铁素体不锈钢 430 连续铸造板坯成形合理 工艺参数的研究

李新强^{1,2},赵升吨^{1,3*},丘铭军^{1,2},杜肖臣²,范淑琴¹,周士凯²

(1.西安交通大学 机械工程学院,西安 710049; 2.中国重型机械研究院股份公司,西安 710018;3.中南大学 轻合金研究院,长沙 410083)

摘要:目的 以某钢厂板厚为 180~220 mm 的铁素体不锈钢 430 连铸板坯为对象,研究合理的板坯连铸工艺 参数,以提高不锈钢 430 连铸坯的等轴晶率,强化铸坯质量。方法 通过高温拉伸试验、结晶器凝固冷却温 度分析以及电磁搅拌磁感应强度模拟,探讨了液体加热温度、结晶器冷却水参数及电磁搅拌参数等工艺参 数对连铸坯质量的影响规律。结果 高温拉伸试验结果表明,430 不锈钢在不同温度下的应力-应变曲线都是 典型的塑性拉伸曲线,当温度超过 1000 ℃后,抗拉强度显著减小;在结晶器宽面水量 3 400 L/min、窄面水 量 400 L/min 的参数条件下,结晶器宽面及窄面铜板温度均匀,满足铸坯成形要求;在扇形 1 段第 6[#]和 7[#] 辊位并列增加电磁搅拌辊后,430 不锈钢铸坯电磁场分布合理且铸坯中心磁感应强度最大,为 0.104 T,平 均磁感应强度为 0.09 T,显著提升了液相穴内钢水的流动性。结论 在结晶器宽面水量为 3 400 L/min、窄面 水量为 400 L/min 条件下,在连铸机扇形 1 段第 6[#]和 7[#]辊位并列增加电磁搅拌辊后,对 430 不锈钢进行连续 铸造工业试验,铁素体不锈钢 430 板坯等轴晶率达到 62.5%,裂纹发生率降低。 关键词:铁素体不锈钢 430;连铸板坯;工艺参数;铸坯成形;等轴晶率

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2024.07.022

中图分类号: TF777 文献标志码: A 文章编号: 1674-6457(2024)07-0239-07

Reasonable Process Parameters for Continuous Casting of Ferritic Stainless Steel 430 Continuous Casting Billets

LI Xinqiang^{1,2}, ZHAO Shengdun^{1,3*}, QIU Mingjun^{1,2}, DU Xiaochen², FAN Shuqin¹, ZHOU Shikai²

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. China National Heavy Machinery Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710018, China; 3. Light Alloy Research Institute of Central South University, Changsha 410083, China)

ABSTRACT: The work aims to study the continuous casting process parameters of ferritic stainless steel 430 continuous casting slabs with a thickness of 180-220 mm to improve the equiaxed grain rate of the stainless steel 430 continuous casting slabs

*通信作者(Corresponding author)

收稿日期: 2024-05-31

Received: 2024-05-31

基金项目:国家自然科学基金 (519705449);陕西省秦创原"科学家+工程师"队伍建设 (2023KXJ-151)

Fund: National Natural Science Foundation of China (519705449); Construction of the "Scientists+Engineers" Team in Qinchuangyuan, Shaanxi Province (2023KXJ-151)

引文格式: 李新强,赵升吨,丘铭军,等. 铁素体不锈钢 430 连续铸造板坯成形合理工艺参数的研究[J]. 精密成形工程, 2024, 16(7): 239-245.

LI Xinqiang, ZHAO Shengdun, QIU Mingjun, et al. Reasonable Process Parameters for Continuous Casting of Ferritic Stainless Steel 430 Continuous Casting Billets[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2024, 16(7): 239-245.

