

电除尘器用感应叠加大功率高压脉冲电源的设计

赵海浩, 严智渊, 王孝俊, 胡晓峰, 张方建
江苏一同环保工程技术有限公司, 江苏 无锡 214437

摘要: 本文详细论述了现有脉冲电源在电除尘器上的原理与技术特性, 给出了一款用于电除尘器上的感应叠加大功率脉冲供电电源的设计思路与方案、提供了详细的实验数据。并通过现场使用, 证明了脉冲电源对于细小高比电阻粉尘颗粒的吸收、反电晕的抑制确有着极为明显的效果。

关键词: 电除尘器, 脉冲电源, 反电晕, 感应叠加

Design for the ESP of High-power High-voltage Pulsed Power with Induction Superposed

Zhaohaihao Yanzhiyuan Wangxiaojun Huxiaofeng Zhangfangjian
Jiangsu Yitong Environmental Engineering Technology Co.,Ltd, Wuxi 214437, China

Abstract: This article explicitly discusses about the pulsed generator's theory and technical characters on the ESP. It provides the design idea and proposal, which are used for the induction superposed hyperbaric pulsed power. It also offers detailed experiments' date. With applying to the scene, it has been proved that the pulsed generator, to the absorb of the small high resistivity and the suppression of anti-corona, has an obvious effect.

Keyword: Electrostatic Precipitator, pulsed generator, anti-corona, Induction superposed

中图分类号: TN86 文献标识码: B 文章编号: 1606-7517(2014)08-6-117

1 引言

电除尘器作为一种有效的脱除工业废气中固体颗粒的方法诞生于 20 世纪初期, 50 年代起电除尘器被广泛推广使用, 60 年代电除尘器已遍及各个工业部门。但是由于传统的电除尘器采用的是直流供电, 在处理高比电阻粉尘时, 沉积在集尘极板上的粉尘很难释放掉电荷, 极易引发反电晕, 从而表现出较低的效率和较高的能耗, 科研工作者长期以来一直探索解决这一问题的途径。大量的研究表明, 电除尘器采用脉冲电源供电时, 不但能提高收集高比电阻率 ($\rho > 10^{11} \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$) 的收尘效率, 同时能耗只有直流供电时的 1/5~1/2, 而且脉冲供电比直流供电能更好地处理高比电阻粉尘及抑制使电除尘

器运行性能恶化的反电晕现象, 因此对电除尘器采用脉冲供电是当今电除尘器供电电源的发展方向之一。

具有代表性的丹麦 F.L.Smith 对实际应用的电除尘器的微秒级脉冲供电技术和应用做了大量的研究工作。它采用贮能式原理, 有显著的节能优点。其典型参数是脉冲宽度 70~200 μs , 脉冲重复频率 25~400pps, 基础直流电压 40kV, 脉冲最高峰值电压 80kV。

2 常规直流供电电源在电除尘器的反电晕现象

2.1 反电晕的发生原理

电除尘器集尘极上灰尘的不断积累会严重影响电晕电

流。因为灰尘层电压的升高或者相应的极间的电压降低都会在一定程度上抑制电晕电流。而灰尘层的电压是与比电阻相关的，灰尘层的比电阻越大，灰尘层的电压就越高。当灰尘层的比电阻极高，集尘极上灰尘层的电压会显著地增大，最终超过击穿电压而发生灰尘的电场击穿时，就会产生反电晕现象。反电晕的形成条件用下式来表示：

