

CM690 锚链钢发纹缺陷形成分析和工艺改善

马建超¹ 石可伟² 杨 颀²

(1 江苏省(沙钢)钢铁研究院,张家港 215625; 2 江苏沙钢集团淮钢特钢股份有限公司,淮安 223002)

摘 要 CM690 锚链钢的生产流程为铁水预处理-80 t BOF-LF-RH-200 mm × 200 mm 方坯连铸-轧制成 Φ50 mm 圆钢工艺。钢材分析结果表明,酸蚀过程中,CM690 钢(∕%:0.29C,0.21Si,1.58Mn,0.017P,0.012S,0.017Ti)中条串状 MnS、TiN 夹杂物及其周围带状富碳组织被腐蚀形成发纹状缺陷,另外,富碳贝氏体和珠光体亦逐渐腐蚀。通过控制 RH 终点[S]0.004%~0.007%, [N]从原 55×10^{-6} ~ 70×10^{-6} 降至 40×10^{-6} ~ 50×10^{-6} , 钢水过热度从 25~40 ℃ 降至 25~35 ℃, 控制连铸拉速在 1.3 m/min, 二冷比水量由 0.35 L/kg 增至 0.40 L/kg, 基本消除了钢中的发纹缺陷。

关键词 CM690 锚链钢 发纹 MnS TiN 带状组织

Analysis on Capillary Crack Defect in Anchor Steel CM690 and Process Improvement

Ma Jianchao¹, Shi Kewei² and Yang Xie²

(1 Jiangsu Province (Shasteel) Research Institute of Iron and Steel, Zhangjiagang 215625;
2 Huaigang Special Steel Co Ltd, Jiangsu Shagang Group, Huai'an 223002)

Abstract The production flowsheet for anchor steel CM690 is hot metal pretreatment-80 t BOF-LF-RH-200 mm × 200 mm billet casting-rolling to Φ50 mm round bar process. The products analysis results show that during acid etching process the string cluster MnS and TiN inclusions with around banded rich carbon structure in steel CM690 (∕%:0.29C,0.21Si,1.58Mn,0.017P,0.012S,0.017Ti) are corroded to form capillary crack defect, and the rich carbon bainite and pearlite also corroded gradually. With controlling RH end [S] 0.004%~0.007%, decreasing [N] from original 55×10^{-6} ~ 70×10^{-6} to 40×10^{-6} ~ 50×10^{-6} , decreasing liquid superheating extent from 25~40 ℃ to 25~35 ℃, controlling casting speed 1.3 m/min and increasing secondary cooling water ratio from 0.35 L/kg to 0.40 L/kg, the capillary crack defects in steel products are basically eliminated.

Material Index Anchor Steel CM690, Capillary Crack, MnS, TiN, Banded Structure

发纹是钢中的一种宏观缺陷,指钢的塔形车削试样经酸蚀法或磁粉法显示出的、呈纵向分布的细小沟纹^[1-5]。发纹一定程度上危害着钢的力学性能,因此用于制造重要机件的钢材,对发纹的数量、大小和分布状态都有严格的限制^[6-9]。

产生发纹的原因是复杂的,一般来说,凡是在锻轧加工后能在钢材内部造成和加工方向垂直的形如毛发、细长条状、不连续性缺陷的因素都可能产生发纹^[1]。因此,对不同条件、不同钢种的发纹,应进行具体的研究分析,以便找出相应的发纹形成原因及对策。

钢厂生产的 CM690 锚链圆钢在采用 GB/T15711-1995 标准进行塔形发纹酸蚀检测时,经常出现发纹缺陷而造成产品返废。为提高钢材质量,减少发纹缺陷,本文通过对 CM690 锚链圆钢酸蚀过程进行跟踪分析,探索了发纹缺陷的形成机理,并提出了相应的改善措施,基本消除了发纹缺陷。

1 CM690 生产工艺及控制要点

CM690 锚链圆钢的生产工艺为:铁水预处理→80 t BOF 冶炼→90 t LF 精炼→90 t RH 真空脱气→200 mm × 200 mm 方坯连铸→轧制→Φ50 mm 圆钢。

