

# 钢包炉精炼过程夹杂物有效控制策略研究

万来宝

(新疆八一钢铁有限公司, 新疆 乌鲁木齐 890022)

**摘要** 金属材料的质量和性能对于工业应用具有关键意义, 而夹杂物是影响金属材料性能的关键因素之一。本文分析了夹杂物在金属冶炼过程中的类型和形成机理, 探究了夹杂物对精炼过程和产品质量的影响, 并提出了钢包炉精炼夹杂物控制策略, 包括优化精炼工艺操作参数、改进炉渣处理工艺、优化精炼工艺过程和引进先进技术和控制系统等。通过以上策略, 旨在能为有效减少夹杂物、提升金属产品质量和性能提供参考。

**关键词** 金属冶炼; 夹杂物; 形成机理; 精炼过程; 产品质量

中图分类号: TF748

文献标识码: A

文章编号: 2097-3365(2024)03-0118-03

金属材料在现代社会中扮演着不可或缺的角色, 其广泛应用于建筑、交通、能源等各个领域, 而夹杂物对金属材料的性能和质量具有重要影响。在该背景下, 如何降低金属材料中夹杂物的含量, 优化精炼工艺, 成为提高金属制品质量和附加值的关键一环, 也是金属冶炼产业转型升级的迫切任务。尽管金属冶炼领域取得了一定的技术进步, 但夹杂物仍然是制约金属材料质量提升的重要瓶颈之一。特别是在高强度、高韧性等特殊要求的应用领域, 夹杂物问题愈发凸显, 严重制约了金属材料的进一步应用和推广。

本文通过深入分析夹杂物的类型、形成机理以及对精炼过程的影响, 旨在寻找切实可行的技术策略, 有效降低夹杂物含量, 提升金属材料的质量和性能。

## 1 夹杂物的类型和形成机理分析

在冶炼或连铸过程中, 夹杂物是一类与钢机体无任何联系、呈独立存在的氧化物、硫化物、氮化物等非金属相。这些夹杂物经过加工或热处理后仍无法消除。它们来自多个渠道, 如原料中的杂质、矿石中的脉石、耐火材料带入的夹杂物, 还包括钢液在冶炼过程中的反应产物等。夹杂物在材料工程中具有重要影响, 不同类型的夹杂物有不同的形成机制, 因此在优化精炼过程时, 须综合考虑不同因素, 以实现夹杂物的有效控制。

### 1.1 气体夹杂物

气体夹杂物是由气体在材料中析出或吸收而形成的微小气体包囊, 在精炼炉造渣过程中, 夹杂物的形成与原材料中气体的溶解度以及炉内气氛的变化密切相关。在金属冶炼过程中, 原材料中的气体溶解度会

受到温度和压力的影响而变化, 当温度升高或压力降低时, 原材料中的气体会逐渐析出, 形成微小气泡。这些气泡会在金属凝固过程中被包裹在金属晶界或内部, 形成气体夹杂物。相反, 如果温度下降或压力升高, 之前析出的气泡会重新被溶解, 从而减少夹杂物含量。

### 1.2 氧化夹杂物

精炼炉内的高温条件导致原材料中存在的金属氧化物颗粒进一步析出, 附着在金属表面或嵌入晶界中, 从而形成氧化夹杂物。在精炼过程优化中, 通过调整炉内温度, 可以减缓或抑制金属氧化物的生成速率, 从而降低氧化夹杂物的含量。此外, 减少金属与氧气的接触也是降低氧化夹杂物的重要手段, 精炼炉的气氛控制和氧气含量调节, 可以有效减少氧气对金属表面的影响, 从而降低氧化夹杂物的生成。通过合理设计精炼炉内部结构和加强气氛控制, 可以最大程度地减少金属氧化物的形成, 进而提高金属材料的纯净度和性能。

