

LD-氩站流程生产 Q235B 钢连铸板坯中间裂纹的分析与控制

黄 华^{1,2} 时朋召¹ 徐李军¹ 夏春祥² 赵英杰²

(1 钢铁研究总院连铸技术国家工程研究中心,北京 100081;2 唐山燕山钢铁有限公司,迁安 064403)

摘 要 针对 LD-氩站流程生产 Q235B 钢 230 mm 连铸板坯出现的中间裂纹,利用光学显微镜、扫描电镜和能谱仪对中间裂纹宏观和微观特征进行了系统分析。结果表明,判断扇形段接弧不良、辊缝精度差、辊子错位等是中间裂纹形成的外因;裂纹带上有粗大的晶粒,且有明显的 Mn、S 等元素以及复合夹杂物形态聚集是铸坯产生中间裂纹的内因。通过控制接弧精度 $\leq \pm 0.3$ mm、辊缝精度 $\leq \pm 0.5$ mm、二冷比水量 0.50 L/kg、成品[S] $\leq 0.030\%$ 、 $[Mn]/[S] \geq 15$ 等工艺措施,减少甚至杜绝板坯中间裂纹的发生,提高了连铸板坯的心部质量。

关键词 Q235B 钢 连铸 板坯 中间裂纹 外因 内因

Analysis and Control of Intermediate Cracks in Q235B Steel Continuous Casting Slab Produced by LD-Ladle Argon Blowing Route

Huang Hua^{1,2}, Shi Pengzhao¹, Xu Lijun¹, Xia Chunxiang² and Zhao Yingjie²

(1 National Engineering Research Central for Continuous Casting Technology, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081; 2 Tangshan Yanshan Iron & Steel Co Ltd, Qian'an 064403)

Abstract Based on the intermediate cracks in continuous casting Q235B steel 230 mm slab produced by LD-Ar route, a series of analyses the macroscopic and microscopic characteristics in intermediate cracks are done by optical microscope, SEM and EDS. The results show that irregular arc of segments and low precision of roll gap as well as misalignment of the supporting rollers are the outer causes of forming and extending in intermediate cracks, and coarse grains and serious element segregations such as manganese, sulfur and complex inclusion compound accumulated at the crack band are the inner causes of producing intermediate cracks. With the process measures including control segments arc $\leq \pm 0.3$ mm, roll gap $\leq \pm 0.5$ mm, secondary cooling water ratio 0.50 L/kg, [S] $\leq 0.030\%$, $[Mn]/[S] \geq 15$, it is available to decrease and avoid the occurrence of the cracks. As a result, the quality of the slab center quality is enhanced.

Material Index Q235B Steel, Continuous Casting, Slab, Intermediate Cracks, Outer Causes, Inner Causes

Q235B 板带材可用于制备轮毂、焊管、花纹板、结构板等机械零部件,是应用较广泛的钢材产品。

为了进一步降低生产成本,许多企业生产 Q235B 钢采用转炉-氩站处理工艺,其产品性能完全满足某些常规板带材的要求^[1-2]。河北唐山炼钢厂生产中发现,LD-氩站流程生产 Q235B 钢连铸板坯在火焰切割横截面上会直接暴露中间裂纹缺陷^[1],对钢水含硫量高、转炉出钢“渣洗”钢包脱硫^[3-4]情况尤为明显;该缺陷在轧制过程中裂纹不能焊合,使钢材断面中心部位容易出现分层或暗线,或在轧制薄板时,表面呈波浪形缺陷,有时在轧制中还会发生断带事故,给轧钢生产带来危害^[5]。不同企业解决连铸坯中间裂纹的措施不同且可移植性差,这与对其形成机制和影响因素的认识不够深入有关。

本文针对 Q235B 钢连铸板坯横截面出现的中

间裂纹缺陷,基于实际工艺路线、连铸设备和工艺参数,利用光学显微镜、扫描电镜和能谱仪对中间裂纹

表 1 Q235B 钢主要成分/%

Table 1 Composition of main elements in Q235B steel/%

成分	C	Si	Mn	P	S	O
内控	0.14~0.16	0.10~0.20	0.35~0.40	≤ 0.030	≤ 0.030	$\leq 0.006 0$
目标	0.15	0.15	0.38	≤ 0.025	≤ 0.025	$\leq 0.003 0$
范围	0.13~0.19	0.10~0.30	0.30~0.50	≤ 0.030	≤ 0.030	$\leq 0.008 0$

