

## 低合金高强度钢板坯窄面微裂纹产生机理分析和工艺改进

曹树卫 高新军 孙 拓

(安阳钢铁股份有限公司第二炼轧厂, 安阳 455004)

**摘 要** 采用金相分析方法对低合金高强度钢( $\% : 0.16 \sim 0.18\text{C}, 0.20 \sim 0.40\text{Si}, 1.42 \sim 1.55\text{Mn}, \leq 0.025\text{P}, \leq 0.012\text{S}, 0.015 \sim 0.025\text{Nb}, 0.100 \sim 0.115\text{V}, 0.010 \text{O} \sim 0.015 \text{ON}$ )连铸板坯窄面微裂纹的产生机理进行了分析研究。结果表明:板坯窄面表层显微组织不合理如奥氏体晶粒粗大、奥氏体晶界处先共析铁素体膜的形成以及第二相质点在奥氏体晶界处的偏析等是微裂纹产生的机理。通过优化连铸板坯窄面冷却工艺,将窄面冷却水量增加 35%;细化了晶粒,抑制了铁素体膜的产生,改变了第二相质点析出,改善了铸坯表层组织,消除了铸坯窄面微裂纹缺陷。

**关键词** 低合金高强度钢 板坯 窄面微裂纹 显微组织 冷却

## Analysis on Forming Mechanism of Fine Cracks at Narrow Faces of Slab of HSLA Steel and Process Improvement

Cao Shuwei, Gao Xinjun and Sun Tuo

(The 2<sup>nd</sup> Steel Making & Rolling plant, Anyang Iron and Steel Co Ltd. Anyang 455004)

**Abstract** The mechanism of fine crack at narrow faces of slab of HSLA steel ( $\% : 0.16 \sim 0.18\text{C}, 0.20 \sim 0.40\text{Si}, 1.42 \sim 1.55\text{Mn}, \leq 0.025\text{P}, \leq 0.012\text{S}, 0.015 \sim 0.025\text{Nb}, 0.100 \sim 0.115\text{V}, 0.010 \text{O} \sim 0.015 \text{ON}$ ) was analyzed and researched by the means of metallographic analysis. The results show that the mechanism of fine crack is unreasonable microstructure of surface of slab narrow faces, such as coarse austenite grain, as well as formation of pre-eutetoid ferrite film and segregation of the second phase particle at the austenite grain boundaries. By optimization of cooling process i. e. increasing narrow face cooling water rate by 35%, the austenite grains are fine, the formation of ferrite film is suppressed and the participation of second phase particle is changed as well as the surface structure of slab is improved, the defect of fine crack at narrow faces of slab is eliminated.

**Material Index** HSLA Steel, Slab, Fine Cracks of Narrow Faces, Microstructure, Cooling

安阳钢铁公司(简称安钢)开发的低合金高强度热轧钢板主要用于煤炭机械行业,自开发成功后因其成本低、性能优,已成为煤炭机械的主流原材料。但由于连铸板坯窄面产生微裂纹,引起厚规格(厚度 $\geq 40$  mm)钢板破边缺陷,影响用户使用。

对于连铸板坯的角部横裂纹、角部纵裂纹等质量问题,大量相关研究,较为详尽地揭示了这些缺陷的产生机理、影响因素和预防措施<sup>[1-7]</sup>。但对连铸板坯的窄面微裂纹,尤其是低合金高强度钢连铸板坯的窄面微裂纹相关研究较少。耿明山等人<sup>[8]</sup>研究了中板上、下表面微裂纹缺陷,认为钢中的 Cu、As 和 Sn 等元素在  $\gamma$  晶界偏聚和选择氧化在钢基体和氧化铁层间形成含 Cu、As 和 Sn 的富集相,钢的塑性恶化是导致中板表面微裂纹的主要原因。何宇明等人<sup>[9]</sup>研究了中厚板表面微裂纹,发现主要是铜引起的裂纹。

本文重点研究了低合金高强度钢连铸板坯的窄

面微裂纹,探究其形成机理,并结合生产现场实际提出相应的解决措施。

### 1 安钢低合金高强度钢生产工艺介绍

#### 1.1 安钢高强度钢板生产流程及主要工艺要点

安钢高强度钢板的生产流程为:150 t 转炉 $\rightarrow$ LF(LF + VD) $\rightarrow$ 超宽板坯连铸机 $\rightarrow$ 炉卷轧机

