

DOI:10.13228/j.boyuan.issn1005-4006.20210099

连铸坯低倍检验工艺发展现状及展望

马飞跃^{1,2}

(1. 中冶赛迪工程技术股份有限公司公用设计部, 重庆 401122;
2. 重庆赛迪热工环保工程技术有限公司公用设计部, 重庆 401122)

摘 要: 连铸坯的低倍检验是钢厂质量控制的重要环节之一。长期以来,与冶炼检验和成品检验全自动工艺的快速发展相比,全自动低倍检验工艺的价值被低估。以酸蚀检验法为对象,通过对比试样加工、酸蚀方法、扫描成像等方面的不同工艺,回顾了国内钢厂连铸坯低倍检验的发展历程,并对国内钢铁企业全自动低倍检验的未来之路进行了展望。

关键词: 低倍检验; 连铸坯; 试样加工; 热酸腐蚀; 电解腐蚀; 自动化

文献标志码: A **文章编号:** 1005-4006(2022)01-0009-05

Development and prosperity of macrostructure etching process of continuous casting billet

MA Fei-yue^{1,2}

(1. Department of Utilities, CISDI Engineering Co., Ltd., Chongqing 401122, China;
2. Department of Utilities, CISDI Thermal and Environmental Co., Ltd., Chongqing 401122, China)

Abstract: Macrostructure etching of continuous casting billet is one of the important parts of quality control in steel companies. For a long time, compared with the rapid development of automatic metallurgical analysis and products testing process, the value of automatic macrostructure etching process has been underestimated. With acid etching as the testing method, by comparing the different processing of sample preparation, acid etching and imaging, the development of the macrostructure etching process of continuous casting billet in domestic steel companies is reviewed and the future of automatic macrostructure etching process is discussed.

Key words: macrostructure etching; continuous casting billet; sample preparation; hot-acid etching; electrolytic etching; automation

钢的宏观检验又称为低倍检验,是用肉眼或在低于十倍的放大镜下检查钢材的纵、横断面或断口上各种宏观缺陷的一种方法^[1]。连铸板坯、方坯等钢坯凝固过程中形成的内部组织形态对于后续生产环节以及最终产品的技术性能有着重要影响^[2-7]。通过观察连铸坯的凝固组织和缺陷来改善凝固条件、提高连铸坯质量,是连铸工作者的迫切需要。因而,连铸坯的低倍检验是钢厂质量控制的重要环节之一。

目前检验钢的低倍组织缺陷的方法主要有酸蚀检验法、断口检验法、塔型发纹检验法及硫印检验法等。根据 GB/T 226—2015“钢的低倍组织及缺陷酸蚀检验法”,酸蚀检验法又包括热酸腐蚀法、冷酸腐蚀法(含枝晶腐蚀法)以及电解腐蚀法。

本文以酸蚀检验法为主对铸坯低倍检验的各个工序的发展历程及现状进行了总结,并展望了全

自动低倍检验工艺流程,以供钢企质量管理人员和从事钢铁冶金试验室建设的工程人员参考。

1 低倍检验工艺发展现状

1.1 传统工艺

长期以来,连铸板坯和圆方坯大多采用在线火焰切割的方式,将试样切割后送至试验室。圆方坯试样采用锯床、铣床和磨床等单体设备进行加工,取用铸坯的全断面进行酸蚀试验。对于板坯试样,采用锯床、铣床和磨床等单体设备进行加工,取用铸坯的板宽 $1/2+100$ mm 断面进行酸蚀试验。

试样加工环节、加工到酸蚀的转运环节、酸蚀环节主要采用人工进行过程流转,工作环境差、效率低、劳动强度大。典型的传统工艺流程如下所示。

(1)圆方坯及异形坯:试验坯料(全断面)→铣

削→研磨→腐蚀(热酸蚀或冷酸擦拭)→冲洗→干燥→判定→检验结果上传。

(2)板坯:试验坯料→切割(切割成板宽 1/2+100 mm)→铣削→研磨→腐蚀(热酸蚀或冷酸擦拭)→冲洗→干燥→判定→检验结果上传。

虽然国外钢铁企业和科研院所在连续铸造主体工艺方面有诸多研究,但其低倍检验工艺仍大多采用传统工艺,加工方式是锯切、铣削、研磨,以热酸蚀为主的酸蚀方法等^[8-9]。国内早期的研究方向主要聚焦于低倍检验在铸坯质量控制、优化工艺操作方面的应用。随着国内钢铁行业连续铸造工艺的进步,低倍检验的研究方面又逐渐偏向于几种酸蚀方法的优缺点及其应用范围。

