



## φ1 200 mm 超大规格连铸圆坯端面裂纹的成因分析及工艺改进

董诗朋<sup>1</sup>, 周胜刚<sup>1,2</sup>, 李文博<sup>1</sup>, 张国东<sup>1</sup>, 尹志强<sup>1</sup>, 李宇航<sup>1</sup>

(1 承德建龙特殊钢有限公司, 承德 067200; 2 北京科技大学 冶金与生态工程学院, 北京 100083)

**摘要:**以φ1 200 mm规格优质碳素钢连铸圆坯端面裂纹的问题为研究背景,生产工艺流程为80 t BOF-LF-VD-超大规格连铸机-铸坯缓冷。采用多段式电磁搅拌、铸坯在线保温、缓冷工艺等措施,连铸工艺参数为拉速0.06~0.11 m/min,中间包过热度15~35 °C,连铸圆坯入坑温度≥500 °C,出坑温度≤350 °C。结合低倍检验、扫描电镜和原位分析等方法,进行多维度关联性分析。运用TWS软件和液芯控制模型,在电磁搅拌、过热度参数不变的前提下,优化拉速参数,由0.10 m/min降至0.07 m/min,改善铸坯心部质量,低倍检验中心裂纹由1.0~2.0级降低至0~0.5级。通过在线套保温罩的方式,提高连铸圆坯端部温度102.4 °C,缓冷坑容量由50%提高至80%以上,前两天的冷却速率降低1 °C/h以上。检验结果表明,连铸圆坯的端面裂纹长度由60~200 mm降低至0~10 mm。客户使用效果良好,得到了市场的有效验证,对同行业有很好的参考价值。

**关键词:**超大规格; 连铸圆坯; 端面裂纹; 连铸工艺

DOI:10.20057/j.1003-8620.N250561 中图分类号:TF777.1

## Cause Analysis and Process Improvement of End face Cracks in Extra-Large Continuous Casting Round Billets with a diameter of 1 200 mm

Dong Shipeng<sup>1</sup>, Zhou Shenggang<sup>1,2</sup>, Li Wenbo<sup>1</sup>, Zhang Guodong<sup>1</sup>, Yi Zhiqiang<sup>1</sup>, Li Yuhang<sup>1</sup>

(1 Chengde Jianlong Special Steel Co., Ltd., Chengde 067200, China; 2 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The problem of end face cracks in high-quality carbon steel continuous casting round billets with a diameter of 1 200 mm was investigated, with a production process of 80 t BOF-LF-VD - ultra large size continuous casting machine - slow cooling of castings. Measures such as multi-stage electromagnetic stirring, online insulation of castings, and slow cooling process were adopted. The continuous casting process parameters are as follows: casting speed of 0.06-0.11 m/min, tundish superheat of 15-35 °C, continuous casting round billet charging temperature ≥ 500 °C, and discharging temperature ≤ 350 °C. Perform multidimensional correlation analysis using methods such as low magnification testing, scanning electron microscopy, and in situ analysis. Using TWS software and liquid core control model, the pulling speed parameters were optimized from 0.10 m/min to 0.07 m/min while keeping the electromagnetic stirring and superheat parameters unchanged, thereby improving the core quality of the casting billet and reducing low-magnification inspection center cracks from 1.0-2.0 levels to 0-0.5 levels. By using an online insulation cover, the end temperature of the continuous casting round billet increased by 102.4 °C, and the slow-cooling pit capacity rose from 50% to over 80%. The cooling rate in the first two days decreased by more than 1 °C/h. Inspection results showed that the crack length on the end face of the continuous casting round billet was reduced from 60-200 mm to 0-10 mm. Customers reported satisfactory results, and the improvements were effectively verified by the market, providing valuable reference for the industry.

**Key Words:** Oversized Specifications; Continuous Casting Round Billet; End-face Cracks; Continuous Casting Process

随着工业大型化快速、高效、低成本可持续发展的需要,代表“大国重器”制造所必需高端材料的超大规格高品质连铸坯较传统的模铸相比,具有有机时产量高、成本低、成材率高的优点。超大规格连铸机的投产满足了高端市场的需求,推动相关产业

的发展<sup>[1-2]</sup>。然而对于超大规格连铸机属于是新设备、新工艺,目前国内仅有5条生产线具备1 200 mm规格以上的生产能力<sup>[3]</sup>,投产初期避免不了出现一些“新”的问题,而且超大规格连铸坯相关问题的报道较少。以φ1 200 mm超大规格优质碳素钢的连铸

