

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2018.04.025

# 流光放电烟气脱硫用高压脉冲电源的研制

王积成<sup>1</sup>, 冯德仁<sup>1</sup>, 宛传友<sup>1</sup>, 潘绪超<sup>2</sup>

(1. 安徽工业大学电气与信息工程学院, 马鞍山 243002;

2. 南京理工大学智能弹药国防重点学科试验室, 南京 210094)

**摘要:** 脉冲电晕法烟气脱硫优点显著,但该方法可能使正离子和电子离开流光通道,发生复合反应的范围不够大,自由基分布不广,很难产生稳定、宽范围和有效的流光,这就影响烟气脱硫,严重降低脱硫效率.本文分析了流光放电等离子体脱硫机理,提出一种直流叠加高压脉冲电源流光放电等离子体发生技术,并结合脱硫机理研制用于烟气脱硫的脉冲电源,通过现场运行测试,结果表明,在直流高压基础上叠加高压脉冲的技术方案可以有效提高脱硫效率.

**关键词:** 烟气脱硫; 流光放电; 脉冲电源; 叠加

**中图分类号:** TQ152      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0490-6756(2018)04-0813-06

## Design of the pulsed high-voltage power for FGD of streamer discharge

WANG Ji-Cheng<sup>1</sup>, FENG De-Ren<sup>1</sup>, WAN Chuan-You<sup>1</sup>, PAN Xu-Chao<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, China;

2. Ministerial Key laboratory of ZNDY, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** The technology of FGD (Flue Gas Desulfurization) by PPCP (Pulse Corona Induced Plasma Chemical Process) has obvious advantages, but the method could make the positive ions and electrons leave the streamer channels, the range of complex reaction be not big enough, and the free radicals be not widely distributed, which is difficult to produce a stable, wide range and effective streamer. It has a bad influence on FGD and decreases the efficiency of DESO<sub>2</sub> (Desulfurize SO<sub>2</sub>) seriously. In the paper, the technology of inspiring streamer discharge plasma by DC superimposed high voltage pulse power supply is presented and the mechanism of streamer discharge plasma desulfurization is analyzed. The mechanism of DESO<sub>2</sub> is also used to develop pulse power which could do DESO<sub>2</sub> from flue gas. Through the field operation test, it shows that the technical scheme of high voltage pulse superimposed on the DC high voltage can improve the efficiency of DESO<sub>2</sub> effectively.

**Keywords:** FGD; Streamer discharge; Pulse power supply; Superimpose

## 1 引言

我国能源的主要来源在很长一段时间内仍然是燃煤. 燃煤烟气所含的烟尘、二氧化硫、氮氧化物等有害物质是造成大气污染、酸雨和温室效应的主要根源. 目前,我国治理烟气脱硫的现状比较落后,

实现污染物排放总量控制的形势十分严峻. 微波热处理活性炭产生再生物用于烟气脱硫拥有广阔的应用潜力和发展前景,其不同情况下产生的再生物对脱硫性能有明显区别. 现阶段国内外等离子体烟气脱硫技术主要有电子束法、脉冲电晕法. 电子束法的关键设备是能长期稳定运行的大功率电子枪.

收稿日期: 2017-11-26

作者简介: 王积成(1993-),男,硕士,主要从事脉冲功率及电力电子变换研究. E-mail: wangjicheng1993@163.com

大容量的电子加速器造价昂贵,技术要求高,其功率难以满足应用于工业烟气量的需要.且电子束能量很大一部分损失在离子的碰撞上,故其电能的消耗较大,大约为电厂所发出电能的 3%.脉冲电晕法用旋转火花隙开关容易使脉冲波形变坏.用电容器组作初级储能,由于储能密度低、寿命短、性能价格比低等缺点,不适用于处理大气流量和连续稳定运行的脉冲发生器.利用火花隙作为开关产生脉冲,脉冲频率一般在几百赫兹,作为工业应用脱硫效率较低,且脉冲电晕法能耗也较大.

