

50CrMo 钢 $\Phi 600$ mm 连铸圆坯中心裂纹分析及工艺改进

张洪才, 林 鹏, 翟万里, 许正周, 牟泽锋, 许光乐
(江苏沙钢集团淮钢特钢股份有限公司技术中心, 淮安 223002)

摘要: 钢厂 90 t LD-LF-VD-CC 流程生产的 $\Phi 600$ mm 钢 50CrMo 连铸圆坯中心裂纹比率达到 30%, 分析得出: 连铸圆坯中心裂纹全部出现在内弧一侧。主要原因是该钢种柱状晶发达, 内弧柱状晶基本延伸到圆坯中心, 在矫直时圆坯中心产生开裂并向内弧侧扩展。通过采取将结晶器电磁搅拌电流由 260 A 提高到 400 A, 中间包钢水过热度由 30 ~ 50 $^{\circ}\text{C}$ 降到 15 ~ 30 $^{\circ}\text{C}$, 拉速由 0.34 m/min 降到 0.28 m/min, 进拉矫机前支撑辊及拉矫机辊道对弧精度由 0.40 ~ 1.00 mm 降到 0.20 mm 以下等措施, 50CrMo 钢 $\Phi 600$ mm 连铸圆坯中心裂纹全部消除。

关键词: 50CrMo 钢; 连铸圆坯; 柱状晶; 电磁搅拌; 过热度; 中心裂纹

Analysis and Process Improvement of Center Crack of 50CrMo Steel $\Phi 600$ mm Continuous Casting Round Bloom

Zhang Hongcai, Lin Peng, Zhai Wanli, Xu Zhengzhou, Mou Zefeng, Xu Guangle
(Technology Center, Huaigang Special Steel Co., Ltd., Jiangsu Shagang Group, Huai'an 223002)

Abstract: The central crack ratio of the $\Phi 600$ mm 50CrMo steel continuous casting round bloom produced by 90 t LD-LF-VD-CC flow sheet at steel plant reaches up to 30%. It is obtained by analysis that the central cracks of the continuous casting round bloom all appear on the inner arc side. The main reason is that developed columnar crystal of the steel, the inner arc columnar crystals basically extend to the center of the round bloom, leading to the round bloom center cracking and expanding to the inner arc side during straightening. By increasing the electromagnetic stirring current of the crystallizer from 260 A to 400 A, the superheat of the tundish liquid reducing from 30 ~ 50 $^{\circ}\text{C}$ to 15 ~ 30 $^{\circ}\text{C}$, and the casting speed lowering from 0.34 m/min to 0.28 m/min, and the accuracy of the roller table of the tension leveling machine reducing from 0.40 ~ 1.00 mm to below 0.20 mm, etc, the center crack of the $\Phi 600$ mm 50CrMo steel continuous casting round bloom is completely eliminated.

Material Index: 50CrMo Steel; Continuous Casting Round Bloom; Columnar Crystal; Electromagnetic Stirring; Superheat; Center Crack

50CrMo 钢属于超高强度的合金结构钢, 具有较高的强度和韧性, 淬透性好, 无明显的回火脆性。调质处理后的 50CrMo 钢具有较高的疲劳极限和良好的低温冲击韧性, 而且高温时具有较高的蠕变强度和持久强度, 广泛用于制造机车大齿轮, 增压器传动齿轮、压力容器齿轮、受较高载荷的连杆及弹簧夹以及可用于折弯机的模具等。江苏沙钢生产 50CrMo 钢 $\Phi 600$ mm 连铸圆坯, 供下游用户用于锻造生产此类产品, 但是生产的 50CrMo 钢 $\Phi 600$ mm 连铸圆坯出现近 30% 的中心裂纹, 给钢厂带来重大损失。

