

309L 奥氏体不锈钢板热轧边裂缺陷成因分析和工艺改进

杨 兆 陈兴润 王 珂 赵得江 潘吉祥
(酒钢集团宏兴钢铁股份有限公司,嘉峪关 735100)

摘 要 通过金相组织观察和热力学计算相结合的方式对 309L 奥氏体不锈钢板热轧边裂缺陷进行了分析。试验结果表明,309L 钢(0.012% C,0.034% N)板坯热轧加热温度 1 260 °C 边部三角区存在大量网状铁素体,在后续加热过程中高温铁素体含量进一步升高,达到 24% 左右,导致塑性降低,轧制过程中产生边裂缺陷。通过控制钢中 C 含量 0.015% ~ 0.025%,N 含量 0.04% ~ 0.05%,热轧板加热温度 1 150 °C,使钢中铁素体含量降至 10.7%,有效避免 309L 钢板边裂,板卷合格率达 100%。

关键词 309L 奥氏体不锈钢板 边裂 高温铁素体 热塑性

Process Improvement and Edge Crack Analysis of 309L Austenitic Stainless Steel Plate in the Hot Rolling

Yang Zhao, Chen Xingrun, Wang Ke, Zhao Dejiang and Pan Jixiang
(Hongxing Iron & Steel Co Ltd, Jiuguan Iron and Steel Group Corporation, Jiayuguan 735100)

Abstract The edge crack cause of 309L austenitic stainless steel plate in the hot rolling is analyzed by means of metallographic structure observation and thermodynamic calculation. Results test show that the hot rolling temperature of steel plate 309L (0.012% C,0.034% N) is at 1 260 °C and large area of continuous reticular δ ferrite exists in the triangle area of slab edge. In the subsequent heating process, the ferrite content increased continuously to up 24%, which lead to the decrease of plasticity and formation of edge crack in rolling process. By controlling 0.015% ~ 0.025% C, and 0.04% ~ 0.05% N in steel, and slab heating at 1 150 °C, the ferrite content in steel decreases to 10.7% to be available to avoid the edge crack of 309L steel plate and coil qualified rate up to 100%.

Material Index 309L Austenitic Stainless Steel Plate, Edge Crack, δ Ferrite, Thermoplasticity

不锈钢焊带是带极堆焊的关键技术,也是主要的焊接材料^[1]。不锈钢焊带中,309L 奥氏体不锈钢的用量最大,占到 60% 左右。由于特殊的成分要求,309L 奥氏体不锈钢在热轧过程中容易产生边裂和起皮缺陷,严重影响了成材率和生产效率^[2-3]。

不锈钢热轧生产过程中,边裂是比较常见的一种缺陷,在双相不锈钢、马氏体不锈钢和奥氏体不锈钢中都有发生^[4-10]。岳杰兰等人^[4]研究了 0Cr18Ni9 奥氏体不锈钢热轧带钢裂边缺陷,认为边裂是由于连铸坯铁素体含量和加热温度较高造成的,一般控制加热温度应在 1 270 °C 以下。刘春粟等人^[5]分析了 00Cr17TiMo 超纯铁素体不锈钢的热轧边裂缺陷,指出 00Cr17TiMo 钢加热温度达到 1 200 °C 时,出现了明显混晶现象。混晶导致在轧制过程中出现不均匀变形,经过精轧后出现边部层状结构以及边裂等缺陷。李永旺等人^[8]认为高硼不锈钢组织中含有硬脆性硼化物的共晶组织是导致边裂缺陷产生的原因。

针对 309L 不锈钢热轧板边裂缺陷,通过显微组织观察和热力学计算相结合的方式,对缺陷形成原因进行分析。并根据边裂缺陷的位置,对 309L 不

锈钢板坯进行组织观察,从炼钢-热轧工艺过程中探讨缺陷产生机理,提出边裂缺陷的工艺改进措施。

1 材料及研究方法

1.1 材料

309L 奥氏体不锈钢的生产工艺流程为 100 t 电弧炉-110 t AOD-110 t LF-直弧型板坯连铸机-板坯修磨-加热-粗轧-炉卷轧机轧制-卷取。板坯尺寸为 1 260 mm(宽) × 220 mm(厚),热轧轧制的成品厚度为 6 mm,化学成分如表 1 所示。309L 不锈钢加热温度为 1 260 °C,在炉时间为 280 min。热轧板边裂缺陷的照片如图 1 所示。从图 1 中可以看出,边裂不是通卷发生,裂纹在黑卷边部的局部区域发生,裂纹深度最大为 70 mm。

