

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1005-4006.20190106

枝晶腐蚀低倍检验技术在连铸生产中的应用

杨擷光¹, 许庆太¹, 马 宁²

(1. 沈阳市启光科技有限公司, 辽宁 沈阳 110004; 2. 包头市三合信息技术有限公司, 内蒙古 包头 014010)

摘 要: 简述了枝晶腐蚀低倍检验技术在连铸生产中的应用。结果表明, 枝晶腐蚀低倍检验方法不仅能够非常清晰地显示连铸坯中的缺陷和铸坯凝固组织全貌, 而且提供了优化工艺和提高钢材质量的有效途径。同时, 在此次检验中, 采用砂带磨削代替砂轮磨削可大幅度缩短制样的时间并提高制样的质量。

关键词: 枝晶腐蚀; 砂带磨削; 砂轮磨削; 电磁搅拌; 等轴晶率

文献标志码: A **文章编号:** 1005-4006(2020)03-0022-05

Application of low-power test for dendritical etching in continuous casting

YANG Xie-guang¹, XU Qing-tai¹, MA Ning²

(1. Shenyang Qiguang Science and Technology Co., Ltd., Shenyang 110004, Liaoning, China;

2. Baotou Sanhe Information Technology Co., Ltd., Baotou 014010, Nei Mongol, China)

Abstract: Application of low-power test technology for dendritical etching in the continuous casting production is introduced. The results show that the low-power test of dendritical etching can not only show the defects in continuous casting billet and the details of solidification structure, but also provide an effective way to optimize the process and improve the quality of steel. At the meantime, using belt grinding instead of grinding wheel can greatly shorten the time of sample making and improve the quality of sample making.

Key words: dendritical etching; belt grinding; wheel grinding; M-EMS; equiaxed grain rate

随着钢铁冶金技术的发展, 低倍检验方法也在不断地完善和创新。当钢中硫质量分数较高时, 硫分布与钢中缺陷有直接关系, 硫印检验是检验钢质量简单且有效的方式。而当钢中 $w(S) \leq 0.005\%$ 时, 硫不易发生偏析, 且硫印检验已无法反映出C和Mn元素的偏析状况, 于是, 人们便研发出热酸腐蚀和电解腐蚀检验方法。而连铸工艺成熟并大范围应用后, 由于试样尺寸较大, 热酸腐蚀和电解腐蚀方法的低倍检测有诸多不便, 例如: 热酸腐蚀会伤害检测人员的身体, 高浓度酸性废液的处理和电解腐蚀会受到电解槽尺寸的限制, 同时对被检测试样的尺寸也有严格的要求, 而冷酸腐蚀检验方法可有效改善这一问题^[1-3]; 同时, 为了提高钢材的力学性能, 大量学者开始优化凝固条件, 研究出可显示铸坯缺陷和凝固组织的枝晶腐蚀低倍检验方法^[4-5]。硫印、热酸、电解和冷酸这4种方法统称为传统检验方法, 在中国各冶金核装备制造企业中广泛使用, 而枝晶腐蚀低倍检验方法, 在国内只有鞍钢和少数钢厂中

得以应用^[6]。

枝晶腐蚀低倍检验方法是继传统的硫印、热酸腐蚀、电解和冷酸检验方式之后, 为适应当今冶金技术的进步和质量控制的要求而研发的新技术。经现场应用可知, 枝晶低倍检验方法与前4种传统检验方法对比, 具有以下优越性: (1) 清晰且原样(不扩大、不缩小)地显示各类缺陷, 降低了识(低倍)图门槛, 实现了快速且无争议评级; (2) 清晰地显示出铸坯的凝固组织全貌; (3) 清晰地反映出不同工艺条件下的凝固组织差异; (4) 根据凝固组织结构, 可直接分析出特定质量问题的原因; (5) 检验过程快速; (6) 检验过程环保且无污染。

1 枝晶腐蚀低倍检验方法原理

硫印、热酸、电解和冷酸这4种传统检验方法原理大致相同, 均为电化学反应。腐蚀试剂(电解质)与试样检验面作用, 产生大量微电池, 检验面发生选择性腐蚀, 从而显示出铸坯的各种凝固组织和各

