

低温等离子体脱硫技术研究进展

夏诗杨¹, 马文鑫², 米俊锋³, 杜胜男^{3*}, 杨爽⁴, 于靖尚⁵

1. 辽宁石油化工大学土木工程学院, 抚顺 113001
2. 中国昆仑工程有限公司沈阳分公司, 沈阳 110000
3. 辽宁石油化工大学石油天然气工程学院, 抚顺 113001
4. 中国石油天然气股份有限公司辽河油田分公司供水公司, 盘锦 124010
5. 辽宁石油化工大学创新创业学院, 抚顺 113001

摘要 SO₂气体排量大、污染重, 传统的脱硫技术存在经济、技术等方面局限, 而低温等离子体技术用于净化污染气体具有脱除效率高、适用性广等优点。介绍了电子束、电晕放电、介质阻挡放电3种低温等离子体技术脱除SO₂的研究进展, 分析了其技术机理、影响因素, 并讨论了低温等离子体脱硫技术的可能研究趋势。

关键词 低温等离子体; 脱硫; 电子束; 电晕放电; 介质阻挡放电脉冲

在我国的一次能源消耗中, 煤炭位居榜首。随着城市化进程的加快和经济的高速发展, 导致煤能源利用消耗持稳不减。煤的燃烧产生大量SO₂污染气体, 排放到大气中的SO₂在氧化和光催化的作用下形成雾霾、酸雨等污染现象, 不仅对生态环境有极大危害, 同时严重威胁人体健康^[1-2]。其排放量大、污染严重的特性致使SO₂污染气体的控制、脱除一直位居环境治理的主要地位。在常温常压下, 传统脱硫技术中应用较广的石灰石-石膏法、氨肥法、钠-钙双碱法、旋转喷雾干燥法等脱硫方法存在不同程度的成本高、能耗大、效率低、易产生二次污染等缺陷^[3-4]。为更好地满足现行SO₂气体

污染物排放标准和环境保护要求, 低温等离子技术因其脱除效率高、成本低、二次污染小等优点^[5-6], 已受到业界研究者的广泛关注, 成为烟气脱硫技术领域的研究热点, 极具广阔的应用前景和研究价值。

1 等离子体

等离子体是由电子、离子、原子、中性粒子及自由基组成的即区别于气体、液体和固体的离子化气态物质, 整体上呈电中性, 被称为物质的第4种存在形态^[7]。等离子体包括2种类别即热平衡等离子

收稿日期: 2020-03-11; 修回日期: 2021-08-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(20277004)

作者简介: 夏诗杨, 硕士研究生, 研究方向为低温等离子体与气体污染控制工程, 电子信箱: 1194150360@qq.com; 杜胜男(通信作者), 讲师, 研究方向为低温等离子体与流体污染控制工程, 电子信箱: dusn808@163.com

引用格式: 夏诗杨, 马文鑫, 米俊锋, 等. 低温等离子体脱硫技术研究进展[J]. 科技导报, 2022, 40(12): 66-72; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2022.12.006

体和非热平衡等离子体。低温等离子体(非热平衡等离子体)处于非热力学平衡状态,其电子温度远高于周围中性原子和分子温度,整体呈低温状态^[8-9]。低温等离子体技术(NTP)主要是利用高电压下气体放电电离产生的高能电子、自由基以及活性粒子与污染气体分子发生非弹性碰撞使污染物分子发生激发、解离、氧化等一系列反应来降解污染气体。

低温等离子体主要由气体放电法和高能电子束法等产生^[10],目前使用较多的是气体放电法。根据放电方式不同,通常分为介质阻挡放电、电晕放电、辉光放电、射频放电和雾化电晕放电等^[11]。现阶段用于脱除SO₂污染气体较广的方式为脉冲电晕放电、介质阻挡放电技术和电子束法。其相应技术比较如表1^[12-14]所示。