and strengthen the quality of the slabs. The influence of process parameters such as liquid heating temperature, crystallizer cooling water parameters, and electromagnetic stirring parameters on the quality of continuous casting billets was explored through high-temperature tensile tests, analysis of crystallizer solidification cooling temperature, and simulation of electromagnetic stirring magnetic induction intensity. The high-temperature tensile test clearly showed that the stress-strain curves of 430 stainless steel at different temperature were typical plastic tensile curves. After the temperature exceeded 1 000 °C, the tensile strength significantly decreased; Under the parameter conditions of 3 400 L/min wide surface water volume and 400 L/min narrow surface water volume in the crystallizer, the temperature of the wide and narrow surface copper plates in the crystallizer was uniform, meeting the requirements for billet forming; After adding electromagnetic stirring rollers in parallel at the 6th and 7th roller positions in sector 1, the electromagnetic field distribution of the 430 stainless steel billet was reasonable, and the maximum magnetic induction intensity at the center of the billet was 0.104 T, with an average magnetic induction intensity of 0.09 T, significantly improving the fluidity of molten steel in the liquid phase cavity. In conclusion, when conducting continuous casting industrial experiments on 430 stainless steel through a crystallizer with a wide surface water flow rate of 3 400 L/min and a narrow surface water flow rate of 400 L/min by adding electromagnetic stirring rollers in parallel at the 6th and 7th roller positions of the first section of the continuous casting machine, the equiaxed grain rate of the ferritic stainless steel 430 slab reaches 62.5%, and the crack occurrence rate is reduced.

KEY WORDS: ferritic stainless steel 430; continuous casting slab; process parameters; casting billet forming; equiaxed grain rate

不锈钢因具有优良的性能,在石油化工、汽车等 领域得到了广泛的应用^[1-4]。在连铸生产过程中,对 不锈钢的工艺控制非常重要,合理的铸坯冷却控制是 提高产品质量的关键^[5-8]。其中,铁素体不锈钢 430 对连铸过程控制更为严格。

铁素体不锈钢具有优异的耐腐蚀、耐点蚀性能^[9-13]。此外,铁素体不锈钢拉伸成形性能优于奥氏体不锈钢的,且在价格方面,因其不含 Ni 或含少量 Ni 而更加低廉,而奥氏体不锈钢含有部分 Ni,生产成本相对较高^[14]。

430 不锈钢广泛应用于家电、厨卫等领域。国内 外大量学者^[15-19]对不锈钢连铸坯的质量问题进行了 深入研究,研究表明,不锈钢板坯连续铸造成形生 产过程中的高温物理性能、钢水过热度、中间包流 场、结晶器冷却水量大小、二次冷却水量、电磁搅 拌等工艺参数对不锈钢连铸坯的等轴晶率以及铸坯 的成材率有较大的影响^[20-22]。钢水过热度的变化会 影响连铸板坯的宽度,在同一结晶器中,过热度大 的炉次比过热度小的炉次具有更宽的板坯宽度;中 间包流场的流动性越好,夹杂物脱除上浮率越高, 钢液的凝固冷却性能越好;在连铸结晶器冷却和二 次冷却过程中,冷却水量越大,铸坯温度变化越迅 速,但在其冷却凝固过程中,若结晶器、二次喷淋 冷却水量过大,则会导致铸坯表面温差以及表面回 温过大,从而在铸坯表面产生纵裂纹和表面裂纹。 电磁搅拌技术的实质是通过电磁力的作用,推动钢 液产生强制流动,这种强制流动可以改善钢液的流 动、传质和传热的条件,从而有利于温度场和溶质 的均匀化,进而减少柱状晶,提高等轴晶率,以满 足提升铸坯质量。在国内外学者研究中,文献[23-25] 通过开发倒角结晶器以及探究电磁搅拌参数等对不 锈钢连铸坯的影响发现,当倒角结晶器投入使用后, 板坯宽度达标率在 92%以上。针对上述问题,本文 结合 430 钢种的高温物性参数,通过优化结晶器冷 却水、振动、电磁搅拌等工艺参数,以减少铸坯缺 陷,保证铸坯质量。

1 430 不锈钢铸坯成分及工艺流程

430 不锈钢的化学成分如表 1 所示,常规的生产 工艺流程如下: 电炉炼钢→AOD 精炼→LF 精炼→ CCM 连铸成形。

铁素体不锈钢 430 连铸机为直弧形且为 2 流, 铸机半径为 9 m,其主要冷却方式为结晶器、二冷 区、空冷区冷却,铸造断面为(180~220)mm×(900~ 1 600)mm的连铸板坯,并采用结晶器液面自动控制、 液压振动、在线液压调宽、三维动态二冷配水以及二 冷区辊式电磁搅拌等关键技术。图 1 为连铸过程示意

