

转炉一次烟气净化技术现状及过滤净化技术的应用

刘晓雄

山西焦化集团有限公司, 山西 临汾 041600

DOI:10.61369/ME.2025040016

摘 要 : 针对钢铁行业转炉炼钢过程中一次烟气污染严重、传统净化技术存在能耗高且煤气回收效率低等局限的问题, 本研究基于转炉一次烟气高温、高尘、成分复杂且富含可回收煤气的特性及其对环境和人体健康的危害, 系统分析了当前转炉一次烟气净化技术现状, 并深入探讨了过滤净化技术在转炉一次烟气中的应用。分析发现, 湿法、半干法、干法等传统净化技术在实际应用中各有优劣, 难以完全满足当前严格的环保标准和企业节能减排需求, 而过滤净化技术凭借其高效除尘、适应性强等优势, 在转炉烟气净化领域展现出显著潜力。通过分析, 文章旨在为钢铁企业选择科学合理的烟气净化方案提供参考依据, 助力钢铁行业降低污染物排放、实现绿色低碳发展, 减少转炉一次烟气对生态环境和公众健康的威胁。

关 键 词 : 转炉一次烟气; 净化技术; 过滤净化; 布袋除尘; 陶瓷滤管除尘

Current Situation of Primary Flue Gas Purification Technology for Converter and Application of Filtration Purification Technology

Liu Xiaoxiong

Shanxi Coking Group Co., Ltd., Linfen, Shanxi 041600

Abstract : In view of the serious pollution of primary flue gas in the process of converter steelmaking in the iron and steel industry, and the limitations of traditional purification technology such as high energy consumption and low efficiency of gas recovery, this study is based on the characteristics of the primary flue gas of converter which is high temperature, dusty, complicated in composition, and rich in recoverable gas as well as its hazards to the environment and human health, and it systematically analyses the present situation of the current purification technology of primary flue gas of converter and discusses the application of the filtration and purification technology in the primary flue gas of converter in-depth. The application of filtration purification technology in the primary flue gas of converter is discussed in depth. It is found that the traditional purification technologies, such as wet, semi-dry and dry, have their own advantages and disadvantages in practical application, and it is difficult to fully meet the current stringent environmental protection standards and the demand of energy saving and emission reduction of enterprises, while the filtration purification technology, by virtue of its high efficiency of dedusting, adaptability and other advantages, has shown significant potential in the field of converter flue gas purification. Through the analysis, the article aims to provide a reference basis for steel enterprises to choose scientific and reasonable flue gas purification solutions, help the steel industry to reduce pollutant emissions, achieve green and low-carbon development, and reduce the threat of the primary flue gas of the converter to the ecological environment and public health.

Keywords : primary flue gas of converter; purification technology; filtration purification; bag dedusting; ceramic filter tube dedusting

引言

钢铁工业是我国经济发展中主要的产业, 在基础设施建设, 机械制造, 汽车制造等行业中扮演着举足轻重的角色。由于其生产效率高, 成本低廉, 转炉炼钢成为目前我国钢铁工业发展的主流技术之一。但是, 在转炉炼钢生产中, 会产生一次烟气, 在处理烟气时, 普遍存在煤气回收效率低、能耗高等问题, 导致大量可燃气体浪费。根据有关资料, 生产1t钢铁时, 产生的一次烟气体积在80~150m³。这

作者简介: 刘晓雄 (1989.03-), 男, 汉族, 山西忻州人, 职称: 助理工程师, 学历: 大专, 主要研究方向: 化工工艺, 身份证号码: 142232198903042190。

些烟气如果没有处理直接排放,将导致空气质量恶化,引发雾霾和酸雨等环境问题,危及周围居民的身体健康,还会导致大量的能量和资源浪费,限制了钢铁工业的可持续发展。随着世界范围内环境保护意识的日益增强和各国越来越严格的环境保护法规的出台,如何通过技术创新提升煤气回收效率、实现节能降耗,已成为钢铁行业绿色转型的关键课题^[1]。作为一种新型的、高效的烟气净化方法,过滤净化技术在转炉一次性烟气治理中得到了越来越多的重视,深入探究其应用现状与发展趋势,对提升钢铁行业的环保水平、实现绿色转型具有重要意义。

