

# 谐振高压等离子球磨电源研究\*

袁松,曾敏,李阳,胡子鑫

(华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641)

**摘要:** 等离子辅助球磨技术需要高压电源激发等离子场, 而目前高压等离子球磨电源存在开关管数目多、控制时序复杂、可靠性低等问题。研制了采用单管结构的谐振高压等离子球磨电源。首先介绍了主电路的工作原理, 详细分析了初级谐振网络的固有谐振频率及谐振参数选择; 利用变压器与负载的串联谐振网络进一步提高输出电压幅值; 通过 Simulink 仿真, 验证了主电路工作波形以及谐振电压增益, 其输出电压峰峰值可达到 24 kV 以上。在此基础上, 研制了一台输出功率 3 kW 样机, 并成功激发等离子场用于辅助球磨。

**关键词:** 可控硅; 外场辅助球磨; 高压电源; 谐振; 等离子体

中图分类号: TM832

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.201266

中文引用格式: 袁松, 曾敏, 李阳, 等. 谐振高压等离子球磨电源研究[J]. 电子技术应用, 2021, 47(9): 91–95.

英文引用格式: Yuan Song, Zeng Min, Li Yang, et al. Research on resonant high voltage plasma ball milling power supply[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(9): 91–95.

## Research on resonant high voltage plasma ball milling power supply

Yuan Song, Zeng Min, Li Yang, Hu Zixin

(School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** Plasma assisted ball milling technology requires high voltage power supply to excite the plasma field. However, high voltage plasma ball milling power supply has many problems such as large numbers of switch tubes, complicated control timing, and low reliability. Therefore, the high voltage plasma ball milling power supply based on single tube structure has been developed. Firstly, the working principle of the main circuit is introduced, and the inherent resonance frequency and resonance parameter selection of the primary resonance network are analyzed in detail. In addition, the voltage gain of the transformer and load series resonance network is utilized to further increase the amplitude of output voltage. Through Simulink software, the main circuit waveforms and the resonance voltage gain are verified. The peak-to-peak output voltage reach more than 24 kV. Based on the above, a prototype with an output power of 3 kW is developed, and the plasma field is successfully excited and used in auxiliary field ball milling.

**Key words:** silicon controlled rectifier; auxiliary field ball milling; high voltage power supply; resonance; plasma

## 0 引言

传统机械高能球磨中利用机械能使材料内部反复形变、细化、固相变化等过程以制备具有良好性能的化合物粉末<sup>[1]</sup>。但其机械能作用效率较低、耗能大且球磨过程需要较长时间, 容易带来介质污染<sup>[2]</sup>。针对上述问题, 等离子体辅助球磨技术应运而生<sup>[3-4]</sup>, 利用等离子体激发的高活性粒子对表面的活化与机械破碎的双重作用加强了粉末细化, 大幅提高了球磨的效率, 且等离子球磨在真空电离, 不会带来污染物。等离子球磨过程中等离子放电与机械效应的比值不同对辅助球磨的影响不同, 因此研制具有可控放电参数的高压等离子球磨电源具有重要意义。

以往工频高压电源整机效率低, 变压器体积及损耗较大, 因此越来越多的高压等离子电源采用高频电源<sup>[5]</sup>, 利用在放电电极间施加高频高压交流电来激发等离子体, 减少了电源体积和提高了电源效率。目前高压高频电源存在控制结构复杂的问题, 一般采用前级全桥整流电路, Buck 电路直流调压加上全桥逆变结构, 完成由 AC-DC-AC 的变换, 时序控制复杂<sup>[6-8]</sup>, 电源可靠性较低, 不利于等离子体辅助球磨系统长时间的稳定工作。

本文提出了采用单管结构的谐振高压等离子球磨电源, 只需要控制单个开关管脉冲信号即可调节高压等离子球磨电源输出交流电压的频率与幅值, 并利用高压变压器与负载的谐振网络进一步提高输出电压的幅值。

\* 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFD0400903); 广东省基础与应用基础研究基金项目(2021A1515011773); 广州市科技计划项目(201904010272)