$$E_{ds} = j \cdot \rho_d \quad (1)$$

其中 E_{ds} 为灰尘层的击穿电场强度， j 和 ρ_d 分别为电流密度和灰尘层的比电阻。

电除尘器采用常规直流供电时，电除尘器较佳的电流密度 $j=0.1\sim 0.5\text{mA/m}^2$ ，当灰尘层的比电阻达到 $\rho_d=10^{11}\sim 10^{12}\Omega\cdot\text{cm}$ 时，灰尘层的电场强度就开始逐渐超过击穿电场强度（一般为 $8\sim 12\text{kV/cm}$ ）。这时若极间仍有强电场，则击穿时产生的正离子将被迫离开集尘极向极间运动，从而形成火花。当 j 与 ρ_d 的乘积远远超过 E_{ds} 时，击穿会蔓延到整个集尘极表面，大量的正离子会离开集尘极，形成稳定的反电晕电流向放电极运动。实际上，在采用常规直流供电的情况下，电除尘器中的电流分布很不均匀，因而一般在更低比电阻情况下就将发生反电晕现象。

2.2 反电晕的危害

众所周知，电除尘器的除尘原理是由电晕极放电产生负电荷使得极间的灰尘带负电，这些荷电尘粒在极间电场力的作用下向集尘极运动。当反电晕时，集尘极电离出的正离子使得带负电的尘粒所带电荷被中和或者带上正电，因而大大减少了尘粒的荷电，使得尘粒脱离集尘极，或者改变方向，向放电极运动。这些都会影响除尘器的性能，降低除尘效率。因此，为了提高除尘效率，采取有效的防止反电晕的措施是必要的。

3 脉冲电源在电除尘器上的功能及电气特性及分析

3.1 脉冲电源供电优点

脉冲供电的优点在于它能够给电除尘器的电极间施加比直流击穿电压高得多的峰值电压，因此提高了粉尘微粒的荷电量和驱进速度，而驱进速度和除尘效率与工作电压的峰值成正比，其效率取决于峰值电压 V_p 、平均电压 V_r 和粉尘粒径 D ，公式如下：除尘效率 $\propto f(V_p \cdot V_r \cdot D)$ ，这也就说明了脉冲供电使粉尘微粒的驱进速度和收尘效率显著地提

高。可见，粉尘粒径越小，除尘器效率越低，为了解决细小粉尘带来的除尘器效率降低的问题，就必须增加峰值电压和平均电压。但是，如果用常规电源供电，在电除尘器电场未得到最高工作电压之前粉尘层就有可能发生击穿，从而导致反电晕的发生。要避免反电晕发生就必须在提高电除尘器电场电压的同时，不增加粉尘层上的电场强度，以避免粉尘层击穿。由于脉冲电源的充电周期（脉宽）远小于粉尘层的时间常数（ $t \approx 30\text{ms}$ ），并且粉尘上的电荷有放电回路和足够的放电时间，从而使粉尘上不易积累电荷，能有效地克服反电晕现象。

相对于直流供电电源一般的伏安特性外，对脉冲供电关系较大的还有介质的伏秒特性。按照气体击穿的理论，气体的击穿看起来似乎是突然发生的现象，但实际上仍需要一定的时间才能完成，这段时间称为放电时间。在长 1cm 的空气间隙中，放电时间约为 $10^{-7}\sim 10^{-8}$ 秒。在直流电压作用时，由于放电时间比原电压持续作用的时间要少得多，因此它实际上不影响击穿电压数值。但在脉冲电源供电时，由于脉冲电压波的作用持续时间（即脉冲宽度—简称脉宽）也不过几十至几百微妙和放电时间完全可以比较。因此这时电压作用时间的长短（脉宽）对击穿电压数值有很大影响。脉宽愈窄，击穿电压愈高；脉宽愈宽，则击穿电压愈低，这是因为介质的击穿需要一定的能量，也解释了电除尘脉冲供电时不宜产生闪络的原因。

3.2 脉冲电源对反电晕的抑制原理

除尘器在直流供电时，电场得到的电压为单极性电压，其电场等效电容 C_d 和粉尘层等效电容 C_g 上的电荷（如图 1 所示），无法通过供电回路释放，只能通过电场等效电阻 R_d 和粉尘层等效电阻 R_g 释放，粉尘层的时间常数 T_d 可以由下式给出：

$$T_d = RC = 8.85 \times \rho_d \times 10^{-14} (\text{s}) \quad (2)$$

其中 ϵ_s 为灰尘层的介电常数， ρ_d 为灰尘层的比电阻。

图中： d 粉尘厚度； g 电除尘器电场间距； V_g 电场电晕等效电压； C_d 粉尘层等效电容； C_g 电场等效电容； R_d 粉尘层等效电阻； R_g 电场等效电阻。

