

试验研究

# 钢板表面裂纹及氧化物圆点形成条件模拟试验

祝桂合, 万友堂, 张继明, 杜恒科  
(济钢集团有限公司, 山东 济南 250101)

**摘要:**为了查明钢板表面裂纹产生的原因和产生机理,利用实验室加热炉对加热前和加热后产生的两种条件下的表面裂纹进行了模拟。试验结果表明,裂纹附近组织中脱碳层和氧化物圆点的出现是判断裂纹产生时间的必要条件,裂纹附近的脱碳层和氧化物圆点是轧制前坯料表面裂纹的基本特征,利用此特征查找裂纹产生的原因具有重要的指导意义。

**关键词:**钢板;裂纹;脱碳层;氧化物圆点;模拟试验

中图分类号: TG115

文献标识码: A

文章编号: 1004-4620(2012)02-0030-04

## 1 前言

表面裂纹是中厚板生产过程中常见的的质量缺陷,该缺陷不仅造成一定的质量损失,也会影响产品的及时交付。因此,弄清裂纹来源,加以预防和控制成为轧钢和炼钢生产者经常需要面对和解决的问题。作者通过长期的观察和总结,认为钢板表面裂纹除来源于连铸坯缺陷外<sup>[1]</sup>,还有部分裂纹是在轧制过程产生的<sup>[2]</sup>,两者产生的裂纹形态和附近组织存在明显的差异,掌握以上特征可以作为鉴别以上两类裂纹来源的基本依据。为进一步探索和掌握以上两类裂纹的形成规律和基本特征,进行了实验室模拟,观察裂纹在加热和轧制过程中的演变特点,探索裂纹周围形成脱碳层和氧化物圆点的基本条件,为准确判定裂纹产生的原因提供依据。

## 2 模拟裂纹试验

### 2.1 试样制作

在低合金钢板上截取尺寸为100 mm × 120 mm的试样3个,用尖锐物分别在其中的2个试样(编号a、b)表面制造楔形裂纹开口,模拟轧前裂纹。将此3个试样同时放入加热炉中,加热一定时间后分别取出,在其中无裂纹试样(编号c)表面快速凿一裂纹后,3个试样一起空冷,分别模拟铸坯原始裂纹和

轧制过程中产生的裂纹。

### 2.2 试验方案

在实验室使用箱式电阻加热炉加热试样,具体工艺为:将炉温升到900℃时装入a、b、c试样,炉温达到1200℃后分别保温10 min和60 min后取出试样,并空冷至室温。各试样总加热时间>2 h,试验内容见表1。

表1 不同裂纹方式试验内容

| 试样 | 裂纹情况 | 试验方式                       |
|----|------|----------------------------|
| a  | 预制裂纹 | 1200℃保温10 min取出空冷至室温       |
| b  | 预制裂纹 | 1200℃保温60 min取出空冷至室温       |
| c  | 后加裂纹 | 1200℃保温10 min取出后速制裂纹,空冷至室温 |

在试样a、b、c上截取裂纹金相试样,分别用金相显微镜和扫描电镜自钢板表面至裂纹根部(尖部)观察脱碳程度和氧化物圆点分布状态。

### 2.3 试验结果

#### 2.3.1 钢板表层分析

图1和图2为试样表层高温加热后的氧化物形貌特征和氧化物成分的扫描电镜分析。结果显示所有试样表层(无裂纹处)均存在明显的脱碳层,在脱碳层中观察到大量的氧化物圆点,氧化物圆点颗粒尺寸由表面向内部逐渐减小;氧化物圆点成分能谱分析表明,呈现褐色的氧化物含硅和锰,呈现浅灰色的氧化物含锰,而呈现白亮色的为未被氧化的基体,但其中含有较高的镍或钼(见表2)。

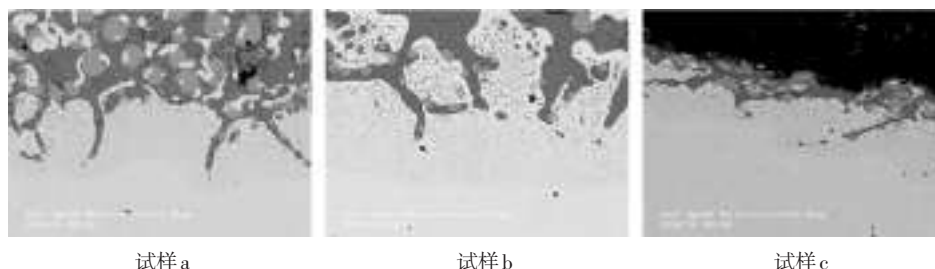


图1 试样a、b、c加热后的表层特征

收稿日期:2012-02-17

作者简介:祝桂合,男,1961年生,2004年毕业于日本九州大学材料工艺专业,博士。现为济钢科技质量部副部长,高级工程师,从事炼钢轧钢生产技术、产品开发及管理工作30年。

