

304 不锈钢 2 mm 连铸薄带中的裂纹分布和形成分析

王振敏^{1,2} 方圆^{1,3} 张跃¹ 黄运华¹ 齐俊杰¹

(1 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083;

2 鞍山科技大学材料科学与工程学院, 鞍山 114044; 3 上海宝钢集团公司, 上海 200941)

摘要 用扫描电镜(SEM)观察和分析了双辊连铸法生产的 304 不锈钢 1 200 mm × 2 mm 铸带表面和内部裂纹的形貌和形成。由于采用导热性好的铜制结晶辊, 薄带表面和内部产生了长 140 mm、深 0.33 mm 的裂纹, 薄带断面有分层现象。试验结果表明, 铜制结晶辊使钢液的冷却速度达到 $(1 \sim 4) \times 10^3$ K/s, 薄带接触辊面温度低, 凝固区的温度梯度高达 10^5 K/m, 温差产生的内应力和应力集中导致裂纹产生; MnS、MnO、Cr₂O₃ 等夹杂物是裂纹源。

关键词 连铸薄带 裂纹 304 不锈钢

An Analysis on Formation and Distribution of Cracks in 2 mm 304 Stainless Steel Concasting Thin Strip

Wang Zhenmin^{1,2}, Fang Yuan^{1,3}, Zhang Yue¹, Huang Yunhua¹ and Qi Junjie¹

(1 School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083;

2 School of Materials Science and Engineering, Anshan University of Science and Technology, Anshan 114044;

3 Baosteel Group Co, Shanghai 200941)

Abstract The morphology and formation of surface and internal crack of 304 stainless steel 1 200 mm × 2 mm casting strip produced by twin-roll concasting process were tested and analyzed by scanning electron microscope (SEM). Due to adopting high thermal conduction copper mould, the surface and internal cracks with length up to 140 mm and depth 0.33 mm occurred in strip and there was delamination phenomenon in strip section. The test results showed that the cooling rate of molten steel in copper mold came to $(1 \sim 4) \times 10^3$ K/s; because strip strand touched low temperature mold roller, the temperature gradient in solidification was up to 10^5 K/m, the internal stress produced by temperature difference and stress concentration led to crack formation; and the inclusions such as MnS, MnO, Cr₂O₃ are crack initiation.

Material Index Concasting Thin Strip, Crack, 304 Stainless Steel

进入 21 世纪, 国外钢铁工业的发展集中在以下领域: 工艺的短流程和近终形; 生产过程的低污染和有利于环保; 轧材性能的高品质化、品种规格的多样化、控制手段的智能化, 即轧钢生产转向质量型、效益型和低成本。其发展特征有两个重要方面: (1) 轧制工艺与前后工序的连续化、紧凑化、节能化和可持续发展; (2) 钢铁企业结构优化, 工厂向合理规模经济和追求灵活化的方向发展(多品种、高质量、少批量、小定货量、最短交货期等), 同时还要达到低成本^[1-3]。薄带钢连铸技术是最符合上述特征的前沿技术之一。

双辊连铸法是薄带钢连铸发展的主要技术, 它是以转动的轧辊为结晶器, 依靠双辊的表面来冷却液态钢水并使之凝固为薄带钢的技术。其特

点是液态金属在结晶凝固的同时承受压力加工并发生塑性变形, 在很短的时间内完成从液态钢水到固态薄带的全过程, 在双辊系统中可以获得组织均匀而厚度差又相对不大的带钢^[4-6]。

薄带钢连铸过程中, 其内部和表面通常会出出现损伤及裂纹, 这种裂纹的存在与扩展将使材料的强度、韧性下降, 不利于后续的加工和使用^[7]。为此, 针对宝钢自主研发的薄带钢连铸机组薄带产品出现裂纹的现象, 利用带有能谱的扫描电镜, 对裂纹周围的组织成分进行了分析, 研究裂纹出现与元素分布和组成的关系, 为生产过程中工艺参数的调整与控制提供依据。

1 实验设备和条件

试验钢为 304 奥氏体不锈钢 0Cr18Ni9, 采用

表 1 304 不锈钢化学成分/%
Table 1 Chemical composition of 304 stainless steel /%

C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Cu	Mo	W	V	Al	Ti
0.08	1.44	0.03	0.012	0.21	8.31	18	0.32	0.04	0.04	0.03	0.002	0.01

电弧炉冶炼,化学成分如表 1。

试验工艺流程:在该机组中由钢水变成薄带的过程如下:电弧炉钢水→钢包座架→中间包→布流器→结晶辊熔池→弧形出带装置→带钢检测系统→活套→夹送辊→(热轧机)→控冷系统→飞剪→卷取机,在线热轧机尚未安装,但预留了位置。连铸工艺参数在表 2 中列出,试验铸机的主要参数如表 3。