高压脉冲脱硫的技术方案,使得瞬时电场的击穿电压相对于直流更高.针对目前已投入使用的烟气脱硫装置,高压脉冲使放电增强,单脉冲注入能量增大,产生自由基增多,因而氧化脱除量增加.同时直流基压能驱使正离子和电子离开流光通道,在更大的范围内发生复合反应,自由基分布更广<sup>[1]</sup>.因此,在高压直流基础上叠加一个幅值及脉宽都可调的脉冲,可以产生稳定、宽范围和有效的流光,就起到二者兼顾的作用.然而由于流光放电脱硫反应器不同的负载特性,加上现场的工况不一致,在直流高压基础上叠加高压脉冲技术方案的电气参数难以做到普适性.针对不同工况,要达到理想效果,须经现场反复调试,工作量非常繁重.本文分析了流光放电等离子体产生机理以及流光放电脱硫机理,介绍了流光放电烟气脱硫工艺流程,研制了一种用于流光放电等离子体脉冲电源.现场运行测试表明,在直流高压基础上叠加高压脉冲的技术方案可以有效的提高脱硫效率<sup>[2]</sup>.

## 2 流光放电脱硫机理

气体放电有多种放电模式,流光放电产生等离子体活性自由基机理如图 1 所示<sup>[3]</sup>.

如图 1 (a)所示,当正高压施加到尖状电极时,尖端表面就产生强电场,引发电子击穿的雪崩电离过程,因此生成正离子和电子.电子质量轻,很快被吸入正极,而在正尖端外留下正离子的电荷团,该正电荷团又产生方向向外的电场,并继续向外激发,再次引发电子击穿的雪崩电离过程.如此继续,以致形成一个线状的流光通道,见图 1 (b).在流光电晕区域激发的富能电子能量可达到 10 eV 以上,电子不断撞击电离气体分子,产生 O、OH、HO<sub>2</sub> 和 O<sub>3</sub> 等自由基,这就是流光放电引发化学反应的根源.

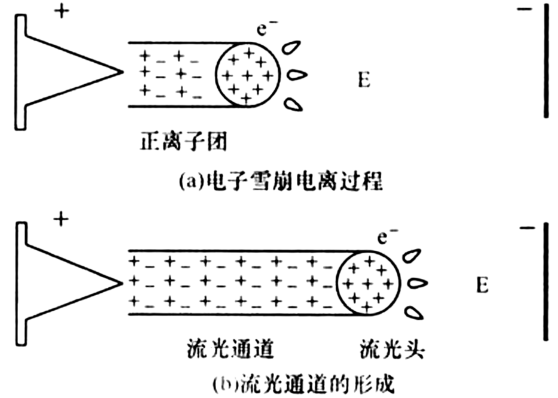
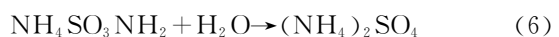
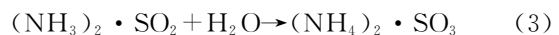
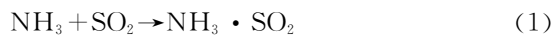


图 1 流光放电机理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of streamer discharge mechanism

流光放电脱硫技术协同利用了等离子体氧化和氨吸收的作用<sup>[4]</sup>.一种是先电晕氧化、后生成铵盐的途径,即这些强氧化性自由基与烟气中的 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 发生化学反应,最后再通入氨气,在有铵的情况下发生化学反应生成铵盐.这是通常有关电晕放电脱硫技术资料所介绍的机理,研究表明这一途径在脉冲电晕放电脱硫效率中的贡献约占 30%<sup>[5]</sup>.在实际脱硫过程中还存在另一贡献更大的反应途径,即 NH<sub>3</sub> 与 SO<sub>2</sub> 发生快速热化学反应.首先生成氨基磺酸分子及氨基磺酸铵固体等中间产物<sup>[6]</sup>,自由基迅速将其氧化,生成稳定的硫铵,即先成盐后氧化.反应过程如下:



## 3 系统设计及原理分析

### 3.1 电源主电路设计

脉冲电源叠加方案如图 2 所示,直流基础电压  $U$  施加在脱硫反应器本体上,  $L_{dc}$  为隔离电感,减少脉冲电源对直流源的影响,脉冲发生电路输出端的耦合电容为  $C_c$ ,用来实现直流上叠加高压脉冲<sup>[7,8]</sup>.电感  $L_{ps}$ 、电阻  $R_{ps}$ 、储能电容  $C_s$  和高压变压器 PT 组成充电通路,其它各器件为辅助电路或寄生参数,不一一介绍.

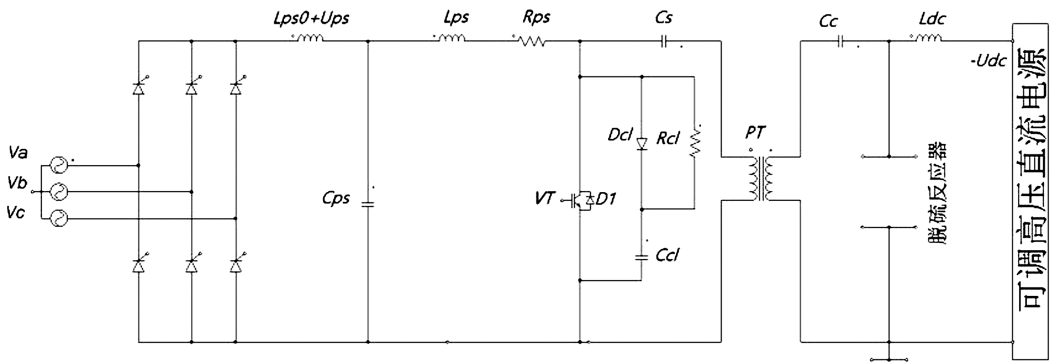


图 2 脉冲电源的电路拓扑图  
Fig. 2 Circuit topology of the pulse power

脉冲发生电路是由经过工频整流后直流电压  $+U_{ps}$  提供电能, 在开关管 VT 断开期间给储能电容充电, 使  $C_s$  上的电压很快达到直流总线上的电压. 当开关管 VT 闭合期间,  $C_s$  和 PT 的原边经过 VT 形成闭合的通路. 回路中变压器的漏感、储能电容以及变压器二次侧耦合到一次侧的等效电容, 在储能电容初始能量的激励下发生串联谐振. 设计脉冲电路时需要将第一个谐振脉冲的方向和直流电源的接线进行匹配, 并且在该谐振半个周期之前控制 VT 断开, 可以得到所需要占空比的脉冲, 传递到变压器二次侧, 通过耦合电容  $C_c$  叠加在电脱硫反应器本体上, 从而在脱硫反应器本体上形成的高压脉冲.

### 3.2 电路原理分析及仿真

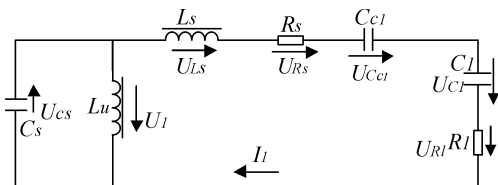


图 3 等效串联谐振回路  
Fig. 3 Equivalent RLC series resonant circuit

脱硫反应器本体等价为一个漏电容器, 用  $R_0$  和  $C_0$  表示. 为方便从原理上分析叠加电路, 忽略辅助电路, 将高频变压器看成并联漏感的理想变压器, 并借助其近似等效电路, 将变压器的次级电路耦合到原边进行统一分析计算, 得出图 3 所示的 VT 导通时的简化电路<sup>[9]</sup>.

