

烧结烟气中气态污染物的减排技术现状及展望

杨光¹, 张淑会¹, 杨艳双²

(1. 华北理工大学冶金与能源学院, 河北 唐山 063210;
2. 华北理工大学管理学院, 河北 唐山 063210)

摘要: 烧结工序是高炉炼铁工艺中的重要环节, 亦是钢铁生产流程中对环境污染最为突出的环节之一。烧结过程产生的 SO₂、NO_x 和二噁英等气态污染物, 会对人体和环境造成极大的威胁。本文结合目前烧结工艺过程环保现状, 重点分析了烟气中气态污染物 SO₂、NO_x 和二噁英产生的原因, 结合工程实例综述了上述气态污染物常用的脱除技术原理和方法, 并对烧结烟气污染物的脱除技术进行了展望。指出实现脱硫石膏的合理利用, 开发烧结烟气中 SO₂、NO_x 和二噁英综合治理技术, 提高活性炭或活性焦的吸附效果等是现有技术有待于进一步研发的关键环节; 加强对烧结厂源头和过程的控制, 结合现有的末端治理实现烧结烟气超低排放是今后烧结烟气气态污染物减排努力的方向。

关键词: 烧结烟气; 减排技术; 二氧化硫; 氮氧化物; 二噁英; 脱硫脱硝

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2021.01.007

中图分类号: TD989 X701;X765 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2021)01-0045-012

烧结是我国高炉 - 转炉钢铁冶金长流程中必要的组成环节, 它为高炉提供优质、稳定的烧结矿, 但也是钢铁企业造成环境污染最严重的生产环节。烧结生产的原理和特点决定其生产过程会产生大量的粉尘和烟气。烧结粉尘产生的主要环节包括原料场各种粉状物料的装卸、筛分、运输、堆放混匀过程, 配料过程, 抽风烧结及鼓风冷却过程。随着国家对环保要求的提高, 国内各大钢铁公司烧结厂对于粉尘的治理相对比较完善, 通过分散式或集中式除尘设备系统可以实现粉尘的控制。常用的粉尘处理设备包括脉冲袋式除尘器和电除尘器等, 这些除尘设备能除尘效率高, 运行稳定可靠, 可以实现生产现场对粉尘控制的要

求^[1]。烧结烟气具有排放量大、含尘量高、有害气体污染物种类多且含量高等特点。其中有害气体污染物主要包括 SO₂、NO_x 和二噁英等。据统计, 烧结工艺过程在产生的 NO_x 的排放量占总 NO_x 排放量的 50%, SO₂ 的排放量约占钢铁工艺总产量的 80% 左右^[2]。上述有害气体污染物均会对环境和人类产生严重的危害。随着环保要求的提高, 如何减少和控制烧结烟气中的污染物更引起了人们的广泛关注。国家环保部于 2019 年发布了《关于推进实施钢铁行业超低排放的意见》(000014672/2019-00534), 要求烧结机机头的烟气颗粒物、SO₂、NO_x 排放浓度小时均值分别不高于 10、35、50 mg/m³^[3]。本文在介绍烧结烟气中气体

收稿日期: 2019-08-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51174074); 华北理工大学杰出青年基金项目 (JP201508) 资助

作者简介: 杨光 (1997-), 男, 学生, 研究方向为炼铁和冶金资源综合利用研究。

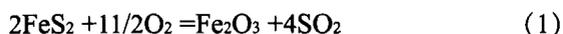
通讯作者: 张淑会 (1976-), 女, 教授, 博士, 主要从事炼铁和冶金资源综合利用研究。邮箱 zhangshuhui@ncst.edu.cn

污染物产生的原因和危害的基础上,重点综述了SO₂、NO_x和二噁英三种有害物质的处理方法和工艺设备,并对烧结烟气的综合处理进行了展望。

1 烧结烟气中气体污染物的产生及危害

1.1 SO₂的产生与危害

SO₂为大气中主要含硫污染物,是形成酸雨的主要成分。同时,SO₂对人体有较大的危害。SO₂被人体吸入呼吸道后,因其极易溶于水,会被阻滞在上呼吸道,对支气管和肺部有明显的刺激症状,使肺组织受到伤害。SO₂还可被人体吸收进入血液,对全身产生毒性作用并促进癌变。烧结废气中的硫主要来源于烧结生产使用的铁精粉和固体燃料中含有的硫元素。其中铁精粉中的硫多以硫化物(FeS₂, FeS)和硫酸盐(FeSO₄)形式存在。而固体燃料中含有的硫元素多为有机硫。铁精粉中的硫化物(FeS₂, FeS)在烧结过程中通常发生氧化反应,生成气态SO₂。例如,铁FeS₂在650℃以下时,可以与氧气发生如下氧化反应生成SO₂:



在温度高于650℃时,FeS₂先分解生成FeS和S,再与与氧气反应,其反应式如下:



而铁精粉中的硫酸盐在烧结过程中多是通过分解反应释放气态硫化物^[4]。固体燃料中有机硫则是通过氧化生成气态硫化物。

1.2 NO_x的产生与危害

一般将NO和NO₂统称为氮氧化物,用NO_x表示,除此之外空气中氮的氧化物还包括N₂O和N₂O₃等^[5]。氮氧化物是造成光化学烟雾的主要原因之一,同时也会与平流层臭氧发生反应形成臭

氧层空洞,导致紫外线对地面生物带来严重的危害。吸入人体后NO_x会与血液中的血红蛋白结合,使血液输氧能力下降,造成缺氧。NO_x还具有致癌作用,会造成细胞分裂异常,遗传信息紊乱。根据燃烧条件和生成途径,NO_x的生成反应可以分为以下三种类型。

(1) 热力型NO_x

热力型NO_x是由空气中的N₂在1800K以上的高温(主要是火焰高温带)范围内与氧发生反应生成,其反应机理如下^[6]:



(2) 瞬时型NO_x

瞬时型NO_x是在碳氢化合物燃料燃烧充足的条件下于火焰面内生成,但其生成量很低,仅占总量的5%左右^[5]。其生成过程如下为碳氢化合物分解生成的CH和CH₂等与N₂反应生成CN和HCN等中间产物,然后这些中间产物再与O、O₂、OH等活性氧化基反应形成NCO, NCO进一步于O、OH等基团反应生成NO_x^[7]。

(3) 燃料型NO_x

燃料中含有的氮化合物在燃烧过程中热分解后,经过氧化还原反应而生成的氮氧化物属于燃料型NO_x。燃料型NO_x的生成与燃料受热分解后氮元素在挥发分和焦炭中的分配比例有关,同时其生成量也取决于温度和氧浓度等燃烧条件^[7]。

