

倒角结晶器技术对 82B 大方坯质量的影响

党爱国¹ 林 鹏² 万 敏² 郑亚旭³ 张 龙³

(1. 钢铁研究总院连铸技术国家工程研究中心, 北京 100081; 2. 河北机电职业技术学院材料与建筑工程系, 邢台 054000; 3. 河北科技大学材料科学与工程学院, 石家庄 050091)

摘 要 针对尺寸为 280 mm×320 mm 的 82B 大方坯, 建立了直角铸坯与倒角铸坯的凝固传热模型和轻压下的热力耦合模型, 研究了倒角结晶器技术对大方坯角部温度及凝固末端的影响, 分析了轻压下对直角铸坯与倒角铸坯应力-应变的影响, 并进行了试验验证。结果表明, 拉速为 0.7 m/min 时, 结晶器倒角技术使 82B 铸坯凝固末端位置延后 0.32 m; 相同压下量时, 倒角铸坯各压下辊的作用力均明显低于直角铸坯, 轻压下率提升了 9.6%~15.6%; 倒角铸坯的 V 型偏析减少, V 型通道变窄, 中心缩松和中间裂纹均明显减轻; 采用轻压下工艺, 倒角铸坯中心 C 偏析的改善优于直角铸坯, 中心 C 偏析均值由 1.11 减少到 1.06。

关键词 82B; 轻压下; 倒角结晶器技术; 铸坯质量

中图分类号 TG249.7; TG142.21

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.T20240310

Influence of Chamfering Crystallizer Technology on Quality of 82B Billet

DANG Aiguo¹, LIN Peng², WAN Min², ZHENG Yaxu³, ZHANG Long³

(1. National Engineering and Research Center for Continuous Casting Technology, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081; 2. Department of Materials and Building Engineering, Hebei Institute of Mechanical and Electrical Technology, Xingtai 054000; 3. School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050091)

Abstract: A solidification heat transfer model of right-angled and chamfered billets and a thermal mechanical coupling model under light reduction were established for 82B billet with dimension of 280 mm × 320 mm. The influence of chamfering crystallizer technology on the corner temperature of billet and solidification end was investigated. Effects of light reduction on stress-strain curves of right-angle and chamfered billet were analyzed, and industrial experiments were conducted. The results indicate that at pulling speed of 0.7 m/min, the solidification end position of 82B billet is delayed by 0.32 m through chamfering crystallizer technique. Under identical reduction amount, the force exerted by each reduction roller on chamfered billet is significantly lower than that on right-angled billet, and light reduction rate is improved by 9.6%~15.6%. The V-shaped segregation in chamfered castings is reduced, and V-shaped channels become narrower, where the center shrinkages and middle cracks are significantly reduced. Under the light reduction process, the improvement of center carbon segregation in chamfered ingot is greater than that in right-angled billet, where the average center carbon segregation value is decreased from 1.11 to 1.06.

Key Words: 82B Billet, Light Reduction, Chamfering Crystallizer Technology, Billet Quality

82B 是典型的高碳珠光体钢, 具有较高的强韧性和拉拔性能, 主要应用于高层建筑物、大型桥梁和水利建设等领域。82B 盘条经拉拔、捻制成为预应力钢丝、钢绞线, 因此要求盘条必须有足够的强度、面缩率和较好的拉拔性能^[1-3]。82B 钢属于过共析钢, C 含量高, 其连铸坯在冷却凝固过程中易产生中心区域偏析并导致后

续轧制线材产生网状碳化物^[4-5], 因而在 82B 大方坯连铸生产中, 通常采用凝固末端动态轻压下技术来减轻铸坯的中心 C 偏析。目前, 影响 82B 大方坯质量的主要问题是压下量和拉矫力的控制, 压下量过小导致铸坯中心 C 偏析改善不明显, 压下量过大则导致铸坯内部萌生微裂纹, 且由于拉矫力过大容易造成铸坯漏钢或

收稿日期: 2024-08-05; 修订日期: 2024-10-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52204341); 河北省自然科学基金资助项目(E2024208002)

第一作者简介: 党爱国, 男, 1984 年出生, 高级工程师, E-mail: dangaiguo@163.com

通信作者: 林鹏, 男, 1984 年出生, 讲师, E-mail: 187151060@qq.com

引用格式: 党爱国, 林鹏, 万敏, 等. 倒角结晶器技术对 82B 大方坯质量的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(9): 1377-1381.

