

# 大功率低纹波等离子喷涂斩波电源研制

汪殿龙<sup>1</sup>, 黄浩<sup>1</sup>, 邹显鑫<sup>1</sup>, 梁志敏<sup>1</sup>, 吴朝军<sup>2</sup>

(1. 河北科技大学, 河北省材料近净成形技术重点实验室, 石家庄, 050000; 2. 航天材料及工艺研究所, 北京, 100076)

**摘要:** 等离子喷涂电源通常采用可控硅整流电源或逆变电源, 存在效率低、输出电流纹波大等问题, 难以满足等离子喷涂工艺的特殊要求. 文中提出了一种基于八相交错并联 Buck 变换器的大功率等离子喷涂斩波电源. 首先设计了斩波电源的电路拓扑, 分析了斩波电源的工作原理和电流纹波产生机理, 阐明了并联相数、占空比对电流纹波的影响规律, 并进行了仿真验证. 然后, 基于等离子喷涂工艺对电源特性的要求, 设计出功率为 40 kW 的四相交错并联模块, 在 CAN 总线协同控制下, 组成 80 kW 的八相交错并联斩波式等离子喷涂电源. 最后, 搭建了等离子喷涂斩波电源样机, 进行了喷涂试验, 测试了电源的输出纹波和效率. 试验结果表明, 与传统的可控硅整流电源和逆变电源相比, 斩波电源的电流纹波率降低 50% 以上, 电源效率最高达到 94.5%.

**创新点:** (1) 提出了一种基于八相交错并联 Buck 变换器的等离子喷涂斩波电源.  
(2) 基于等离子喷涂斩波电源, 设计八相交错并联 Buck 变换器的控制器.

**关键词:** 等离子喷涂; 斩波电源; Buck 变换器; 交错并联; 电流纹波

**中图分类号:** TG 434.1

**文献标识码:** A

**doi:** 10.12073/j.hjxb.20220419001

## 0 序言

等离子喷涂具有电弧温度高、喷涂粉末飞行速度快、涂层结合强度高、气孔率低等优点, 成为应用最广泛的热喷涂工艺<sup>[1-2]</sup>, 在航空、航天、冶金、石化、汽车、海洋防护、电子以及生物等领域发挥了重要作用<sup>[3-5]</sup>.

等离子喷涂利用非转移型等离子弧, 经等离子喷涂喷枪对喷涂气体进行机械压缩、热压缩和磁压缩, 产生高温、高速的等离子弧, 喷涂粉末在等离子弧中得到充分加速, 进而与工件表面达到紧密的机械结合<sup>[6]</sup>. 等离子喷涂的工作气体为还原性气体(如 H<sub>2</sub> 气)和惰性气体(如 Ar 气), 可保护喷涂粉末和工件不被氧化, 因而可得到高质量的喷涂涂层<sup>[7]</sup>. 在等离子喷涂过程中, 氩气流量主要影响等离子弧的速度, 氢气流量主要影响等离子弧的温度<sup>[8]</sup>. 等离子弧温度高, 可快速熔化难熔的喷涂粉末; 喷涂粉末速度快, 得到的涂层结合强度高、孔隙率低.

等离子喷涂设备主要包括电源、喷枪、控制柜、水电转接箱、送粉器及冷却装置<sup>[9]</sup>. 等离子喷涂电

源为整个喷涂过程提供能量, 其工作电流和电压是影响涂层质量的重要参数. 为确保获得优良的涂层性能, 等离子喷涂电源首先要提供足够的能量, 其次要有良好的动特性. 因此, 等离子喷涂电源正朝着大功率、高效率、低纹波及高精度的方向发展<sup>[10]</sup>. 欧美国家对等离子喷涂电源的研究工作起步较早, 现已涌现出一批大型的跨国公司, 如瑞士的 Oerlikon Metco、美国的 Praxair 和德国的 GTV 公司等分别开发了自己的系列产品.

