

炼钢过程中夹杂物的形态控制与去除

王小峰

河南安钢周口钢铁有限责任公司 河南 周口 466300

摘要: 炼钢过程中, 夹杂物形态控制与去除是提升钢材质量的关键。形态控制技术包括钙处理改性 Al_2O_3 为低熔点钙铝酸盐、稀土元素实现夹杂物球化、复合脱氧剂优化夹杂物尺寸与分布。去除工艺则涵盖钢包吹氩、中间包气幕挡墙、电磁搅拌及过滤器拦截等技术。这些方法通过减少夹杂物数量、改变其形态或分布, 显著降低其对钢材力学性能、疲劳寿命及耐蚀性的危害, 助力洁净钢生产。

关键词: 炼钢过程; 夹杂物; 形态控制; 去除

引言: 在钢铁材料向高性能、高品质方向发展的当下, 炼钢过程中夹杂物的控制成为关键制约因素。夹杂物作为钢中的非金属相, 不仅会割裂钢基体、引发应力集中, 还会导致裂纹萌生与扩展, 显著降低钢材的强度、韧性及疲劳寿命。其形态(如尖锐度、尺寸分布)与去除效率直接影响最终产品的表面质量与耐蚀性。因此, 系统掌握夹杂物的形成机理, 开发精准的形态调控技术与高效的去除工艺, 已成为炼钢领域实现洁净化生产的核心课题。

1 炼钢过程中夹杂物的分类与形成机理

1.1 夹杂物的分类

(1) 按来源: 内生夹杂与外来夹杂。内生夹杂源于钢液内部反应, 主要包括脱氧产物(如Si-Mn脱氧生成的 $MnO \cdot SiO_2$ 、Al脱氧生成的 Al_2O_3)和二次氧化产物(钢液与空气接触生成的氧化物); 外来夹杂来自外部环境, 如耐火材料侵蚀脱落物、冶炼过程中卷入钢液的炉渣等。(2) 按化学成分: 可分为氧化物、硫化物、氮化物及复合夹杂。氧化物常见的有 Al_2O_3 、 SiO_2 、 MnO 等; 硫化物以MnS为主, 多在凝固阶段析出; 氮化物主要为TiN、AlN, 由钢液中氮与钛、铝等元素反应生成; 复合夹杂是多种化合物的结合体, 如 Al_2O_3 -MnS复合相。(3) 按尺寸: 宏观夹杂($> 50\mu m$), 肉眼可见或借助低倍显微镜可观察, 对钢材性能危害极大; 微观夹杂($1-50\mu m$), 需高倍显微镜识别, 是影响钢材疲劳性能的关键因素; 超细夹杂($< 1\mu m$), 分散性好, 若控制得当可细化晶粒, 改善钢材韧性。

1.2 夹杂物的形成机理

(1) 脱氧反应动力学: 不同脱氧工艺对应不同夹杂物生成演变规律。Si-Mn脱氧为渐进式反应, 先形成 SiO_2 , 再与MnO结合生成低熔点复合氧化物, 易上浮去除; Al脱氧反应剧烈, 快速生成高熔点 Al_2O_3 , 初期呈细

小颗粒, 易聚集长大形成簇状夹杂。(2) 二次氧化机制: 钢液在浇铸、精炼等过程中, 与空气、炉渣接触发生氧化反应。钢液中的合金元素(Si、Mn、Al等)与氧结合生成新的氧化物夹杂, 炉渣卷入后还会引入CaO、MgO等成分, 形成复合夹杂。(3) 凝固过程中夹杂物的析出与长大: 凝固时钢液中溶质元素重新分配, 枝晶间溶质富集, 当超过溶解度极限时, 夹杂物会在枝晶间析出。同时, 原子扩散使细小夹杂物相互碰撞融合, 实现长大, 最终形成不同尺寸和分布的夹杂物^[1]。