作者简介:董诗朋(1980—),男,本科,高级工程师; E-mail:dongshipeng@ejianlong.com; 收稿日期:2025-10-19

通信作者:李文博(1988—),男,硕士,高级工程师; E-mail:liwenbo@ejianlong.com

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

坯端面裂纹问题为研究背景,运用多种分析方法进行关联性分析,找出问题产生的真正原因,并制定针对性的措施,最终此类问题得到有效解决。

$\phi 1\ 200\ \text{mm}$  超大规格优质碳素钢连铸圆坯经过缓冷后,在火切端面存在明显的裂纹缺陷,裂纹的位置及尺寸特征,位于端面的中间部位,且在铸坯几何中心偏铸坯上表面侧 40~140 mm 的位置,裂纹方向为平行于铸坯上、下表面的横向裂纹,裂纹长度 60~200 mm,宽度 1~3 mm。裂纹位置及宏观形貌如图 1 所示。

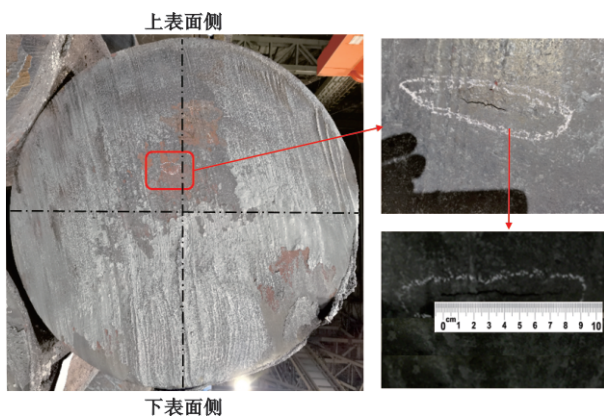


图 1 裂纹位置及宏观形貌

Fig. 1 Crack location and macroscopic morphology

## 1 试验材料及方法

工艺流程为 80 t 氧气顶底复吹转炉→80 t LF 精炼炉→80 t VD 真空脱气炉→ $\phi 700\sim 1300\ \text{mm}$  规格三机三流连铸机→铸坯缓冷。

钢种为以 GB/T699—2015 优质碳素结构钢中牌号 30 钢-50 钢为例,主要化学成分见表 1, $\phi 1200\ \text{mm}$  规格连铸机相关参数见表 2。

表 1 试验钢主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical component of experimental steel

%						
C	Si	Mn	P	S	Cr	Al
0.27~0.55	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.020	≤0.010	≤0.25	0.010~0.020

$\phi 1200\ \text{mm}$  规格优质碳素结构钢的工艺参数,中间包过热度 13~35 °C,拉速 0.10 m/min,电磁搅拌 300 A/2.0 Hz,二冷比水量 0.15 L/Kg,连铸圆坯的缓冷工艺,入坑温度≥500 °C,出坑温度≤350 °C。

连铸圆坯低倍组织要求:中心疏松≤2.0 级,中心缩孔≤2.0,中心裂纹≤1.0 级,中间裂纹≤1.0 级,皮下

裂纹≤1.0 级。

表 2 试验钢连铸机相关参数

Table 2 Parameters of continuous caster of experimental steel

项目	参数
流数/条	3
流间距/mm	3 500
弧形半径/m	18
断面尺寸/mm	$\phi 700\sim\phi 1\ 300$
结晶器搅拌形式	内置式
铸流搅拌位置/m	7.5
末端搅拌位置/m	18
液面检测	涡流式(Vuhz)
铸坯加热装置	6 个加热器,位于拉矫机之间
切割系统	带喷粉装置的氧气切割
标识系统	机器人喷号系统
定尺切割长度/m	2.5~10.0
保温罩型号/mm	直径 $\phi 700\sim\phi 1\ 300$ ,长度 200
缓冷方式	缓冷坑,入坑缓冷

## 1.1 试验方法

### 1.1.1 连铸圆坯低倍分析

低倍样制取方法:将存在裂纹的铸坯端面进行锯切制样,厚度 2~3 cm。根据 GB/T 266—2015,钢的低倍组织及缺陷酸蚀检验法,低倍经酸洗后可以看见,裂纹位置与宏观端面裂纹位置一致。低倍形貌如图 2 所示。10 块低倍检验见表 3,评级为中间裂纹 1.0~2.0 级。连铸圆坯低倍的中心裂纹缺陷<sup>[4]</sup>主要原因为上表面侧较下表面侧的疏松区域大,且疏松点较明显。