烧结过程中生成的氮氧化物主要以燃料型NO_x为主。燃料型NO_x主要是烧结燃料中,含氮化合物在燃烧受热后的分解。

1.3 二噁英的产生与危害

二噁英是氯化环芳烃类化合物,是多氯代二苯并二噁英(PCDDs)和多氯代二苯并呋喃(PCDFs)的总称^[8]。研究表明,二噁英无论是在生物体还是环境中,都很难以被降解,可长时间存

在于环境之中，至少需要数十年乃至上百年才可以退化^[9]。二噁英属于剧毒化合物，能够致癌、致畸，还会毒害人体主要器官，对肝脏、内分泌系统、神经系统等造成危害，被列为人类一级致癌物。二噁英通过食物链进入人体，不易被排出，长期隐匿在体内，严重时可导致死亡^[10]。

研究表明，钢铁冶炼过程排放的二噁英占我国二噁英排放总量的46%，而排放总量中15%的二噁英是来自于烧结生成过程。由于二噁英危害巨大，联合国环境署限制二噁英的排放量为0.1 ngTEQ/Nm³^[11]，目前我国对二噁英排放的控制也在不断增大，特别是烧结过程中二噁英的控制已经得到生产和科研人员的广泛关注。烧结过程中产生的二噁英主要由两种途径，一是前驱物反应生成，二是“从头合成”。其中，由前驱物反应生成的二噁英主要是由烧结过程燃料燃烧所生成的前驱体化合物（氯酚、氯苯和多氯联苯）和烧结原料中的除尘灰、氧化铁皮等二次回收物料，在催化剂（铜）的作用下发生反应而形成。而燃烧过程中碳、氢、氧和氯等元素在铜、铁等金属离子的催化作用下，可以和飞灰中的氯元素发生卤化反应，生成的卤化物经氧化可以生成CO₂和二噁英^[12]，该反应过程通常称为“从头合成”。而且“从头合成”被认为是烧结过程释放二噁英的主要途径^[13]。这是因为烧结过程具有二噁英“从头合成”的基本条件，例如烧结料层中氧气份含量高，温度适宜；烧结燃料中具有合成二噁英需要的碳；二次含铁物料和铁精粉中存在少量的氯元素，且铁离子可以作为上述反应的催化剂。

2 烧结气态污染物的脱除技术

2.1 SO₂ 的去除

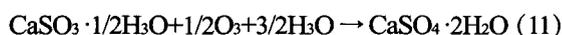
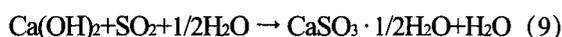
目前烧结烟气中SO₂的去除技术较为成熟，主要包括干法、湿法和半干法脱硫工艺。干法脱硫工艺有活性炭吸附法、GSCA双循环流化床法

和ENS法等。湿法脱硫工艺主要有石灰石-石膏法、硫铵法、双碱液法等。半干法脱硫工艺包括NID烟道循环法，LJS循环流化床法、SDA旋转喷雾法^[14]。我国烧结烟气脱硫，95%以上都采用湿法或半干法脱硫。

(1) 湿法-石灰-石膏法

石灰-石膏湿法脱硫工艺，是目前应用最广泛，效果最好、技术最成熟的脱硫方法。

石灰-石膏工艺一般采用石灰石（CaCO₃）或石灰（CaO）作为脱硫吸收剂，将石灰石破碎磨细成粉状与水混合搅拌形成的吸收浆液，并将其送入脱硫吸收塔。在吸收塔内，吸收浆液与烟气接触混合，烟气中的SO₂通过与浆液中的CaCO₃以及鼓入空气中的氧进行化学反应形成石膏（CaSO₄）浆液，从而被脱除。形成的石膏浆液通过真空皮带脱水机处理后得到石膏^[15]。石灰-石膏脱硫工艺的主要化学反应式^[16]如下：



石灰-石膏法脱硫工艺的投资合理，运行成本低；脱硫剂为石灰石，便宜易得且脱硫效率高，可达90%以上；产生的石膏可以被回收利用。但该工艺也存在一些缺点，例如会产生大量废水，烟囱排白雾现象严重，容易造成厂的“拖尾”现象，严重的会出现烟囱雨^[17]。

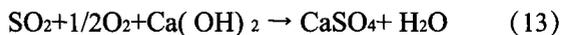
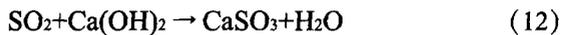
为了进一步提高石灰-石膏法的脱硫效率近年来人们围绕开发新的添加剂和完善该脱硫工艺过程进行了系列研究。例如，Paul Maina等^[18]曾研究了天然沸石添加剂对石灰石脱硫的影响，该研究得到含有大量硅酸盐的天然沸石按1:1的比例添加到石灰石浆液中，可显著改善石灰石的反应性进而提高石灰石浆液的脱硫效率。

宝钢的第三烧结机烟气采用石灰石-石膏法脱

硫,其主体设备是气喷旋冲脱硫塔配合烟道除雾器,脱硫后烟气中 SO_2 的浓度低于 40 mg/Nm^3 ^[17]。但是宝钢的石灰-石膏法脱硫曾出现运行不稳、对周边环境产生腐蚀等问题。随后,湘钢 360 m^2 烧结机烟气石灰-石膏脱硫工艺对脱硫塔进行了改造,采用喷淋空塔技术,以颗粒直径 0.045 mm 的石灰石做吸收剂,采用逆流技术与烟气接触,成功实现烟气脱硫。刘宪^[19]研究发现,通过合理加快塔内烟气流速可增加气液的接触面积,确定合适的液气比可以显著提高脱硫效率。应用此工艺,湘钢烧结机烟气 SO_2 排放浓度低于 100 mg/m^3 ,脱硫效率高于 90% 以上。

(2) 半干法-SDA 旋转喷雾法

半干法脱硫工艺与石灰-石膏湿法工艺的相同点是在湿态过程中脱硫,脱硫速度快、效率高;不同点是前者在干态下处理产物,因此具有无酸性物质、无废水排出等特点。SDA 旋转喷雾法是典型的半干法脱硫技术,该工艺的原理是烧结机头的烟气首先进入电除尘器进行除尘,然后经主抽风机直接进入旋转喷雾干燥 (SDA) 吸收塔之中,与经雾化器雾化后的石灰浆液充分接触^[14]。该过程发生的主要反应如下^[14]:



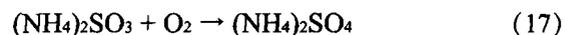
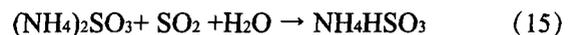
旋转喷雾法生产工艺流程为生石灰与水混合配制成石灰浆液,浆液经雾化器形成雾滴后喷入吸收塔。石灰浆液雾滴与烟气快速发生化学物理反应。在脱硫塔内,脱硫产物经烟气干燥,形成的固体粉状料由袋式除尘器捕集排出,净化后的气体经增压风机至烟囱排放^[14]。

实践表明,SDA 旋转喷雾法技术先进、运行可靠,适应性强;且流程短,占地少,投资低;脱硫过程中无废水,不会对脱硫设备产生腐蚀^[20]。华菱湘潭钢铁公司烧结机 2015 年引进了 SDA 旋转喷雾半干法脱硫工艺,在工艺的基础上增设了

循环灰浆液制备供给系统,以提高未反应的脱硫剂的利用率。经过一年的运行优化,该套系统 SO_2 排放浓度小于 150 mg/Nm^3 ,符合国家排放标准^[20];李凤民等^[21]曾对邯钢 400 m^2 烧结机使用的 SDA 脱硫工艺进行了工艺技术改造和优化。该研究表明,因烧结烟气 SO_2 含量较高,波动大,工艺运行初期出现稳定性差,雾化器事故率高等问题。经采用圆形振动浆液技术以及对关键技术参数进行优化后,该工艺的作业率可达 100%,烟气脱硫效率达到 80% 以上。烟气净化后各项排放指标均优于国家排放标准,其中二氧化硫平均排放浓度达 134 mg/m^3 、颗粒物排放浓度达 18 mg/m^3 、氮氧化物排放浓度达 225 mg/m^3 。

(3) 氨法脱硫技术

烧结烟气氨法脱硫技术主要是用液态氨或氨水作为吸收剂,吸收烟气中 SO_2 生成 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 、 NH_4HSO_3 等中间产物,再次经过强制氧化得到硫酸铵的过程^[22]。氨法脱硫工艺的技术要点主要包括吸收剂的选择、亚硫酸铵的氧化、灰渣处理技术、防腐蚀以及真空增发和结晶技术等^[23]。该过程发生的主要化学反应如下:



氨法脱硫技术的能耗低,脱硫装置高效简便,无废水、废渣及 CO_2 排放,脱硫副产物应用市场大,生产的硫酸铵可以用作优质的化肥,符合低碳环保的发展理念^[24]。2008 年日照钢铁公司就已经在 $2 \times 180 \text{ m}^2$ 的烧结及上应用了氨法脱硫技术,取得了不错的脱硫效果。杭钢 1 号、2 号烧结机的氨法脱硫装置于 2012 年建成投入使用,运用镍基合金、玻璃钢等防腐衬里,运行高效安全。运行以来,该系统的脱硫效率高于 95%,同步作业率高达 98%,净化之后烟气中 SO_2 含量小于 200 mg/Nm^3 ,符合

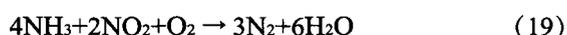
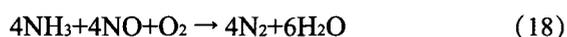
国家的排放标准^[25]。

综上所述, 目前国内烧结烟气 SO₂ 的脱除技术较为成熟, 但如何实现脱硫产物石膏的有效回收利用是该技术得以完善的限制性环节。我国天然石膏资源丰富、价格低廉, 而脱硫石膏的物化性能和天然石膏亦有差别, 多种因素导致目前脱硫石膏未能实现合理的再利用, 这亦是现阶段烧结烟气脱硫技术研究的重要方向之一。

2.2 NO_x 的去除

据统计生产 1 t 烧结矿大约会产生 4000 ~ 6000 m³ 的烟气^[23]。烧结烟气具有 CO 含量高, 烟气温度变化大 (120 ~ 200 °C), 成分复杂 (含有 SO₂ 和 NO_x 酸性气体) 等特点^[26]。

对于烧结烟气中 NO_x, 目前比较成熟的脱销技术选择性催化还原法 (SCR), 该方法运行稳定, 脱硝效率高。SCR 技术使用氨 (NH₃) 作为还原剂, 钒钨钛体系作为催化剂^[27]。在适宜的温度, 和一定量催化剂作用下, 烧结烟气中的 NO_x 可以被 NH₃ 还原成 N₂, 其反应方程式如下:



当反应温度低于 350 °C 时, 仅可能发生 NH₃ 被氧化 N₂ 成的副反应, 当温度高于 350 °C 时能发生如下副反应,



且在 450 °C 以上时反应剧烈^[28]。

烧结烟气经过静电除尘器除尘后, 通过引风机进入系统中, 经空气预热器、烟道燃烧器充分预热和加热后, 烧结烟气温度可达到 320 ~ 450 °C 的较佳催化活性温度, 加热后的烧结烟气通过氨喷射格栅, 和混有一定空气的氨气混合后经顶部烟道进入反应器催化剂层。在催反应器催化剂层, NH₃ 和烟气中的 NO_x 发生式 (16) 的反应生成 N₂ 和 H₂O。脱硝后的烟气随烟道进入空气预热器进

行换热, 然后再由出风门进入烟囱排出^[29]。

随着工业 NO_x 排放标准的严格要求, 性能稳定并且低温高效的 SCR 脱硝催化剂一直是人们的研究热点。低温 SCR 脱硝催化剂主要包括锰基催化剂、碳基催化剂和分子筛催化剂三类^[30]。

研究表明, 不同价态锰元素之间发生的氧化还原反应可以促进 NH₃ 选择性还原 NO。在 SCR 工艺中, 锰氧化物催化活性从高到低的顺序为 MnO₂, Mn₅O₈, Mn₂O₃, Mn₃O₄ 和 MnO。Mn 基催化剂的催化效率高, 但在低温度时对 N₂ 的选择性较差。基于该问题, 近年来人们还开发了掺杂其他金属元素的复合型 Mn 基催化剂^[31]。例如, 以 TiO₂ 或以 Al₂O₃ 为载体的锰基催化剂, 在 SCR 工艺中均得到了良好的应用效果。碳基材料比表面积大, 具有多孔结构, 导热性好, 常用来作为吸附剂的载体。常见的碳基材料主要有碳纳米管、活性炭、活性碳纤维等^[32]。陈九玉等^[33] 以活性炭为载体, 并且加入铁、钴等元素, 制备了 Fe₂O₃/活性炭催化剂和 Co-Fe₂O₃/活性炭催化剂。该研究表明铁的质量分数为 10% 时, 催化剂能够实现较高的 NO 转化率; 当 Co 和 Fe 的质量比为 0.7 时, Co-Fe₂O₃/活性炭催化剂脱硝效果较佳。另一方面, 分子筛因具有比表面积大、孔隙结构独特、吸附能力强等特点, 亦被广泛应用于低温脱硝催化剂^[34]。唐剑骁等^[35] 以等体积浸渍法为基础, 采用微波干燥和普通干燥两种方法制备了负载型 Cu 基分子筛催化剂并进行了的脱硝活性试验。试验结果表明铜对分子筛的脱硝活性有明显的促进作用, 而且微波处理能够直接影响分子筛的孔道结构并对材料的催化活性产生影响。

