微波辐照活性炭对烧结烟气硫硝脱除的研究进展

孟令一，石 焱，胡长庆，王健雄
（华北理工大学 a. 冶金与能源学院；b. 河北省现代冶金技术重点实验室，河北 唐山 063210）

摘要：微波辐照活性炭脱硫脱硝技术能高效脱除烧结烟气中的 SO_2 和 NO_x。该技术在实验阶段 SO_2 和 NO_x 的脱除率可达到 95% 以上，且具备占地面积小、工艺流程少、节能环保的理想效果，在工业烟气处理中具有巨大的发展潜力。基于微波在烧结烟气中的传播加热特性及活性炭的良好吸附性，二者协同促进催化还原反应发生，组成一套高效的烧结烟气处理工艺。本文将微波辐照活性炭烟气硫硝脱除技术与传统烧结烟气处理技术进行对比，总结该工艺的优势和国内外现有研究成果，深入研究该工艺的技术细节和反应机理，找到该工艺在能源消耗、副产物处理、污染协同处理和研发成本中存在的现有不足，深入剖析该工艺应用于实践领域存在的弊端和制约因素，展望其未来发展方向，为下一步研究指明道路。

关键词：微波；活性炭；烧结烟气；脱硫；脱硝
中图分类号：TF046.4；X701.3 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2024)06－0068－10
doi：10.13403/j.sjqt.2024.06.092

Research progress on desulfurization and denitrification of sintering gas by utilizing microwave to irradiate activated carbon

MENG Lingyi, SHI Yan, HU Changqing, WANG Jianxiong
(North China University of Science and Technology a. School of Metallurgy and Energy; b. Key Laboratory of Modern Metallurgical Technology of Hebei Province, Tangshan 063210, Hebei, China)

Abstract: Desulfurization and denitrification technology utilizing microwave to irradiate activated carbon can efficiently remove SO_2 and NO_x from sintering gas. The removal rate of SO_2 and NO_x can reach more than 95% in the experimental stage, and it has the ideal effect of small footprint, less process flow, energy saving and environmental protection, and has great development potential in industrial gas treatment. Based on the propagation and heating characteristics of microwave in the sintering gas and the good adsorption of activated carbon, the two synergistically promote the catalytic reduction reaction to form a set of efficient sintering gas treatment process. Desulfurization and denitrification technology utilizing microwave to irradiate activated carbon is compared with the traditional sintering gas treatment technology, the advantages of this process and existing research results at home and abroad are summarized, the technical details and reaction mechanism of this process are deeply studied, the current shortcomings of this process in energy consumption, by-product treatment, pollution coordination treatment and R&D costs are found out, the drawbacks and restrictive factors of this process in practical applications are deeply analyzed, its future development direction is prospected, and the way for the next step of research is shown clearly.

Key words: microwave; activated carbon; sintering gas; desulfurization; denitrification

收稿日期：2024－09－26；**修回日期**：2024－10－27
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52174312)；河北省自然科学基金－高端钢铁冶金联合基金资助项目(E2021209151)
作者简介：孟令一(1986—)，男，博士研究生，从事冶金环保、冶金节能、冶金资源综合利用等方面的研究。
通信作者：石 焱(1980—)，女，教授，从事冶金环保、冶金节能、冶金资源综合利用等方面的研究。

烧结烟气是钢铁冶炼过程中产生的一种工业废气。生产 1 t 烧结矿大约产生 4 000 ~ 6 000 m^3 烟气[1]。烧结烟气具有粉尘浓度高，状态不稳定，温度浮动大，含尘、含湿、含氧量大和成分复杂等特点[2-4]。其主要含有破坏臭氧层，导致酸雨和温室效应，损害人体呼吸、消化、心血管、免疫系统和致癌的 SO_2、NO_x 等气态污染物。国内钢铁企业烧结烟气中 SO_2 排放质量浓度为 300 ~ 800 mg/Nm^3，最高可达到 2 000 ~ 4 000 mg/Nm^3 范围；NO_x 质量浓度为 0.15 ~ 0.30 g/Nm^3，最高可达0.5 ~ 0.6 g/Nm^3 范围[5]。2022 年全国钢铁工业 SO_2 排放量为 24.31 万吨，占工业总排放量的 13%；NO_x 排放量为 46.60 万吨，占工业总排放量的 14%。综上所述，烧结烟气与普通烟气存在一定差异。活性炭烟气净化技术因能适应烧结烟气所呈现出的特性且能同时脱除多种污染物，已成为烧结烟气处理的一种重要选择。

现有烧结烟气各项硫硝脱除技术优点各异，缺点却也同样突出，集中表现为投入运营成本相对较高，硫硝脱除效果难以同时达到理想状态，易产生副产物造成二次污染等[6-10]。其中，SO_2 脱除主要采用湿法和半干法，NO_x 脱除主要采用选择性还原法，即 SCR(selective catalytic reduction)脱硝技术[11-12]。在应用领域，烧结烟气硫硝协同治理技术主要包括：① 半干法脱硫 + SCR 脱硝技术(其中包括 CFB、SDA 半干法)[13-15]。该技术可高效脱除烧结烟气中的 SO_2 和 NO_x，但技术繁琐，设备复杂，成本较高。② 湿法脱硫装置 + 湿式电除尘器 + SCR 脱硝装置。该技术硫硝脱除率高，且可协同脱除烟气中的二噁英，但在湿态环境中运行，设备的防腐难度大，维护成本高，废水难处理。③ 臭氧氧化硫硝协同吸收技术。该技术能够达到烟气脱硫、脱硝、除尘协同治理，二噁英脱除率也可达 90% 以上，但该技术尚不能满足大烟气量脱除要求[16]。④ 活性炭(焦)硫硝一体化脱除技术。该技术可脱除烟气中的多种污染物，其中 SO_2、SO_3 脱除率可达 98%，NO_x 脱除率也在 80% 以上，粉尘排放质量浓度可限制在 10 mg/Nm^3 以内，无二次污染，副产品可回收利用[17-18]。