种类型的内部缺陷。

枝晶腐蚀与传统检验方法具有相同的原理,即在电解质溶液中,金属表面不同区域有着不同的电极电位,形成大量的微电池,电位较低的区域为阳极发生溶解,电位较高的区域为阴极发生沉淀。金属和合金晶界的电位通常比晶粒内部要低,为微电池的阳极,所以腐蚀首先从晶界开始。金属和合金凝固时产生的偏析,也是引起电化学不均匀性的原因,因此酸蚀方法可以显示出试样中偏析缺陷的存在。

枝晶腐蚀方法与传统检验方法的区别是:(1)试样表面要求抛光,达到镜面光洁度;(2)腐蚀试剂酸的浓度低;(3)腐蚀时间短。

达到镜面光洁度的经抛光的金属表面,在浓度较低的腐蚀试剂酸下腐蚀较短的时间,试样表面会发生准确的多极微电池腐蚀过程。因此,这种腐蚀方法可以显示出连铸坯树枝晶晶轴与晶间的差别,轴晶粒与晶界及缺陷与基体之间的差别,并清晰地显示出连铸坯的凝固组织和连铸坯缺陷。

2 试验方法

文献[7]认为,枝晶腐蚀低倍检验方法是研究连铸坯凝固组织和缺陷,提高钢材质量的最佳选择方法。但枝晶低倍腐蚀检验对试样表面光洁度要求较高,因而,加工过程对设备和操作工有一定的特殊需求。

长期沿用至今的枝晶腐蚀检验流程是:铣床铣平→砂轮磨削→人工抛光→腐蚀作业→照相、出图→评级和发报告。其中,砂轮磨削是上述流程的关键工序,以下两个因素会直接影响加工效率和加工质量,进而,直接影响枝晶腐蚀检验的效果:

(1)由于试样加工中的砂轮与试样表面是硬性接触,砂轮磨床使用3~5年,机床精度会明显下降;(2)有磨削经验的工人,有时需要磨削50~60 min,还经常出现磨不光的现象,大量新工人完全磨不出合格的试样。因而,磨削效果不佳,抛光效果降低,即达不到镜面光洁度的要求,最终导致腐蚀效果较差,腐蚀图像模糊,限制了枝晶腐蚀低倍检验方法的广泛应用。

因此,本文根据此现状,改进了试样的加工程序,采用砂带磨削代替砂轮磨削。砂带基体为纸、布或聚酯薄膜等弹性材料,接触轮外缘也为橡胶或塑料等弹性体,因此,砂带磨削与试样表面是弹性接触,有减振和吸收环境振动的作用^[8-9]。另外,砂带磨削过程操作简单,加工过程无需依赖经验,只需设定试样的厚度、启动、停止和更换砂带等操作即可。

为测试优化后的枝晶腐蚀低倍检验方法的效果,在某钢厂集团钢管公司检验过程中,应用了砂带磨削的枝晶腐蚀低倍检验方法,由于现有低倍检验室场地的限制,采用了简易的砂带机,并人工更换了砂带。在制备断面 $\phi 390\text{ mm}$ 的试样的过程中,磨光时间为5~10 min,抛光时间为2~3 min,已经大幅度提高了工作效率;磨光一次合格率为100%,整体检验效果也大为提高。如果对场地稍加改造,并更换更好的砂带机,效率将会进一步提高,磨削质量也会得到进一步的改善。

3 试验结果

在某钢厂集团钢管公司取12块铸坯,11个案例,进行砂带机制样,应用枝晶腐蚀低倍检验方法检验,结果见表1。

表1 无缝钢管厂枝晶腐蚀检验结果
Table 1 Results of dendritical etching inspection in seamless steel tube plant