1.1.1 低倍检验在铸坯质量控制中的应用

程海芬^[10]介绍了天铁炼钢厂铸坯低倍检验技术在质量控制中的应用情况,指出低倍检验可以优化工艺操作、改善铸坯内部质量、为连铸机的维护检修工作提供指导性信息、控制铸坯缺陷的发生以及提供品种钢的开发条件。杨劲松等^[11]指出低倍检验在铸坯质量控制的应用还未受到应有的重视。除文献^[10]述及的 3 点作用以外,文献^[11]还指出,低倍检验技术的充分应用是铸坯在线质量控制的良好补充。张永藏^[12]介绍了低倍检验技术在邢台钢铁公司铸坯质量控制中的应用情况,指出了低倍检验不仅有利于铸坯质量控制,还可用于盘条成品的质量缺陷分析。贾建平^[13]采用热酸蚀法对连铸坯低倍组织缺陷进行了检测分析,确定了宣钢连铸坯缺陷的主要类别和产生原因,通过实施调整设备、改善水质、优化炼钢工序工艺参数等措施,提高了连铸坯质量。

1.1.2 几种酸蚀方法的应用

(1)热酸蚀法。

热酸蚀法从模铸时期一直是最常用的低倍检验方法之一,被国标推荐为仲裁检验方法。巴虹等^[14]认为热酸蚀法既可显示裂纹、夹渣及皮下气泡等表面缺陷,也可显示连铸坯的中心疏松、中心偏析、缩孔、内部裂纹、气泡和非金属夹杂等内部缺陷。热酸蚀法对试样加工表面光洁度要求不高,试料加工过程中造成的轻微加工缺陷和污染都能被很好地克服,低倍组织和缺陷显示清晰,因此是适用面最广的一种酸蚀方法。但是热酸蚀操作较复杂、劳动强度较大、检验周期长、对环保设施的要求较高^[14,16],国内钢企对于替代热酸蚀方法的研究和应用越来越多^[15-22]。

(2)冷酸蚀法。

许庆太等^[15]认为冷酸蚀法相比硫印和热酸蚀法有一定的优势。硫印和热酸蚀法不能清楚地显示连铸坯的凝固组织形态,因此用这两种方法来分析铸坯缺陷与凝固组织及凝固条件的关系比较困难。而冷酸蚀法不仅能显示前两种方法提供的铸坯缺陷信息,还能清晰地显示铸坯的凝固组织,进而为改善凝固条件创造有利条件。李靖等^[16]介绍了武钢第二炼钢厂在低倍检验方面的工艺发展,从 2001 年起冷酸蚀法逐步取代了硫印和热酸蚀法。认为冷酸蚀法操作简单、快速,能准确反映连铸坯内部低倍组织与缺点,改善劳动环境。更进一步,冷酸蚀法能动态指导连铸生产、设备检修、改进工艺、提高操作水平。经过数年的实践应用,冷酸蚀法在武钢连铸坯质量控制中发挥了重要的作用。与此同时,巴虹等^[14]也认为冷酸蚀法腐蚀程度轻,对酸蚀过程操作要求相对严格,如酸蚀液涂抹不均匀会造成成分偏析的假象,如刷洗不充分微小的气孔等缺陷则不能充分显示,造成低判或漏判。

(3)电解腐蚀法。

早在 20 世纪 70 年代,第一重型机器厂^[17]在上钢一厂用电解腐蚀法做小截面钢的基础上,试验成功了大截面钢的低倍检验腐蚀法。该方法电解腐蚀液采用 15%~20%的盐酸水溶液,在室温下通电 10 min,刷洗、吹干、检验评级。盐酸可循环使用,减少了盐酸的损耗量,减少了有害气体的挥发。并且实现了半机械化操作,可提高工作效率 4 倍。