活性炭具有良好的吸波性和吸附性。在微波作用下，活性炭迅速升温，骨架收缩，比表面积减小，孔容、孔径增大，含氧量降低，碱性官能团增加，这些变化使得活性炭的吸附容量和速率得到显著提升[19-20]。此外，微波辐照时，活性炭热效应和非热效应的协同作用能够提升催化脱除效率。马双忱等[21-22]用微波辐照活性炭进行硫硝脱除试验，结果表明：吸附于活性炭孔隙之中的 SO_2 和 NO_x，在微波热效应作用下，分别被还原为硫单质和氮气，这两类污染物在 470 ℃温度下的脱除率可达 96%。刘金鑫等[23]研究发现，微波的非热效应可以激发物质内部分子的高频率振动和摩擦，使电子发生能级跃迁，分子电荷发生畸变。微波和活性炭结合了对于 SO_2 和 NO_x 脱除的全部优点，形成一整套脱除率高、占地空间小、副产物可回收的烟气净化系统。该系统可以脱除烧结烟气中 SO_2 和 NO_x，具有广阔的市场前景和深远的研究价值。为此，本文从分析微波的特性及其对烟气硫硝脱除的影响入手，总结二者协同作用下烟气硫硝脱除的反应特性和反应机理，并对其未来研究的发展方向提出展望。

1　微波的特性及其对烟气硫硝脱除的影响

微波是频率为 0.3 ~ 300 GHz 的电磁波，位于红外线和无线电波频率之间[24]，波长为 0.001 ~ 1 m。微波能与分子或分子中的个别原子团相互作用，也能与物质中结合力弱的或“自由的”电荷载体相互作用[25]。由于微波在烧结烟气中的独特传播特性，其可作为加热源在烧结烟气硫硝脱除中发挥“热效应”与“非热效应”。因此，微波辐照活性炭能高效率脱除烧结烟气中的 SO_2 和 NO_x。

1.1　微波在烧结烟气处理中的特性

1.1.1　传播特性

微波的传播特性受频率和波长影响。由于微波的波长较短，其在介质中的传播与其电磁特性密切相关。首先，直线传播的微波可精确聚焦目标区域，在传输过程中具有较高的方向性和较低的能量损耗。微波辐照可实现精准的能量传递，并提高处理效率和能源利用率。其次，作为电磁波，微波具有高效的吸收和穿透能力，可促进物质内部水分蒸发和污染物分解。再次，利用反射

和折射特性微波可控制传播路径，实现对不同污染物的有效处理。如微波烘焙白肋烟和膨胀梗丝等应用，体现了其高效、精准和可控性。微波在烧结烟气处理中的传播特性如表1所示。

表1 微波在烧结烟气处理中的传播特性

Table 1 Propagation characteristics of microwave in treatment of sintering flue gas

直线传播	反射折射	吸收穿透
自由空间传播,路径几乎为直线,能量传递精准	根据斯涅尔定律,可控制传播路径	迅速加热并蒸发物质内部水分,深入废气内部加热分解

1.1.2 加热特性

微波辐照作为一种新型加热方法，广泛应用于污染物处理、有机合成、高分子合成以及材料科学和纳米技术等领域[26]。微波处理烧结烟气技术具有即时性、均匀性、环保性、可控性、选择性等特性[27-28]。微波与物质的作用可分为3种方式：物质反射微波、透射微波和吸收微波。微波选择性加热极性物质，引起反应体系迅速升温形成热点，加速了反应的进行[29]。

1.1.3 等离子生成特性

微波在烧结烟气处理中的等离子生成特性十分显著。微波等离子体的无电极与大体积设计优点，使得处理室与发生室能灵活组合，可适应不同规模的烧结烟气处理需求。其宽气压确保了设备在不同气压条件下都能稳定运行，适应性增强。此外，微波等离子体还具有高效的分解与去除能力，通过高水解和溶解水平，可有效去除烧结烟气中的有害物质。此外，微波等离子体在气相色谱堆积中表现出优势，确保了设备的稳定运行。特别是在高气压条件下，微波等离子体依然能保持稳定，进一步拓宽了应用范围。同时，其生成过程清洁无污染，安全性高，运行稳定易控，且低噪音环境为工作人员提供了舒适的操作体验。

1.1.4 化学反应特性

微波高频振荡能够有效激发分子和原子的能级跃迁，进而促进化学反应的进行。此外，微波加热技术能够显著加速反应速率，提高反应的整体效率。在烧结烟气处理领域，微波技术的应用显著缩短了处理时间，并有效提升了处理效果。通过微波的选择性加热和激发作用，污染物可被针对性处理，从而增强反应的选择性，并提高产物的纯度。在处理复杂烧结烟气时，微波技术展现出了其独特的优势。此外，微波技术还能够提升催化剂的活性和选择性，进而促进烧结烟气催化反应的进行。