北京航空制造工程研究所在 20 世纪 70 年代成功研制了第一台 80 kW 的磁放大器式二极管整流电源, 其效率仅为 50% ~ 60%, 且体积大、成本高、可控性差, 基本已被市场淘汰<sup>[11]</sup>. 针对磁放大器式二极管整流电源存在明显的不足, 20 世纪 90 年代甘肃工业大学成功研制了 PLC 控制的晶闸管整流式等离子喷涂电源, 其控制特性好, 但未能推广到工业应用上<sup>[12]</sup>. 北京航空制造工程研究所又自行研制了 80 kW 高性能可控硅等离子喷涂电源, 效率仅为 70% ~ 80%, 由于主电路采用非全波整流, 等离子喷涂工作中会产生高次谐波, 对电网造成污染, 并且抗干扰能力较差<sup>[13]</sup>, 所以现阶段只有一部分性能稳定、技术成熟的可控硅整流电源仍在使用.

21 世纪以来, 国内大学与研究院相继开展等离

子喷涂逆变电源的研制. 北京航空制造工程研究所于2002年成功研制NB-800型等离子喷涂逆变电源,其电源额定功率80 kW,额定电压80 V,额定电流1 000 A,电源的主电路拓扑采用四组电源并联组合结构,电源效率在85%左右<sup>[14]</sup>. 河北科技大学研制了基于TMS320F2812的等离子喷涂数字化软开关逆变电源,通过控制PID参数解决电弧电流发散振荡和熄弧的问题<sup>[15]</sup>. 但等离子喷涂逆变电源因设计过于复杂,降低了电源的可靠性,增加了控制精度的不稳定性. 更重要的是,逆变电源没有从根本上解决输出电流纹波大的问题,造成喷枪寿命短、涂层质量不稳定,限制了涂层性能进一步提升,很难在工业领域进行大批量生产.

针对目前等离子喷涂电源效率低、电流纹波大、控制精度差、电路结构复杂且成本较高等缺点,文中提出一种基于2个四相交错并联Buck变换器通过CAN总线并联,形成八相交错并联Buck变换器的大功率等离子喷涂斩波电源. 其中,Buck变换器作为一种传统的电源结构更容易实现高频,可以任意调节占空比,具有工作效率高、控制精度高、动态响应快、参数稳定等优势<sup>[16]</sup>. Buck变换器采用交错并联技术可以大幅降低电流纹波,进而降低等离子弧的波动. 结合工程应用背景,研制试验样机,并进行斩波电源的性能分析和等离子喷涂点火试验,验证理论分析和工程设计的正确性.

## 1 斩波电源拓扑结构

### 1.1 主电路拓扑

等离子喷涂斩波电源主电路拓扑如图1所示. 三相380 V交流电经变压器降压为三相200 V交流电后,通过整流桥模块和滤波电容将交流电变为直流电. Buck变换器模块使用四相交错并联技术,单模块功率为40 kW,文中使用2个Buck变换器模块通过CAN总线交错并联组成大功率等离子喷涂斩波电源,总功率为80 kW. 若需要更大功率,可

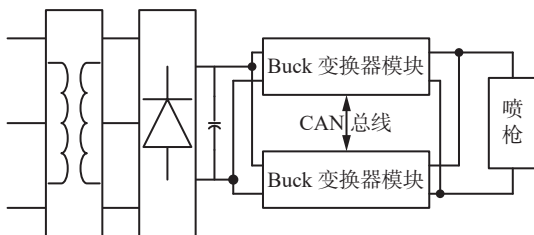


图1 斩波电源的主电路拓扑

Fig. 1 Main circuit topology of chopper power supply

以使用多个Buck变换器模块并联达到等离子喷涂电源大功率、低纹波、高效率的需求.

图2为四相交错并联Buck变换器的拓扑结构,该拓扑采用共正极轨Buck变换器的交错并联技术,降低了Buck变换器驱动电路的复杂性. 其中,4路Buck变换器的电气参数一致,各支路电感电流均为四相交错并联Buck变换器总电流的1/4,4个开关管的驱动信号依次相差90°,有助于降低输出电流纹波和开关器件的开关应力. 2个四相交错并联Buck变换器模块通过CAN总线进行交错并联,8个开关管的驱动信号依次相差45°,形成基于八相交错控制时序的等离子喷涂斩波电源.

