

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1005-4006.20160125

## 降低含铝钢表面横裂纹的工艺实践

赵 迪, 程 业, 李 博, 李 飞, 郭艳芳, 石教兴

(南阳汉冶特钢有限公司炼轧总厂炼钢厂, 河南 南阳 474500)

**摘 要:** 针对南阳汉冶特钢有限公司 250 mm×1 650 mm 断面生产的含铝钢表面角部横裂缺陷,从连铸工艺角度分析了含铝钢表面角部横裂产生的原因,提出了控制解决措施。通过优化结晶器振动参数、二冷控制模型、结晶器冷却模型、严控扇形段接弧精度及辊缝开口度、钢种成分控制优化等措施,提高了铸坯表面质量,板坯角部横裂缺陷得到了改善,铸坯不清理装炉率大幅提高,轧板裂纹缺陷率由 14.48%降低至 6.24%。

**关键词:** 含铝钢;角部横裂;连铸工艺;改善

**文献标志码:**A      **文章编号:** 1005-4006 (2020)02-0014-05

## Practice process of reducing surface transverse crack of aluminum containing steel

ZHAO Di, CHENG Ye, LI Bo, LI Fei, GUO Yan-fang, SHI Jiao-xing

(Nan Yang Han Ye Special Steel Co., Ltd., Refining Cast Rolling Factory Workshop, Nanyang 474500, Henan, China)

**Abstract:** Aiming at the transverse corner crack defects of aluminum bearing steel 250 mm×1 650 mm surface corner produced by Nanyang Hanye Special Steel Co., Ltd. The causes of the transverse corner crack on aluminum bearing steel surface corner were analyzed from the perspective of continuous casting process, and the control measures were put forward. By optimizing the mould vibration parameters, secondary cooling control model, mold cooling model, and strictly controlling the arcing accuracy of the sector and the opening of the roll gap, steel composition controlling and optimizing measures, The surface quality of the cast slab was improved, the transverse crack defects of the slab corner were improved, the rate of casting billet not cleaning and charging furnace was greatly increased, and the rate of rolling plate crack defect was reduced from 14.48% to 6.24%.

**Key words:** aluminum steel; transverse corner crack; continuous casting process; improve

南阳汉冶特钢有限公司(以下简称南阳汉冶)近年来通过一系列设备、工艺改造,综合质量得到了提高。在产品结构方面,可以生产的钢种系列较多,包括:普通碳素结构钢、低合金高强度结构钢、桥梁钢、高建钢、容器钢、合金钢、优质碳素结构钢以及国外相同质量等级牌号钢种等。生产中,大部分钢种因国标成分要求含铝( $w(\text{Al}) \geq 0.015\%$ ),该类钢生产后铸坯表面角部横裂缺陷较突出,而不含铝的钢种表面角部横裂缺陷发生率很小。因含铝钢月生产量占公司月度产量的50%以上,大量铸坯表面角部横裂缺陷产生导致铸坯切割后不能做到温装,需要坯温降低后采取火焰枪对铸坯角部进行火焰清理。由于铸坯不能温装,且需要火焰清理,生产成本较高,影响合同快速轧制履约。因此,从连铸工艺、设备精度等方面对角部横裂形成原因进行了分析,提出了控制解决措施,基本上抑制了含铝钢角

部横裂的产生,铸坯实现了不清理送轧,降低了生产成本。

### 1 现状

#### 1.1 生产工艺装备情况

南阳汉冶生产的含铝钢,以1号和2号连铸机生产时表面角部横裂缺陷发生率最高,3号连铸较低,本文主要就1号和2号连铸生产的含铝钢进行论述。1号和2号连铸现有的生产铸坯断面为250 mm×1 650 mm,均为武钢二炼钢的二手连铸机,是20世纪70年代武钢引进的CONCAST全弧形连铸机。铸机基本参数如下:结晶器高度700 mm,出结晶器后依次为格栅段、扇形一段至七段、拉矫段35号辊至55号辊(其中44号辊为矫直辊),总冶金长度22.45 m,弧半径10.30 m。整个扇形段辊子,拉矫段辊子全部为通辊,其中:扇形一段和二段每段

