

# 含铌钢 HRB400Nb 180 mm × 180 mm 铸坯角部裂纹分析及改进工艺

王东兴 杨伟勇 汪春梅 陶群南 黄雁 左小坦

(芜湖新兴铸管有限责任公司钢铁研究院, 芜湖 241000)

**摘要** 通过对含铌钢 HRB400Nb 180 mm × 180 mm 连铸坯产生的角部裂纹进行研究分析, 结果表明, 由于连铸冷却工艺、钢水氮含量和结晶器保护渣工艺控制不当易导致含铌钢铸坯角部沿晶开裂。通过工艺改进钢液氮含量由原(67~98) × 10<sup>-6</sup> 降至(40~55) × 10<sup>-6</sup>, 结晶器角部圆弧半径由 8 mm 调整为 12 mm, 结晶器冷却水量由 150 m<sup>3</sup>/h 降至 120 m<sup>3</sup>/h, 二冷比水量由 1.35 L/kg 降至 1.1 L/kg, 二冷分配比由 26:48:17:9 调整为 36:34:19:11, 保护渣碱度由 0.65 调整为 0.82、粘度由 1.3 pa·s 调整为 0.69 pa·s、熔点由 1 260 °C 调整为 1 150 °C 等, 有效解决了铸坯表面角部裂纹缺陷, 保证了轧材的产品质量。

**关键词** 含铌钢 结晶器 氮含量 连铸坯 角部裂纹

## Analysis on Corner Crack of Nb-Bearing Steel HRB400Nb 180 mm × 180 mm Casting Billet and Process Improvement

Wang Dongxing, Yang Weiyong, Wang Chunmei, Tao Qunnan, Huang Yan and Zuo Xiaotan  
(Research Institute of Iron and Steel, Wuhu Xinxing Ductile Pipes Co., Ltd., Wuhu 241000)

**Abstract** The Corner crack of Nb bearing steel HRB400Nb 180 mm × 180 mm billet has been studied and analyzed. The results show that improper control of continuous casting cooling process, nitrogen content in molten steel and mold flux can easily lead to corner cracking of Nb bearing billet along grain boundary. With process improvement measures including decreasing the nitrogen content in liquid from original (67~98) × 10<sup>-6</sup> to (40~55) × 10<sup>-6</sup>, adjusting the arc radius at the corner of mould from 8 mm to 12 mm, decreasing the cooling water quantity of the mould from 150 m<sup>3</sup>/h to 120 m<sup>3</sup>/h, decreasing the water ratio of the secondary cooling from 1.35 L/kg to 1.1 L/kg and adjusting the partitioning ratio of secondary cooling from 26:48:17:9 to 36:34:19:11, adjusting the basicity of the mould flux from 0.65 to 0.82, the viscosity from 1.3 pa·s to 0.69 pa·s, and adjusting the melting point of shielding slag from 1 260 °C to 1 150 °C. The defects of corner cracks on the surface of billet are effectively solved and the quality of the products is guaranteed.

**Material Index** Nb Steel, Mould, N Content, Casting Billet, Corner Crack

炼钢厂 1<sup>#</sup>连铸机, 在生产 180 mm × 180 mm 断面的含铌微合金化连铸坯时, 铸坯表面靠角部及附近位置时有裂纹产生, 经过轧制变形后, 轧材时有微细条状裂纹, 因此, 严重影响了铸坯质量和轧材质量。为消除此裂纹缺陷, 对连铸坯角部裂纹的形成原因进行了分析研究, 并采取相应的控制措施后, 含铌钢铸坯表面角部裂纹得到了有效控制, 提升了轧材的产品质量。试验钢 HRB400Nb 的连铸主要技术参数及化学成分分别如表 1 和表 2 所示。

的坯料在经轧制成材后有多条直条状微细裂纹现象, 如图 1(b) 所示。

### 1.1.2 微观特征

(1) 铸坯裂纹微观特征。取铸坯角部表面裂纹的试样进行观察, 见图 2(a), 发现裂纹大多沿铸坯振痕附近无规则开裂。经腐蚀后金相显微观察(放大 50 倍), 多条裂纹沿晶界铁素体开裂, 裂纹深度 1.0~3.2 mm, 靠表面边缘的裂纹两侧大多数有

表 1 连铸主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of casting

弧型半径/ mm	浇铸断面/ (mm × mm)	拉速/ (m · min <sup>-1</sup> )	铸机流数	冷却方式	浇铸方式
900	180 × 180	1.9 ~ 2.5	10 机 10 流	全水冷却	浸入式水口保护浇铸

