

许庆太 王文仲 编著

连铸钢坯低倍检验 和缺陷图谱



 中国标准出版社

连铸钢坯低倍检验 和缺陷图谱

许庆太 王文仲 编著

中国标准出版社

北 京

内 容 简 介

本书介绍连铸坯和钢材的低倍检验方法、连铸坯的凝固组织及各种内部缺陷,是为了解决连铸生产中出现的质量问题而编著的。全书共6章:连铸钢坯凝固组织和缺陷的低倍检验方法;连铸钢坯凝固组织;连铸钢坯内部缺陷;连铸钢板坯内部缺陷图例;连铸钢方、矩形坯内部缺陷图例;连铸钢坯缺陷案例分析。

本书推荐使用枝晶腐蚀低倍检验方法,是因为该方法不但能够准确地显示连铸坯的缺陷,而且还可以清晰地显示连铸坯的凝固组织。该方法具有准确性、易操作性及对环境不产生污染等特点。

在应用枝晶腐蚀低倍检验方法进行连铸坯在线质量监控工作中,作者收集了500多幅图片,展示连铸坯凝固组织和内部缺陷,图文并茂,具有真实性和实用性。

本书可供连铸生产的操作者、技术人员、管理人员及科研人员阅读,也可以作为大专院校相关专业的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

连铸钢坯低倍检验和缺陷图谱/许庆太,王文仲编著.

北京:中国标准出版社,2009

ISBN 978-7-5066-5098-4

I. 连… II. ①许…②王… III. 连铸坯:钢坯-低倍缺陷(金属)-检验-图谱 IV. TF777-64

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第009625号

中国标准出版社出版发行
北京复兴门外三里河北街16号

邮政编码:100045

网址 www.spc.net.cn

电话:68523946 68517548

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

各地新华书店经销

*

开本 880×1230 1/16 印张 19.5 字数 598 千字

2009年4月第一版 2009年4月第一次印刷

*

定价 80.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换

版权专有 侵权必究

举报电话:(010)68533533

序

该书全面介绍了连铸坯各种低倍检验方法;概述了连铸坯凝固组织的形成机理及形态特征;揭示了连铸坯内部缺陷的类型、特点及成因;重点展示了连铸生产实践中的众多低倍检验实例,借以剖析和探讨连铸坯内部缺陷的形成条件和改进措施。内容完整、充实,论述简练、精辟,极具说服力。

枝晶腐蚀低倍检验法是随着连铸技术的发展而日臻完善的连铸坯低倍检验方法。与传统的硫印和热酸蚀等低倍检验法相比,它不仅可以准确地显示连铸坯的内部缺陷,而且还可以清晰地显示连铸坯的凝固组织。这就为进一步分析连铸坯缺陷与凝固组织间的相关信息、探求改善连铸坯质量的途径和措施创造了有利条件。鞍钢在国内率先尝试将枝晶腐蚀法用于连铸坯质量的在线监控,收到良好效果。为枝晶腐蚀低倍检验法在全国冶金企业的推广和普及起到了示范作用,并为制定枝晶腐蚀低倍检验法的相关国家标准奠定了基础。

该书作者花费8年多时间,采用枝晶腐蚀低倍检验技术,在线监控了2万8千余块各类连铸坯的质量,积累了大量低倍检验的信息。该书结合生产实际,精选出540余幅更典型、更清晰的低倍图片(其中绝大多数为枝晶腐蚀低倍检验结果),展示和评述了不同规格、不同品种和不同工艺条件下的连铸坯凝固组织和内部缺陷的基本特征和相关性,阐明了减少缺陷的技术措施。此外,还对某些因连铸坯缺陷而引发的连铸生产事故案例(如漏钢等)进行了深入的综合分析研究。分析科学有据,结论确切可信。这不仅对鞍钢连铸生产有实用价值,而且也对全国各冶金企业的连铸生产有普遍的指导意义。

该书集知识性、实践性和工具性于一体,内容新颖,图文并茂。论述深入浅出,读者面广人众。它将成为冶金企业的管理、生产和科研工作者以及大专院校、科研院所相关专业同行们的良师益友,受益久而丰厚。

东北大学炼钢研究所教授

原中国连铸学会第1~4届理事

原辽宁省连铸学会第1届和第2届副主任

姜永林

2008年7月22日

前 言

目前,钢铁工业是世界经济的支柱产业,连铸技术已成为现代钢铁生产的重要工艺过程。连铸是冶金工业具有突破性的技术,它具有节能、提高金属收得率和便于机械化、自动化等突出优点。开发成功后,日臻成熟,深受人们的青睐。连铸工艺作为一项与传统模铸工艺相竞争的新技术,必须以高质量的产品来显示其优越性。我国连铸工业发展迅猛异常,随着连铸厂的新建、扩建和投产,生产了大量冶金产品。因为冶金产品的质量主要取决于连铸坯的质量,为了满足市场对冶金产品种类、质量各方面的要求,所以必须提高连铸坯质量。现在国、内外连铸工作者,都把提高连铸坯质量工作放在首位。

连铸坯和钢材的低倍检验方法有五种:①硫印检验;②热酸蚀检验;③冷酸蚀检验;④电解腐蚀检验;⑤枝晶腐蚀检验。其中枝晶腐蚀检验不但能够准确地显示连铸坯的内部缺陷,而且还可以清晰地显示连铸坯的凝固组织。对缺陷不扩大、不缩小,按1:1的比例显示,准确提供缺陷信息。根据凝固组织的结晶特征,可以判断凝固条件,通过改变凝固条件,最后达到提高连铸坯质量的目的。该方法具有准确性、易操作性及对环境不产生污染等特点。