上下5对辊子,扇形三段至七段每段上下4对辊子。二冷方式采取气雾冷却。

目前,公司生产的低合金系列含铝钢工艺路线为:铁水(KR脱硫)→转炉→LF精炼(VD真空)→连铸(250 mm×1 650 mm断面)→铸坯切割后清理送轧。连铸拉速:0.725 m/min;浇注钢水过热度:10~25 ℃;二冷比水量:0.40~0.48 L/kg;对应钢种成分控制见表1。

表1 低合金系列含铝钢成分(质量分数)  
Table 1 Chemical composition of series containing aluminium steel %

| 钢种类别  | 钢种牌号      | 对应内控成分    |           |           |        |        |             |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|--------|-------------|
|       |           | C         | Si        | Mn        | P      | S      | Als         |
| 低合金系列 | Q345 系列含铝 | 0.14~0.18 | 0.20~0.40 | 1.35~1.50 | ≤0.020 | ≤0.010 | 0.015~0.040 |

注:少量钢种根据性能级别情况,还加有微量Nb、V、Ti元素。

1.2 含铝钢铸坯表面角部横裂情况

1号、2号连铸生产的含铝钢,铸坯表面缺陷主要以角部横裂为主,产生位置主要在板坯宽面两边部100 mm范围内。该类含铝钢表面质量较差,铸坯切割后基本上不能实现直接送轧,均需入库进行表面抽检或清理。清理过程中,若相应炉次任意清理两块均没裂纹,则该炉钢剩余铸坯不再清理直接送轧;若任意清理的两块铸坯中,任何一块铸坯表面存在裂纹,则剩余铸坯均需块块清理送轧。具体板坯角部横裂图片如图1所示。

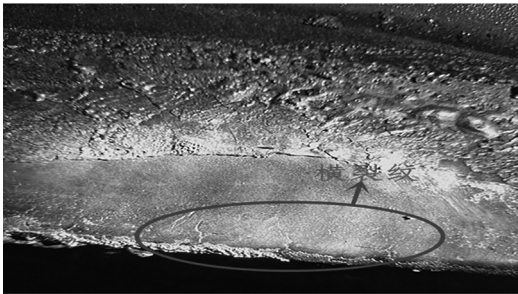


图1 铸坯边部横裂纹  
Fig.1 Transverse crack of slab

2 裂纹产生原因探讨

钢水浇注到结晶器后,为防止坯壳黏连影响生产现象,结晶器普遍采取振动模式。由于结晶器在

上下振动过程中,填充在结晶器坯壳与铜板之间的液渣由于受挤压作用使铸坯表面产生振痕。由于振痕底部常常出现横向裂纹、磷锰元素偏析、大型夹杂物聚集、上浮气泡捕获等缺陷,对铸坯表面质量影响较大<sup>[1-3]</sup>。其中,由于磷锰元素偏析及夹杂物在振痕处偏析、聚集,降低了钢的高温强度,当铸坯在凝固过程中表面承受的应力超过坯壳强度时,容易形成裂纹<sup>[2,4]</sup>。另外,铸坯在矫直过程中如果表面温度处于钢的Ⅲ低温脆化区间,又加上相当于应力集中“缺口效应”的振痕,受到拉伸应力作用的应变变量如果超过1.3%,将会导致振痕波谷部位产生横裂纹,振痕越深,横裂纹越严重<sup>[2,4]</sup>。结合南阳汉冶生产情况,含铝钢表面角部横裂产生主要与铸坯振痕深度、二冷强度、结晶器冷却、接弧精度、铸机开口度及钢中成分控制有关。

2.1 铸坯振痕深度分析

1号2号连铸生产中,结晶器振动为正弦振动,振频低,负滑脱时间长,振痕深;3号连铸生产中,结晶器振动为非正弦振动,振频高,负滑脱时间短,振痕浅。对应振动参数及实测振痕深度见表2。