表 2 304 不锈钢 2 mm 薄带连铸工艺参数

Table 2 Technical parameters for concasting 2 mm thin strip for 304 stainless steel

钢包容量/ t	中间包容量/ t	浇铸温度/ ℃	浇铸速度/ $m \cdot min^{-1}$	机组年产量/ $10^4 t$
16	6	1 510	60	50

表 3 304 不锈钢试验铸机的主要参数

Table 3 Principal parameters of thin strip concaster for 304 stainless steel

最大铸速/ $m \cdot min^{-1}$	辊面宽度/ mm	结晶辊直径/ mm	铸带厚度/ mm	铸带宽度/ mm
100	1 200	800	2~5	1 000~1 200

本实验结晶辊材质为铜辊,从结晶辊铸出的薄带厚度 2.0 mm,未经轧制变形,经层流冷却后进入卷取机。

2 试验结果与分析

2.1 表面宏观裂纹形貌与形成原因

本次实验生产首次采用铜制结晶辊,它的冷却能力和导热性比铁制结晶辊好,在其它工艺参数不变的情况下,发现铸出的带钢表面上出现了明显的表面裂纹。在 1 200 mm 板宽范围内,横向裂纹长度最长达 140 mm,纵向裂纹最长有 70 mm,通过观察沿裂纹处的带钢截面的氧化情况,发现严重裂纹深度达到带钢厚度的 1/6,约为 0.33 mm。本次生产铸轧的带钢由于裂纹严重,虽无使用价值,但为研究裂纹的成因提供了一个机会。

在近终形连铸法中,获得稳定、良好的表面质量是一个重要的课题,表面的加工质量可归于表面初始粗糙度^[8]。由于采用铜制的结晶辊,在冷却水充分发挥效能的情况下,冷却速度在(1~

$4) \times 10^3 K/s$,薄带接触辊面部分温度低,中间部分温度高,带坯的这两个层面温度相差近千度,凝固区存在着很大的温度梯度,研究表明温度梯度值高达 $10^5 K/m$,又由于铸辊表面存在一定的粗糙度,使得表面内应力分布不均匀和存在应力集中区,当达到一定程度,超过材料的高温强度时,薄带表面出现裂纹。

凝固区的温度分布与浇铸温度、速度、熔池高度等工艺参数有密切的关系。同时薄带通过两铸辊的辊缝时受到挤压,薄带发生形变,易产生残余应力,促使微小的裂纹长大,也是表面裂纹形成和扩展的重要原因。

2.2 薄带内部的裂纹形貌及形成原因

在观察表面裂纹的同时,更加值得关注的是内部裂纹的产生与扩展。将薄带沿纵向和横向裁成 1 mm 的窄条,在每个窄条上,分别选取裂纹严重的位置断开薄带,将薄带纵横断面置于带有能谱的扫描电镜下观察,沿薄带厚度发现多处有明显的裂纹存在,较为严重的情形如图 1(a)所示出现分层现象。进一步观察裂纹发现有些内部裂纹两侧面并非完全分离,还存在相互联系的部分,如图 1(b)所示。

利用 Cambridges-360 扫描电镜的能谱对薄带断面的元素分布进行点分析,扫描点位置呈基本对称分布,分别是(1)明显分离的裂纹两侧点 2 和点 4,(2)点 3 和点 5 位置上金属没有完全分离,(3)薄带基体上点 6。各点的扫描结果见表 4。

由表 4 可见,位于图 1(b)完全分开的裂纹两侧的点 2 和点 4 的 Cr 和 Mn 的化学成分明显高于钢种的平均含量,其中 Cr 含量达到 46.97%,高出平均值近 30%,Mn 含量高出平均值 4~5 倍。点 3 和点 5 位置上金属没有完全分离,其成分分布和正常的基体成分有不同程度的差异,但偏差的程度比上述两点低很多。

不锈钢中合金元素含量丰富,其中 Mn 与 S 的亲合力比钢中其它的元素强,且 Mn 含量较高,易生成 MnS 夹杂物,Mn 和 Cr 与氧的亲合力比 Fe 强,且因含 Cr 量较高,易生成 MnO 和 $Cr_2 O_3$ 夹杂