### 1.3 硫化夹杂物

在金属冶炼中, 硫是一种常见的杂质元素, 其存在容易导致硫化夹杂物的形成。为了降低夹杂物含量, 控制原材料中硫的含量是首要任务之一, 通过筛选低硫原料, 可以有效减少硫化夹杂物的源头。此外, 精炼炉过程中的温度和反应条件也会影响硫的析出和合金化反应。因此, 在精炼炉的操作中, 适当调整温度和反应条件, 有助于控制硫的含量和分布, 从而减少硫化夹杂物的生成。此外, 还可以考虑加入硫化物抑制剂等措施来控制硫化夹杂物的生成, 硫化物抑制剂可以与硫化物发生竞争性反应, 阻止硫的析出, 从而减少硫化夹杂物的形成。

## 2 夹杂物对精炼过程和产品质量的影响

在现代工业生产中,金属材料的质量和性能直接关系到产品的可靠性和耐用性,然而,夹杂物的存在往往会降低金属材料的力学性能、化学稳定性和耐蚀性,从而影响产品的综合品质与市场竞争力。

### 2.1 内部缺陷引发的性能下降与失效风险

夹杂物在金属结构中是应力集中点和微小裂纹的引发因素,容易导致材料断裂,从而削弱金属的机械性能,包括强度、韧性和塑性。由于夹杂物通常存在于材料的内部,它们成为内部缺陷,在受到外力作用时引发微小裂纹,随着应力的积累,这些裂纹会扩展并导致材料失效。

### 2.2 结构不均匀性增加的加工难度与能源消耗

夹杂物含量过高会导致金属材料的结构变得不均匀,这导致切削工具的过度磨损和断裂,进而显著增加了加工的难度和成本。如在冷轧过程中,夹杂物导致金属板材的不均匀压下,引发表面皱纹或不均匀的变形,不仅降低了产品的表面质量,还增加了加工难度,需要额外的工艺进行修复和调整。

另外,夹杂物的存在会吸收精炼炉内的热量,直接导致炉内温度下降,进而对整个精炼过程产生诸多影响,这种现象影响了炉内的炉料熔化速度和反应速率,导致炼炉时间延长,从而对生产效率产生不利影响。

### 2.3 影响金属液流动性减弱精炼效果

夹杂物的存在会导致金属液的流动变得不畅,因为它们会在金属液中形成微小团聚体或气泡,这阻碍了渣液和金属液的有效分离、混合,以及连铸坯的凝固过程,流动性不佳导致渣液在炉内无法均匀分布,从而影响了炉内各种反应的进行。其次,金属液中的夹杂物团聚体或气泡导致金属液的混合不均匀,影响了金属的组织均匀性和成分一致性,最终导致冶炼出的金属材料的纯净度下降,精炼效果降低,甚至影响材料的性能和用途。

### 2.4 影响生产连续性

夹杂物过高会与炉料中的其他元素发生复杂的反应,导致炉渣成分发生变化,产生不稳定的渣体。夹杂物中的化学元素与炉料中的元素发生化学反应,形成新的化合物或改变原有的炉渣成分,这些变化会影响炉渣的粘度、流动性和脱除效率。变化的炉渣成分导致精炼炉内的炉渣不稳定,难以控制和调整。

## 3 钢包炉精炼夹杂物控制策略

随着现代工业不断发展,钢铁等金属冶炼行业对高效、环保的生产方式的需求不断增长,夹杂物的生

成与多个因素密切相关,各因素间相互作用,共同影响夹杂物的含量和性质。为此,需要综合考虑原材料成分、温度控制、炉渣配方以及操作参数等多个因素,提高炼钢效率,以期减少废渣产生,降低能耗,从而推动钢铁工业向更加智能、绿色和可持续发展的方向迈进。