2.3 二噁英的去除

《中国二噁英类排放清单研究》指出, 现有烧结工艺是二噁英的主要来源之一^[36]。二噁英产生于烧结生产的烧结料层中, 它的毒性极强、结构复杂、危害巨大, 必须严格控制。依据二噁英

产生机理, 可通过以下方法进行治理:

(1) 合理选择和优化烧结原料: 合理选择和优化烧结原料属于源头控制技术。烧结生产除了使用大量铁矿石以外, 还配加熔剂、焦粉和除尘灰等二次含铁物料。烧结原料中含有铜、铁和氯元素均可以促进二噁英的释放^[37], 因此烧结生产应合理的选择铁矿石, 尽量使用氯、铜等元素含量较低的矿石, 并对二次含铁物料进行分选, 严格限制氯、铜含量高的物料配比^[38]。Chen 等^[39]对烧结过程中二噁英的减排进行了试验研究, 结果表明烧结配料中用部分赤铁矿代替褐铁矿, 或取消点除尘灰和高炉炉尘可以明显降低烧结过程中二噁英的排放, 而增加配料中水分含量对二噁英的减排影响不大。Masanori 等^[40]的研究亦发现增加高炉除尘灰和静电除尘灰的使用量, 会提高二噁英的排放量。

(2) 选择合理的二噁英去除工艺: 根据二噁英可被多孔物质吸附的特性, Chi 等^[41]利用活性炭吸附结合布袋除尘器的方法进行了烟气二噁英减排试验研究, 在该研究中活性炭采用流动床和固定床两种形式, 配合布袋除尘器使用。结果表明, 两种活性炭供给工艺均可以吸附二噁英, 但烟气通过活性炭流动床和布袋除尘器时, 可以更有效的吸附和捕集烟气中的有毒物质, 结果表明, 经此工艺净化后的二噁英浓度为 $0.031 \text{ ng-TEQ/Nm}^3$ 。太钢烧结生产采用了活性炭工艺去除二噁英技术, 二噁英脱除率达 90% 以上, 同时二氧化硫脱除率也可达 95%^[42]。

(3) 改进烧结工艺, 减少烧结过程二噁英的生成: 基于烧结生产的特点和在钢铁冶金生产中的起的作用, 上述二噁英的去除方法或技术收到原料、投资的限制。而通过改进和调整烧结工艺, 可以减少烧结过程中二噁英的生成量, 是便捷可行的控制方法。例如, 调节烧结终点的位置, 快速减低烟气温度, 调整烧结气氛中氧浓度等, 均

可以改变二噁英的生成条件。采用烟气循环技术可以使烟气中的二噁英在烧结过程中发生裂解^[43-44]另外, 在烧结混合料中添加含氮、含硫和碱性抑制剂能与氯结合或破坏金属催化剂的活性, 从而抑制二噁英的生成^[45-46]。其中含硫和碱性抑制剂虽然有效, 但不符合烧结和高炉生产有负面作用, 不宜采用。含氮添加剂是相对经济有效的方式。龙红明等^[47]的研究表明, 烧结过程添加尿素可以实现二噁英的减排, 当其添加量为 0.1% 时, 二噁英的减排可达 60% 以上。

现有研究表明, 对于二噁英的减排技术, 其中采用不同途径或方法实现源头生成量减排最为有效。而对已产生的二噁英的去除技术多存在装置复杂、成本偏高等问题, 多数技术还处于研发阶段, 还未实现大规模应用。因此, 如何实现已产生二噁英的减排技术的工业化应用亦是今后努力的方向。

2.4 活性炭吸附综合脱硫脱硝

活性炭由碳元素组成, 属于石墨微晶无序构成的多孔体^[48]。研究表明, 活性炭因其具有良好的微孔结构和较大的比表面积, 可以同时吸附烟气中的 SO_2 、 NO_x 、重金属、二噁英等多种污染物^[49]。在活性炭系统吸附 SO_2 、 NO_x 过程中, 既发生物理吸附也发生化学吸附, 其化学反应为^[50]:



邯郸钢铁公司经过对比和调研, 首次引进了活性炭逆流脱硫脱硝技术, 经过不断的探索和改进, 该套系统的运行已经成为烧结领域实现综合脱硫脱硝的成功范例^[51]。

活性炭脱硫脱硝工艺包括烟气、吸附、解析、活性炭输送、热循环和制酸六大系统。

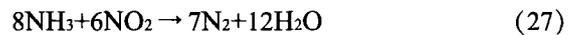
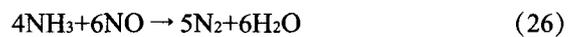
烧结机排出的烟气首先经过除尘器除尘, 除尘后的烟气进入增压机增压, 之后被送入吸收塔脱硫床层进行脱硫吸附反应。经脱硫后烟气在脱

硫床层后中间部位与氨气混合，再经过脱硝床层完成脱硝反应后进入主烟囱排出。上述脱硫脱硝过程采用逆流原理进行。达到吸附饱和的活性炭送到解析塔内，通过加热的 N_2 加热可以解析出高浓度的 SO_2 用于制备浓硫酸；解析后的活性炭通过输送机送回吸收塔循环使用，新活性炭通过链斗机加入系统中作为补充。

目前太钢炼铁厂烧结机烟气采用活性炭吸附脱硫脱硝工艺，包括吸附系统、解吸系统、副产品回收利用系统。宝湛钢铁公司烧结工序也使用活性炭脱硫脱硝工艺。生产实践表明，活性炭脱硫脱硝工艺可以有效的吸附烟气中 SO_2 和 NO_x ，处理后的烟气中 SO_2 的排放浓度不大于 8 mg/m^3 ；脱硝效率达 98.4%； NO_x 的排放浓度为 101 mg/m^3 ，脱硝效率为 50.25%，均符合国家排放标准^[39]。活性炭吸附脱硫脱硝工艺不但可以脱除烧结烟气中的 SO_2 和 NO_x ，还能实现二噁英的去除。太钢应用活性炭吸附工艺后，烧结净烟气中二噁英的排放小于 0.2 ng/Nm^3 ^[48]。