#### 2.3.2 沿裂纹方向氧化物圆点的观测

为了观察裂纹不同深度部位的表层氧化物特征,沿预制裂纹纵向剖开,研磨抛光后观察不同保

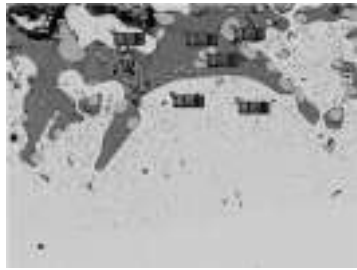


图2 表层脱碳区域的电镜形貌

温时间后的裂纹表层形貌。

图3为预制裂纹纵剖面不同深度位置的表层氧化物形貌。可以看出,试样a、b氧化物圆点从裂纹

表2 试样氧化物成分能谱分析(质量分数) %

| 谱图  | O     | Si    | Mn   | Fe    | Ni   | Mo   | 总的  |
|-----|-------|-------|------|-------|------|------|-----|
| 谱图1 |       |       |      | 100   |      |      | 100 |
| 谱图2 | 24.04 |       | 4.86 | 71.10 |      |      | 100 |
| 谱图3 |       |       |      | 99.20 | 0.80 |      | 100 |
| 谱图4 | 31.94 | 10.08 | 1.94 | 56.04 |      |      | 100 |
| 谱图5 | 25.29 |       | 1.06 | 73.66 |      |      | 100 |
| 谱图6 |       |       |      | 97.82 | 0.97 | 1.21 | 100 |
| 最大  | 31.94 | 10.08 | 4.86 | 100   | 0.97 | 1.21 |     |
| 最小  | 24.04 | 10.08 | 1.06 | 56.04 | 0.80 | 1.21 |     |