1 $\Phi 600$ mm 圆坯中心裂纹形貌

将 50CrMo 钢 $\Phi 600$ mm 连铸大圆坯低倍试样, 按照低倍检验试样表面光洁度要求铣磨后, 按照《钢的低倍组织及缺陷酸蚀检验法》对低倍试样进

行热酸洗, 酸液成分为 1:1 (容积比) 工业盐酸水溶液, 酸液温度为 $(70 \pm 5)^{\circ}\text{C}$, 酸洗时间为 20 ~ 25 min, 按照标准 YB/T153-2015 优质结构钢连铸坯低倍组织缺陷评级图进行低倍评级, 中心裂纹最大达到 3 级以上。如图 1 所示, 在圆坯低倍试样上, 内弧柱状晶异常发达, 一次枝晶末端距圆坯凝固中心约 50 mm, 外弧近中心则无明显柱状晶, 裂纹从圆坯凝固中心开始并向内弧侧扩展, 裂纹总长度约为 85 mm。50CrMo 钢 $\Phi 600$ mm 连铸圆坯中心等轴晶长度约 250 mm, 粗略测算, 中心等轴晶率约 17.3%。

2 生产工艺

50CrMo 钢 $\Phi 600$ mm 连铸圆坯生产工艺流程为: 转炉 90 t LD \rightarrow 90 t LF 精炼 \rightarrow 90 t 双工位 VD 真空处理 \rightarrow CCM ($\Phi 450 \sim \Phi 800$ mm)。

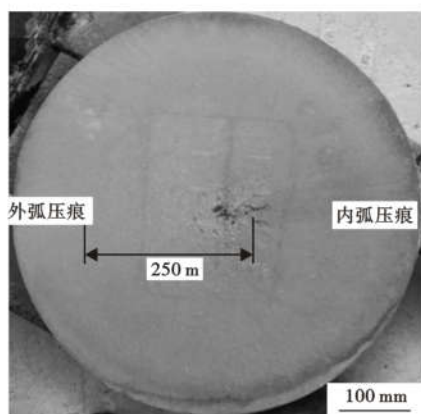


图 1 50CrMo 钢 Φ600 mm 铸坯中心裂纹形貌

Fig. 1 Morphology of 50CrMo steel Φ600 mm cast bloom central crack

2.1 钢水成分

该钢种主要标准化学成分如下: 0.48% ~ 0.52% C、0.20% ~ 0.34% Si、0.65% ~ 0.80% Mn、1.20% ~ 1.30% Cr、0.20% ~ 0.30% Mo、0.060% ~ 0.080% V、≤0.015% P、≤0.010% S。经转炉-精炼-VD 真空脱气-连铸机, 成品连铸坯氧含量 ≤ 20 × 10⁻⁶, 成品氮含量 ≤ 50 × 10⁻⁶。

2.2 连铸生产工艺

大圆坯连铸机由意大利 Danie 公司设计制造, 生产规格为 Φ450/Φ500/Φ600/Φ700/Φ800 mm, 配置两段电磁搅拌: 结晶器电磁搅拌 + 末端电磁搅拌。连铸生产时采用全保护浇注, 钢包套用长水口, 中间放石墨密封垫, 液压系统支撑长水口, 结晶器保护渣采用自动加渣系统加渣。二次冷却采用动态配水, 连铸圆坯出二冷室后采用保护罩保温, 火焰切割后通过辊道输送到冷床喷码, 吊运入坑缓冷。过热度 ≤ 40 °C, 拉速 0.34 m/min; 过热度 > 40 °C, 拉速为 0.32 m/min。

3 50CrMo 钢 Φ600mm 连铸圆坯中心裂纹产生原因及影响因素

带液芯连铸坯以一定的速度在连铸机内运行, 边放热、边凝固, 形成一个很长的液相穴, 直到完全凝固。连铸坯在运动中凝固, 实质上是沿液相穴在固液界面两相区 (Tl-Ts) 把液体转变为固体的加工过程。一般来说, 固液界面刚结晶的晶体强度和塑性变形能力是很小的 (抗拉强度 σ 为 1 ~ 3 MPa, 变形率 ε 为 0.2% ~ 0.4%), 当作用于凝固坯壳的外力超过了临界值时, 就会在固液界面产生裂纹^[1]。从宏观上说, 坯壳受外力作用是连铸坯产生裂纹的外因, 钢对裂纹的敏感性是产生裂纹的内因, 而工艺和设备状况是产生裂纹的条件。从微观上来说, 铸