连铸坯质量取决于连铸工艺参数、设备状态和操作三个方面,因为这三个方面都是可以控制的,所以连铸坯的质量也是可以控制的。连铸坯质量是影响钢厂质量效益的重要指标,只有提高连铸坯的质量,钢厂才能赢得较高的经济效益。

五种低倍检验方法是判断连铸坯质量的主要手段,方法操作简单,能够准确、及时为现场提供质量信息,很适合于跟踪连铸生产的质量在线监控,受到各个连铸厂家的高度重视。目前,枝晶腐蚀方法用于连铸坯质量的在线监控,收到良好效果,使连铸坯的低倍检验已成为研究连铸坯质量工作的技术平台。为了适应连铸技术的发展和有关人员的需求,本书介绍了连铸坯的低倍检验方法、连铸坯的凝固组织及连铸坯的内部缺陷。

本书是鞍钢实业集团有限公司一钢分公司铸坯检测室,根据东北大学冶金技术研究所枝晶腐蚀的转让技术,经过作者开发和研制成功后编著出来的。八年来进行了连铸坯质量的在线监控工作,为鞍钢各炼钢厂、国内部分钢厂和院校及科研单位,共检验连铸板坯1.15万块,方、矩形坯1.72万块。在此基础上结合生产实际,收集541张典型图片,对连铸坯的凝固组织及缺陷以图例形式展示并分析,内容丰富,重点突出,图文并茂,具有真实性、实用性和通俗易懂的特点。

本书在编写过程中曾得到鞍钢张永金、付强、关艳、朴志民、庞志伟、张楠、袁艺魁、曲立男、付月新,东北大学孙中强、蔡锡年、万利成的支持,在此表示诚

挚感谢。

本书成稿后,承蒙东北大学程士富先生、姜永林先生、北满钢厂朱学仪先生校阅,在此表示衷心感谢。

本书在编写过程中参阅了有关连铸方面的专著和杂志,在此向有关作者和出版社表示谢意。

由于编著者水平有限,书中难免有缺点和错误,敬请专家和广大读者批评指正。

编 著 者

2008 年 7 月

目 录

第 1 章 连铸钢坯凝固组织和缺陷的低倍检验方法	1
1.1 硫印检验方法	2
1.2 热酸蚀低倍检验方法	3
1.3 冷酸蚀低倍检验方法	3
1.4 电解腐蚀低倍检验方法	4
1.5 枝晶腐蚀低倍检验方法	4
1.6 几种低倍检验方法的比较	5
1.7 其他检验方法	7
第 2 章 连铸钢坯凝固组织	8
2.1 细小等轴晶带	9
2.2 柱状晶带	13
2.3 交叉树枝晶带	21
2.4 等轴晶带	24
2.5 各种凝固组织	28
第 3 章 连铸钢坯内部缺陷	35
3.1 内部裂纹	35
3.2 中心偏析	60
3.3 中心疏松和缩孔	85
3.4 气泡和气孔	90
3.5 非金属夹杂物	95
第 4 章 连铸钢板坯内部缺陷图例	99
4.1 裂纹缺陷	99
4.2 中心偏析缺陷	151
4.3 中心疏松缺陷	199
4.4 缩孔缺陷	201

4.5	针孔气泡和夹杂缺陷	204
第5章	连铸钢方、矩形坯内部缺陷图例	209
5.1	裂纹缺陷	209
5.2	中心疏松缺陷	221
5.3	中心偏析缺陷	234
5.4	缩孔缺陷	263
5.5	皮下气泡缺陷	276
第6章	连铸钢坯缺陷案例分析	278
6.1	连铸板坯表面纵向裂纹缺陷的分析(1)	278
6.2	连铸板坯表面纵向裂纹缺陷的分析(2)	282
6.3	矩形连铸钢坯偏角内裂产生漏钢原因的分析	285
6.4	20 钢连铸方坯粘结漏钢的分析	289
6.5	82B-1 矩形坯漏钢的分析	292
6.6	连铸钢板坯浸入式水口掉底造成漏钢事故的分析	295
6.7	Q195 矩形连铸坯蜂窝气泡缺陷的分析	298
6.8	40 井异型钢坯腿角撕裂缺陷的分析	299
6.9	钢板表面纵向裂纹的金相检验和分析	301
参考文献		304