如当 $\rho_d=10^{12}\text{cm}\cdot\Omega$ 时， $T_d \approx 270\text{ms}$ ，当 $\rho_d=10^{11}\text{cm}\cdot\Omega$ 时， $T_d \approx 0.027\text{s}=27\text{ms}$ 。此时粉尘层时间常数与硅整流变压器供电电源的充电时间（ 10ms ）为同一数量级，粉尘层表面上的电荷在下次充电前只能泄放掉一部分，若供电电源是现在新型的高频直流电源，则几乎无法得到泄放。这样反复

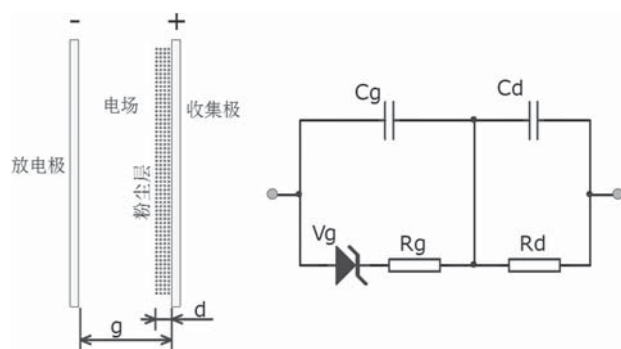


图1 电除尘器等效示意图

充电导致电荷积累的结果会使粉尘层维持在一个很高电压，从而可以得出，在 $\rho_d > 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ 时容易击穿从而导致发生反电晕。

要避免粉尘层击穿，就必须设法使供电电源的充电周期远小于粉尘层的时间常数，且粉尘层上的电荷有放电回路和足够的放电时间，即供电波形的等效频率较高，占空比较小，从而使粉尘层上不宜积累电荷，就可以有效地避免和克服反电晕。

对于常规电除尘器，电场间距 $g = 12\text{cm}$ ， $\epsilon_s = 3$ ，电场粉尘击穿强度 $E_d = 10\text{kV/cm}$ ，要使脉冲供电时粉尘击穿，需加在除尘器上的脉冲电压幅度为：

$$V_F = E_d * g * \epsilon_s = 10\text{kV/cm} * 12\text{cm} * 3 = 360\text{kV}$$

可见脉冲供电时粉尘层是不易击穿的，因为在粉尘层击穿前电除尘器电场早已击穿。而且由于脉冲电源供电时，脉冲电压的宽度为微秒级（50~600 μs ），这对于 $\rho_d > 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ 、灰尘层的介电常数 $\epsilon_s = 3$ （ $T_d = 27\text{ms}$ ）的高比电阻粉尘，可以认为脉冲电源供电时脉冲电压在除尘器中的分配是按电除尘器电容量和粉尘层电容量来分配的。

另外，脉冲电源采用谐振供电的方法，电压、电流波形等效频率高，不仅具有充电时间短、占空比可调整的特点，而且由于电场的电荷能通过谐振回路放电，因此能非常好地适应高比电阻粉尘的供电特性要求。

3.3 脉冲电源的技术参数及功能分析

现在市场比较成熟且使用较广的是丹麦 F.L.Smith 公司的微秒级脉冲供电电源电路结构技术，该电源在应用时需一维持在起晕电压附近的基础电压 $V_B(E1)$ ，以使脉冲电压 $V_p(E2)$ 施加期间，除尘器产生的荷电尘粒可以在 $V_B(E1)$ 产生的电场下进行迁移到集尘极上，从而达到收尘的