DANG A G, LIN P, WAN M, et al. Influence of chamfering crystallizer technology on quality of 82B billet[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(9): 1377-1381.

停机。因此,提高 82B 大方坯在轻压下工艺的铸坯质量是亟待解决的问题。

倒角结晶器技术通过改变结晶器生产铸坯的角部形状,提高了铸坯角部温度,可有效提高轻压技术下铸坯质量。国内钢厂对倒角结晶器技术的研究较少,且多集中在板坯上^[6-14],而对倒角结晶器技术在大方坯上的应用关注较少。本研究以断面尺寸为 280 mm×320 mm 的高碳钢 82B 大方坯为对象,研究倒角结晶器技术对轻压下后的倒角铸坯质量的影响,旨在为轻压下工艺下高碳钢大方坯内部质量的改善及轻压下技术的优化提供参考。

1 试验材料及方法

试验材料为某钢厂生产的 280 mm×320 mm 规格的 82B 连铸大方坯,其化学成分见表 1。

表 1 82B 钢的化学成分

Tab.1 Chemical composition of 82B steel %					
w_B					
C	Si	Mn	P	S	Fe
0.82	0.26	0.67	0.015	0.004	余量

82B 钢的生产工艺流程为:3 000 t 高炉→50 t 钢包精炼炉→280 mm×320 mm 连铸机→铸坯退火→铸坯修磨→轧机轧制。82B 大方坯生产使用四机四流全弧形连铸机,结晶器能够在线调节振幅和振频^[15]。铸坯凝固末端根据软件的压下模型数据实施四辊动态轻压下,总压下量为 11.5 mm。在铸坯非切割影响区切取长 320 mm 的中心纵向试样,在 80 ℃、体积分数为 50% 的盐酸溶液中酸洗 20 min,得到酸洗低倍试样,观察其中间裂纹及缩松情况。在铸坯非影响区切取 10 mm 厚的横向试样,用 $\phi 5$ mm 的钻头沿对角线方向,每隔 10 mm 取点进行钻孔取屑,利用 CS744 碳硫分析仪检测各点的钻屑 C 含量,取铸坯横截面中心处 C 含量与所有点的钻屑 C 含量平均值的比值,作为 82B 铸坯的中心 C 偏析值。大方坯连铸机的基本参数见表 2,倒角铸坯和直角铸坯的连铸生产工艺相同,连铸工艺参数见表 3。

表 2 大方坯连铸机基本参数

Tab.2 Basic parameters of billet continuous caster				
结晶器有效长度/mm	铸机断面/mm	铸机类型	水口浸入深度/mm	二冷各区长度/m
750	280×320	全弧形	100±10	0.56,1.52,2.34,2.49,2.60

表 3 82B 倒角铸坯和直角铸坯的连铸参数

Tab.3 Continuous casting parameters for chamfered and right-angled 82B billets					
过热温度/℃	浇注温度/℃	液相线温度/℃	环境温度/℃	拉速/(m·min ⁻¹)	结晶器水量/(L·min ⁻¹)
25	1 523	1 498	25	0.7	宽面 1 500,窄面 1 350

2 数学模型及计算结果

2.1 铸坯凝固传热模型

大方坯连铸生产过程中的热传导过程相对复杂,传热方程与铸坯在结晶器、二冷段传热过程的边界条件一起构成连铸坯凝固传热的数学模型。对铸坯凝固传热模型做出如下假设:①热传导过程为稳态,钢水为不可压缩的牛顿流体;②钢水的热物理参数为常数;③忽略结晶器倒角、振动对钢水流动的影响;④铸坯内外弧的传热条件相同^[16-17]。82B 铸坯的传热控制模型的方程为^[18]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q$$

式中, ρ 为 82B 钢的密度,kg/m³;c 为 82B 钢的比热容,J/(kg·℃);T 为铸坯温度,℃;t 为时间,s; λ 为导热系数,W/(m·℃);x、y、z 分别为铸坯宽度方向、厚度方向、拉坯方向坐标,m;Q 为内热源,W/m³。

