DOI: 10.3969/j.issn.1000-6826.2023.06.3002

高品质中厚板炼钢过程中夹杂物特征演变

Evolution of Inclusions in High Quality Medium Steel Plates during Steelmaking Process

供稿|甄新刚[1,2]，李廷刚[1]，李永金[1]，张志强[1]，代景鑫[1]，王章印[2] / ZHEN Xingang[1,2], LI Tinggang[1], LI Yongjin[1], ZHANG Zhiqiang[1], DAI Jingxin[1], WANG Zhangyin[2]

内容导读

造成中厚板超声波探伤不合的主要原因为铸坯偏析、夹杂物含量高、铸坯中心疏松（遗传至钢板）、钢板内部裂纹等。本文针对夹杂物引起的探伤不合问题进行分析，通过对转炉—LF 精炼—RH 真空处理—板坯连铸工艺全流程取样、分析，分析夹杂物的特征演变规律，明确工艺改进的方向。结果表明，转炉出钢铝脱氧后的夹杂物主要为 Al_2O_3。LF 出站、RH 破空时为 CaO–MgO–Al_2O_3 三元系夹杂物，二者成分基本一致。经过 RH 真空精炼后夹杂物数量减少。钙处理后，夹杂物大部分转变为 CaO–MgO–Al_2O_3–CaS 系，CaS 含量较高。软吹结束后夹杂物仍为 CaO–MgO–Al_2O_3–CaS 系。

高品质中厚板对超声波探伤有严格要求。相关研究表明，连铸坯中缺陷往往会“遗传”至钢板中，造成探伤不合[1–7]：连铸坯中偏析在轧制时常常无法全部消除而“遗传”至轧板，造成组织异常进一步导致探伤不合；连铸坯中的大型夹杂物以及夹杂物聚集带在热轧后会随着钢基体流变成为尺寸更大的夹杂物或夹杂物聚集带从而造成探伤不合；连铸坯中心疏松与内裂纹在轧制时常常由于芯部变形量不够而难以“愈合”，也会造成探伤不合。

高品质中厚板大量采用 Al 脱氧和碱性炉渣精炼工艺，钢中全氧（T.O）含量低，有利于减少夹杂物的总量。在 Al 脱氧和碱性渣精炼条件下，钢中容易形成镁铝尖晶石、钙镁铝酸盐类高熔点夹杂物[8–9]，这些夹杂物易黏附于水口内壁且常被钢流冲刷进入结晶器从而形成大型夹杂物，造成钢板探伤不合格。为了改善钢液的可浇性，炼钢时通常采用钙处理，但是钙处理后钢中夹杂物的成分、数量等特征会发生重要变化，钙处理不得当反而会恶化可浇性。因此，有必要对中厚板冶炼过程中夹杂物的形成与特征（数量、成分、尺寸等）的演变规律进行研究，从源头上解决和管控夹杂物带来的钢板探伤不合问题。鉴于此，本文研究本厂生产实践中导致

作者单位：1. 日钢营口中板有限公司，辽宁　营口　115005；2. 北京科技大学绿色低碳钢铁冶金全国重点实验室，北京　海淀　100083

探伤不合的氧化物夹杂物的形成和变化规律，以进一步提高和稳定钢板探伤合格率。

实验方法

选取低合金钢为研究对象，其工艺流程为转炉—钢包精炼（LF）—真空循环脱气精炼（RH）—钙处理—软吹—板坯连铸。在转炉炉后采用 Al 脱氧和渣洗预精炼，LF 进行深脱硫、温度和成分调整，RH 进行脱气处理并促进夹杂物上浮去除，RH 后对钢水进行钙处理，随后进行钢包底吹软搅拌。分别在转炉炉后、LF 进站、LF 出站、RH 破空、钙处理后、软吹后、连铸大包剩余 90 t、连铸大包剩余 60 t 以及连铸大包剩余 30 t 时对钢液和炉渣进行取样，分析钢中非金属夹杂物特征。钢中非金属夹杂物特征采用自动扫描电镜进行分析检测。

