 Main technical parameters of continuous casting for H13 hot work die steel under different process conditions

试验批	弧形半径/m	浇铸断面/(mm)	拉速/ ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	冶金长度/m	二次冷却长度/m	二次比水量/ ($\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$)	结晶器/ ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	二冷水分 配比	流次	PMO 电 压/V	PMO 功 率/kW
对比坯	14	$\phi 300$	0.65~0.75	36	6.5	0.25	2500	31:36:20:13	1	0	0
PMO 处理坯	14	$\phi 300$	0.65~0.75	36	6.5	0.25	2500	31:36:20:13	2~6	185	42

均热温度约 1 230 °C, 开轧温度 1 100 °C, 尾段温度约 1 080 °C。铸坯出加热炉后高压水除鳞, 清除钢坯表面的氧化铁皮。连轧后终轧温度约 980 °C, 收集温度约 570 °C, 入坑温度约 490 °C, 轧制过程未见明显开裂现象。具体轧制工艺见表 3。

表3 H13 模具钢轧制工艺

Table 3 Rolling process of H13 hot work die steel °C

入炉温度	预热段	加热1段	加热2段	均热1段	均热2段	开轧温度
>500	≤800	600~900	1 050~ 1 130	1 230~ 1 250	1 210~ 1 240	1 100~ 1 120

由于 H13 钢合金含量较高, 其热轧态硬度高, 无法取样分析, 因此, 需进行退火处理, 退火工艺如图 1 所示。其中, 保温时间 t_1 根据钢材规格, 按 2.5 min/mm 计算, 但不少于 2 h。保温时间 t_2 为 t_1 的 1.5 倍, 但不少于 4 h。

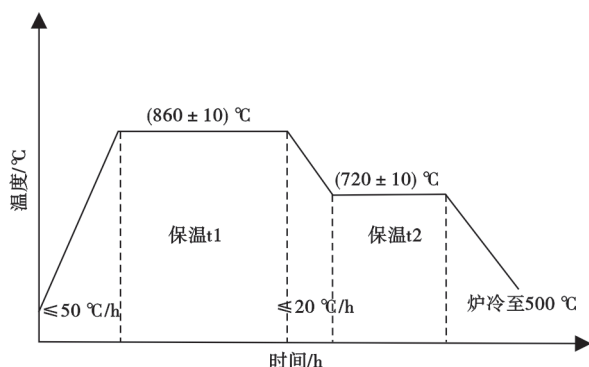


图1 H13 钢棒材退火工艺

Fig. 1 Annealing process of H13 steel bar

2 试验结果与讨论

2.1 铸坯低倍

为了研究 PMO 技术对改善铸坯内部质量的影响, 在连铸生产浇注断面为 $\phi 300$ mm 圆坯 H13 钢过程中采用 PMO 凝固均质化技术。图 2 为 H13 模具钢铸坯横截面的宏观组织, 图 2(a) 和图 2(b) 分别为未经 PMO 处理 (对比坯) 和经 PMO 处理的浇注断面为 $\phi 300$ mm 圆坯 (处理坯)。从图 2 中可以看出, 未经 PMO 处理的铸坯中心有明显的缩孔 (图中黄色虚线区域), 而经过 PMO 处理后铸坯的等轴晶区面积显著增大, 中心未发现明显的缩孔, 铸坯组织更加致密。

图 3 所示为两种工艺条件下 H13 钢低倍评级结

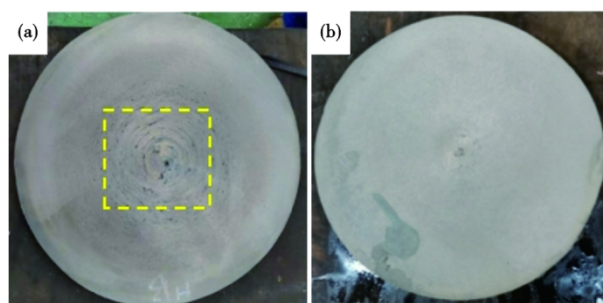


图2 两种工艺条件下 H13 钢低倍图: (a) 对比坯, (b) PMO 处理坯

Fig. 2 Macrographs of H13 steel under two process conditions: (a) comparison of macrographs of cast billets, (b) macrographs of castings processed by PMO