使用 ANSYS 有限元软件对 82B 钢坯连铸过程进行模拟,钢种设置为“弹塑体”,压下辊为“刚性体”;由正六面体网格划分,网格数设置为 8 000,温度场模拟过程全长为 20 m,拉速为 0.7 m/min。三维仿真模型见图 1,由于模型具有对称性,因此以 1/4 模型为研究对象开展分析。其中点 A 为铸坯芯部,点 B 为铸坯上表面中心,点 C 为铸坯角部,R 为铸坯的圆角半径,取 8 mm。

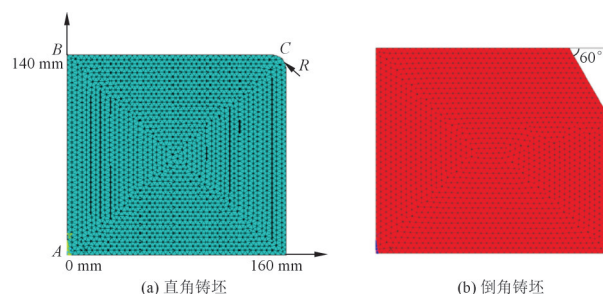


图 1 直角与倒角铸坯的网格模型

Fig.1 Mesh model of right-angled and chamfered billets

倒角结晶器的角部倒角角度为 30°、斜面长度为 50 mm,见图 2。通过数值模拟和现场实际工业试验,

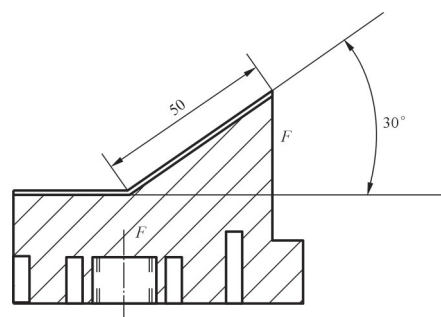


图 2 倒角结晶器角部尺寸

Fig.2 Corner size of chamfering crystallizer

发现采用图 2 尺寸后,角部应力相对较小,对铜板的使用寿命影响也较小。

2.2 铸坯凝固过程分析

以 82B 钢为研究对象,按照 $280\text{ mm} \times 320\text{ mm}$ 大方坯连铸工艺流程进行建模。直角铸坯、倒角铸坯角部区域随结晶器弯月面距离的温度场分布见图 3。可以看出,高温初生坯壳在结晶器内因受到一冷区的强冷而温度迅速下降;进入二冷区后,水冷强度减弱,同时由于 82B 钢水在凝固过程中释放的潜热大于二冷水带走的热量,导致两种铸坯的角部区域温度都有所升高,倒角铸坯角部温度比直角铸坯的高 100 K 左右。结晶器倒角设计,使得铸坯角部区域由二维冷却转变为一维冷却,进而减弱了角部的冷却速度,提高了铸坯角部区域的温度^[19-21]。此外,结晶器倒角设计也减少了铸坯曲率半径偏小的区域,减弱了铸坯冷却过程中的应力集中,使其避开钢的脆性区,避免了铸坯后续轧制受力变形过程中角部裂纹的产生。

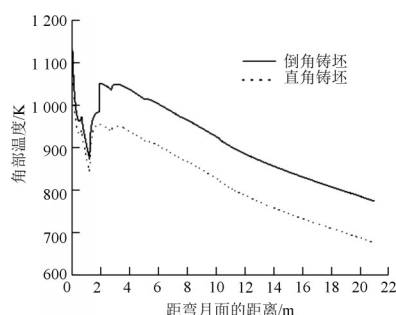


图 3 直角铸坯和倒角铸坯角部温度对比

Fig.3 Corner temperature comparison between right-angled and chamfered billets

对于 82B 连铸工艺,需保证一定的铸坯坯壳厚度和固相率,以便改善轻压下效率,提高铸坯质量。根据模拟计算结果,在拉速为 0.7 m/min 下,直角铸坯和倒角铸坯的两相区和液相线凝固末端长度见图 4。倒角

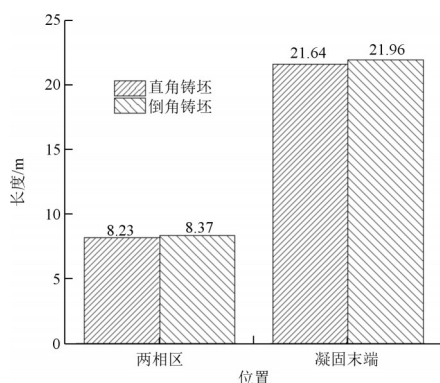


图 4 82B 直角和倒角铸坯凝固末端及两相区长度对比

Fig.4 Comparison of solidification end and bi-phase zone length of 82B right-angled and chamfered castings