钢中非金属夹杂物的特征

形态特征

典型夹杂物的形貌如图 1 所示。转炉出钢后采用铝脱氧，夹杂物主要为簇群状 Al_2O_3；LF 精炼进站时夹杂物主要为块状 Al_2O_3，仅含有少量 MgO 与 CaO；LF 精炼结束时，由于钢液–渣发生复杂的物理化学反应，夹杂物转变为 CaO–MgO–Al_2O_3 三元系夹杂物；RH 破空后，夹杂物仍为 CaO–MgO–Al_2O_3 三元系，但 CaO 含量增加；钙处理后夹杂物由 CaO–MgO–Al_2O_3 三元系大部分转变为 CaO–MgO–Al_2O_3–CaS 系；连铸中间包内夹杂物与软吹结束时一致，为 CaO–MgO–Al_2O_3–CaS 系。

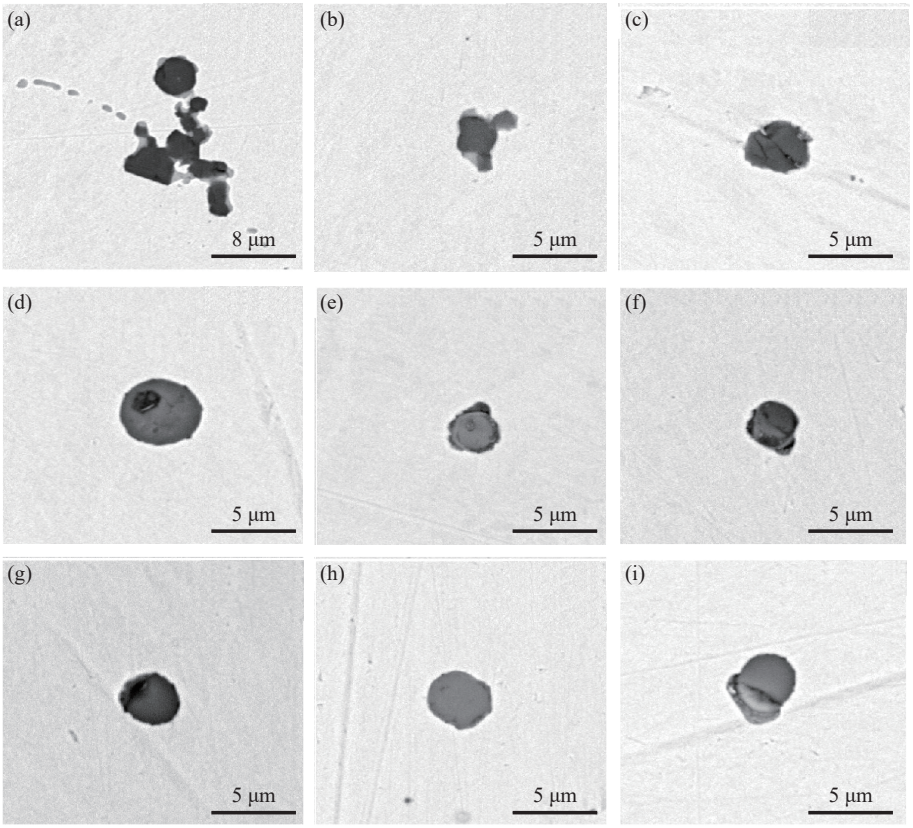

图 1　冶炼过程各工序钢中夹杂物形貌：(a) 转炉炉后脱氧和预精炼；(b) LF 进站；(c) LF 出站；(d) RH 破空；(e) 钙处理结束；(f) 软吹结束；(g) 连铸大包剩余 90 t；(h) 连铸大包剩余 60 t；(i) 连铸大包剩余 30 t

数量特征

转炉炉后所取钢样采用自动扫描电镜观察，观察面积为 14.4 mm^2，共检测到 361 个夹杂物，数量密约度为 25.07 个/mm^2。其中，夹杂物尺寸主要集中在 1~10 μm，共 337 个，尺寸为 10~20 μm 的数量为 24 个，夹杂物最大尺寸为 19.2 μm，

LF 精炼进站时所取钢样在自动扫描电镜下观察面积为 22.0 mm^2，检测到的夹杂物数量为 51 个，数

量密度约 2.32 个/mm²。夹杂物尺寸集中在 1~5 μm，共 43 个，尺寸为 5~10 μm 的数量为 8 个，夹杂物最大尺寸为 7.3 μm。

LF 精炼结束时所取钢样在扫描电镜下观察的面积为 19.6 mm²，夹杂物数量为 330 个，数量密度约为 16.84 个/mm²。夹杂物尺寸集中在 1~5 μm，共 326 个，尺寸为 5~10 μm 的数量为 3 个，>20 μm 的数量为 1 个，夹杂物最大尺寸为 58.8 μm。LF 出站时典型夹杂物的形貌为球形，见图 1(c)。