果。从图 3 中可以看出, 对比坯低倍缩孔残余及中心疏松评级均为 2 级, PMO 处理坯低倍缩孔评级为 0.5 级, 中心疏松评级为 1 级。检测结果表明, 采用 PMO 技术处理可以有效消除 H13 钢铸坯缩孔, 降低中心疏松级别, 对铸坯内部质量提升效果明显。

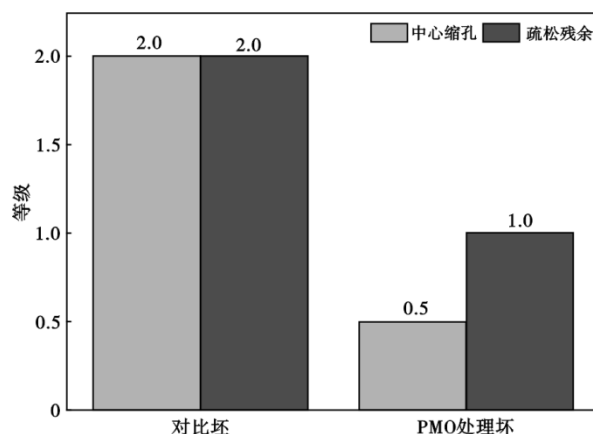


图3 两种工艺条件下 H13 钢低倍评级结果

Fig. 3 Low magnification rating results of H13 steel under different process conditions

PMO 技术由上海大学翟启杰等^[9]发明, 其技术原理是将脉冲电流导入二冷区附近的激励线圈, 在固液界面前沿形成特定的电磁效应, 促进钢液形核。晶核在电磁力作用下脱落、漂移并增殖, 形成“结晶雨”, 从而达到细化铸坯凝固组织的目的。该技术已经成功应用于多家冶金企业^[10-21]。采用 PMO 处理 H13 钢可有效抑制低倍中心缩孔缺陷, 其作用机制主要体现在两个方面: 首先, PMO 能够降低液相温度梯度^[22-23]; 其次, PMO 可促进异质形核, 形成大量细小等轴晶^[24]。这两种效应的协同作用促使铸坯内部凝固模式由逐层凝固转变为体积凝固, 从

而将集中缩孔转化为分散性疏松。此外,大量细小等轴晶的存在阻碍了凝固组织发展成粗大枝晶并形成“搭桥”现象,这对中心偏析问题也起到了显著的抑制作用^[25-27]。

2.2 碳偏析检测

图 4 为两种工艺条件下 H13 钢铸坯中心碳偏析指数结果。从图 4 中可以看出,对比坯中心碳偏析较为严重,偏析指数均在 1.15 以上。而 PMO 处理坯中心偏析指数均在 1.15 以下,明显降低,铸坯内部质量得到了有效提升。

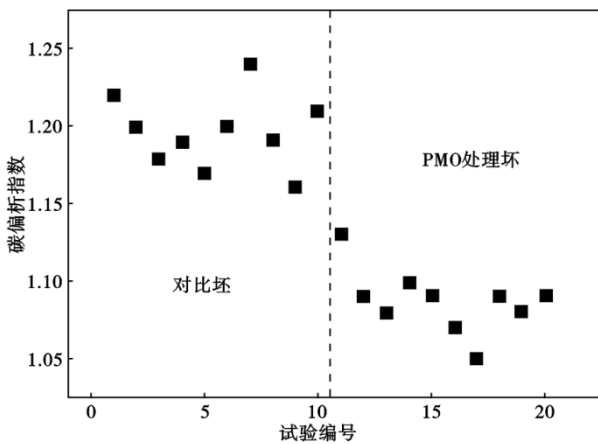


图 4 两种工艺条件下 H13 钢碳偏析指数情况

Fig. 4 The situation of carbon segregation index of H13 steel under different process conditions

采用金属原位分析仪能够检测出钢中各元素面分布,在面分布图中,深色区域代表较严重的正偏析。图 5(a)、(b)分别为 H13 钢 Cr、Mo 元素的面分布,从图 5 中可以看出,经过 PMO 处理的连铸坯中心 Cr、Mo 元素分布更加均匀、波动范围更小。此外,经过 PMO 处理的铸坯中心区域已经基本不再出现元素严重富集区域。

PMO 对 H13 钢均质化的提升主要源于其独特的电磁场作用机制,一是 PMO 作用形成的电磁力和焦耳热促进了凝固前沿的金属熔体流动,降低了凝固过程中的温度梯度;同时,通过“结晶雨”效应促进细小等轴晶形成,使得凝固末端的枝晶臂间距减小,降低渗透率^[28]。