	表 1	430 1	钢合金法	元素成	分	
Tab.1	Element	comp	osition	of 430	steel	alloy

wt.%

			1				
С	Si	Mn	Р	Cr	Ni	S	Ν
0.03-0.05	0.20-0.50	0.30-0.50	≤0.038	16.00-16.80	≤0.600	≤0.007	≤0.060



图 1 连铸过程示意图 Fig.1 Schematic diagram of continuous casting process

图,展示了整个连铸坯生产的过程。

2 430 不锈钢铸坯成形工艺参数

连铸板坏在生产过程中的结晶器冷却、二次冷却 以及电磁搅拌等工艺对连铸坯的裂纹缺陷以及铸坯 的成材率有较大的影响。结晶器是连铸机的心脏,直 接决定了连铸坯的质量与连铸生产能否顺利进行。在 实际生产过程中,结晶器冷却直接影响到铸坯凝固成 形,国内外学者多采用数学模型模拟分析板坯连铸结 晶器的冷却行为,以选择合适的冷却水量进而确保结 晶器铜板宽窄面的冷却行为。在二次冷却过程中, 过强或过弱的冷却强度以及不合理的二冷水量分配 等将会促使缺陷增加或产生新的缺陷,如表面裂纹 等。基于此,冶金学者将理论研究和生产实践相结 合,制定了二冷区的冶金准则以确保二冷区连铸坯 进行凝固冷却。二冷区电磁搅拌以及末端电磁搅拌 主要是为了减少柱状晶并扩大等轴晶。电磁力可以 对钢水产生强制运动力, 使柱状晶被打断并重熔, 因此破碎的柱状晶会成为新的晶核,以此为晶核, 钢液将再次结晶,形成新的细小等轴晶。因此,本 文主要对 430 不锈钢的高温力学性能、结晶器冷却 以及电磁搅拌关键工艺参数进行研究,以明确 430 不锈钢在高温下的力学性能变化、结晶器冷却控制 水量、二冷却电磁搅拌位置以及磁场分布强度,进 而提高430不锈钢连铸板坯的质量。

2.1 高温物性参数

通过研究铸坯的高温力学性能可明晰其脆性区 间与良好塑性温度区间,为连铸冷却温度调控提供 理论依据,基于对材料高温物性参数的精确认识, 将外界条件的精确换热和涉及铸坯质量的内部、表 面缺陷联系起来,通过设备及工艺控制,实现无缺 陷铸坯的生产。上述过程涉及铸坯的高温物理及力 学性能、铸坯的温度场、铸坯的凝固过程、铸坯在 辊列下的应力应变以及传热、流动、应力应变等物 理问题。 分析 430 铁素体不锈钢在高温下的力学性能变 化,对明确不锈钢在连铸生产时不同温度下产生裂纹 的机理、确定冷却制度和矫直温度具有重要的意义。

采用 Gleeble-1500D 热/力模拟试验机进行了不 锈钢试样的高温拉伸试验。结果表明,不同温度下的 应力-应变曲线都是典型的塑性拉伸曲线。430 不锈钢 不同应变速率下的抗拉强度如图 2 所示,可知,当温 度超过 1 000 ℃后,430 铁素体不锈钢抗拉强度显著 减小。



图 2 430 不锈钢不同应变速率下的抗拉强度 Fig.2 Comparison of tensile strength of 430 stainless steel under different strain rates

2.2 结晶器冷却水参数

在结晶器中,工艺参数设置不合理可能导致保护 渣卷入、铸坯中间裂纹、三角区裂纹及表面缺陷等问 题,因此研究不同工艺及设备参数对温度场的影响作 用,对指导 430 铁素体不锈钢板坯连铸机核心装备结 晶器设计具有重要意义。

