

炼钢过程中脱氧合金化工艺的优化

姚德福 裘文 常 军

本溪北营钢铁（集团）股份有限公司 辽宁 本溪 117000

摘 要：本文围绕炼钢过程中脱氧合金化工艺展开研究，阐述了传统工艺存在的问题，如脱氧材料不足、钢水中氧含量高、合金元素添加不均匀等。详细介绍了多种脱氧合金化工艺优化方案，包括优化脱氧剂选择、加强脱氧过程控制、合金元素均匀添加、优化工艺参数等。同时，探讨了不同优化方案在实际应用中的效果，如采用钙系脱氧剂、两步脱氧法等对脱氧合金消耗和连铸坯质量的影响。通过对这些优化方案的研究，旨在提高炼钢质量、降低生产成本，为钢铁企业的生产实践提供理论支持和技术指导。

关键词：炼钢过程；脱氧合金化工艺；优化方案；脱氧剂；合金元素

引言

炼钢是钢铁生产中的关键环节，其核心目标是将生铁中的碳、硅、锰等杂质元素去除，同时精确控制钢的成分，以满足不同用途对钢材性能的要求。脱氧合金化工艺作为炼钢过程中的重要工序，直接影响着钢的质量和性能。在炼钢过程中，钢液中会溶解一定量的氧，这些氧若不加以去除，会在后续的冷却凝固过程中形成氧化物夹杂，降低钢的塑性、韧性和疲劳强度等力学性能。而合金化则是向钢中添加适量的合金元素，以改善钢的组织结构，提高钢的强度、硬度、耐磨性等性能。因此，对炼钢过程中的脱氧合金化工艺进行优化具有重要的现实意义。

1 传统脱氧合金化工艺存在的问题

1.1 脱氧材料不足

在传统炼钢脱氧合金化工艺里，硅铁是常用脱氧剂，然而其存在诸多弊端。从脱氧能力来看，硅铁相对较弱，难以将钢水中的氧含量有效降低至理想水平。这意味着在脱氧过程中，仍有大量氧残留在钢水中，无法满足高质量钢材的生产要求。而且，硅铁脱氧后的产物 SiO_2 是强酸性氧化物，这一特性会引发一系列问题。它容易与钢液中的磷和硫发生反应，导致磷和硫在钢液中的回收出现问题。磷和硫在钢中属于有害元素，它们的存在会显著降低钢的韧性、焊接性能等，从而影响钢的整体质量，使得生产出的钢材难以满足高端用户的需求。

1.2 钢水中氧含量高

传统炼钢转炉工艺在脱氧环节存在明显不足，脱氧不彻底导致钢水中氧含量居高不下。过高的氧含量在钢凝固时会产生严重后果，会生成 FeO 等夹杂物。这些夹杂物在钢中形成应力集中点，大大降低钢的塑性，使钢在受力时容易发生脆性断裂。同时，热脆现象也会随

之出现，严重影响钢材的加工性能和使用寿命。此外，高氧含量还容易造成钢铁的进一步氧化，在后续的轧制、热处理等工序中，钢材表面易形成氧化皮，不仅增加能耗，还会降低钢材的表面质量，影响产品的外观和性能。

1.3 合金元素添加不均匀

为了满足低碳钢的性能需求，必须向钢中添加适量的合金元素。但在传统工艺中，合金元素的添加方式存在明显缺陷，导致合金元素在钢中分布不均匀。这种不均匀性会使得低碳钢的性能不稳定，不同部位的钢材强度、硬度、韧性等性能指标存在差异。在实际应用中，这种性能不稳定的钢材可能会在使用过程中出现局部强度不足、过早疲劳断裂等问题，严重影响钢材的使用性能和安全性。例如，在建筑结构中，若使用的钢材合金元素分布不均，可能导致某些部位承受不了设计载荷，从而引发安全事故。因此，解决合金元素添加不均匀的问题对于提高钢材质量和性能稳定性至关重要^[1]。