何志明等^[18]介绍,2007 年以后,一种冷稀酸液常温下的全自动电解腐蚀技术开始在国内一些钢厂在线应用。这种电解腐蚀技术与 GB 226—91 所述的电解腐蚀方法有本质上的不同。对某钢厂同一批连铸坯试样分别进行了热酸蚀、冷酸蚀和电解腐蚀 3 种技术的对比试验,得出结论认为,电解腐蚀能够最为客观地描绘出钢坯结晶组织以及内部缺点的边界,清晰地解析出连铸坯宏观凝结组织的客观状态,证明了电解腐蚀法的先进性、准确性和可靠性。

(4)枝晶腐蚀法。

随着国内高附加值钢产品的开发,连铸坯的内部质量显著改善,为提升优化连铸工艺操作,除一般的缺陷外,低倍检验评级还要检测铸坯的树枝晶结构,许庆太等^[19]介绍了一种新的酸蚀方法—枝晶腐蚀法。枝晶腐蚀法不仅能显示连铸坯的缺陷信息,而且还能显示连铸坯的凝固组织,即细小等轴

晶、柱状晶和中心等轴晶,并且可以准确地计算等轴晶率。在另一篇文献中,许庆太等^[20]提出,枝晶腐蚀法还可以测量柱状晶偏斜角度及二次晶间距等数据,进而推测其凝固条件。枝晶腐蚀检验对判断电磁搅拌、电脉冲孕育处理、动态轻压下及压缩浇铸的冶金效果极其有效。

何志明等^[21]详细介绍了枝晶腐蚀法在梅钢低倍检验中的应用,包括检验流程、试样加工、腐蚀方法、评级方法,并结合产品图例分析,阐明了枝晶腐蚀法的优势。杨擷光等^[22]结合枝晶腐蚀法的最新研究进展,概括了枝晶腐蚀法的优越性:清晰且原样地显示各类缺陷,降低了识图门槛,实现了快速且无争议评级;清晰地显示出铸坯的凝固组织全貌;根据凝固组织,可直接分析出特定质量问题的原因;检验过程快速且环保无污染。

然而,巴虹等^[14]指出,枝晶腐蚀法对试样加工光洁度要求极高,达到镜面水平。每块样坯加工平均 5 h,操作工艺复杂,检测成本高。枝晶腐蚀法是一种弱冷酸选择性腐蚀,有的缺陷不能充分显示。另外用于评定的图像是经过锐化技术处理后的图像,可能失真,特别是中心偏析和中心疏松不易区分,因而不能完全取代常规的低倍组织检验方法。

1.2 局部自动化工艺

为提高低倍试样加工(尤其是板坯)效率和加工精度,减少人工转运环节,改善工作环境,进入 21 世纪后,国内一些设备制造厂家和钢企用户开始探索用于低倍试样加工或低倍试验的自动化工艺流程,并进行设备研发。

1.2.1 低倍试样专用加工机床

(1)端面铣削研磨机。

为提高低倍试样加工(尤其是板坯)效率和加工精度(主要是表面粗糙度),国内一些设备制造厂家^[23]研制出了用于钢坯低倍检验试样加工专用的龙门铣磨床。该机床可以实现试样整体加工、以铣代刨、采用周边磨进行精加工、整体粗加工后原位进行精加工等功能。经过数年的技术研发和用户反馈改进^[24],该机床已经可以实现液压自动装卡、自动定位。主轴功率强大,针对普碳钢一次切削深度可达到 12 mm。铣削加工采用盘铣刀加工方式,可进行粗铣和精铣,经过铣削加工表面粗糙度 $Ra \leq 0.8 \mu\text{m}$,平面度公差不得超过 0.1 mm,满足 GB/T 226 的要求。如需进行磨削,可采用砂轮磨削或砂带磨削两种方式进行加工。

该类机床为数控产品,设备自动化程度高,技

术先进,操作简单,操作者把待加工的试样吊放到工作台上指定位置,液压夹紧工装。按循环启动按钮,机床会全自动进行循环加工。

(2)强力铣床。

另外,有厂家将强力铣床经专门设计后,设置专用的数控系统、铣削装置、冷却装置、液压夹紧装置、排屑装置等,实现先粗铣、再精铣的全过程精度控制,保证试样尺寸加工精度及表面粗糙度 $Ra \leq 1.6 \mu\text{m}$,仅通过铣削就可以满足低倍试样的检测要求。