表1 关节镜组与保守治疗组的一般情况

脱硫技术	起源时间	优点	缺点
脉冲电晕放电	20世纪80年代	放电效率高,电子能量高	脉冲电源成本高,能量利用率低
介质阻挡放电	19世纪50年代	放电稳定均匀,能量密度高能量利用率高	能耗大,压降较高,放电升温减少使用寿命
电子束	20世纪80年代	系统简单,操作简单,占地面积小	电子加速器价格昂贵,投资成本高,X射线危害性

2 电子束法脱硫技术

2.1 电子束法脱除SO₂的技术原理

电子束技术起源于20世纪80年代,作为一种脱硫清洁工艺,不易产生废物。该工艺流程主要由烟气预除尘器、烟气冷却器、投氨系统、电子束照射反应器和副产品收集处理等部分组成,如图1所示。其工作原理是利用辐射的高能电子束照射反应系统中的燃煤烟气,大部分能量被氮、氧和水蒸气等气体分子吸收,气体分子吸收能量后电离、离解产生大量的离子自由基·OH、·O、·HO₂等活性物质。这些活性物质与SO₂发生氧化反应生成硫酸,再与加入的氨发生中和反应或热反应生成硫酸铵和硝酸铵^[15-16]。反应过程如下:

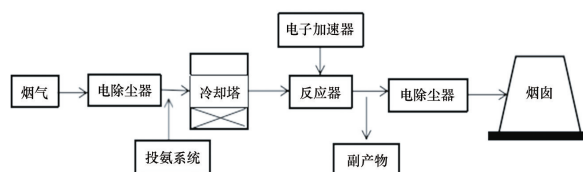
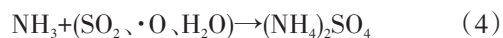
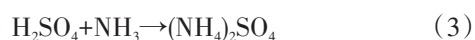
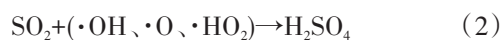


图1 电子束法脱硫工艺流程

2.2 电子束法脱除SO₂的影响因素

2.2.1 反应参数

反应参数是反应系统重要组成部分,直接影响系统脱除SO₂的能力和效果,这些主要因素包括氨气投加化学计量比、入口烟气温度、入口烟气相对湿度、电子束吸收剂量等参数^[17-18]。Basfar等^[19]进行去除燃油燃烧产生高排量SO₂的气体实验,实验表明随着吸收剂量增加,SO₂去除效率迅速增加,当剂量达到8 kGy时,增速趋于平缓,且增加烟气湿度和NH₃加入量,显著提高了SO₂去除效率,而升高烟气温度不利于SO₂的去除。在剂量为8.8 kGy,烟气湿度体积分数为11.57%,NH₃化学计量比为0.90,烟气温度60℃时,可获得98%的SO₂最佳去除效率。Licki等^[20]利用电子束法脱除烟气中高浓度SO₂,以确定去除效率与吸收剂量、烟气湿度、氨化学计量比及烟气温度的关系。同样得出SO₂去除效率随吸收剂量增加呈先增加后平缓的趋势,烟气湿度和入口NH₃浓度的增加有利于提高SO₂脱除效率,而升高烟气温度,去除效率随之减小。当剂量为11.5 kGy,烟气湿度体积分数为11%时,体积浓度为10%,得到SO₂的最佳去除效率为95%。

2.2.2 电子束能耗

电子束能耗是影响反应装置连续运行可行性的关键因素。出于经济性、技术性考虑,可利用多

种技术协同进而实现降低能耗保持能量水平。Ighigeanu 等^[10]和 Radoiu 等^[21]研究了电子束(EB)和微波感应(MW)结合形成等离子体组合反应器去除 SO₂的试验,二者实验结果表明:在微波作用下,可大幅减少吸收剂量。在剂量为 9 kGy 条件下的 EB 与剂量为 1kGy,微波功率为 550 W 条件下的 EB+MW 的 SO₂去除效率相同,对于实现相同的去除效率,单独的 EB 照射所需的剂量是 EB 和 MW 组合的 10 倍,同样在剂量为 30 kGy 条件下与剂量为 9 kGy,微波功率为 550 W 条件下的去除效率相同,单独的 EB 照射所需的剂量是 EB 和 MW 组合的 3 倍,且随着微波功率的增加可有效提高 SO₂脱除效率,在微波功率为 1200 W 下 SO₂脱除效率可由原来的 42% 增至 85%。二者实验均表明加入微波辐射有助于减少电子束法烟气处理过程的能耗,提高了脱硫效率,进而证明了电子束和微波感应等离子体组合反应器是一种可行的、高效的烟道气净化方法。