2 脱氧合金化工艺优化方案

2.1 优化脱氧剂的选择

传统硅铁脱氧剂在实际应用中存在诸多局限性，如脱氧效率相对较低，易在钢中形成较多的二氧化硅夹杂物，影响钢水的纯净度和后续加工性能。为提升脱氧效果，需对脱氧剂进行优化选择。铝作为一种优质脱氧剂，展现出强大的脱氧能力。其脱氧原理是铝与钢水中的氧发生化学反应，生成氧化铝（ Al_2O_3 ），能将钢水中的氧含量大幅降低。相较于硅脱氧，铝脱氧不仅去氧效率显著提高，而且可有效减少钢中二氧化硅含量。氧化铝呈中性，不会降低熔炼钢渣的碱度，也不会影响钢水中磷和硫的回收，有助于提高钢的质量。在特定工艺条件下，使用铝脱氧可使钢水中的氧含量降低至极低水

平,为后续的合金化处理创造良好条件。锰同样是常用的脱氧剂,尽管其脱氧能力相对较弱,但与铝配合使用时,能产生协同效应,增强脱氧效果。锰与氧反应生成氧化锰(MnO),在钢水中与氧化铝等夹杂物共同作用,有助于改善钢水的流动性,促进夹杂物的上浮和排除。此外,复合脱氧剂的应用前景广阔,如硅铝铁、铝锰铁、硅铝钡等。这些复合脱氧剂结合了多种脱氧剂的优点,具有更好的脱氧效果和回收利用率。例如,硅铝钡复合脱氧剂中的钡元素能改善钢水的流动性,进一步提高脱氧产物的上浮速度,减少钢中夹杂物的含量。同时,复合脱氧剂中的多种元素在脱氧过程中相互作用,可形成更稳定的化合物,降低夹杂物对钢性能的不良影响。在实际生产中,应根据不同的钢种和冶炼工艺要求,选择合适的脱氧剂。对于高要求的特殊钢种,可优先考虑使用复合脱氧剂,以确保钢水的纯净度和质量。

2.2 加强脱氧过程控制

为确保钢水中的氧被彻底去除,需加强脱氧过程的控制。一方面,适当提高脱氧剂的加入量,并延长脱氧时间,使炉料中的氧充分反应。但加入量和脱氧时间的控制需根据钢水的初始氧含量、钢种要求等因素进行精确调整,避免过度脱氧导致合金元素的浪费和钢水成分的波动。另一方面,引入自动控制系统,实时监测钢水中氧含量的变化。通过先进的传感器和检测技术,能够准确获取钢水中氧含量的实时数据,并根据监测结果精确调整脱氧剂的加入量,实现钢水的精准脱氧。自动控制系统还可以对脱氧过程中的其他参数进行监控和调节,如温度、压力等,确保脱氧过程的稳定性和可靠性^[2]。以转炉冶炼低碳钢为例,可采用两步脱氧法。首先,在转炉冶炼过程中,利用碳粉进行预脱氧。碳与钢水中的氧发生反应,生成一氧化碳(CO)气体逸出,从而降低钢水中的氧含量。预脱氧过程可以有效去除钢水中的大部分氧,为后续的深脱氧创造有利条件。然后,在出钢过程中,加入适量的铝粒进行深脱氧。铝与钢水中的残留氧进一步反应,生成氧化铝,进一步去除钢水中的残留氧。通过这种两步脱氧法,能有效降低钢水中的氧含量,提高钢的质量。在实际操作中,需严格控制碳粉和铝粒的加入量和加入时机,以确保脱氧效果。

2.3 合金元素均匀添加

合金元素分布不均匀会影响钢材的性能稳定性,因此需采用先进的合金元素添加技术,确保合金元素均匀分布。真空脱气设备是一种有效的工具,通过抽真空使钢包内的钢液处于真空环境,打破钢液原有的碳氧平衡,促使钢液中的氧与碳反应生成一氧化碳气体逸出,