1.2 微波对烧结烟气硫硝脱除的影响

由于微波与烧结烟气中的 SO_2 和 NO_x 很难直接发生有效的物理化学反应，要达到 SO_2 和 NO_x 理想脱除效果，必须在脱除系统中增加相应的媒介、吸附剂或催化剂。唐军旺等[30]以石英棉为放电介质，设计了多管微波放电反应器，利用常压连续微波稳定放电技术分解 NO_x。试验结果表明，该技术可以有效脱除 NO_x，在无氧条件下，可使90%的 NO_x 转化为 N_2，无二次污染和电极烧蚀等现象。但此技术必须在无氧条件下进行，不符合烧结烟气的特点，且对 SO_2 无脱除效果。WEI等[31-33]在微波作用下以高锰酸钾($KMnO_4$)为氧化剂对烧结烟气进行硫硝脱除试验。结果表明：当微波功率为256 W时，烧结烟气中硫硝脱除率分别为94%和97%以上，但高锰酸钾售价较高，且其具有高腐蚀和高毒性等危害；以碳酸氢铵(NH_4HCO_3)为还原剂，采用微波诱导 Fe/Ca-5A 分子筛对烧结烟气中硫硝进行还原脱除，当微波功率为280 W时，烧结烟气中的硫硝脱除率分别为92.3%和94.8%；同样以碳酸氢铵为还原剂，采用微波诱导 FeCu/5A 分子筛对烧结烟气中硫硝进行还原脱除，当微波功率280 W时，烧结烟气中硫硝脱除率分别为93.4%和95.8%。但此项技术的催化剂成本同样较高，且在反应过程中易发生氨气逃逸现象，造成二次污染。

朱政等[34]在相同试验环境不同微波功率下对3种褐煤半焦(HM800、HM750、HM700)以及微波炼制焦炭、普通焦炭和活性炭等碳基材料的脱硝性能进行了对比。结果表明，活性炭的脱硝率明显高于褐煤半焦和焦炭。其主要原因是，相比较褐煤半焦和焦炭，活性炭拥有更强的吸波性；此外，由于活性炭拥有较大的比表面积和发达的孔隙，利用微波辐照技术对烧结烟气进行硫硝脱除的研究多选用活性炭作为吸收剂。然而，在实际研究中发现，活性炭的脱硫能力很强，脱硝能

力却明显不足，其主要原因：活性炭表面的碱性官能团不充足及灰分较高，造成反应过程中 SO_2 先于 NO_x 与活性炭发生反应，形成竞争吸附。因此围绕如何提高微波辐照活性炭的硫硝协同脱除效率，学者们展开了一系列研究。

2　活性炭烧结烟气硫硝脱除技术

2.1　工艺技术

在生产实践环节中活性炭烟气净化技术主要以错流式和逆流式两种为代表。逆流式活性炭烟气净化技术以系统结构简单、活性炭损耗低、硫硝脱除效率高且各子系统相互独立、污染物脱除效率稳定、易实现超低排放成为当今烧结烟气硫硝脱除的一种主流技术[35]。如图 1 所示，逆流式活性炭烟气净化技术吸附塔采用上下重叠的模块式设计，上层为脱硝段，下层为脱硫段，顶层为储料仓。活性炭自上向下，依靠重力缓慢移动；烟气自下而上，与活性炭形成逆流接触[36]。此流动方式极大提高了活性炭与烟气的接触效率，从而增强了硫硝脱除的效果。此外，这种设计还有利于活性炭的均匀磨损和更换，保证了系统的长期稳定运行。

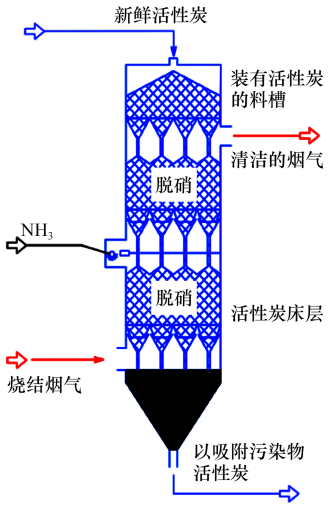


图 1　逆流式活性炭烟气净化技术吸附塔结构示意

Fig. 1　Structure diagram of adsorption tower of countercurrent activated carbon flue gas purification technology

2.2　反应机理

在与活性炭接触过程中，烟气中的 SO_2、NO_x 等污染物被吸附。吸附态的 SO_2 在氧气和水蒸气并存的条件下被氧化为 H_2SO_4，储存在活性炭的空隙内。氨气（NH_3）在吸附塔脱硫与脱硝模块的中间位置被喷入，其在活性炭的吸附、催化作用下与 NO_x（NO、NO_2）发生选择性催化还原反应生成 N_2 与 H_2O。逆流式活性炭烟气净化技术各环节主要反应方程式如下。

（1）吸附反应：

$$SO_2 + 1/2O_2 + H_2O = H_2SO_4 \quad (1)$$

$$SO_3 + H_2O = H_2SO_4 \quad (2)$$

$$H_2SO_4 + 2NH_3 = (NH_4)_2SO_4 \quad (3)$$

（2）解吸反应：

$$2H_2SO_4 + C = 2SO_2 + CO_2 + 2H_2O \quad (4)$$

$$3(NH_4)_2SO_4 = 4NH_3 + 3SO_2 + N_2 + 6H_2O \quad (5)$$

（3）还原反应：

$$NO + NH_3 + 1/2O^* = N_2 + 3/2H_2O \quad (6)$$

$$2NO_2 + 4NH_3 + O_2 = 3N_2 + 6H_2O \quad (7)$$

相比其他烧结烟气硫硝脱除技术，活性炭烟气净化技术有着多污染物协同高效脱除、占地小、成本低、副产物可回收、无二次污染等诸多优势。但其问题也同样突出，如挥发分相对较低，脱硝效果不理想；吸附脱硫过程中再生频繁；脱硫速率较低，硫容量相对较小；在系统运转过程中活性炭再生速率较慢，损耗相对较大等。