(3)高速圆盘锯床。

魏振广等^[25]介绍了使用圆盘锯床高效率高精度锯切的新技术。锯切系统采用硬质合金锯片,由大功率电机驱动,可实现高效切割。设置高效的上料端备料系统和出料端分拣系统,可与锯切工序匹配。高速圆盘锯床是生产要求高效率、大产出、只允许很小的尺寸误差、需要很高的切割表面质量的任何一种情况的首选,因而可以用于连铸板坯试样的粗加工下料,或者直接用于电解腐蚀等对表面光洁度要求不高的酸蚀试验。

(4)镜面铣磨一体化数控机床。

随着钢企对优质洁净钢需求的增加,对钢坯低倍检测提出了新要求,要求钢坯试样表面加工粗糙度能达到镜面效果。王克杰等^[26]介绍了洁净钢检测的一项新技术——钢坯镜面加工和钢坯全端面检测。钢坯镜面加工的意义:可在镜面上检测尺寸微小的缺陷,理论分辨率可达到几微米;可在钢坯上直接检测非金属夹杂物;可进行钢坯枝晶检测和凝固组织分析;可在钢坯上进行洁净度检测。郭长升等^[27]撰文详细介绍了其公司研发的重型超精密镜面铣磨一体化数控机床,该机床配置 1 个铣头和 3 个磨头,通过粗铣、粗磨、精磨和超精磨,可在 180 min 内完成 230 mm×1 900 mm 大型钢坯全端面的镜面加工,加工精度纵向 $Ra \leq 0.02 \mu\text{m}$,横向 $Ra \leq 0.05 \mu\text{m}$ 。

1.2.2 酸蚀试验装置

(1)全自动热酸腐蚀试验装置。

由于热酸腐蚀法对钢种的适用范围广,且被国标推荐为仲裁检验方法,因此研究全自动热酸腐蚀试验技术有重要指导意义。据笔者了解,国内已经有一些厂家开发出了全自动热酸腐蚀试验装置。该装置采用蒸汽石墨加热的方式,操作者只需将样品放置好,点击运行就可以实现进酸、腐蚀浸泡、废酸处理、酸雾净化、达标排放等全自动功能。

(2)全自动电解腐蚀试验装置。

彭勃等^[28]撰文对比了 GB/T226、GB/T4334 和

ASTM E340 所列的 3 种电解腐蚀方法,认为 ASTM 所列的方法腐蚀效果最好,并介绍了一种采用 ASTM 腐蚀方法的全自动电解腐蚀试验机。其腐蚀方式是通过钢样与阴极相对运动,使平均分布在整个腐蚀表面上的电流集中于扫描区域的狭小范围内,保证有足够的电解电流,使试样腐蚀得更加充分。同时,流动的电解液可以从试样表面带走水合性铁及铁的氧化物,保证试样得到清晰的低倍组织形貌。该装置可与试样搬运装置联用,实现无人值守自动化作业,并且已经在首钢迁钢^[29]、宝钢湛江等钢厂成功应用。整个过程通过 PLC 主机进行控制,自动完成钢坯的抓取→翻转→夹紧→移动→检测→腐蚀→清洗→吹干→翻转→送至输出位置,配合试样搬运系统进行无人化作业。

1.2.3 自动扫描成像装置

在文献^[27]中,作者详细介绍了其公司研发的大型金属表面缺陷综合检测仪。该系统主要由钢坯试样运送与水平系统、数控往复移动式检测桁架、低倍成像系统等组成,加载非金属夹杂物检测系统、枝晶组织检测与分析系统等。其核心是全端面低倍高倍综合检测系统,低倍成像主体是 8~16 K 高清扫描相机,可以实现恒距离水平扫描、自动调焦、自动成像等功能。成像方式包括明场和暗场方式,明场方式主要用于铸坯凝固组织、枝晶组织和缺陷成像,暗场方式主要由于非金属夹杂物检测。