为进一步提高活性炭脱硫脱硝能力和效果，人们围绕如何改善或提高活性炭的性能进行了研究，并开发了活性焦脱硫脱硝吸附技术。Kazuhiko Tsuji 等发现，如果在使用过程中，对活性炭加热可以再次对活性炭活化，可以更加提高其脱硫、脱硝性能^[52]。目前烧结过程使用的脱硫脱硝活性焦大小多为直径约 9 mm 的圆柱状，与普通活性炭相比，其具有比表面积较小、综合强度高，协同脱硫脱硝能力强，使用寿命长等特点。

活性焦吸收塔由两段组成，烧结烟气经空气预热器加热至 $120\sim 160\text{ }^\circ\text{C}$ （较佳温度）后送入第一段吸收塔进行脱硫。脱硫后的烟气进入第二段吸收塔并与氨气混合完成脱硝。活性焦在吸收塔内自上而下的运动依靠重力完成，从第一段吸收塔底部经管道进入活性焦再生系统，在 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 左右解析后进行循环使用。发生的主要反应为^[53]：



日本新日铁于曾在名古屋钢铁厂的 3 号烧结机上利用活性焦吸附法来对烧结烟气进行脱硫脱硝，之后又在 1、2 号烧结机上采用同样的方法，经过不断的改进，其脱硫率高达 95%、脱硝率高于 40%^[54]。

活性炭和活性焦脱硫脱硝工艺对烟气中有害气态物质的脱除效率高，而且符合绿色冶金的发展方向。但是其投资和运行成本也偏高，这某种程度上限制了其推广应用。因此，如何降低该工艺的吸附能耗、提高吸附效率、降低运行成本等将是进一步完善活性碳和活性焦脱硫脱硝工艺的关键环节。

2.5 烧结源头和过程控制气态污染物的研究现状

2.5.1 烧结源头气态污染物的减排

烧结烟气中主要污染元素多来源于烧结原料，因此通过对烧结原料成分进行调控，如通过降低焦粉、生石灰配比，调整烧结含铁物料配比，或者合理控制混合料水分等可以大大减少烟气中气态污染物的含量，以实现源头减排^[55]。龙红明等^[56]基于烧结过程 SO_2 的生成特点，提出在烧结料过失层均匀添加尿素固体颗粒实现脱硫的新方法。该方法经工业试验证明，过湿层混合料中尿素配比为 0.09% 即可对 SO_2 的减排脱除有较大效果。苏玉栋^[57]的研究发现，确保烧结矿质量的前提下，增加混合料的含水量、提高烧结料层高度、生石灰碱度，降低混合料中焦粉和无烟煤配比，可以使 NO 的排放浓度降低 20% 左右。

2.5.2 过程控制研究现状

过程控制是在烧结生产过程中通过对烧结工艺参数进行调控来降低烟气污染物排放的方法。其中烟气再循环技术法是目前应用较为广泛的过

程控制技术,其主要利用 NO_x 在高温分解或转化的特点,将部分烧结烟气循环回到烧结层以达到 NO_x 减排。常用的三种烟气循环技术包括 EOS 工艺 (Emission optimized sintering)、EPOSINT 工艺 (Environmental process optimized sintering) 和 LEEP 工艺 (Low emission & optimized sinter production)^[57]。

EOS 工艺是将 45% 左右的主烟道气体抽出并与空气混合,其氧气含量达到 14% 左右时将其循环至烧结层。EPOSINT 工艺在 EOS 工艺的基础上,进一步对烧结设备进行改造和优化。该工艺烧结机的每个风箱可以单独排放废气,从而实现烧结过程废气温度升高位置可调。在生产中可以单独将废气温度升高的几个风箱中的废弃循环回烧结层,使烟气循环工艺的运用更具有灵活性。LEEP 工艺主要是将烧结机后半段产生的硫氧化物、氯化物、二噁英等高温高污染物质,经降温于空气混合后再次通入烧结机中进行烟气循环。杜伊斯堡-胡金根厂将 LEEP 工艺在一台 420 m² 烧结机上应用后,与传统烧结工艺相比,烟气总量减少了 600 Nm³/h, SO₂ 和 NO_x 的排放量同比减少 150 mg/m³、30 mg/m³。

上述分析可知,烧结烟气循环过程控制技术不仅可以实现烟气中多种污染物和烟气总量的减排,还可以充分利用烧结烟气余热,减少固体燃料的使用量,具有良好的综合冶金效应。

3 结 语

(1) 烧结烟气中的气态污染物主要包括 SO₂、NO_x 和二噁英,随着我国烧结环保标准的逐步完善,对 SO₂、NO_x 和二噁英的排放都进行了严格的限制。目前烟气中 SO₂ 的去除技术比较成熟,包括干法、湿法和半干法三大类。与湿法脱硫工艺相比,半干法脱硫工艺无酸性物质、无废水排放,更符合环保要求。较为成熟的烟气中 NO_x 技术是 SCR 脱硝工艺。脱硫石膏的合理再利用将是烧结烟气脱硫技术今后研究的重点。

(2) 二噁英的控制方法应坚持源头 - 过程 - 末端综合治理的原则,其中采取有效措施控制烧结生产中二噁英的生成是关键。已生成二噁英的减排技术如何实现工业化应用亦是科技突破的发展方向。

(3) 综合考虑烧结烟气中 SO₂、NO_x 和二噁英等多种污染物的协同减排是今后科技工作这和烧结生产技术人员努力的主要方向。国内部分钢铁企业已经采用活性炭或活性焦综合脱硫脱硝技术,但因其存在投资成本高等问题还没有实现大范围推广应用。因此如何降低烟气气态污染物综合治理技术的投资、运行成本,进一步提高活性炭或活性焦的吸附效果,是现有工艺得以广泛应用的关键;对烧结烟气实施源头和过程控制,结合现有末端治理技术将是今后努力的重要方向。

参考文献:

- [1] 张朝晖,赵福才,等.冶金环保与资源综合利用[M].北京:冶金工业出版社,2016.
- ZHANG Z H, ZHAO F C, et al. Metallurgical environmental protection and comprehensive utilization of resources [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2016.
- [2] WANG J,ZHONG W Q. Simultaneous desulfurization and denitrification of sintering flue gas via composite absorbent[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2016, 24(8): 1104-1111.
- [3] (000014672/2019-00534)《关于推进实施钢铁行业超低排放的意见》[S].(000014672/2019-00534)"Opinions on Promoting the Implementation of Ultra-Low Emissions in the Iron and Steel Industry"[S].
- [4] 陈凯华.铁矿石烧结过程中二氧化硫的生成机理及控制[J].烧结球团,2007,32(4): 13-17.
- CHEN K F,Formation mechanism and control of sulfur dioxide during iron ore sintering process[J].Sintering and Pelletizing,2007,32(4): 13-17.
- [5] 杨颀.氮氧化物减排技术与烟气脱硝工程[M].北京:北京工业出版社,2007.
- YANG Y. Nitrogen oxide emission reduction technology and flue gas denitrification project[M].Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007.

