

高炉热风炉烟气脱硫超低排放改造方案探讨

杨智强

中冶南方武汉钢铁设计研究院有限公司 湖北 武汉 430080

摘要：在相关政策及行业发展战略规划的持续影响与硬性要求下，钢铁企业面临着最快实现高炉热风炉烟气脱硫超低排放改造的必然要求，因此针对这方面的研究日益深入。而在相关制度及法律法规要求中，则给出了高炉热风炉超低排放应当达到的最低限度指标及要求，要求排放颗粒物 $\leq 10\text{mg/m}^3$ ， $\text{SO}_2 \leq 50\text{mg/m}^3$ ， $\text{NO}_2 \leq 200\text{mg/m}^3$ 。结合已有钢铁企业排放数据结果加以对比，若在排放之前未严格执行严密的精脱硫处理过程，高炉热风炉烟气中 SO_2 排放浓度一般处在 $50\text{-}150\text{mg/m}^3$ 之间，与超低排放的要求存在显著差异，因此必须采取对应的脱硫处理流程。故此次研究以热风炉烟气特点的阐述为出发点，对比不同的工艺方案并进行比选，以期研究结果能为高炉热风炉烟气脱硫超低排放改造提供相应理论支持及参考，进而推动行业的发展。

关键词：高炉；热风炉；烟气脱硫；超低排放改造

引言

大气中存在的 SO_2 、 NO_2 以及各种颗粒物会对环境造成严重负面影响，也限制了可持续发展这一发展要求的实现，更成为我国发展战略中碳达峰、碳中和等目标的阻碍。有关法律法规及行业标准中要求钢铁、有色金属、建材、化工、石油等类型企业，若生产过程涉及到氮氧化物、硫化物及粉尘等大气污染物排放，则必须进行生产工艺的优化，全面采用清洁生产工艺，同时还要配套完善污染物处理装置的建设工作，来满足法律法规及行业规定在污染控制上的要求。在这种相关政策、法律法规及宏观发展规划的要求下，实施高炉热风炉烟气脱硫超低排放改造已经成为必然。

1 高炉热风炉烟气的特点

高炉热风炉消耗的燃料多为高炉煤气，生产过程中高炉煤气的消耗量在能耗总量中的占比一般处于13%-20%之间。以钢铁企业为例，高炉煤气是这类企业在副产回收过程中产量最高的气体之一，其产量大抵能达到88%，因此多数情况下会在对高炉煤气进行除尘、余压能及热能利用之后，引入下游工序（包括轧钢加热炉、燃气锅炉及热风炉等）作为燃料进行回收利用，其过程如下图所示。

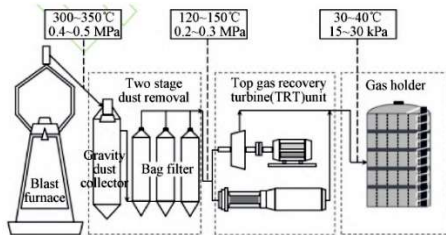


图1 高炉煤气回收利用过程图

就高炉煤气中硫化物的成分分析来看，煤气中含有的硫化物包括有机硫（占比最大，占总硫含量的70%-80%左右，主要为羰基硫COS，另外含有极少量的 CS_2 ）与无机硫两种，其中COS、 CS_2 和 H_2S 的含量总和在总硫含量中能够达到95%以上^[1]。问题在于这类烟气排放过程中的温度波动较大，其温度波动通常在 100°C - 220°C 左右，除温度之外，这类烟气还具有一定的湿度，可达到10%及更高，其中 SO_2 的浓度在受到硫的影响之后，会表现出相当大的波动范围，通常情况下波动范围处于 $50\text{-}150\text{mg/m}^3$ 之间，但极端情况下甚至可达到 300mg/m^3 。参考某钢铁厂1#、2#两座热风炉，其烟气技术参数如下表1所示。

表1 热风炉烟气技术参数明细

指标	热风炉1#	热风炉2#
烟气量 (万 m^3/h)	50	60
烟气温度/ $^\circ\text{C}$	-150 (正常) -300 (换热器检修)	-150 (正常) -350 (换热器检修)
废气粉尘浓度/ (mg/m^3)	≤ 10	≤ 10
废气 NO_2 浓度/ (mg/m^3)	-30	-30
废气 SO_2 浓度/ (mg/m^3)	90-110	110-130
O_2 含量/%	< 2	< 2
CO 含量/%	0	0