3　微波辐照活性炭烧结烟气硫硝脱除技术

3.1　工艺技术

在已有活性炭烟气处理技术基础上，学术界对微波辐照活性炭烧结烟气硫硝脱除技术开展了广泛研究。根据逆流式活性炭烧结烟气净化技术，设计试验评价系统如图 2 所示。该系统通过混气和加湿装置模拟真实环境中的烧结烟气，采用流量计监测气体流速，将活性炭置于微波管式炉内的石英管反应器中，在一定时间和温度下采用微波加热研究改善硫硝脱除效率和活性炭质量损耗率的途径。赵莹[37]称取 30 g 粒径为 4 mm 的活性炭进行试验，分别探究不同加热时间和温度下活性炭的质量损耗率。结果表明，在相同条件下加热温度为 300 ~ 500 ℃时活性炭质量损耗率最低，约为 7%。而随着加热时间的延长，活性炭的质量损耗率随之升高，当加热时间为 12 ~ 15 min 时活

性炭的质量损耗率趋于平稳，维持在 9.6% 左右。郝克[38]进行了相同条件下温度对改性活性炭硫硝脱除效率的影响试验，结果表明，当加热温度为 300 ~ 450 ℃时，SO_2、NO_x 的脱除率分别可达到 100% 和 84.5%。

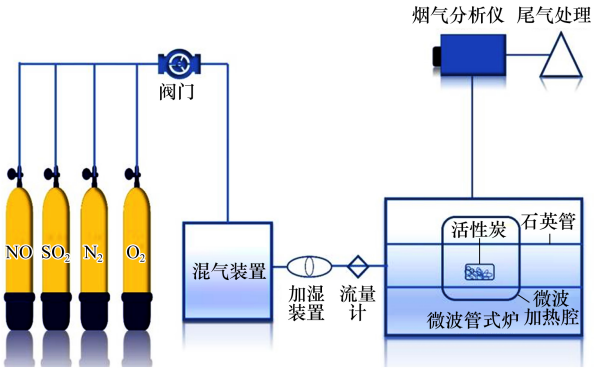


图 2 微波辐照活性炭硫硝脱除试验系统

Fig. 2 Test system of microwave irradiation activated carbon on the removal of SO_2 and NO_x

较低活性炭质量损耗率和高硫硝脱除率，使得该系统在建设和运营成本上也具备一定优势。通过调研，以河钢唐钢新区 1 号 360 m^2 烧结机为例，其烟气净化系统中吸附装置的建设成本大约为 500 万元，运营成本约为 22 元/t。而依据机组规模和当前微波管的实际市场售价，建设和运营一台同级别的微波辐照活性炭硫硝吸附装置的成本要低于已有系统的建设和运营成本[39]。

3.2 反应机理

活性炭的两种特性使之具有良好的微波吸收性。首先，活性炭中的阴离子和阳离子作为荷电载体，其在高速转动的微波(即电磁波)作用下旋转和碰撞，产生热量；其次，活性炭中的分子或原子表现出偶极子(即相距很近但符号相反的一对电荷或磁荷)运动的特性(运动特性：用电偶极矩和磁偶极矩表示)[40]。在处于非极性状态的活性炭平铺结构中，分布不均或出现断裂的电荷与微波发生局域电磁共振耦合传能，形成局部的活性点位，促进硫硝脱除反应进行。微波辐照活性炭硫硝脱除，不需要将活性炭加热到较高温度便可使 SO_2 和 NO_x 得到还原，并且在活性炭上形成了较高的温度梯度。从活性炭中心向表面，温度逐渐降低，从而使烟气中还原产物迅速扩散出来[41]，如图 3 所示。

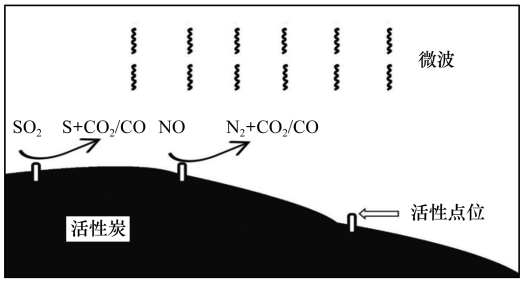


图 3 微波辐照活性炭硫硝脱除机理示意

Fig. 3 Schematic diagram of SO_2 and NO_x removal mechanism of microwave irradiation activated carbon

微波辐照活性炭硫硝脱除反应中，活性炭既是 SO_2 和 NO_x 吸附剂，也是还原剂，所发生的主要氧化还原反应[42]：

$$xC + 2NO_x \rightarrow N_2 + xCO_2 \quad (8)$$

$$xC + NO_x \rightarrow 1/2N_2 + xCO \quad (9)$$

$$C + SO_2 \rightarrow S + CO_2 \quad (10)$$

$$2C + SO_2 \rightarrow S + 2CO \quad (11)$$

在整个反应过程中，反应(8)和(10)为放热反应，在较低温度下即可进行；反应(9)和(11)为吸热反应，在常规加热方式下，需要较高温度才可以进行。微波辐照活性炭还原反应不需要将活性炭加热到常规反应温度，就可以使 SO_2 和 NO_x 得到还原，实现较高的硫硝脱除效率。