近年来,电子束法脱硫得到了广泛的研究,因操作简单、无二次污染使其成为一种有效的脱硫技术,但由于电子加速器等部件成本较高,设备寿命短致使经济性、可靠性较差,限制了其大规模的应用发展。

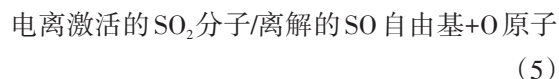
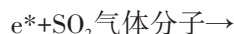
3 脉冲电晕放电脱硫技术

3.1 电晕放电脱除 SO₂的技术原理

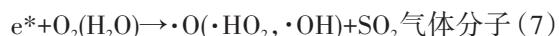
脉冲电晕放电是在电子束法基础上发展而来,在脉冲电源产生的脉冲高压放电作用下,致使不均匀电场发生放电,放电极附近气体电离产生高能电子、自由基等活性粒子与 SO₂气体氧化反应使其降解净化。该工艺流程主要由烟气调节系统、脉冲高压电源系统、等离子体反应器、副产物收集系统和其他辅助装置等部分组成,如图 2 所示。脉冲放电产生的瞬时电压电流很高,形成大等离子区提供更高的能量,使气体激发、电离,产生的电子能量更高^[22],电离更加充分,产生更多的自由基等活性粒子与污染气体进行反应。Yimin^[23]等通过实验和定性分析,得出脉冲电晕放电会引发自由基反应。该

自由基反应有助于氧化 SO₂,主导着 SO₂的去除过程。反应过程可分为两个阶段^[24-26]:

发生非弹性碰撞:高能电子与 SO₂气体分子直接作用



发生氧化反应:高能电子与 SO₂间接反应



其中, e* 为高能电子。

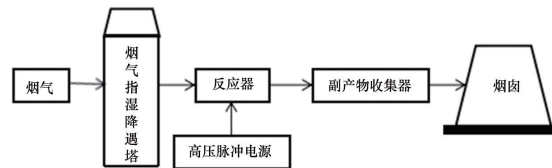


图2 脉冲电晕放电脱硫技术工艺流程

3.2 脉冲电晕放电脱除 SO₂的影响因素

3.2.1 放电参数及放电结构

放电参数和放电结构是影响放电空间电场强度的关键因素,进而影响着放电过程中电子能量转移和 SO₂气体的脱除效果。Wang 等^[27]研究了针-板电晕放电场中放电区域的电压、长度和功率对 SO₂脱除效率的影响。实验结果表明:放电电压、放电区域长度和放电功率与 SO₂脱除效率呈正相关,当放电电压、放电功率增加或放电区域延长时,会产生更多的高能电子,增加电场强度,增加了与 SO₂气体碰撞次数,加快了电荷转移进程,致脱除效率增加。在 SO₂浓度为 385 mg/m³,输入电压为 14 KV,脱硫效率最佳接近 95%。当输入功率约为 1~3 Wh/m³时,效率达到约 80%~85%。Xu 等^[28]利用脉冲放电氧化 SO₂,以确定峰值电压和脉冲频率对脱硫效率的影响,结果表明 SO₂氧化效率随着峰值电压和脉冲频率增加而增加,在高频率高电压下,放

电能力增强导致自由基和活性物质的产生会相应增加,提高了氧化效率,在最高峰值电压 53 kV, 300 Hz 下,SO₂ 的去除效率可达到近 80%。曹玮等^[29]在 SO₂ 初始浓度 364×10⁻⁶ g/m³, 脉冲峰值电压 50 kV, 脉冲频率 300 Hz 下, 研究脉冲放电电极数目对 SO₂ 脱除效率的影响, 当放电电极数目从 2 根增至 8 根时, SO₂ 去除效率由 47.7% 增加至 82.6%, 去除效率增加了 34.9%, 即随着放电电极数目的增加, 单次脉冲放电注入反应器的能量按比例相应增加, 使更多的气体分子发生激活、电离、裂解, 产生更多的活性粒子, 致脱硫效率明显升高。