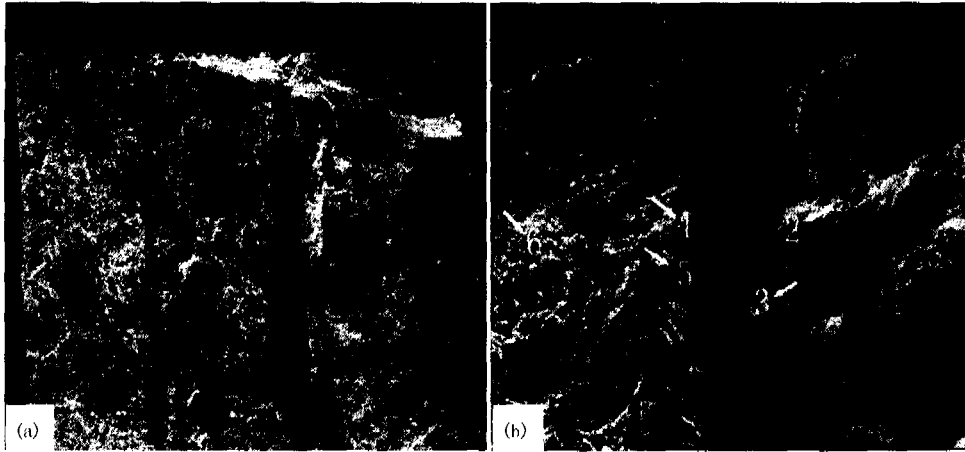


图 1 304 不锈钢连铸薄带断面形貌(a)和内部裂纹两侧点扫描的位置(b)

Fig.1 Morphology of section of 304 stainless steel concasting thin strip (a) and location of scanning points in structure nearby internal crack (b)

表 4 图 1(b)裂纹处组织点扫描元素含量/%

Table 4 Element content at scanning points in Fig.1 (b) structure nearby crack /%

扫描点	Fe	Cr	Mn	备注
2	48.15	41.99	5.99	2,4 点位于完全分开的裂纹两侧
4	43.76	46.97	7.52	
3	72.33	21.12	3.52	3,5 点未完全分离
5	79.82	15.52	2.60	
6	70.77	19.98	1.60	基体正常位置

物。这些夹杂物较难变形,由于热应力和铸轧产生的应力作用,在高温下使夹杂物破碎生成空隙,在铸轧力的作用下会发生与基体脱离,成为裂纹发源地。因该钢中 Ti 含量很少, Cr 易和钢中的 C 结合形成 Cr 的碳化物(Cr₂₃C₆)沿晶界析出,裂纹是否沿晶界产生的问题尚待验证。

3 结论

(1) 表面裂纹的产生与薄带凝固过程中过高的温度梯度有关,由于温差产生的内应力和应力集中,是裂纹产生的根本原因。

(2) MnS、MnO、Cr₂O₃ 等夹杂物的存在,是内

部裂纹的发源地。

(3) 铸轧力的作用,使高温下的夹杂物破碎形成空隙并扩展成为内部裂纹。

参考文献

- 徐才法. 带钢生产新工艺. 钢铁研究, 1999(3): 57
- 朱 铮. 带钢连铸技术的发展和现状. 上海金属, 2000(5): 3
- 张小平, 梁爱生. 近终型连铸技术. 北京: 冶金工业出版社, 2001: 87
- 马少武, 韩华伟, 郝冀成, 等. 异径双辊薄带铸轧熔池中钢液流动特性. 东北大学学报(自然科学版), 1999, 20: 290
- 张 奇. 双辊法连铸薄带凝固特征研究. 上海金属, 1992, 14: 29
- Hugues Legrand, Vli Albrecht-Fruh, Guido Stebner, et al. Stainless Steel Direct Strip Casting Brief Summary of the Current Status Eurostrip. Dr. Manfred Wolf Symposium. Zurich, Switzerland, 2002: 80
- 康向东, 邸洪双, 张晓明. 双辊铸轧薄带钢裂纹形成原因分析. 材料与冶金学报, 2002(6): 106
- Hiroyuki Yasunaka, Kazuyuki Taniguchi, Masahiko Kokita. Surface Quality of Stainless Steel Type 304 Cast by Twin Roll Type Strip Caster. ISIJ International, 1995(6): 784

王振敏(1966-), 女, 讲师, 在读博士生, 从事金属材料工程和成型技术以及连铸薄带成型与组织性能的研究。

收稿日期: 2005-12-01

下 期 要 目

我国凿岩钎具行业的发展	董鑫业等
B ₂ O ₃ 对 CaO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ -MgO-CaF ₂ 五元精炼渣系熔化特性的影响	于学斌等
高碳钢线材轧制组织和性能模型的应用	张云祥等
固溶温度对超级双相不锈钢 00Cr25Ni7Mo4N 组织和性能的影响	吴忠忠等
高塑性 Cr-Mn-Ni-Cu-N 奥氏体不锈钢 YGA201 的研制	徐 军等
轧制工艺对微合金钢 EH420 变形奥氏体中碳氮化物析出的影响	王 洪等