最后通过 Simulink 对电路进行仿真验证，在此基础上研制了最大输出电压峰峰值为 24 kV、输出功率为 3 kW 样机，并进行等离子辅助球磨的放电测试。

## 1 工作原理与谐振参数设计

### 1.1 主电路及其原理

本文采用的谐振高压等离子球磨电源主电路与等效负载如图 1 所示。220 V 交流电由隔离变压器  $T_1$  降压为 110 V 交流电，再经过全桥整流滤波输出为 150 V 平滑直流电，作为给谐振变换电路的输入。谐振电感  $L_1$ 、谐振电容  $C_3$ 、可控硅 SCR、RC 缓冲电路  $C_2$  和  $R_2$  以及反向二极管  $D_5$  组成谐振变换电路，经过谐振变换后得到可调频的交流电压作用于高压变压器  $T_2$  初级，高压变压器次级升压至 20 kV 交流电压用来激发等离子体。等离子负载可等效为  $R_L$  和  $C_L$  并联电路<sup>[9]</sup>， $R_L$  等效为激发等离子体过程中功率电阻模型， $C_L$  则为等效放电间隙的电容模型。

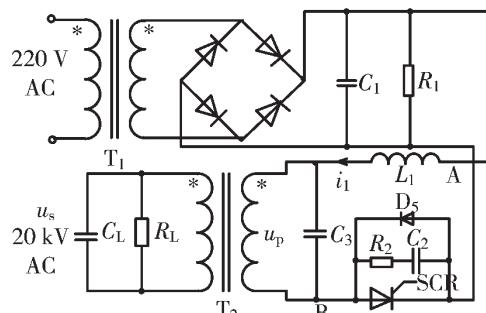


图 1 主电路示意图

谐振高压等离子球磨电源的主电路工作波形如图 2 所示，其中  $u_p$  为  $T_2$  变压器初级电压， $u_s$  为负载电压。在  $t_0$  时刻触发可控硅导通，电感电流  $i_1$  和电压  $u_p$  为谐振状态，一直到  $t_1$  时刻，可控硅因电流反向而自然关断，电流转移到二极管  $D_5$ ，直到  $t_2$  时刻电流  $i_1$  第二次反向，二极管  $D_5$  关断，能量传输阶段结束，到  $t_3$  时刻开始新的开关周期。

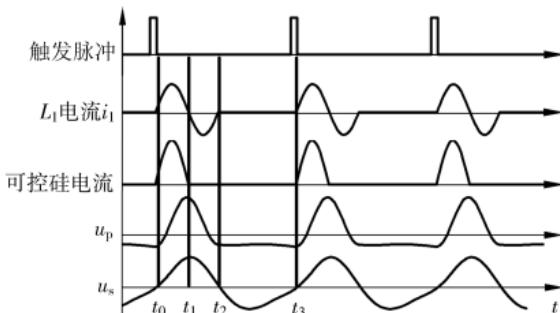


图 2 主电路工作波形简图

### 1.2 谐振参数设计

在  $t_0 \sim t_2$  时间里，可控硅 SCR 以及反向二极管  $D_5$  先后导通，电路  $L_1$ 、 $C_3$  以及等效变压器负载  $Z_L$  参与谐振，等效初级谐振电路如图 3 所示。图中  $\dot{U}_{in}$  为图 1 中 AB 两点

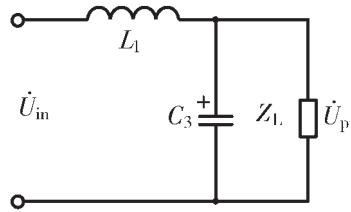


图 3 等效初级谐振电路

的电压相量， $\dot{U}_p$  为变压器  $T_2$  初级电压  $u_p$  的相量形式。

实际电路中  $Z_L \gg 1/(\omega C_3)$ ，其中  $\omega$  为工作角频率，因此等效谐振电路可看作串联谐振电路，其固有谐振频率可表示为：

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_3}} \quad (1)$$

$t_0 \sim t_2$  这段谐振时间也可表示为：

$$t_{02} = 2\pi\sqrt{L_1 C_3} \quad (2)$$

为了使高压等离子电源起振，可控硅 SCR 的脉冲频率  $f_G$  要满足式(3)：

$$f_G < f_1 \quad (3)$$

当  $f_G \geq f_1$  时，流过可控硅的电流未第二次过零点时就给予开通脉冲信号，导致可控硅无法自然关断，最后起振失效。另外从图 3 可得到工作频率与输出电压的关系式：

$$\dot{U}_{in} = j\omega L_1 \dot{I}_1 - j \frac{1}{\omega C_3} \dot{I}_1 \quad (4)$$

$$\dot{U}_p = \frac{1}{1 - \omega^2 L_1 C_3} \dot{U}_{in} \quad (5)$$

从式(5)中可得随着工作角频率  $\omega$  的增加，升压变压器  $T_2$  初级电压也随之上升，从而通过控制可控硅工作频率可以控制电源输出电压的幅值大小。