对于轧制板钢厚度 $\geq 40$  mm 的钢水需经过 LF 和 VD 精炼处理,轧制板钢厚度 $< 40$  mm 的钢水,仅进行 LF 精炼。

##### 1.1.1 转炉冶炼工艺要点

冶炼渣碱度:3.0 ~ 3.4,转炉终点[C] $\geq 0.06\%$ ,出钢温度:1 600 ~ 1 640  $^{\circ}\text{C}$ ;转炉下渣量 $< 50$  mm。

##### 1.1.2 精炼工艺要点

精炼时间 $> 30$  min,采用石灰、精炼剂、萤石造白渣,确保渣碱度大于 1.2,精炼结束软搅拌时间 $> 5$  min,精炼终点钢水温度:1 570 ~ 1 600  $^{\circ}\text{C}$ 。

### 1.1.3 连铸工艺要点

中间包过热度: 20 ~ 35 °C, 拉速 1.05 ~ 1.35 m/min(根据断面大小确定)。

### 1.1.4 热连轧工艺要点

板坯加热温度: 1 250 ~ 1 290 °C, 加热时间: 120 ~ 200 min, 除鳞水压力:  $\geq 17$  MPa, 终轧温度范围: 700 ~ 750 °C。

## 1.2 安钢低合金高强度钢的强化机理及成分设计

低合金高强度钢的强化机理<sup>[10]</sup>是:在低合金钢基础上加入微合金元素,依靠控轧控冷达到钢的强度要求。在热轧过程中通过微合金元素(Nb, V)和热变形的相互作用实现细晶强化, VN 合金中的 V 与钢中 C、N 形成大量细小 V(C, N)析出相,其强化效果比采用 FeV 形成粗大 VC 明显增强。且用 VN 合金微合金化,析出数量成倍增长,颗粒尺寸和间距明显减小。终轧后加速冷却及 Nb(CN)共格析出及相伴的位错亚结构使钢进一步强化。安钢高强度钢的成分设计如表 1。

### 1.3 安钢超宽板坯连铸机介绍

表 1 低合金高强度钢的化学成分/%  
Table 1 Chemical composition of HSLA steel /%

项目	C	Si	Mn	P	S	Nb	V	N
范围	0.16 ~ 0.18	0.20 ~ 0.40	1.42 ~ 1.55	$\leq 0.025$	$\leq 0.012$	0.015 ~ 0.025	0.100 ~ 0.115	0.010 ~ 0.015
目标值	0.17	0.30	1.45			0.020	0.105	0.012

表 2 安钢超宽板坯连铸机的主要技术参数

Table 2 Main technology parameters of Jumbo-wide slab caster at Angang

项目	技术参数
机型	直弧形板坯连铸机
基本弧半径/mm	6 670
拉速范围/(m · min <sup>-1</sup> )	0.2 ~ 2
冶金长度/mm	18 687
铸坯厚度/mm	150
铸坯宽度/mm	1 600 ~ 3 250



图 1 连铸板坯破边缺陷宏观形貌

Fig. 1 Macromorphology of broken edge defect of casting slab

安钢低合金高强度钢连铸坯由该公司超宽板坯连铸机生产,该连铸机投产于 2005 年 8 月,主要设备及技术从西马克公司引进,其工艺参数见表 2。

## 2 安钢低合金高强度钢连铸板坯窄面微裂纹的发生及形貌

安钢高强度钢连铸板坯窄面微裂纹的发现源于对轧后钢板破边缺陷原因的调查。生产中发现,某些厚规格的低合金高强度钢板出现破边缺陷,比较典型的轧后钢板破边如图 1 所示。

从钢板破边缺陷处取样,进行微观分析,分析结果如图 2 所示。

由图 2(a, b)可以看出,钢板窄边缺陷处金相组织为正常的铁素体 + 珠光体,没有发现贝氏体等低温组织,裂纹内发现脱碳及氧化圆点。经 EDS 分析,发现裂纹内明显脱碳处的氧化圆点为 Si、Mn 的高温氧化物,见图 2c。以上分析说明,该缺陷在高温区形成,即在铸坯装加热炉前已存在。观察同钢种的连铸坯板坯的原始表面,没有发现异常。但从