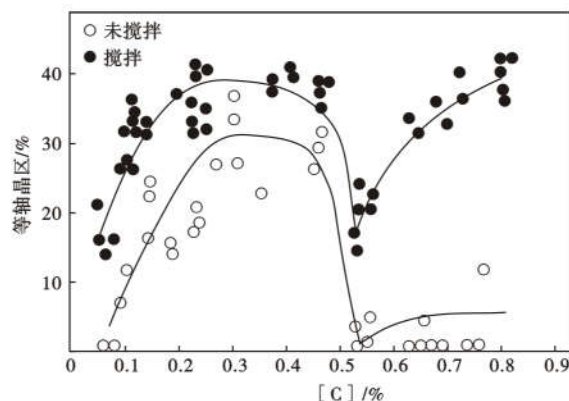


图 2 钢中 C 含量对连铸坯等轴晶区的影响

Fig. 2 Effect of carbon content in steel on equiaxed grains zone of continuous casting bloom

坯发达的柱状晶结构、铸坯冷却过程中的相变、奥氏体晶界第二相质点析出等降低了钢的高温塑性, 在外力 (弯曲、矫直、热应力) 作用下, 坯壳承受应力超过了钢的允许强度和应变时便产生了裂纹^[1]。就本钢种连铸圆坯产生裂纹的位置及形态特征, 结合该钢种连铸圆坯生产实际, 就如下几个主要方面进行分析。

3.1 钢水成分

理论分析和试验测定指出, 钢的连铸坯凝固结构受到多种因素的影响, 但是钢中的 C 含量对凝固组织的形成起着重要作用, 钢中的 C 含量和铸坯中心等轴晶的关系见图 2。

由此可知, 当钢中 C 含量为 0.53% 时, 钢水在凝固过程中已无包晶反应, 液态钢水凝固成 γ_{Fe} , 收缩小, 无明显气隙生成, 热流最大, 定向传热效果显著, 柱状晶异常发达, 此时中心等轴晶区最小。而该钢种 50CrMo 钢 C 含量为 0.48% ~ 0.52%, 接近包晶反应终点, 钢水在凝固时包晶反应微乎其微, 凝固时热流大, 因此, 连铸坯柱状晶也很发达。从图 1 可知, 50CrMo 钢 Φ600 mm 连铸圆坯低倍试样上内弧柱状晶异常发达, 几乎达到圆坯凝固中心, 而外弧柱状晶并不是很发达, 主要是连铸坯在凝固过程中内弧凝固前沿枝晶的脱落, 在重力作用下沉积在外弧, 抑制了外弧柱状晶的生长^[2]。柱状晶枝干较纯, 而柱状晶交界面, 由于杂质元素富集, 晶间偏析严重, 是裂纹优先形成、扩展的地方。尤其是接近凝固中心, 柱状晶交界面溶质元素浓度随着凝固前沿的逐步推进而不断提高, 在外力作用下产生裂纹并扩展的风险显著提高了。

3.2 中间包钢水过热度 and 拉速

中心等轴晶区的大小和中间包钢水过热度密切

相关。低过热度是连铸坯扩大等轴晶区的有效手段,降低钢水的过热度,使钢水在接近液相线温度时进行浇注,从而获得细小的铸态组织^[3]。对于Φ600 mm及以上大规格连铸圆坯,由其面积/体积比较小,传热效率低,大圆坯液芯长,长时间保持着较高的温度梯度,柱状晶生长驱动力强,易引起柱状晶发达,裂纹敏感性强。

连铸生产过程中,过热度和拉速是一对相互关联的工艺参数。拉速越高,钢水在结晶器中停留时间短,在二冷喷水区停留时间也相对较短,钢水过热耗散较少,柱状晶区增加;而且,拉速增加,连铸坯液芯长度延长,带液芯矫直,中心缩孔和疏松变的更加严重,且很容易产生中心裂纹。大量生产实践表明,过热度和拉速对于大规格连铸圆坯中心质量常常起着决定性的作用。经过统计,过热度 $\geq 40\text{ }^{\circ}\text{C}$,拉速为 0.34 m/min 炉次产生中心裂纹比率达到40%以上,而中间包最后一包由于钢水补缩需要,尾出拉速设定为 0.30 m/min ,最后一炉圆坯低倍质量较好,未出现明显中心裂纹。