一、转炉一次烟气特性及危害

(一) 转炉一次烟气的产生过程

在转炉炼钢时,将高压力的纯氧注入含铁水的转炉中,使其发生一系列激烈的化学反应。首先,铁水中含有的铁元素与氧进行氧化反应,形成氧化铁,放出大量热能。伴随着反应的持续推进,铁水中的碳元素与氧气反应,形成一氧化碳(CO),而CO又与氧形成二氧化碳(CO₂)。在吹氧的初始阶段,还会有大量的硅、锰等元素被氧化,生成了较小的烟尘;在吹氧强度和冶炼强度持续增加的过程中,炉内的碳、氧反应更加激烈,并伴随有较高温度的含尘烟气向外高速喷溅,从转炉炉口排出。整个冶炼过程中,烟气的产生量和成分会受到铁水初始成分、吹氧制度、废钢加入量等多种工艺参数的影响而发生显著变化,这对煤气回收系统的适应性提出极高要求。

(二) 烟气成分及特性

转炉一次烟气成分复杂多样,主要包含CO、CO₂、N₂、O₂、粉尘以及少量的SO₂、NO_x等有害气体。其中,CO含量通常在60%~80%之间,是烟气中具有回收利用价值的可燃成分;粉尘含量一般在80~150g/m³,粉尘粒径主要分布在0.1~10μm之间,这些细小的粉尘颗粒具有较强的悬浮性,容易在大气中长时间扩散,造成大范围的空气污染^[2]。此外,转炉一次烟气具有高温(800~1400℃)、高湿(水分含量可达10%~20%)、高粉尘浓度且成分波动大的特性^[3]。高温特性对净化设备的耐高温性能提出了极高要求,普通材质的设备在高温烟气的冲刷下极易损坏;高湿环境不仅会加速设备的腐蚀,还可能导致粉尘结块,堵塞设备管道,影响净化系统的正常运行;而烟气成分和流量的大幅波动,则会影响煤气回收系统的稳定性,需净化技术同步实现除尘与煤气品质优化。

二、转炉一次烟气净化技术现状

(一) 湿法净化技术

以OG工艺为代表的湿法净化技术在转炉一次烟气的处理中得到了较好地应用。该工艺过程包括三个重要步骤:烟气冷却,洗涤,脱水。高温烟气先进入气化冷却通道,与冷却水发生换热,使温度从1400℃降低到800~1000℃,并对其的一些余热进行回收,得到的蒸汽可以直接利用来发电或供暖。在此基础上,烟气进入溢流文氏管中,进行一级洗涤,使高速水流与烟气混合,并通过惯性碰撞、拦截等作用对烟气进行初步的除尘及冷却降温^[4]。随后,烟气回进入喷淋塔和脱水器,通过喷淋、脱水等方式将残余的灰尘、水分进行分离,该操作可以使净化后的

烟气喊陈亮达到50 mg/m³以下。尽管OG工艺除尘效率高^[5],但煤气回收时的能耗损失与品质下降,使其难以满足当前节能降耗需求。

(二) 半干法净化技术

半干法净化技术主要包括喷雾干燥法和循环流化床法两种工艺。喷雾干燥方法就是用一个雾化喷嘴向干燥吸收塔中喷射石灰浆液,使其与高温烟气完全接触,这个过程可以使石灰浆液内部的水分快速挥发,并与二氧化硫等酸性气体进行化学反应,形成固态产物。此方法具有简单、占用空间少、能够去除部分酸性气体等优点,但仍面临着脱硫效率不高(约80%~90%)、吸收剂利用率不高、粉尘排放浓度高等问题。循环流化床技术基于流化床的原理,实现了吸收剂与烟气在流化条件下的充分接触。烟气在进入循环流化床反应器后,会与高速流动的中的吸收剂粒子进行剧烈的传质、传热及化学反应,从而达到同时脱除酸性气体和粉尘的目的。虽然该技术脱硫率高(95%),设备紧凑,运行稳定,但存在着吸收剂循环系统结构复杂、设备损耗大、运行费用高等问题。在煤气回收方面,半干法工艺因无法精准控制烟气温度,易导致煤气中焦油等杂质凝结,堵塞回收管道,降低回收效率(较湿法提升不足10%),且能耗指标(电耗约25~30kWh/t钢)仍处于较高水平。

(三) 干法净化技术

干法净化技术以静电除尘为主。静电除尘是指采用高压电场对烟尘中的粉尘进行荷电,荷电粉尘在电场力的驱动下,粉尘会向集尘极运动并沉积,从而达到除尘效果^[6]。本工艺具有较大的处理风量和较高的除尘能力(理论上大于99%),同时还可对干燥的灰尘进行再循环使用。但其会受到烟气温度、湿度、比电阻等烟气工况变化的影响,比如,当烟气温度、湿度、粉尘比电阻等参数超出一定范围时,除尘效率会显著下降,且设备投资和维护成本较高^[7]。