- [6] 苏亚欣, 毛玉茹, 徐璋. 燃煤氮氧化物排放控制技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- SU Y X, MAO Y R, XU W. Coal-burning nitrogen oxide emission control technology [M]. Metallurgical Industry Press, 2005.
- [7] 吕薇. 铁矿烧结过程 NO_x 生成行为及其减排技术 [R]. 长沙: 中南大学硕士学位论文, 2014.
- LV W. NO_x generation behavior in iron ore sintering process and its emission reduction technology [R]. Changsha: Master Thesis of Central South University, 2014.
- [8] 李建萍, 王存政. 钢铁行业二噁英减排技术浅析 [J]. 四川环境, 2014, 33(1): 137-139.
- LI J P, WANG C Z. Analysis of Dioxin Emission Reduction Technology in the Iron and Steel Industry [J]. Sichuan Environment, 2014, 33(1): 137-139.
- [9] Rada E C, Ragazzi M, Panaitescu V, etc. The role of bio-mechanical treatments of waste in the dioxin emission inventories [J]. Chemosphere, 2006, 62(3): 404-410.
- [10] 徐培佩, 张一新, 张婷. 二噁英的危害及其防治措施 [J]. 广东化工, 2017, 44(13): 149-150.
- XU P P, ZHANG Y Y, ZHANG T. The harm of dioxin and its prevention measures [J]. Guangdong Chemical Industry, 2017, 44(13): 149-150.
- [11] Ka W Y, Ma H W, Chang-Chien, GP. Evaluation of incremental population and individual carcinogenic risks of PCDD/Fs from steel and iron industry in Taiwan by a site-specific health risk assessment method [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2011, 11(6): 716-731.
- [12] 李曼, 田志仁. 铁矿石烧结过程中二噁英的防治对策 [J]. 环境监控与预警, 2017, 9(6): 71-73.
- LI M, TIAN Z Ret al. Countermeasures for the prevention and control of dioxins in the process of iron ore sintering [J]. Environmental monitoring and early warning, 2017, 9(6): 71-73.
- [13] 杨红博, 李咸伟, 余勇梅, 等. 热风烧结过程对二噁英生成的影响研究 [J]. 烧结球团, 2011, 36(1): 47.
- YANG H B, LI X W, YU Y M, et al. Study on the influence of hot air sintering process on the formation of dioxins [J]. Sintering and Pelletizing, 2011, 36(1): 47.
- [14] 董军涛. 烧结半干法脱硫技术的应用 [J]. 河南冶金, 2018, 26(5): 34-36.
- DONG J T. Application of Sintering Semi-dry Desulfurization Technology [J]. Henan Metallurgy, 2018, 26(5): 34-36.
- [15] 江立振, 胡明意, 等. 石灰-石膏湿法烧结脱硫问题治理 [J]. 河南冶金, 2018, 26(5): 26-28.
- JIANG L Z, HU M Y, et al. Treatment of Desulfurization by Lime-Gypsum Wet Sintering [J]. Henan Metallurgy, 2018, 26(5): 26-28.
- [16] 薛建明, 王小明, 刘建民, 等. 湿法烟气脱硫设计及设备选型手册 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- XUE J M, WANG X M, LIU J M, et al. Manual for wet flue gas desulfurization design and equipment selection [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2011.
- [17] 王芳. 石灰石-石膏湿法在烧结行业应用现状及分析 [J]. 资源节约与环保, 2018(1): 4-6.
- WANG F. The application status and analysis of limestone-gypsum wet method in sintering industry [J]. Resource conservation and environmental protection, 2018(1): 4-6.
- [18] Paul Maina, Makame Mbarawa. Investigating effects of zeolites as an agent to improve limestone reactivity toward flue gas desulfurization [J]. Energy & Fuels, 2011, 25: 2028-2038.
- [19] 刘宪. 石灰石-石膏法在湘钢烧结烟气脱硫工程的应用 [J]. 工业安全与环保, 2010, 36(11): 23-25.
- LIU X. Application of limestone-gypsum method in Xiangtan Steel's sintering flue gas desulfurization project [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2010, 36(11): 23-25.
- [20] 闫现芳. 旋转喷雾半干法脱硫在湘钢 105 m² 烧结机的应用 [J]. 山西建筑, 2018, 44(5): 195-197.
- YAN X F. Application of rotary spray semi-dry desulfurization in 105 m² sintering machine of Xiangtan Iron and Steel Co., Ltd. [J]. Shanxi Construction, 2018, 44(5): 195-197.
- [21] 李凤民, 王涛, 等. 邯钢 2[#] 400 m² 烧结机应用 SDA 脱硫工艺技术改进与优化的实践 [J]. 烧结球团, 2017, 42(3): 30-35.
- LI F M, WANG T, et al. Practice of improvement and optimization of SDA desulfurization process technology applied to Hangang 2[#] 400 m² sintering machine [J]. Sintering and Pelletizing, 2017, 42(3): 30-35.
- [22] 王荣成, 胡志刚. 烧结烟气氨法脱硫技术特点及应用 [J]. 浙江冶金, 2010 (4): 7-10.
- WANG R C, HU Z G. Characteristics and application of ammonia desulfurization technology for sintering flue gas [J]. Zhejiang Metallurgy, 2010 (4): 7-10.
- [23] 罗海兵, 李啸. 烧结烟气氨法脱硫技术介绍与分析 [J]. 化工装备技术, 2011, 32 (6): 25-27+41.
- LUO H B, LI X. Introduction and analysis of sintering flue gas ammonia desulfurization technology [J]. Chemical Equipment Technology, 2011, 32(6): 25-27+41.
- [24] 王宾. 烧结机氨法脱硫的应用 [J]. 科技风, 2014 (22): 81.

