

Analysis of Surface Crack Control in Hot Rolling of Copper Bearing Low Alloy Steel

Xi Cao, Jianfeng Zhou, Shizheng Xie

Technical Center, Lianyuan Iron and Steel Co Ltd., Loudi Hunan
Email: tale-2002@163.com

Received: Feb. 4th, 2020; accepted: Feb. 18th, 2020; published: Feb. 25th, 2020

Abstract

The surface crack of the rolled steel plate containing copper was studied by statistical analysis. The results show that reasonable control of the slab heating time and temperature will avoid the surface crack of the rolled steel plate containing copper and low alloy steel, and the surface quality of the rolled steel coil is well. The key process control parameters are slab temperature controlled below 690°C, liquid steel [S] content less than 0.012%, liquid steel [n] content less than 0.0070%.

Keywords

Copper Bearing Steel, Surface Crack, Heating Process

含铜低合金钢热装轧制表面裂纹控制浅析

曹曦, 周剑丰, 谢世正

湖南华菱涟源钢铁有限公司技术中心, 湖南 娄底
Email: tale-2002@163.com

收稿日期: 2020年2月4日; 录用日期: 2020年2月18日; 发布日期: 2020年2月25日

摘要

针对含铜低合金钢轧制钢板表面裂纹, 经统计分析, 通过优化关键工艺控制参数, 板坯入炉温度控制小于690°C、钢水[S]含量小于0.012%, [N]含量小于0.0070%, 合理控制板坯加热时间和温度, 将避免含铜低合金钢轧制钢板表面裂纹, 轧制钢卷表面质量良好。

关键词

含铜钢, 表面裂纹, 加热工艺

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

连铸坯热装热送工艺能有效减低能耗, 提高生成节奏, 降低生产成本[1] [2] [3]。目前, 连铸坯热装主要有两种形式: 1) 连铸坯直接热装轧制(CC-DHCR), 连铸坯温度在 A3~A1 之间, 铸坯直接送加热炉加热后轧制, 铸坯组织经过 $\gamma \rightarrow \alpha \rightarrow \gamma$ 相变, 易造成混晶组织, 对部分低合金钢和中、高碳钢, 容易析出 AlN, 而在铸坯表面产生裂纹缺陷[4] [5] [6]; 2) 连铸坯热装轧制(CC-HCR), 连铸坯温度在 A1 以下(高于 400℃), 铸坯未完全冷却前送保温设备进行保温, 然后送加热炉加热后轧制, 但在冷却过程中容易产生裂纹, 导致铸坯表面质量变差。

湖南华菱涟源钢铁有限公司(下文简称涟钢)生产含铜低合金钢(A36-CU)时采用热装热送工艺, 但在轧制过程中容易产生裂纹缺陷, 对产品质量和成品合格率产生较大影响。本文结合生产实践, 对含铜低合金钢采用热装热送工艺出现表面裂纹问题分析, 探讨表面裂纹产生与工艺参数的关联性。

2. 热轧含铜低合金钢板的生产工艺

A36-CU 钢生产工艺路线为: 铁水脱硫(KR) → 顶底复吹转炉(BOF) → 电弧炉精炼(LF) → 连铸坯直接热装轧制(CC-DHCR)。产品采用常规 LF 精炼工艺, 连铸拉速控制在 1.1~1.5 m/min, 铸坯断面 230 × (1500~2000) mm, 加热炉温度约 1220℃, 加热时间 180~300 min, 开轧温度 1100℃, 精轧开轧温度 920℃, 卷曲温度 630℃。产品的主要化学成分如下表 1。

Table 1. Chemical composition of A36-CU steel, wt%

表 1. A36-CU 钢种化学成分, wt%

C	Si	Mn	P	S	Cu	Als
0.14~0.17	0.10~0.30	0.25~0.40	≤0.030	≤0.015	0.25~0.35	0.006~0.045

3. 表面缺陷形貌和降等钢板铸坯入炉情况

通过热轧在线表面检测仪系统, 板坯轧制后在表面检测系统发现钢卷表面对缺陷进行分析, 热轧钢板的表面裂纹形貌大致为“起皮”状裂纹, 裂纹严重程度不一, 其缺陷情况如图 1 所示。