铸坯的凝固末端比直角铸坯的凝固末端位置向后延长 0.32 m ,两相区长度增加 0.14 m 。凝固末端和两相区长度增加后,在同一压下位置,倒角铸坯的表面及中心区域温度都相对较高,由压下引起的中心区域等效应变也相对较大,有利于防止铸坯中心区域偏析、缩松、缩孔等缺陷的形成,有利于提高轻压下的压下效果。

2.3 轻压下工艺下的铸坯应变

82B 轻压下控制模型根据钢种、拉速和过热度等工艺信息确定压下量和压下范围,并将压下量分配到实施压下的辊上,由此给出实施压下辊子的辊缝设定值,系统根据辊缝设定值控制拉矫机辊缝,使辊缝达到设定值。

直角和倒角铸坯分别经过 11.5 mm 轻压下后的铸坯横截面等效应变分布见图 5。可以看出,经过压下后,直角铸坯变形均匀,两侧边没有鼓肚现象,铸坯上下表面应变较大,压下过程铸坯横截面除了上下表面距铸坯表面 35 mm 范围内应变较大,铸坯中心区域的应变几乎为 0,这不利于高碳钢 82B 铸坯中心缩松和裂纹的改善。倒角铸坯经过压下后,铸坯倒角区域变为圆弧形,没有发现明显的鼓起变形,铸坯横截面上等效应变分布如漏斗形,等效应变分布面积较大,中间位置应变较直角铸坯应变大,这有利于铸坯中心缩松和裂纹的控制。

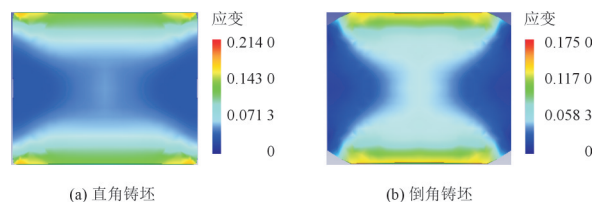


图 5 轻压下过程不同类型铸坯截面等效应变分布图

Fig.5 Equivalent strain distribution of cross sections in different types of billets during light reduction process

2.4 轻压下工艺下的铸坯应力

拉速为 0.7 m/min 下,在 82B 大方坯心部固相率 $57\% \sim 97\%$ 范围内对倒角铸坯和直角铸坯分别实施四辊压下,压下量分别为 $3, 3.5, 3$ 和 2 mm ,总压下量为 11.5 mm 。不同压下辊在倒角铸坯及直角铸坯的作用力对比见图 6。可以看出,相同压下量下,各个压下辊作用在铸坯的作用力,倒角铸坯均明显低于直角铸坯。1~4 号辊压下力的降幅分别为 $15.6\%、13.6\%、11.3\%$ 和 9.6% ,这表明对于倒角连铸坯,轻压下液压系统可施加较少的作用力实现同等的压下量,即倒角结晶器技术可提升连铸坯压下效率。图 7 为直角铸坯与倒角铸坯的应力分布图。可以看出,在压下量均为 11.5 mm 时,直角铸坯所受最大应力为 5.5 MPa ,主要分布在角部区域,中心区域凝固前沿的正应力为 $1.0 \sim 1.5\text{ MPa}$;

而倒角铸坯由于表面区域面积小,角部所受最大应力升至 25 MPa,中心区域凝固前沿的正应力为 5~10 MPa。

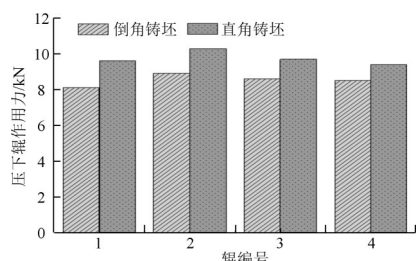


图 6 不同压下辊在直角铸坯与倒角铸坯上的作用力

Fig.6 The force exerted by different reduction rollers on chamfered and right-angled billets