RH 破空后所取钢样在扫描电镜下观察的面积为 14.4 mm²，夹杂物数量为 130 个，数量密度为 9.03 个/mm²。夹杂物尺寸集中在 1~5 μm，共 120 个，尺寸为 5~10 μm 的数量为 9 个，10~20 μm 的数量为 1 个，夹杂物最大尺寸为 13.2 μm。夹杂物形态为球形，见图 1(d)。

钙处理结束后所取钢样在扫描电镜下观察的面积为 16.2 mm²，夹杂物数量为 557 个，数量密度为 34.38 个/mm²。夹杂物尺寸集中在 1~5 μm，共 489 个，尺寸为 5~10 μm 的数量为 58 个，尺寸为 10~20 μm 的数量为 10 个，最大尺寸为 12.6 μm。

软吹结束后所取钢样在扫描电镜下观察的面积为 16.7 mm²，夹杂物数量为 445 个，数量密度为 26.65 个/mm²。夹杂物尺寸集中在 1~5 μm，共 439 个，尺寸为 5~10 μm 的数量为 6 个，最大尺寸为 7.6 μm。

大包剩余 90 t 时所取钢样在扫描电镜下观察的面积为 14.4 mm²，共检测到的夹杂物数量为 370 个，数量密度为 25.69 个/mm²。夹杂物尺寸集中在 1~5 μm，共 366 个，尺寸为 5~10 μm 的数量为 4 个，最大尺寸为 9.4 μm。

大包剩余 60 t 时所取钢样在扫描电镜下观察的面积为 21.8 mm²，夹杂物数量为 702 个，数量密度为 32.20 个/mm²。夹杂物尺寸集中在 1~5 μm，共 696 个，尺寸为 5~10 μm 的数量为 6 个，最大尺寸为 7.3 μm。

大包剩余 30 t 时所取钢样在扫描电镜下观察的面积为 17.8 mm²，夹杂物数量为 602 个，数量密度为 33.82 个/mm²，夹杂物尺寸集中在 1~5 μm，共 589 个，尺寸为 5~10 μm 的数量为 12 个，尺寸为 10~20 μm 的数量为 1 个，最大尺寸为 15.3 μm。

对上述数据进行整理，结果见表 1。夹杂物的数量密度从 LF 进站时 2.3 个/mm² 增加至软吹结束时 26.7 个/mm²，再增加至连铸时 32.2 个/mm²，夹杂物数量密度整体呈上升趋势；夹杂物的平均尺寸呈下降趋势，从 LF 进站时的 2.9 μm 降低至软吹结束后的 1.6 μm。

表 1　精炼过程钢液试样的夹杂物数量及尺寸

试样	夹杂物数量/个	观测面积/mm²	数量密度/(个/mm²)	平均尺寸/μm
转炉炉后脱氧和预精炼	361	14.4	25.07	4.6
LF进站	51	22.0	2.32	2.9
LF出站	330	19.6	16.84	2.0
RH破空	130	14.4	9.03	2.4
钙处理结束	557	16.2	34.38	2.2
软吹结束	445	16.7	26.65	1.6
大包剩余90 t	370	14.4	25.69	1.7
大包剩余60 t	702	21.8	32.20	1.7
大包剩余30 t	602	17.8	33.82	1.9