- WANG B. Application of Ammonia Desulfurization in Sintering Machine[J]. Technology Wind,2014 (22): 81.
- [25] 胡松. 烧结氨法脱硫研究进展与工程实践 [J]. 中国水运,2013,13 (6): 132-133.
- HU S. Research progress and engineering practice of sintering ammonia desulfurization[J]. China Water Transport,2013,13 (6): 132-133.
- [26] 郭婷, 李建军. 烧结烟气特点及脱硝技术研究 [J]. 四川化工,2018,21(6): 47-49.
- GUO T, LI J J. Sintering flue gas characteristics and research on denitrification technology[J]. Sichuan Chemical Industry,2018,21(6): 47-49.
- [27] 魏淑娟, 王爽, 周然. 我国烧结烟气脱硫现状及脱硝技术研究 [J]. 环境工程,2014,32(2): 95-97.
- WEI S J, WANG S, ZHOU R. Current Situation of Sintering Flue Gas Desulfurization in my country and Research on Denitrification Technology[J]. Environmental Engineering,2014,32(2): 95-97.
- [28] Yuanzhou Xi, Nathan A, Ottinger, Z, Gerald Liu. New insights into sulfur poisoning on a vanadia SCR catalyst under simulated diesel engine operating condition[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2014, 160-161:1-9.
- [29] 周立荣, 高春波, 杨石波. 钢铁厂烧结烟气 SCR 脱硝技术应用探讨 [J]. 中国环保产业,2014 (6): 33-36.
- ZHOU L R, GAO C B, YANG S B. Discussion on the application of SCR denitrification technology for sintering flue gas in steel plants[J]. China Environmental Protection Industry,2014 (6): 33-36.
- [30] 居殿春. 低温 SCR 脱硝催化剂的研究 [J]. 现代化工,2019,39(3): 51-54.
- JU D C. Research on Low Temperature SCR Denitration Catalyst[J]. Modern Chemical Industry,2019,39(3): 51-54.
- [31] 刘铭辉, 刘涛, 肖成磊. 低温选择性催化还原 (SCR) 脱硝催化剂的研究进展 [J]. 世界有色金属,2018 (21): 170-174.
- LIU M H, LIU T, XIAO C L. Research progress in low temperature selective catalytic reduction (SCR) denitration catalysts[J]. World Nonferrous Metals,2018 (21): 170-174.
- [32] 严长俊, 崔士龙. 低温 SCR 脱硝催化剂的研究进展 [J]. 中国环保产业,2018 (1): 28-30+34.
- YAN C J, CUI S L. Research progress of low temperature SCR denitration catalyst[J]. China Environmental Protection Industry,2018 (1): 28-30, 34.
- [33] 陈九玉. Co 改性 Fe₂O₃/AC 催化剂低温 SCR 脱硝性能 [J]. 有色金属工程,2017,7 (2): 99-102.
- CHEN J Y. Co-modified Fe₂O₃/AC catalyst low-temperature SCR denitration performance[J]. Non-ferrous Metal Engineering,2017,7 (2): 99-102.
- [34] 吴凡, 范美玲, 赵长多. 低温 SCR 脱硝催化剂研究进展 [J]. 广东化工,2018,45(7): 179-182.
- WU F, FAN M L, ZHAO C D. Research progress of low temperature SCR denitration catalyst[J]. Guangdong Chemical Industry,2018,45(7): 179-182.
- [35] 唐剑骁, 马丽萍. 微波对 Cu-ZSM-5 催化剂结构及低温 NH₃-SCR 脱硝活性的影响 [J]. 人工晶体学报,2017,46(8): 1569-1574.
- TANG J X, MA L P. Effect of Microwave on Cu-ZSM-5 Catalyst Structure and Low-temperature NH₃-SCR Denitration Activity[J]. Journal of Synthetic Crystals,2017,46(8): 1569-1574.
- [36] 王梦京, 吴素慷. 铁矿石烧结行业二噁英类形成机制与排放水平 [J]. 环境化学,2014,33(10): 1723-1732.
- WANG M J, WU S S. The formation mechanism and emission level of dioxins in iron ore sintering industry[J]. Environmental Chemistry,2014,33(10): 1723-1732.
- [37] 张玉才, 龙红明, 春铁军, 等. 原料铜和氯元素对二噁英排放的影响及抑制技术 [J]. 钢铁,2015,50(12): 42-46.
- ZHANG Y C, LONG H M, CHUN T J, et al. The influence of raw material copper and chlorine on dioxin emission and suppression technology[J]. Iron and Steel,2015,50(12): 42-46.
- [38] 李曼, 田志仁. 铁矿石烧结过程中二噁英的防治对策 [J]. 环境监测与预警,2017,9(6): 71-73.
- LI M, TIAN Z R. Countermeasures for the prevention and control of dioxins in the process of iron ore sintering[J]. Environmental monitoring and early warning,2017,9(6): 71-73.
- [39] Yu-Cheng Chen, Yu-Chieh Kuo, Mei-Ru Chen, etc. Reducing polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans (PCDD/F) emissions from a real-scale iron ore sinter plant by adjusting its sinter raw mix[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112 : 1184-1189.
- [40] Nakano Masanori, Kawachi Shiji, Morii Kazuyuki. Factors accelerating dioxin emission from iron ore sintering machines [J]. ISIJ International, 2009, 49(5):729.
- [41] Kai Hsien Chi, Shu Hao Chang, Chia Hua Huang, etc. Partitioning and removal of dioxin-like congeners in flus gases treated with activated carbon adsorption[J]. Chemosphere,2006,64:1489-1498.
- [42] 贾建廷. 钢铁生产二噁英减排技术探讨 [J]. 山西化工,2018,38(2): 179-181.