目的。其电路结构以及输出波形如下图 2、3 所示：

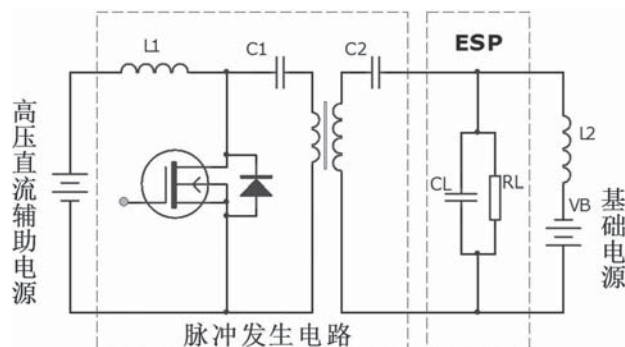


图2 脉冲电源供电结构原理图

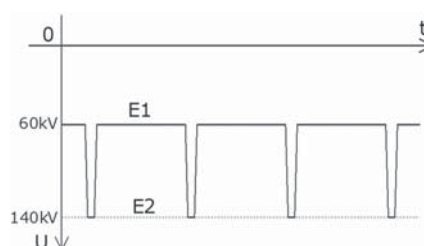


图3 脉冲电源电压波形图

主电路是由直流基础电压电路、脉冲功率电路及耦合电路构成。静电除尘器等效为一个电阻 R_L 和电容 C_L 的并联，通过电容 C_2 和电感 L_2 的耦合在高压直流电压上叠加高重复频率、微秒级的功率脉冲。电容 C_2 为隔直耦合电容，将产生的脉冲电压耦合到除尘器负载上，电容 C_2 的取值要满足 $1/\omega C_2 \gg 1/\omega C_L$ ，同样，电感 L_1 为直流滤波电感，能同时减小高压脉冲电源对直流基础电源的影响。

图 4 给出了脉冲电源等效工作原理图，其回路电流 I 满足的方程为：

$$V_0 = \frac{1}{C} \int_0^t I dt + RI + L \frac{dI}{dt} \quad (3)$$

式中：电容 C 为 C_1 和 C_2 、 C_L 的串联。

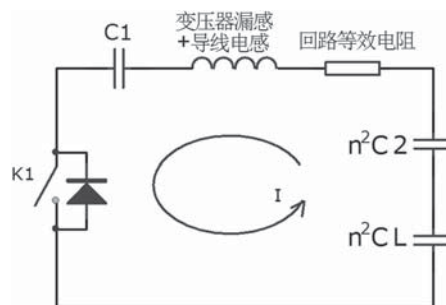


图4 脉冲供电电源等效原理图

在 K1 未导通时, C2 上的电压即除尘器上的电压等于基础电压 V_B , 在 K1 导通时, 脉冲电压通过 C2 耦合后叠加到基础电压上并施加于电除尘器 CL 上。谐振电流的前半周期 CL 充电; 后半周期 CL 通过开关管 K1 体内二极管放电, K1 自然关断。由此可见, 电除尘器粉尘层等效电容在脉冲电压施加期间所充的电荷在脉冲电压结束时也已经基本放电完毕, 这与常规直流或间歇供电电源供电时电除尘器是作为电源负载, 电除尘器粉尘层等效电容上的电荷是靠其通过电场等效电阻和粉尘层等效电阻自然泄放的情况完全不同。这可以从图 5 中所示的回路电流波形中看出:

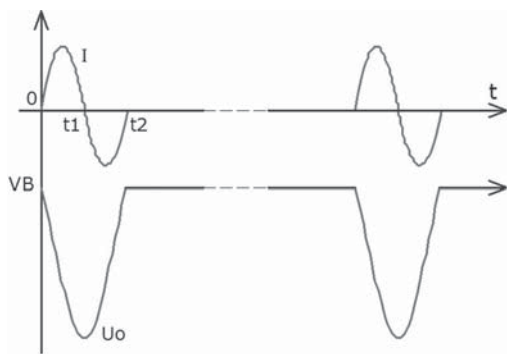


图5 脉冲电源回路电流、电压波形

电流波形的后半面积大小为前半面积的 90% 以上, 即电除尘器 CL 等效电容通过脉冲供电电源线路的谐振回路, 将除尘器在脉冲电压的前半周期得到的能量的大部分都在后半周期返回到了储能电容 C1 上, 因此大大节约了能耗。通常在高比电阻粉尘情况下, 达到相同的除尘效率, 脉冲电源比常规电源节约能耗 70~80%。

同时我们看到电除尘器采用脉冲供电时, 极间的电压波形、不等于电源脉冲波形, 而与电路时间常数 τ 有关, 即与负载电容 CL 和回路等效电阻 R_s 、漏感等分布参数有关。其前、后沿都要比供电脉冲平缓得多, 其陡度由时间常数决定。脉冲波形是否矩形与极间电压波形关系不大。实际上矩形和正弦半波脉冲供电, 它们对电收尘的电气特性影响都很接近。故此在设计脉冲电源时, 过分强调理想的矩形波输出和极大的电压陡度都是没有多大意义的。

同时我们也看到 F.L.Smith 公司的电源电路结构方式由于需要一个基础电源和一个高压辅助电源共两套电源, 以及高压大容量隔直电容 C2, 存在整机体积大, 控制繁复, 制造成本高等因素, 所以在使用、维护时会存在较高的成本。

而且受分布参数、漏感及该电路固有特性的限制, 其脉宽不可能做得很窄 ($70\mu s$), 不利于最高脉冲电压的实现。

4 感应叠加高压脉冲电源的设计

4.1 感应叠加型高压脉冲原理及方案电路

如图 6 所示, 该方案的基本原理是借鉴了感应加速器的的工作原理, 采用多个功率单元组合而成, 每个单元用 IGBT 作为开关器件驱动一个脉冲变压器, 利用电容电感谐振充放电, 变压器铁芯工作在 B-H 第一象限, 次级输出电压是所有单元次级电压的叠加, 输出电流是单元初级电流的 $1/n$ (n 为单元变压器变比), 每个单元的 IGBT 驱动可以共地, 绝缘设计比双脉冲电源容易。并且具有非常好的抗闪络及高压短路功能。此外采用这种方式分布电容可以得到大幅度减小, 这是因为在一个匝比为 $1:n$ 的传统变压器中, 设次级回路的电容量为 C , 则折合到原边的等效电容是 n^2C , 这将极大地限制脉冲的上升沿时间的减小, 同时会极大地增加开关功率管 IGBT 的电流。而在一个 N 单元的高压脉冲电路中, 每单元的变压器变比为 n/N , 则折合到原边的电容量将是 $(n/N)^2$, 影响会小很多, 有利于提高参数性能及降低 IGBT 开关电流。