各生产工序中夹杂物分布特征分析及演变

图 2 所示为冶炼过程中各工序的夹杂物成分分布特征图，图中曲线代表 1873 K 时的液相线。由图 2 分析可知：

（1）由于转炉出钢采用 Al 进行强脱氧，转炉炉后夹杂物以 Al_2O_3 为主，LF 进站时夹杂物以 Al_2O_3 为主，含少量 MgO 与 CaO；

（2）LF 出站及 RH 破空时夹杂物为 CaO–MgO–Al_2O_3 三元系夹杂物，二者成分基本一致，但经过 RH 真空精炼后夹杂物数量减少。

（3）钙处理后夹杂物大部分转变为 CaO–MgO–Al_2O_3–CaS 系夹杂物，CaS 含量较高。

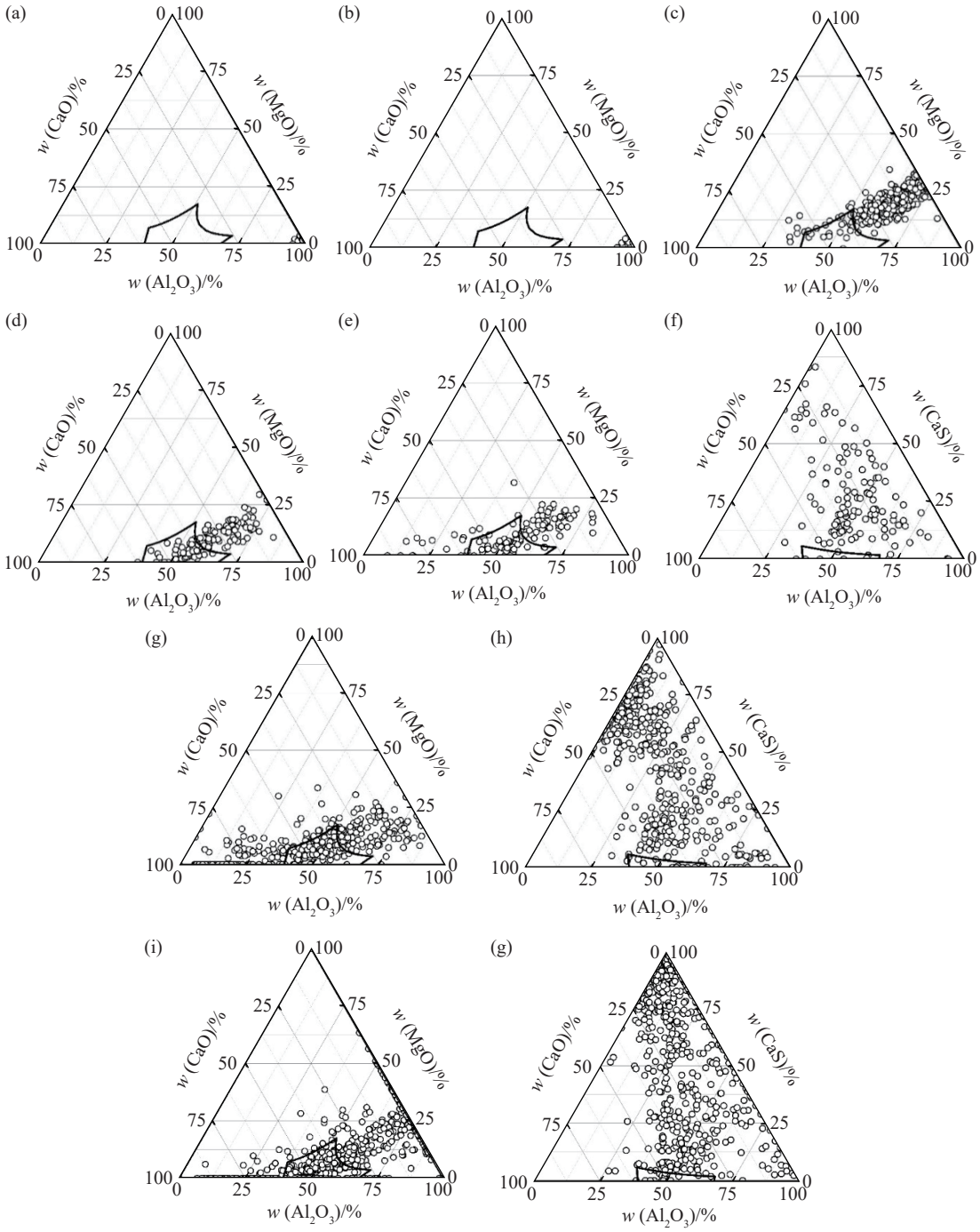

图 2　冶炼各工序钢水中夹杂物成分分布特征：(a) 转炉炉后；(b) LF 进站；(c) LF 出站；(d) RH 进站；(e) RH 破空；(f) 钙处理后；(g) 软吹结束；(h) 连铸大包剩余 90 t；(i) 连铸大包剩余 60 t；(j) 连铸大包剩余 30 t

（4）软吹结束后夹杂物仍为 CaO–MgO–Al_2O_3–CaS 系夹杂物；

（5）连铸过程中间包内夹杂物仍为 CaO–MgO–Al_2O_3–CaS 系，但更多夹杂物的化学组成进入低熔点区，整个浇铸过程中成分基本不变。

工艺优化措施与效果

通过对夹杂物的形貌、类型、数量密度、成分等特征变化分析可知：LF 精炼时夹杂物由 Al_2O_3 转变为 CaO–MgO–Al_2O_3 三元系夹杂物；RH 真空处理时，夹杂物数量密度大幅降低；钙处理后部分夹杂