### 1.3 变压器与负载谐振网络

为了实现 20 kV 级别的高电压输出，通常升压变压器  $T_2$  的匝数比往往较高，变压器效率较低。这里通过变压器与负载谐振，进一步提高变压器次级输出电压幅值，使电源在较低匝比下输出高电压，拓宽高压等离子球磨电源的工作频率范围。图 4(a)所示为变压器等效电路与负载，图 4(b)为转换后变压器与负载等效电路。

图 4(a)中， $R_p$  和  $L_p$  分别为初级等效电阻和初级等效漏感， $R_s$  和  $L_s$  分别为次级等效电阻和次级等效漏感，用  $R_m$  和  $L_m$  表示对磁芯的磁化特性建模。等效处理后得到图 4(b)变压器与负载谐振电路，具体关系如下：

$$k = N_p / N_s \quad (6)$$

$$\begin{cases} R_{eq} = R_p + R_s k^2 \\ L_{eq} = L_p + L_s k^2 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} R'_L = R_L k^2 \\ C'_L = C_L / k^2 \end{cases} \quad (8)$$

式中： $k$  为变压器  $T_2$  的匝数比； $N_p$  为初级匝数， $N_s$  为次级匝数。

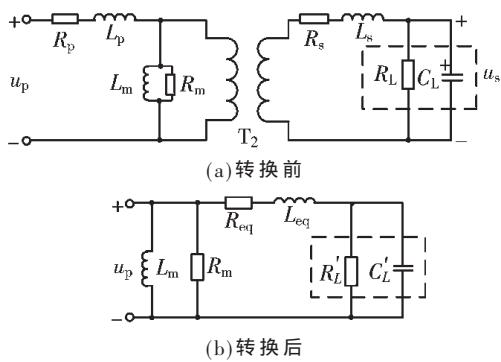


图 4 等效变压器与负载谐振电路

为了使变压器与负载产生谐振,需要等效电路中的  $L_{eq}$ 、 $R_{eq}$  与等效负载的  $C_L$  和  $R_L$  的电抗相加等于 0,从而得到其谐振频率  $f_L$  为:

$$f_L = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{C_L L_{eq}} - \frac{1}{C'_L R'_L}}$$
 (9)

当可控硅工作在变压器与负载谐振频率  $f_L$  附近时,可在次级得到超过匝数比的高压,具体由式(10)得到:

$$u_s = u_p Q/k$$
 (10)

$$Q = \frac{R_L \sqrt{\frac{C_L}{L_{eq}}}}{R_{eq} \left( \frac{C_L R_L}{L_{eq}} - \frac{1}{R_L} \right) + 1} > 1$$
 (11)

式中,  $Q$  为变压器  $T_2$  初级电压与负载电压增益。

通过在 Simulink 搭建如图 4(b)所示的变压器与负载模型,设置  $u_p=110\sqrt{2} \sin\omega t$ ,  $f_L=12$  kHz, 对不同的  $Q$  值进行仿真,仿真结果如图 5 所示。

从图 5 仿真结果中可以看出,  $Q$  值越大以及可控硅工作频率  $f_G$  越接近变压器与负载的谐振点  $f_L$ , 得到的变压器次级电压值就越高。

因此高压等离子球磨电源可控硅工作频率  $f_G$  的范围应小于固有谐振频率  $f_i$ , 同时接近谐振频率  $f_L$ , 为简化控制与电路参数设计, 取  $f_L$  为可控硅工作频率  $f_G$  的上

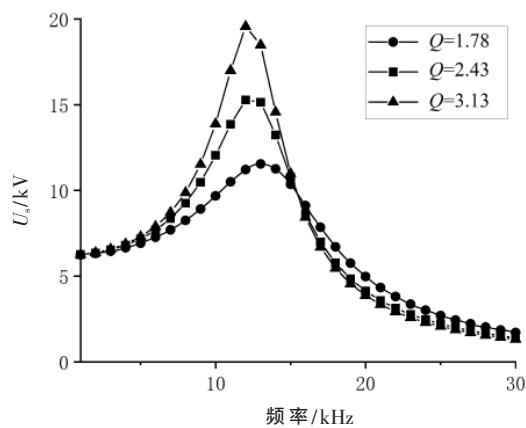


图 5 变压器与负载谐振的频率响应

限值, 工作频率  $f_G$  越高, 输出电压幅值也越大。

## 2 仿真结果与实验分析

### 2.1 仿真分析与验证

基于上述原理, 在 Simulink 仿真软件中, 搭建如图 1 所示电路, 通过对上述公式进行合理取值, 使得由式(1)、式(9)计算可控硅工作频率  $f_G=f_L=12$  kHz< $f_i=27$  kHz, 基于此条件得到高压等离子电源的仿真波形如图 6 所示。