## 1 裂纹缺陷特征及成因分析

### 1.1 缺陷特征

#### 1.1.1 宏观特征

随机锯切含铌微合金化螺纹钢铸坯进行纵剖面的表面酸洗, 并用钢丝刷清洗铸坯表面, 发现铸坯表面的角部位置有微细裂纹, 如图 1(a) 所示。与之对应

表 2 HRB400Nb 钢的化学成分 / %

Table 2 Chemical composition of HRB400Nb steel / %

C	Si	Mn	P	S	Nb	O	N	H
0.22 ~ 0.25	0.40 ~ 0.60	1.35 ~ 1.55	≤ 0.040	≤ 0.040	0.017 ~ 0.030	≤ 0.007 0	≤ 0.010 0	≤ 0.000 4

脱碳现象,而远离铸坯角部表面的沿晶裂纹未有明显脱碳,见图 2(b),由此说明铸坯角部表面裂纹产生于结晶器内<sup>[1]</sup>,并在后续凝固过程的热应力、拉应力等各种应力作用下扩展。

(2) 轧材裂纹微观特征。取对应的轧材条状裂纹样,试样未腐蚀前测量的裂纹深度见图 3(a),其裂纹 1 为 0.381 mm、裂纹 2 深度为 0.165 mm。试样经腐蚀后如图 3(b、c)所示,显微组织为珠光体和铁素体,铁素体晶粒均匀分布,裂纹存在脱碳现象,裂纹处晶粒与正常部位晶粒一样,无晶粒粗大现象,因此,可排除此条状裂纹并非由于“过热”“过烧”而导致的组织不均匀性引起,说明裂纹脱碳组织在铸坯高温浇铸时已经产生,且是由铸坯表面的角部裂纹造成,并在后续轧制过程中裂纹缺陷遗传扩展所致,因此减少铸坯表面裸露的角部裂纹是消除轧材条状裂纹的关键。

### 1.2 形成机制探讨

Nb 为裂纹敏感元素,在连铸过程中,当振痕波谷处受力时容易引发裂纹,在振痕处冷却较弱,而铸坯传热减慢会导致坯壳温度升高,促进奥氏体晶粒的生成,整个坯壳凝固厚度并不会十分均匀,因此,连铸角部在结晶器内容易在较薄的坯壳处受力引发裂纹<sup>[2-3]</sup>。另一方面连铸坯角部裂纹发生也与钢种的低塑性温度区间密切相关,在连铸二冷区

内由于二次冷却的不均匀、冷却强度不适中导致连铸坯角部温度落入低塑性区间,降低钢的高温热塑性,当铸坯角部受到弯曲、矫直及热应力作用后产生裂纹,尤其是含 Al、Nb、V 钢铸坯表面更易产生细小的角部横裂纹<sup>[4]</sup>。

## 2 连铸坯裂纹的改进措施及效果

### 2.1 结晶器传热优化

研究表明<sup>[5]</sup>,降低结晶器冷却强度,实现弱冷,有助于改善铸坯的表面质量。为了避免铸坯角部冷却过快,减少角部或附近角部裂纹的产生,对结晶器

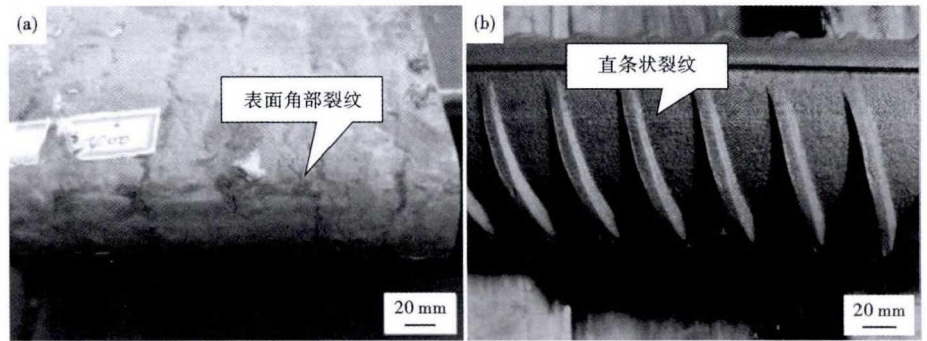


图 1 铸坯(a)及轧材(b)的宏观裂纹形貌  
Fig. 1 Macro-morphology of cracks of continuous casting billet (a) and rolled product (b)