案例	钢种	规格/mm	中心 疏松/级	中心 偏析/级	缩孔/ 级	角部 裂纹/级	皮下 裂纹/级	中间 裂纹/级	中心 裂纹/级	皮下 气泡/级	非金属 夹杂/级	等轴 晶率/%
1	15CrMo	$\phi 390$	0.5	1.0	0.5	0	0	0	0	0	0	25
2	N80(BTN-1)	$\phi 200$	0.5	1.0	0.5	0	0	0.5	0	0	0	26
3	34Mn6	$\phi 270$	0.5	1.0	0	0	0	0	0	0	0	58
4	10CrMoTi	$\phi 390$	0.5	0.5	0.5	0	0	0	0	0	0	27
5	20G	$\phi 270$	0.5	0.5	0	0	0	0	0	0	0	35
6	10CrMoTi	$\phi 390$	0.5	0.5	0.5	0	0	0	0	0	0	20
7	某钢轨	380×280	0.5	0.5	0	0	0	0	0	0	0	49
8	15CrMo-1	$\phi 390$	0.5	0.5	0	0	0	0	0	0	0	31
9-1	某钢轨1号	380×280	0.5	1.0	0	0	0	0	0	0	0	40
9-2	某钢轨2号	380×280	0.5	1.0	0	0	0	0	0	0	0	54
10	SWRH82B	150×150	0.5	0.5	0	0	0	0	0	0	0	37
11	SWRH82B	150×150	0.5	1.0	1.0	0	0	0	0	0	0	33

注:9-1案例无电磁搅拌(M-EMS);9-2案例有电磁搅拌(M-EMS)。

(1)9种缺陷按照 YB/T 4340—2013《连铸钢方坯低倍枝晶组织缺陷评级图》标准进行评级;

(2)等轴晶率按照 GB/T 24178—2009《连铸钢坯凝固组织低倍评定方法》标准进行评定。

4 讨论和分析

评价连铸坯钢质的质量,通常是从铸坯的凝固组织和内部缺陷两个方面进行,某钢厂集团钢管公司取 12 块试样,检验结果见表 1,质量评价见表 2。方坯和圆坯按国家标准规定,内部缺陷 9 种,12 个试样中 2 种缺陷 7 个,占 58%,3 种缺陷 4 个,占 33%,4 种缺陷 1 个,占 8%。2 种缺陷占 50%以上,各种缺陷

级别都很低,缺陷等级都在 1.5 级以下。由表 2 可知,某钢厂集团钢管公司连铸圆坯缺陷较少,级别较低,钢质优良。

在 12 个试样中,等轴晶率不低于 40% 的 4 个,30%~40% 的 4 个,20%~30% 的 4 个,3 种等轴晶率各占 33%。整体来看,某钢厂集团钢管公司大圆坯等轴晶率较高,然而,大圆坯(其中 10 和 11 案例是小方坯)等轴晶率在 40% 以上只占 33%,等轴晶率还有待提高,为了进一步提高钢管的质量,等轴晶率应该达到 50% 以上,并要求等轴晶不产生下沉和偏斜现象。如表 2 中案例 2 就是等轴晶少、下沉和偏斜的案例,应该避免此问题的发生。

表 2 枝晶腐蚀检验结果质量评价

Table 2 Quality evaluation of dendrital etching inspection results

案例	钢种	规格/mm	质量评价
1	15CrMo	ϕ 390	3 种缺陷,较轻,级别低;等轴晶率 25%,应提高。
2	N80(BTN-1)	ϕ 200	4 种缺陷,但都很轻,级别低;等轴晶率 26%偏低,下沉 20 mm,向左偏斜 28 mm。
3	34Mn6	ϕ 270	2 种缺陷,很轻,级别低;等轴晶率 38%。
4	10CrMoTi	ϕ 390	3 种缺陷,较轻,级别低;等轴晶率 27%,应提高。
5	20G	ϕ 270	2 种缺陷,很轻,级别低;等轴晶率 35%。
6	10CrMoTi	ϕ 390	3 种缺陷,较轻,级别低;等轴晶率 20%,应提高
7	U71Mn	380×280	2 种缺陷,很轻,级别低;等轴晶率 49%,比较高。
8	15CrMo-1	ϕ 390	2 种缺陷,很轻,级别低;等轴晶率 31%,应提高。
9-1	某钢轨 1 号	380×280	2 种缺陷,很轻,级别低;等轴晶率 40%,无交叉树枝晶。
9-2	某钢轨 2 号	380×280	2 种缺陷,很轻,级别低;等轴晶率 54%,比 9-2 等轴晶率提高 14%,交叉树枝晶多。如图 2~图 4 所示。
10	SWRH82B	150×150	2 种缺陷,很轻,级别低;等轴晶率 37%,对于小方坯来说等轴晶率是比较高的。
11	SWRH82B	150×150	3 种缺陷,较轻,级别低;等轴晶率 33%。