第1章 连铸钢坯凝固组织和缺陷的低倍检验方法

连铸钢坯(简称连铸坯)的质量包括连铸坯的纯净度、凝固组织、内部缺陷、表面缺陷及形状缺陷五个方面。连铸坯的纯净度是指钢中的气体(N_2 、 H_2 、 O_2)和 S、P 元素及非金属夹杂物含量和形态。这主要取决于钢水的原始状态,也就是进入结晶器前是否纯净。为此,应当选择合适的炉外精炼方式,采用连续铸钢(简称连铸)全过程保护浇铸,尽可能降低钢水中气体和非金属夹杂物含量。连铸坯凝固组织,主要是指连铸坯在凝固过程中所形成的结晶状态。二次冷却强度大,凝固速度快,连铸坯中的柱状晶发达,等轴晶比例少。对于大方坯和厚板坯,通过计算等轴晶所占比例的多少可以判断连铸坯的质量状况。连铸坯等轴晶多,钢材各向同性效应好。凝固组织与钢种、规格、浇铸温度及二次冷却条件等因素有关。连铸坯的内部缺陷是指连铸坯内部是否有裂纹、偏析、疏松、缩孔、气泡及夹杂等缺陷。合理的二冷制度、拉矫辊和支撑辊严格对中及辊缝合理调整是保证内部质量的关键。采用电磁搅拌及轻压下技术对改善连铸坯内部质量也是奏效的。连铸坯的表面缺陷是指连铸坯表面是否有裂纹、夹渣及表面气泡等缺陷。表面缺陷主要是钢水在结晶器内形成凝壳过程中产生的。表面缺陷与保护渣性能、浸入式水口设计、结晶器锥度、结晶器振动、结晶器冷却及结晶器液面的稳定程度等因素有关。生产无表面缺陷的连铸坯是热送热装和直接轧制的前提条件。连铸坯的形状缺陷是指连铸坯的形状是否规矩,尺寸公差是否符合规定的要求。形状缺陷与结晶器内腔尺寸及冷却的均匀性有关。连铸坯变形严重或尺寸公差太大,给连轧工序咬入孔型带来困难。

钢材质量的优劣,主要取决于连铸坯的质量,因而要想得到性能合格的钢材,必须提高连铸坯的质量。

对于连铸坯来说,尽管凝固组织与普通模铸钢锭相比并无本质差别,也是由激冷层、柱状晶和中心等轴晶组成,由于连铸坯是在边运行、边冷却、边凝固和边矫直(或边弯曲)条件下生产出来的,而且冷却强度大,凝固速度快,因此,具有激冷层薄,柱状晶发达,中心等轴晶少的特点。

连铸坯质量取决于连铸工艺参数、设备状态和操作三个方面,因为这三个方面是可以控制的,所以连铸坯的质量也是可以控制的。

因为连铸坯的凝固组织和缺陷与凝固条件有直接关系,所以通过改变凝固条件可以获得合乎要求的凝固组织和减少缺陷。反之,判断连铸坯的凝固条件是否合理,可以通过对连铸坯进行低倍(宏观)检验,利用观察到的凝固组织和缺陷信息,来推测凝固条件,然后操作者调整凝固条件,达到提高连铸坯质量的目的,这是经常使用的方法。

检验连铸坯的凝固组织是指检验连铸坯激冷层厚薄,柱状晶的形态和长短,以及中心等轴晶占的比例多少。检验连铸坯的内部缺陷是指检验连铸坯内部偏析、裂纹、疏松、缩孔、气泡和夹杂等缺陷的数量、分布及严重程度而言。

连铸投产以来,经常使用硫印检验、热酸蚀、冷酸蚀、电解腐蚀和枝晶腐蚀低倍检验方法进行检验,使之适应于连铸坯生产在线的质量监控工作,已收到良好效果。

本图谱也是采用上述几种方法进行检验,其中用硫印检验、热酸蚀和冷酸蚀低倍检验的图片在本图谱中一律注明检验方法,而未注明检验方法的是枝晶腐蚀低倍检验图片,后者在本图谱中占绝大多数。

连铸坯的凝固组织和缺陷与化学成分有一定关系,本图谱根据钢厂的习惯分类法,按碳含量将连铸坯分为低碳钢、中碳钢、高碳钢和合金钢四种。碳含量等于或小于 0.08% 叫低碳钢,大于 0.08% 而小于

0.45%叫中碳钢,等于或大于0.45%叫高碳钢,含一定量合金元素的叫合金钢。

1.1 硫印检验方法

硫印检验方法是检验硫元素在钢锭、连铸坯、钢坯和钢材中分布的低倍(宏观)检验方法。化学成分分析尽管能够提供钢中硫含量,但是得不到硫在钢中分布的整体形貌。硫印检验方法是通过在稀硫酸水溶液中浸泡过的相纸上的印迹来确定钢中硫化物的分布位置及数量,是显示钢中硫偏析的有效方法。

1.1.1 引用标准

硫印检验方法是按 GB/T 4236—1984《钢的硫印检验方法》进行检验,也可参考 ISO 4986:1979《钢——硫印低倍检验方法》。对于连铸板坯,早期按 YB 4003—1991《连铸钢板坯缺陷硫印评级图》标准评级,现在按 YB/T 4003—1997《连铸钢板坯低倍组织缺陷评级图》附录 B 进行评级。

1.1.2 取样和试样加工

取样可用热剪、热锯、火焰烧切或冷锯切割等方法进行。试样加工时,必须去除由切割造成的变形区和热影响区,确保检验面不受其影响。检验面距切割面的参考尺寸为:

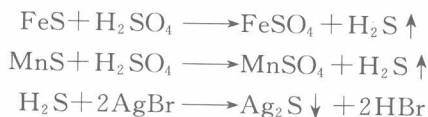
- a. 热锯切时不小于 20 mm;
- b. 火焰烧切热坯时不小于 20 mm;
- c. 火焰烧切冷坯时不小于 25 mm;
- d. 冷锯切割冷坯时不小于 15 mm。

首先使用刨床或铣床把检验面刨(或铣)平,然后,用磨床磨光,检验面的粗糙度 $Ra \leq 1.6 \mu\text{m}$,不许有磨痕。做硫印检验前要用无水乙醇、苯或四氯化碳进行擦拭,清除油污。