表 2 Q235B 钢连铸设备与工艺参数

Table 2 Parameters of equipment and process for Q235B steel continuous casting

项目	参数
机型	2 机 2 流直弧形板坯
铸机半径/m	10.6
断面/(mm × mm)	230 × 1 530
拉速/(m · min ⁻¹)	0.95
过热度/°C	20~45
比水量/(L · kg ⁻¹)	0.70
冷却方式	足辊水冷、其它气雾冷
辊缝控制	静态常规

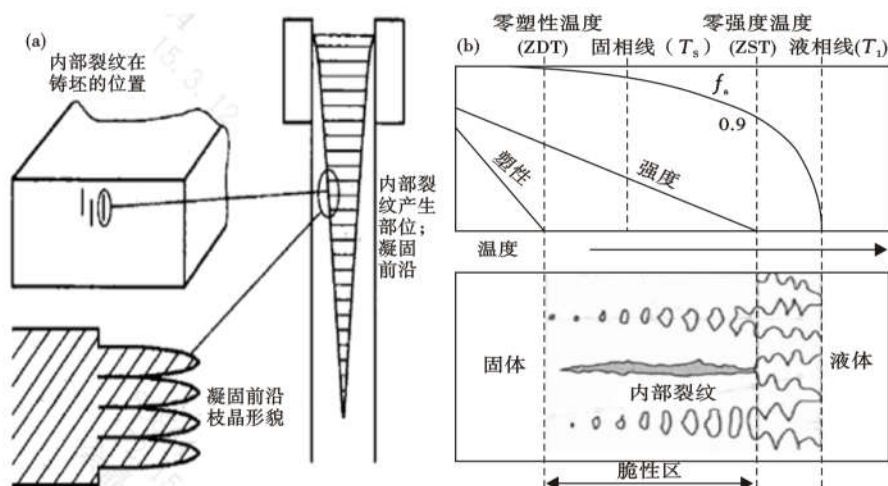


图 1 铸坯内部裂纹及其形成机理示意图

Fig. 1 Schematic and formation pattern diagrams of internal cracks in continuous casting slab

宏观和微观特征进行了系统分析,探索铸坯中间裂纹的形成机理和调控措施,为进一步实现 Q235B 钢高品质连铸坯提供技术参考。

1 工况条件

Q235B 钢的生产工艺流程为:高炉→KR 铁水脱硫→180 t 转炉→氩站→厚度 230 mm 板坯连铸→加热炉→热轧带钢,Q235B 钢其主要成分见表 1,主要连铸设备和工艺参数见表 2。

2 中间裂纹形成的理论分析

铸坯横截面上的中间裂纹是内部裂纹的典型缺陷之一,内部裂纹形成机理的阐述直接为后续中间裂纹缺陷分析提供理论参考。带液芯的铸坯在连铸机内运行过程中,需承受钢水静压力、弯曲应力、矫直应力、导辊不对中产生的外力以及二冷区喷淋不均所产生的热应力,这些力相互叠加使得铸坯液相穴凝固前沿承受的应力和应变超过其临界值时就会产生内部裂纹,内部裂纹示意图如图 1(a)所示^[6-8]。

从凝固角度来看,铸坯在凝固前沿一次枝晶间存在部分呈糊状且不能流动的液体,该部分液体在热应力作用下构成了自零塑性温度 (Zero ductility temperature, ZDT) 至零强度温度 (Zero strength temperature, ZST) 的热脆性裂纹敏感区,如图 1(b)所示。当凝固前沿固相率 $f_s = 0.9$ 时,在 ZST 的晶体由于无塑性在外力作用下开始产生裂纹;在 ZDT 铸坯完全凝固且具备一定塑性,已形成的裂纹停止扩展。

从钢的高温力学性能来看,钢成分和凝固过程中溶质元素的微观偏析对 ZDT、ZST 有较大的影响,尤其是枝晶间[S]、[P]和[Mn]含量变化对 ZDT 和

ZST 影响较大^[9-11]。

综上所述,带液芯坯壳所受的外力是内部裂纹产生的外因,钢对裂纹敏感性是裂纹产生的内因,工艺条件和设备状况是裂纹产生的条件,将外因、内因和条件三者协调统一,才能达到有效防止铸坯内部裂纹的目的。