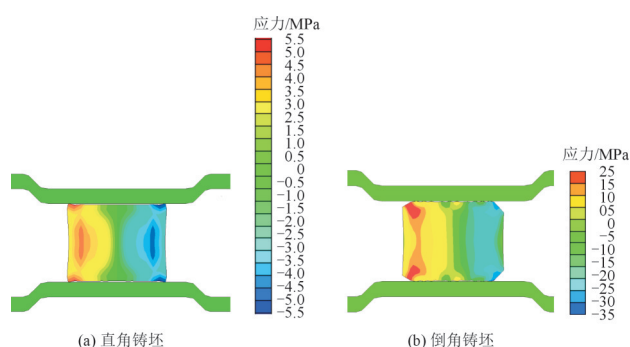


图 7 直角铸坯与倒角铸坯的应力分布图

Fig.7 Stress distribution diagram of right-angled and chamfered billet

3 试验验证

3.1 铸坯角部显微组织

图 8 为 82B 直角铸坯、倒角铸坯的角部显微组织。可以看出,直角铸坯与倒角铸坯在连铸过程中的角部温度不同。直角铸坯角部温度相对倒角铸坯低 100℃ 左右,因此其角部柱状晶生长细长,柱状晶间距较细,两侧柱状晶生长对称,在铸坯对角线上柱状晶交叉,有二次枝晶生成,见图 8a。倒角铸坯柱状晶生长方向和

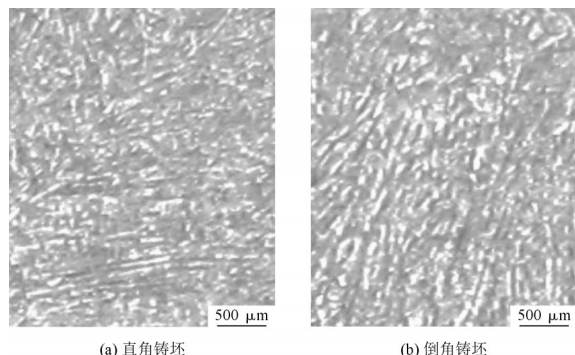


图 8 82B 直角铸坯、倒角铸坯的角部显微组织

Fig.8 Microstructure of corners of 82B right-angled and chamfered billiets

宽面基本一致,有一定的倾斜角度,柱状晶较直角铸坯粗大,在柱状晶区域没有生成二次枝晶,见图 8b。

3.2 中心缩松及中间裂纹

连铸大方坯凝固末端轻压下易产生中间裂纹,这是由于压下辊的作用力过大使得凝固前沿的树枝晶发生晶内开裂导致的^[22-23]。如果铸坯中间裂纹宽度大、数量多,则在后续的轧制过程中,不易压合^[24],从而导致线材缺陷。对倒角铸坯及直角铸坯进行酸洗检验,酸洗后铸坯中间裂纹及心部 V 型偏析等缺陷分别见图 9 和图 10。可以看出,与直角铸坯相比,倒角铸坯的 V 型偏析条数减少,V 型通道变窄,偏析带的中心缩孔数量减少,V 型偏析有降低的趋势;中心缩松和中间压下裂纹情况均明显减轻,倒角铸坯液芯凝固收缩的补充效果更强,这间接验证了倒角结晶器技术可提升压下辊对连铸坯内部区域的压下效率,并有助于压合凝固末端钢水凝固收缩导致的缩松。

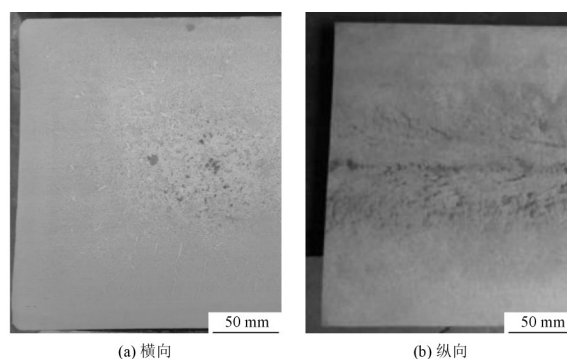


图 9 82B 直角铸坯的横向、纵向低倍形貌

Fig.9 Low magnification morphologies of 82B right-angled billet in horizontal and vertical directions