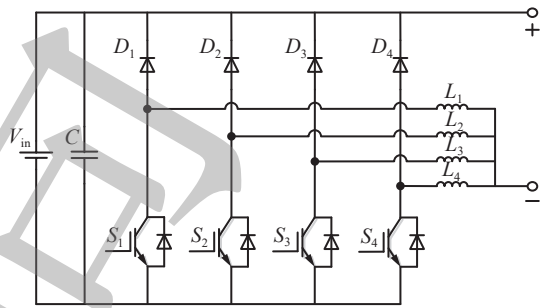


图2 四相交错并联Buck变换器

Fig. 2 Four-phase interleaved parallel Buck converter

### 1.2 纹波产生机理

单相Buck变换器的输出电流为流过功率电感的电流. 在一个开关周期内,功率电感有储能和释能两种状态,因此会产生电流纹波.

在输入输出不变的前提下,当开关管导通时,电感电流变化量为

$$\Delta i_{L1} = \int_0^{t_1} \frac{V_S - V_O}{L} dt = \frac{V_S - V_O}{L} D T_S \quad (1)$$

式中: $\Delta i_{L1}$ 为电流增加量(A); $V_S$ 为输入电源电压(V); $V_O$ 为输出电压(V); $L$ 为电感(H); $T_S$ 为开关周期(s); $D$ 为开关管接通时间占空比; $t_1$ 是开关管截止时刻.

当开关管截止时,电感电流变化量为

$$\Delta i_{L2} = - \int_{t_1}^{t_2} \frac{V_O}{L} dt = - \frac{V_O}{L} (T_S - D T_S) \quad (2)$$

式中: $\Delta i_{L2}$ 为电流减少量(A); $t_2$ 是开关周期截止时刻.

由于稳态时两个电感电流变化量相等,即 $\Delta i_{L1} = |\Delta i_{L2}|$ ,所以

$$V_O = D V_S \quad (3)$$

图3为Buck变换器运行在连续导通模式时的两种工作模式. 开关管开通期间,电流通过负载流向开关管,功率电感处于储能状态,电感电流线性增加;开关管截止期间,负载通过续流二极管进行

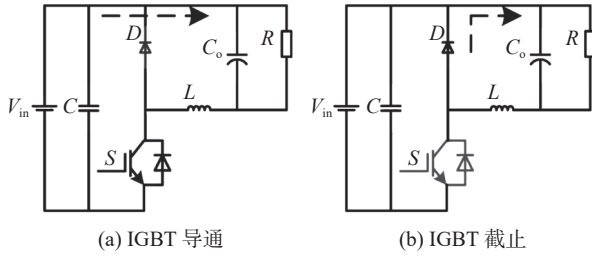


图 3 Buck 变换器工作模式

Fig. 3 Buck converter working mode. (a) IGBT is turned on; (b) IGBT is turned off

续流, 功率电感处于释能状态, 电感电流线性减小。

文中采用 2 组四相交错并联 Buck 变换器模块进行交错并联形成八相交错控制时序的斩波电源, 其 8 个开关管驱动信号交错导通, 相位角两两之间相差  $45^\circ$ , 为等离子喷涂斩波电源提供更大的功率和更小的电流纹波。