物转变为低熔点钙铝酸盐，大部分转变 $CaO–MgO–Al_2O_3–CaS$ 系，数量密度大幅增加，另外钢水容易出现二次氧化。

鉴于此，提出炼钢工艺优化的方向为：提高钢水真空处理的比例，同时减轻钙处理强度或取消钙处理以减少夹杂物数量、降低钢水精炼时的二次氧化，具体如下：

（1）提高钢水进行 RH 真空处理的比例，降低钢中 [H] 含量、大幅减少夹杂物的数量。除此之外，还可有效规避和减少因 [H] 含量偏高导致的探伤不合。

（2）对非硬性要求钙处理的钢种，尽量减轻钙处理强度或取消钙处理，以减少夹杂物的总量，兼顾降本需求。

（3）有钙处理要求的钢种，采用轻钙处理（≤100 m 纯钙线）将夹杂物控制在 $CaO–Al_2O_3–CaS$ 三元系中高 $Al_2O_3–CaS$ 含量区域。

（4）采用水口及塞棒吹氩，避免涨棒和堵水口导致的可浇性问题。

结束语

通过对 LD—LF—RH—CC 工艺流程下的熔融态钢液进行取样、分析，明确了夹杂物在各个工序的变化趋势，具体如下：（1）LF 精炼时夹杂物由 Al_2O_3 转变为 $CaO–MgO–Al_2O_3$ 三元系夹杂物。LF 结束后进行 RH 真空处理时，夹杂物数量密度大幅降低；（2）钙处理后部分夹杂物成为转变为低熔点钙铝酸盐，钙处理过程钢水发生二次氧化的风险增加；大部分夹杂物转变为 $CaO–MgO–Al_2O_3–CaS$ 系，尽管尺寸有所降低，但是数量密度大幅增加，不利于提高和稳定钢板的探伤合格率。提出炼钢工艺改进方向为：提高钢水真空处理的比例，同时减轻钙处理强度或取消钙处理以减少夹杂物数量、降低减少钢水精炼时的二次氧化。

参考文献

[1] 刘庆波. Q345B 中厚板探伤不合原因分析及控制措施. 连铸，2015，40(5)：15
[2] 袁少威，许少普，王新，等. 70~100 mm 厚低合金钢板探伤不合原因分析及控制. 轧钢，2015，32(4)：80
[3] 王宝君，臧涛，蔺晓亮. Q345R 中厚板探伤不合格原因分析. 物理测试，2019，37(6)：55
[4] 张振兴，王强，刘忠满，等. 中厚板探伤不合格原因分析与改善措施. 宽厚板，2022，28(4)：32
[5] 刘德祥，翟卫江，刘义，等. 南钢管线钢非金属夹杂物去除工艺. 金属世界，2015(4)：69
[6] 杨治争，严翔，熊玉彰，等. 夹杂物特性对 10CrNi3MoV 钢冲击韧性的影响. 特殊钢，2022，43(5)：33
[7] 孙复年，任能，任本福，等. GCr15 轴承钢连铸坯冷却速度与入炉温度对其组织和性能的影响. 金属世界，2024(3)：53
[8] 储焰平，张立峰，葛君生，等. 基于“转炉—LF—VD”工艺高速重轨钢非金属夹杂物控制技术探讨//第十三届中国钢铁年会论文集. 重庆，2022：237
[9] 杨恩蛟，姜敏，侯泽旺，等. 连铸板坯凝固末端大压下改善铸坯内部质量. 中国冶金，2020，30(5)：23

作者简介：甄新刚（1982—），男，河北省秦皇岛市人，日钢营口中板有限公司冶金技术处处长。2010 年毕业于北京科技大学钢铁冶金专业，硕士研究生。主要研究方向：炼钢工艺技术。主持完成了多项连铸方面的新工艺的研究与开发项目，在《钢铁》、《炼钢》等核心期刊发表论文 27 篇；授权发明专利 23 项；科研成果获得冶金科学技术二等奖，辽宁省科学技术二等奖。通信地址：辽宁省营口市老边区营口中板科技楼；E-mail：sqszhen@163.com。