2 现有主要脱硫工艺分析

2.1 密相干塔半干法脱硫除尘一体化技术

该技术简称密相干塔法技术，整个工艺以密相塔为载体进行，烟气入口被设置在脱硫塔中下位置，在烟气经加水消化后投入脱硫塔参与脱硫反应。反应过程中

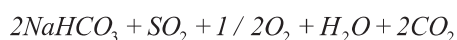
烟气会被加入脱硫剂,并向脱硫塔上方流动,流动过程中会有水、消石灰、SO₂分别参与反应,生成CaSO₃和CaSO₄等副产物。反应完成之后脱硫灰会在烟气的流动过程中进入布袋除尘器,而进入布袋除尘器的脱硫灰将逐渐沉积在灰斗底部,经出料口进入加湿装置与螺旋输送机^[2]。到这一步之后,为控制进入脱硫塔的循环脱硫灰数量,还需在灰斗出料口安装变频给料装置。

整个工艺过程中会有少部分粒径较大的脱硫灰颗粒进入灰斗,底部喷射器会将一部分循环灰送入脱硫塔,这部分被送入脱硫塔的循环灰将继续参与脱硫反应,其有效成分也在此过程中得到更进一步的利用;而另一部分循环灰则被送往除尘器灰斗,用于在后续反应过程中确保脱硫体系维持稳定的平衡状态。反应中所有失效的脱硫灰均会被排入底部排灰装置,进入副产物仓之后由密封罐车定期外运加以处理^[3]。此技术本身具有非常高的成熟度,对热风炉工况也具有较高的适应性,然而缺陷在于工艺中需额外匹配制浆、副产物回收利用等众多附属系统及设施,这意味着整个工况具有较高的复杂程度,也就增加了设备维护管理的难度,另外也因为额外配置设备偏多,因此会出现占地面积较大的情况。

2.2 SDS钠基脱硫工艺

此脱硫工艺会将碳酸氢钠粉(粒径20-25μm)喷射在管道内,通过调整喷射方式使之均匀分布,之后脱硫剂在受热后会被充分激活且表面积会迅速上升,以保证与酸性烟气氧化反应的有效性及速率。反应过程中二氧化硫这类酸性物质会被持续吸收,从而顺利完成整个脱硫过程。而在脱硫过程结束之后,烟气中会携带少量粉状副产物,这些粉状副产物将被袋式除尘器及配套设备过滤,经检测达到相应标准后才可准许排放烟气。

显而易见,该工艺中碳酸氢钠被作为脱硫剂,反应过程中实际上出现了受热分解激活(脱硫剂)、二氧化硫吸收两种反应类型,前者是指热烟气自身携带的热量激活碳酸氢钠,并产生碳酸钠,在该状态下脱硫剂会生成大量多孔性物质,其比表面积也会显著增加。激活后的碳酸氢钠在功效上类似多孔性的活性炭化物,比表面积的上升会使这类物质与二氧化硫、碳酸氢钠的接触面积显著增加,进而提升后续化学反应的速率,使烟气中的SO₂及其他酸性气体得到迅速中和^[4]。反应机理如下公式所示:

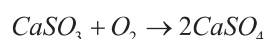
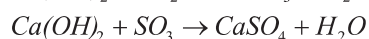
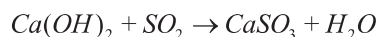


此工艺的优点首先表现在高水准的技术成熟度上,作为脱硫剂的碳酸氢钠是以全干状态被喷入管道中的,故整个工艺过程不会产生工业废水(不需要水分参

与)。但不足之处是对碳酸氢钠品质有着极高要求,且为了保证碳酸氢钠的干粉状态,系统中需额外装置超细粒径研磨机,且需确保烟气温度处于160-250℃这一温度区间;还有就是该工艺脱硫副产物以Na₂SO₄、Na₂SO₃、Na₂CO₃干粉混合物为主,这类产物当前并不具有良好的二次应用空间,某种程度上可能会被作为危废品,因而反应产物会面临着极大的处置、处理难度。

2.3 固定床脱硫工艺

此工艺需要以人工方式打开吨袋,将脱硫吸收剂置入其中,随后脱硫吸收剂会经仓顶进料口被充分填充至吸收塔内。脱硫吸收剂完成填充之后,热风炉中的烟气在进入吸收塔后会从吸收剂中穿过,在烟气穿过的过程中,烟气中的SO₂会与吸收剂中含有的活性物产生化学反应,并使SO₂得到充分中和脱除,完成净化后的烟气经引风机送入烟囱排放^[5]。反应机理如下公式所示:

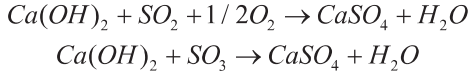


反应结束后失效的吸收剂将经吸收塔底部排出,同时后续反应所需的新鲜吸收剂将从上方补充至仓内,反应后产物则经由塔底排出阀排出,而粉尘则与烟气共同进入料床,与饱和吸收剂经卸料过程排出塔外。此工艺的优势相对较多,其一在于设备结构简单且控制难度低,尤其固定床干法脱硫系统能够根据SO₂浓度变化自适应;其二在于适用温度范围较广,达到60-380℃区间,因此烟气处理范围较广;其三在于系统构成优化程度高,不仅产生的系统温降较小,整个系统占地面积也较小^[6]。工艺缺点则在于无法有效控制颗粒物,且可能会面临床层阻力暴增的情况。