图 3 中脉冲变压器的主要参数有漏磁电感  $L_s$ 、励磁电感  $L_u$  和绕组线圈本身的等效电阻  $R_s$ , 脉冲变压器的励磁电感相比于漏磁电感要大很多, 推导电路时将其看作开路, 电容  $C_{cl}$ 、电容  $C_1$  和电阻  $R_1$  都是变压器二次侧电路折算到一次侧的等效

参数.

$$\text{令: } \frac{1}{C} = \frac{1}{C_s} + \frac{1}{C_{cl}} + \frac{1}{C_1} \quad (8)$$

$$R = R_s + R_1 \quad (9)$$

当  $R < \sqrt{L_s/C}$  时, 产生阻尼振荡. 根据电路的基尔霍夫定理 KVL, 求出电容  $C_1$  两端压降  $U_{C1}$ , 即为

$$U_{C_1} = \frac{C}{C_1} U_{ps} (e^{-\alpha t} \cos \omega t - 1) - \frac{U_{dc}}{n} \quad (10)$$

脉冲发生器在脱硫反应器本体施加的脉冲电压就是在图 3 中电容  $C_1$  的电压,  $n$  为变压器的变比, 式中:

$$\alpha = \sqrt{\frac{R}{2L_s}}; \theta = \arctan \frac{\omega}{\alpha}; \omega = \sqrt{\frac{1}{CL_s} - \frac{R^2}{4L_s^2}}$$

在 PSIM 软件下建模仿真, 设置高压直流电压  $U_{dc} = 30 \text{ kV}$ ,  $U_{ps} = 45 \text{ kV}$ , 脉冲频率为  $1 \text{ kHz}$ , 脉冲宽度为  $4 \mu\text{s}$ , 变压器的变比为  $1 : 70$ , 得到了脉冲叠加前和叠加后的仿真波形如图 4 所示, 从而验证了叠加的可行性.

## 4 结果与分析

根据前文的理论和电路分析, 我们研制了脉冲电源的实验样机, 完成电路的调试工作, 并在某燃煤厂进行了实地测试. 流光放电烟气脱硫的工艺流程如图 5(a) 所示是一套完整的设备, 将它嵌入燃煤电厂烟气排放系统内, 一端接受除尘器的尾气, 另一端将脱硫的气体, 送入烟囱. 分区湿式反应器包含热化学反应区和等离子体反应区, 烟气先经过热化学反应区, 由液态吸收剂吸收大部分  $\text{SO}_2$ , 得到浓度达到摩尔量级的亚硫酸盐溶液; 进入等离子体反应区时, 经受脱硫处理, 同时也将热化学反应区的生成液雾化喷入, 使生成液中的亚盐氧化为正盐<sup>[10]</sup>. 由于初始氧化速度提高千百倍, 使反应器能耗降低  $30\% \sim 50\%$ . 脉冲高压叠加在分区湿式反

应器中,图 5(a)~(d)为流光放电等离子体烟气脱硫工艺流程图,控制柜及实验现场图。

脉冲叠加直流的实验中,先调节高压直流侧电压使其达到 30 kV,再通过上位机调节脉冲的幅值,使其达到 50 kV,得到模拟反应器负载端电压波形如下图 6 所示,图 6(a)、(b)分别为叠加后脉冲全图与脉冲放大图,高压的测量均通过 1000 倍的高压探棒测得的,高压碳棒型号为 Tektronix P6015A。