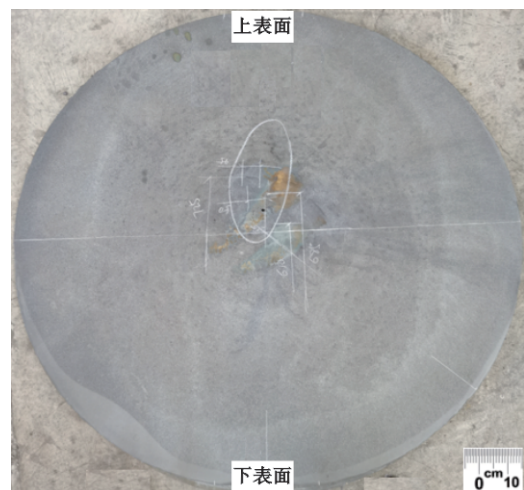


图 2 酸洗后低倍形貌

Fig. 2 Low-magnification morphology after pickling

表3 45钢  $\phi 1200$  mm 圆坯低倍检验明细Table 3 Macroscopic examination inspection details of 45 Steel  $\phi 1200$  mm Round Billet

炉次号	中间裂纹/级
32B07566	1.0
32B07604	1.0
31B07782	1.5
31B07789	1.5
31B07796	1.0
32B07893	1.5
31B07821	1.0
31B07827	1.5
31B09575	2.0
31B09581	1.5

### 1.1.2 连铸圆坯脱碳层分析

制样方法,垂直于连铸圆坯端面锯切,在锯切面明显看出裂纹存在延伸,经测量裂纹前沿向内延伸约20 mm,如图3所示。

对裂纹处采用扫描电镜进行分析,根据GB/T224—2019标准,钢的脱碳层深度测定法,裂纹两侧基体均无脱碳层,如图4所示,根据钢的脱碳层形成特点分析<sup>[5-7]</sup>,推断裂纹发生在温度低于750 °C,结合不同位置连铸圆坯表面平均温度分布情况见表4,裂纹形成于铸坯切割后或缓冷坑过程中。

### 1.1.3 连铸圆坯端面组织分析

试验样品制备:在铸坯端面锯切厚度为20 mm

的样品,并沿轴线锯切成4块,在其中1块端面的不同位置如图5所示(1#~5#样间隔10 mm,6#~8#样间隔15 mm,9#~11#样分别距水平线100、200、300 mm),制取11个20 mm×20 mm的小样块。

通过金相组织检验结果可以看出,同一端面不同位置的组织有明显差异。靠近铸坯端面心部的位置为珠光体+铁素体,远离铸坯端面心部至皮下位置均出现魏氏组织。

采用金相显微镜进行组织分析,根据GB/T13299—2022组织评定,分析结果见表5。

为分析连铸圆坯端面过热魏氏组织<sup>[9-11]</sup>产生的原因,采用设备FOTRIC热成像仪。对火焰切割后的铸坯端面温度进行测量,可以明显看出, $\phi 1200$  mm超大规格连铸坯在火焰切割后端面由中心向边缘温度逐渐降低,且最大温度差 $\geq 100$  °C,同时切割后端面最高温度可达到950 °C以上。如图6所示。

通过对同一端面上组织及温度的分布情况,分析得出,同一端面不同位置上的温度差异明显,存在较大的温度梯度差,当中心高温区域在奥氏体化时间相对较长,晶粒粗大,边缘冷却较快,形成魏氏组织。

### 1.1.4 原位分析

为判断裂纹的产生是否与低熔点物质偏析有关,采用端面成分分析的方法检验整体成分的偏析

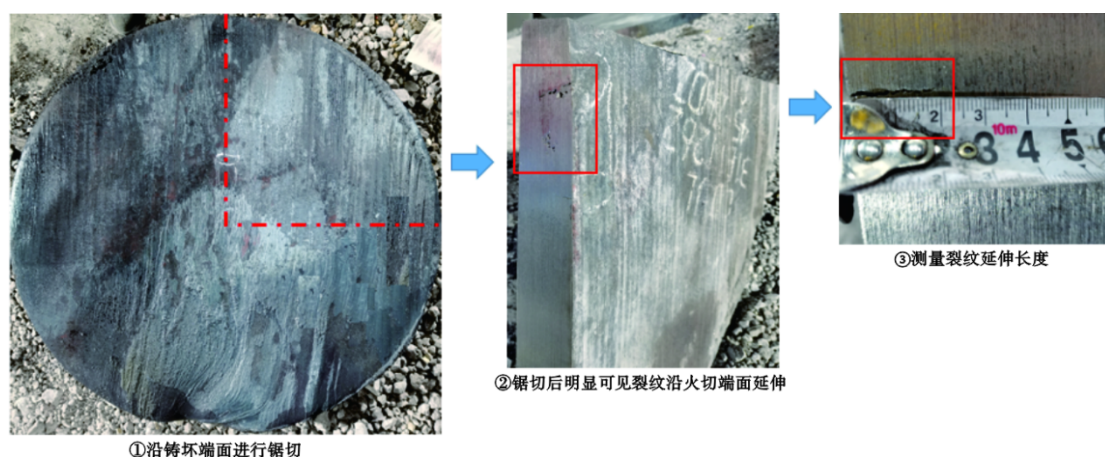
图3 45钢  $\phi 1200$  mm 圆坯端面裂纹制样示意图Fig. 3 Schematic diagram of end crack sample preparation of 45 Steel  $\phi 1200$  mm Round Billet