3.3 二冷水量

连铸圆坯出结晶器以后就进入二冷区,二冷区前面分别是喷水冷却的足辊段和气雾冷却的活动段和固定段,后面是带保温罩的空冷段。通常来说,二冷区冷却越强,圆坯表面温度越低,内外温差越大,圆坯横端面上温度梯度越大,越有利于柱状晶生长,柱状晶区域就越宽,中心等轴晶率就越低,圆坯中心抵抗裂纹产生及扩展能力就越低。在生产过程中,有时存在设备不稳定状况,在二冷室空冷段发生管道漏水,直接淋在圆坯内弧表面,进一步促进内弧柱状晶生长,同时造成二冷冷却不均,坯壳生长不均匀。生产过程中发现的圆坯内弧表面淋水会引起圆坯内弧表面过冷现象。

3.4 对弧及矫直

铸坯内裂纹的形成是因为凝固前沿受到拉应力的作用或产生较大的拉应变。当拉应力超过凝固前沿钢的强度或拉应变超过某一临界值时,凝固前沿就会产生开裂,并沿着柱状晶扩展^[4]。连铸坯进拉矫机矫直过程中,铸坯表面与矫直辊接触部分以及坯壳靠近两相区部位为应力集中区,而且两相区坯壳高温强度低,所以更容易产生裂纹^[4]。该钢种内弧柱状晶发达,裂纹敏感性强,矫直过程中容易产生内部裂纹,因此必须严格控制凝固前沿坯壳的应力和应变。从图1低倍组织看,50CrMo钢Φ600 mm中心裂纹和矫直密切相关,因此,矫直压力和对弧精

度是两个关键参数。在生产过程中,拉矫机压力比较稳定,经自动数据采集统计,50CrMo钢Φ600 mm生产期间拉矫机压力标准差为0.02,而进拉矫机前外弧辊道有7组,每流有2-3组辊道和圆坯外弧保持分离状态,初步怀疑进拉矫机前及拉矫机辊道对弧精度较差,引起圆坯矫直应变较大,超过圆坯心部凝固前沿临界应变。

4 改进措施及效果

4.1 改进措施

4.1.1 优化结晶器电磁搅拌

电磁搅拌技术的广泛应用,为连铸坯内部质量的提高提供了有力的保障^[1,5-6]。结晶器电磁搅拌是通过放置在结晶器周围的电磁搅拌器产生非接触式的电磁力来控制结晶器中钢液的流动,提高连铸坯质量的一种技术,其主要作用有:①加强高温钢水和出生坯壳的换热,促进钢水过热耗散,降低结晶器中钢水过热度,提高等轴晶率;②通过钢水的流动打碎凝固前沿的枝晶,抑制柱状晶生长,尤其是内弧柱状晶,增加等轴晶形核的核心数量,扩大中心等轴晶区^[7]。铸坯的等轴晶率随着结晶器电磁搅拌电流的增大而增加,但当结晶器电磁搅拌电流增加到一定程度后,铸坯的等轴晶率增加逐渐趋缓^[8]。合适的结晶器电磁搅拌参数和连铸坯规格、钢水过热度、浸入式水口结构等密切相关,在取得综合冶金效果最大化的同时,不能带来液面波动过大、卷渣等负面影响。根据该钢种连铸圆坯规格、水口状况等,将结晶器电磁搅拌电流由260 A提高到400 A,频率保持1.0 Hz不变。

4.1.2 控制钢水过热度

加强管理和培训,提高精炼炉吊包钢水温度稳定性,中间包采用覆盖剂和碳化稻壳双重保温,减少连铸浇注过程中的温降。中间包钢水过热度由以前通常 $30\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$,稳定降到 $15\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$,不超过 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时采取恒拉速浇注,减少液位波动。

4.1.3 优化拉速

拉速决定了钢水在结晶器和二冷区停留冷却时间的长短,即决定了钢水过热耗散的效果,同时也是连铸坯液芯长度影响最大的一个因素。50CrMo钢Φ600 mm原工艺拉速为 0.34 m/min ,试验工艺拉速定为 0.28 m/min ,改善了钢水过热耗散,缩短圆坯液芯长度。