1.3 夹杂物对钢材性能的影响机制

(1) 力学性能: 夹杂物是裂纹萌生的核心位点, 在外力作用下, 夹杂物与基体界面易产生应力集中, 进而形成微裂纹并扩展; 疲劳载荷下, 夹杂物周围易产生疲劳裂纹, 加速疲劳断裂; 韧性断口分析显示, 夹杂物含量越高, 断口韧性越差, 断裂方式易从韧性断裂转为脆性断裂。(2) 表面质量: 轧制过程中, 钢材内部夹杂物会导致表面缺陷, 如较大夹杂物易造成钢材表面翘皮, 层状分布的夹杂物会引发轧制分层, 严重影响钢材外观和使用安全性。(3) 耐蚀性: 夹杂物与基体存在电位差, 形成微电池。如硫化物、氧化物夹杂物多为阳极, 易发生溶解腐蚀, 进而引发钢材局部腐蚀, 降低钢材耐蚀性能。

2 炼钢过程中夹杂物的形态控制技术

2.1 化学法形态控制

(1) 钙处理技术: 这是改善 Al_2O_3 系夹杂物形态的核心技术之一。向钢液中加入钙合金(如Ca-Si合金)后, 钙与钢液中未上浮的 Al_2O_3 发生化学反应, 将高熔点、高硬度且呈簇状分布的 Al_2O_3 夹杂物, 改性为低熔点(约 $1450^\circ C$)、塑性良好的钙铝酸盐, 典型相组成如 $12CaO \cdot 7Al_2O_3$ 。改性后的夹杂物在轧制过程中可随基体发生塑性变形, 避免形成应力集中点, 同时低熔点特性

使其更易在钢液中上浮去除,显著提升钢材力学性能^[2]。

(2) 稀土元素添加: 稀土元素(Ce、La等)具有极强的脱氧、脱硫能力,同时能有效实现夹杂物球化。稀土元素优先与钢液中的氧、硫结合,生成高稳定性的稀土氧化物(如Ce₂O₃)、稀土硫化物(如La₂S₃)或稀土氧硫化物(如Ce₂O₂S)。这类夹杂物具有良好的球形或近球形形态,且与钢基体的界面结合性优异,可避免传统夹杂物的尖锐棱角对基体的割裂作用,同时能抑制其他有害夹杂物的长大,进一步优化钢材的韧性和疲劳性能。

(3) 复合脱氧剂设计: 通过合理搭配Si-Ca、Al-Mg、Si-Mn-Al等多元复合脱氧剂,利用各组分的协同效应优化夹杂物形态与尺寸。例如, Si-Ca复合脱氧时, Si可初步脱氧降低钢液氧含量, Ca则对生成的氧化物进行改性,避免单一脱氧剂导致的夹杂物形态不佳问题; Al-Mg复合脱氧可生成MgO·Al₂O₃尖晶石型夹杂物,其尺寸细小、分布均匀,且能细化钢液晶粒,实现夹杂物控制与晶粒细化的双重效果。

2.2 物理法形态控制

(1) 电磁搅拌技术: 借助电磁感应产生的洛伦兹力驱动钢液流动,实现夹杂物的形态调控与去除。工业中常用的电磁搅拌技术包括结晶器电磁搅拌(EMS)、电磁制动(EMBR)等。电磁搅拌可打破钢液的静止状态,促进细小夹杂物碰撞、聚集长大,形成更易上浮的大尺寸夹杂物;同时,稳定的钢液流场可避免夹杂物在局部聚集,改善其分布均匀性,EMBR还能抑制结晶器内钢液的湍动,减少卷渣导致的外来夹杂物引入。(2) 超声波处理: 利用超声波在钢液中传播产生的空化效应和机械振动调控夹杂物形态。空化效应形成的微小气泡破裂时会产生强烈的冲击波,可将大尺寸、不规则的夹杂物破碎为细小颗粒;同时,超声波的机械振动能加速钢液内部的质量传输,促进细小夹杂物均匀分散,避免其聚集长大,进而获得尺寸细小、分布均匀的夹杂物,提升钢材的致密度和力学性能^[3]。(3) 气泡浮选法: 通过向钢液中吹入惰性气体(如氩气),生成大量微小气泡,利用气泡对夹杂物的吸附作用实现夹杂物的上浮去除与形态优化。典型工艺如RH真空循环脱气、VD真空精炼等,在真空环境下吹入惰性气体,气泡在上升过程中不断吸附钢液中的细小夹杂物,使夹杂物随气泡上浮至钢液表面并进入炉渣被去除。该技术可有效减少钢液中夹杂物含量,同时避免夹杂物在钢液中过度聚集长大,保证夹杂物的合理形态与分布。