转炉出钢 C 控制在 0.09%~0.12%, 出钢温度 ≥1 630 ℃, 出钢时加入 1.2~2.2 kg/t 电石和 1.5~2.5 kg/t 铝锭进行预脱氧,再加入 700 kg 预熔精炼渣和 500 kg 石灰造还原渣。到精炼工位钢水温度 ≥1 520 ℃, 根据渣况补加石灰或调渣剂,保证精炼渣良好的流动性;精炼渣碱度控制在 4.3~5.7, 主要成分(%): 52.6~58.9CaO, 8.1~12.7SiO₂, 17.1~27.3Al₂O₃, 4.4~6.9MgO; 精炼完毕出钢后至 RH 处理前进行软吹氩。RH 快速抽真空至 100 Pa 以下保持 15 min, 破空后软吹氩 20 min。RH 处理后钢水中 T[O] 为 18×10^{-6} ~ 27×10^{-6} , [N] 控制在 55×10^{-6} ~ 70×10^{-6} 。试验炉次 CM690 钢化学成分如表 1 所示。

表 1 试验 CM690 钢成品化学成分 / %

Table 1 Analysis of test steel CM690 / %

C	Si	Mn	P	S	Ti
0.29	0.21	1.58	0.017	0.012	0.017

连铸采用全程保护浇注,第 1 炉开浇前向中间包内充入氩气。连铸比水量 0.35 L/kg,连铸拉速 1.3 ~ 1.4 m/min,钢水过热度 25 ~ 40 °C。进行 300 A,5.5 Hz 结晶器电磁搅拌和 220 A,11 Hz 末端电磁搅拌。

2 发纹缺陷特征

用户对发纹要求总换算个数 20 以下,总长 15 mm 以下,发纹最大长度 5 mm 以下,其中发纹起算长度为 1 mm、同一母线上间距小于 2 mm 的发纹计为 1 条。CM690 锚链圆钢塔形样品在发纹酸蚀过程中经常在第 2 阶梯上发现发纹缺陷,如图 1(a)所示。进一步截取样品发纹缺陷部分在扫描电镜进行观察分析,发现发纹缺陷具有一定的深度和宽度,均为 50 μm 左右,但在其内部观察不到有明显的夹杂物等存在,如图 1(b)所示。根据朱学仪的分析^[5],发纹通常是由于钢中夹杂物在压力加工后变形,经过浸蚀夹杂物脱落而形成,因此,很难从酸蚀样品发纹缺陷查找出造成发纹缺陷的原因。

3 发纹缺陷形成过程分析

为弄清发纹缺陷的形成原因,截取第 2 阶梯附近的纵截面样品,研磨抛光后直接放在扫描电镜(SEM)下进行观察分析。观察发现,在第 1 阶梯附近纵截面处,发现该位置区域存在较多的条串状夹杂物。采用电子探针(EMPA)对条串状夹杂物进行面扫描分析,发现条串状夹杂物主要是 MnS,条串附近分布有 TiN 夹杂,如图 2 所示。从图 2 可以看出,条串状 MnS 和 TiN 夹杂宽度仅为 1 ~ 2 μm。那么,1 ~ 2 μm 的串状夹杂物是否会形成具有发纹缺陷