(四) 现有技术的局限性

现有的转炉一次烟气净化传统工艺都有各自的缺陷。传统的湿法净化工艺除灰效率高,但存在着能耗大、耗水量大、有二次污染等缺点;半干法净化工艺在一定程度上可以对酸性气体进行治理,但其总体净化效果不能适应日趋苛刻的超低排放标准;在干法净化工艺中,静电除尘工艺对运行工况的要求较高。另外,在环境保护政策下,烟气中粉尘、二氧化硫、氮氧化物等多种污染物的排放标准持续下降,传统工艺难以兼顾多污染物超低排放与高效煤气回收。此外,现有工艺中能源循环效率较低,无法有效地实现烟气中的热能和化学能的有效回收,同时,对系统的协调控制也不够深入,造成了综合运行成本偏高,对我国钢铁工业的可持续发展产生了一定的阻碍。

三、过滤净化技术在转炉一次烟气中的应用

（一）过滤净化技术的原理

过滤净化技术主要基于深层过滤和表面过滤两种原理实现对烟气中粉尘的有效去除。深层过滤的除尘效能，源于滤料内部复杂的孔隙结构，当含尘烟气通过滤料时，直径大于滤料孔径的粉尘颗粒，会在惯性力驱动下，与滤料纤维发生剧烈碰撞，进而被直接拦截；而对于粒径小于 $0.1\mu\text{m}$ 的亚微米级粉尘，由于气体分子的无规则热运动引发的布朗扩散效应，它们会在随机运动中与滤料纤维接触并被捕获；此外，运动轨迹靠近滤料纤维的粉尘颗粒，即便未发生直接碰撞，也会因拦截效应被滤料牢牢截留^[8]。

在过滤初始阶段，主要依靠滤料自身的孔隙结构进行过滤，此时过滤效率相对较低。随着过滤过程的持续进行，粉尘在滤料内部逐渐积累，形成更为复杂的过滤通道，过滤效率也随之逐步提高。

表面过滤则以滤料表面形成的滤饼层作为核心“滤网”。当含尘烟气与滤料接触时，粒径较大的粉尘颗粒率先被拦截在滤料表面，随着烟气持续通过，这些粉尘逐渐堆积、压实，最终形成致密滤饼层。研究显示，滤饼层的孔隙直径仅为滤料原始孔隙的 $1/10 - 1/5$ ，即便 $0.01\mu\text{m}$ 的超细微粉尘也难以穿透，使得表面过滤效率可高达 99% 以上。但随着滤饼增厚，烟气通过阻力会呈指数级增长，当阻力达到 $1200 - 1500\text{Pa}$ 时，就需启动清灰程序。

常见的清灰方式各有专长。脉冲喷吹清灰利用 $0.4 - 0.6\text{MPa}$ 的高压空气瞬间冲击滤袋，使其剧烈膨胀收缩，以强大的机械振动抖落滤饼，适用于处理高浓度含尘烟气；反吹清灰凭借 $2 - 3\text{m/s}$ 的反向气流温和剥离滤饼，对聚酰亚胺等娇贵滤料友好；声波清灰通过 $20 - 200\text{Hz}$ 的高频振动，使粉尘因共振脱离滤料，尤其擅长应对黏性粉尘。在实际应用中，需根据转炉烟气的温度、湿度、粉尘浓度等特性，精准匹配清灰方式，确保过滤系统长期稳定运行。

（二）具体应用

1. 布袋除尘技术

布袋除尘技术在转炉一次烟气净化领域应用较为广泛。针对转炉烟气高温、高尘、腐蚀性强的特性，通常选用高性能滤料，如聚苯硫醚（PPS）纤维滤料、聚酰亚胺（PI）纤维滤料等。PPS 纤维滤料具有良好的耐高温性能，可在 $180 - 200^\circ\text{C}$ 的环境下长期稳定运行，并且具备优异的抗化学腐蚀能力，能够有效抵御烟气中 SO_2 、 NO_x 等酸性气体的侵蚀；PI 纤维滤料的耐高温性能更为突出，可耐受 260°C 的高温，同时其机械强度高，耐磨性能好。在