周志超^[30]介绍了扫描技术在首钢迁钢铸坯低倍检验中的应用。该扫描装置采用平台护罩式布局型式,主要由工作台、防护罩、工件升降装置、定位调平装置、扫描装置和图像采集系统组成,采用美国 NI 控制系统集中控制。其操作方式为全自动方式,可与低倍试样加工设备、酸蚀设备联合使用,实现更大程度上的自动化。

1.2.4 自动评级系统

为实现铸坯低倍检验质量自动评级,贾永坡^[31]研发了基于深度学习的板坯低倍质量评级系统。该系统采用图像处理技术对板坯低倍检验后的表面进行处理,然后基于深度学下方法通过标定数据来学习判定模型。该系统的判定准确率不低于 93%,综合 F1-score 高达 95%,统在邯钢三炼钢投用后,其判断准确率由之前的约 70%提高到 90%以上,有一定的推广价值。

1.3 全自动低倍检验工艺

虽然上述方案在低倍试样加工和酸蚀试验方面进行了有益的探索,且在国内有成功的应用案

例,但打通所有环节、实现真正意义上的全自动低倍检验的应用案例少之又少。

据公开的文献显示,采用电解腐蚀法的全自动低倍检验系统最早在首钢迁钢投用。周志超等^[29]介绍了该系统的组成及应用。该系统由低倍专用铣磨床、试样吊装自动翻转机构、电解腐蚀试验机、自动成像检测中心 4 部分组成,可实现自动试样加工、自动电解腐蚀、自动扫描成像和结果检测。据作者介绍,该套系统属于国内首创,在迁钢的成功应用将对国内外低倍检验技术的创新起到推动和借鉴作用。

苏群^[32]报道了酒钢应用的低倍酸洗自动化系统。该系统由自动配酸系统、自动运输系统、自动酸洗系统、自动清洗系统、酸雾及废液自动中和处理和排放系统 5 部分组成,可实现从铣磨床加工后的酸洗、环保处理的自动化。然而,该系统尚未将低倍试样加工纳入自动化系统。

2 展望

笔者认为,发展全自动低倍检验工艺,未来待解决的技术问题包括如下几方面。

2.1 低倍组织缺陷自动评级

根据 GB/T 1979—2001《结构钢低倍组织缺陷评级图》、YB/T 4002、YB/T 4003、YB/T 153 等一系列国标和冶标,钢的低倍组织缺陷大致有疏松、偏析、白点、缩孔、裂纹、非金属夹杂、气泡以及各种不正常断口等。上述各标准均在附录中给出了不同种类缺陷的评级图。如何将这些常见低倍组织缺陷评级图电子化并形成数据库,对人工智能(AI)图像识别系统进行深度训练,提升其比对成功率,最终开发出 AI 低倍组织缺陷评级系统,彻底打通全自动低倍检验最后一环,将是研发的重中之重。

2.2 建立自动化集控系统

由于全自动低倍检验系统是由试样加工、酸蚀、扫描成像、试样运转等诸多环节组成的,而目前市面上尚无一家整体的集成供货商可以完整软硬件打包,这就导致不同的单体设备由不同的 PLC 系统控制的局面。在目前钢铁企业全厂检化验 L2 系统不具备直接传递至设备的情况下,搭建新平台(暂命名为 L1.5)将 L2 的信息再进行细化转化为指令传递至不同厂家、不同功能的每一台加工、试验设备,从而实现机与机之间对话的功能,是十分必要的。

随着智能制造在钢厂的大力推广和环保要求

越来越高,试验室在减少劳动定员和环保合规方面的压力也越来越大。而全自动低倍检验工艺在提升试验精度、改善劳动环境、提高劳动效率、环保合规等方面有明显的优势,因此,全自动低倍检验工艺将是连铸坯质量检验未来的发展方向。只要解决了上述技术难题,全自动低倍检验工艺将逐渐普及。

参考文献:

[1] 师昌绪,李恒德,周廉. 材料科学与工程手册 [M]. 北京:化学工业出版社,2004.

[2] 杨恩蛟,姜敏,侯泽旺,等. 连铸板坯凝固末端高压下改善铸坯内部质量[J]. 中国冶金,2020, 30(5):23.

[3] 毛敬华,帅勇,谢贵强,等. 连铸特厚板坯内部质量控制的关键技术[J]. 钢铁,2019,54(8):64.