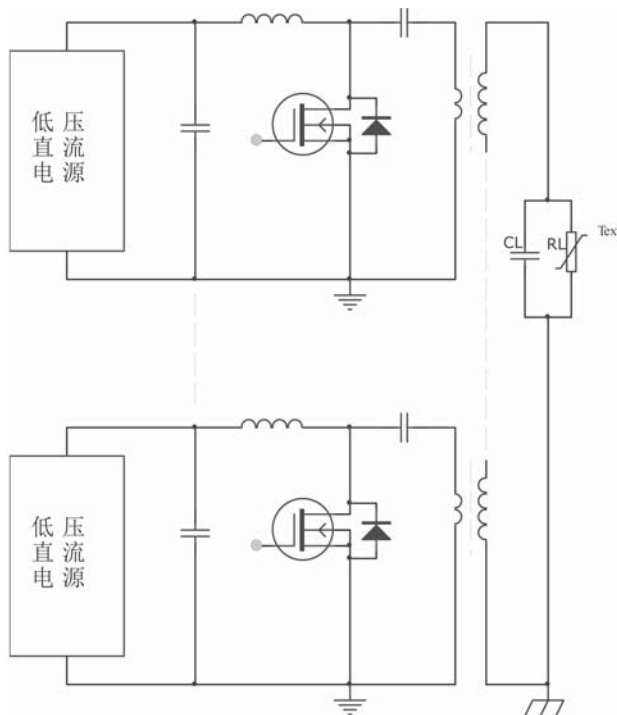


图6 感应叠加型高压脉冲串联原理图

最终我们采用的感应叠加型负载脉冲变压器的方案如图 7 所示，由 8 个脉冲单元加一个高压直流基础组成，每一个单元电路由一个变比为 1 : 12 的变压器耦合输出，总体技术指标如表 1 所示：

表 1

脉冲峰值电压	60kV
单元 IGBT 峰值电流	900A
单元脉冲变压器变比	1:12
脉冲宽度	最小 35 μ S，最大 120 μ S
抖动	1 μ S
重复频率	1500Hz