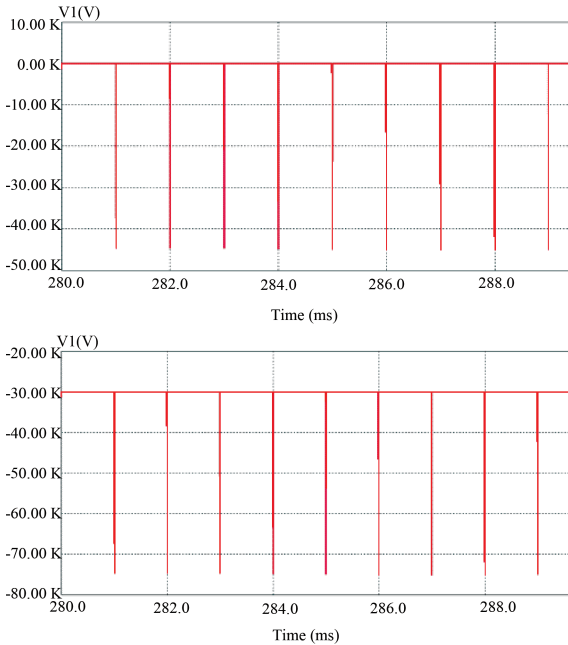
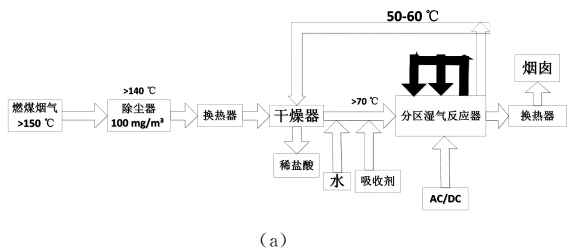
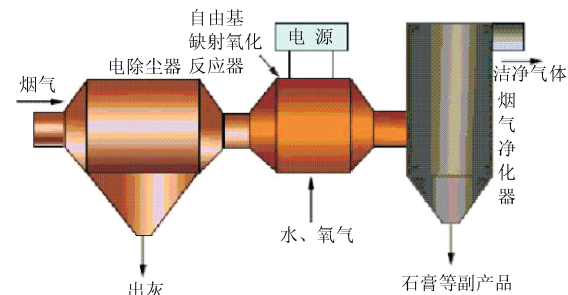


图 4 脉冲叠加前后的仿真波形

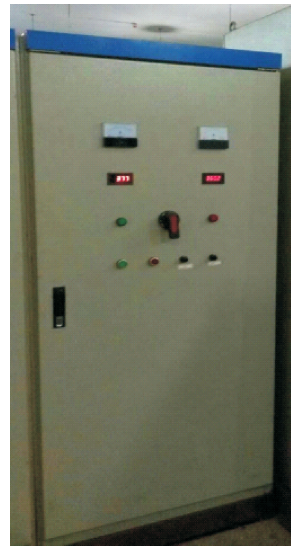
Fig. 4 Simulation waveforms before and after pulse superposition



(a)



(b)



(c)



(d)

图 5 流程图及实地测试

Fig. 5 Flow chart and field test

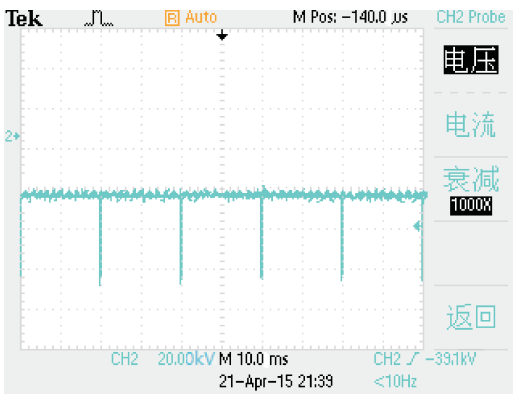
实地测试中,某燃煤厂原有的脱硫反应器设备,其运行参数:处理烟气量 2000 Nm<sup>3</sup>/h,单位体积烟气注入能量 2.6 Wh/m<sup>3</sup>,直流电压约为 45 kV,测得进气口烟气中 SO<sub>2</sub> 浓度为 2.6 g/Nm<sup>3</sup>,出气口 SO<sub>2</sub> 浓度为 253.51 mg/Nm<sup>3</sup>,脱硫效率为 90.25%(以出口浓度比进口浓度的比值).针对我们设计的原型机,在处理烟气量、单位体积烟气注入能量等条件一定的情况下,选取一系列脉冲电压幅值、宽度及脉冲频率进行试运行实验并测试出最佳的试运行脉冲幅值、宽度和脉冲频率。