通过对表面裂纹发生率和铸坯入炉温度进行统计分析, 结果如表 2 所示。当入炉温度低于 650℃时, 未发现轧制钢卷中有裂纹的缺陷出现。而随着温度的升高, 裂纹发生率快速增加, 当温度入炉温度大于 690℃时, 钢卷裂纹发生率达到 15.8%。

同时, 对表面裂纹发生率和钢水成分进行统计分析, 结果如表 3 所示。从表中可以看出, 当入炉温度大于 650℃时, 当钢水中[S]含量大于 0.012%时, 裂纹发生率为 12.5%, 当钢水中[N]含量大于 0.007%时, 裂纹发生率为 17%。

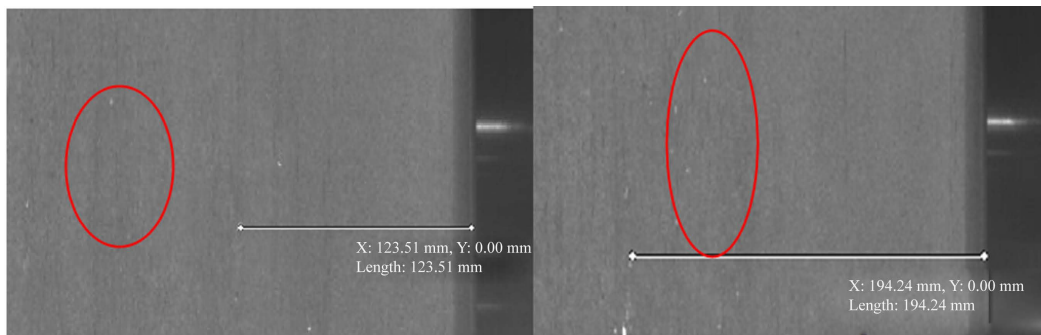


Figure 1. Macro morphology of surface cracks in hot rolled steel plate

图 1. 热轧钢板表面裂纹宏观形貌

Table 2. Occurrence rate of surface crack of steel coil with different furnace temperature

表 2. 不同入炉温度钢卷表面裂纹发生率

板坯入炉前温度, °C	轧制钢卷裂纹发生比例, %
<450	0
451~650	0
651~690	3.9
>690	15.8

Table 3. Occurrence rate of surface crack of steel coil caused by chemical composition

表 3. 钢水硫、氮含量对钢卷表面裂纹发生率

钢水硫含量	装炉温度	轧制钢卷裂纹发生比例, %
>0.012%	≥650	12.5
钢水氮含量		轧制钢卷裂纹发生比例, %
>0.007%	≥650	17

4. 钢板裂纹缺陷检测分析

对热轧板裂纹缺陷处进行取样分析。采用线切割切取裂纹试样，经打磨、抛光、腐蚀后，分别使用徕卡显微镜(DM6000)、扫描电镜和能谱分析(SEM-EDX, ZEISS-MERLIN)，观察裂纹附近的组织和形貌，检测结果如图 2、图 3 所示。