2.2.1 结晶器模型的建立

假设连铸过程中结晶器内凝固坯壳沿宽度和厚度方向的热/力学行为对称,以 1/4 铸坯-结晶器系统为研究域。在该结晶器中,铜板基体为 Cu-Cr-Zr 合金,铜板热面为 Ni-Co 镀层,结晶器上、下口镀层厚度分别为 0.5 mm 和 1.5 mm,结晶器进出口之间的镀层厚度线性过渡。有限元模型网格划分结果如图 3 所示。基于能量守恒,钢在结晶器内的凝固与温度变化可用三维瞬时导热方程来描述,具体的换热公式以及求解方法见文献[26-27]。

2.2.2 结晶器铜板宽窄面温度场

结晶器长度为 0.9 m、单侧锥度尺寸差为 6.1 mm, 其宽面水量为 3 400 L/min、窄面水量为 400 L/min。 采用有限元法对宽面及窄面铜板进行温度场分析,结 果如图 4 和图 5 所示,温度均匀,满足铸坯成形要求。



图 3 有限元模型网格划分图 Fig.3 Mesh division diagram of finite element model



图 4 结晶器宽面铜板温度场分析示意图 Fig.4 Schematic diagram of temperature field analysis for wide copper plate in crystallizer



图 5 结晶器窄面铜板温度场分析示意图 Fig.5 Schematic diagram of temperature field analysis for narrow copper plate in crystallizer

2.3 电磁搅拌参数

2.3.1 电磁场模型的建立

2.3.1.1 基本假设

由于板坯坯壳内钢液的复杂流动以及内部物理 量彼此之间会相互影响,故合理地进行如下简化假 设:1)在连铸过程中,忽略温度对钢液的影响,即 将钢液的参数定义为常数;2)电磁辊辊套与钢液的 相对磁导率接近真空磁导率,模拟中按真空环境处 理;3)忽略电磁冶金过程中钢液流动对磁场的影响; 4)该电磁场模型的建立及仿真过程依据麦克斯韦方 程组。

2.3.1.2 边界条件

电磁搅拌辊和连铸坯之间的装配关系如图 6 所示,本文将电磁搅拌辊设置在扇形1段第6[#]和7[#]辊位, 电磁搅拌辊并列安装。线圈采用两相交流电,相位角 相差 90°;忽略线圈以及铁芯涡流;线圈与铁芯间设 置为绝缘;电气参数选择 300 A、5 Hz。电流具体表 达式如式(1)~(2)所示。

$$U = 300 \times \sin(2 \times \pi \times 5 \times t) \tag{1}$$

 $V = 300 \times \sin(2 \times \pi \times 5 \times t - \pi/2) \tag{2}$

式中: *U* 为初始相位电流; *V* 为相位角 90°时的 电流; *t* 为时间。



图 6 电磁搅拌辊和连铸坯之间的装配关系图 Fig.6 Assembly relationship between electromagnetic stirring roller and continuous casting billet

2.3.1.3 建立数学模型及有限元网格划分

根据连铸二冷区实际情况,综合考虑电磁搅拌的 基本原理,建立二冷区电磁搅拌的电磁数学模型。利 用时域分析法,计算出电磁搅拌不同时刻的磁场形 态、伏安特性、磁感应强度、铁芯饱和度等。

在铸坯二冷区电磁搅拌数值模拟分析过程中,需 要定义一些物理参数:线圈相对磁导率为 1.0 H/m, 空气相对磁导率为 1.0 H/m,铁芯相对磁导率为 1 000 H/m,钢液电导率为 7.14×15¹⁵ S/m。然后根据 二冷区电磁搅拌实际情况,建立三维分析模型,并根 据有限元模型划分合适的网格,如图 7 所示。通过对 模型加载合适的边界条件(电流、匝数等),选择合 适的求解器即可求解。

2.3.2 电磁搅拌辊电磁场

本文所选取的磁感应强度均是某一时刻的瞬时 值,磁感应强度的变化对 430 不锈钢连铸坯的质量影 响不大。因为电磁搅拌的主要作用是加剧钢水流动,



图 7 电磁搅拌棍画网格后的模型 Fig.7 Model of electromagnetic stirring roller after drawing grid