2.3 凝固过程控制技术

(1) 低温浇注技术: 通过降低钢液浇注温度,减小

钢液过热度,抑制柱状晶生长,促进等轴晶形成,进而减少夹杂物的枝晶间偏聚。较低的过热度可降低钢液中原子的扩散速率,减缓夹杂物的析出与长大速度,同时等轴晶的均匀生长能避免夹杂物在枝晶间的大量聚集,使夹杂物更均匀地分布在钢基体中,减少因夹杂物偏聚导致的局部性能劣化。(2) 电磁连铸技术: 将电磁场引入连铸结晶器,通过电磁场的作用细化铸坯晶粒,改善夹杂物的分布均匀性。电磁场可抑制钢液的对流湍动,减少卷渣和二次氧化,同时能破碎长大的晶粒,促进细小等轴晶的形成。晶粒细化后,夹杂物的析出位点增多,可避免夹杂物在局部集中,实现夹杂物的均匀分布,提升铸坯质量,为后续轧制获得高性能钢材奠定基础。(3) 轻压下技术: 在铸坯凝固末端施加一定的压力,通过塑性变形弥补铸坯的凝固收缩,减少缩孔和疏松缺陷,同时抑制夹杂物的聚集。凝固末端的钢液处于液固两相区,夹杂物易在该区域聚集,轻压下可促进液固两相区的钢液流动,将聚集的夹杂物推向铸坯中心或随钢液排出,减少夹杂物的局部富集,提升铸坯的致密度和成分均匀性,改善钢材的力学性能和表面质量^[4]。

3 炼钢过程中夹杂物的去除工艺优化

3.1 炼钢各工序的夹杂物去除机制

(1) 转炉炼钢: 核心依靠顶底复吹工艺实现夹杂物去除。顶吹氧气流股冲击钢液形成剧烈搅拌,底吹惰性气体(氩气)产生上升气泡流,二者协同作用打破钢液静止状态,促进细小夹杂物碰撞聚集、长大为大尺寸夹杂物。同时,气泡上升过程中吸附钢液中的夹杂物,携带其上浮至炉渣层被捕获,实现夹杂物与钢液的分离。(2) 炉外精炼: 通过多工艺协同强化夹杂物去除。LF精炼以渣洗为核心,高碱度精炼渣与钢液充分接触,溶解钢液中的氧化物夹杂物,同时吸附悬浮的细小夹杂物;RH真空脱气利用真空环境降低钢液中气体分压,促进夹杂物上浮,且循环流动的钢液增强了夹杂物与渣相的反应效率;CAS-OB通过浸渍罩隔离钢液与空气,减少二次氧化产生的夹杂物,同时吹氩搅拌促进夹杂物上浮。(3) 连铸过程: 聚焦“防堵+分离”双目标去除夹杂物。保护浇注通过长水口、浸入式水口等设备隔绝空气,避免钢液二次氧化生成新夹杂物;中间包冶金设置挡墙、坝、过滤器等装置,改变钢液流场,延长钢液停留时间,促进夹杂物上浮,同时过滤器直接拦截大尺寸夹杂物;结晶器流场控制(如电磁制动)抑制钢液湍动,减少卷渣引入的外来夹杂物,保障夹杂物稳定上浮。