- JIA J T. Discussion on Dioxin Emission Reduction Technology in Iron and Steel Production[J]. Shanxi Chemical Industry,2018,38(2): 179-181.
- [43] Yu Y M,Zheng M H,Li X W,et al. Operating condition influences on PCDD/Fs emissions from sinter Pottests with hot flue gas recycling [J] . Journal of Environmental Sciences,2012, 24(5): 875.
- [44] 李咸伟,凌勇,喻波,等. 烧结废气循环与深度净化技术的研发与应用 [C]. 2014年全国冶金能源环保生产技术会, 2014.
- LI X W, LIN Y, YU B, et al.Development and application of sintering waste gas circulation and deep purification technology[C]. 2014 National Metallurgical Energy Environmental Protection Production Technology Conference, 2014.
- [45] Ismo H,Kari T,Juhanir. Formation of aromatic chlorinated compounds catalyzed by copper and iron[J]. Chemosphere,1997,34(12): 2649-2662.
- [46] 龙红明,吴雪健. 烧结过程二噁英的生成机理与减排途径 [J]. 烧结球团,2016,41(3): 46-51.
- LONG H M, WU X J.The formation mechanism of dioxins in sintering process and the ways to reduce emissions[J].Sintering and Pelletizing,2016,41(3): 46-51.
- [47] LONG H M, LI J X, WANG P. Influence of dioxin reduction on chemical composition of sintering exhaust gas with adding urea[J]. Journal of Central South University,2012,19(5): 1359-1363.
- [48] 杨波. 活性炭在太钢450烧结烟气脱硫脱硝工程中的应用及展望 [J]. 科学之友,2011,9-10.
- YANG B.Application and prospect of activated carbon in TISCO 450 sintering flue gas desulfurization and denitrification project[J]. Friends of Science,2011,9-10.
- [49] 里俊杰,魏进超,刘昌齐. 活性炭法多污染物控制技术的工业应用 [J]. 烧结球团,2017(3): 79-85.
- LI J J, WEI J C, LIU C Q. Industrial application of multi-pollutant control technology by activated carbon method[J]. Sintering and Pelletizing,2017(3): 79-85.
- [50] 杨雅娟,杨景玲. 烧结烟气活性炭吸附脱硫脱硝技术应用现状 [J]. 环境工程,2018,36: 546-550.
- YANG Y J, YANG J L.Application status of sintering flue gas activated carbon adsorption desulfurization and denitrification technology[J]. Environmental Engineering,2018,36: 546-550.
- [51] 李凤民. 邯钢烧结烟气活性炭法脱硫脱硝技术应用实践 [C].2017京津冀及周边地区钢铁行业废气排放深度治理和利用技术交流会议论文集,18-21.
- LI F M. Handan Iron and Steel sintering flue gas activated carbon method desulfurization and denitrification technology application practice[C]. 2017 Beijing-Tianjin-Hebei and surrounding areas of the iron and steel industry exhaust emission control and utilization technology exchange conference proceedings,18-21.
- [52] Kazuhiko Tsuji,Shiraishi I. Combined desulfurization, denitrification and reduction of air toxics using activated coke. 1. Activity of activated coke[J]. Fuel,1997(6): 549-553.
- [53] 周益辉,曾毅夫. 钢铁行业烧结烟气脱硫脱硝联合治理技术 [J]. 中国环保产业,2013,(12): 38-40.
- ZHOU Y H, ZENG Y F. Combined treatment technology for sintering flue gas desulfurization and denitrification in iron and steel industry[J]. China Environmental Protection Industry,2013,(12): 38-40.
- [54] 胡国生. 攀钢烧结烟气脱硫技术研究 [J]. 工业安全与环保,2002,28(8): 7-10.
- HU G S.Panzhihua Iron and Steel Sintering Flue Gas Desulfurization Technology Research[J]. Industrial Safety and Environmental Protection,2002,28(8): 7-10.
- [55] 张璞,王瑋. 烧结烟气污染物治理技术现状 [J]. 世界金属导报,2017(B12): 1.
- ZHANG P, WANG H. Current status of sintering flue gas pollutants treatment technology[J]. World Metal Guide,2017(B12): 1.
- [56] 龙红明,张向阳,李家新,等. 铁矿烧结过程SO₂的排放特性及过程脱硫的可行性研究 [J]. 过程工程学报,2015(2): 230-235.
- LONG H M, ZHANG X Y, LI J X,et al.SO₂ emission characteristics in iron ore sintering process and feasibility study of process desulfurization[J]. The Chinese Journal of Process Engineering,2015(2): 230-235.
- [57] 苏玉栋. 烧结主要工艺参数对烟气中NO_x排放的影响研究 [D]. 上海:上海交通大学,2014.
- SU Y D. Research on the influence of main sintering process parameters on NO_x emissions in flue gas[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University,2014.

Current Status and Prospects of Emission Reduction Technology for Gaseous Pollutants in Sintering Flue Gas

Yang Guang¹, Zhang Shuhui¹, Yang Yanshuang²

(1. School of Metallurgy and Energy, North China University of Technology, Tangshan, Hebei, China; 2. School of Management, North China University of Technology, Tangshan, Hebei, China)

Abstract: The sintering process, an important section of the blast furnace ironmaking process, is also one of the most prominent sections of environmental pollution in the steel production process. A large amount of gaseous pollutants, such as SO₂, NO_x and dioxin, which were generated during the sintering process could seriously threaten the human beings and the environment. Based on the current environmental protection treatment of sintering process, this paper focuses on analyzing the causes of gaseous pollutants (SO₂, NO_x and dioxin) in sintering flue gas. The technique principles and methods to be commonly used to remove the above pollutants are reviewed in combination with engineering examples. And the technologies for removing pollutants from the sintering flue gas have been prospected. It is pointed out that the reasonable utilization of desulfurization gypsum should be developed. The comprehensive treatment technology of SO₂, NO_x and dioxin in sintering flue gas and the improvement of adsorption capacity of activated carbon or activated coke should be explored further. The control of sintering sources and processes should be strengthened, and combining the existing terminal treatment to achieve ultra-low emission of sintering flue gas is the direction of future efforts to reduce gaseous pollutants in sintering flue gas.

Keywords: Sintering flue gas; Emission reduction technology; Sulfur dioxide; Nitrogen oxides; Dioxin; Desulfurization and denitrification

////////////////////////////////////
(上接 76 页)

The Application of Different Experimental Design Method in the Flotation Optimization Experiments of High Ash Coal Slime

Xie Caixiu, Zhang Yongju, Long Tao, Chen Peng, Shi Kaiyi, Wang Chengyong

(School of Chemistry and Materials Engineering, Liupanshui Normal University, Liupanshui, Guizhou, China)

Abstract: The empirical design, multi factor design and orthogonal design were used to optimize flotation condition of high ash coal slime flotation in guizhou. It shows that the minimum ash content of flotation clean coal was 12.42% and the yield was 19.92% in the uniform experiment; the optimal flotation conditions are as follows: the amount of collector was 60 g/t, the amount of foaming agent was 80 g/t, the rotor speed was 1800 r/min, the concentration was 60 g/L, the yield of flotation clean coal was 24.62%, the ash content was 11.57%, the yield of flotation tail coal was 75.38%, the ash content was 61.68%, and the optimum flotation conditions were 90 g/t of foaming agent, 60 g/T of collector, 80 g/L of concentration, 2000 r/min of rotation speed, 26.36% of flotation clean coal, 12.46% of ash, 73.64% of flotation tail coal yield and 63.82% of ash in the orthogonal experiment. The optimum conditions of coal slime flotation were obtained by multi factor experiment and orthogonal experiment.

Keywords: High ash coal slime; Flotation; Empirical design; Multi factor design; Orthogonal design