使柱状晶断裂破碎,与钢水一起混合,并形成等轴晶的晶核。电磁搅拌的作用使钢水强制对流,消除了铸坯内部的过热度,使液芯钢水分布均匀化,也有利于等轴晶的生长。因此,二冷区电磁搅拌可以改善凝固组织,增加铸坯等轴晶率,并在一定程度上起到减轻中心偏析和中心裂纹等缺陷的作用。一对电磁搅拌辊作用下铸坯截面的磁感应强度分布如图 8 所示。调整两侧电磁搅拌辊的电流方向,使在铸坯截面位置两侧的极性相反,因此磁力线可穿透铸坯液芯。由于电磁搅拌辊相邻线圈的相位角相差 90°,因此铸坯截面两侧的磁极会同时朝着一个方向移动,即为初始相位角领先的线圈向初始相位角落后的线圈移动,由此,磁极的定向移动带动磁力线的定向移动,进而带动钢液移动。





一对电磁搅拌辊作用下铸坯截面磁感应强度云 图如图9所示。铸坯截面的磁感应强度主要集中在铸 坯外壳处,由铸坯外壳向液芯,磁感应强度逐步降低。 铸坯中心磁感应强度如图10所示。铸坯中心最 大磁感应强度为0.104T,平均磁感应强度为0.09T。



Horizontal distance 图 10 传坯中心磁感应强度 Fig.10 Magnetic induction intensity at the center of

the casting billet 两对电磁搅拌辊并列安装时,铸坯的磁感应强度

分布如图 11 所示。

700



图 11 铸坯的磁感应强度分布 Fig.11 Distribution of magnetic induction intensity in casting billet

国内某钢厂进行 430 不锈钢连铸坯生产的工艺 流程如下:电炉炼钢→AOD 精炼→LF 精炼→CCM 连 铸成形。关键工艺参数如下:结晶器宽面水量为 3 400 L/min,窄面水量为 400 L/min,且在连铸机扇 形 1 段第 6[#]和 7[#]辊位并列增加电磁搅拌辊。铸坯成形 后取样分析,其低倍组织如图 12 所示,计算后可知 等轴晶率接近 62.5%。



图 12 430 钢连铸板坯试样 Fig.12 Sample of 430 steel continuous casting slab

3 结论

1)针对铁素体不锈钢 430 高温连铸的状态,通 过高温拉伸试验对 430 不锈钢在高温下的力学性能 进行了研究,分析了 430 不锈钢 600~1 000 ℃的应 力-应变曲线、1 050~1 440 ℃的应力-应变曲线规律 以及 430 不锈钢不同应变速率下的抗拉强度,明确 了 430 不锈钢不同温度下的应力-应变曲线都是典型 的塑性拉伸曲线,当温度超过 1 000 ℃后,抗拉强 度显著减小。

2)采用凝固传热数值模拟,对 430 不锈钢连铸 坯结晶器冷却工艺中宽面及窄面铜板温度场进行分 析,结果表明,在结晶器宽面水量 3 400 L/min、窄 面水量 400 L/min 的参数条件下,结晶器宽面及窄面 铜板温度均匀,满足铸坯成形要求;此外,在 430 不 锈钢连铸机扇形 1 段第 6[#]和 7[#]辊位并列增加电磁搅拌 辊,电磁场分布数值模拟结果表明,430 不锈钢铸坯 电磁场分布合理且铸坯中心最大磁感应强度为 0.104 T、平均磁感应强度为 0.09 T,可通过合理增加 电磁搅拌显著提升液相穴内钢水的流动性。

3)采用本文连铸过程中的工艺参数对 430 不锈 钢进行连续铸造工业试验后,铁素体不锈钢 430 板坯 等轴晶率达到 62.5%,裂纹发生率降低,本研究可为 后续生产此类钢种提供借鉴。

参考文献:

- 谢胜涛, 邵书东, 亓海燕, 等. 稀土元素对 430 铁素 体不锈钢组织和性能的影响[J]. 中国冶金, 2022, 32(6): 94-100.
 XIE S T, SHAO S D, QI H Y, et al. Effect of Rare Earth Elements on Microstructure and Properties of 430 Ferritic Stainless Steel[J]. China Metallurgy, 2022, 32(6): 94-100.
- [2] LI H M, TAKATA N, KOBASHI M, et al. Effect of Added Stabilizing Elements on Thermal Activation Process of Plastic Deformation in 18Cr Ferritic Stainless Steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 824: 141866.