实现脱氧。在真空脱氧过程中,吹入氩气等惰性气体对钢液进行搅拌。氩气搅拌不仅可以促进碳氧反应和一氧化碳气泡的生成,还能使合金元素在钢液中均匀分布。氩气搅拌的强度和时间需根据钢液的成分和温度进行合理调整,以确保合金元素的均匀分布。此外,采用复合脱氧剂也是实现合金元素均匀添加的有效方法。将脱氧剂和合金元素同时添加到钢水中,在脱氧的同时实现合金化,提高了低碳钢的合金化效果。例如,硅铝铁复合脱氧剂中的铁元素本身就是一种合金元素,在脱氧过程中能均匀地溶解到钢水中,改善钢的性能。同时,复合脱氧剂中的其他元素也能在钢水中均匀分布,起到协同合金化的作用。在实际生产中,可根据钢种的要求选择合适的复合脱氧剂,并优化添加工艺,以确保合金元素的均匀分布。

2.4 优化工艺参数

工艺参数的优化对提高低碳钢的冶炼效果至关重要。通过对炉温、转炉容量、吹氧时间等工艺参数的合理调整,可以实现低碳钢冶炼过程的最佳效果。炉温是影响冶炼过程的重要因素之一。合理控制炉温可以提高脱碳成效的快速性和稳定性,保证钢水的质量。炉温过高会导致钢水过氧化,增加脱氧剂的消耗和夹杂物的生成;炉温过低则会影响脱碳反应的进行,降低冶炼效率。因此,需根据钢种和冶炼工艺要求,精确控制炉温。转炉容量也是影响冶炼效果的关键参数。不同容量的转炉在冶炼过程中具有不同的热力学和动力学条件,需根据实际情况调整工艺参数。例如,大容量转炉在冶炼过程中需要更长的吹氧时间和更高的吹氧强度,以确保钢水的充分脱碳和合金化。吹氧时间和吹氧强度的优化同样重要。优化吹氧时间可以提高氧气的利用率,减少能源消耗。吹氧时间过短会导致钢水脱碳不充分,吹氧时间过长则会增加氧的消耗和夹杂物的生成。吹氧强度的调整需根据钢水的成分和温度进行,以确保钢水的充分搅拌和脱碳反应的进行。利用计算机模拟技术,可以对工艺参数进行优化设计。通过建立准确的数学模型,模拟不同工艺参数组合下的冶炼过程,提前预测冶炼效果,从而选择最优的工艺参数。计算机模拟技术还可以对冶炼过程中的各种因素进行综合分析,为工艺优化提供科学依据。通过优化工艺参数,不仅能提高钢的质量,还能降低生产成本,提高企业的经济效益。在实际生产中,需不断总结经验,根据实际情况调整工艺参数,以实现低碳钢冶炼过程的持续优化。

3 不同优化方案在实际应用中的效果

3.1 钙系脱氧剂的应用

在钢铁冶炼领域,钙系脱氧剂在优化转炉出钢脱氧工艺方面展现出了显著优势。从脱氧效果来看,钙系脱氧剂中的钙与氧具有极强的结合能力,能够在钢水中迅速且有效地与氧发生反应,将钢水中的氧含量降低至极低水平。例如,在一些大型钢铁企业的实际生产中,使用钙系脱氧剂后,钢水的氧含量可降低至传统脱氧工艺的30%–50%,大大提高了钢水的纯净度。在提高合金元素收得率方面,钙系脱氧剂发挥了重要作用。由于钙系脱氧剂能更好地去除钢水中的氧,减少了氧与合金元素发生反应形成氧化物的可能性,从而使得更多的合金元素能够保留在钢水中,提高了合金元素的利用率。相关数据显示,使用钙系脱氧剂后,一些关键合金元素的收得率可提高10%–20%。此外,钙系脱氧剂的使用还可以减少三氧化二铝夹杂的生成。三氧化二铝夹杂是钢铁中常见的有害夹杂物,它会降低钢的韧性、塑性等性能,并且容易导致水口堵塞。钙系脱氧剂能够与钢水中的铝等元素发生反应,形成易于上浮的夹杂物,从而减少三氧化二铝夹杂在钢中的残留。在实际生产中,采用钙系脱氧剂后,水口的堵塞率可降低40%–60%,大大提高了生产的稳定性和连续性。在钙系脱氧剂的使用方法上,每炼1t钢材通常需要加入钙系脱氧剂1.2kg左右。为了充分发挥其效果,可以采用合适的加入方法。例如,在出钢前一次性将钙系脱氧剂加入到钢包中,使其在钢水中充分扩散和反应;或者与铁合金一起加入,实现脱氧和合金化的同步进行。