表4 不同位置铸坯表面的平均温度分布

Table 4 Average temperature distribution on the surface of cast billets at different positions

°C

搅拌位置		拉矫机										切割
铸流	末端	一架	二架	三架	四架	五架	六架	七架	八架	九架	十架	
1 286	1 151	1 109	1 084	1 059	1 034	1 009	982	955	929	898	874	739

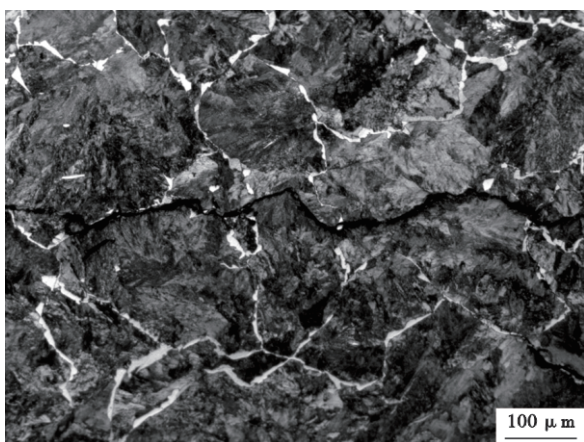


图4 45钢φ1 200 mm圆坯裂纹处金相组织

Fig. 4 Metallographic structure at cracks of 45 Steel φ1 200 mm Round Billet

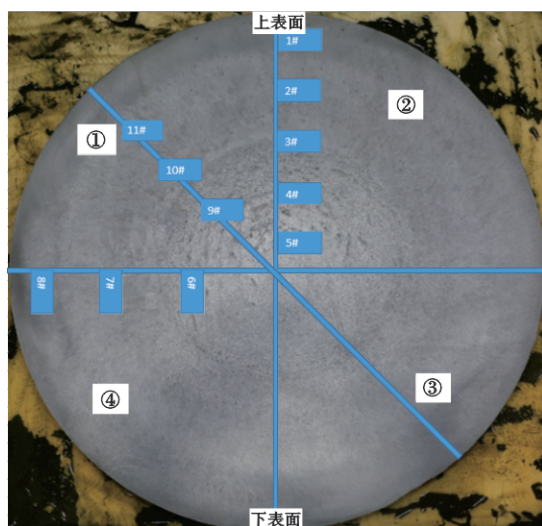


图5 45钢φ1 200 mm圆坯不同位置的金相组织分布示意图  
Fig. 5 Schematic diagram of the distribution of metallographic structures at different locations of 45 Steel φ1 200 mm Round Billet

情况。分析设备采用原位分析仪,型号OPA-300。试验样品制备:在紧邻裂纹处的心部位置取样,样品长400 mm、宽200 mm,进行原位分析,结果如下。样品扫描分析,水平扫描沿图中X方向,竖直扫描沿图中Y方向。

图7(a)、(b)、(c)、(d)分别是C、Mn、P、S元素的含量分布图。包括元素含量二维分布图及含量统计分布图。其中,二维分布图X、Y轴均表示位置坐标,以“色标”的方式表示含量高低,色标从下到上所代表的颜色表示含量依次增加。含量统计分布图中X轴表示元素含量大小,Y轴表示元素在相应

表5 45钢φ1 200 mm圆坯不同位置的金相组织分析结果  
Table 5 Metallographic structure analysis results at different locations of 45 Steel φ1 200 mm Round Billet

位置	分析结果
1#	魏氏组织
2#	魏氏组织
3#	魏氏组织
4#	铁素铁+珠光体
5#	铁素铁+珠光体
6#	魏氏组织
7#	魏氏组织
8#	魏氏组织
9#	铁素铁+珠光体
10#	轻微魏氏组织
11#	魏氏组织