3 中间裂纹宏观与微观分析

3.1 宏观分析

通过对 Q235B 钢连铸板坯在火焰切割横截面上热检统计发现,板坯的中间裂纹均出现在铸坯内弧侧,外弧未出现该缺陷。从中间裂纹形貌可以看出,中间裂纹缺陷发生在内弧表面至铸坯中心的二分之一厚度范围之内,可以断定缺陷发生在柱状晶区的一次枝晶间隙间,在铸坯等轴晶区裂纹消失;裂纹长度最长处达到 60 mm,严重的裂纹开口度为 2 mm;裂纹出现在浸入式水口吐出孔两侧,距内弧表面 30~80 mm 处。按照在钢水凝固过程中连铸坯壳厚度变化平方根定律^[12],裂纹发生在距结晶器弯月面 1.5~8.5 m,由于结晶器有效高度 0.8 m、直弧段出口距弯月面 4.67 m,扇形段出口距弯月面分别为 6.51 m、8.37 m、10.22 m,判断裂纹缺陷发生位置对应着连铸机直弧段和 1#~3#扇形段之间。

铸机拉下后,对结晶器与直弧段接弧、1#~3#扇形段接弧与辊缝进行测量发现,接弧精度在 -0.5 mm 至 +0.5 mm、辊缝精度在 -1.0 mm 至 +1.0 mm,超出铸机开机前安装接弧精度 $< \pm 0.3$ mm、辊缝精度 $< \pm 0.5$ mm 的控制要求。

铸坯内部裂纹形成取决于高温下变形金属凝固前沿临界应变、钢的热脆性与热塑性产生的裂纹敏感性以及设备和冷却工艺等因素,结合生产实践,在多个中间包浇次生产过程中仅在个别炉次出现中间裂纹缺陷。因此,除了考虑连铸机结晶器与直弧段、直弧段与 1#扇形段以及 1#至 3#扇形段间接弧精度、扇形段辊缝精度、冷却制度下坯壳四周的均匀性和温度梯度外,仍需从中间裂纹附近的微观组织结构、元素偏聚以及端口形貌予以系统分析。

3.2 微观分析

将选取的典型裂纹试样锯成小块,然后将试样

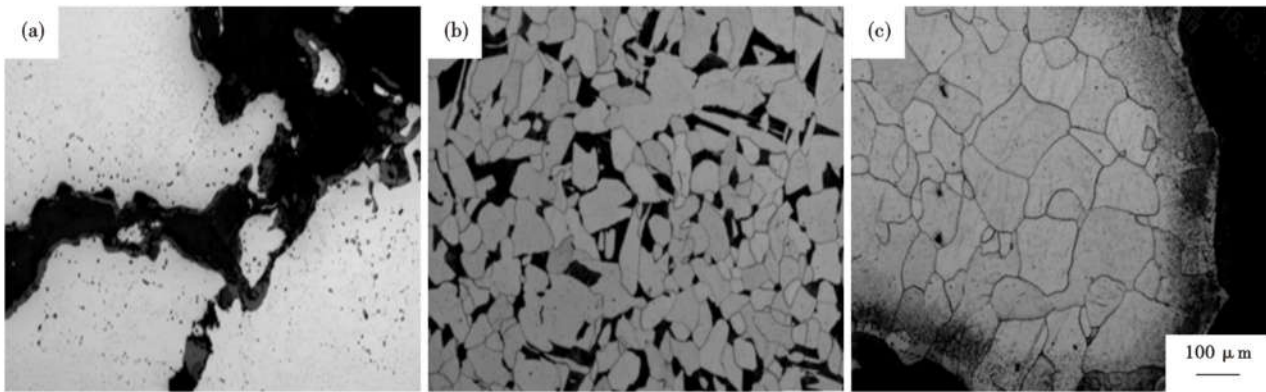


图 2 Q235B 钢 230 mm 连铸板坯中间裂纹微观形貌(a),正常部位晶粒(b)和裂纹附近晶粒(c)

Fig. 2 Morphology of intermediate crack (a), grain size at normal zone (b) and grain size near crack zone (c), Q235B steel 230 mm CC slab