连铸板坯窄面取样并热酸洗后,发现板坯窄边存在如图 3 所示沿振痕分布的微裂纹。

## 3 安钢低合金高强度钢连铸板坯窄面微裂纹形成机理

金相观察连铸板坯窄面微裂纹缺陷微观形貌如图 4(a)(b),由此发现:(1)窄边表层奥氏体晶粒较大,一般为 700  $\mu\text{m}$ ,个别奥氏体晶粒尺寸甚至超过 1 mm;(2)微裂纹均为沿奥氏体晶界开裂;(3)在晶界上发现有连续的膜状物存在。经扫描电镜分析,发现奥氏体晶界处存在的膜状物为厚度在 15 ~ 25  $\mu\text{m}$  之间的先共析铁素体膜见图 4(c)(d)。由于层片状铁素体膜强度只有奥氏体的 1/4 左右,在高温下阻隔了奥氏体基体的连续性,因此,裂纹易沿先共析铁素体膜形成并扩展。

有研究表明<sup>[11]</sup>:铁素体膜厚度对钢种高温热塑性影响非常大,当沿晶铁素体膜厚度大于 5  $\mu\text{m}$  时,钢种的塑性与铁素体膜厚度几乎呈现线性负相关,铁素体膜厚度值越大,钢种的塑性越差,当铁素体膜厚度超过 20  $\mu\text{m}$  时,表征钢种塑性的断面收缩率值均在 30% 以内,这非常有利于裂纹的发生。由于安钢高强度低合金钢采用 Nb-V 微合金化,一方面 Nb、V 的碳氮化物在沿奥氏体晶界析出,降低了晶界的结合力;另一方面,在较低温度时,奥氏体晶界处出

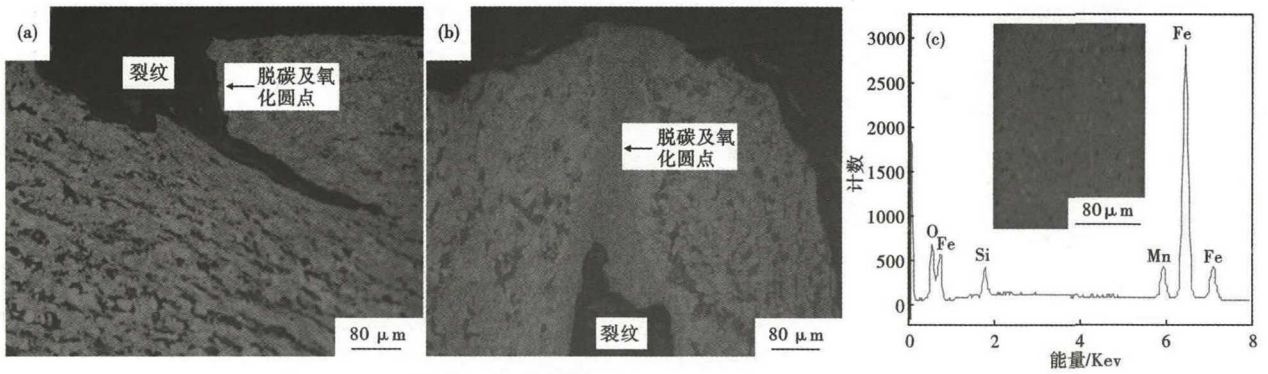


图 2 连铸板坯破边缺陷微观组织及能谱分析  
 Fig. 2 Microstructure & energy spectrum analysis of broken edge defect of casting slab

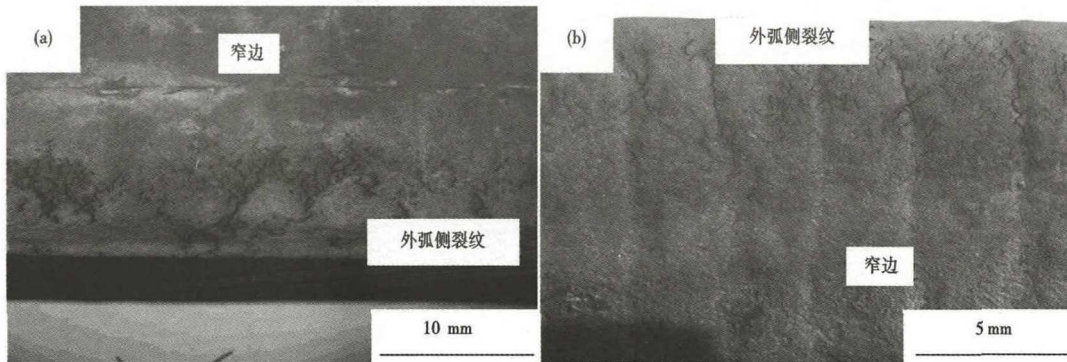


图 3 连铸板坯窄边微裂纹宏观形貌  
 Fig. 3 Macromorphology of fine crack at narrow faces of casting slab