1.2 研究方法

取不锈钢带边裂部位样品,加工成 20 mm × 20 mm × 6 mm 的尺寸,沿着厚度方向镶样,然后依次用

表 1 309L 不锈钢化学成分 / %
Table 1 Chemical composition of 309L stainless steel / %

| C | Si | Mn | P | S | Ni | Cr | Cu | Mo | N |
|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|
| 0.012 | 0.39 | 1.84 | 0.014 | 0.001 | 11.49 | 21.35 | 0.01 | 0.01 | 0.034 |

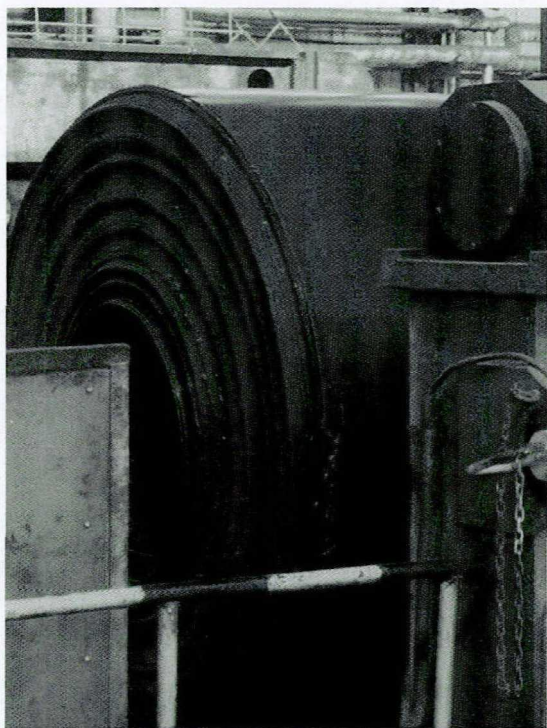


图1 309L不锈钢6 mm热轧板边裂缺陷照片

Fig. 1 Edge crack photograph of 6 mm hot rolled plate of 309L stainless steel

100目、200目、400目、800目和1200目的砂纸研磨,研磨后进行抛光和腐蚀。腐蚀液为 FeCl_3 盐酸溶液。

样品制备完毕后采用LEICA DMI 3000M光学显微镜对金相组织观察。采用光学显微镜自带的“多相面积百分比”软件对组织中高温铁素体含量进行定量分析。采用Zeiss Merlin Compact扫描电镜对组织进行更高倍数的观察,并对不同相进行能谱分析。

裂纹深度跟板坯三角区的宽度基本是一致的。

为了系统分析边裂缺陷产生的原因,取309L不锈钢板坯三角区的试样进行分析。具体的检测分析方法跟黑卷边裂缺陷样品的分析方法是一致的。

2 试验结果

2.1 边裂样品组织观察

图2为309L不锈钢边裂试样不同倍数下的金相组织。图中基体为奥氏体,黑色条状组织为高温铁素体。从图2(a)中可以看出,裂纹两边高温铁素体相均匀分布,数量较多。为了便于高温铁素体相的量化,将视场放大到1000倍,见图2(b)所示。从图2(b)中可以看出,高温铁素体主要以条状分布。通过软件对高温铁素体定量,高温铁素体的含量(面积分数)为24%。普通奥氏体不锈钢,如304、304L、316L等,热轧黑卷中高温铁素体含量一般在10%以内。309L不锈钢中高温铁素体含量要远高于一般的奥氏体不锈钢,因此从金相组织可以初步判断不锈钢中高温铁素体含量高是导致边裂缺陷产生的原因。

采用扫描电镜对309L不锈钢边裂试样进行组织观察,结果见图3所示。从图3中可以看出,除了高温铁素体,组织中未见其它异常。基体奥氏体的成分跟表1中Ni、Cr元素的含量基本是一致的。而高温铁素体的成分中Cr含量高,Ni含量低。

2.2 板坯组织观察

对309L不锈钢板坯三角区的金相组织进行观察,结果见图4所示。图4中基体为奥氏体,黑色网状组织为高温铁素体。从图4中可以看出,板坯三角区存在大面积网状的高温铁素体。通过软件对板坯三角区高温铁素体进行定量测量,高温铁素体的含量达到18.5%。309L不锈钢板坯中高温铁素体含量也要远高于普通的奥氏体不锈钢。