### 4.1 脉冲电压幅值影响

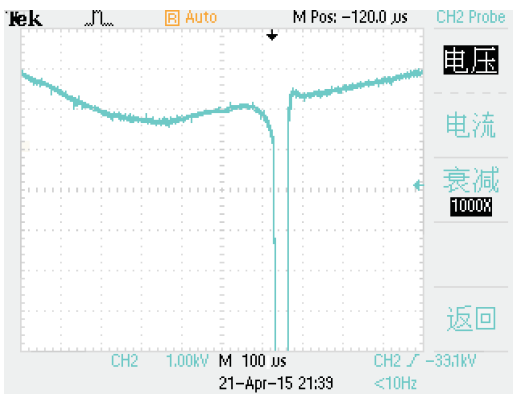
在 1 kHz 脉冲频率、脉冲宽度 2 μs 进行电压实验,得到脱硫效率实验数据.并绘制出其平滑曲线图,见图 7.发现在 47 和 49 kV 之间脱硫效率曲线有一个极值点,所以增加了脉冲幅值为 48 kV 的测试,得到数据为:进气口 SO<sub>2</sub> 浓度为 2.62 g/Nm<sup>3</sup>,出气口 SO<sub>2</sub> 浓度为 86.98 mg/Nm<sup>3</sup>,除尘效率为 96.68%.说明脉冲电压并非越大越有利于提

升除尘效率, 而是有一峰值, 故而选用 48 kV 作为后面测试所设定的脉冲电压幅值。

但是当频率更高后脱硫效率又急剧下降, 这一过程说明电场荷电会有饱和状态, 考虑到等离子体暂且选用 800 Hz 作为后面测试所设定的脉冲电压频率。



(a)



(b)

图 6 负载端波形图

Fig. 6 The waveform diagram of loads

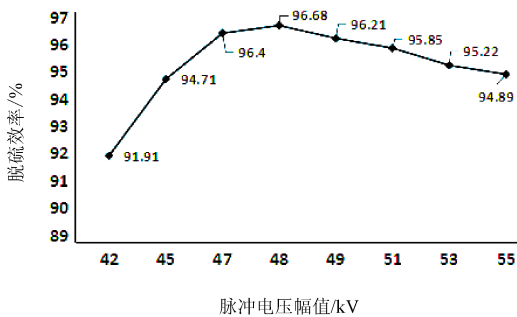


图 7 脉冲幅值和脱硫效率的关系

Fig. 7 Relationship between pulse amplitude and removal efficiency of SO<sub>2</sub>

### 4.2 脉冲频率影响

参考脉冲幅值的影响实验, 选用脉冲宽度 2 μs, 48 kV 的脉冲电压进行脉冲频率的影响研究实验, 同样绘制出其影响趋势图见图 8, 发现随着频率从 300 Hz 增加, 脱硫效率会渐渐增加, 到 900 Hz 以后, 脱硫效率又会慢慢减小, 不过速率较慢,

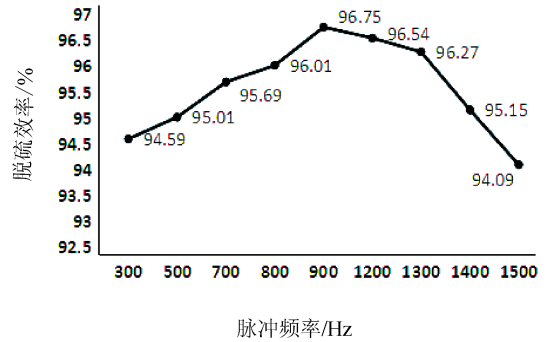


图 8 脉冲频率和除尘效率的关系

Fig. 8 Relationship between pulse frequency and removal efficiency of SO<sub>2</sub>

### 4.3 脉冲宽度影响

另一方面, 脉冲电压的宽度对脱硫效率也有影响. 同理, 参考上面脉冲幅值及脉冲频率的实验, 选用脉冲电压幅值 48 kV、脉冲频率为 800 Hz, 进行实验. 实验结果表明, 在脉冲宽度低于 1 μs 时, 脱硫效率随着脉宽的增加而提高, 1 μs 时脱硫效率达到最大, 脉宽高于 1 μs 时, 脱硫效率会慢慢降低. 脉冲宽度对脱硫效率的影响如下图 9 所示, 这说明脉冲宽度并非越宽越好, 在脉宽 1 μs 左右脱硫效率最高。