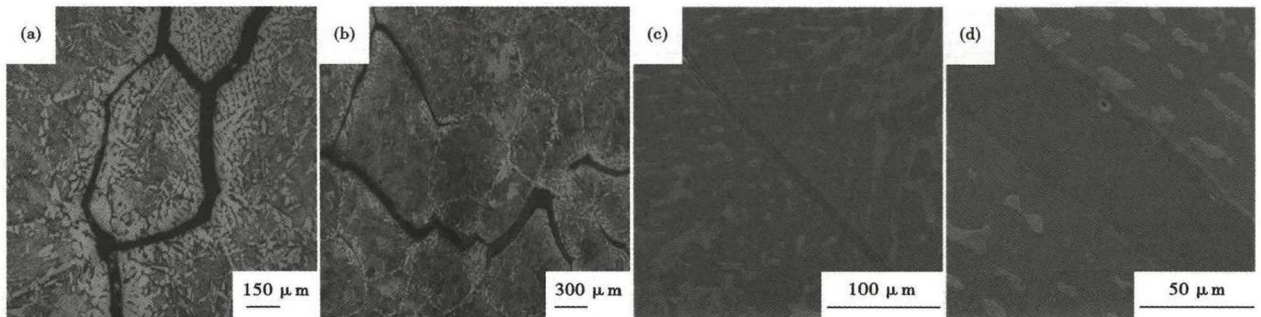


图 4 板坯窄面微裂纹处组织形貌:(a)(b)光学;(c)(d)SEM  
 Fig. 4 Morphology of structure of fine crack on narrow faces of casting slab:(a)(b) optics;(c)(d) SEM

现了厚度 15 ~ 25 μm 的先共析铁素体膜,先共析铁素体膜强度较低,当铸坯窄面受到的应力超过奥氏体晶界上铁素体膜所能承受的强度时,首先在铁素体中生成小的空洞,随着应力的继续存在,空洞聚合长大,从而产生沿晶界延伸的横向微裂纹。

安钢超宽板坯连铸机有 5 排喷嘴对着结晶器的铸坯窄面进行喷水冷却,随后窄面自然冷却,当拉速为 1.2 m/min 时,窄面冷却水的流量为 76 L/min,认为窄面冷却弱,导致窄面表层组织不合理,引起微裂纹的产生。

#### 4 减少连铸板坯窄面微裂纹措施

目前解决板坯表面裂纹有两种工艺思路:一是“热行”或“冷行”控制弯曲和矫直时板坯表面温度,以避免钢的高温脆性区间;二是通过控制板坯表层微观组织,使其形成一层抗裂纹能力较强的组织,不容易产生裂纹。日本住友的 KATO 等人<sup>[12]</sup>研究发现:对于出结晶器的铸坯采用强冷工艺使其表面温度迅速降至 1 050 ℃ 以下,然后再采用弱冷工艺使铸坯表面回温,能够改善铸坯热塑性,减少甚至消除铸坯横裂纹的发生。钢铁研究总院的徐李军等

表3 工艺优化前后的结晶器窄面冷却水量  
Table 3 Cooling water rate of narrow face of mould before and after technology optimization

拉速/( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ )	冷却水量/( $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ )	
	优化前	优化后
1.0	60	81
1.1	68	92
1.2	76	103
1.3	84	113
1.4	92	124