3.2 两步脱氧法的应用

传统的转炉炼钢主要采用一步脱氧方式,这种方式存在锰、铝以及硅等合金元素回收率低的问题。为了提高脱氧剂的利用率,两步脱氧法应运而生。第一步脱氧在出钢过程中进行,此时加入廉价的脱氧剂进行预脱氧。这些廉价脱氧剂能够快速降低钢水中的氧含量,为后续的深脱氧创造有利条件。例如,在出钢时加入一定量的碳粉或硅铁粉,它们与钢水中的氧发生反应,生成一氧化碳或二氧化硅等气体或夹杂物,从而降低钢水的氧含量。第二步脱氧在钢水进入精炼炉后进行。根据钢水的成分和温度情况,加入适量的合金元素和强脱氧剂

进行深脱氧和合金化。强脱氧剂如铝粒、钛铁等能够进一步去除钢水中的残留氧,确保钢水的纯净度。同时,合金元素的加入可以实现钢水的合金化,满足不同钢材性能的要求。实践表明,两步脱氧方式具有诸多优点。它大大提高了各合金的回收率,减少了合金元素的浪费。例如,锰的回收率可提高15%–25%,铝的回收率可提高10%–20%^[3]。此外,两步脱氧法还能减少三氧化二铝夹杂的生成,降低水口的堵塞率,与一步脱氧法相比,水口堵塞率可降低30%–50%。在对脱氧工艺进行优化后,脱氧合金的消耗大大降低,企业的生产成本得到有效控制。同时,连铸坯的质量水平显著提高,钢材的性能更加稳定,满足了市场对高质量钢材的需求。例如,在一些汽车用钢的生产中,采用两步脱氧法后,钢材的强度、韧性等性能指标得到了明显提升,提高了汽车的安全性和使用寿命。

结束语

炼钢过程中的脱氧合金化工艺对钢的质量和性能有着至关重要的影响。传统工艺存在的脱氧材料不足、钢水中氧含量高、合金元素添加不均匀等问题,严重制约了钢铁生产的发展。通过优化脱氧剂的选择、加强脱氧过程控制、合金元素均匀添加和优化工艺参数等优化方案,可以显著提高炼钢转炉冶炼低碳钢脱氧合金化的效果。不同优化方案在实际应用中取得了良好的效果,如采用钙系脱氧剂和两步脱氧法等,不仅降低了脱氧合金消耗,还提高了连铸坯的质量。因此,钢铁企业应积极推广和应用这些优化方案,不断提高炼钢质量、降低生产成本,以适应市场竞争的需求。同时,未来的研究还应进一步探索更加高效、环保的脱氧合金化工艺,为钢铁工业的可持续发展做出贡献。

参考文献

- [1]张立君.基于转炉CO气体分析的炼钢喷溅控制技术[J].山西冶金,2020,43(06):127–128+135.
- [2]何冲.转炉炼钢工序低成本运行探讨[J].冶金与材料,2020,40(06):93–94.
- [3]邓志勇,王飞宇,张一臣,马桂芬,杨春伟.提高转炉工序能效的工艺实践[J].天津冶金,2019(06):14–16.