国内外学术界对微波辐照活性炭脱除烧结烟气中 SO_2 和 NO_x 的催化反应机理进行了大量研究。MA 等[43-44]利用微波辐照活性炭进行硫硝脱除试验研究。结果表明，微波通过热效应和选择性催化反应能有效去除气态污染物中的 SO_2 和 NO_x，且不同催化剂对微波功率的要求各不相同。在整个反应过程中，被活性炭吸附后 SO_2 和 NO_x 在微波诱导下与催化剂发生还原反应。KONG 等[45-46]对微波辐照焦炭同时脱除燃煤锅结烟气中的 SO_2 和 NO_x 进行了研究，结果表明：在微波作用下，焦炭先吸附烟气中的 SO_2 和 NO_x，并迅速还原成为硫和 N_2；吸附 NO_x 的区域聚集了比其他区域更多的微波能量，形成“局部热点”，加速 NO_x 还原。马双忱等[47]利用微波的诱导催化作用研究了活性炭法同时脱除模拟烟气中硫硝的方法和反应动力学，得到该过程由慢速反应和快速反应两阶段组成，并获得常规条件和低于常规条件两种状

态下 SO_2 和 NO_x 的还原反应活化能。刘建爽等[48]在不同微波辐照条件处理活性炭，探究微波辐照对活性炭吸附及脱硫效果的影响。结果表明，在微波辐照条件下，活性炭具有吸附与催化的双重作用，且温度越高，脱硫效果越明显，当温度到达 700 ℃时，脱硫率达到了 95%。XU 等[49]利用微波辐照负载 Mn_2O_3 的活性炭进行 NO_x 脱除试验，结果表明，Mn_2O_3 在微波辐照作用下产生活性点位，促进了活性炭与 NO_x 反应，产生了 N_2 和 CO_2。由于微波的选择吸收性，O_2 基本不与活性炭和 NO_x 发生反应，因此该反应降低了活性炭的消耗量。

3.3　技术应用前景

活性炭具有良好的吸波性，在微波辐照条件下可低能耗高效率再生，且微波技术与活性炭技术都已广泛应用于工业污染物治理的诸多领域。与工业领域已有传统技术工艺相比，微波辐照活性炭烧结烟气硫硝脱除技术的优势在于：通过对活性炭的负载金属氧化物改性，结合微波辐照，能够对烧结烟气中的 SO_2 和 NO_x 完成高效率脱除。该技术应用范围和应用前景广阔，但是，目前为止微波辐照活性炭烧结烟气硫硝脱除技术还停留在试验阶段，主要原因有以下几个方面。

（1）微波本身属于节能环保能源，但其通常采用直流电或 50 Hz 交流电通过特殊器件来获得。我国发电形式主要以火力发电为主，时至今日，电能源构成中煤电的发电量比例仍高达 70% 以上。功率大小和单位时间处理烧结烟气量的大小都是影响微波设备耗电量的主要因素。该技术的具体耗电量会因设备型号、处理条件等因素变化而产生差异，所以很难就目前试验条件下推测出投入生产后的具体耗电数值。但可以肯定的是，微波辐照活性炭烧结烟气硫硝脱除技术相比传统工艺的耗电量要高。高耗电所带来的环境和成本问题有待进一步研究。

（2）已有烧结烟气处理技术能够满足生产需要和国家排放标准，且技术成熟稳定，成本可控。新技术研发势必需要耗费大量的人力、物力和财力。企业经营以利益为中心，科技研发以服务社会创造更大的经济价值为首要目的。受惰性思维和经济利益的主导，在没有成熟稳定的技术理论支撑下科研团队或研发中心不会冒险高投入地研发新产品、新设备。

（3）学者们对微波辐照活性炭烟气治理的研究范围仅局限于 SO_2 和 NO_x 的脱除研究。虽有学者在试验过程中考虑了 CO_2、O_2 和水蒸气对脱除效果的影响，但烧结烟气成分复杂，如粉尘、重金属等有毒气体和有害物质等因素也会影响脱除效果。而微波辐照活性炭与这些物质的反应机理更为复杂，脱除效果可能差强人意，导致该技术距离实际应用领域还有一定距离。

（4）由于烧结烟气中含氧量较高，微波辐照活性炭产生的高温不仅会再次产生 CO 和 CO_2，还会由此增加活性炭损耗。微波产生的高温可能导致炭燃烧过程中产生的粉尘发生热膨胀，有引发爆炸的风险，存在一定的安全隐患。

4　结　论

（1）微波辐照活性炭烧结烟气硫硝脱除技术在试验阶段取得了理想的效果。传统加热采用的是对流和传导的方式将热能传递给被加热物体，而微波辐照采用的是辐射方式，直接将热能传递给活性炭，从而达到均匀加热的目的。微波以其特殊的热传导方式结合活性炭强大的吸附性使得烧结烟气中 SO_2 和 NO_x 的综合脱除效果优于现阶段传统烧结烟气处理技术的脱除效果。

（2）由于特殊内部结构，微波辐照活性炭会引起局部热点效应。热点效应的产生会使非热点部位的活性炭在较低温度下与 SO_2 和 NO_x 发生催化还原反应，达到高效的硫硝脱除效果。但热点效应同时会给活性炭带来较大的局部热损耗。因此，对活性炭进行改性处理从而降低其局部热损耗和提升硫硝脱除效果也是该技术实际应用的研究方向。

（3）微波辐照活性炭烧结烟气硫硝脱除技术具有高效、环保、易维护等诸多技术优势，但在多因素影响下要将该技术运用到生产实践环节还有很多未知领域有待进一步深入探索。研究人员要从多污染物协同脱除、微波设备功率匹配、实际脱除系统设计研发、运营成本控制等方面开展

研究，力争早日让该技术投入市场提升企业经济价值、造福社会。

参考文献：

[1] 兰国谦,刘建秋,张江伟. 钢铁行业烧结烟气脱硫技术现状和发展趋势[J]. 中国环保产业,2014(6):42－46.
LAN Guoqian, LIU Jianqiu, ZHANG Jiangwei. Status of sintering FGD technology and development trend[J]. China Environmental Protection Industry,2014(6):42－46.