对于高碳钢和合金钢的连铸坯、钢坯及钢材,在室温下不应该用火焰切割,以免切割后冷却时产生热应力裂纹,影响检验结果。但是,在生产线上的热坯,可用热剪、热锯及火焰烧切。这两个钢种的冷坯可以用冷锯切割。

1.1.3 方法原理

硫印检验方法的原理是:相纸上的稀硫酸水溶液与试样上的硫化物(FeS 、 MnS)发生反应,生成硫化氢气体,硫化氢再与相纸上的溴化银作用,生成硫化银沉淀,印在相纸的相应位置上,形成黑色或褐色斑点。其反应式:



1.1.4 操作方法

硫印检验方法的操作要在暗室中红灯下进行,也可以在光线较暗的房间中进行。

配制稀硫酸水溶液 5%~15%,选取 10%左右的稀硫酸水溶液较为合适。操作时要注意,先把水倒入溶液盛装盘中,然后按比例缓慢倒入硫酸,并用玻璃棒进行搅拌。不许反过来先倒硫酸后倒水,否则会产生爆炸。刚配完的溶液有放热升温现象,等冷却到室温时再浸泡相纸。

将相纸放入稀硫酸水溶液中,浸泡 5~25 min,选取 10 min 左右较为合适。去除相纸上多余的稀硫酸水溶液后,将湿润相纸的药面对准试样检验面轻轻覆盖好,要注意相纸不许滑动,以防硫印图像模糊。为了确保相纸与试样接触良好,用橡胶辊在相纸上不停地辊动,或用脱脂棉擦拭,排除试样表面与相纸之间的气泡。

相纸在试样上的覆盖时间从五分钟到十几分钟不等,一般覆盖 4、5 min 较为合适。可根据连铸坯的化学成分和缺陷类型用以往的经验确定覆盖时间,或者在操作过程中,揭开相纸角部先窥视一下,观察硫印纸上是否有棕色印记,然后确定覆盖时间,但在揭开相纸角部窥视时,在试样检验面上覆盖的相纸不许产生滑动。

相纸取下后,放在流水中冲洗 2~3 min,冲洗掉相纸上未发生反应的硫酸水溶液,然后放在定影液

中定影 10 min 左右,也可以用 20%~40% 硫代硫酸钠($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)水溶液做定影液。定影实际上是用大苏打,即硫代硫酸钠水溶液把相纸上未与硫酸起反应的 AgBr 颗粒溶解掉,其反应式如下:



定影完毕,放入流水中冲洗 10~20 min。

纸板相纸干燥时要用上光机上光,涂塑相纸可直接晾干。

一般情况下,同一个试样检验面不可以连续进行两次硫印检验,因为第一次检验就使钢的表层硫作用殆尽,再进行第二次检验会导致效果不佳。重做硫印检验时,应将检验表面重新进行机械加工,切削深度至少 1 mm。

1.2 热酸蚀低倍检验方法

热酸蚀低倍检验方法是检验钢锭、连铸坯、钢坯和钢材中缺陷及评定钢的质量最常用的宏观(低倍)检验方法之一。

1.2.1 引用标准

GB/T 226—1991《钢的低倍组织及缺陷酸蚀检验法》,GB/T 1979—2001《结构钢低倍组织缺陷评级图》,YB/T 153—1999《优质碳素结构钢和合金结构钢连铸方坯低倍组织缺陷评级图》,YB/T 4003—1997《连铸钢板坯低倍组织缺陷评级图》附录 A:连铸钢板坯缺陷酸蚀低倍评级图。可以参考 ISO 4969:1980《钢——强矿物酸腐蚀下的宏观检验(酸蚀低倍检验)》。

1.2.2 取样和试样加工

热酸蚀低倍检验方法的取样和试样加工与硫印检验方法中的 1.1.2 节取样和试样加工相同。检验面的粗糙度也与硫印检验方法一样,粗糙度 $Ra \leq 1.6 \mu\text{m}$ 即可。

1.2.3 方法原理

热酸蚀低倍检验方法原理属于电化学腐蚀范畴。利用钢本身具有不均匀性或不连续性,抵抗酸蚀能力不同,以不同速度和不同程度与酸液发生电化学反应,呈现高低不平或颜色深浅不同,来显示钢的缺陷。当酸液加热到较高温度时,电化学腐蚀加速进行,试样被加速腐蚀。检验室经常用热酸蚀低倍检验方法来检查钢的内部质量,根据标准评定钢的内部缺陷级别,判断钢的质量优劣。

1.2.4 操作方法

热酸蚀低倍检验方法一般是使用 1:1(体积比)工业盐酸水溶液,加热到 60~80 °C,试样浸泡时间一般为 10~40 min。

酸液到温后,将试样检验面朝上放入酸槽中,酸液覆盖检验面要达到 20 mm 以上。应注意检验面不能被铁夹子划伤,记好试样放入和取出顺序,或者用钢字头给试样打上编号,不许混号。

酸蚀后试样的检验面必须用碱水和热水冲刷干净,然后用软的泡沫塑料擦干或晾(烘)干。做到检验面上无水痕、锈蚀、划伤、脏物等。

1.3 冷酸蚀低倍检验方法

1.3.1 引用标准

目前冷酸蚀低倍检验方法引用标准与热酸蚀低倍检验方法 1.2.1 节引用标准相同。

1.3.2 取样和试样加工

冷酸蚀低倍检验方法取样和试样加工与硫印检验方法 1.1.2 节取样和试样加工相同。但是检验面的光洁度要比硫印和热酸蚀检验面光滑一些,也就是粗糙度要低一些,要求粗糙度 $Ra \leq 0.8 \mu\text{m}$ 。