固液界面处,振荡电磁场诱导熔体产生大量形核点,通过“结晶雨”效应促使晶核脱离并进入熔体内部,从而有效解决了连铸坯凝固组织粗大的问题^[14,29]。这种细晶结构的形成有助于碳元素的均匀分布。此外,凝固过程中的流体运动会致富集溶

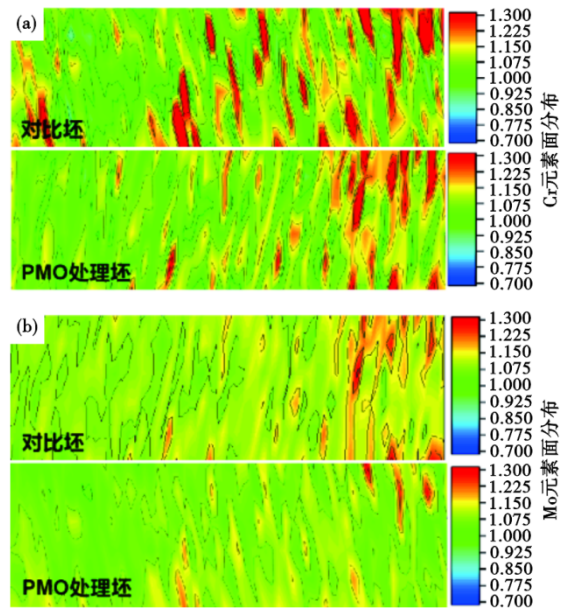


图 5 PMO 处理对 H13 钢中铬、钼元素分布的影响:(a)Cr 元素分布,(b)Mo 元素分布

Fig. 5 The influence of PMO treatment on the distribution of chromium and molybdenum elements in H13 steel: (a) Cr element distribution, (b) Mo element distribution

质溶液沿枝晶间隙向中心区域迁移,进而可能造成凝固中心溶质浓度的显著升高^[15,20]。PMO 处理通过增加晶核数量和降低温度梯度的双重作用,抑制了柱状晶向铸坯中心的延伸,从而促进了铸坯横断面溶质的均匀分布^[9,11,13]。

2.3 夹杂物控制情况

对轧制成 $\phi 140$ mm 规格的 H13 棒材进行取样检验,对比坯和 PMO 处理材钢种夹杂物的级别检测结果见表 4。可以看出,炼钢生产过程通过控制出钢温度,可有效去除脱氧夹杂物,在后续精炼过程通过全过程吹氩和 RH 真空脱气促进了夹杂物聚集上浮,获得了较高纯净度,满足技术协议要求。

表 4 H13 钢中非金属夹杂物评级

Table 4 Nonmetallic inclusions in H13 steel

A 类/级		B 类/级		C 类/级		D 类/级		DS 类
细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	-
0.5	0	0	0	0	0	0.5	0	0

3 结论

(1) 通过优化转炉终点碳控制、LF/RH 精炼工艺、PMO 凝固均质化技术及轧制退火工艺,成功实现 H13 钢的高纯净度、低偏析与均匀组织生产。

(2) 当 PMO 电压为 185V,功率为 42 kW 时,可

以有效消除H13钢铸坯缩孔,改善H13钢铸坯心部碳偏析,缩孔等级由2.0级降低至1.0级以下,改善H13钢铸坯心部碳偏析,心部碳偏析指数平均由1.2降低至1.1以下,对铸坯内部质量提升效果明显,为