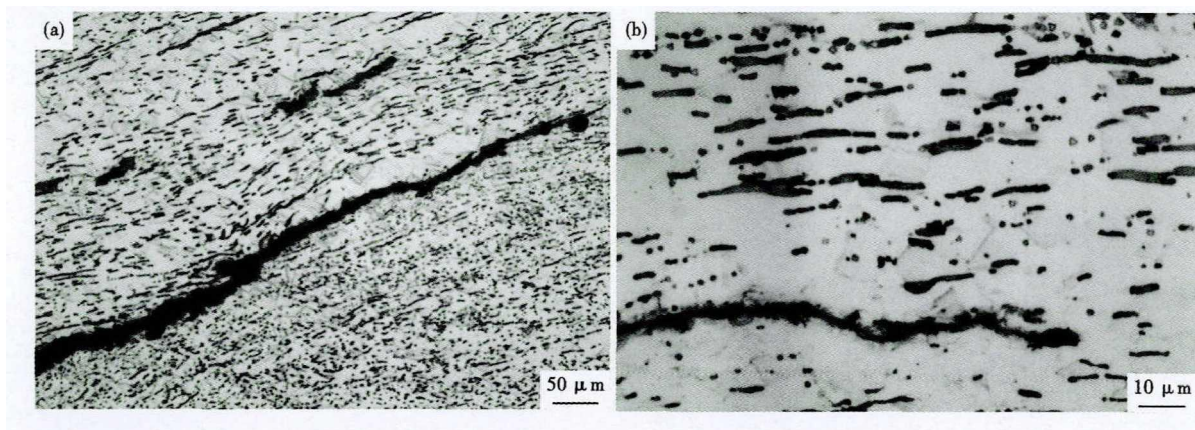


图2 309L钢板边裂形貌(a)和裂纹附近组织(b)

Fig. 2 Morphology of edge crack (a) and structure near crack (b) of 309L steel plate

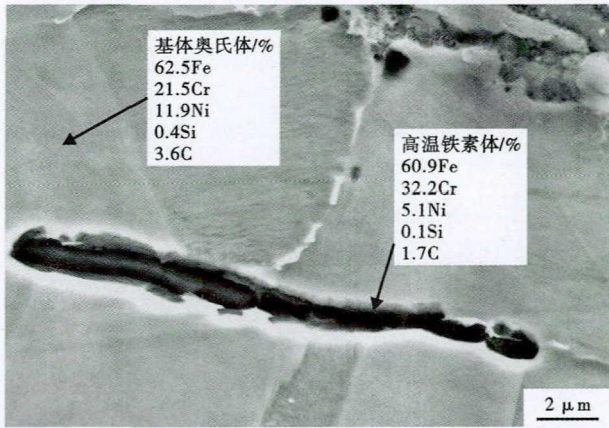


图 3 309L 钢板边裂附近铁素体和奥氏体基体扫描电镜-能谱检测结果

Fig. 3 SEM-EDS detection results of ferrite and austenite matrix near edge crack of 309L steel plate

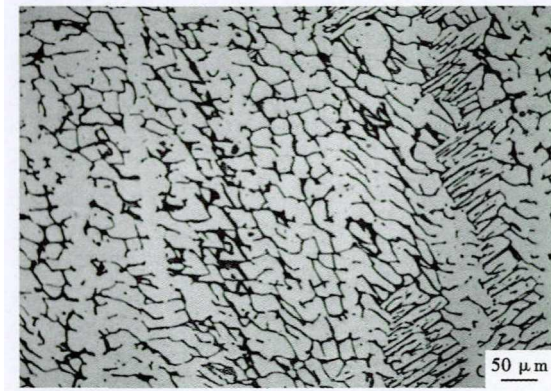


图 4 309L 钢 220 mm 板坯金相组织

Fig. 4 OM image of structure of 309L steel 220 mm slab

3 结果分析讨论

在奥氏体不锈钢中,铁素体含量过高,会导致材料塑性降低。在热轧过程中,奥氏体和铁素体两相结构和性能的差异,导致变形不协调和附加应力的产生,最终在两相界面产生裂纹。从以上的试验结果可以看出,309L 不锈钢板坯边部三角区存在 18.5% 的网状高温铁素体,网状高温铁素体的塑性更差。经过加热后,高温铁素体中 Cr 元素扩散,高温铁素体含量会减少,但是从热轧黑卷边裂样品的检测结果来看,加热后 309L 不锈钢高温铁素体含量没有降低,反而是进一步升高,导致热塑性降低明显。因此 309L 奥氏体不锈钢热轧板边裂缺陷产生的原因为:309L 不锈钢板坯边部三角区存在大量网状铁素体,在后续加热过程中高温铁素体含量进一步升高,达到 24% 左右,在轧制过程中高温铁素体跟奥氏体变形不协调,在奥氏体和铁素体的相界产生裂纹,最终扩展为边裂缺陷。以下结合热力学计