1.3.3 方法原理

冷酸蚀低倍检验方法原理与热酸蚀低倍检验方法 1.2.3 方法原理基本相同。

1.3.4 操作方法

冷酸蚀低倍检验是在室温条件下进行的,首先按表 1-1 选好侵蚀试剂,将试样检验面朝上、放平,把

侵蚀试剂倒在检验面上浇蚀 5~10 min,肉眼观察缺陷,缺陷清晰时用麻布擦掉侵蚀试剂,然后用 15% 碳酸钠水溶液或其他弱碱性溶液进行中和处理,以免残余药液引起腐蚀生锈。最后,用水冲洗、擦干或烘干。

如果擦掉侵蚀试剂发现检验面侵蚀不到位,即欠腐蚀,可以重复上面操作再进行一次,直到缺陷清晰为止。

表 1-1 GB/T 226—1991 的冷酸侵蚀法试剂和适用范围

编号	冷 蚀 液 成 分	适 用 范 围
1	盐酸 500 mL,硫酸 35 mL,硫酸铜 150 g	钢与合金
2	氯化高铁 200 g,硝酸 300 mL,水 100 mL	
3	盐酸 300 mL,氯化高铁 500 g 加水至 1 000 mL	
4	10%~20%过硫酸铵水溶液	碳素结构钢,合金钢
5	10%~40%(体积分数)硝酸水溶液	
6	氯化高铁饱和水溶液加少量硝酸(每 500 mL 溶液加 10 mL 硝酸)	
7	硝酸 1 份,盐酸 3 份	合金钢
8	硫酸铜 100 g,盐酸和水各 500 mL	
9	硫酸 60 mL,盐酸 200 mL,氯化高铁 50 g,过硫酸铵 30 g,水 50 mL	精密合金,高温合金
10	100~350 g 工业氯化铜氨,水 1 000 mL	碳素结构钢,合金钢

注:① 选用第 1、8 号冷蚀液时,可用第 4 号冷蚀液作为冲刷液。

② 表 1-1 中 10 号试剂试验验证时的钢种为 16 Mn。

1.4 电解腐蚀低倍检验方法

电解腐蚀低倍检验方法也是酸蚀检验方法,电解液的成分为 15%~30%(体积分数)工业盐酸水溶液,通常使用电压小于 36 V,电流强度小于 400 A,电解时间为 5~30 min。

1.4.1 引用标准

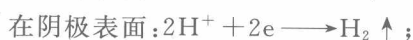
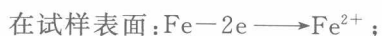
电解腐蚀低倍检验方法的引用标准与热酸蚀低倍检验方法 1.2.1 节引用标准相同。

1.4.2 取样和试样加工

电解腐蚀低倍检验方法的取样和试样加工与硫印检验方法中的 1.1.2 节取样和试样加工相同。

1.4.3 方法原理

阳极腐蚀法,试样为阳极,阴极是固定的电极板,二者之间为电解液,反应如下:



1.4.4 操作方法

电解腐蚀完毕,取出试样,检验面用清水冲洗,碱液中和,再冲洗,吹干。

1.5 枝晶腐蚀低倍检验方法

虽然硫印检验、热酸蚀低倍及冷酸蚀低倍检验能够提供连铸坯的缺陷信息,但是,硫印检验不能够提供连铸坯的凝固组织信息,而热酸蚀和冷酸蚀低倍检验提供凝固组织信息不如枝晶腐蚀低倍检验方法效果好。枝晶腐蚀低倍检验方法不但能够显示连铸坯的缺陷信息,而且还能够清楚地显示连铸坯的凝固组织,即显示细小等轴晶、柱状晶和中心等轴晶,并且可以准确地计算等轴晶率。

1.5.1 引用标准

现在没有枝晶腐蚀低倍检验方法国家标准,通常是参照下列标准进行枝晶腐蚀低倍检验工作。这

些标准是:GB/T 226—1991《钢的低倍组织及缺陷酸蚀检验法》,GB/T 1979—2001《结构钢低倍组织缺陷评级图》,YB/T 153—1999《优质碳素结构钢和合金结构钢连铸方坯低倍组织缺陷评级图》,YB/T 4003—1997《连铸钢板坯低倍组织缺陷评级图》附录 A:连铸钢板坯缺陷酸蚀低倍评级图。可以参考 ISO 4969:1980《钢——强矿物酸腐蚀下的宏观检验(酸蚀低倍检验)》。

当然,最好是能够制定出适合于枝晶腐蚀低倍检验方法的标准。目前,鞍山钢铁集团公司已按上述标准结构,制订出企业枝晶腐蚀低倍检验标准,供枝晶腐蚀低倍检验评级使用。

1.5.2 取样和试样加工

枝晶腐蚀低倍检验方法的取样和试样加工前几道工序与硫印检验方法中的 1.1.2 节取样和试样加工相同,最后要加一道抛光工序,使检验面的粗糙度 $Ra \leq 0.1 \mu\text{m}$ 。