[4] 郑伟栋,唐志军,郝强,等. 铸坯酸蚀检验法在板坯生产中的应用[J]. 连铸,2011 (2):44.

[5] 周滨新,张康晖,马建超,等. 70 钢小方坯芯部质量优化[J]. 中国冶金,2021,31(1):42.

[6] 陈亮,宋波,陈天明,等. 45 钢连铸大方坯中心疏松与缩孔控制[J]. 钢铁,2018,53(8):49.

[7] 董大西,王谦,李国栋,等. 含硫易切削钢连铸坯低倍裂纹的成因及控制[J]. 中国冶金,2013, 23(6):30.

[8] Da S G, Ghosh S, Chowdhury S G, et al. Investigation of sub-surface cracks in continuous cast billets[J]. Engineering Failure Analysis, 2003, 10(3):363.

[9] Eskin D G, Zuidema J, Savran V I, et al. Structure formation and macrosegregation under different process conditions during DC casting[J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 384(1/2):232.

[10] 程海芬. 低倍检验在铸坯质量控制中的应用[J]. 天津冶金, 2006(5):44.

[11] 杨劲松,陶金明. 低倍检验在铸坯质量控制中的应用[C]//第八届全国连铸学术会议论文集. 海口:中国金属学会连铸分会,2007.

[12] 张永藏. 低倍检验在铸坯质量控制中的应用[J]. 河北冶金, 2006 (5):49.

[13] 贾建平. 降低连铸坯内部缺陷技术的研究与应用[J]. 冶金设备,2015(4):69.

[14] 巴虹,万书伟. 连铸坯低倍酸蚀方法及分析[J]. 物理测试, 2010,28(1):59.

[15] 许庆太,张楠,傅强. 连铸坯凝固组织和缺陷的冷酸蚀法宏观检验[J]. 炼钢,2003,19(5):26.

[16] 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.

[17] 佚名. 大截面钢的低倍电解腐蚀法[J]. 机械工程师,1974,52 (2):21.

[18] 何志明,范立强,彭勃,等. 连铸板坯低倍组织检验的三种方法对比试验[J]. 世界钢铁,2014 (6):15.

[19] 许庆太,王文仲. 连铸坯低倍检验和缺陷图谱[M]. 北京:中国标准出版社,2009.

[20] 许庆太,李吉东,孙中强. 枝晶腐蚀低倍检验在连铸生产中的应用[J]. 物理测试,2011,29(6):22.

[21] 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.

[22] 杨颀光,许庆太,马宁. 枝晶腐蚀低倍检验技术在连铸生产中的应用[J]. 连铸,2020 (3):22.

[23] 傅文耀,李作鑫,刘广. 钢坯低倍检测试样加工专用设备龙门铣磨床的研制[J]. 物理测试,2002,20(3):37.

[24] 周立富. 试样加工技术的创新与发展[J]. 物理测试,2011, 29 (增刊 1):109.

[25] 魏振广,王万征. 圆盘锯床高效率高精度锯切的新技术[J]. 制造技术与机床,2008(8):145.

[26] 王克杰,王洪亮,黄港明,等. 洁净钢检测新技术—钢坯镜面加工及全端面检测[J]. 理化检验(物理分册),2015, 51 (12):839.

[27] 郭长升,周立民,刘国栋,等. 大型钢坯低倍试样加工与缺陷检测的新装备、新技术[J]. 连铸,2016 (2):43.

[28] 彭勃,李春阳. 全自动电解腐蚀技术在连铸坯低倍检验中的应用[J]. 理化检验(物理分册),2015,51(12):858.

[29] 周志超,崔全法,徐鑫. 迁钢全自动低倍检测评定系统的开发与应用[C]//2014 年全国压力加工设备节能降耗及技术创新研讨会论文集. 北京:中国金属学会,2014.

[30] 周志超. 扫描技术在连铸坯低倍检验中的应用[J]. 现代测量与实验室管理,2016(5):8.

[31] 贾永坡. 基于深度学习的板坯低倍质量评级系统[C]//第十一届中国钢铁年会议论文集. 北京:中国金属学会,2017.

[32] 苏群. 低倍酸洗自动化系统的应用[J]. 甘肃冶金,2019,41 (2):107.