从振动参数、振痕深度实测平均值对比看,目前1号2号连铸生产中使用的振动参数振程大、振频低、负滑脱时间长是导致振痕深的主要原因,生产中容易诱发振痕波谷处产生横裂纹。

表2 结晶器振动参数及实测振痕深度  
Table 2 Mold vibration parameters and measured vibration mark depth

| 钢种类别  | 铸机    | 连铸拉速/(m·min <sup>-1</sup> ) |                 | 二冷比水量/(L·kg <sup>-1</sup> ) | 结晶器振动参数及振痕深度 |       |         |      |         |             |
|-------|-------|-----------------------------|-----------------|-----------------------------|--------------|-------|---------|------|---------|-------------|
|       |       | 250 mm×1 650 mm             | 300 mm×2 100 mm |                             | 振动曲线         | 振程/mm | 波形偏斜率/% | 振频   | 负滑脱时间/s | 实测振痕平均深度/mm |
| 低合金系列 | 1号和2号 | 0.725                       | —               | 0.46                        | 正弦           | 5.5   | —       | 93.5 | 0.226   | 0.46        |
|       | 3号    | —                           | 0.9             | 0.42                        | 非正弦          | 4.0   | 20      | 117  | 0.138   | 0.31        |

## 2.2 二冷强度分析

研究表明,钢从固相线温度到600℃温度区间存在3个明显的脆性温度区。分别为:钢从固相线温度到1300℃的第Ⅰ凝固脆性化区、1300~1000℃的第Ⅱ高温塑性区、1000~600℃的第Ⅲ低温脆化区。其中钢的第Ⅲ低温脆化区对铸坯表面裂纹的产生有着密切的联系<sup>[4-5]</sup>。针对南阳汉冶生产的含铝钢进行高温力学性能测试,选择生产量大的Q345C/D铸坯进行试验,成分与表1显示的一样。其中:试样在铸坯上取得,加工成棒状,直径10 mm,长度130 mm。试验设备Gleeble-1500,加热速度10℃/s,冷却速度1.5℃/s,加热最高温度1350℃时保温1 min,试验温度下保温0.5 min,应变速率0.004 s<sup>-1</sup>。具体试验测得的脆性温度曲线如图2所示。

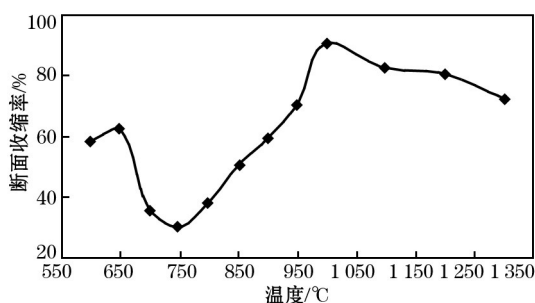


图2 含铝钢(Q345C/D)脆性温度曲线  
Fig.2 Aluminized steel (Q345C/D) brittle temperature curve

从试验情况看:Q345C/D含铝钢生产中第Ⅲ低温脆性温度区在700~900℃。而断面收缩率的60%是作为划分塑性能力的温度临界值,当收缩率低于60%时,铸坯表面裂纹敏感性增强<sup>[4]</sup>。因此,南阳汉冶生产的含铝钢在铸坯矫直时温度必须控制在900℃以上,才可以有效降低铸坯表面横裂产生。

为验证我公司生产的含铝钢是否存在第Ⅲ脆性化温度区间矫直现象,采用美国雷泰公司生产的ReK300型手持测温仪对二冷末端矫直点温度进行多次反复测定,通过一周时间对比统计总结,发现在新开浇次浇注的前5炉钢,由于二冷水温介于25~28℃,坯矫直时宽面两边部100 mm范围的角部区域内温度介于850~930℃、而两边部100 mm向中心部位温度则在950~1000℃。浇注5炉钢后,二冷水温逐渐升高,后稳定在33~35℃内,测量坯矫直时两边部100 mm范围的角部区域内温度介于910~940℃。根据试验得出的第Ⅲ脆性化温度区可知,我公司生产的含铝钢在二冷水温低时,矫直时坯表面两边部温度较低,处于含铝钢的第Ⅲ脆