高合金模具钢的高效制备提供了有效解决方案。

(3)采用本文生产流程,钢中非金属夹杂物相对都比较细小,均未出现A类粗系和C类非金属夹杂物,钢的洁净度高。

参考文献

- [1] 王昊,侯新平,马鸣蔚,等.不同回火工艺对H13钢疲劳性能的影响[J].金属加工(热加工),2025(2):112-121.
- [2] 邱英南,马党参,周健,等.不同冶炼工艺生产H13钢中非金属夹杂物特征及其对力学性能的影响[J].机械工程材料,2024,48(11):69-75.
- [3] 曹源,李强军.多向锻造对H13模具钢热疲劳和高温抗氧化性能的影响[J].锻压技术,2025,50(2):16-23.
- [4] 马登,吴伟.国内120t转炉高效冶炼工艺研究进展[J].上海金属,2024,46(5):1-8.
- [5] 倪卓文,朱红春,李花兵,等.H13模具钢电渣锭中夹杂物的类型以及分布规律分析[J].特殊钢,2024,45(6):48-52.
- [6] 佟倩,马跃,孙齐松,等.国内外H13钢组织和性能对比分析[J].上海金属,2020,42(1):55-59.
- [7] 张新文,朱康宁,孟祥岩,等.H13钢 ϕ 130~150mm热轧材探伤不合格原因分析及改进措施[J].特殊钢,2022,43(5):55-58.
- [8] 付莉莉,闵永安.热作模具钢线材的材质分析[J].上海金属,2022,44(2):24-31.
- [9] 龚永勇,程书敏,钟玉义,等.脉冲磁致振荡凝固技术[J].金属学报,2018,54(5):757-765.
- [10] 朱富强,任振海,陈志亮,等.PMO作用对60Si₂Mn弹簧钢凝固组织的影响[J].上海金属,2020,42(4):100-104.
- [11] 李莉娟,王郢,翟启杰.脉冲磁致振荡(PMO)凝固均质化技术在特殊钢中的应用[J].钢铁研究学报,2021,33(10):1018-1030.
- [12] 许英华.结晶器脉冲磁致振荡技术对HRB400EG螺纹钢铸坯质量的影响[J].上海金属,2021,43(3):82-85+93.
- [13] 邵楠男,邹富康,仲红刚,等.PMO和冷却速率对5CrNiMoV热作模具钢凝固组织的影响[J].中国冶金,2021,31(10):23-29.
- [14] 李辉成,杨谱,刘海宁,等.PMO-EMS组合调控提高铸坯均质化应用实践[J].连铸,2022,47(4):66-71.
- [15] 刘海宁,李辉成,李涛,等.PMO对GCr15轴承钢矩形坯心部微观组织及元素分布的影响[J].铸造,2022,71(2):164-170.
- [16] 李开创,李莉娟,蔡常青,等.M-PMO对HRB400EG螺纹钢连铸坯中夹杂物的影响[J].钢铁,2023,58(4):58-68.
- [17] 张亚兵,王东兴,赵立,等.PMO作用下35CrMnSi合金结构钢铸坯的元素分布[J].连铸,2023,48(2):78-83.
- [18] 刘均,左小坦,陈永峰,等.PMO对42CrMoA钢 ϕ 300mm圆坯枝晶组织的影响[J].钢铁研究学报,2023,33(5):53-59.
- [19] 刘志勇,杨仁强,刘海牛,等.PMO对SWRCH35K冷镦钢铸坯凝固组织和碳偏析的影响[J].连铸,2024,49(2):77-82.
- [20] 杨阳,黄雁,刘海宁,等.采用PMO改善20CrMnTi钢的凝固组织和偏析研究[J].上海金属,2025,47(1):67-75.
- [21] 黄雁,陈玉娥,陈永峰,等.高碳钢连铸坯末端单辊重压下和PMO技术比较[J].钢铁,2025,60(5):91-101.
- [22] 翟启杰,龚永勇,李仁兴.金属凝固过程与细晶技术[J].材料与冶金学报,2015,14(2):81-82.
- [23] Liao X L, Zhai Q J, Luo J, et al. Refining mechanism of the electric current pulse on the solidification structure of pure aluminum[J]. Acta Materialia, 2007, 55(9): 3103-3109.
- [24] Sun J, Sheng C, Wang D P, et al. Fine equiaxed dendritic structure of a medium carbon steel cast using pulsed magneto-oscillation melt treatment[J]. Advances in Manufacturing, 2018, 6(2): 189-194.
- [25] Zhao J, Yu J H, Han K, et al. Improving the solidified structure by optimization of coil configuration in pulsed magneto-oscillation[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2018, 31(12): 1334-1344.
- [26] Liu T Y, Sun J, Sheng C, et al. Influence of pulse magneto-oscillation on the efficiency of grain refiner[J]. Advances in Manufacturing, 2017, 5(2): 143-148.
- [27] 吴杰,陈文杰.提高连铸坯质量的关键技术[J].上海金属,2025,47(1):1-10.
- [28] 徐燕祎,翟启杰.脉冲电磁场在金属熔体中的电磁效应及其应用[J].上海大学学报(自然科学版),2020,26(1):1-20.
- [29] 郝军利,赵静,仲红刚,等.PMO作用下连铸二冷区电磁场-流场-温度场的数值模拟[J].上海大学学报(自然科学版),2018,24(3):412-421.