算,对 309L 不锈钢从板坯到热轧黑卷高温铁素体含量的变化及边裂缺陷产生的机理进行讨论。

奥氏体不锈钢板坯中高温铁素体的含量(面积分数)可以用 Schaeffler 相图来预测^[10-11]。根据 309L 不锈钢的化学成分,计算 Cr 当量和 Ni 当量,具体见式(1)和式(2)。将 309L 不锈钢对应的点标记到 Schaeffler 相图中,见图 5 所示。根据 Schaeffler 相图预测的 309L 不锈钢板坯中高温铁素体含量为 10% 左右,跟金相组织中观察到高温铁素体含量有一定的出入。分析主要原因为:Schaeffler 相图预测的高温铁素体含量是平衡状态下的,实际上板坯边部冷却快,凝固过程中残留的高温铁素体含量更高。此外,板坯三角区由于宏观偏析,是奥氏体不锈钢板坯中高温铁素体含量最高的区域,这在 Chen 等人的研究结果中也得到了证实^[12]。

$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 1.5Si \tag{1}$$

$$Ni_{eq} = Ni + 0.5Mn + 30C + 30N + 0.5Cu \tag{2}$$

309L 奥氏体不锈钢在加热过程中,由于 Cr 元素的扩散,高温铁素体的含量会降低,但事实上根据金相检测结果,309L 奥氏体不锈钢热轧后高温铁素体含量比板坯更高。通过计算的 309L 奥氏体不锈钢的相图得出,309L 不锈钢在 1 138 ℃ 以上的加热温度下,奥氏体又会转变为高温铁素体,温度越高生成的高温铁素体含量也越高。本文研究的 309L 不锈钢加热温度为 1 260 ℃,在此温度下,一方面高温铁素体相中 Cr 元素扩散,高温铁素体含量是降低的过程;另一方面由于奥氏体转变为高温铁素体含量相变的发生,高温铁素体含量是升高的过程,奥氏体转变为高温铁素体相变占主导的地方时,加热过程高温铁素体含量是升高的。

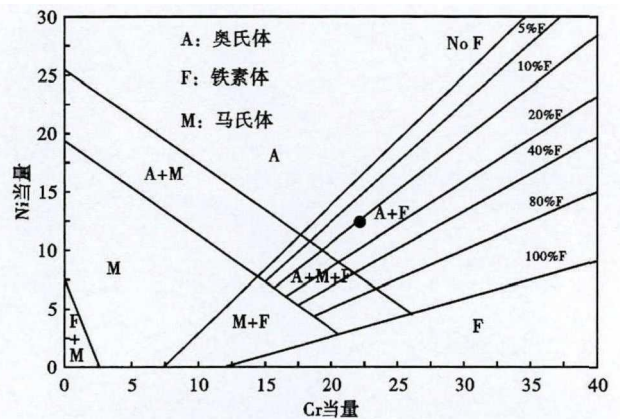


图 5 通过 Schaeffler 相图预测的 309L 板坯铁素体含量位置
Fig. 5 Prediction location of ferrite content in 309L steel slab in Schaeffler diagram

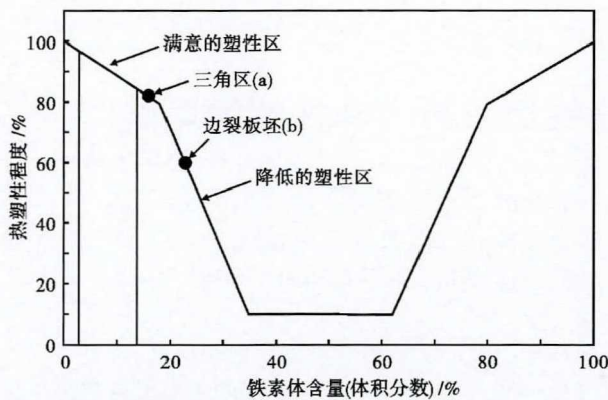


图6 309L钢板坯三角区(a)和边裂坯(b)在铁素体量-热塑性图中的位置

Fig.6 Location of 309L steel slab triangle area (a) and edge crack slab (b) in ferrite content-hot plasticity diagram