表层至裂纹尖端均有大量分布,同时金相显示脱碳层明显。

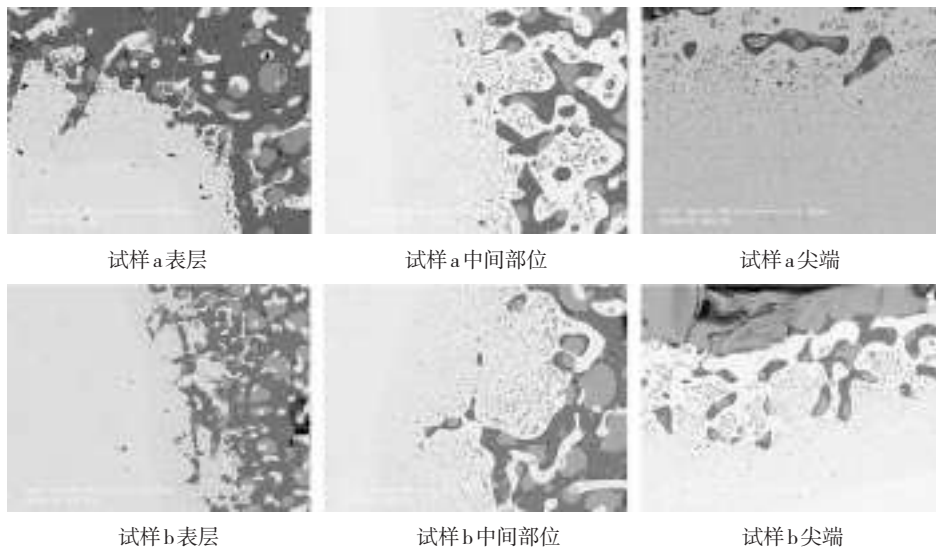


图3 预制裂纹周围脱碳层和氧化物圆点分布

图4为试样c裂纹纵剖面的表层氧化物形貌特征,观察发现,c试样仅在试样表面存在氧化物圆点,而加工裂纹后的表面,没有观察到氧化物圆点,

而该试样1/5处的氧化物是在高温加工裂纹是样品表面变形延伸所导致,表明加热后新加工的裂纹表面没有氧化物圆点生成。

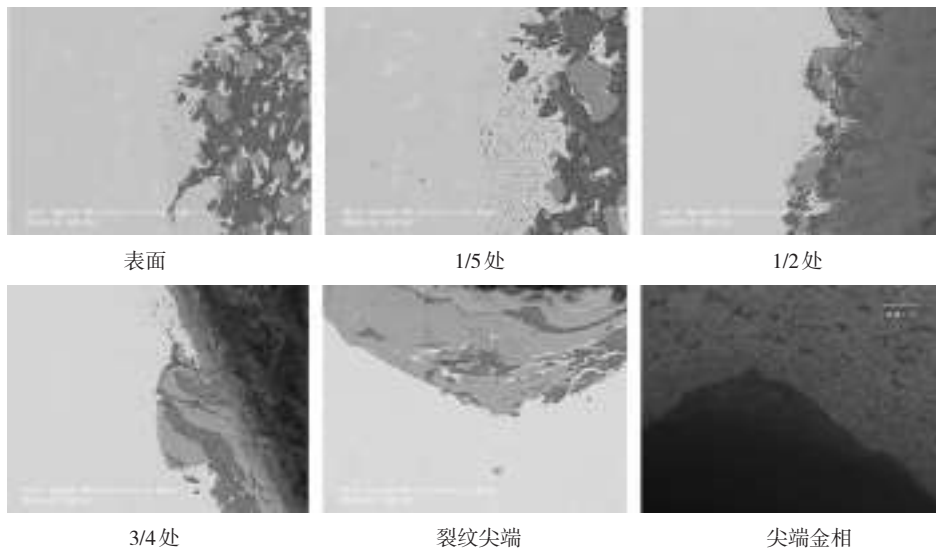


图4 后加裂纹(试样c)周围脱碳层和氧化物圆点分布

2.3.3 试验结论及分析

模拟裂纹试验可得出如下结论:

1)无论预制裂纹还是后加裂纹的钢板表面,在加热时间>2 h、加热温度1 200 ℃的条件下,钢板表

层均存在氧化物圆点和明显脱碳层。

2)氧化物圆点在预制裂纹试样中从钢板表层至裂纹尖端均有出现,同时组织中也明显出现了脱碳层。

3)在后加裂纹试样中氧化物圆点仅在钢板表层存在,而裂纹内部和裂纹尖端处无氧化物圆点,也没有脱碳层。

本试验用加热炉未采取惰性气体保护,试样也未采取盐浴、铅浴、碳粉等保护措施。基本模拟了现场工业加热炉空燃比控制较差条件及轧制过程暴露于空气下的氧化环境。容易形成脱碳层及氧化物圆点。其机理推测如下:

1)在一定温度条件下,钢板表面及裂纹表面(沿扩展面)受到空气中氧原子氧化,形成脱碳层。

2)氧原子继续穿透脱碳层向基体内部渗透,亲氧元素(如Si、Mn)将优先被氧化,从而在基体上形成离散的氧化物质点。试验也证明弥散分布的氧化圆点颗粒中Si、Mn含量非常高(见表2)。