3.2 关键工艺参数优化

(1) 精炼渣成分设计: 核心是构建高碱度、低氧化

性的CaO-Al₂O₃-SiO₂三元渣系。高碱度(CaO/SiO₂ ≥ 3)可提升渣相溶解Al₂O₃等氧化物夹杂物的能力,低氧化性(FeO+MnO ≤ 1%)避免渣中氧引发钢液二次氧化,同时合理调控Al₂O₃含量,保证渣相具有适宜的黏度和流动性,增强与钢液的反应界面,提升夹杂物去除效率。

(2)吹氩制度优化:通过精准控制透气砖布局、氩气流量与压力实现优化。透气砖采用多点位均匀布局,确保氩气气泡均匀分布于钢液中,避免局部搅拌不足;低流量、稳压力的吹氩模式可生成细小均匀的气泡,提升对细小夹杂物的吸附效率,避免高流量吹氩导致的钢液湍动过大、卷渣风险增加,实现夹杂物高效去除与钢液稳定的平衡。(3)浇注系统设计:多环节参数协同优化保障夹杂物去除。中间包采用大容量设计,延长钢液停留时间(≥ 8分钟),为夹杂物充分上浮提供条件;长水口设置氩封装置,通过持续通入微量氩气隔绝空气,防止二次氧化,同时避免水口堵塞;结晶器电磁制动精准调控磁场强度,抑制钢液液面湍动,减少卷渣,保障夹杂物稳定上浮至保护渣层被去除^[5]。

3.3 新型去除技术开发

(1)夹杂物吸附剂:以陶瓷过滤器、泡沫陶瓷过滤器(CFF)为代表,依靠多孔结构实现夹杂物拦截。泡沫陶瓷过滤器具有高孔隙率、大比表面积的特点,钢液流经时,大尺寸夹杂物被直接拦截,细小夹杂物则在孔隙表面吸附,其对≥ 20μm夹杂物的拦截效率可达90%以上,能显著降低钢液中夹杂物含量。(2)离心分离技术:利用夹杂物与钢液的密度差,通过离心力实现分离。钢液在离心设备中高速旋转时,密度大于钢液的夹杂物(如氧化物、硫化物)受离心力作用向外侧迁移聚

集,密度较小的钢液处于内侧,最终通过分区出料实现夹杂物与钢液的分离,尤其适用于去除大尺寸、高密度的外来夹杂物。(3)磁场过滤技术:针对磁性夹杂物(如FeO、MnS、Fe₃O₄)开发,利用高梯度磁场的强磁力捕获夹杂物。高梯度磁场中,磁性介质产生强磁场梯度,钢液流经时,磁性夹杂物被磁力吸附在介质表面,实现与非磁性钢液的分离,该技术对细小磁性夹杂物的去除效率显著,且不影响钢液成分和温度。

结束语

炼钢过程中夹杂物的形态控制与去除是提升钢材综合性能的核心环节。通过钙处理、稀土添加、复合脱氧等化学手段,可有效优化夹杂物形态,减少其对基体的割裂作用;结合电磁搅拌、超声波处理、气泡浮选等物理方法,能显著提升夹杂物去除效率。未来,随着新型吸附材料、智能流场控制及多场耦合技术的深度应用,夹杂物控制将向更精准、高效、绿色方向发展,为高端装备制造提供更高品质的洁净钢材料支撑。

参考文献

- [1]赵亮,孙娜.氧含量调控对钢水夹杂物形成的影响及优化策略[J].炼铁,2020,39(2):42-48.
- [2]王雄文.炼钢连铸中的非金属夹杂物控制与去除方法研究[J].冶金与材料,2024,44(01):31-33.
- [3]王子铮.炼钢-精炼-连铸钢中夹杂物控制[J].现代制造技术与装备,2023,59(05):132-134.
- [4]蒋星亮,敖翔.炼钢-精炼-连铸钢中夹杂物控制研究[J].科技创新与应用,2021,11(34):91-94.
- [5]李明,王晓华.炼钢过程中氧含量对钢水夹杂物形成的影响机制研究[J].钢铁研究,2021,33(4):12-18.