性化温度区700~900℃内,是导致裂纹产生的一个主要原因。由此说明,现有二冷制度在二冷水温低时存在冷却强度过大现象,对铸坯表面横裂纹产生带来了严重影响。

## 2.3 结晶器冷却强度方面分析

结晶器冷却是保证液态钢水出结晶器后具有一定厚度的坯壳,防止漏钢产生。但结晶器冷却强度大小直接对铸坯表面质量产生影响,一般情况下,弱冷表面质量较好,但存在漏钢风险。强冷铸坯凝固坯壳厚,易造成坯壳冷却不均,板坯表面容易形成各种裂纹<sup>[6-7]</sup>。同时,结晶器的宽窄面为二维传热,强冷后,铸坯边角部位坯表面温度低,容易在后续冷却过程中及温度处于低塑性区内产生裂纹<sup>[2,8]</sup>。针对我公司现有结晶器冷却强度是否合适,通过跟踪对比发现:出现裂纹炉次结晶器水温多在27~30℃,且对应坯矫直时两边部100 mm范围的角部区域温度存在低于900℃现象;未出现边部裂纹炉次结晶器水温多在30~35℃,且矫直时坯边部温度也较高。

根据热量计算公式 $Q_{\text{结晶器}} = CM\Delta t$ 可知:在相同水量情况下,结晶器进出水温差对传热影响很大。在南阳汉冶含铝钢生产中,结晶器进水管、出水管均安装有在线温度测量计,可实现对水温的不间断监控。通过对比看,结晶器进水温度在27~30℃时,进出水温差平均在8~8.5℃,较正常30~35℃进水温度对应的平均温差7.3~7.9℃平均高出0.65℃,其结晶器进水温度低时冷却水带走的热量较大,降低了铸坯宽窄面部位角部温度,容易产生横裂纹。因此,结晶器水温低也是导致含铝钢表面横裂纹产生的一个原因。

## 2.4 接弧精度及辊缝开口度方面分析

铸坯出结晶器后在二冷段继续喷水冷却,在冷却过程中要承受热应力、组织应力及机械应力,如果因二冷扇形段辊子接弧不良、开口度异常、辊子变形等,铸坯表面产生的应力超过坯壳高温强度时表面容易产生裂纹<sup>[4,9]</sup>。

南阳汉冶现有的1号、2号连铸整体设备包括:结晶器、格栅、扇形段、拉矫段,因设备接弧精度及辊缝开口度对铸坯表面质量影响如下。

### 2.4.1 接弧精度方面

现有的结晶器、格栅段因框架使用年限长,存在装配精度低间隙过大现象,每次上线使用寿命规定不能超过4万t通钢量。但正常的使用寿命内,每次浇注停机后,对结晶器、格栅、扇形一段进行接弧

检查,经常出现结晶器与格栅段接弧偏差过大现象,内部标准控制为 $\pm 0.50$  mm,实际检查有时偏差达到 $0.70\sim 1.00$  mm,存在严重的接弧精度偏差过大现象。因此,接弧精度偏差也是导致含铝钢表面横裂纹产生的一个原因。

#### 2.4.2 辊缝开口度方面

由于1号和2号铸机扇形段辊子为通辊,辊径大,生产中辊子使用寿命长容易出现辊子挠度变大现象,且辊子下线修复质量不达标,上线二次使用后表面存在裂纹,甚至个别时间因辊身裂纹大直接导致辊子断裂,这些均导致了铸机开口度发生异常,对铸坯表面裂纹产生带来了影响。因此,辊缝开口度偏差也是导致含铝钢表面横裂纹产生的一个原因。

#### 2.5 钢中成分影响

铝作为细化钢中晶粒元素,加入后可以改善钢的塑韧性。但铝在钢水中存在时,容易和钢中的氮形成 $\text{AlN}$ ,在铸坯凝固过程中 $\text{AlN}$ 会在奥氏体晶界沉淀析出,引起晶界结合力减弱,降低了钢的高温塑性,增加了铸坯表面裂纹产生<sup>[4-5,10]</sup>。南阳汉冶生产的含铝钢,本身铝含量就高,容易因铝含量过高而导致铸坯表面产生横裂纹。