由此推断:氧化物圆点的多少取决于氧原子的渗透条件,渗透条件包含温度和时间两个因素。上述试验结果表明,较高的温度和一定的时间下才能形成氧化物圆点。

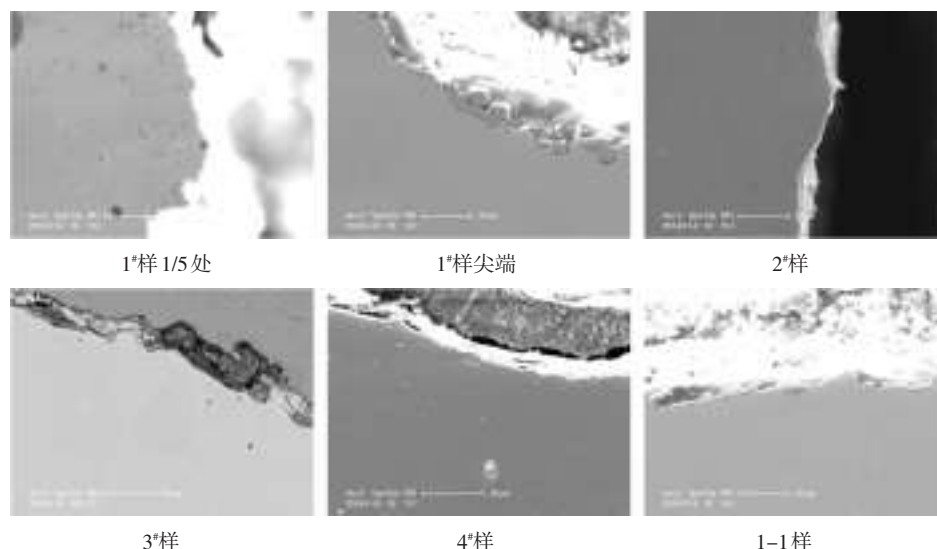


图5 补充试验试样裂纹部位氧化物圆点观测

### 3.3 补充试验结论及分析

1)本次试验仅1#样靠近钢板表层发现了少量氧化物圆点,其他试样均未发现。说明形成氧化物圆点的条件是温度至少在1 000 ℃以上及该温度下保温一定时间。

2)与1#试样同样温度条件下的后加裂纹试样(1-1试样),未发现氧化物圆点,说明该温度下保温时间应>20 min,才有可能形成氧化物圆点。

综上所述,钢板加热温度和保温时间是氧化圆点形成的两个主要因素<sup>[3]</sup>,1 200 ℃保温10 min即可形成大量粗大氧化物圆点(主试验),而1 100 ℃入炉保温20 min,氧化物圆点层较浅,且氧化物圆点颗粒较少(补充试验)。1 000 ℃保温20 min及该温度以下20 min以内,不形成氧化物圆点。

## 3 氧化物圆点形成条件模拟试验

### 3.1 补充试验方案

为验证上述推断结果,进行了补充试验。选取同一钢板上同样大小的4块试样分别预制裂纹,不同温度下保温20 min,观察氧化物圆点分布。1#及2#样加热取出后于裂纹旁边再预制裂纹,亦观察氧化物圆点分布。试验方案如下:1#试样,1 100 ℃入炉,保温20 min后取出空冷至室温,同时再后加裂纹,试样编号1-1;2#试样,1 000 ℃入炉,保温20 min后取出空冷至室温,同时再后加裂纹,试样编号2-1;3#试样,950 ℃入炉,保温20 min后取出空冷至室温;4#试样,900 ℃入炉,保温20 min后取出空冷至室温。

### 3.2 电镜观察

利用电镜对1#~4#样进行观测表明:1)除1#试样外,其他试样钢板表层均没有发现氧化物圆点。2)1#样裂纹表层至尖端1/5处发现少量氧化物圆点,其他位置未发现,见图5。

主试验结论3)与上述讨论存在矛盾之处。即“后加裂纹试样中氧化物圆点从钢板表层至裂纹尖端逐渐减少至消失,裂纹尖端处无氧化物圆点,也没有脱碳层”。尖端处无氧化物圆点,证明加入裂纹后,该处温度及保温时间未能满足氧化物圆点形成条件。而由表及里的氧化物圆点是制作裂纹过程中表层氧化物圆点随金属被尖锐物挤压带入所至。

对应于工业生产过程来说,若连铸坯表面已经带有裂纹,其加热过程充分满足上述形成氧化物圆点的条件,扫描电镜下应能看到明显的脱碳层和氧化物圆点。若连铸坯无裂纹,加热过程也无裂纹,轧制过程中若产生裂纹,因其所处高温时间较短,不能满足氧化物圆点形成条件,因此,扫描电镜下无氧化物圆点,金相检验也无脱碳层存在。



结合裂纹中扫描电镜能够发现的一些特殊物质,如Ca、Mg、Cu、As、Na、K等,能够更进一步辅助判断裂纹形成于钢板(或连铸坯)制造的哪一个阶段,从而制定针对性措施。

## 4 结论

4.1 钢板表面经加热一定温度和时间会产生脱碳层,脱碳层出现后会出现氧化物圆点。

4.2 本试验所用低合金钢其氧化物圆点产生条件

为:加热1 000 ℃以上及该温度下保温20 min以上。

4.3 检验裂纹附近脱碳层及氧化物圆点,可以判断裂纹产生的时机。此两点及一些特殊元素可以作为判定裂纹产生于制造工序的具体阶段。

### 参考文献:

- [1] 蔡开科.连铸坯表面裂纹的控制[J].鞍钢技术,2004(3):1-8.
- [2] 万友堂.热送中厚板生产线钢板表面裂纹的机理分析[J].钢铁研究,2008,36(3):14-16.
- [3] 韦东滨,韩静涛,谢建新,等.金属材料内部裂纹高温愈合试验研究[J].北京科技大学学报,2000,33(3):245-248.