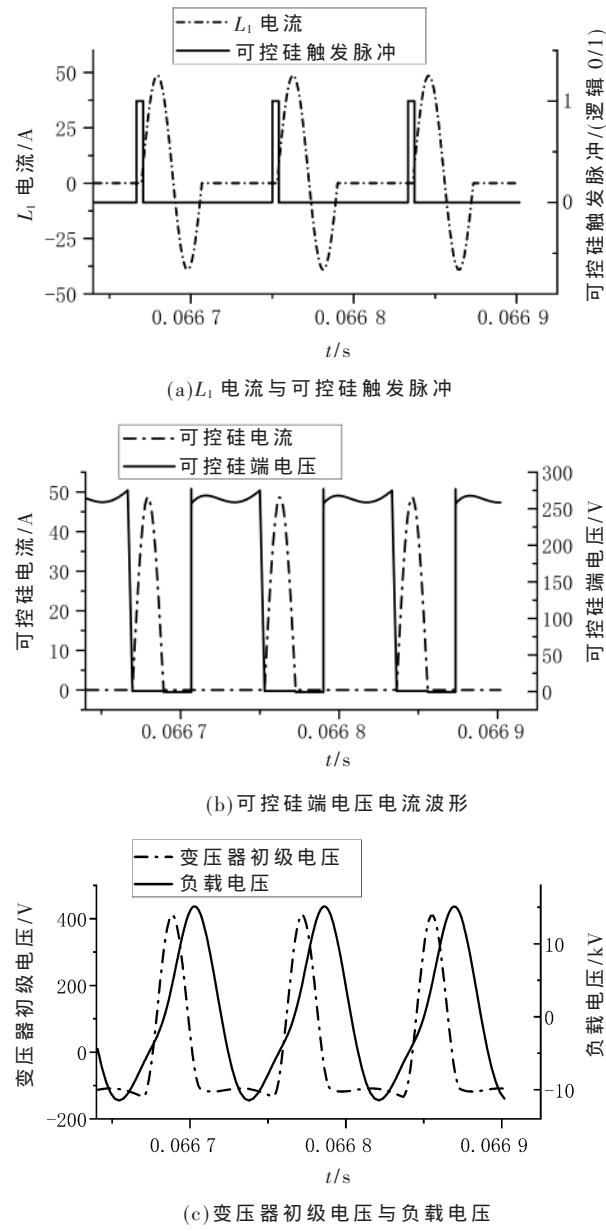


图 6 主电路仿真波形

从图 6(a)中可得  $L_1$  电流的谐振时间  $t_{01}=37 \mu s$ , 与计算谐振频率  $f_i=27$  kHz 相符。可控硅的控制信号采用脉冲逻辑信号触发。图 6(b)为同一时间轴下的可控硅端电压电流波形, 可以看出可控硅工作在自然关断状态, 在正半周可控硅电流为  $L_1$  电流。图 6(c)为高压变压器  $T_2$  初级与负载电压波形, 通过分析初级电压与负载电压

的基波幅值,得  $U_p=207\text{ V}$ ,  $U_s=12.6\text{ kV}$ ,此时电压增益比  $Q=1.5$ ,负载电压峰峰值超过  $20\text{ kV}$ ,满足球磨电源激发等离子体设计要求。

## 2.2 实验结果

基于上述原理和仿真结果,搭建了高压等离子电源样机,样机电路参数如下:谐振电感  $L_1=36\text{ }\mu\text{H}$ ,谐振电容  $C_1=1\text{ }\mu\text{F}$ ,滤波电容  $C_2=200\text{ }\mu\text{F}$ ,变压器  $T_2$  匝数比  $k=1/40$ ,等效初级漏感  $L_p=1.25\text{ mH}$ ,等效励磁电感  $L_m=8\text{ mH}$ 。图 7 为可控硅工作频率为  $7\text{ kHz}$  时的样机波形。