2.4 SDS钙基脱硫工艺

该工艺原理是在特定温度范围内(30-350℃),以确保烟气中的二氧化硫、三氧化硫能够与脱硫剂中的成分充分形成气固反应,进而起到脱硫的作用。应用的脱硫剂为钙基高活性脱硫剂,该脱硫剂同样为粉状,因此需要以定期输送的方式,密封输送至脱硫剂料仓,故应用过程中还需额外装置脱硫剂料仓,由旋转输料机及输送风机送入烟道,使之能够与烟气产生脱硫反应。而在布袋除尘器中经过滤并收集的粉尘,则被运输至废剂料仓。反应形成的脱硫灰需定期经吸罐车排出。需要注意的是,工艺中应用的旋转给料机需匹配变频控制的控制方法,从而保证与二氧化硫排放浓度的契合性,并实现理想的成本控制效果。整个工艺过程需要在完全密闭的环境中应用脱硫剂,无论是脱硫剂的输送还是脱硫灰的

处置均需满足这一要求，进而实现脱硫系统的低能耗运行，另外还具有自动化程度高、作业环境清洁度高的特征。反应原理如下：



该工艺的优势在于比前文中出现的钠基技术拥有更灵活的适用温度范围，且不需要在现场设置研磨系统；生成的脱硫产物也以钙基一般固体废料为主，拥有较理想的资源化合规处理操作空间。技术缺点在于无法充分控制烟气温度，且由于废料带有高温，配套除尘器需配备高温滤袋，另外一旦前段换热器产生故障，将会影响到整个系统的正常运行。

3 脱硫工艺方法比选

3.1 干法脱硫+布袋除尘器

干法脱硫即密相干塔法脱硫技术，配合布袋除尘器可达到理想的烟气脱硫处理效果。此工艺完整流程如下：

首先将碳酸氢钠置入磨机加以研磨，使之粒径均达到25 μ m以下。之后通过控制系统从原烟道引出烟气，使之进入反应过程进行脱硫。在此过程中需控制烟气流动速率，保证反应时间最低维持2s（注意最佳反应温度区间为140-250 $^{\circ}$ C，因此烟气进入原烟道换热器前需降温，换热器后应升温处理）。完成脱硫后的烟气被送入布袋除尘器，在捕获其中的烟尘之后，被脱硫的烟气整体已达到相应标准，可注入原烟囱加以排放。

该方案的优势在于采用碳酸氢钠脱硫剂，不会使烟气温度下降，反应过程也不会产生白烟；且整个系统构造简单、设备少、运行成本相对较低、占地小，因此脱硫工艺总体成本也较为理想；最后整个脱硫过程不会产生废水、白烟、腐蚀、也不会造成其他环保敏感问题。缺点则在于脱硫生成的副产物以NaSO₄、Na₂CO₃干粉混合

物为主，针对这类反应后产物，目前尚没有理想的控制方法。

3.2 钙基固定床脱硫

该方法中热风炉烟气自下方进入脱硫塔，之后与脱硫剂大范围接触，从而产生脱出二氧化硫的反应。除此之外，此方法采用的脱硫剂还能起到拦截烟气中灰尘的作用，因而具有额外的深度除尘效果。反应过程能够完全净化烟气，并使之达到相应的排放标准；至于反应后完全饱和的脱硫剂，则需要定期查看其在废料仓中的堆积状态并及时清理。

这一方案的优势在于脱硫后形成的烟气为干烟气，不需要防腐处理且不会产生废水；另外整个系统构成较为简单，不需值守，检修维护难度较低且不会造成水资源消耗；还有就是整个系统不需要配备动力设备，因此能耗表现上较为理想。缺点在于系统需要做好流场设计，另外脱硫废渣以粉煤灰、硫酸钙及少量未完全反应的氢氧化钙，仅具有少量的水泥厂利用潜力。

结语

当下高炉热风炉烟气脱硫技术逐步发展至更为成熟的阶段，因此企业在应用具体的脱硫技术及工艺时也拥有更多选择，能够结合自身实际经营状况及烟气特征，合理选择可靠的工艺对热风炉烟气加以处理，使之满足相应的排放要求。

参考文献

- [1]杨凡.高炉热风炉烟气脱硫超低排放改造方案分析[J].冶金动力,2022(5):101-105.
- [2]柳培浩. 锅炉烟气脱硫超低排放改造技术的应用[J]. 化工设计通讯,2020,046(6):17-18.
- [3]向叶楠. 高炉热风炉烟气脱硫脱硝工艺选择及应用[J]. 中国资源综合利用,2023,41(5):174-176.