含量下的统计频度。成分偏析统计结果见表6。

通过原位分析结果来看,C、Mn、P、S各元素存在一定偏差,但偏差量不大。故成分不是影响产生裂纹的主要因素。

通过对低倍质量、金相组织及成分偏析等相关性分析,得出φ1 200 mm规格超大规格优质碳素钢的连铸圆坯端面裂纹产生原因为:1)超大规格连铸圆坯经火焰切割后,在同一端面由中心至表面温度逐渐降低,且温度差异较大,在100℃以上,同时端面的最高温度≥950℃,晶粒粗大,在冷却过程中温降速率过快,局部有魏氏组织形成,且产生较大组织应力。2)在原搅拌、冷却强度及拉速工艺参数下,低倍的疏松区域较大,且上表面侧的疏松点明显,在冷却过程中产生较大应力在薄弱的疏松区域开裂得到释放,导致在端面的上表面侧产生裂纹。

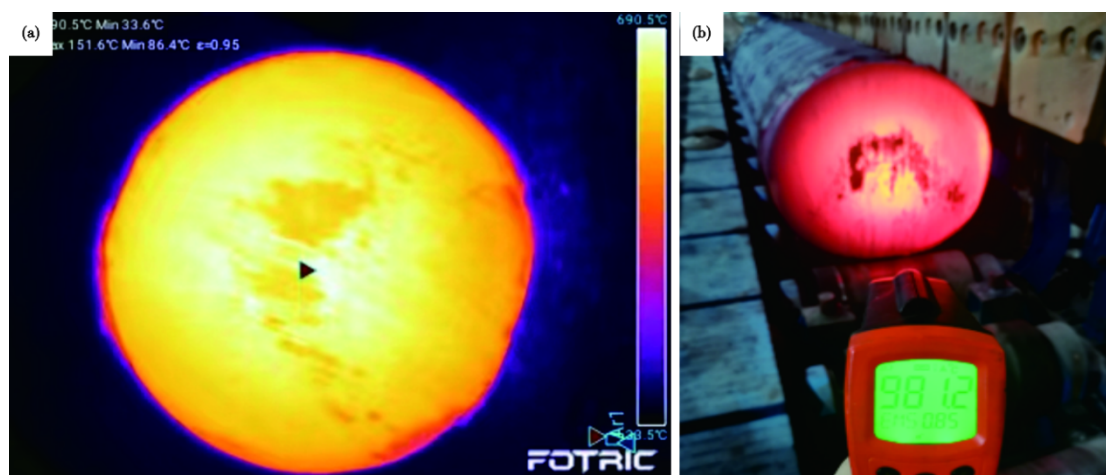
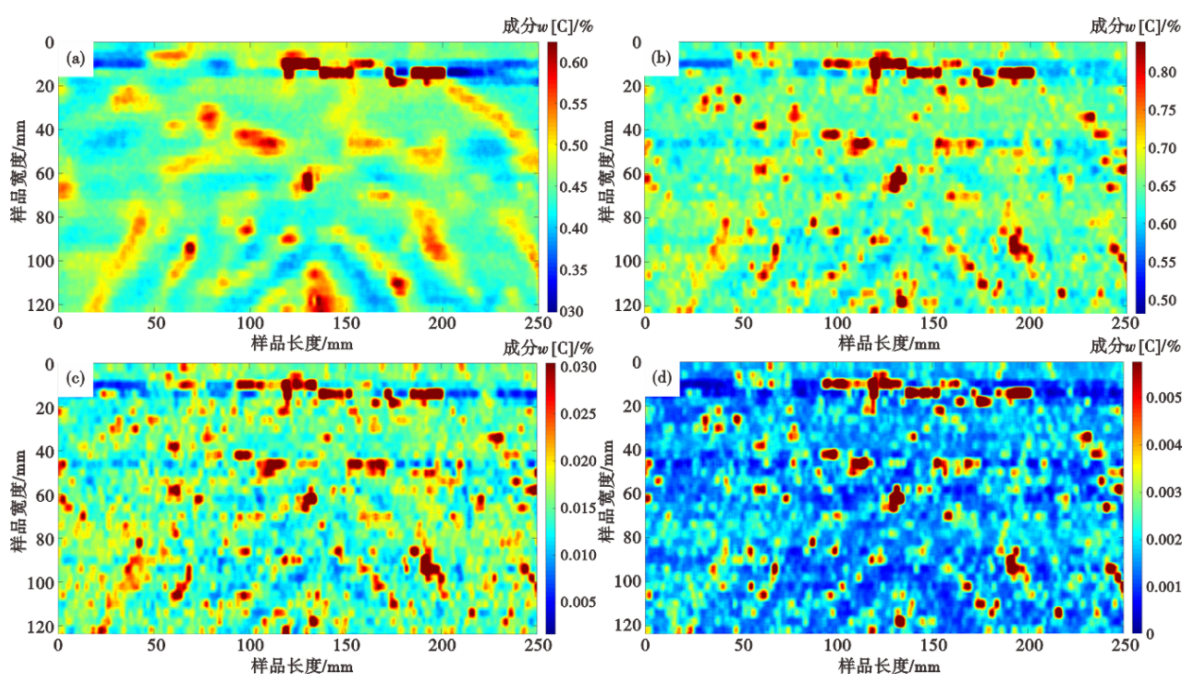
## 2 试验结果与讨论