图6一般用来表示双相不锈钢中铁素体含量对塑性的影响^[12-13]。309L不锈钢板坯和热轧黑卷中高温铁素体含量达到了15%以上,金相组织也是奥氏体+高温铁素体的两相组织,因此可以用图6来解释缺陷产生的原因。将309L不锈钢板坯三角区和边裂样品的高温铁素体含量标到图中。从图6中可以看出,309L不锈钢板坯边部三角区高温铁素体含量为18.5%,由于高的铁素体含量导致板坯本在低塑性区内^[13-14]。在后续的加热过程中,铁素体含量进一步升高,达到了24%,309L不锈钢的塑性进一步降低,在热轧过程中由于边部塑性差,导致边裂缺陷产生。

4 工艺改进措施

通过以上的分析,可以看出309L不锈钢组织中

参考文献

- [1] 林晓冬,彭群家,韩恩厚,等.退火对热老化308L不锈钢焊材显微结构的影响[J].金属学报,2019,55(5):555-565.
- [2] 舒玮,李俊,廉晓洁,等.热处理对奥氏体不锈钢00Cr24Ni13铸坯高温热塑性的影响[J].工程科学学报,2015,37(2):190-195.
- [3] 陈根保,王建勇,杨辉,等.309L焊接用奥氏体不锈钢线材的生产实践[J].金属材料与冶金工程,2011,39(6):34-37.
- [4] 岳杰兰,黄滔滔,吴艳红.0Cr18Ni9奥氏体不锈钢热轧带钢边部质量控制[J].钢铁,2002,37(4):39-41.
- [5] 刘春粟,王咏波,毕洪运.00Cr17TiMo铁素体不锈钢热轧边裂分析[J].宝钢技术,2017(3):36-39.
- [6] 朱亮,魏鹏,侯国清,等.奥氏体不锈钢热轧边裂实验研究[J].轧钢,2012,29(5):9-13.
- [7] 徐军,蔡才,李伯平,等.430和410S不锈钢边裂机理分析及工艺改进[J].宝钢技术,2008(6):55-57.
- [8] 李永旺,刘光军,王昭杰,等.高硼不锈钢板的组织演化及制备工艺研究[J].钢铁研究学报,2019,39(2):207-212.
- [9] 陈兴润,潘吉祥.2205双相不锈钢边裂缺陷形成原因分析[J].钢铁研究,2013,41(4):33-36.
- [10] 易昊钰,陈思含,王旻,等.Cr和Si元素对奥氏体不锈钢组织

高温铁素体含量小于13%,可以达到较好的塑性。为降低不锈钢组织中的高温铁素体含量消除边裂缺陷采取以下改进措施:

(1)控制C含量为0.015%~0.025%,控制N含量为0.04%~0.05%,提高Ni当量,降低板坯中高温铁素体含量。

(2)在保证热轧轧制负荷满足的前提下,加热温度设定为1150℃,避免高温下奥氏体转变为高温铁素体。

通过工艺改进措施,309L奥氏体不锈钢中的铁素体含量控制到了10.7%,消除了边裂缺陷,不锈钢板卷合格率达到100%。

5 结论

(1)309L奥氏体不锈钢热轧板坯边部三角区存在大量网状铁素体,在后续加热过程中高温铁素体含量升高到24%左右,在轧制过程中高温铁素体跟奥氏体变形不协调,在奥氏体和铁素体的相界产生裂纹,最终扩展为边裂缺陷。

(2)热力学计算结果表明,309L不锈钢在1138℃以上的加热温度下,奥氏体又会转变为高温铁素体,温度越高生成的高温铁素体含量也越高。可以通过铁素体对塑性的影响图,来指导309L不锈钢的生产。

(3)309L奥氏体不锈钢边裂缺陷控制的最佳工艺参数为C含量控制为0.015%~0.025%,N含量控制为0.04%~0.05%,板坯热轧加热温度1150℃。

构成及凝固路线的影响[J].工程科学学报,2020,42(2):179-185.

[11] Schaeffler A L. Constitution Diagram for Stainless Steel Weld Metal [J]. Metal Progress, 1949, 56(11): 680-688.

[12] Chen Chao and Cheng Guoguang. Delta-ferrite Distribution in a Continuous Casting Slab of Fe-Cr-Mn Austenitic Stainless Steel [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2017, 48: 2324-2333.

[13] 陆世英. 不锈钢概论[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.

[14] 陈雨来,张泰然,王一德,等. O, N和Ni含量对0Cr25Ni7Mo4N双相不锈钢热轧塑性的影响[J].金属学报,2014,50(8):905-912.

杨兆(1977-),男,工程师,2001年西安建筑科技大学(本科)毕业,不锈钢热轧工艺研究。

E-mail: chenxingrun850204@126.com

收稿日期:2021-02-03