3.2.2 添加剂

添加剂的协同作用更有益于降低能耗, 提高脱硫效率, Yu 等^[30]研究了在脉冲电晕放电场中增加水蒸气和粉煤灰对 SO₂ 转化效率的影响。实验得出通过添加水蒸气, 极大地提高了 SO₂ 的去除效率。在水体积比 1.0% 的情况下, SO₂ 去除效率达到约 61%, 并且随着水体积比增加到 4.0%, 去除效率被提升到 85% 以上。同样添加低浓度的粉煤灰有助于促进 SO₂ 的去除, 当粉煤灰浓度为 0.57 g/m³ 时, 其去除效率接近 90%, 而当粉煤灰浓度过高时, SO₂ 的去除效率急剧下降。在水蒸气和粉煤灰的协同作用下, 可改变放电空间活性基团的特性, 由于产生 ·OH 自由基数目的增加以及粉煤灰表面化学吸附能力的增强, 因而实现更好的脱硫效果。此外, Sun 等^[31]去除烟气流量为 65 Nm³/h 的 SO₂ 气体, 表明当水蒸气被活化时, SO₂ 的去除效率明显高于未活化时, 可提高近 20%。进而证明了活化的水蒸气更利于提高 SO₂ 去除效率。

脉冲电晕放电脱硫技术利用高压脉冲电源替代了电子加速器, 相比电子束法脱硫获得更高更稳定的去除效率, 能量效率可提高至电子束法的两倍, 投资费用仅约为电子束法的一半。但脉冲电晕放电技术对脉冲电源要求极高, 因此研制适宜的大功率脉冲高压电源是该技术发展应用的关键。

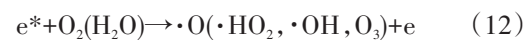
4 介质阻挡放电脱硫技术

4.1 介质阻挡放电脱除 SO₂ 的技术原理

介质阻挡放电 (DBD) 又可称无声放电, 是有绝

缘介质插入放电空间的一种非平衡态气体放电^[32-33], 可将介质放于电极表面或置于放电空间, 这种放电更为均匀、稳定, 通常的工作气压为 104~106 Pa, 电源频率为 50 Hz~1 MHz, 在高频率高电压下, 产生更高的电子能量, 气体电离发生电子雪崩产生稳定的离子、自由基等活性粒子 (·OH、·HO₂、O₃、H₂O₂) 与污染气体分子发生非弹性碰撞和一系列反应使其化学键断裂致气体净化。该脱硫工艺流程主要由烟气调节系统、高频电源系统、等离子体反应器、副产物收集系统和其他辅助装置等部分组成 (图 3)。在放电过程中产生的主要氧化物 ·O、·OH 和 O₃, 可用于 SO₂ 的氧化, 生成 SO₃/H₂SO₄。且放电过程中, 电介质的存在阻碍了火花放电的形成^[34]。反应过程如下:

1) 发生非弹性碰撞: 高能电子与 H₂O、O₂ 等气体分子反应



2) 发生氧化反应: 活性粒子与 SO₂ 气体分子反应

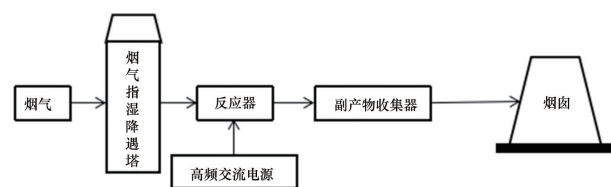
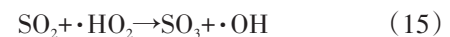
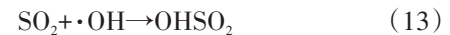