1.5.3 方法原理

枝晶腐蚀低倍检验方法对试样检验面的腐蚀也是电化学过程,依靠药液腐蚀来显示试样表面的不均匀性。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,电位较低的地区为阳极发生溶解,电位较高的地区为阴极发生沉淀。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,因此枝晶腐蚀低倍检验方法可以显示偏析缺陷的存在。经抛光的金属表面在电解质溶液中溶解时,发生复杂的多极微电池腐蚀过程。这种腐蚀方法可以显示金属中晶粒内部和晶界之间的差异。对连铸坯来说,可以显示树枝晶晶轴与枝晶间、等轴晶粒与晶界及缺陷与基体之间的差别。

1.5.4 操作方法

将抛光完毕的试样检验面朝上,用腐蚀药液浇蚀或用脱脂棉沾上腐蚀药液在检验面上均匀擦蚀,直到检验面上的凝固组织和缺陷显示清楚为止。然后,用清水冲洗,最后用无水乙醇擦拭和吹风机吹干,或者用高压风直接吹干。枝晶腐蚀低倍检验方法,显示凝固组织和缺陷的时间很短,只需 1~2 min 即可。

1.6 几种低倍检验方法的比较

应用硫印和热酸蚀低倍检验方法已有很多年历史,人们经常用这两种方法进行模铸钢锭、钢坯和钢材的低倍检验工作。连铸投产以来,这两种方法也经常在连铸坯的检验工作中使用,近几年又研发出冷酸蚀和枝晶腐蚀低倍检验方法,这些方法各有其特点。

(1) 硫印检验方法

硫印检验方法是检验硫在连铸坯中的分布。如前所述,化学成分分析尽管能够提供钢中硫含量,但是得不到硫在钢中分布的整体形貌。硫印检验方法可以确定钢中硫化物的分布位置,是显示钢中硫偏析的有效方法。但是硫印检验方法只是一种定性试验,只能根据棕色印记面积的大小,或印记颜色的深浅对硫元素多少做一个大概估计,不能根据硫印图像来计算钢的硫含量。

硫印图像上印迹的深浅除与硫含量多少有关外,还与很多因素有关,例如,试样检验面的加工状况、硫印纸在硫酸水溶液中浸渍时间、硫印纸在试样检验面上覆盖时间及钢的化学成分等等。甚至硫印纸碰脏了也会有印记出现。

硫印主要缺点是当硫含量小于 0.005% 时,硫印检验片的效果很差,往往是一张“白片”。硫印检验只能显示 S 元素偏析,对 C、P 元素及合金元素的偏析根本没有显示。显示树枝晶凝固组织就更无能为力了,有时只能看到柱状晶的雏形,看不到凝固组织的细节。

硫印检验的主要优点是对加工试样检验面的光洁度要求不高,检验操作工序简单,适用于跟踪生产连铸坯质量的检验工作。

硫印检验可以按相应标准进行评定缺陷的级别,通过对硫印片的观察可以了解缺陷的分布和严重程度,非常直观。

(2) 热酸蚀、冷酸蚀和电解腐蚀低倍检验方法

热酸蚀、冷酸蚀和电解腐蚀低倍检验在工厂中应用很普遍,按相应标准进行评定缺陷的级别,给出缺陷严重程度的定量概念,也是监控连铸坯质量的重要手段。冷酸蚀检验对加工试样检验面的光洁度要求比热酸蚀、电解腐蚀、硫印检验稍高一点。而热酸蚀、冷酸蚀和电解腐蚀与硫印一样,检验操作工序也很简单,也适用于跟踪连铸坯质量的检验工作。

但是,热酸蚀检验腐蚀液加热温度较高,腐蚀时间较长,并对环境产生严重的污染。特别是整块连铸坯很重,放入热酸槽中较为困难,这是热酸蚀检验的缺点。为了克服热酸蚀检验这个缺点,人们研发了冷酸蚀和枝晶腐蚀检验。

热酸蚀、冷酸蚀和电解腐蚀低倍检验可以用数码相机或扫描仪拍摄图像,对感兴趣的区域可以放大倍数拍摄,提供缺陷的分布和严重程度,非常直观。但是,检验评级时要仔细观察试样检验面,拍摄图像只做参考。

然而,这三种检验方法显示凝固组织效果较差,而采用枝晶腐蚀低倍检验方法效果很好。

(3) 枝晶腐蚀低倍检验方法

枝晶腐蚀低倍检验方法对钢的铸态组织(如模铸钢锭、连铸坯、铸钢件等)及钢坯或钢材试样都可以进行检验,观察铸态钢的凝固组织和缺陷以及经热加工后钢材的凝固组织和缺陷的变化情况,并且还可以考查凝固组织与缺陷的关系。

枝晶腐蚀低倍检验方法优于传统检验方法在于不但能够准确地显示连铸坯的内部缺陷,而且还可以清晰地显示连铸坯的凝固组织。对缺陷不扩大、不缩小,按 1:1 的比例显示,准确提供缺陷信息。根据凝固组织的结晶特征,可以判断凝固条件,通过改变凝固条件,最后达到提高连铸坯质量的目的。该方法具有准确性、易操作性及对环境不产生污染等特点。