呢,有必要进行进一步分析。

为进一步弄清发纹的形成原因,取第 2 阶梯附近带有条串状 MnS 和 TiN 夹杂物的纵向样品,将条串状夹杂附近采用压痕标记,如图 3(a)所示。标记后样品先用 4% 的硝酸酒精溶液擦拭浅腐蚀来观察其金相组织,浅腐蚀后发现该处为铁素体、珠光体及贝氏体相间的带状组织,其中串状 MnS 和 TiN 夹杂分布在贝氏体组织区域,并未发生脱落现象,如图 3(b)所示。再采用 GB226-1991 钢的低倍组织及缺陷酸蚀检验法进行发纹检验,将样品浸入 70 °C 的容积比 1:1 工业盐酸水溶液浸蚀不同时间后进行观察,研究串状夹杂物及其周围组织在浸蚀过程中的变化过程。结果表明,浸蚀 10 s 后,长条状 MnS 已脱落, TiN 夹杂未发生脱落,见图 3(c);浸蚀 2 min 后, MnS 周围基体出现腐蚀, TiN 夹杂周围基体也出现腐蚀现象, TiN 夹杂与基体间出现缝隙,见图 3(d);浸蚀 4 min 时, TiN 夹杂脱落, TiN 和 MnS 周围基体腐蚀加剧,贝氏体组织也由于发生腐蚀变得疏松,见图 3(e);当腐蚀到 7 min 时,夹杂物已基本脱落,贝氏体组织和珠光体组织均发生了腐蚀,其中标记处贝氏体组织由于腐蚀严重形成沟槽,珠光体组织相对较浅,而铁素体组织腐蚀最浅,见图 3(f)。从图 3(e~f)还可以看出,一旦沟槽缺陷形成,其周围基体的腐蚀速度显著增加。

在酸蚀过程中,夹杂物是钢中主要点蚀诱发源,钢基体与夹杂物交界处的钝化膜保护作用最弱,在热酸溶液中浸蚀时,钝化膜首先在夹杂物边界部位破裂,在钢表面形成腐蚀斑,并导致腐蚀斑附近的电位不断下降,加速腐蚀的进行^[10]。同时,夹杂物的成分及形态的不同都会影响到腐蚀的继续进行^[10-13]。

酸蚀试验结果表明,CM690 钢中条串状硫化锰夹杂物最先腐蚀脱落,而小块状 TiN 夹杂在酸浸一段时间后才逐渐腐蚀脱落。陈学群等认为^[11]:MnS 夹杂物优先腐蚀是由于钢基体与硫化物交界处不仅钝化膜薄弱,而且相界面原子排列也混乱,铁原子的内能高,离子化趋势大,所以导致钝化膜首先在硫化物边界部位破裂。通常硫化锰夹杂物在连铸坯凝固过程中以球状析出,在后续的热轧过程中沿轧

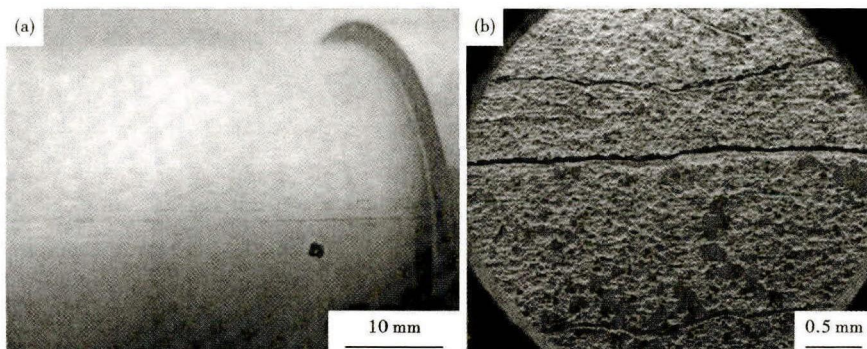


图 1 CM690 钢塔形样品上的发纹缺陷形貌:(a)宏观;(b)SEM

Fig. 1 Macro (a) and SEM (b) morphology of capillary crack defect at stepped sample of steel CM690