## Simulation Experiments of the Surface Cracks and Oxide Dots on Steel Plate

ZHU Gui-he, WAN You-tang, ZHANG Ji-ming, DU Heng-ke

(Jinan Iron and Steel Group Corporation, Jinan 250101, China)

**Abstract:** In order to investigate the reason and mechanism of surface crack produced, two cracks producing conditions before heating and after heating were simulated in the laboratory by means of a heating furnace. The experimental results showed that the decarburized layer and the oxide dots around cracks are the essential condition of judging the crack producing time. The decarburized layer and the oxide dots around cracks are basic feature of slab surface cracks during high temperature heating for long time. It is an important guiding significance to decide the causes of cracks according to this feature.

**Key words:** plate; crack; decarburized layer; oxide dot; simulation experiment

(上接第29页)为鱼雷罐喷补料的促凝剂。

## 4 工业应用

按上述试验确定的最佳配方生产喷补料,采用三乙醇胺作促凝剂,在鱼雷罐使用650次后进行内衬简单清理再喷补施工,一次使用喷补料10 t,施工时间约90 min,喷补层平均厚度45 mm左右(流槽处较厚,可达60 mm),喷补附着率(附着率=100%-回弹率-滑落率)<sup>[5]</sup>达到95%以上。

喷补层养护24 h后开始烘烤,按照设定的升温曲线烘烤24 h后开始使用。使用前喷补层没发现明显的裂纹,共试验了15个台次的鱼雷罐,喷补一次平均使用寿命达到200次以上,吨铁喷补料消耗约0.15 kg,吨铁降成本约0.3元,具有较好的经济效益和使用效果。

## 5 结论

5.1 在Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC系喷补料中,使用三乙醇胺作促

凝剂是比较合适的。

5.2 鱼雷罐喷补料的使用大大提高了鱼雷罐的使用寿命,对鱼雷罐进行两次喷补,可以使鱼雷罐的平均使用寿命达到1 000次以上,降低了吨铁耐材成本消耗。

5.3 鱼雷罐的结构较为复杂,砌筑难度大,但喷补料施工比较简单,易操作,效率高,无粉尘,可降低操作人员的劳动强度和改善操作环境。

### 参考文献:

- [1] 陶绍平,叶方宝,杨彬.湿式泵送喷射料的研究及其在鱼雷罐上的应用[J].耐火材料,2004,38(5):324.
- [2] 韩行禄.不定形耐火材料[M].2版.北京:冶金工业出版社,2003:292-293.
- [3] 方莹,张永芳.耐火喷补料用促凝剂的开发[J].国外耐火材料,2001,26(1):51-55.
- [4] 魏明坤,张丽鹏,张广军.碳化硅耐火材料的发展与性能[J].硅酸盐通报,2001(3):36.
- [5] 蒋明学.不定形耐火材料工艺学[M].西安:陕西科学技术出版社,1997:242.

## Development and Application of the Jetting Refractory for Torpedo Ladle

MA Ming-kai

(The Science and Technology Quality Department of Jinan Iron and Steel Group Corporation, Jinan 250101, China)

**Abstract:** The jetting refractory for torpedo ladle was developed by density bauxite, silicon carbide, white corundum powder, fine silica powder, fine alumina powder and pure calcium aluminate cement as material. The influences of the fine powers on the properties of the jetting refractory were investigated. And the accelerating effects of CaCl<sub>2</sub>, polyaluminium chloride, triethanolamine and NaAlO<sub>2</sub> were compared. The results showed that adding 7% fine SiO<sub>2</sub> powder and 3% fine Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder was beneficial to the construction performance and using performance of the gunning refractory and the triethanolamine had better accelerating effect. The developed jetting refractory increased the life of torpedo ladle for more than 200 times for once when the torpedo ladle was overhauled. The jetting process is simple and the construction performance is good. The cost of per ton iron was decreased by 0.3 Yuan(RMB).

**Key words:** jetting refractory; fine powder; accelerating agent; torpedo ladle; service life