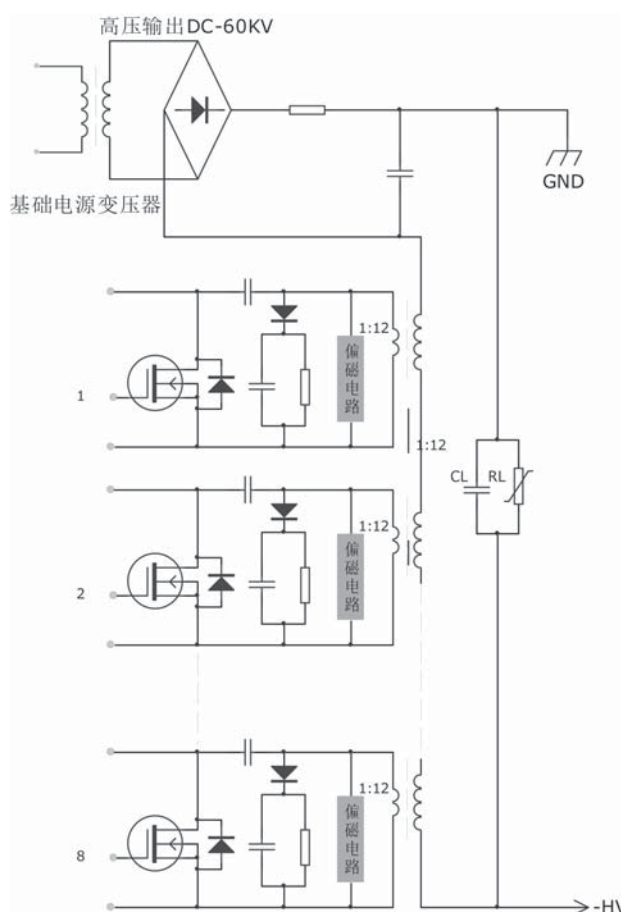


图7 脉冲感应叠加型高压电源原理图

与之前的高压脉冲电源相比较，新的感应叠加型高压脉冲电源具有原理清晰、脉冲重复频率高、脉宽窄、开关寿命长、供电电源单一、维护简单等优点。

4.2 单元电路设计原理

单元电路是本方案脉冲电源中的基本组成部分，其原理如图 8 所示。其主要部件包括 DC500V 直流母线电源（所

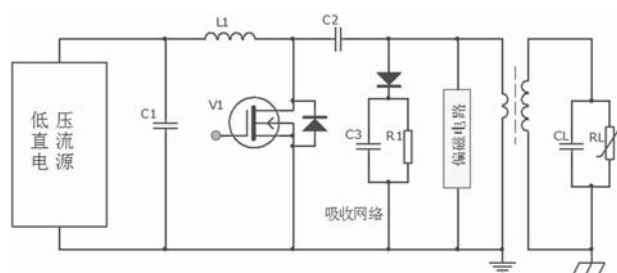


图8 单元电路基本原理图

有 8 组单元共用）超微晶脉冲变压器、储能电容 C2、偏磁电路、大功率 IGBT、反向吸收网络。

其工作原理是：IGBT 开关管受驱动电路脉冲信号触发后瞬间完全导通，储能电容中的能量瞬时通过 IGBT 向本单元变压器原边迅速释放，形成一强流脉冲，再通过单元脉冲变压器将脉冲传递到副边。偏磁电路为磁芯提供复位电流，以提高磁芯利用率、避免饱和。并且此工作期间时将除尘器的等效电容作为线路 LC 谐振回路的电容而工作。其等效电路如图 9 所示。

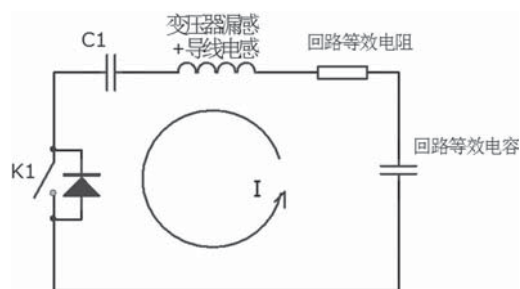


图9 单元脉冲电路等效原理图

5 试验测试与数据

5.1 试验条件及主要采样条件

试验负载为一等效电除尘器负载，等效电阻为 80k Ω ，等效电容为 0.03 μ F；电流互感器为 1 : 100（取样电阻 10 Ω ）；高压脉冲测量仪器型号为 MD-150，衰减比为 1 : 10000（带宽 75MHz），由美国北极星公司生产。

整机实物内部如图 9 所示，并通过上位机进行控制。外部接有两台示波器测量，一台测量 IGBT 电流、UCE 及驱动波形，另一路用于测量高压脉冲电压波形。

5.2 实验波形

实验波形如图 11、12 所示，通道 1 为驱动波形，通道



图10 脉冲电源装置实物及高压测量仪器图

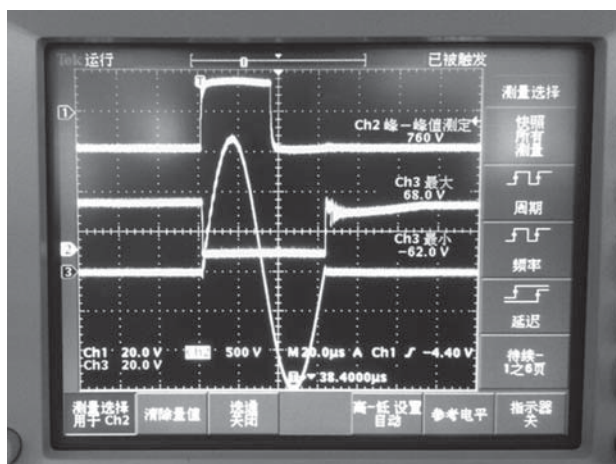


图11 单元电路电流、电压测量波形图

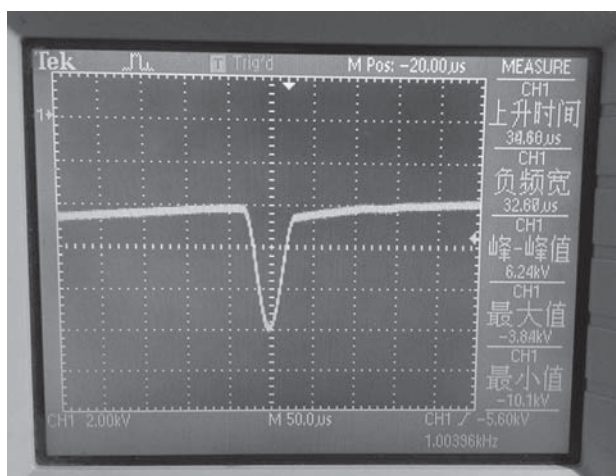


图12 8路叠加输出脉冲高压电压波形图

注：示波器可选择探头衰减比最大为1000：1，而实际测量仪器的衰减比为10000：1，所以实际测量结果要乘以10倍。

2 为一单元模块的 UCE 波形，通道 3 为回路电流波形，正半周（即储能电容将能量传递给负载充电过程）为 680A，负半周（即次级负载等效电容将能量回馈到储能电容上）为 620A；另一示波器显示的是输出高压电压波形，脉冲幅