图3 介质阻挡放电脱硫技术工艺流程

Bai 等^[35]利用介质阻挡放电 (DBD) 产生了大于 8 eV 的平均电子能量将 O₂ 电离为高浓度的活性氧 (O²⁺, O₃), 将其注入模拟烟道气的管道中与水反应产生 ·OH 自由基, 这些自由基迅速且非选择性地氧化 SO₂ 以生成硫酸 (H₂SO₄), 进而证明活性氧是去除烟气 SO₂ 的关键物质。考虑到介质阻挡放电过程中会产生臭氧 (O₃), Obradovi 等^[36]研究对比由介质阻挡放电直接氧化烟气和通过介质阻挡放电产

生的臭氧化空气间接氧化烟气用于同时去除 SO_2 , 结果显示 SO_2 不仅与 O_3 反应生成 SO_3 , 在放电中还会被 $\cdot\text{OH}$ 自由基氧化为 SO_3 , 因此 SO_2 的氧化在直接氧化中更有效。

4.2 介质阻挡放电脱除 SO_2 的影响因素

4.2.1 气体参数及能量密度

气体参数是直接影响 SO_2 污染气体净化效果的主要原因。赵之骏等^[37]利用介质阻挡放电脱除 SO_2 , 研究气体初始浓度和气体流量变化对 SO_2 的去除效果, 实验结果表明: SO_2 的初始浓度和气体流量与脱除效率呈反比, 当二者增加时, 使 SO_2 与活性粒子碰撞反应几率减小, 致 SO_2 脱除效率降低。张俊杰等^[38]研究了烟气湿度和氧气含量对 SO_2 去除效率的影响, 研究表明烟气湿度的增加即 H_2O 的加入可以明显改善对 SO_2 的脱除效果, 在放电电压 20kV, 相对湿度 0%、40%、60% 的脱除率分别为 30.2%、51.7%、64.2%, H_2O 的加入使与高能电子发生碰撞的几率增大, 产生大量的强氧化性粒子 $\cdot\text{OH}$ 与 SO_2 发生反应, 而氧气含量对 SO_2 的去除效率几乎没有影响。王雪涛等^[39]则分析了能量密度对脱除效率的影响, 结果表明增加能量密度有益于脱除效率的升高, 当能量密度在 0~50 J/L 时, SO_2 脱除率增加缓慢, 能量密度在 50~100 J/L 时, SO_2 脱除率迅速增加, 能量密度增大后得到的 $\cdot\text{O}$ 、 $\cdot\text{OH}$ 等活性粒子增多, 加速了 SO_2 的氧化反应, 在能量密度达 300 J/L 时, SO_2 脱除率达到 33.5%。Cui 等^[40]利用介质阻挡放电协同 MnCe/Ti 催化剂, 以促进等离子体放电, 加速氧化反应同时脱除烟气中的 NO 和 SO_2 , 分析了能量密度与 SO_2 的初始浓度对 SO_2 脱除率的影响。结果得出: SO_2 脱除效率随着能量密度的增加而增加, SO_2 初始浓度越低, 脱除效率越高, 当能量密度 $\text{SED}=250 \text{ J/L}$, NO 和 SO_2 初始浓度分别为 200 mg/m^3 、 2000 mg/m^3 时, SO_2 脱除效率最高, 实现 90.1%。

4.2.2 放电参数及停留时间

放电参数和停留时间均对电场强度和反应程度有很大的影响, 李海玮等^[41]研究介质阻挡放电脱除中放电间距和放电电压对脱除 SO_2 的作用效果, 结果得出在放电间距和放电电压的增大下, SO_2 的

去除效率呈上升趋势, 当放电电压增加时, 活性粒子密度增大, 且适当增加放电间距可提高放电空间的瞬时能量密度, 而过大的放电间距会增大放电空间体积致活性粒子密度减小, 当放电间距为 40 mm, 放电电压为 16 KV 时, SO_2 的去除率取得最高值为 32.5%。Nasonova 等^[42]利用介电材料为玻璃珠的介质阻挡低温等离子体放电, 进而分析放电参数和停留时间对系统中 SO_2 的去除影响。结果表明增加施加的峰值电压、放电频率和气体停留时间有效地促进了 SO_2 的去除, 这些参数的改变导致放电空间电子碰撞解离产生自由基的速率增加, 能量变高, 最终致使 SO_2 的脱除效率随之升高。在 $[\text{SO}_2]_0=1201.1 \text{ mg/m}^3$, $f=900 \text{ Hz}$, $t=2 \text{ s}$ 条件下, SO_2 的去除效率约为 64%。