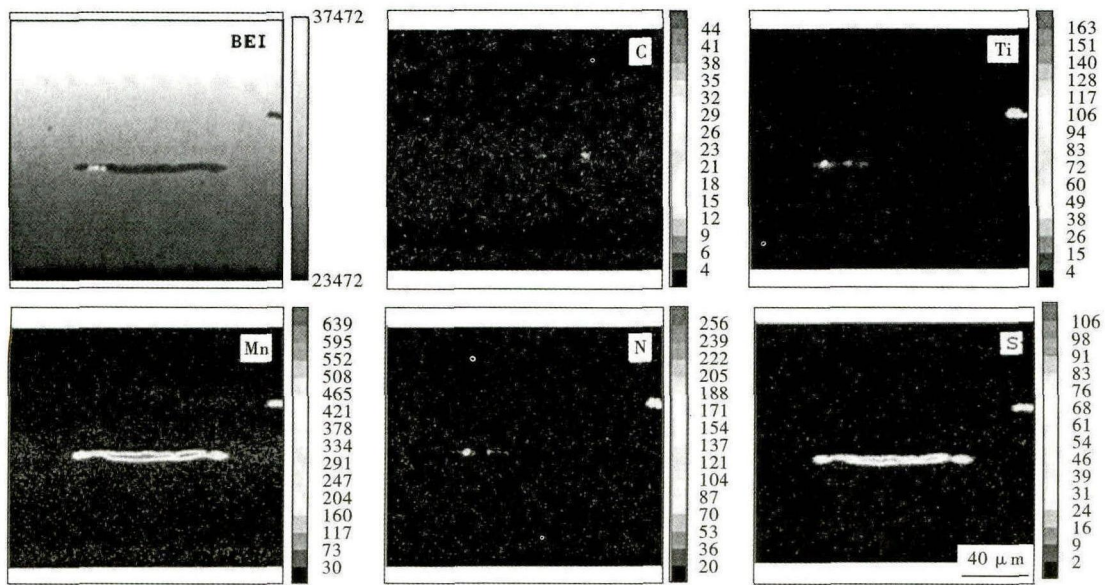


图2 条串状夹杂物电子探针(EMPA)面扫描结果
Fig.2 Scanning maps of elements in string inclusions by EMPA

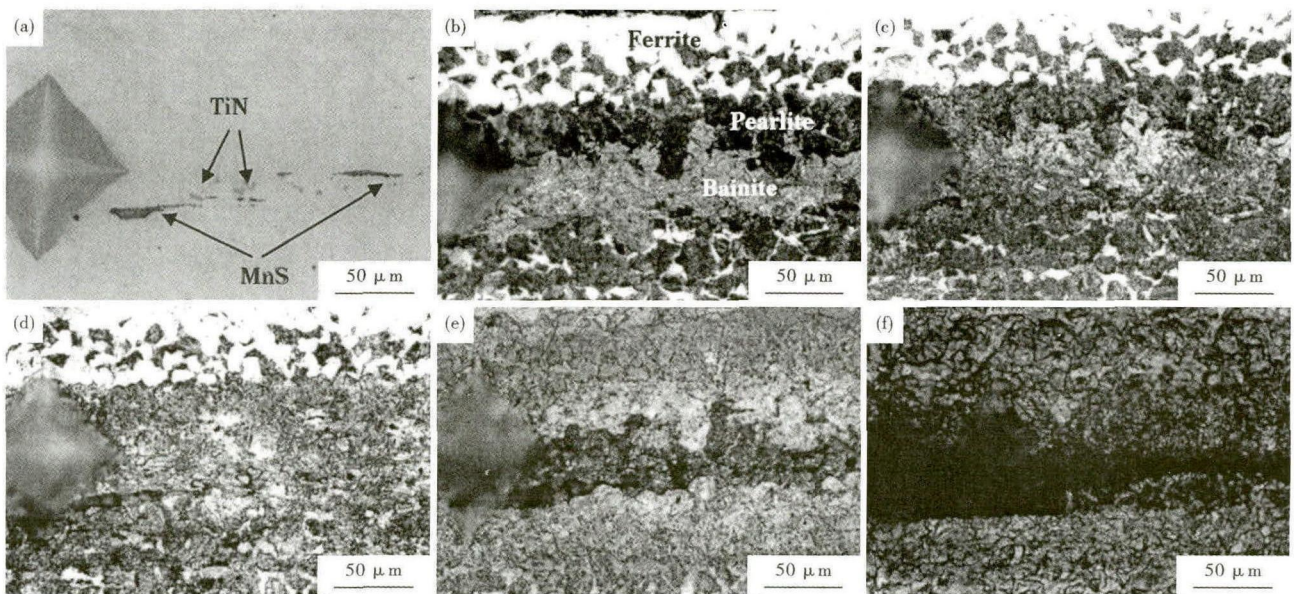


图3 CM690 钢的组织形貌:(a)未腐蚀;(b)硝酸酒精腐蚀;热浸蚀(c)10 s;(d)2 min;(e)4 min;(f)7 min
Fig.3 Morphology of structure steel CM690: (a) without etching; (b) nitric acid alcohol etching; hot etching for 10 s (c); 2 min (d) 4 min (e) and 7 min (f)