注: 9-1 无电磁搅拌(M-EMS),重轨;9-2 有电磁搅拌(M-EMS),矩形坯。

表 2 中案例 2,等轴晶率为 26%,偏低,下沉 20 mm,向左偏斜 28 mm,等轴晶下沉和向左偏斜严重,枝晶图片如图 1 所示。等轴晶率低、下沉和偏斜,穿管时顶头鼻部在圆坯几何中心,不在等轴晶区中心,导致穿管变形区达到柱状晶区。由于柱状晶间微观偏析的存在,出现不均匀的变形,产生了各向异性,从而引起钢管内折表面的缺陷^[10]。

已有检验实践证明,某厂低合金钢 ϕ 200 mm 圆坯,等轴晶率为 20%,下沉 27 mm,向左偏斜 20 mm,导致本炉钢内折缺陷率高达 20%。厂方经调整过热度、二冷比水量、拉速和电磁搅拌,将等轴晶率提高到 36%,向下偏心 4~5 mm,钢管内折消除。

表 2 中案例 9-1 和 9-2,是某钢厂炼钢厂某重轨坯,做有无电磁搅拌(M-EMS)对比试验。钢轨连铸坯的横向断面分别观察枝晶图片和对应位置的凝固组织。其中,钢轨连铸坯的枝晶图片如图 2 所示;钢

轨连铸坯对应位置的凝固组织如图 3 和图 4 所示。

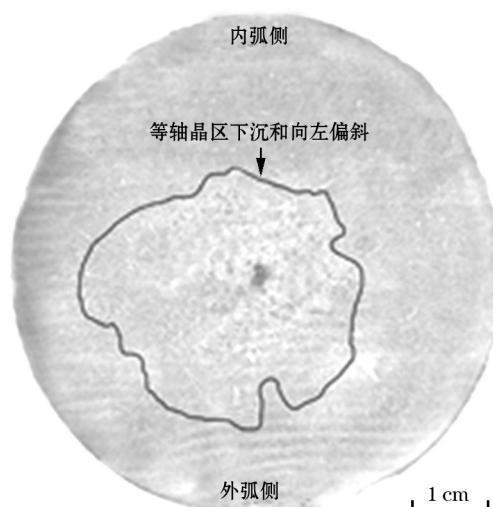


图 1 案例 2 的枝晶图片

Fig.1 Dendrite image of case 2

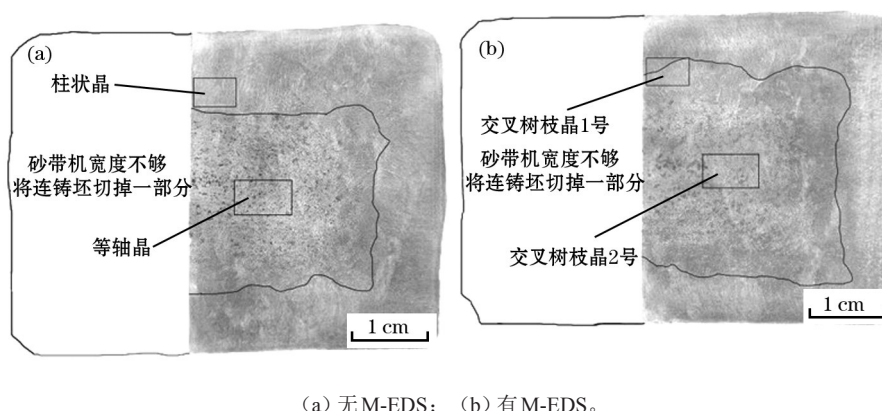
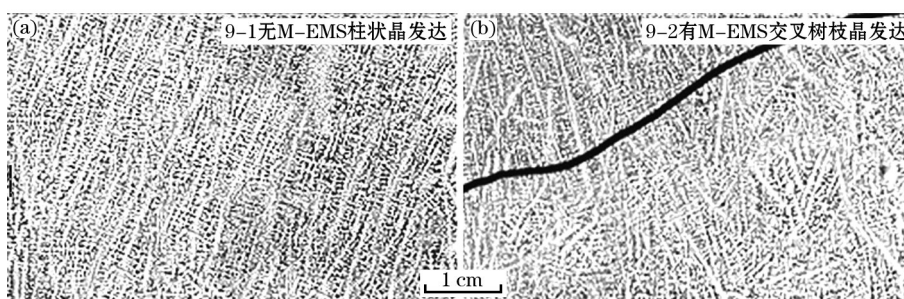