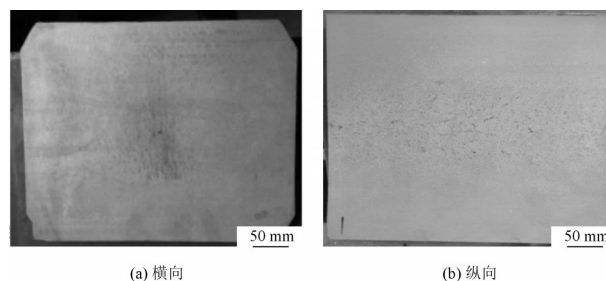


图 10 82B 倒角铸坯的横向、纵向低倍形貌

Fig.10 Low magnification morphologies of 82B chamfered billet in horizontal and vertical directions

3.3 中心 C 偏析

82B 的中心 C 偏析是铸坯在凝固末期随着枝晶的不断生长,由于选分结晶作用,C 元素在铸坯最后凝固的中心区域不断富集导致的^[25-27]。此外,中心区域 C 偏析降低了晶界强度并增加了晶间脆性^[28],也使得铸坯更容易产生中间裂纹。倒角铸坯与直角铸坯的中心 C

偏析对比见图 11。在相同的压下工艺下,分别检验了两种铸坯 35 炉次的横向低倍试样中心 C 偏析,发现直角铸坯的中心 C 偏析波动范围为 1.06~1.16,均值为 1.11,倒角铸坯的中心偏析波动范围为 1.02~1.10,均值为 1.06。结晶器倒角技术通过改变铸坯角部形状,提高了轻压下率,使得由固液相界面向铸坯中心推进富集的 C 元素,重新流入分配到铸坯中心外的其他区域中,从微观上减轻了铸坯中心 C 偏析。轻压下工艺下倒角铸坯中心 C 偏析的改善优于直角铸坯的。

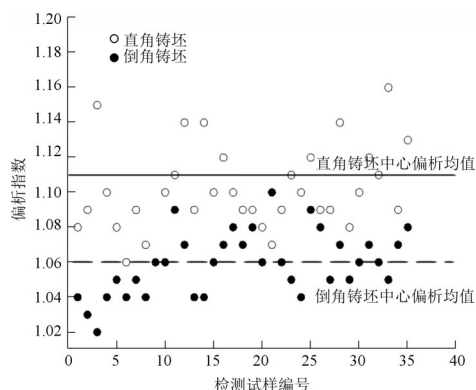


图 11 82B 倒角铸坯与直角铸坯中心 C 偏析对比图

Fig.11 Comparison of center carbon segregation between 82B chamfered billet and right-angled billet

4 结 论

(1)拉速为 0.7 m/min 时,82B 倒角铸坯角部温度高于直角铸坯角部 100℃左右,倒角铸坯的凝固末端比直角坯的凝固末端位置向后延长 0.32 m,两相区长度增加 0.14 m,倒角结晶器技术有利于改善轻压下工艺的铸坯质量。

(2)相同压下量下,各个压下辊作用在铸坯的作用力,82B 倒角铸坯均明显低于直角铸坯。1~4 号辊压下力的降低幅度分别为 15.6%、13.6%、11.3% 和 9.6%,倒角结晶器技术可提升连铸坯压下效率。

(3)结晶器倒角技术减弱了 82B 铸坯冷却过程中的应力集中,V 型偏析条数减少,V 型通道变窄,中心疏松和中间裂纹均明显减轻;轻压下 82B 倒角铸坯中心 C 偏析的改善优于直角铸坯,中心 C 偏析均值由 1.11 降至 1.06。

参 考 文 献

- [1] 王金涛,沈奎,李战卫,等. SWRH82B 高碳钢热轧盘条心部组织控制[J]. 金属热处理, 2024, 49(3): 103-107.
- [2] 白澈力格尔,王忠伟,牟贝成,等. Cr-V-Al 微合金化 SWRH82B 钢生产工艺研究[J]. 天津冶金, 2022(2): 12-15.
- [3] 李月云,王雷,李建华,等. 大规格 SWRS82B 钢盘条同圈抗拉强度波动原因分析及改善措施[J]. 金属热处理, 2024, 49(1): 273-278.
- [4] 吕明,米小雨,张朝晖,等. 连铸工艺参数对 SWRH82B 高碳钢 C 偏