一般来说,连铸坯的凝固条件是不容易测定的,但是通过观察连铸坯的凝固组织,可以计算等轴晶率,测量柱状晶偏斜角度及树枝晶二次晶间距(在较高倍数下测量)等数据,进而推测其凝固条件,可以得到许多有价值的技术情报。例如,柱状晶发达,中心等轴晶少,表明钢水过热度高或二冷强度大;根据测定柱状晶的偏斜角度来推测液相穴钢水流动状况,进而研制出合适的浸入式水口形状,调整钢水在液相穴内的流动,达到减少夹杂物、减轻偏析和改善连铸坯质量的目的;对同一种钢种,尽管冶炼方式和规格大小不同,只要测量出二次晶间距就可以知道其冷却速度大小。检验实践证明,枝晶腐蚀低倍检验方法判断电磁搅拌、轻压下和压缩浇铸技术的冶金效果极其有效,能够观察到连铸坯中电磁搅拌白亮带出现的位置,中心偏析改善的程度,以及树枝晶破碎情况等等。

枝晶腐蚀低倍检验可以用扫描仪拍摄图像,对感兴趣的区域也可以放大倍数拍摄,提供缺陷的分布和严重程度,非常直观。

枝晶腐蚀检验虽然有上述优点,但对试样检验面加工要求较高,多一道抛光手续,加工时间较长一些,然而,通过改进试样加工工具可以得到弥补。

综上所述,五种宏观(低倍)检验方法分两大类,一是硫印检验,二是酸蚀检验。酸蚀检验又分为热酸蚀、冷酸蚀、电解腐蚀、枝晶腐蚀低倍检验四种方法。对四种酸蚀检验进行比较:

① 方法原理。四种酸蚀检验方法原理都是电化学反应,只是酸的浓度、酸的温度及腐蚀时间有差别。

② 腐蚀温度。热酸蚀在 60~80 °C 温度条件下进行腐蚀,电解腐蚀在 15~40 °C 条件下进行腐蚀,冷酸蚀和枝晶腐蚀在室温条件下进行腐蚀。

③ 检验面粗糙度。热酸蚀和电解腐蚀检验面粗糙度 $Ra \leq 1.6 \mu\text{m}$,冷酸蚀 $Ra \leq 0.8 \mu\text{m}$,枝晶腐蚀 $Ra \leq 0.1 \mu\text{m}$ 。

④ 试样加工速度。热酸蚀和电解腐蚀快,冷酸蚀居中,枝晶腐蚀慢。

⑤ 侵蚀速度。热酸蚀 10~40 min,电解腐蚀 5~30 min,冷酸蚀 5~10 min,枝晶腐蚀快 1~2 min。

⑥ 腐蚀效果。热酸蚀、冷酸蚀和电解腐蚀主要显示缺陷,枝晶腐蚀显示缺陷和树枝晶凝固组织。

⑦ 对环境污染。热酸蚀严重,冷酸蚀和电解腐蚀居中,枝晶腐蚀没有污染。

1.7 其他检验方法

连铸坯的质量检验,除了上述几种宏观检验方法之外,还可以应用金相检验、电子探针分析、扫描电镜观察(包括能谱和波谱成分分析)、透射电镜检验、离子探针分析以及 X-射线衍射分析等手段。前者是肉眼或用 6 倍放大镜来观察和检验缺陷,叫做宏观(低倍)检验方法,而后者是用光学、电子光学方法对缺陷进行放大观察和检验,叫做微观检验方法。宏观检验方法简单易行,适合于跟踪大生产监控质量的工作。宏观检验能够看到缺陷的全貌,确定缺陷的位置,是进行缺陷分析工作的第一步,是研究缺陷产生原因的基础工作。而微观检验方法是对宏观检验方法进一步深化过程,能够观察到宏观检验看不到的缺陷细节,可以探讨缺陷的属性,进一步确定缺陷的产生原因。因此,宏观检验方法和微观检验方法是密不可分的两种手段,互相匹配,相辅相成,二者不可偏废。通过宏观和微观两种手段弄清楚某种缺陷产生原因后,下次再检验,只做宏观检验,缺陷产生原因就可以清楚了,没有必要对每种缺陷都做微观观察和检验。

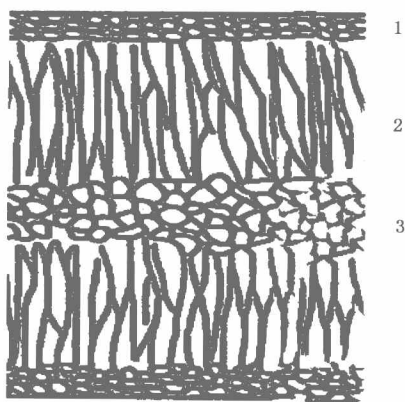
另外,宏观断口检查和化学成分分析都可以做为研究连铸坯缺陷的辅助手段。

第2章 连铸钢坯凝固组织

连铸坯凝固组织一般是由细小等轴晶、柱状晶和中心等轴晶组成,参见图 2-1 和图 2-2。对于大断面连铸坯,通常在柱状晶带和中心等轴晶带之间还存在一个过渡带——交叉树枝晶带。如前所述,因为连铸坯的凝固组织和缺陷与凝固条件有直接关系,所以通过改变凝固条件可以获得合乎要求的凝固组织和减少缺陷。反之,利用凝固组织的检验结果,可以判断凝固条件,进而调整凝固条件,达到提高连铸坯质量的目的。