- [3] FU J W, WANG J C, LI F, et al. Effect of Nb Addition on the Microstructure and Corrosion Resistance of Ferritic Stainless Steel[J]. Applied Physics A, 2020, 126(3): 194.
- [4] 艾峥嵘,于凯,吴红艳,等. 超低温轧制 304 奥氏体 不锈钢马氏体逆相变及组织表征[J]. 精密成形工程, 2023, 15(12): 12-18.
 AI Z R, YU K, WU H Y, et al. Martensite Reverse Transformation and Microstructure Characterization of 304 Austenite Stainless Steel during Cryogenic Rolling[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(12): 12-18.
- [5] 张鑫,杜伟,黄训增. 铌钛对 430 铁素体不锈钢第二 相析出及力学性能的影响[J]. 宝钢技术, 2015(2):
 6-12.

ZHANG X, DU W, HUANG X Z. Effect of Nb and Ti on Second-Phase Precipitation and Mechanical Properties of 430 Ferritic Stainless Steel[J]. Baosteel Technology, 2015(2): 6-12.

- [6] DOU K, LIU Q. A New Cooling Strategy in Curved Continuous Casting Process of Vanadium Micro-Alloyed YQ450NQR1 Steel Bloom Combining Experimental and Modeling Approach[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2020, 51(8): 3945-3955.
- [7] LUO Y W, GUO H J, GUO J. Effect of Cooling Rate on the Transformation Characteristics and Precipitation Behaviour of Carbides in AISI M42 High-Speed Steel[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2018, 46(7): 1-7.
- [8] 康喜范. 铁素体不锈钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.

KANG X F. Ferritic Stainless Steel[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012.

- [9] 王文学,杨拉道,赵敏,等.不锈钢特性及其对板坯 连铸机的要求[J]. 重型机械,2010(S1):152-155.
 WANG W X, YANG L D, ZHAO M, et al. Character of Stainless Steel and Its Requirement for Slab Caster[J]. Heavy Machinery, 2010(S1):152-155.
- [10] 贾楠. 铁素体不锈钢板坯连铸结晶器液面波动原因分析[J]. 现代冶金, 2015, 43(4): 10-13.
 JIA N. Analysis of the Causes of Liquid Level Fluctuations in the Continuous Casting Crystallizer of Ferritic Stainless Steel Slab[J]. Modern Metallurgy, 2015, 43(4): 10-13.
- [11] 王文学,赵敏,曾晶,等. 铁素体不锈钢板坯连铸机 技术要点[J]. 连铸, 2015, 40(5): 76-79.
 WANG W X, ZHAO M, ZENG J, et al. Technical Characteristics of Ferritic Stainless Steel Slab Caster[J]. Continuous Casting, 2015, 40(5): 76-79.
- [12] 王贺利. 提高 430 铁素体不锈钢连铸坯等轴晶比例的 工艺实践[J]. 上海金属, 2007, 29(6): 27-30.
 WANG H L. Improvement of Equiaxed Grain Ratio in Continuous Casting Billet of 430 Ferrite Stainless Steel[J]. Shanghai Metals, 2007, 29(6): 27-30.
- [13] WON Y M, YEO T J, SEOL D J, et al. A New Criterion for Internal Crack Formation in Continuously Cast

Steels[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2000, 31(4): 779-794.