制方向变形为条串状,导致硫化锰与钢基体界面面积增加,加剧了硫化锰夹杂物的腐蚀趋势,因此条串状硫化锰夹杂物在酸蚀过程中由于钝化膜破裂而发生腐蚀。另外,TiN 夹杂物腐蚀脱落较慢可能与其为尺寸较小的块状有关。

另外,钢的显微组织也对钢的耐蚀性有较大的影响,通常碳钢为铁素体+珠光体(+贝氏体)组织,由于各相中C、Mn 等元素含量不同,各相间电位差较大,不同类型的晶粒易形成腐蚀微电池,导致阳

极溶解,发生腐蚀。在有带状组织的样品中,腐蚀锈层沿带状组织中的富碳相生长,而铁素体可抑制腐蚀沿带状组织的横向发展,随着碳含量增加,腐蚀深度增加^[13-14]。对图3(b)中不同组织处采用 EPMA 进行 C、Si、Mn 元素分析发现,铁素体、珠光体和贝氏体3 种组织中元素含量依次增加,如表2 所示。因此,由于钢中组织的不均匀性,不同类型组织间形成微电池,富碳相优先发生腐蚀,因此钢中合金含量最高的贝氏体组织优先腐蚀。另外由于MnS、TiN

表 2 图 3(b) 中基体, 铁素体, 珠光体和贝氏体中的 C、Si、Mn 含量 / %

Table 2 C, Si and Mn content in matrix, ferrite, pearlite and bainite in Fig. 3 (b)

位置	C	Si	Mn
圆钢	0.29	0.21	1.58
铁素体	0.24	0.14	1.35
珠光体	0.31	0.23	2.20
贝氏体	0.34	0.25	2.35

等夹杂物主要分布在贝氏体组织区域, 也加剧了贝氏体组织的腐蚀速度。

跟踪 CM690 连铸坯低倍发现, 圆钢第 2 阶梯台阶附近的带状组织与方坯内部对应位置存在较多点状半宏观偏析有关。在凝固末期, MnS、TiN 这些低熔点夹杂物容易在 Mn、S、Ti 等元素含量较高的半宏观偏析区域析出长大。在热轧后的冷却过程中, 连铸坯中半宏观偏析区由于来不及发生充分扩散, 在发生相变时铁素体优先在由枝晶偏析和非金属夹杂延伸而成的条带中形成, 导致铁素体形成条带, 铁素体条带之间为珠光体组织, 其中偏析最严重的区域在轧后冷却过程中可以形成贝氏体组织。在酸蚀过程中, 这些带状富碳组织及分布在其中的条串状夹杂物成为腐蚀薄弱区域, 逐渐被腐蚀脱落而形成发纹缺陷。

4 发纹缺陷的改善

根据以上分析, CM690 圆钢发纹缺陷是酸蚀过程中形成的头发状缺陷, 是由于钢中 MnS、TiN 夹杂物及其周期带状富碳组织在酸蚀过程中被腐蚀脱落而形成的, 而圆钢中的带状组织和条串状 MnS、TiN 夹杂物聚集区是由连铸坯中半宏观偏析所导致的。