[2] WASEQ W M. The impact of air pollution on human health and environment with mitigation measures to reduce air pollution in Kabul Afghanistan[J]. International Journal Of Health Sciences,2020,8(1):12.

[3] 竹涛,王若男,金鑫睿,等. 以废治废:铝厂固废赤泥治理工业废气二氧化硫的应用研究[J]. 有色金属工程,2019,9(7):109－114.
ZHU Tao, WANG Ruonan, JIN Xinrui, et al. Waste treatment by waste: Application research of solid waste red mud for purification of sulphur dioxide from industrial waste gas[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2019, 9(7):109－114.

[4] 邢芳芳,姜琪,张亚志,等. 钢铁工业烧结烟气多污染物协同控制技术分析[J]. 环境工程,2014,32(4):75－78.
XING Fangfang, JIANG Qi, ZHANG Yazhi, et al. The analysis of multi-pollutant collaborative control technologies of sinter flue gas in iron and steel industry [J]. Environmental Engineering,2014,32(4):75－78.

[5] 庄俊鹏. 烧结烟气脱硫脱硝处理技术探讨[J]. 冶金管理,2021(7):47－48.
ZHUANG Junpeng. Discussion on desulfurization and denitrification treatment technology of sintering flue gas [J]. China Steel Focus,2021(7):47－48.

[6] 马双忱,马京香,金鑫,等. 微波辐照活性炭床同时脱除 SO_2 和 NO_x 实验研究[J]. 工程热物理学报,2013,34(1):26－30.
MA Shuangchen, MA Jingxiang, JIN Xin, et al. Experimental study on simultaneous removal of SO_2 and NO_x using activated carbon under microwave irradiation [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(1):26－30.

[7] KWON D W, PARK K H, HONG S C. Enhancement of SCR activity and SO_2 resistance on VO_x/TiO_2 catalyst by addition of molybdenum[J]. Chemical Engineering Journal,2016,284:315－324.

[8] ZHAO Y, HAO R L, YUAN B, et al. Simultaneous removal of SO_2, NO and H_2O through an integrative process utilizing a cost-effective complex oxidant[J]. Journal of Hazardous Materials,2016,301:74－83.

[9] 李钊,赵文滔,赵毅. 催化氧化法脱除烟气污染物研究进展[J]. 现代化工,2022,42(3):26－30.
LI Zhao, ZHAO Wentao, ZHAO Yi. Research progress on removal of flue gas pollutants by catalytic oxidation method[J]. Modern Chemical Industry, 2022, 42(3): 26－30.

[10] 朱廷钰,刘青,李玉然,等. 钢铁烧结烟气多污染物的排放特征及控制技术[J]. 科技导报,2014,32(33):51－56.
ZHU Tingyu, LIU Qing, LI Yuran, et al. Emission characteristics of multiple pollutants from iron-steel sintering flue gas and review of control technologies[J]. Science & Technology Review,2014,32(33):51－56.

[11] 黄修行,谌莉,李惠,等. 活性炭纤维用于烟气脱硫脱硝的研究进展综述[J]. 红水河,2020,39(4):35－38.
HUANG Xiuxing, CHEN Li, LI Hui, et al. Research progress of activated carbon fiber in flue gas desulfurization and denitrification[J]. Hongshui River, 2020,39(4):35－38.

[12] QIN M C, DONG Y, CUI L, et al. Pilot-scale experiment and simulation optimization of dual-loop wet flue gas desulfurization spray scrubbers[J]. Chemical Engineering Research and Design,2019,148:280－290.

[13] 张晋萍,程群. CFB 与 SDA 半干法脱硫技术比较[J]. 石油和化工设备,2022,25(12):14－16.
ZHANG Jinping, CHENG Qun. Technical comparison between CFB and semidry FGD of SDA[J]. Petro & Chemical Equipment,2022,25(12):14－16.

[14] 于勇,朱廷钰,刘霄龙. 中国钢铁行业重点工序烟气超低排放技术进展[J]. 钢铁,2019,54(9):1－11.
YU Yong, ZHU Tingyu, LIU Xiaolong. Progress of ultra-low emission technology for key processes of iron and steel industry in China[J]. Iron & Steel,2019,54(9):1－11.

[15] 杨海东,刘金英. 半干法脱硫＋低温 SCR 脱硝技术的

研究与应用[J]. 矿业工程,2022,20(2):45 – 50.
YANG Haidong, LIU Jinying. Study and application of semi-dry desulfurization + low temperature SCR denitrification technology[J]. Mining Engineering,2022, 20(2):45 – 50.

[16] 钟璐,胡小吐,朱天乐,等. 烧结烟气臭氧氧化协同吸收脱硫脱硝废水的无害化处理[J]. 广东化工,2021, 48(17):116 – 117.
ZHONG Lu, HU Xiaotu, ZHU Tianle, et al. Harmless treatment of O_3 oxidation synergistic absorption desulfurization and denitrification wastewater in sintering flue gas[J]. Guangdong Chemical Industry, 2021, 48(17):116 – 117.

[17] 金呈虎,赵铁男. 活性炭脱硫脱硝一体化技术的工程应用[J]. 一重技术,2017(4):45 – 47.
JIN Chenghu,ZHAO Tienan. Integrated desulfurization & denitrification technique with activated carbon[J]. CFHI Technology,2017(4):45 – 47.

[18] 李芳盛,张杰,齐云国,等. 活性炭联合脱硫脱硝工艺[J]. 化工管理,2020(4):189 – 190.
LI Fangsheng, ZHANG Jie, QI Yunguo, et al. Activated carbon combined desulfurization and denitrification process[J]. Chemical Enterprise Management,2020(4): 189 – 190.