从图 2 中可以看出，基体组织主要为铁素体和珠光体，裂纹处晶粒相对粗大，在裂纹处有氧化圆点和一定的脱碳层，裂纹主要沿晶界处开裂。

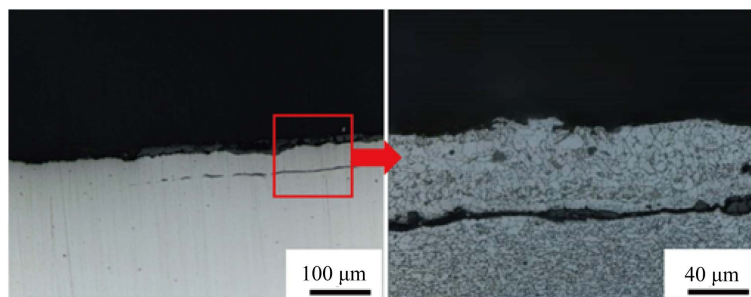


Figure 2. Micro morphology of surface cracks in hot rolled steel plate

图 2. 热轧钢板表面裂纹微观形貌

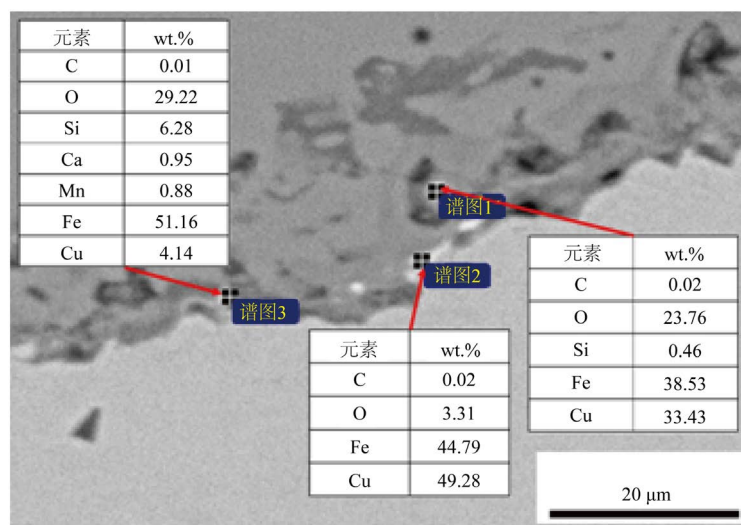


Figure 3. Results of SEM-EDX
图 3. 显微能谱分析结果

从图 3 中可以看出, 裂纹处存在大量的氧化铁, 以及 Cu 元素的富集等。铸坯在加热和保温过程中, 发生表面氧化, 而铁优先于铜氧化, 导致铜表面富集。如果连铸坯在入炉前出现有裂纹, 氧通过裂纹向内扩散, 这也加剧了铜的析出和晶界弱化[7] [8]。

采用投射电解对裂纹处析出物进行扫描分析, 结果如图 4 所示。从能谱分析结果来看析出物主要为 TiN 和 AlN, 并且 700℃析出物量多且平均尺寸较大。这类细小的析出物对热轧板高温力学性能有较大的影响。