针对上述分析出裂纹产生的原因,从减缓连铸圆坯火切后至入缓冷坑缓冷整个过程的冷却速率,减小冷却过程中组织应力的产生和改善铸坯心部质量等方面开展工作进行攻关。

### 2.1 降低连铸圆坯温降速率

#### 2.1.1 降低火切过程连铸圆坯温降措施

由于超大规格连铸圆坯的拉速低,两支铸坯切割完的间隔时间30~50 min,在此期间铸坯完全处于空冷状态,铸坯端面芯部相对表面的温度高且冷缓慢。采用一种特殊的端部保温罩方式,如图8所示。铸坯切割后在线及时将端面套上保温罩进行保温,较空冷相比降低明显降低了冷却速率。在出坯辊道末端对端面芯部进行测温,对比两种方式的温度

图6 45钢 $\phi 1200$  mm圆坯铸坯(a)端面温度分布和(b)端面温度测量Fig. 6 Temperature distribution on the end face (a) and end face temperature measurement (b) of 45 Steel  $\phi 1200$  mm Round Billet图7 45钢 $\phi 1200$  mm圆坯铸坯原位分析结果(a)C元素偏析、(b)Mn元素偏析、(c)P元素偏析和(d)S元素偏析Fig. 7 In-situ analysis results of 45 steel  $\phi 1200$  mm round billet castings: (a) C element segregation, (b) Mn element segregation, (c) P element segregation, and (d) S element segregation表6 45钢 $\phi 1200$  mm圆坯成分偏析统计表Table 6 Statistical table of component segregation of 45 Steel  $\phi 1200$  mm Round Billet

元素	平均含量(质量分数)/%	95%置信区间下限/%	95%置信区间上限/%	最大负偏析度	最大正偏析度	标准偏差
C	0.460	0.423 7	0.509 6	-0.079	0.108	0.021 9
Mn	0.660	0.618 9	0.745 2	-0.062	0.129	0.031 1
P	0.016	0.011 9	0.025 0	-0.259	0.564	0.003 2
S	0.002	0.001 0	0.004 6	-0.503	1.298	0.000 9

差异见表7,效果明显,相同时间内加套保温罩的铸坯端部温度较未套保温罩的铸坯端部温度高 $102.4^{\circ}\text{C}$ 。

### 2.1.2 降低缓冷过程连铸圆坯温降措施

对同一缓冷坑不同坑容量的温降速率进行对比,坑容量定义为(实际装入支数/理论装入支数) $\times$



图8 45钢φ1 200 mm圆坯铸坯端部保温罩

Fig. 8 Insulation cover at the end of 45 Steel φ1 200 mm Round Billet

表7 45钢φ1 200 mm圆坯加套与不套保温罩测温数据对比

Table 7 Comparison of temperature measurement data with and without insulation covers of 45 Steel φ1 200 mm Round Billet

未套端部保温罩		加套端部保温罩		差异
测量温度	平均温度	测量温度	平均温度	
680.7		756.3		
651.7		776.5		
651.3	666.78	781.4	769.18	102.4
672.8		777.4		
677.4		754.3		

100%，方式一为坑容量约80%，方式二为坑容量约50%，采用连续测温方式对每天的铸坯温度进行测量并根据记录，形成温降速率曲线，如图9所示。方式一的整体温降速率均低于方式二，尤其是铸坯入坑的前两天，更为明显，第1天缓冷速率差异1.9℃/h，第2天缓冷温降速率差异1.14℃/h，因此，得出提高坑容量有助于降低缓冷过程的温降速率。在生产φ1 200 mm超大规格碳素钢时，采用提高坑容量的方法，减缓铸坯缓冷过程的冷却速率，相对缓慢的冷却有利于组织的均匀转变。