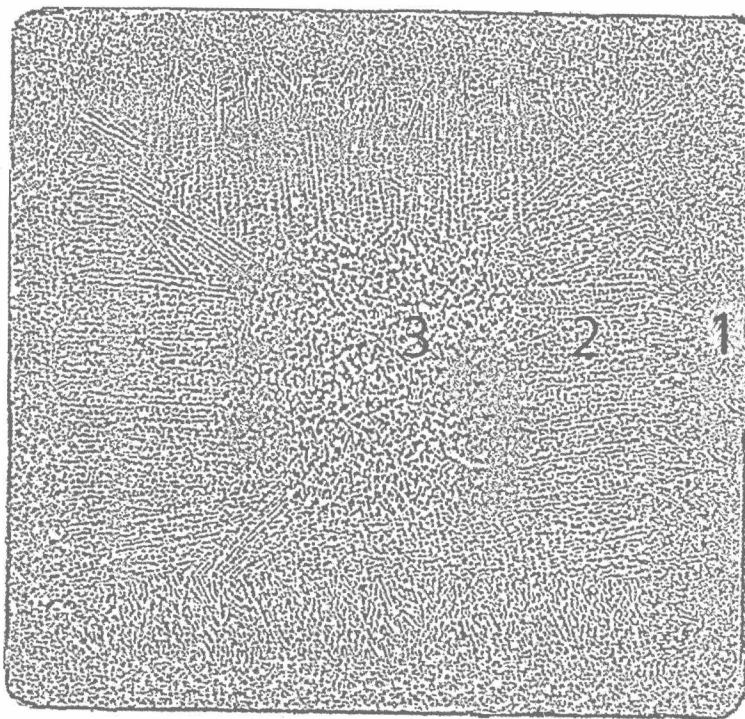
连铸坯凝固组织与浇铸条件、化学成分、铸机机型和连铸坯断面尺寸有关。提高铸温(过热度),增加拉坯速度和增大二次冷却区冷却强度都会使柱状晶发展。常见的连铸机型有立式、立弯式和弧形连铸机三种类型。立式连铸机连铸坯的凝固是从各个侧面向中心对称进行的,因而其凝固组织也是对称的。立弯式连铸机的连铸坯是在其凝固组织基本形成后弯曲的,因而其凝固组织一般来说基本上也是对称的。但是对于弧形连铸机来说,由于连铸坯是沿着圆弧形轨道在倾斜的条件下凝固,连铸坯的凝固组织呈非对称性,一般都是内弧侧柱状晶长度大于外弧侧柱状晶长度。断面尺寸对连铸坯凝固组织有一定影响,断面尺寸增大到一定数值后,中心等轴晶率显著提高。这可以理解为当连铸坯断面尺寸较小时,拉坯速度较快,二次冷却强度较大,其柱状晶较容易发展到连铸坯中心;而对于大断面尺寸连铸坯来说,拉坯速度较慢,二次冷却强度较小,柱状晶不发达,不容易伸展到中心。大断面连铸坯,即使柱状晶发达,因其断面尺寸大,柱状晶也不容易达到中心,这也是方坯连铸机浇铸优质钢时多用较大断面尺寸连铸坯的原因。

连铸机类型不同,其凝固原理基本相同,连铸过程生成的凝固组织基本相似,大体上都是由细小等轴晶、柱状晶、交叉树枝晶和中心等轴晶组成。



1—细小等轴晶带;2—柱状晶带;3—中心等轴晶带。

图 2-1 连铸坯凝固组织示意图



1—细小等轴晶带；2—柱状晶带；3—中心等轴晶带。

图 2-2 连铸坯凝固组织实物图(0.8×)

1—钢种:20 MnSi;2—规格:120 mm×120 mm 方坯。

2.1 细小等轴晶带

钢水从中间包流入结晶器后,放出热量通过结晶器冷却水带走,然后在结晶器中形成坯壳晶粒。

在结晶器上部弯月面附近,钢水与结晶器内表面铜壁紧密接触,结晶器内壁有强烈吸热和散热作用,靠结晶器内壁的一层钢水具有极大的过冷度,受到激冷,冷却速度能够达到 $100\text{ }^{\circ}\text{C/s}$,因此生成大量晶核,此时形核速率大于核长大速率,致使临近的晶核很快彼此相遇,不能长大,形成细小等轴晶带。细小等轴晶带的凝固组织致密,在低倍腐蚀试片上肉眼观察可以见到一层颜色较浅的均匀组织,其化学成分相当于钢水成分。细小等轴晶带的厚度主要取决于钢水过热度、结晶器冷却强度及拉坯速度等因素,也就是取决于结晶器内钢水温度场的影响。钢水过热度越高、结晶器冷却强度越小及拉坯速度越快,细小等轴晶带的厚度越薄。检验实践证明,细小等轴晶带厚度大多数为 $2\sim 8\text{ mm}$ 。

在结晶器中、下部,由于凝固的坯壳收缩,与结晶器内壁脱离而产生空气隙,造成热阻增大,传热减慢,热流开始沿垂直结晶器壁方向流动,此时细小柱状晶开始生长。可见,细小等轴晶是在结晶器上部形成的,而细小柱状晶是在结晶器中、下部形成的。为了防止连铸坯出结晶器下口产生拉漏和坯壳变形,各种规格连铸坯在结晶器下口坯壳要达到一定厚度。小方坯在结晶器出口处坯壳厚度应大于 $8\sim 10\text{ mm}$,厚板坯和大方坯厚度应为 $15\sim 25\text{ mm}$ 。

另外,从测量漏钢后残留坯壳厚度可知,结晶器内坯壳厚度是不均匀的,主要与钢水温度、钢水成分、结晶器液面波动、浇铸钢水对坯壳的冲刷及凝固收缩等因素有关。