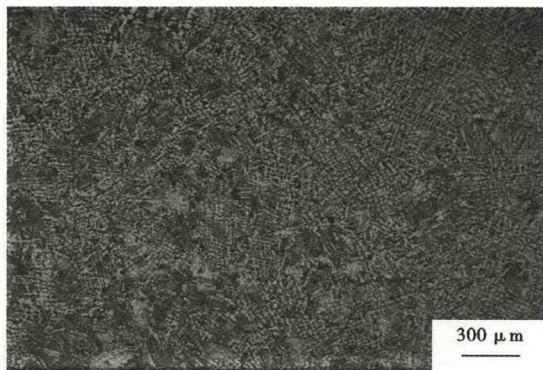


图5 增加二冷水流量35%后板坯窄面微观组织  
Fig.5 Microstructure of narrow surface of casting slab with increasing secondary water flow rate by 35%

人<sup>[13]</sup>通过试验研究发现:当出结晶器采用强冷时,铸坯表层为细小的铁素体,且铁素体沿不同方向形核和生长,没有相对较软的微观结构存在,因此裂纹很难产生和扩展。蔡开科<sup>[14]</sup>认为:强冷能细化表层铁素体,消除了晶界铁素体膜,改变了第二相质点析出。

根据以上思路,通过增加窄面冷却水流量,使得出结晶器板坯窄面强冷,在后续过程中,窄面温度因弱冷而回温,从而改善板坯窄面的表层组织。现场试验发现,当将结晶器窄面足辊冷却水流量从增加35%后,优化前后的冷却水量见表3,铸坯窄面表层得到改善,见图5,有效防止了窄面微裂纹的发生。

## 5 结论

(1)安钢高强度低合金钢连铸板坯窄面微裂纹产生原因为:由于连铸过程中结晶器窄面足辊冷却

强度不够致使铸坯窄面表层先共析铁素体膜产生以及碳氮化物沿原奥氏体晶界析出,使得铸坯高温塑性降低,而Nb、V的碳氮化物在沿奥氏体晶界析出,进一步降低了晶界的结合力;铸坯受到的应力应变超出允许值时在应力集中处产生孔洞,孔洞聚合、扩展产生微裂纹。

(2)通过增加结晶器窄面冷却水量,细化了高强度低合金钢连铸板坯窄面的表层晶粒,抑制了奥氏体晶界铁素体膜的产生,改变了第二相质点析出,改善了铸坯表面塑性,消除了微裂纹的产生。

## 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,2010,210-230.
- [2]徐李军,潘贻芳,陈青,等.硼微合金化钢连铸坯角部裂纹控制[J].炼钢.2015,31(3):22-30.
- [3]彭其春,童志博,于学森,等.含硼中碳钢铸坯角部横裂纹影响因素分析[J].炼钢.2012,28(6):44-48.
- [4]朱国森,朱志远.含铌板坯角部横裂控制[J].钢铁.2006,41(12):30-32.
- [5]朱伦才,刘启龙,王志政,等.M510L板坯角部横裂纹原因及二冷工艺优化[J].炼钢.2012,28(1):20-24.
- [6]董长征,王金平.CSP连铸薄板坯边裂成因与控制[J].炼钢.2011,27(4):25-28.
- [7]刘启龙.J55套管钢铸坯角部横裂成因与防止措施[J].连铸.2008(6):42-44.
- [8]耿明山,何矿年,张炯明,等.中板表面微裂纹缺陷研究[J].钢铁.2008,43(4):80-83.
- [9]何宇明,朱斌,陈文满,等.中厚板表面微裂纹成因及影响因素研究[J].钢铁.2006,41(1):36-38.
- [10]齐新霞,包燕平.低合金高强度AH60钢板的研制开发[J].钢铁.2008,43(8):40-41.
- [11]李树森,张立峰,杨小刚,等.亚包晶钢连铸坯角部横裂控制研究[J].炼钢.2016,32(3):67-72.
- [12]Kato. T, Ito. Y. Prevention of Slab Surface Transverse Cracking by Microstructure Control [J]. ISIJ International. 2003, 43 (11): 1742-1750.
- [13]Xun Li-jun, Zhang shu-lan, et al. Surface Microstructure Control of Microalloyed Steel During Slab casting[J]. Journal of Iron and Steel Research, International. 2017, 24:803-810.
- [14]蔡开科.连铸坯质量控制[M].北京:冶金工业出版社,2010:249.

曹树卫(1976-),男,博士(2007年北京科技大学),教授级高级工程师,1999年武汉科技大学(本科)毕业,钢铁冶炼和加工研究。E-mail:Caoshuwei2007@163.com

收稿日期:2019-04-26