介质阻挡放电可以在常压下发生强电离放电, 产生能量高、密度大的低温等离子体直接作用于气体污染物, 与其他两种放电技术相比应用介质阻挡放电脱硫技术的效果更佳, 成熟度更高, 得到了广泛的试验研究。但该反应过程复杂, 影响因素较多, 仍处于发展阶段还有许多问题待以进一步分析优化。

对上述 3 种低温等离子体脱硫技术技术的特点进行分析对比, 总结具体内容如表 2 所示^[43-44]。

表 2 低温等离子体脱硫技术特点对比

	电子束法	脉冲电晕放电	介质阻挡放电
电子能量	$5 \times 10^5 \sim 8 \times 10^5 \text{ eV}$	2~20 eV	5~20 eV
能量损耗	最高	高	高
脱硫效率	较高 >50%	高 >80%	高 >85%
投资费用	高	低	低
运行费用	高	高	低
二次污染	无	无	无

5 结论

低温等离子体脱硫技术具有效率高、操作简单、成本低且不易产生二次污染等特点, 众多的优势使其处于污染物治理的热点和重点地位。目前针对 SO_2 污染气体脱除机理和影响参数等方面已经得到了一定程度的研究, 但还存在着些许不足和

问题。为进一步完善低温等离子技术,实现低温等离子体脱硫技术大范围的工业化应用,充分考虑经济性、适用范围、可行性等方面的影响,针对降低能耗、提高脱除效率还应更深入探究优化。可利用多种诊断方式深入监测放电过程及反应机理,明确反应器放电机理与去除污染物相互作用机理,以从源头上强化放电装置与反应过程;全面探究放电条件、气体参数条件对放电机理及反应机理的可能影响,并总结规律变化,确定最佳工艺参数;此外,可利用多种添加物或催化剂展开协同复合作用以增强电离放电或反应强度,进而改善脱除效果。

参考文献(References)