### 3 采取的措施及效果

#### 3.1 优化结晶器振动参数

采取小振幅、高振频、低的负滑脱时间可以减轻铸坯表面振痕深度。针对1号和2号连铸生产时,考虑到生产安全,振频参数由以前 $f=60\text{ V}+50$ 调整为 $f=72\text{ V}+50$ ,振程由以前 $5.5$  mm调整为 $4.0$  mm。拉速在 $0.725$  m/min生产时,振频由以前 $93.5$  次/min提高到 $102.2$  次/min,负滑脱时间由以前 $0.226$  s降低到 $0.181$  s。通过小振幅、高振频缩短负滑脱时间,减轻铸坯表面振痕深度,改善铸坯表面质量。

#### 3.2 优化二冷控制模型

借助于对含铝钢高温力学性能的测试,结合生产过程中二冷水温低影响坯矫直时边部温度现象,采取:在现有二冷水量控制模型公式 $Q=A\times V^2+B\times V+C$ 中引入水温系数 $T$ ,即二冷各区水量控制模型公式变为 $Q=T\times(A\times V^2+B\times V+C)$ 。通过二冷水量调整及跟踪测量坯表面温度后,内部规定二冷各区水量控制模型中:正常二冷水温 $33\sim 35$  °C时水温系数为 $1.28$ , $28\sim 33$  °C时水温系数为 $0.95$ ,低于 $28$  °C时水温系数为 $0.85$ ,生产中二冷水温变化时,模型采集到温度值后自动进行二冷水量调整。通

过在二冷模型中引入水温系数后,生产中对不同二冷水温情况下矫直时坯两边部 $100$  mm位置再次进行坯温测量,温度普遍在 $910$  °C以上,有效避免了含铝钢在第III脆性化温度区矫直,从而避免了横裂纹产生。

#### 3.3 优化结晶器冷却模型

通过 $Q_{\text{结晶器}}=CM\Delta t$ 公式,计算出正常生产过程中对应结晶器水温 $30\sim 35$  °C条件下结晶器冷却水带走的热量,同时,统计前期水温在 $30$  °C以下时结晶器进出水温差平均值,然后用正常水温对应的热量值反算出水温低情况下结晶器水量大小,以保证不同水温条件下结晶器冷却水量带走的热量基本恒定。水温低时对应的水量与正常水温对应的水量比值引入到结晶器水量控制模型中,以确保生产中当水温低时模型自动计算后实现降低结晶器水量的目的,从而减弱结晶器冷却强度,改善铸坯表面质量。

#### 3.4 严控扇形段接弧精度及辊缝开口度

为杜绝因设备精度控制差带来的坯表面横裂纹发生,要求对新上线格栅本体弧进行检测,偏差控制在 $\pm 0.30$  mm内、格栅上线安装时必须检查格栅两边销轴是否坐实到格栅槽内、格栅滑块与导向轮间隙不得过大、格栅与结晶器和扇形一段接弧偏差必须控制在 $0.50$  mm以内。同时,每次铸机停浇后,必须采取弧度尺对铸机精度进行点检、维护,接弧偏差控制在 $0.50$  mm范围内。在辊缝开口度控制方面:一方面排查连铸扇形段所用辊子质量情况,对辊身裂纹大、挠度大的辊子下线进行更换;另一方面排查上线扇形段使用寿命,凡寿命达到要求,但辊身质量良好的,也一律下线换段;确保整体辊缝开口度控制精度偏差由以往 $0.50$ 向 $0.40$  mm控制。

#### 3.5 钢种成分控制优化

为降低高铝含量对铸坯边部横裂纹的影响,生产中一方面严控成品铝的质量分数在 $0.015\%\sim 0.025\%$ ,以减轻高铝含量对坯表面质量影响。另一方面向钢中加入 $0.015\sim 0.025\%$ 的钛,用钛来固定钢中N生成 $\text{TiN}$ 质点,来降低 $\text{AlN}$ 生成量,从而抑制 $\text{AlN}$ 析出对铸坯表面质量影响<sup>[11-12]</sup>。