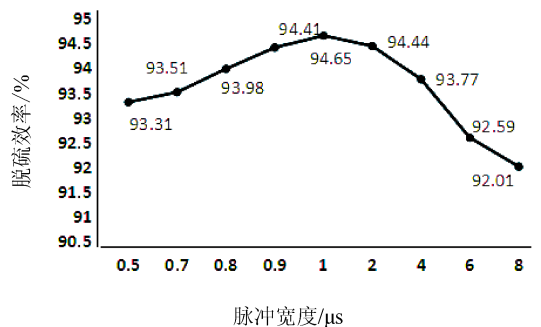


图 9 脉冲宽度与脱硫效率的关系

Fig. 9 Relationship between pulse width and removal efficiency of SO<sub>2</sub>

综上所述, 考虑脱硫效率和等离子体流光放电的产生机理, 选用脉冲频率为 800 Hz、脉冲电压幅值为 48 kV、脉冲宽度 1 μs, 直流电压幅值为 30 kV 的叠加方案作为该环境下最佳的脱硫反应器运行参数。

## 5 结 论

分析了流光放电等离子体脱硫原理,设计了一种等离子体脱硫用高压脉冲电源,与原直流电源叠加,产生稳定、宽范围和有效的流光,提高脱硫效率.利用 PSIM 仿真软件对主电路进行了仿真,并验证了理论分析的正确性.搭建了 17.5 kW 的高压电源系统实验平台,对系统的可行性进行了实地测试,得到了脱硫反应器最佳的运行参数.

### 参考文献:

[1] 王攀峰. 流光放电等离子体烟气脱硫反应器、电源及其匹配问题研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2005.

[2] Jiang Y Z, Shen J W, Wu Y, *et al.* Influence of resident time of  $\text{NH}_3$  in corona field on  $\text{DeSO}_2$  efficiency by pulse discharge [C]//Proceedings of the Fourth International Conference on Applied Electrostatics. Dalian: Electrostatics, 2001.

[3] 胡小吐, 邓咏佳. 流光放电等离子体氨法烟气脱硫脱

硝技术概述[J]. 硫磷设计与粉体工程, 2009(5): 11.

[4] 陈辉. 流光放电氨法脱硫技术在工程中的应用[J]. 硫酸工业, 2014(1): 31.

[5] 朱爱民, 宫为民, 刘书海, 等. 氨与脉冲电晕等离子体脱硫  $\text{SO}_2$  的协同效应[J]. 中国环境科学, 1997, 17: 37.

[6] Landreth R, Pena R G, Helcklen J. Thermodynamics of the reactions  $(\text{NH}_3)_n \cdot \text{SO}_2(\text{s}) \rightleftharpoons n\text{NH}_3(\text{g}) + \text{SO}_2(\text{g})$ [J]. J Phys Chem, 1974, 78: 1378.

[7] 唐国山. 工业电除尘器应用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.

[8] 蒋云峰, 李连永, 谢友金, 等. ESP 用脉冲高压电源研究[C]//第 15 届中国电除尘学术会议论文集. 蚌埠: 中国环境保护产业协会电除尘委员会, 2013.

[9] 刘军, 郭珊珊, 常磊, 等. 高压变压器寄生电容对串联谐振变换器特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32: 16.

[10] 陈雨. 锅炉烟气除尘脱硫综合治理技术应用[J]. 石化技术, 2016, 23: 129.

### 引用本文格式:

中 文: 王积成, 冯德仁, 宛传友, 等. 流光放电烟气脱硫用高压脉冲电源的研制[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2018, 55: 813.

英 文: Wang J C, Feng D R, Wan C Y, *et al.* Design of the pulsed high-voltage power for FGD of streamer discharge [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2018, 55: 813.