- [1] 苑贺楠, 何广湘, 孔令通, 等. 工厂燃煤烟气脱硫技术进展[J]. 工业催化, 2019, 27(9): 8-12.
- [2] 刘睿劫, 张智慧. 中国工业二氧化硫排放趋势及影响因素研究[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(10): 100-104.
- [3] Carletti C, Henrik G, Blasio C D, et al. Limestone dissolution study for wet flue gas desulfurization under turbulent regimes above critical suspension speed[J]. Computer Aided Chemical Engineering, 2013, 32(1): 301-306.
- [4] 杨忠凯, 王敬臣, 武宁, 等. 燃煤烟气脱硫技术综述[J]. 河南化工, 2019, 36(3): 7-10.
- [5] Cui S, Hao R L, Fu D. An integrated system of dielectric barrier discharge combined with wet electrostatic precipitator for simultaneous removal of NO and SO₂: Key factors assessments, products analysis and mechanism[J]. Fuel, 2018, 221: 12-20.
- [6] Ma S, Zhao Y, Yang J, et al. Research progress of pollutants removal from coal-fired flue gas using non-thermal plasma[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 67: 791-810.
- [7] Schiavon M, Torretta V, Casazza A, et al. Non-thermal plasma as an innovative option for the Abatement of volatile organic compounds: A Review[J]. Water, Air & Soil Pollution, 2017, 228(10): 388-407.
- [8] 史亚微. 不同供电方式下等离子体脱除烟气中SO₂及颗粒物的研究[D]. 北京: 华北电力大学环境科学与工程学院, 2011.
- [9] Huang L, Xia L Y, Ge X X, et al. Removal of H₂S from gas stream using combined plasma photolysis technique at atmospheric pressure[J]. Chemosphere, 2012, 88(2): 229-234.
- [10] Ighigeanu D, Martin D, Zisslescu E, et al. SO₂ and NO_x removal by electron beam and electrical discharge induced non-thermal plasmas[J]. Vacuum, 2005, 77(4): 493-500.
- [11] 宁平, 徐可, 王学谦, 等. 低温等离子体技术处理含硫恶臭气体的研究进展[J]. 材料导报, 2015, 29(21): 66-71.
- [12] 李盼宋, 李建军, 贺尧祖, 等. 电子束氨法协同脱硫脱硝技术的研究进展[J]. 四川化工, 2016, 19(1): 13-15.
- [13] Hong L, Chen D Z, Yang M, et al. Interaction between NO and SO₂ removal processes in a pulsed corona discharge plasma (PCDP) reactor and the mechanism[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 359: 1130-1138.
- [14] Zhou Y, Deng Y, Wu P, et al. The effects of ventilation and floor heating systems on the dispersion and deposition of fine particles in an enclosed environment[J]. USA: Building and Environment, 2017, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.08.049.
- [15] Park J H, Ahn J W, Kim K H, et al. Historic and futuristic review of electron beam technology for the treatment of SO₂ and NO_x in flue gas[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, doi: 10.1016/j.cej.2018.08.103.
- [16] Gogulancea V, Lavric V. Flue gas cleaning by high energy electron beam—Modeling and sensitivity analysis[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 70(2): 1253-1261.
- [17] Chmielewski A G. Industrial applications of electron beam flue gas treatment—from laboratory to the practice [J]. Radiation Physics and Chemistry, 2007, 76(8-9): 1480-1484.
- [18] Yong K K, Do H H. Microwave effect in the simultaneous removal of NO_x and SO₂ under electron beam irradiation and kinetic investigation of NO_x removal rate[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2010, 49(17): 8147-8156.
- [19] Basfar A A, Fageeha O I, Kunnummal N, et al. Electron beam flue gas treatment(EBFGT) technology for simultaneous removal of SO₂ and NO_x from combustion of liquid fuels[J]. Fuel, 2008, 87(8/9): 1446-1452.
- [20] Licki J, Chmielewski A G, Zimek Z, et al. Electron beam process for SO₂ removal from flue gases with high SO₂ content[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2002, 63(3-6): 637-639.
- [21] Radoiu M T, Martin D I, Calinescu I. Emission control of SO₂ and NO_x by irradiation methods[J]. Journal of Hazardous Materials, 2003, 97(1-3): 145-158.
- [22] Akria M. Generation of non-thermal plasma combined with catalysts and their application in environmental technology[J]. Catalysis Today, 2013, 211(Complete): 2-8.
- [23] Yimin Z, Chae J O, Kim K Y, et al. Effects of Water Vapor and Ammonia on SO₂ removal from flue gases using pulsed corona discharge[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2002, 22(1): 187-195.
- [24] Eliasson B, Kogelschatz U. Nonequilibrium volume plasma-chemical process in[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1992, 19(6): 1063-1077.
- [25] 王祖武, 曾汉才, 梅欢, 等. 放电电场对SO₂气相传质过