进行加工处理,表面抛光,观察裂纹附近形貌如[图 2(a)]所示,开裂处的微观形貌呈现“河流状”。通过 4% 硝酸酒精溶液腐蚀后,观察正常部位晶粒[图 2(b)]、缺陷部位晶粒[图 2(c)]发现,正常部位组织的铸态组织为铁素体和珠光体;缺陷处组织有明显的晶粒长大和严重脱碳现象,裂纹内部已氧化,并有大量氧化圆点存在。

通过扫描电镜下裂纹断口的形貌(图 3),可以看出,中间裂纹不是很深,且在裂纹剥开过程中会发生撕裂,裂纹断口局部位置会观察到典型的塑性变形断口形貌;但从整体上看,裂纹开裂面上存在着大量的液相自然凝固形成的平滑曲面,几乎没有韧窝存在,表明裂纹产生时,该位置存在一定量的液态钢液,说明中间裂纹是在固液两相区形成的,属于低熔点开裂。在裂纹周边不同位置以及裂纹断口处选择不同点进行能谱分析,发现裂纹断口附近存在许多条状、点状灰色物质,这些条状与点状物质除氧化原

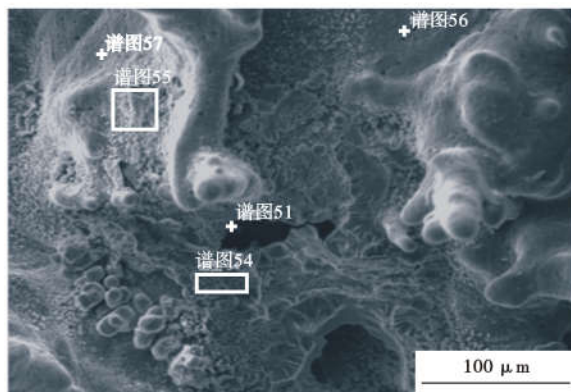


图 3 扫描电镜 Q235B 钢 230 mm 连铸板坯裂纹断口形貌
Fig. 3 SEM images of crack fracture, Q235B steel 230 mm CC slab

点外,元素 Mn、S、C 在该位置存在一定的富集,并且 S 的偏析非常显著。

结合现场生产实践,LD-氩站流程生产 Q235B 钢连铸板坯总氧含量稳定控制为 0.002 0% ~ 0.004 0%,氧化物夹杂水平较好;S 含量可控制为 0.020% ~ 0.030%,虽未超过 Q235B 国家标准 $S \leq 0.045\%$ 的范围,但与常规 LF 精炼工艺下的 S 含量 0.001% ~ 0.005% 相比,已属于中高范围。由于钢凝固过程中 S 在固液相之间的溶解度不同,其大量偏聚在枝晶间,使基体抵抗裂纹的能力下降。

中碳钢连铸坯的柱状晶发达,容易造成晶间偏析,富集的 Mn、S 等元素以夹杂物的形式存在于晶界上,它们的凝固偏析显著降低了树枝晶晶界的高温强度和高温塑性,降低了钢的临界应变值,引起晶间脆性,形成裂纹扩展路径。同时,富集元素在晶界偏聚,降低了树枝晶间液膜的凝固点,使钢的第 I 脆性温度区向低温区移动,增加了中间裂纹出现的几率和延伸长度。铸坯凝固过程中,坯壳在铸机中经历鼓肚、弯曲、矫直、接弧不良、辊子错位等状况产生的应变超过所允许的临界应变值时,在已经凝固的界面上造成一次树枝晶开裂,并沿晶界延伸,周围富集 Mn、S 等元素的熔化钢液补充到缝隙处,致使裂纹形成。

为了控制 Q235B 钢连铸坯柱状晶比例,提出降低二冷比水量、提高二冷区电磁搅拌电流参数以抑制柱状晶生长。此外,S 元素在柱状晶一次枝晶间偏聚,提高了中间裂纹发生的几率,通过控制入炉铁水 $[S] \leq 0.025\%$,并规范废钢中铸铁件和转炉使用压球与豆铁散料等高硫物料使用量,控制钢水成品 $[S] \leq 0.030\%$;在转炉出钢 S 高情况下,借助出