通过火切过程连铸圆坯温降和缓冷过程温降措施的执行，改善了超大规格连铸坯表面和心部的冷却速率的差异，连续缓慢、均匀冷却，有助于减少因组织差异造成较大组织应力的产生。

## 2.2 改善连铸圆坯心部质量措施

超大规格连铸机采用Danieli公司开发的TWS (Technological Workstation 技术工作站)软件和液芯控制模型LPC (Liquid Pool Control)，结合不同学者

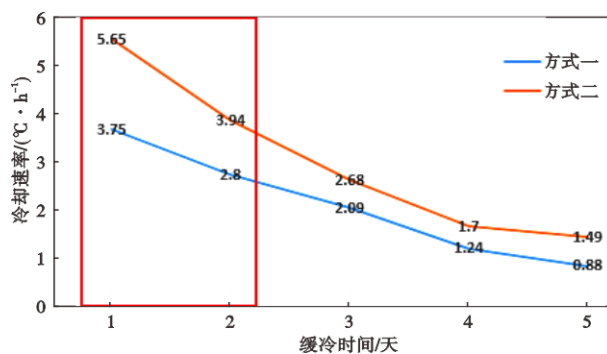


图9 不同缓冷方式的温降速率对比

Fig. 9 Comparison of temperature drop rates of different slow cooling methods

对连铸参数对连铸坯凝固组织影响及模拟<sup>[11-15]</sup>，对连铸圆坯的坯壳厚度、冶金长度及温度分布情况进行实时分析。在电磁搅拌和冷却强度参数不变的情况下，摸索不同拉速的铸坯凝固液芯长度及坯壳厚度，得到最优的低倍质量。

不同拉速下对应铸坯的坯壳厚度及液芯长度见表8。拉速0.10 m/min，铸坯在铸流搅拌-高位位置的坯壳厚度约140 mm，在末端搅拌-低位位置坯壳厚度约340 mm。拉速每降低0.01 m/min，铸坯到铸流搅拌位置的坯壳厚度增加5%~10%，铸坯到末端电磁搅拌位置的坯壳厚度增加7%~12%。凝固液芯长度约21 546 mm，拉速每降低0.01 m/min，凝固液芯长度减小1%~2%。

在每个拉速(0.06、0.07、0.08、0.09、0.10 m/min)下，分别取10块低倍进行中心裂纹等级对比，并绘制成不同拉速的低倍中心裂纹等级分布图，如图10所示。

可以看出，拉速由0.10 m/min降至0.06 m/min，低倍中心裂纹明显改善，由1.0~2.0级降至0~0.5级，且0.07 m/min为最优拉速，低倍中心裂纹等级0~0.5级，同时0级数量更多。

综合上述措施的执行，φ1 200 mm超大规格优质碳素钢的端面裂纹问题，通过降低铸坯温降速率和降低拉速的方法，裂纹长度得到明显改善，由60~200 mm降低到0~10 mm。

## 3 结论

通过低倍检验、扫描电镜、原位分析等方法进行多维度的相关性分析，φ1 200 mm超大规格优质碳素钢连铸圆坯端面裂纹产生原因是基于超大规格连铸圆坯心部温度高且端部温度差异大的特点，在缓冷过程中冷却速度过快而产生的较大组织应

表 8 45 钢  $\phi 1\ 200\ \text{mm}$  圆坯不同拉速对应的坯壳厚度  
Table 8 Billet shell thickness corresponding to different drawing speeds of 45 Steel  $\phi 1\ 200\ \text{mm}$  Round Billet

序号	拉速/( $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ )	坯壳厚度/mm						液芯长度/mm
		足辊段	活动段	铸流搅拌-高位	铸流搅拌-低位	末端搅拌-高位	末端搅拌-低位	
1	0.06	69	108	199	260	455	525	12 895
2	0.07	64	99	179	234	403	460	15 058
3	0.08	60	92	163	214	362	409	17 221
4	0.09	55	85	150	197	330	370	19 384
5	0.10	52	79	140	182	304	340	21 546