- 程的影响[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(4): 23-26.
- [26] Moka Y S, Namb I S. Modeling of pulsed corona discharge process for the removal of nitric oxide and sulfur dioxide[J]. Chemical Engineering Journal, 2002, 85(1): 87-97.
- [27] Wang Z W, Zeng H C, Guo J, et al. Sulfur dioxide(SO₂) gas transfer process enhanced by corona discharge[J]. Journal of Electrostatics, 2007, 65(8): 485-489.
- [28] Xu F, Liu Y Z, Cui W, et al. Simultaneous oxidation of NO, SO₂ and HgO from flue gas by pulsed corona discharge[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(3): 328-332.
- [29] 曹玮, 骆仲决, 徐飞, 等. 脉冲电晕放电协同烟气脱硫脱硝试验研究[J]. 环境科学学报, 2008, 28(12): 2487-249.
- [30] Yu C J, Xu F, Luo Z Y, et al. Influences of water vapor and fly ash addition on NO and SO₂ gas conversion efficiencies enhanced by pulsed corona discharge[J]. Journal of Electrostatics, 2009, 67(6): 829-834.
- [31] Sum M, Wu Y. Removal of SO₂ from flue gas by water vapor DC corona discharge[J]. Environmental Science, 2006, 27(7): 1282-1285.
- [32] 方志, 邱毓昌, 王辉, 等. 介质阻挡放电的电荷传输特性研究[J]. 高压电, 2004, 40(6): 401-403.
- [33] 孙岩洲, 邱毓昌, 袁兴成. 介质阻挡电晕放电去除二氧化硫的研究[J]. 高压电器, 2004, 40(4): 253-258.
- [34] Ma H B, Chen P, Zhang M L, et al. Study of SO₂ removal using non-thermal plasma induced by dielectric barrier discharge[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2002, 22(2): 239-253.
- [35] Bai M, Leng B, Mao S, et al. Flue gas desulfurization by dielectric barrier discharge[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2016, 36(2): 511-521.
- [36] Obradovi B M, Sretenovi G B, Kuraica M M. A dual-use of DBD plasma for simultaneous NO_x and SO₂ removal from coal-combustion flue gas[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 185(2/3): 1280-1286.
- [37] 赵之骏, 吴玉萍, 张仁熙, 等. 高频介质阻挡放电烟气脱硫研究[J]. 化学学报, 2004, 62(2-3): 28-32.
- [38] 张俊杰, 任建兴, 李芳芹, 等. 介质阻挡放电低温等离子体脱硫脱硝过程的研究[J]. 应用化工, 2018, 47(1): 109-112.
- [39] 王雪涛, 王沛迪, 刘予, 等. 介质阻挡放电脱硫效率影响因素试验研究[J]. 热力发电, 2016, 45(3): 59-63.
- [40] Cui S P, Hao R L, Fu D. Integrated method of non-thermal plasma combined with catalytical oxidation for simultaneous removal of SO₂ and NO[J]. Fuel, 2019, 246: 365-374.
- [41] 李海玮, 王祖武, 李萍. 介质阻挡放电同时脱硫脱硝中放电特性研究[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(Suppl1): 88-91.
- [42] Nasonova A, Pham H C, Kim D J, et al. NO and SO₂ removal in non-thermal plasma reactor packed with glass beads-TiO₂ thin film coated by PCVD process[J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 156(3): 557-561.
- [43] 郭彬, 栾涛. 介质阻挡放电低温等离子体脱硝性能研究[J]. 核聚变与等离子体物理, 2017, 37(2): 236-243.
- [44] Kogelschatz U. Dielectric barrier discharges: Their history, discharge physics, and industrial applications[J]. Plasma Chem Plasma Process, 2003, 23(1): 1-46.

Research progress of non-thermal plasma desulfurization technology

XIA Shiyang¹, MA Wenxin², MI Junfeng³, DU Shengnan^{3*}, YANG Shuang⁴, YU Jingshang⁵

1. College of Petroleum Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China

2. Shenyang Branch, China Kunlun Engineering Company Limited, Shenyang 110000, China

3. College of Petroleum and Natural Gas Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China

4. Water Supply Company, Liaohe Oil field Branch, China National Petroleum, Panjin 124010, China

5. College of Innovation and Entrepreneurship, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China

Abstract Aiming at the effective treatment of SO₂ gas with wide range, large displacement, and heavy pollution, the traditional desulfurization technology has economic and technical limitations, while non-thermal plasma technology has the advantages of high removal efficiency, and wide applicability for purifying polluted gases, and has received extensive attention and research. The article introduces the research progress of three non-thermal plasma technologies removal of SO₂ by electron beam, corona discharge, and dielectric barrier discharge. The technical mechanism and influencing factors are reviewed, and possible research trends of non-thermal plasma desulfurization technology are analyzed.

Keywords non-thermal plasma; desulfurization; electron beam; corona discharge; dielectric barrier discharge ●



(责任编辑 祝叶华)