### 4 实施效果

通过优化结晶器振动参数、连铸二冷控制模型、结晶器冷却模型、严控扇形段接弧精度及辊缝开口度、钢种成分控制优化,1号、2号连铸生产的含铝钢铸坯表面横裂纹得到了有效改善,铸坯不清理

直接装炉比例得到了提高,轧板裂纹率也得到了大幅降低。具体效果以措施实施后的2016年8月情况与措施实施前7月进行对比,具体见表3。

从表3对应的措施实施前后两个月铸坯不清理

装炉率、轧板裂纹率情况看:措施实施后铸坯不清理装炉率较措施实施前提高34%、轧板裂纹率较措施实施前降低8.24%。从对比结果看:措施实施后铸坯表面质量得到了大幅改善。

表3 措施实施前后对应铸坯及轧板表面质量

Table 3 Before and after the implementation of the corresponding casting slab and plate surface quality

| 时间段       | 铸坯不清理装炉率/% | 轧板表面质量 |       |       |
|-----------|------------|--------|-------|-------|
|           |            | 外检量/块  | 裂纹量/块 | 裂纹率/% |
| 措施实施前(7月) | 47         | 11 357 | 1 645 | 14.48 |
| 措施实施后(8月) | 81         | 10 341 | 645   | 6.24  |

## 5 结语

南阳汉冶1号和2号连铸250 mm×1 650 mm断面生产的含铝钢表面角部横裂缺陷,经分析主要与铸坯表面振痕深、二冷强度大、结晶器冷却强度大、扇形段接弧精度差和辊缝开口度控制差、钢中成品铝高有关。通过优化结晶器振动参数、二冷控制模型、结晶器冷却模型、严控扇形段接弧精度及辊缝开口度、钢种成分控制优化等措施,生产的铸坯角部横裂缺陷得到了改善,铸坯不清理装炉率较之前提高34%、轧板裂纹缺陷率由之前14.48%降低至6.24%。从实施效果看,铸坯及轧板质量均得到了提高,大大降低了公司生产成本。

### 参考文献:

- [ 1 ] 张旭彬,张立峰,杨文,等.连铸坯振痕和凝固钩基础研究[J].连铸,2016,41(5):58.
- [ 2 ] 刘延强,尹世超,王雷川,等.板坯角横裂成因及控制措施[J].

中国冶金,2016,26(11):58.

- [ 3 ] 屈天鹏,韩志伟,冯科.连铸板坯角部横裂纹产生机理与预防[J].连铸,2011,36(S1):385.
- [ 4 ] 蔡开科.连铸坯质量控制[M].北京:冶金工业出版社,2010.
- [ 5 ] 王悦新,韦耀环,刘相华,等.含铌钢铸坯横裂纹的分析及控制措施[J].连铸,2009,34(6):31.
- [ 6 ] 黄海,周秀丽,李玉娣.Q235B边部翘皮缺陷改善实践[J].连铸,2016,41(5):68.
- [ 7 ] 李黑山,陈蒙.中厚板连铸坯表面角部横裂纹成因分析与预防措施[J].科技传播,2011,36(1):94.
- [ 8 ] 刘洋,王文军,朱志远,等.利用倒角结晶器消除连铸板坯的角横裂纹缺陷[J].钢铁,2012,47(4):47.
- [ 9 ] 罗传清,孙云虎,宋泽启.直弧连铸机板坯皮下横裂纹的形成原因及预防[J].钢铁研究,2007(1):51.
- [ 10 ] 魏励,杨海滨.连铸含铌钢板坯表面横裂纹原因分析和措施[J].中国冶金,2008,18(12):17.
- [ 11 ] 吴巍.含Nb、Ti船板钢中板表面微裂纹的研究[J].连铸,2006,31(1):22.
- [ 12 ] 马范军,文光华,唐萍,等.含铌、钒、钛微合金钢连铸坯角部横裂纹研究现状[J].材料导报,2010,24(5):89.