- [14] BRIMACOMBE J K. The Challenge of Quality in Continuous Casting Processes[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1999, 30(8): 1899-1912.
- [15] 冯兵,陈兴润,王建泽. 连铸工艺参数对 430 铁素体 不锈钢等轴晶率的影响[J]. 铸造, 2013, 62(7): 646-648.
 FENG B, CHEN X R, WANG J Z. Effect of Continuous Casting Process Parameters on Equiaxial Crystal Ratio of 430 Ferritic Stainless Steel[J]. Foundry, 2013, 62(7): 646-648.
- [16] 杨亚光. 高碳马氏体不锈钢 95Cr18 连铸关键技术研究及工业试制[J]. 特钢技术, 2023, 29(1): 17-21. YANG Y G. Investigations of the Key Technology for Continuous Casting of High Carbon Martensitic Steel 95Cr18 and Its Industry Scale Trial Production[J]. Special Steel Technology, 2023, 29(1): 17-21.
- [17] SHANMUGAM S, RAMISETTI N K, MISRA R D K, et al. Microstructure and High Strength-Toughness Combination of a New 700 MPa Nb-Microalloyed Pipeline Steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 478(1/2): 26-37.
- [18] SLATER C, HECHU K, SRIDHAR S. Characterisation of Solidification Using Combined Confocal Scanning Laser Microscopy with Infrared Thermography[J]. Materials Characterization, 2017, 126: 144-148.
- [19] DOU K, LIU Q, ZHOU Y. Influence of Boron Addition on the Hot Ductility of Medium Carbon Spring Steel[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 129: 105696.

[20] 张有余, 马蓉, 侯国清, 等. Cr₁₇Mn₆Ni₄Cu2N 奥氏体 不锈钢连铸坯组织及凝固模式[J]. 兰州理工大学学报, 2009, 35(4): 15-18.
ZHANG Y Y, MA R, HOU G Q, et al. Microstructures and Solidification Mode of Continuous Casting Slabs of Austenitic Stainless Steel Cr₁₇Mn₆Ni₄Cu2N[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2009, 35(4): 15-18.

[21] 周书才, 吕俊杰, 李华基. 电磁搅拌对马氏体不锈钢 连铸坯组织和表面质量的影响[J]. 铸造技术, 2006, 27(11): 1192-1195.

2022, 44(6): 19-21.

ZHOU S C, LYU J J, LI H J. Effect of Mould-Electromagnetic Stirring on Solidification Structure and Surface Quality of Martensite Stainless Steel in Concasting Square Billet[J]. Foundry Technology, 2006, 27(11): 1192-1195.

- [22] 陈湘茹,赵龙,余海峰,等. 2205 双相不锈钢连铸坯 凝固组织热模拟实验设计[J]. 实验室研究与探索, 2023, 42(1): 208-211.
 CHEN X R, ZHAO L, YU H F, et al. Design of Thermal Simulation Experiment for Solidification Structure of 2205 Duplex Stainless Steel Continuous Casting Slab[J].
 Research and Exploration in Laboratory, 2023, 42(1): 208-211.
- [23] 亓欣华,陈培敦,赵刚,等. 400 系不锈钢板坯连铸倒 角结晶器的开发与应用[J]. 山东冶金,2022,44(6): 19-21.
 QI X H, CHEN P D, ZHAO G, et al. Development and Application of Chamfer Mold for 400 Series Stainless Steel Slab Continuous Casting[J]. Shandong Metallurgy,
- [24] 刘驰. 430、444 不锈钢高温物理性能及力学性能研究
 [D]. 包头市:内蒙古科技大学, 2020.
 LIU C. Research on High Temperature Physical and Mechanical Properties of 430 and 444 Stainless Steel[D].
 Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2020.
- [25] 吴斌,陈兴润. 电磁搅拌对不锈钢连铸坯等轴晶率的 影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(9): 955-957.
 WU B, CHEN X R. Effect of Electromagnetic Stirring on Equiaxial Crystal Ratio in Stainless Steel[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2014, 34(9): 955-957.
- [26] 吴豪, 蔡兆镇, 牛振宇, 等. 薄板坯连铸结晶器铜板 热/力行为[J]. 中国冶金, 2021, 31(12): 79-88.
 WU H, CAI Z Z, NIU Z Y, et al. Thermo-Mechanical Behavior of Thin Slab Continuous Casting Mold Copper Plate[J]. China Metallurgy, 2021, 31(12): 79-88.
- [27] NIU Z Y, CAI Z Z, ZHU M Y. Dynamic Distributions of Mold Flux and Air Gap in Slab Continuous Casting Mold[J]. ISIJ International, 2018, 59(2): 283-292.