### 3.1 优化精炼工艺操作参数

钢中夹杂物的产生与氧、氮、硫等元素含量相关,在铸造过程中,随着钢的温度逐渐降低,氧、氮、硫等元素逐渐析出<sup>[1]</sup>。因此,在熔炼温度控制方面,关键是找到一个适当的温度范围,以避免夹杂物的不良影响。对于一些金属,过高的温度可能会导致夹杂物氧化、融合或挥发,而过低的温度则可能使夹杂物不容易分离。通过实时温度监测系统,可以确保在合适的温度范围内进行熔炼适当延长熔炼时间,有助于夹杂物的分离和集聚,从而减少夹杂物的含量。相关研究表明,精炼时间对合金液中氧含量变化及非金属夹杂物数量、尺寸、类型特征能够产生影响,当精炼时间达到 90min 时,合金中非金属夹杂物的数量和尺寸降至最低<sup>[2]</sup>。精炼处理时间保持在 30min 以上,钢水夹杂物含量达到较好的水平;精炼处理时间 32min 到 60min 时,精炼结束夹杂物水平基本一致。此外,冶炼气氛控制方面,通过控制氧气、氮气等气氛的供给,可以影响夹杂物的化学性质和分离行为。

### 3.2 改进炉渣处理工艺

在炼钢过程中,石灰的加入量至关重要,必须与钢水成分、炉渣碱度、钢种磷、硫要求相匹配<sup>[3]</sup>。同时,作为助熔剂,诸如矿石、萤石等的溶剂的投入量需要根据炉内温度和炉渣状态进行动态调整,以确保最佳效果。合理控制石灰的加入量能够优化钢渣反应,促使夹杂物去除和磷、硫分离<sup>[4]</sup>,从而确保生产高质量的钢材。为进一步提升产品品质,通过优化精炼炉渣料配比,制备流动性良好的白渣,可在冶炼过程中有效地降低钢中的非金属夹杂物等级,显著增强最终产品的质量和性能。该过程中,渣料不仅能够与熔融金属发生物理和化学反应,吸附和夹持夹杂物,还能够调控金属液的温度、成分和氧化还原环境,为金属的脱氧、脱硫和脱氮等关键工艺提供有力支持。在渣料设计方面,首先可以通过选用适宜的渣料成分,来调整渣液的黏度、密度和表面张力等物理特性,从而影响夹杂物在渣液中的分布与运动;其次,在化学成分方面的优化,可以引入一定量的还原剂或氧化剂,以调控渣液的氧化还原环境,从而促进夹杂物的还原过程,促使气泡的形成与分离。

在实际操作工况中,针对不同类型的钢材和生产工艺,可以采取不同的渣料配比方案。如在不锈钢冶炼中,可采用高碱度的炉渣,与硫化物反应生成易吸附的硫酸钠等化合物,实现硫的脱除。而在低合金钢冶炼中,则可根据夹杂物的特性,选择适当的氧化剂和还原剂,通过渣液的氧化还原反应,有针对性地促进夹杂物的去除和分离。研究表明,在LF精炼炉渣中,将MgO含量控制在适宜范围,如6%~10%,能够有效降低熔渣黏度,从而提高炉渣的流动性,为夹杂物控制创造更为有利的条件<sup>[5]</sup>。

### 3.3 优化精炼工艺过程

优化搅拌、渣洗、真空去气、喂线等工艺过程,可以促进夹杂物与渣液的交互作用,能够改变金属液的物理状态、化学环境和流动性,使夹杂物更容易被捕捉、吸附和分离,增加夹杂物进入渣液的机会,从而提高去夹杂的效率,可根据钢种的需要,进行工艺方法选择和组合<sup>[6]</sup>。搅拌能够通过机械或气体搅拌装置,有效地改变金属液的流动性和温度分布,从而促进夹杂物与渣液的交互,使得夹杂物在金属液中更容易被捕捉和吸附,进而被带入渣液中。此外,还能改变渣液的氧化还原环境,通过还原反应促使夹杂物还原成更易于被渣液吸附的形态,进一步提高去夹杂效率。