[19] 王雪涛,王沛迪,刘予,等. 基于微波作用下活性炭脱硫脱硝性能的研究[J]. 资源节约与环保,2015(5): 15 – 16,20.
WANG Xuetao, WANG Peidi, LIU Yu, et al. Study on desulfurization and denitrification performance of activated carbon under microwave irradiation[J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2015(5):15 – 16,20.

[20] YUEN F K, HAMEED B H. Recent developments in the preparation and regeneration of activated carbons by microwaves[J]. Advances in Colloid and Interface Science,2009,149(1/2):19 – 27.

[21] 马双忱,赵毅. 循环流化床烟气脱硫数学模型参数的确定[J]. 动力工程,2006,26(5):716 – 719;737.
MA Shuangchen, ZHAO Yi. Determination of parameters of a flue gas desulfurization's mathematical model for circulating fluidized beds[J]. Journal of Power Engineering,2006,26(5):716 – 719;737.

[22] 马双忱,赵毅,马宵颖,等. 活性炭床加微波辐射脱硫脱硝的研究[J]. 热能动力工程,2006,21(4):338 – 341;433.
MA Shuangchen,ZHAO Yi, MA Xiaoying, et al. A study of the desulfuration and denitration on active carbon beds provided with microwave irradiation[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2006, 21(4):338 – 341;433.

[23] 刘金鑫,金永龙,韩庆虹,等. 微波场中冶金固体废弃物脱硫脱硝的非热效应分析[J]. 武汉科技大学学报,2009,32(2):131 – 133.
LIU Jinxin, JIN Yonglong, HAN Qinghong, et al. Non-thermal effect of desulfurization and denitration of solid metallurgical waste in the field of microwave[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2009, 32(2):131 – 133.

[24] 王陆瑶,孟东,李璐. “热效应”或“非热效应”:微波加热反应机理探讨[J]. 化学通报,2013,76(8):698 – 703.
WANG Luyao, MENG Dong, LI Lu. Thermal or nonthermal microwave effects: The mechanism of microwave heating[J]. Chemistry, 2013, 76(8): 698 – 703.

[25] 褚志德. 微波加热原理与特性[C]//全国第十六届红外加热暨红外医学发展研讨会论文及论文摘要集. 杭州:中国光学学会红外与光电器件专业委员会,2017:320 – 323.
CHU Zhide. Principle and characteristics of microwave heating[C]//The 16th National Symposium on Infrared Heating and Infrared Medicine Development and Paper Abstracts. Hangzhou: Committee on Infrared and Optoelectronic Devices of Chinese Optical Society,2017: 320 – 323.

[26] KAPPER C O,STADLER A. 微波在有机和医药化学中的应用[M]. 麻远,译. 北京:化学工业出版社, 2007.
KAPPER C O, STADLER A. Microwaves in organic and medicinal chemistry[M]. MA Yuan, Trans. Beijing: Chemical Industry Press,2007.

[27] 王帅. 微波碳热处理烧结烟气的热点效应[D]. 唐山:华北理工大学,2021.
WANG Shuai. Hot spot effect of sintering flue gas in microwave carbon heat treatment[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology,2021.

[28] 刘志军,张璧光. 微波加热在木材干燥中的应用[J]. 世界林业研究,2005,18(3):54 – 58.

LIU Zhijun, ZHANG Biguang. Application of microwave heating in wood drying[J]. World Forestry Research, 2005, 18(3): 54 – 58.

[29] 杨娟, 胡波. 锰矿还原技术[J]. 中国锰业, 2011, 29(1): 40 – 43.
YANG Juan, HU Bo. On reduction technology of Mn-ore [J]. China's Manganese Industry, 2011, 29(1): 40 – 43.

[30] 唐军旺, 杨黄河, 任丽丽, 等. 微波放电脱除 NO[J]. 高等学校化学学报, 2002, 23(4): 632 – 635.
TANG Junwang, YANG Huanghe, REN Lili, et al. The decomposition of NO in microwave discharge[J]. Chemical Research in Chinese Universities, 2002, 23(4): 632 – 635.

[31] WEI Z S, NIU H J, JI Y F. Simultaneous removal of SO_2 and NO_x by microwave with potassium permanganate over zeolite[J]. Fuel Processing Technology, 2009, 90(2): 324 – 329.

[32] WEI Z S, ZENG G H, XIE Z R. Microwave catalytic desulfurization and denitrification simultaneously on Fe/Ca-5A zeolite catalyst[J]. Energy & Fuels, 2009, 23(6): 2947 – 2951.

[33] WEI Z S, ZENG G H, XIE Z R, et al. Microwave catalytic NO_x and SO_2 removal using FeCu/zeolite as catalyst[J]. Fuel, 2011, 90(4): 1599 – 1603.

[34] 朱政, 王光华, 李文兵, 等. 微波辐照褐煤半焦脱除低浓度 NO 的研究[J]. 工业安全与环保, 2015, 41(7): 52 – 55.
ZHU Zheng, WANG Guanghua, LI Wenbing, et al. Study on the removal of low concentration of NO by using microwave irradiation over lignite char[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2015, 41(7): 52 – 55.

[35] 崔岩, 朱繁, 董艳苹, 等. 活性炭脱硫脱硝技术在烧结烟气治理中的应用[J]. 硫酸工业, 2021(6): 44 – 48.
CUI Yan, ZHU Fan, DONG Yanping, et al. Application of activated carbon desulfurization and denitration technology in sintering flue gas treatment[J]. Sulphuric Acid Industry, 2021(6): 44 – 48.