值为 100.10kV，脉宽 32 μ s。从中可以看出，实际电流波形与我们前面所分析的 F.L.Smith 公司脉冲电源的电流、电压波形几乎完全一致，证明了此方案设计的正确性。

6 现场试验数据及结论

6.1 现场验证数据

按照该方案所研制的 2 台脉冲电源在工厂经过 168 小时老化测试合格后，安装于新澄特钢烧结机头 360m² 电除尘器 2 个四电场，取得了很好的减排和节能效果，具体数据如表 2、3 所示：

表2 改造前直流电源与改造后脉冲电源运行指标对比

改造前 粉尘出口浓度	改造后 粉尘出口浓度
30~65mg/Nm ³	12~23mg/Nm ³

表3 改造前后出口粉尘浓度对比

项目	直流电源		脉冲电源	
运行电压			基础DC 23kV	基础DC 23kV
	53kV	55kV	脉冲PS 52 kV PRF 500Hz	脉冲PS 52 Kv PRF 500Hz
一次电流	69A	71A	8.2A	8.0A
节约能耗			88%	89%

6.2 结论

通过以上的论述及实际测试数据可以看出，本文所论述的感应叠加大功率高压脉冲电源较 F.L.Smith 公司的电源电路结构在原理上更为清楚、并能够输出更窄的高压脉冲。同时也可以看到高压脉冲电源在电除尘器上的应用具有非常好的优势和前景，它既能极大地改善了实际工况中存在的高比电阻粉尘对电除尘器效率的影响，提高除尘效率；也可以大大节省电除尘器的用电量，是降低粉尘排放和减少能源消耗的可靠选择。对我国环保设备电源产品的产业结构调整和优化升级将产生重大的影响和积极的推动作用。

参考文献

- [1] Herbet .J.Hall : History of Pulse Energization in Electrostatic Precipitation, Journal of Electrostastics, 25(1990), PP 1-22
- [2] J.S.Clemens et al: Combined Removal of SO₂, NO_x and Fly Ash from Simulated Flue Gas Using Pulse Streamer

- Corona, IEEE/TA, 1989, 25(1). PP 62-69
- [3] G. Dinelli and M. Rea, Pulse Power Electrostatic Technologies for the Control of Flue Gas Emissions, Journal of Electrostatic, 26(1000). PP 23-40
- [4] Naoji Tachibana. Intermittent Energization on Electrostatic, Journal of Electrostatics, 25(1990). PP 55-74
- [6] 会议论文 陈焕其 改造电除尘器高压电源的理想设备直流叠加脉冲双电源输出装置 2001
- [7] 期刊论文 徐玉存, 王相綦, 冯德仁, 郝浩, 何宁, 尚雷, 赵枫, 李为民, XU Yu-cun, WANG Xiang-qi, FENG De-ren, HAO Hao HE Ning SHANG Lei ZHAO Feng, LI Wei-min 基于MOSFET的6X10单元快速固态调制器-强激光与粒子束 2008, 20(6)
- [8] 期刊论文 尚雷, 李为民, 丛晓艳, 谭泓, 陆业明, SHANG Lei, LI Weimin, CONG Xiaoyan, TAN Hong, LU Yeming 大功率固态调制器组元电路设计与实验-核技术2006, 29 (10)
- [10] 期刊论文 李济吾, 熊正明, 江小华, 林大建 电除尘器高压脉冲供电电收尘技术研究-环境保护科学2000, 26