图2 钢轨连铸坯有、无M-EMS枝晶图片

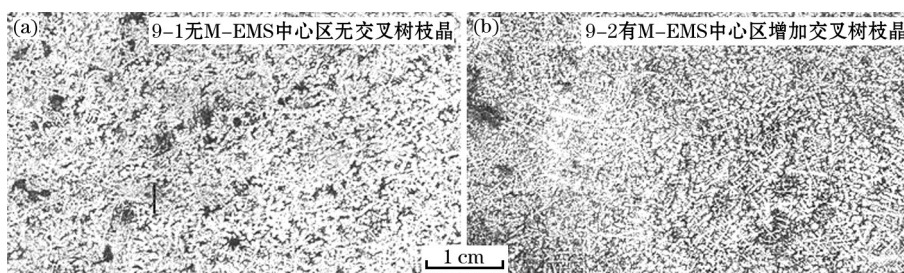
Fig.2 Dendrite pictures of rail casting billet with and without M-EMS



(a) 无M-EDS,柱状晶; (b) 有M-EDS,交叉树枝晶1号。

图3 钢轨连铸坯对应位置凝固组织比较

Fig.3 Comparison of solidification structure of rail continuous casting slab in corresponding position



(a) 无M-EDS,等轴晶; (b) 有M-EDS,交叉树枝晶2号。

图4 钢轨连铸坯对应位置凝固组织比较

Fig.4 Comparison of solidification structure of rail continuous casting slab in corresponding position

图3(a)与图2(a)无M-EMS钢轨连铸坯中的柱状晶对应,图3(b)与图2(b)有M-EMS钢轨连铸坯中的交叉树枝晶1号对应。如图3(a)所示,无M-EMS钢轨连铸坯中的柱状晶生长强健、发达;如图3(b)所示,有M-EMS钢轨连铸坯柱状晶减少,增加了交叉树枝晶。说明结晶器电磁搅拌(M-EMS)可以有效地改善铸坯凝固组织,打碎柱状晶^[11-12],促进交叉树枝晶和等轴晶的形成。

图4(a)与图2(a)无M-EMS钢轨连铸坯中的等轴晶对应,图4(b)与图2(b)有M-EMS钢轨连铸坯中

的交叉树枝晶2号对应。如图4(a)所示,无M-EMS钢轨连铸坯中心区无交叉树枝晶凝固组织;如图4(b)所示,经M-EMS后的钢轨连铸坯增加了交叉树枝晶凝固组织。说明被结晶器电磁搅拌(M-EMS)打碎柱状晶下降到铸坯中心区。

由表1中案例9-1和9-2可知,经结晶器电磁搅拌(M-EMS),铸坯等轴晶率由40%增加到54%,提高了14%。结晶器电磁搅拌(M-EMS)可提高等轴晶的原因为:搅拌加速了钢液过热的耗散,当钢液温度降至液相线和固相线之间时,会出现一些小等

轴晶核,为提高等轴晶率创造了条件^[12-14]。

5 结论

(1) 砂带磨削在某钢厂集团钢管公司制备枝晶腐蚀试样获得成功,磨削 $\phi 390$ mm 断面试样,磨光需要 5~10 min,抛光需要 5 min,大幅度提高了工作效率,改善了磨光和抛光的质量。

(2) 根据国家标准规定,圆坯内部缺陷有 9 种,某钢厂无缝钢管厂取 12 个试样中有 2 种缺陷 7 个,占 58%,3 种缺陷 4 个,占 33%,4 种缺陷 1 个,占 8%。2 种缺陷占 50% 以上,各种缺陷级别都很低,缺陷等级为 1.5 级以下。质量评价结果表明,某钢厂无缝钢管厂连铸圆坯缺陷少,级别低,钢质优良。