[36] 何生明, 赵立文, 杨志功, 等. 逆流活性炭脱硫脱硝技术在烧结烟气超低排放中的应用[J]. 山西冶金, 2022, 45(2): 273 – 275.
HE Shengming, ZHAO Liwen, YANG Zhigong, et al. Application of countercurrent activated carbon desulphurization and denitrification technology in sintering flue gas ultra-low emission[J]. Shanxi Metallurgy, 2022, 45(2): 273 – 275.

[37] 赵莹. 微波法处理烧结烟气中氮硫化物实验研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2019.
ZHAO Ying. Experimental study on treatment of nitrogen sulfide in sintering flue gas by microwave method[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2019.

[38] 郝克. 负载活性炭对烧结烟气微波脱硫脱硝的影响[D]. 唐山: 华北理工大学, 2023.
HAO Ke. Effect of loaded activated carbon on microwave desulfurization and denitrification of sintered flue gas[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2023.

[39] 刘光辉. 活性炭联合脱硫脱硝技术探讨[J]. 山东工业技术, 2019(10): 20.
LIU Guanghui. Discussion on the technology of combined desulfurization and denitrification with activated carbon [J]. Shandong Industrial Technology, 2019(10): 20.

[40] APPLETON T J, COLDER R I, KINGMAN S W, et al. Microwave technology for energy-efficient processing of waste[J]. Applied Energy, 2005, 81(1): 85 – 113.

[41] 马双忱, 高莉, 金鑫, 等. 微波辐照活性炭脱硫脱硝技术研究进展[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(8): 70 – 74.
MA Shuangchen, GAO Li, JIN Xin, et al. Progress on desulfurization and denitrification technology using activated carbon irradiated by microwave[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(8): 70 – 74.

[42] WANG X H, WANG A Q, WANG X D, et al. Microwave plasma enhanced reduction of SO_2 to sulfur with carbon [J]. Energy & Fuels, 2007, 21(2): 867 – 869.

[43] MA S C, JIN X, WANG M X, et al. Experimental study on removing NO from flue gas using microwave irradiation over activated carbon carried catalyst[J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(12): 3431 – 3436.

[44] MA S C, YAO J, MA X, et al. Removal of SO_2 and NO_x using microwave swing adsorption over activated carbon carried catalyst[J]. Chemical Engineering & Technology, 2013, 36(7): 1217 – 1224.

[45] KONG Y G, CHA C Y. NO_x abatement with carbon adsorbents and microwave energy[J]. Energy & Fuels,

1995,9(6):971 – 975.

[46] KONG Y,CHA C Y. Reduction of NO_x adsorbed on char with microwave energy[J]. Carbon, 1996, 34 (8): 1035 – 1040.

[47] 马双忱,姚娟娟,金鑫,等. 微波辐照活性炭床脱硫脱硝动力学研究[J]. 中国科学:技术科学,2011,41(9):1234 – 1239.
MA Shuangchen,YAO Juanjuan,JIN Xin,et al. Study on kinetics of desulfurization and denitrification of activated carbon bed irradiated by microwave[J]. Scientia Sinica (Technologica),2011,41(9):1234 – 1239.

[48] 刘建爽,石焱,宋长鹤,等. 微波辐照对活性炭吸附性能和烟气脱硫的影响[J]. 华北理工大学学报(自然科学版),2022,44(3):63 – 70.
LIU Jianshuang,SHI Yan,SONG Changhe,et al. Effects of microwave irradiation on adsorption properties and flue gas desulfurization of activated carbon[J]. Journal of North China University of Science and Technology (Natural Science Edition),2022,44(3):63 – 70.

[49] XU W T,ZHOU J C,LI H,et al. Microwave-assisted catalytic reduction of NO into N_2 by activated carbon supported Mn_2O_3 at low temperature under O_2 excess[J]. Fuel Processing Technology,2014,127:1 – 6.

(上接第 52 页)

[35] 李俊杰,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,2017,42(3):79 – 85.
LI Junjie, WEI Jinchao, LIU Changqi. Combined desulfurization,denitrification and reduction of air toxice using activated coke[J]. Sintering and Pelletizing,2017,42(3):79 – 85.

[36] 张乾,薛建明,吴春华,等. 碳基多孔材料脱除烟气中二噁英的研究进展[J]. 烧结球团,2021,46(5):65 – 72.
ZHANG Qian, XUE Jianming, WU Chunhua, et al. Research progress on desorption of dioxins in flue gas of carbon-based porous materials[J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(5):65 – 72.

[37] FURUBAYASHI M, HAMANO S, NAGAI K. Regeneration of activated carbon used for removal of dioxins removal from flue gas[J]. Kagaku Kogaku Ronbunshu,2002,28(6):718 – 725.

[38] 周茂军,张代华. 宝钢烧结烟气超低排放技术集成与实践[J]. 钢铁,2020,55(2):144 – 151.
ZHOU Maojun, ZHANG Daihua. Technology integration and practice of ultra-low emission of sintering flue gas in Baosteel[J]. Iron & Steel,2020,55(2):144 – 151.

[39] 杨柳,王飞,毛瑞. 球团工艺活性焦脱硫脱硝系统运行问题分析[J]. 冶金动力,2020,39(8):83 – 86;89.
YANG Liu,WANG Fei,MAO Rui. Analysis on operation problems of activated coke desulfurization and denitrification system in pellet process[J]. Metallurgical Power,2020,39(8):83 – 86,89.

[40] 王泽安. 活性炭纤维协同脱除HCl/NO/SO_2的实验与机理研究[D]. 武汉:华中科技大学,2017.
WANG Zean. A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of pyilosophy in engineering[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2017.