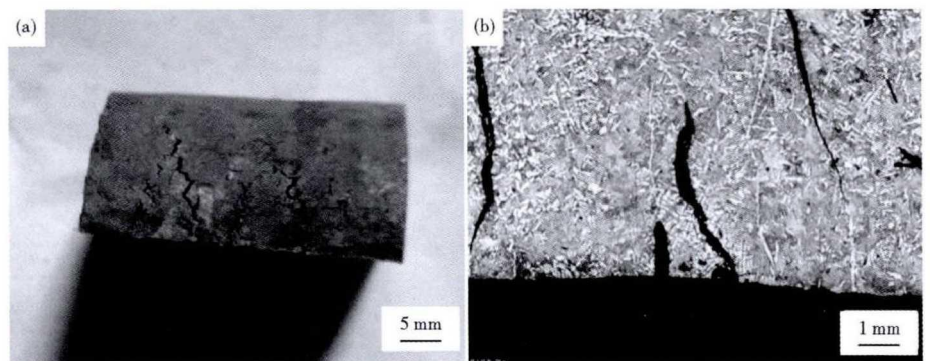


图 2 铸坯角部表面裂纹特征(a)和组织形貌(b)  
Fig. 2 Characteristics of corner transverse cracks of billet (a) and structure morphology (b)

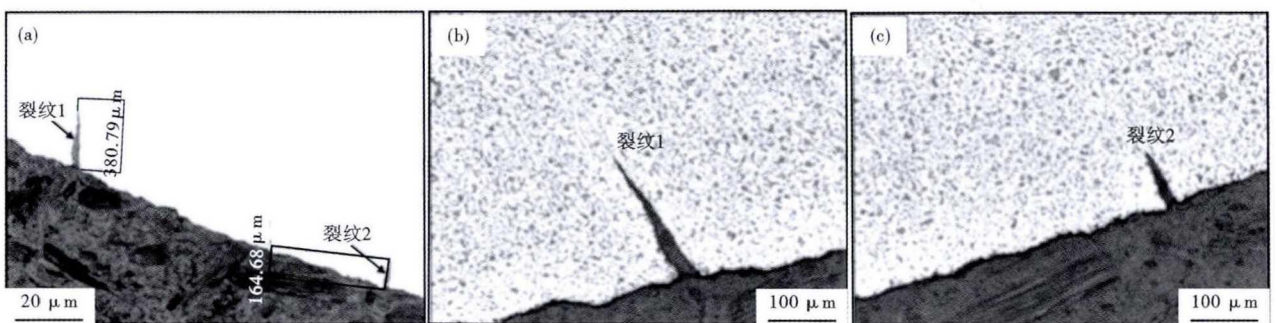


图 3 轧材裂纹:长度(a);裂纹 1(b)和裂纹 2(c)的微观形貌  
Fig. 3 Micro morphology of the cracks in rolled products: length (a); cracks 1 (b) and cracks 2 (c)

表3 工艺优化前后结晶器参数对比  
Table 3 Comparison of mold parameters before and after process optimization

工艺	拉速/ ( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ )	结晶器角部 圆弧半径/mm	结晶器出口处 角部温度/ $^{\circ}\text{C}$	结晶器壁厚/ mm	结晶器进回水 温差/ $^{\circ}\text{C}$	结晶器水量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	水流速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	初生坯壳厚度/ mm
优化前	2.2	8	856	14.5	7.3	150	11.84	15.0
优化后	2.2	12	995	14.5	6.4	120	9.47	14.3

的角部圆弧半径及冷却强度进行优化,通过适当增加方坯结晶器的角部弧形半径,适当提高铸坯角部温度,同时弱化结晶器冷却强度,在确保铸坯坯壳出结晶器安全厚度的情况下实行均匀的弱冷浇铸模式,避免角部位置冷却过快。其工艺优化前后结晶器的圆弧半径、结晶器水量、水流速、坯壳厚度等,如表3所示。

从表3可知,结晶器铜管角部圆弧半径的适当增加及结晶器水量的降低,提高了铸坯的角部温度,一定程度上减弱了角部的冷却强度;同时水量降低后水流速明显降低,但坯壳厚度仍能达到14.3 mm,确保坯壳厚度的不漏钢浇铸,同时在其他工艺条件不变,结晶器工艺参数优化后的铸坯角部裂纹明显减轻,如表4所示。

## 2.2 钢液氮含量的控制

根据文献[6-7]报道,当钢中N含量大于 $50 \times 10^{-6}$ 时,会对铸坯的角部裂纹产生极坏的影响,Al、Nb等易与N结合形成氮化物沿晶界析出,由于铸坯角部的冷却快,这种氮化物更易在弯曲段及矫直段产生表面裂纹(特别是铸坯的角部裂纹);钢成分中N质量分数水平与铸坯角部横裂纹发生存在正相关关系,必须严格加以控制<sup>[8]</sup>。通过对生产过程的裂纹样进行了分析,N含量在 $(67 \sim 98) \times 10^{-6}$ 。