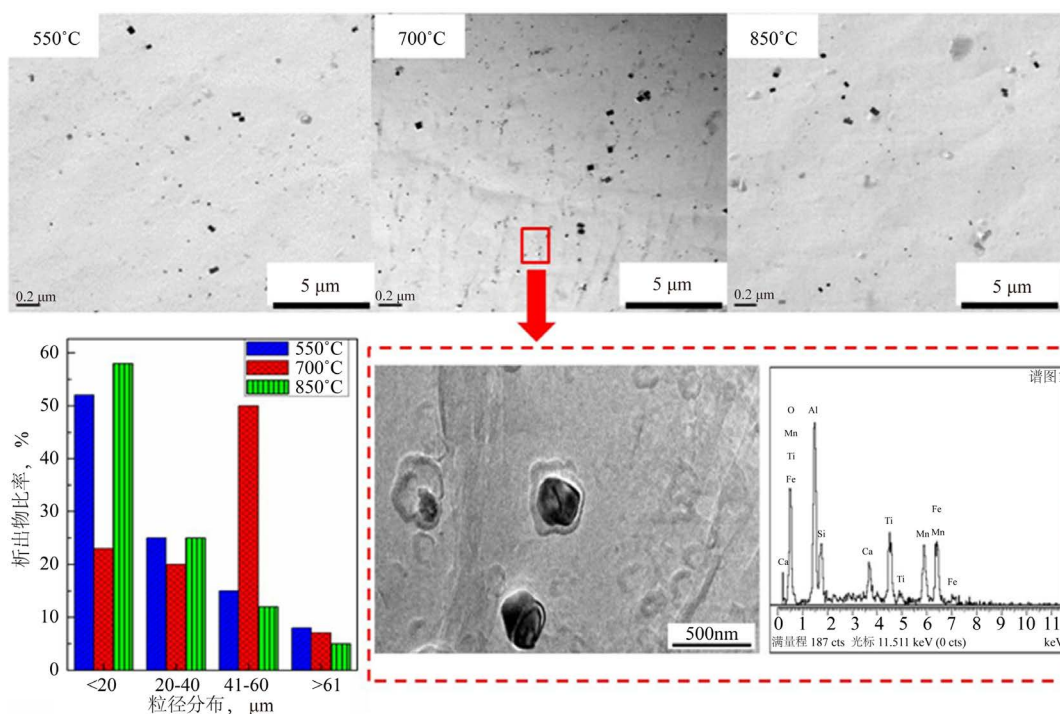


Figure 4. Results of SEM-EDX of precipitates from hot rolled slab at 550°C, 700°C and 850°C
图 4. 550℃、700℃和 850℃入炉板坯热轧钢板析出物形貌和能谱分析

当带有两相区组织的连铸坯进入加热炉后,铁素体将转变成奥氏体。大多数析出物是分布在晶界上,相当于在钢的基体中聚集,析出物尺寸粗大,在粗轧过程中当受到应力大于晶界强度极限时,会在钢材表面发生开裂现象(如图5所示)。

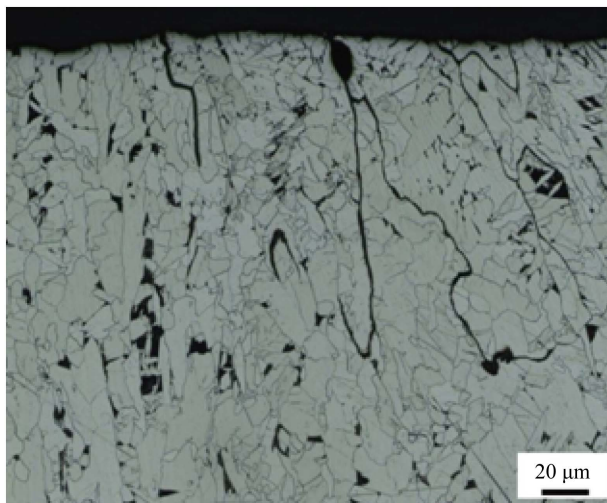


Figure 5. Morphology of crack along grain boundary
图5. 裂纹沿晶界形貌

5. 工艺分析

针对钢卷生产缺陷,从冶炼和轧制工艺参数进行了统计分析,板坯入热炉温度 $\geq 690^\circ\text{C}$ 有 25 块都出现有不同程度的钢卷表面缺陷。分析认为主要由以下因素导致。

1) **入炉温度的影响。**由式(1)(2)可计算出该钢种的 Ar_3 约为 866°C , Ac_1 约为 704°C , 而根据经验 $Ar_1 = Ac_1 - 50^\circ\text{C} = 654^\circ\text{C}$ 。

$$Ar_3 (^\circ\text{C}) = 910 - 209.5C - 122.6Mn + 78.5Si + 287.5Nb - 80Mo - 15Cr + 700P \quad (1)$$

$$Ac_1 (^\circ\text{C}) = 723 - 10.7Mn - 16.9Ni + 29.1Si + 16.9Cr + 290As + 6.38W \quad (2)$$

当入炉温度大于 690°C 时,铸坯组织处于 $\gamma + \alpha$ 两相区。铸坯在冷却过程中组织部分经过了 $\gamma - \alpha$ 相变,而在加热过程中铸坯组织再次发生 $\alpha - \gamma$ 相变,开轧组织既有原始粗大的奥氏体晶粒,又有经过相变细化的奥氏体晶粒,对应的轧后组织不均匀且晶粒平均直径较大。而冷装生产工艺铸坯冷却到室温时铸坯内部组织全部发生了 $\gamma - \alpha$ 相变,再次加热到 1200°C 进行轧制时,又经历了一次 $\alpha - \gamma$ 相变,二次相变使开轧组织变成更为细小的晶粒组织,对应的轧制后组织更为细小均匀。因此,铸坯热装是铸坯组织需要铁素体组织,铸坯装炉温度控制在 Ar_1 温度以下。