- 析的影响[J]. 北京科技大学学报, 2020, 42(S1): 102-108.
- [5] 周青峰,王敏花,马建超,等. SWRH82B 小方坯中心偏析的改善[J]. 上海金属, 2014, 36(1): 48-54.
- [6] 高立超,吴春杰,王鹏飞,等. 鞍钢 170 mm 厚铸机大倒角结晶器优化生产实践[J]. 鞍钢技术, 2021(1): 48-51.
- [7] 马静超,成旭东,许红玉. 大倒角铸坯角部边直裂缺陷的产生及控制[A]// 炼钢品种质量提升研讨会[C]. 济南, 2015.
- [8] 杨春政. 典型微合金化钢板坯角部横裂纹产生机理与倒角结晶器技术研究[D]. 上海: 上海大学, 2011.
- [9] 刘洋,王文军,朱志远,等. 利用倒角结晶器消除连铸板坯的角横裂纹缺陷[J]. 钢铁, 2012, 47(4): 47-50.
- [10] 俞学成,刘凤刚,马威,等. 迁钢倒角结晶器的实践与应用[J]. 连铸, 2018, 43(5): 75-80.
- [11] 任飞飞,张慧,王明林. 倒角结晶器的倾角优化设计[J]. 上海金属, 2015, 37(5): 37-41.
- [12] 任飞飞,张慧,王伟宁,等. 倒角结晶器铜板实际温度场数值仿真[J]. 钢铁, 2015, 50(4): 27-33.
- [13] 宋景欣,张发斌. 基于热流密度分布模型的连铸倒角结晶器温度分布研究[J]. 炼钢, 2019, 35(6): 35-40.
- [14] 江中块,李俊杰,张森森,等. 板坯连铸结晶器铜板冷却水槽结构优化[J]. 材料与冶金学报, 2019, 18(2): 101-105.
- [15] 许建飞,刘志远. 板坯结晶器非正弦振动参数优化[J]. 中国冶金, 2018, 28(9): 58-62.
- [16] EL-BEALY M, LESKINEN N, FREDIKSON H. Simulation of cooling conditions in secondary cooling zones in continuous casting process[J]. Ironmaking and Steelmaking, 1995, 22(3): 246-255.
- [17] EL-BEALY M. Monotonic and fluctuated cooling approaches in secondary cooling zones during continuous casting[J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 1997, 36(1): 49-56.
- [18] 李鹤鹏. 大方坯连铸传热数学模型的研究及二冷配水的优化[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
- [19] 王新华,王文军,刘新宇,等. 减少含铌、钒、钛微合金化钢连铸板坯角部横裂纹的研究[J]. 钢铁, 1998, 33(1): 23-25.
- [20] 陈玉鑫,宋佳友,王莉,等. 板坯角部横裂纹的控制实践[J]. 连铸, 2016, 41(2): 52-56.
- [21] 刘启龙,陶红标,张慧,等. 倒角结构对连铸坯角部温度的影响及角横裂控制工业实验[J]. 炼钢, 2018, 34(2): 31-37.
- [22] 王博,张炯明,肖超,等. 连铸板坯轻压下过程中中间裂纹产生机理[J]. 工程科学学报, 2016, 38(3): 351-356.
- [23] 韩志强,蔡开科. 微观偏析模型在碳钢内裂纹敏感分析中应用[J]. 北京科技大学学报, 2000, 22(5): 442-446.
- [24] 刘志远,曹晓明,程巨广,等. 基于 QES 分析和改善板坯中间裂纹[J]. 炼钢, 2013, 29(3): 14-18.
- [25] 郭东伟,侯自兵,郭坤辉,等. 连铸方坯中心线凝固行为波动现象及变化规律[J]. 钢铁, 2023, 58(1): 78-90.
- [26] 杨奇军,杨庚朝,刘建,等. 52CrMoV4 弹簧扁钢连铸坯内部裂纹产生机理及预防[J]. 连铸, 2023, 48(1): 41-46.
- [27] 魏荣祥,张华,李仁兴,等. PMO 对硬线钢小方坯凝固组织和中心偏析的影响[J]. 中国冶金, 2023, 33(12): 115-121.
- [28] MINTZ B. The influence of composition on the hot ductility of steels and to the problem of transverse cracking [J]. ISIJ Int, 1999, 39(9): 833-855.

(编辑:刘晨辉)