表 3 改进前后的工艺参数
Table 3 Parameters of process before and after improvement

工艺	接弧精度/mm	辊缝精度/mm	二冷水比水量/L·kg ⁻¹	电搅参数	成品[S]/%	成品[Mn]/%	成品 Mn/S
改进前	≤±0.5	≤±1.0	0.70	280 A/7Hz	≤0.045	0.25~0.35	≥10
改进后	≤±0.3	≤±0.5	0.50	350 A/7Hz	≤0.030	0.30~0.40	≥15

钢过程加入白灰进行渣洗、氩站大气搅拌和[Mn]含量二次微调,调整[Mn]/[S]≥15。通过采取一系列的改进措施,如表3所示,使铸坯中间裂纹缺陷得到有效控制。

4 结论

(1)中间裂纹缺陷发生在柱状晶区的一次枝晶间隙间,在铸坯等轴晶区裂纹消失;缺陷发生位置对应着连铸机直弧段和1[#]~3[#]扇形段之间,控制该区域接弧精度≤±0.3 mm、辊缝精度≤±0.5 mm。

(2)中碳钢铸坯的柱状晶发达,容易造成Mn、S等元素晶间偏析,引起晶间脆性,是裂纹产生的内

因,通过调整二冷制度比水量0.50 L/kg、1[#]扇形段电磁搅拌参数350 A/7 Hz等措施抑制柱状晶生长。

(3)钢水S含量高,[Mn]/[S]比低,枝晶间偏聚的S含量增加,提高了中间裂纹出现的几率。通过控制入转炉铁水S含量≤0.025%,并控制废钢中铸铁件和转炉使用压球与豆铁散料等高硫物料使用量等措施使钢水成品S含量≤0.030%;在转炉出钢S高情况下,借助出钢渣洗、氩站精炼功能,提高[Mn]/[S]≥15。减少和避免了铸坯中间裂纹的发生。

参考文献

- [1]郑一见,梁新亮,尹振芝,等. BOF-LF-CSP与BOF-渣洗-CSP工艺生产Q235B钢中夹杂物对比分析[J]. 武汉科技大学学报, 2013, 36(6):416-419.
- [2]蔡常青. Q235B板不进精炼生产工艺的实践[C]//第十一届中国钢铁年会论文集. 北京:中国金属学会, 2017:1.
- [3]景琳琳,周 详. 转炉渣洗脱硫的工业应用与研究[J]. 金属材料与冶金工程, 2015, 43(2):32-34+38.
- [4]潘贵明,曲 欣,张奇毅. 用渣洗替代钢包精炼炉脱硫的工艺优化试验研究[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2016, 33(1):1-4.
- [5]许庆太,杨颀光,吴春雷,等. 连铸坯内部裂纹缺陷的检验与分析[J]. 连铸, 2015, 40(5):1-6.
- [6]Hiebler H, Zirmgast J, Wolf M M. Inner Crack Formation in Continuous Casting: Stress or Strain Criterion[C]. Proceedings of 1994 Steelmaking Conference(Chicago), 1994: 405-416.
- [7]Liu Wenhong, Xie Zhi, Chen Hong. Modeling and Simulation of Quality Analysis of Internal Cracks Based on FTA in Continuous Casting Billet[C]. Ieee International Conference on Computing Control and Industrial Engineering, 2011: 359-362.
- [8]Zhu Guosen, Wang Xinhua, Yu Huixiang, et al. Strain in Solidifying Shell of Continuous Casting Slab[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2003, 10(6):26-29.
- [9]Brimacombe J. K, Sorimachi K. Crack Formation in the Continuous Casting of Steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions 1977, 8B, 489-505.
- [10]Chen Shaodong, Hu Zhaofan, Yuan Yangyang, et al. Study on Intermediate Crack in Continuous Casting Slab of Medium Carbon Steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2011, 18(Supplement 2):383-388.
- [11]蔡开科. 连铸坯质量控制[M]. 北京:冶金工业出版社, 2010: 330-350.
- [12]干 勇,倪满森. 现代连续铸钢实用手册[M]. 北京:冶金工业出版社, 2010:74.

黄 华(1985-),男,博士生,工程师,2009年山东科技大学(本科)毕业,品种钢冶炼工艺研究。
E-mail:huanghual18@163.com

收稿日期:2021-07-14

欢迎全国冶金、机械、耐材及相关
行业在《特殊钢》杂志上刊登工艺设备
和技术、产品研发宣传广告