因此, 为减轻钢材中的发纹缺陷, 生产过程中铁水预处理工艺要求将铁水 S 含量控制在 80×10^{-6} 以下, RH 采用最高真空度 67 Pa, 并保持 15 min, RH 出钢后钢中 S 含量控制在 $40 \times 10^{-6} \sim 70 \times 10^{-6}$, N 含量控制在 $40 \times 10^{-6} \sim 50 \times 10^{-6}$ 。连铸过程中采用全保护浇铸, 控制钢水从 RH 出钢至连铸过程增氮量在 10×10^{-6} 以内。为减轻连铸坯中半宏观偏析, 中间包钢水过热度控制在 $20 \sim 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 拉速稳定在 1.3 m/min, 二冷比水量增加至 0.40 L/kg, 连铸前检查二冷喷嘴和喷淋架对中情况, 保证二冷效果良好。通过以上措施, CM690 连铸坯内部半宏观偏析有所改善, 轧材中带状组织有较好的改善, 客户对成品材发纹检测, 未发现有明显发纹缺陷。

5 结论

(1) CM690 圆钢酸蚀发纹缺陷是钢中条串状 MnS、TiN 夹杂物及其周围带状富碳组织在酸蚀过程中被腐蚀脱落而形成的发纹状缺陷, 而连铸坯内部半宏观偏析是带状组织与条串状夹杂物聚集区形成的主要原因。

(2) 在酸蚀过程中, 条串状 MnS 夹杂物周围基体优先腐蚀, 随着酸蚀时间增加, TiN 夹杂物周围基体逐渐发生腐蚀; 另外, 富碳贝氏体和珠光体组织在浸蚀过程中逐渐腐蚀脱落, 且随着碳含量增加, 对应组织腐蚀程度增加。

(3) 通过降低钢水中 S、N 含量, 适当降低中间包钢水过热度, 稳定拉速在 1.3 m/min, 增加二冷比水量至 0.40 L/kg, 加强二冷设备维护等措施, 发纹缺陷基本消除。

参考文献

- [1] 何镇乾, 陈继志, 冯梦菊, 等. 30CrMnSi 钢中发纹问题的研究[J]. 金属学报, 1959, 4(2): 114-126.
- [2] 马振洲, 何祝根. 钢材的内在质量[J]. 热处理技术与装备, 2008, 29(5): 73-74.
- [3] 袁金才, 于维成, 臧启山, 等. 发纹的微观本质及其对疲劳性能的影响[J]. 铁道学报, 1987, 9(4): 85-92.
- [4] 隋 然. 有关钢材发纹、分层、偏析和脱碳的标准规定[J]. 冶金标准化与质量, 1998(5): 14-16.
- [5] 朱学仪. 钢的检验-宏观检验之二[J]. 海南矿冶, 1996(3): 44-48.
- [6] 王智勇, 高 斌, 仇亚军, 等. 钢球表面缺陷分析[J]. 轴承, 2007(11): 37-38.
- [7] 王加符. 20G 钢板断口发纹缺陷的研究[J]. 鞍钢技术, 1992(3): 27-31.
- [8] 周 勇. 20 钢水平连铸圆管坯轧制的钢管内部发纹研究[J]. 轧钢, 2002, 19(1): 25-27.
- [9] 闫立懿, 郭东章, 魏海荣, 等. 不锈钢发纹的研究与对策[J]. 钢铁研究学报, 1995, 7(4): 6-10.
- [10] 张春亚, 胡裕龙, 王国荣, 等. 低碳钢点蚀诱发部位的实验研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2007, 19(3): 174-177.
- [11] 陈学群, 陈德斌, 孔小东. 低碳钢中硫化物夹杂诱发点蚀的机理[J]. 海军工程学院学报, 1997(1): 1-9.
- [12] 谷 岚, 纪世普. 带状组织及硫化物对钢铁在海水中腐蚀行为的影响[J]. 海洋科学, 1982(4): 30-32.
- [13] 米丰毅, 王向东, 汪 兵, 等. 微组织对低碳钢耐蚀性的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2010, 30(5): 391-395.
- [14] 郭 佳, 杨善武, 尚成嘉, 等. 碳含量和组织类型对低合金钢耐蚀性的影响[J]. 钢铁, 2008, 43(9): 58-62.

马建超(1978-), 男, 博士(中国科学院金属研究所), 高级工程师, 2001 年沈阳工业大学(本科)毕业, 炼钢连铸工艺优化及质量控制. E-mail: majianchao@126.com

收稿日期: 2014-12-27