同时,也可通过引入合成渣料来加速夹杂物的分离和脱除,即洗渣工艺,合成渣料具有更强的吸附能力和流动性,能够更有效地与夹杂物发生作用。当合成渣料与金属液接触时,夹杂物会被吸附到渣液中,随着渣液的流动被带出金属液,这种方法能够快速降低夹杂物含量。真空去气,不仅可以减少夹杂物的生成,还可以促使已存在的夹杂物浮到金属液表面被移除。最后,通过喂线工艺降低夹杂物,向金属液中添加特定的合金材料、气体或化合物,能够在金属液中引入化学反应,从而促进夹杂物的聚集和排除,该方法能够改变金属液的物理状态。如引入气体可以形成气泡,将夹杂物聚集在气泡表面,然后随气泡上浮至金属液表面,从而实现夹杂物的分离。

### 3.4 引用先进的技术和控制系统

引入先进的在线检测技术、传感技术和自动化控制系统,能够实现更精确的夹杂物控制,从而优化精炼炉造渣工艺,降低夹杂物含量,提高金属制品的质量<sup>[7]</sup>。在精炼炉造渣工艺中,通过光谱分析技术可以实时监测夹杂物的种类和含量,不同种类的夹杂物在光谱上会呈现出独特的特征峰,通过分析这些特征峰的强度和位置,可以准确地确定夹杂物的存在和含量。

基于光谱分析的检测结果,操作人员可以及时调整工艺参数,如搅拌强度、温度、喂线速度等,以实现更精确的夹杂物控制。此外,传感技术可以将渣液的温度、流动性、氧化还原环境等参数准确地传递给自动化控制系统,自动化控制系统可以根据这些数据,实现更精确的夹杂物控制。

### 3.5 钢水在线直接测量夹杂物

该系统一般用在钢包和中间包内的在线测定钢中的液态和固态夹杂物,其原理是:钢水流入一空腔时,流入口间加上恒定的电流,由于钢中含有夹杂物使得流入口间的电阻增加,可测得流入口间的电压升高,出现一峰值,该峰值高低与夹杂物的大小相关,峰值数量与夹杂物的数量相关,这样就能获得钢中夹杂物的分布。测定夹杂物的大小为40~300微米,并分析各自的比例。该系统的使用,可用来作为质量控制手段过程控制的工具,减少钢中的夹杂物,减少中间包水口堵塞的机率。

## 4 结论

为提高产品质量,本文深入分析了夹杂物的类型和形成机理,探究了夹杂物对精炼过程和产品质量的影响。并基于上述分析,从工艺操作参数优化、炉渣处理工艺改进、精炼过程工艺优化和先进技术与系统的引进等四个方面,提出了钢包炉精炼夹杂物控制策略,为有效降低夹杂物含量,提升金属材料的质量和性能提供了参考。

### 参考文献:

- [1] 朱晓东,赵亚飞,李嘉雄,等.钢中夹杂物形成机理与调控技术研究进展[J].现代交通与冶金材料,2023,03(04):38-46.
- [2] 李龙飞,林腾昌,梁强,等.精炼时间对真空感应熔炼C-HRA-3合金氧含量及夹杂物特征的影响[J].铸造,2023,72(06):654-660.
- [3] 韩宇,张明博,袁娜,等.100t转炉应用石灰石造渣半钢炼钢工业实践[J].上海金属,2017,39(02):50-54.
- [4] 郑力飞,李亚厚.关于转炉炼钢造渣工艺及效果的相关研究[J].冶金管理,2019(03):5.
- [5] 崔立镇.通过LF精炼炉控制钢中非金属夹杂物的实践[J].河北冶金,2010(05):13,30-31.
- [6] 万真雅.LFV型钢包精炼炉的冶金特性[J].华东冶金学院学报,1992(02):56-61.
- [7] 王金辉,吴丙恒,吴世龙,等.LF造渣工艺模型化实践[J].鞍钢技术,2022(02):50-53.