因此合理控制铸坯表面的角部裂纹,要尽可能地控制钢水中的N含量在合理范围,基于此,对过程工序提出改进措施,以避免过程工序钢液中的N含量的增加。

(1)转炉工序,提高转炉终点碳及温度的一次命中率,避免钢水过氧化;出钢过程适当提高白灰及化渣剂的加入量,提前造渣,减少LF进站的化渣时间。

(2)LF精炼工序实施泡沫渣工艺,前期加入适量白灰及精炼渣,送电化渣过程,杜绝大氩气搅拌,缩短冶炼周期,减少通电时间。

(3)连铸工序,确保钢包水口碗口处增加密封垫、钢包水口、中间包浸入式水口的氩封、

表4 结晶器参数优化前后的含Nb钢铸坯质量对比

Table 4 Comparison of billet quality of Nb-bearing steel before and after mold parameters optimization

工艺	结晶器角部 圆弧半径/mm	结晶器水量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	铸坯检验 数量/块	角部裂纹/ 级	效果
优化前	8	150	10	1.5~2.0	严重
优化后	12	120	10	0.5~1.0	明显减轻

全程密封操作,避免浇铸过程吸气增N。

通过以上工序的优化,铸坯N含量得到了有效控制,角部裂纹也出现相对减轻的趋势。前后对比如表5所示。

## 2.3 结晶器保护渣优化

连铸保护渣对改善铸坯质量尤其是表面质量、保证连铸顺行有着重要的作用。为控制铸坯与结晶器之间的传热速度,适当提高保护渣碱度能均匀控制渣膜的传热速率。合理的熔化温度能使结晶器保护渣在钢液弯月面处保持充分的熔融状态,并使结晶器上部凝固壳表面的渣膜处于黏滞流动状态,起到充分润滑铸坯的作用。降低保护渣粘度,增加液渣膜厚度,能减少摩擦阻力,在高速连铸过程中,为保证良好润滑性,多采用低粘度、低熔点、低凝固温度和良好玻璃态特征的保护渣<sup>[9]</sup>。该钢种拉速相对较快,因此结合生产实际对保护渣的主要理化指标进行了调整优化,以及对应的铸坯质量如表6所示。

## 2.4 二次冷却优化

有研究表明<sup>[10]</sup>,降低含铌钢的二冷比水量,铸坯矫直区表面温度提高,表面横裂纹明显减轻。同时,文中角部裂纹形成机理中也提到的Nb元素的加入降低了钢的高温热塑性,当铸坯角部受到弯曲、矫直及热应力作用后易产生裂纹的理论,需进一步对铸坯二冷系统进行优化,优化前后的二冷参数如表7所示,通过模拟计算二冷优化前后的表面中心

表5 HRB400Nb钢工艺优化前后参数及氮含量对比  
Table 5 Comparison of parameter and nitrogen content in steel HRB400Nb before and after process optimization

工艺	转炉出钢白灰/ ( $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$ )	转炉出钢化渣剂/ ( $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$ )	LF通电时间/ ( $\text{min} \cdot \text{炉}^{-1}$ )	连铸保护 浇铸	N含量/ $10^{-6}$
优化前	2.4	0.4	35	未严格保护	67~98
优化后	4.0	1.0	20	全程密封保护	40~55

表 6 结晶器保护渣优化前后理化指标和对应铸坯裂纹级别  
Table 6 Physical-chemical indexes and crack rating of cast billet before and after optimization of mold flux

工艺	保护渣理化指标			铸坯检验 数量/块	角部裂 纹/级	效果
	碱度	粘度/ (pa·s)	熔点/ °C			
优化前	0.65	1.3	1 260	8	1.5~2.0	严重
优化后	0.82	0.69	1 150	8	1.0~1.5	相对减轻

表 7 二冷区优化前后参数对比

Table 7 Comparison of parameters before and after optimization of secondary cooling zone

工艺	二冷比水量/ (L·kg <sup>-1</sup> )	二冷分配比/%			
		1 区	2 区	3 区	4 区
优化前	1.35	26	48	17	9
优化后	1.10	36	34	19	11

及角部位置的温度,得出优化后的铸坯表面中心温度及角部温度均高于优化前,且铸坯出结晶器后的二冷区的表面及角部位置的回温现象明显减轻,一定程度上提高了二冷区及后续矫直段铸坯的高温塑