实际应用中，含尘烟气进入布袋除尘器后，在负压作用下通过滤袋，粉尘被截留在滤袋表面，净化后的烟气从滤袋内侧排出^[9]。随着过滤过程的进行，滤袋表面的粉尘不断积累，当系统阻力达到设定值时，通过脉冲喷吹系统向滤袋内喷入压缩空气，使滤袋急剧膨胀并产生高频振动，抖落表面的粉尘，实现清灰过程，从而保证除尘器的持续高效运行。

2. 陶瓷滤管除尘技术

陶瓷滤管除尘技术是近年来新兴的高效过滤净化技术，其滤管采用碳化硅、氧化铝等高性能陶瓷材料制成。这些陶瓷材料具有孔隙率高、过滤精度高、机械强度大、化学稳定性好等优点，能够在高温（最高可达 800°C ）、高尘、强腐蚀性的恶劣工况下长期稳定运行^[10]。在应用过程中，含尘烟气从陶瓷滤管外侧进入，在压力差的作用下，烟气透过滤管壁，粉尘被拦截在滤管外表面，净化后的烟气从滤管内侧汇集后排出^[11]。为保证过滤效果和系统稳定运行，陶瓷滤管除尘系统通常配备先进的清灰装置，如声波清灰装置。通过高频声波振动，使滤管表面的粉尘颗粒受到共振作用而脱落，相比传统的脉冲清灰方式，声波清灰对滤管的损伤更小，清灰效果更为均匀彻底，能够有效延长滤管的使用寿命，确保除尘系统长期稳定高效运行。

四、结语

转炉一次烟气净化技术的发展是钢铁行业实现绿色转型的关键环节。当前，湿法、半干法、干法等传统净化技术在应对严格要求和企业节能减排目标时，暴露出诸多问题和局限性。而过滤净化技术凭借其高效的除尘能力、对复杂工况的良好适应性以及实现超低排放的潜力，在转炉一次烟气净化领域展现出广阔的应用前景。展望未来，随着环保标准的持续提高和钢铁行业绿色发展需求的不断增强，转炉一次烟气净化技术将朝着高效化、节能化、智能化方向加速发展。一方面，需要进一步加大研发投入，开发新型高性能过滤材料，提高其耐高温、抗腐蚀、长寿命等性能，同时降低材料成本；另一方面，要推动过滤净化设备与转炉煤气回收系统的智能化集成，通过实时监测烟气成分（如 CO 浓度、粉尘粒径）动态调整运行参数，提高回收效率；探索过滤净化与煤气精脱硫、 CO 提纯技术的协同应用，形成“净化 - 提纯 - 资源化”全链条解决方案，最终实现转炉煤气“零排放、全回收、高利用”，为钢铁行业碳达峰、碳中和目标提供技术支撑。

参考文献

- [1] 张娟, 刘振, 孙世涛, 等. 转炉一次烟气干法净化回收系统工艺的发展与探讨 [J]. 冶金动力, 2025, (01): 86-89.
- [2] 冯俊小, 温俊云, 刘江, 等. 转炉烟气余热回收利用技术发展现状与展望 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23(17): 7183-7193.
- [3] 周俊敏, 李永辉, 李新强, 等. 浅谈大型转炉一次烟气低碳高能超净排放技术与装备 [J]. 企业科技与发展, 2022, (06): 124-126.
- [4] 郑运兴. 转炉一次烟气净化技术现状及过滤净化技术的探索与应用 [J]. 冶金与材料, 2024, 44(10): 64-67.
- [5] 董光宇, 贾东升, 李春生, 等. 转炉一次湿法除尘遗留问题治理 [J]. 鞍钢技术, 2024, (04): 53-56+76.
- [6] 刘国华, 谢建. 转炉一次烟气超低排放技术现状及展望 [J]. 工业加热, 2023, 52(03): 57-60.
- [7] 王进轩. 浅谈转炉炼钢一次除尘超低排放新技术发展趋势 [J]. 低碳世界, 2022, 12(08): 58-60.
- [8] 宋志黎. 烟气冷凝水表层微孔过滤的工业应用实践 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2024, (07): 66-68.
- [9] 付德禄, 姚群. 转炉烟气袋式除尘系统节能降碳途径 [J]. 工业安全与环保, 2024, 50(03): 103-106.
- [10] 钟永生. 高温烟气过滤材料在袋式除尘器中的应用评述 [J]. 中国环保产业, 2020, (08): 57-61.