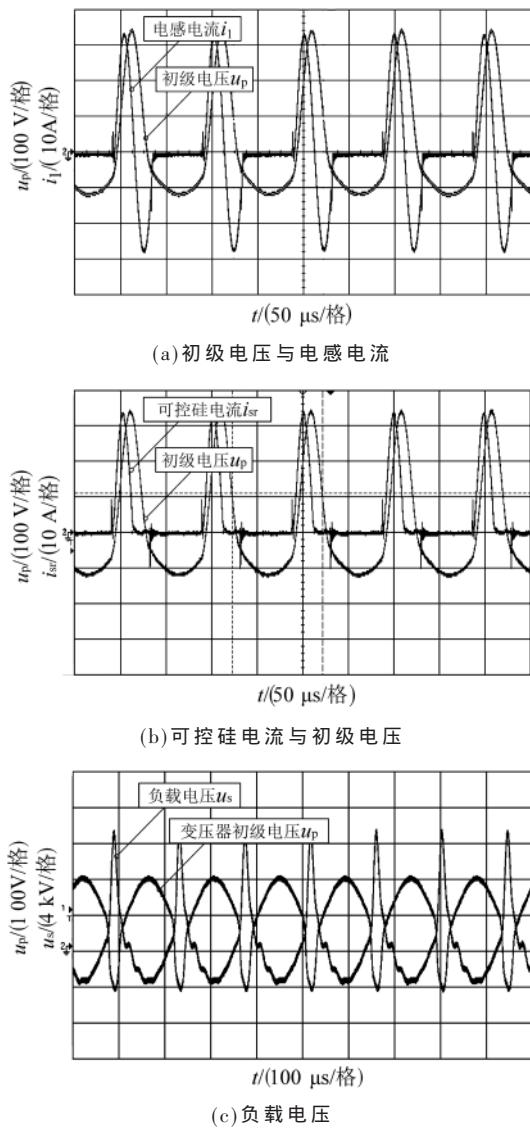


图 7 样机实验波形

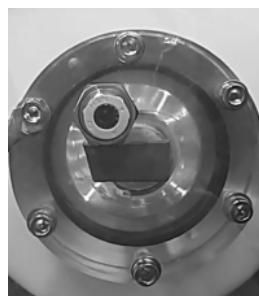
由图 7(a)、图 7(b)可得电感电流  $i_1$  和可控硅电流  $i_{sr}$  与仿真图 6 中一致。为方便观察,将图 7(c)中的变压器初级电压波形反相后与负载电压波形比较,负载电压波形呈现正弦波,与仿真图 6(c)一致。为了验证本文等离子球磨电源的输出电压可控,进行了多组频率实验,结果如表 1 所示。

表 1 不同工作频率  $f_G$  样机输出

工作频率/kHz	初级电压有效值/V	负载电压有效值/kV	负载电压峰峰值/kV
7.0	109	4.95	20.0
8.1	115	5.45	22.7
9.2	121	5.94	23.4
10.1	128	6.37	24.0
11.1	133	6.73	24.5

表 1 中,随着可控硅工作频率  $f_G$  的增加,负载电压峰峰值也随之增加,从  $20\text{ kV}$  增加至  $24.5\text{ kV}$ ,保证了负载电压幅值的可控性,实现等离子辅助球磨的放电参数可调。

图 8 为实际等离子辅助球磨的放电效果,采用同轴式放电结构,可见研制的谐振高压等离子球磨电源成功激发等离子体,在球磨室内发出淡蓝色辉光,作用在制备材料表面。



## 3 结论

本文研制的谐振高压等离子球磨电源,满足等离子辅助球磨的放电要求,放电参数调节,以满足不同比例作用的机械力与等离子放电实验。电源主电路通过初级谐振网络的频率选择简化了电路参数设计,次级输出电压通过变压器负载谐振网络进一步提高输出电压幅值,其控制结构简单,易于在等离子辅助球磨领域推广应用。

## 参考文献

- [1] 朱敏.纳米结构合金的机械合金化制备[J].华南理工大学学报(自然科学版),2002(11):89-94.
- [2] 陈志鸿.放电等离子体辅助球磨机的改进及其效能的研究[D].广州:华南理工大学,2016.
- [3] 魏钰坤,廖海峰,颜海涛,等.介质阻挡放电等离子体辅助球磨对纳米  $\text{TiO}_2$  粉体的表面改性[J].材料导报,2020,34(14):14039-14044.
- [4] 陈祖健.等离子体辅助球磨制备碳化物和碳氮化物[D].广州:华南理工大学,2019.
- [5] 王振民,吴健文,范文艳,等.基于 SiC MOSFET 的谐振开关等离子体电源[J].华南理工大学学报(自然科学版),2019,47(1):1-6.
- [6] 黄继强,薛龙,吕涛,等.可控谐振的 DBD 型臭氧发生器电源[J].高电压技术,2010,36(2):444-449.
- [7] 王立娟,李俊,王中武.基于 DSP 的高频高压交流电源的优化[J].电子器件,2018,41(6):1587-1591.
- [8] 王其斌,李俊.用于产生冷等离子体的高频高压电源的研制[J].电气传动,2017,47(1):78-80.
- [9] CHINGA R A, LIN J S, ROY S. Self-tuning high-voltage high-frequency switching power amplifier for atmospheric-based plasma sterilization[J]. IEEE Transactions on Plasma



## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所