2) **钢水成分的影响。**[S]元素只能溶于液态钢水中,在固态中几乎不能溶解,而是以 FeS 形式存在于固态钢中[9] [10]。FeS 存在于晶界,引起钢的高温热脆性。同时如果钢中氧含量高,还会生成熔点更低的 Fe + FeS + FeO 三相共晶体。所以,钢水需要脱氧良好,同时适当增加钢中的锰,因为锰的化学亲和力大于铁与硫的结合力,钢中的硫与锰形成 MnS,避免了 FeS 的形成。MnS 的熔点高,在高温下有一定的塑性。

连铸过程中钢的低温塑性与钢中的氮含量密切相关,钢液中的[N]高则容易与[Al]生产 AlN,而 AlN 析出的高峰温度约在 850°C , AlN 析出导致低温塑性的降低,如果 AlN 沿奥氏体晶界析出,在应力的作

用下析出物附近形成裂纹。

3) **加热温度和加热时间。**加热温度对含铜钢表面的氧化过程有一定的影响。加热温度升高,含铜钢的氧化程度加剧,表面氧化层厚度增加。研究表明[11] [12] [13],加热温度低于 1100℃时,板坯氧化速度随加热温度升高增加缓慢,氧化过程主要沿表面和晶界进行,氧化的速率较低;加热温度在 1100~1200℃时,氧在铁中的扩散速度迅速增加,晶内氧化逐渐占主导,氧化速度随加热温度升高迅速加快;而加热温度超过 1200℃后,由于晶内的氧化物迅速生成以及氧化活性较低的合金元素在基体与氧化层界面富集,阻止了氧化反应的速度,基体与氧化层界面处发生氧化反应区域的宽度和氧化层厚度出现。同时,加热时间对板坯氧化层也有一定的影响。

6. 结论

- 1) 含铜低合金钢铸坯组织与热装工艺有密切的关联。在大于 700℃热装时,钢的组织为 γ - α 两相混合组织,容易造成铸坯应力集中,导致铸坯产生热装裂纹。
- 2) 钢水[S]、[N]控制偏高,相关的析出物沿晶界分布,弱化了晶界的强度,增加了产生裂纹的倾向。
- 3) 板坯加热温度和加热时间对含铜低合金钢轧制钢板表面裂纹有明显的影晌。
- 4) 通过限制板坯入炉温度控制小于 650℃、控制钢水[S]含量小于 0.012%、[N]含量小于 0.0070%后,含铜低合金钢未再发生热装裂纹缺陷。

参考文献

- [1] 李振明. 连铸坯热装热送技术在炼轧厂的应用[J]. 酒钢科技, 2012(3): 228-233.
- [2] 汪永国, 谷海容, 霍俊, 等. 热装热送工艺技术的生产实践[J]. 安徽冶金, 2016(3): 46-48.
- [3] 王洁, 骆正荣. 梅钢热装热送工艺[J]. 梅山科技, 2010(1): 63-64.
- [4] 陈红雨, 于长春, 张建方. 宁波钢铁连铸坯热装热送生产实践[J]. 山东冶金, 2012, 34(1): 57-58.
- [5] 孙成礼, 林健. 热轧板坯热装热送技术的应用[J]. 新疆钢铁, 2014(1): 9-13.
- [6] 王志刚. 直装工艺造成的表面缺陷机理研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉科技大学, 2010.
- [7] 程秀英, 刘宇. 热装热送板坯加热炉模型参数优化[J]. 特钢技术, 2012, 18(1): 44-45.
- [8] 邓新跃. 2250 热装热送问题及改造方案研究[J]. 涟钢科技与管理, 2018(2): 37-39.
- [9] 万潇, 白松莲, 白学军. 连铸坯热装热送技术的应用[J]. 河北冶金, 2016(10): 54-56.
- [10] 李卓. 热装热送对 82B 成品表面质量影响浅析[J]. 酒钢科技, 2012(3): 177-180.
- [11] 陈小龙, 余轶峰, 董苑华. 柳钢热送热装技术应用浅析[J]. 柳钢科技, 2014(6): 23-26.
- [12] 喻云龙. 热送热装技术在中小型钢厂的应用[J]. 钢铁研究, 2010, 38(4): 36-38.
- [13] 刘钊. 热送热装过程的温度场应力场数值模拟及二次开发[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉科技大学, 2010.