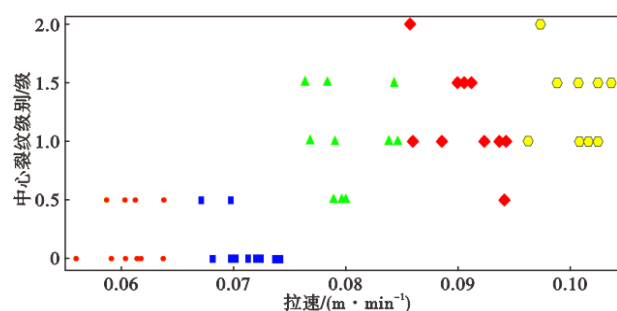


图 10 不同拉速的低倍中心裂纹等级分布

Fig. 10 Distribution of low-magnification central crack levels at different drawing speeds

力,在铸坯心部薄弱的疏松区域开裂得到释放,形成端面裂纹。

1) 铸坯端面通过在线罩保温罩的方法,减缓温

降,在相同时间连铸圆坯端面温度提高  $102.4\ ^\circ\text{C}$ 。

2) 通过提高坑容量的方法,降低铸坯缓冷过程冷却速率,试验坑容量由 50% 提高至 80%,温降速率明显降低,尤其是铸坯入坑的前两天,第 1 天缓冷速率差异  $1.9\ ^\circ\text{C}/\text{h}$ ,第 2 天缓冷温降速率差异  $1.14\ ^\circ\text{C}/\text{h}$ ,有助于得到均匀组织,减少组织应力的产生。

3) 在电磁搅拌和冷却强度参数不变的情况下,拉速由  $0.10\ \text{m}/\text{min}$  降至  $0.07\ \text{m}/\text{min}$ ,改善了连铸坯心部质量,低倍质量得到明显改善,中心裂纹由 1.0 ~ 2.0 级降低至 0 ~ 0.5 级。

$\phi 1\ 200\ \text{mm}$  超大规格优质碳素钢的端面裂纹,通过降低铸坯温降速率和降低拉速的方法,得到明显改善,裂纹长度由  $60\sim 200\ \text{mm}$  降低到  $0\sim 10\ \text{mm}$ ,同时客户使用效果良好,得到了市场的有效验证。

#### 参考文献

- [1] 甄妮. 风电产业新格局: 基地规模化、风机大型化支撑行业高质量发展[J]. 能源, 2022(7): 25-28.
- [2] 刘万平, 果岩. 双碳目标下风电设备及技术发展趋势[J]. 电器工业, 2023(6): 1-7.
- [3] 吴红健. 特殊钢连铸大圆坯凝固末端螺旋电磁搅拌技术应用基础研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2023.
- [4] 毛斌斌, 范敏杰, 曹艳锋, 等. 连铸坯低倍组织缺陷形成原因与控制措施分析[J]. 江苏科技信息, 2018, 35(8): 36-38.
- [5] 肖金福, 刘雅政, 张朝磊, 等. 弹簧钢 55SiCrA 脱碳规律的研究[J]. 金属热处理, 2010, 35(12): 94-98.
- [6] 安金敏, 张永奇, 雷三祥, 等. 胀断连杆用中碳微合金非调质钢的表面脱碳规律[J]. 金属热处理, 2025, 50(3): 227-231.
- [7] 许成, 杨玉, 王润琦, 等. 空气气氛条件下加热温度对 45 钢脱碳层深度的影响[J]. 金属热处理, 2024, 49(4): 219-222.
- [8] 胡进. 45 钢魏氏组织高温实时形成研究及工艺控制[J]. 特钢技术, 2012, 18(4): 29-32.
- [9] 张磊, 赵勇桃, 霍文霞. 冷却速率对 45Mn2 钢魏氏组织的影响[J]. 热加工工艺, 2017, 46(12): 228-231.
- [10] 武淑艳, 吴明忠, 何欣, 等. 热处理工艺对 45 钢魏氏组织形成的影响[J]. 热加工工艺, 2025, 54(6): 138-141.
- [11] 蔡开科. 连铸坯质量控制[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.
- [12] 张志祥, 闵义, 姜茂发. 37Mn5 连铸圆坯凝固过程数学模拟[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2010, 31(7): 966-969.
- [13] 孙涛, 岳峰, 郭春, 等. 连铸工艺参数对大圆坯凝固组织影响的数学模拟[J]. 炼钢, 2015, 31(6): 23-28.
- [14] Zhang L W, Jing L M, Wang Z L, et al. Simulation analysis on the round billet macrostructure of special steel vertical caster[J]. Tehnicki Vjesnik-technical Gazette, 2017, 24(6): 1821-1824.
- [15] 任春节, 冷永磊, 尹修刚, 等.  $\phi 800\ \text{mm}$  大断面连铸圆坯凝固传热和凝固组织模拟[J]. 连铸, 2024, 49(6): 21-30.