4.1.4 提高对弧精度,减轻矫直应力

该铸机有9组拉矫机,第2-7组带矫直功能。

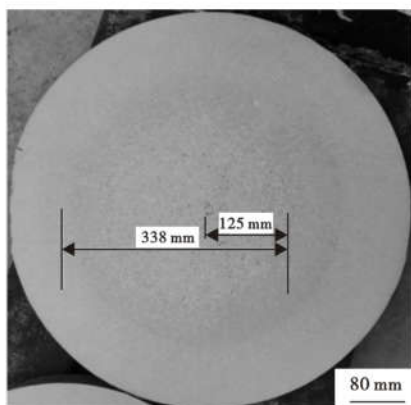


图 3 改进后 50CrMo 钢 $\Phi 600$ mm 连铸圆坯低倍形貌
 Fig. 3 Morphology of macrostructure of 50CrMo $\Phi 600$ mm continuous casting round bloom after improvement

使用对弧弧板从结晶器开始依次向下对弧,拉矫机使用专用弧板对弧。经过对弧,将原辊道和弧板偏差 0.40 ~ 1.00 mm 降到 0.20 mm 以下。

4.1.5 优化二次冷却和加强检查,避免跑冒滴漏

为减轻二冷水量对柱状晶生长的影响,适当降低二冷水量,将 50CrMo 钢 $\Phi 600$ mm 比水量由 0.105 L/kg 调整为 0.085 L/kg。同时对二冷室及进拉矫机前所有管道和喷淋系统进行整改,杜绝管道漏水喷淋在圆坯表面,保证圆坯均匀冷却。整改结束后,二冷冷却均匀性明显提高,连铸圆坯表面温度均匀,无明显黑色痕迹。

4.2 改进效果

通过以上改进措施,50CrMo 钢 $\Phi 600$ mm 连铸圆坯再次生产后内弧中心裂纹完全消除(图 3),内弧柱状晶末端距凝固中心长度由以前的 50 mm 提高到 125 mm,中心等轴晶率由以前的 17.3% 提高到 31.7%。

5 结论

(1) 50CrMo 钢 $\Phi 600$ mm 连铸圆坯内弧柱状晶发达,裂纹敏感性强,在过热度和拉速偏高,带液芯矫直时易引起中心开裂,并沿着柱状晶扩展延伸,严重时导致圆坯报废。

(2) 50CrMo 钢 $\Phi 600$ mm 连铸圆坯柱状晶发达和钢种 C 含量、结晶器电磁搅拌参数、钢水过热度、拉速等密切相关。

(3) 通过采取将结晶电磁搅拌电流由 260 A 提高到 400 A,中间包钢水过热度由 30 ~ 45 $^{\circ}\text{C}$ 降至 15 ~ 30 $^{\circ}\text{C}$,拉速由 0.34 m/min 降至 0.28 m/min,对弧偏差由 0.40 ~ 1.00 mm 降至 0.20 mm 以下,比水量由 0.105 L/kg 调整为 0.085 L/kg,消除管道漏水淋水等措施后,50CrMo 钢 $\Phi 600$ mm 连铸圆坯中心裂纹得到完全消除。

参考文献

[1] 蔡开科. 连铸坯质量控制[M]北京:冶金工业出版社,2010.
 [2] 王璞,铁占鹏,肖红,等. 连铸控流模式对大方坯及棒材组织结构与宏观偏析影响[J]. 工程科学学报,2021,43(8):1081-1089.
 [3] 马交成. 连铸坯凝固过程传热模型与热应力场模型的研究及应用[D]. 沈阳:东北大学,2009.
 [4] 徐李军,李永林,刘立文,等. 大圆坯连铸带液芯矫直过程的应力、应变有限元模拟[J]. 钢铁研究学报,2006,18(3):10-14.
 [5] 王永顺,湛智勇,董珍. 电磁搅拌对圆坯质量的影响[J]. 包钢科技,2008,34(3):4-6.
 [6] 郑淑国,朱苗勇,于海岐,等. 圆坯连铸结晶器电磁搅拌工艺参数优化试验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版),2008,29(11):1589-1592.
 [7] 蔡开科,程士富. 连续铸钢原理与工艺[M]北京:冶金工业出版社,1999.
 [8] 孙涛,岳峰,吴华杰,等. 结晶器电磁搅拌电流对 $\Phi 650$ mm 大圆坯内部质量的影响[J]. 特殊钢,2015,36(5):43-46.

欢迎订阅 2023 年《特殊钢》杂志

全国各地邮局均可订阅(可破订)

邮发代号:38-183

定价:25.00 元/期、150.00 元/年

邮编:435001

地址:湖北省黄石市黄石大道316号、大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社

电话:0714-6297386 6297313 6292935