(3) 在某钢厂无缝钢管厂取得 12 个试样中,等轴晶率不低于 40% 的 4 个,30%~40% 的 4 个,20%~30% 的 4 个,3 种等轴晶率各占 33%。表 2 中的案例 2 是等轴晶少、产生下沉和偏斜现象的案例。

(4) 通过某钢厂某钢轨坯 M-EMS 对比试验,无电磁搅拌,柱状晶生长强健、发达,无交叉树枝晶凝固组织;有电磁搅拌,柱状晶减少,增加了交叉树枝晶。说明结晶器电磁搅拌(M-EMS)可以有效地改善铸坯的凝固组织,打碎柱状晶,促进交叉树枝晶和等轴晶的形成。某钢厂结晶器经电磁搅拌(M-EMS),铸坯等轴晶率由 40% 增加到 54%,提高了 14%。

参考文献:

- [1] 李靖,喻承欢,李凤喜,等. 冷蚀检验在连铸坯质量控制中的应用实践[J]. 炼钢,2003,19(2),13.
- [2] 李靖,周义贵,柳志敏,等. 中高碳钢冷蚀低倍检验与质量改善[J]. 武钢技术,2004,42(1),18.
- [3] 赵成林,唐复平,朱晓雷,等. IF 钢连铸坯表层夹杂分布特征的试验[J]. 钢铁,2017,52(12):42.
- [4] 许庆太,王文仲. 连铸钢坯低倍检验和缺陷图谱[M]. 北京:中国标准出版社,2009.
- [5] 宋景欣. 连铸坯枝晶低倍检验技术在梅钢的应用[J]. 世界金属导报,2014-06-10(B16).
- [6] 李吉东,许庆太,孙中强,等. SPHE 连铸坯夹杂物的检验和分析[J]. 连铸,2012,37(6):36.
- [7] 何志明,张斌. 枝晶腐蚀低倍检验技术在连铸生产质量控制中的应用[J]. 宝钢技术,2014(6):25.
- [8] 薛会民,欧阳晶晖. 砂带磨削在钢坯试样加工铣磨床上的应用[J]. 机床与液压,2009,37(1),44.
- [9] 段练,黄云,邹莱. 机器人砂带磨削 GH4169 镍基高温合金表面完整性研究[J]. 中国机械工程,2019,30(17):2044.
- [10] 常正昇,张乔英,杨克枝,等. 板坯连铸工艺参数对取向硅钢铸坯中心等轴晶率的影响[J]. 中国冶金,2020,30(1):58.
- [11] 杨海峰,汪渊源,李廷刚,等. 电磁搅拌对 Q345D 连铸坯凝固组织的影响[J]. 连铸,2018,43(5):54.
- [12] 赵乃胜,崔全法,费书梅. 热轧 MES 质量检验功能模块的优化[J]. 冶金自动化,2018,42(3):72.
- [13] 陈永,杨素波,朱苗勇. 结晶器电磁搅拌改善重轨钢连铸坯内部质量的试验研究[J]. 钢铁,2007,42(2):24.
- [14] 王璞,李少翔,陈列,等. 电磁搅拌对大圆坯结晶器冶金行为影响的探讨[J]. 钢铁,2019,54(8):82.

2020 年第 3 期广告目次

封面:中冶京诚工程技术有限公司

封二:中冶南方连铸技术工程有限责任公司

目次:辽宁科大东方巨业高级陶瓷有限公司

封三:秦皇岛瀚丰长白结晶器有限责任公司

封底:湖北中钢联冶金工程有限公司

前彩 1:上海重矿冶金设备集团有限公司

前彩 2:斯普瑞喷雾系统(上海)有限公司

前彩 3:上海新中冶金设备厂

前彩 4~5:达涅利冶金设备(中国)有限公司

前彩 6~9:齐齐哈尔华工机床股份有限公司

前彩 10:武汉大西洋连铸设备工程有限责任公司

前彩 11:秦皇岛中鼎热工设备有限公司

中插 1:湖南中科电气股份有限公司

中插 2:杭州谱诚泰迪实业有限公司

中插 3:中冶赛迪工程技术股份有限公司

中插 4:江苏博际喷雾系统股份有限公司