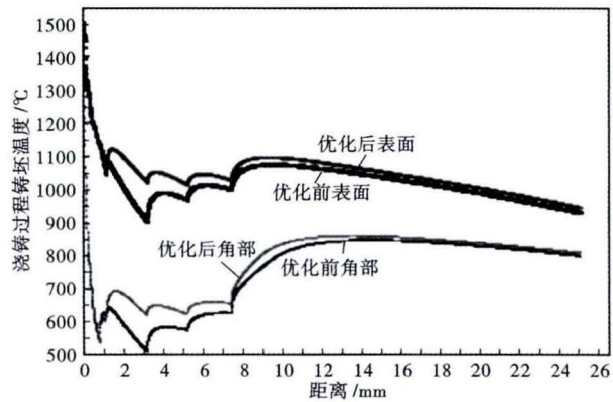


图 4 二冷区优化前后铸坯表面及角部温度模拟

Fig.4 Simulation of billet surface and corner temperature before and after secondary cooling zone optimization

性,二冷配水优化前、后铸坯表面中心及角部温度模拟情况如图 4 所示。

### 2.5 优化效果

按照优化后的工艺参数(表 8)试生产含铌铸

表 8 优化后的工艺参数

Table 8 Parameters after optimized process

氮含量控制/ 10 <sup>-6</sup>	结晶器角部圆弧 半径/mm	结晶器冷却水量/ (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	二冷比水量/ (L·kg <sup>-1</sup> )	二冷分配比	保护渣理化指标		
					碱度	粘度/(pa·s)	熔点/°C
≤55	12	120	1.1	36:34:19:11	0.82	0.69	1 150

坯,并对连浇炉次的铸坯表面进行批量酸洗检验,铸坯表面角部及附近位置无裂纹等缺陷,对应的轧材酸洗无折叠、裂纹等缺陷。

### 3 结论

(1)含铌铸坯角部裂纹主要是由于结晶器传热控制不当而形成的沿铁素体晶界开裂,并在出结晶器后受应力作用致裂纹扩展。

(2)结合钢厂实际,含铌钢铸坯的角部裂纹可通过均匀弱冷的冷却工艺、合理控制钢水 N 含量、优化

结晶器保护渣等措施可消除铸坯表面角部裂纹缺陷。

(3)该含铌钢 HRB400Nb 铸坯的最佳工艺参数为:钢液氮含量 ≤55 × 10<sup>-6</sup>,结晶器角部圆弧半径 12 mm,结晶器冷却水量 120 m<sup>3</sup>/h,二冷比水量 1.1 L/kg,二冷分配比 36:34:19:11,保护渣碱度 0.82、粘度 0.69 pa·s、熔点 1 150 °C。

(4)HRB400Nb 钢筋的表面条状裂纹缺陷是由铸坯角部裂纹缺陷引起,并在后续轧制过程中缺陷遗传所致。

### 参考文献

[1] 许庆太,魏伯,赵晓飞,等. 钢板表面纵向裂纹的金相检验和分析[J]. 理化检验(物理分册),2006,42(12):634-636.

[2] 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,1994:235-237.

[3] 职建军. 宝钢连铸板坯角部横裂缺陷的改善[J]. 钢铁,2001,36(1):22-24.

[4] 包石磊. 含 Nb 包晶钢连铸大圆坯表面横裂形成原因分析与对策[J]. 连铸,2016,41(2):71-74.

[5] 景财良,刘延强,宋佳友,等. S275JR 厚规格热轧卷表面裂纹成因分析与改进[J]. 中国冶金,2016,26(5):64-67.

[6] 李明光,刘军,李秉强. 本钢薄板坯连铸工艺技术优化[J]. 本钢技术,2009,1(1):14-17.

[7] 赵斌,崔怀周,汪成义,等. Q420C 钢 180 mm × 180 mm 连铸坯轧制角部裂纹分析和工艺改进[J]. 特殊钢,2017,38(2):48-52.

[8] 李明贤,朱国军. 氮质量分数对铸坯角部裂纹的影响及控制[J]. 中国冶金,2017,27(6):54-57.

[9] 王德永. 洁净钢与清洁辅助原料[M]. 北京:冶金工业出版社,2017:292-293.

[10] 魏励,杨海滨. 连铸含铌钢板坯表面横裂原因分析和措施[J]. 中国冶金,2008,18(12):17-21.

王东兴(1964-),男,高级工程师,1986年国防科技大学(本科)毕业,连铸工艺和夹杂物控制研究。

E-mail:w223d@163.com

杨伟勇(1985-),男,硕士研究生(燕山大学)。

E-mail:wyyang1012@126.com

收稿日期:2020-04-20