通过分析, 八相交错并联 Buck 变换器的工作原理分别以  $1/8, 1/4, 3/8, 1/2, 5/8, 3/4, 7/8$  作为分段点。推导出八相交错并联 Buck 变换器输出电感电流纹波与占空比关系为

$$\Delta i_{Lo} = \begin{cases} \frac{U_{in}}{L \cdot f} (1 - 8D) D, & 0 < D \leq \frac{1}{8} \\ \frac{U_{in}}{L \cdot f} (2 - 8D) \left(D - \frac{1}{8}\right), & \frac{1}{8} < D \leq \frac{1}{4} \\ \frac{U_{in}}{L \cdot f} (3 - 8D) \left(D - \frac{1}{4}\right), & \frac{1}{4} < D \leq \frac{3}{8} \\ \frac{U_{in}}{L \cdot f} (4 - 8D) \left(D - \frac{3}{8}\right), & \frac{3}{8} < D \leq \frac{1}{2} \\ \frac{U_{in}}{L \cdot f} (5 - 8D) \left(D - \frac{1}{2}\right), & \frac{1}{2} < D \leq \frac{5}{8} \\ \frac{U_{in}}{L \cdot f} (6 - 8D) \left(D - \frac{5}{8}\right), & \frac{5}{8} < D \leq \frac{3}{4} \\ \frac{U_{in}}{L \cdot f} (7 - 8D) \left(D - \frac{3}{4}\right), & \frac{3}{4} < D \leq \frac{7}{8} \\ \frac{U_{in}}{L \cdot f} (8 - 8D) \left(D - \frac{7}{8}\right), & \frac{7}{8} < D \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\Delta i_{Lo}$  为输出总电流纹波 (A);  $U_{in}$  为输入电压 (V);  $f$  为主功率管开关频率 (kHz);  $L$  为 8 路电感量, 满足  $L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = L_5 = L_6 = L_7 = L_8 = L$ 。

最大纹波电流值为

$$\Delta i_{Lo\_max} = \frac{U_{in}}{32L \cdot f} \quad (5)$$

图 4 为多相交错并联 Buck 变换器输出电流纹波系数与占空比关系曲线图, 可以看出, 在相同条件时, 并联相数越多, 输出电流纹波越小。斩波电源选取八相交错并联 Buck 变换器, 占空比在 0.125, 0.25, 0.375, 0.5, 0.625, 0.75, 0.875 实现了零电流纹波, 电流纹波频率比单相电流纹波频率扩大了

8 倍, 最大电流纹波系数比单相 Buck 变换器减小了 8 倍, 且最大电流纹波仅为  $\Delta i_{Lo\_max} = U_{in}/(32L \cdot f)$ , 保证了等离子喷涂斩波电源低纹波的特性。

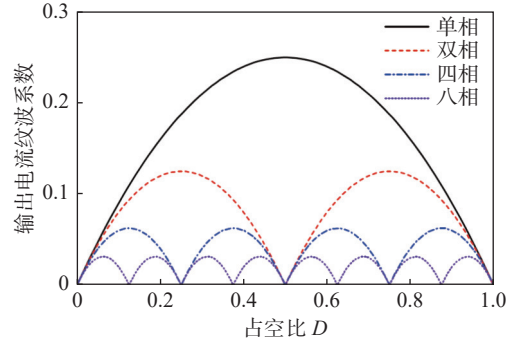


图 4 多相交错并联 Buck 变换器输出电流纹波系数与占空比关系

Fig. 4 Relationship between output current ripple coefficient and duty cycle of multi-phase interleaved parallel Buck converters

### 1.3 仿真验证

搭建四相交错并联 Buck 变换器的仿真模型进行验证, 仿真参数见表 1。对满载的四相交错并联 Buck 变换器模块的工作状况进行仿真, 输入电压为 300 V, 输出功率为 40 kW@400 A/100 V。

表 1 四相交错并联 Buck 变换器仿真参数

Table 1 Four-phase interleaved parallel Buck converter parameters

开关频率 $f/\text{kHz}$	滤波电容 $C/\mu\text{F}$	功率电感 $L/\mu\text{H}$	负载电阻 $R/\Omega$
5	100	1 000	0.25

通过仿真对比四相交错并联 Buck 变换器的 4 路电感电流和输出总电流。由图 5 知, IGBT 的开关频率为 5 kHz, 各支路电感电流相位角两两相差  $90^\circ$ , 4 路电感电流的均流情况一致, 单相电感电流纹波为 17.8 A; 对比图 6 的输出总电流, 电流纹波

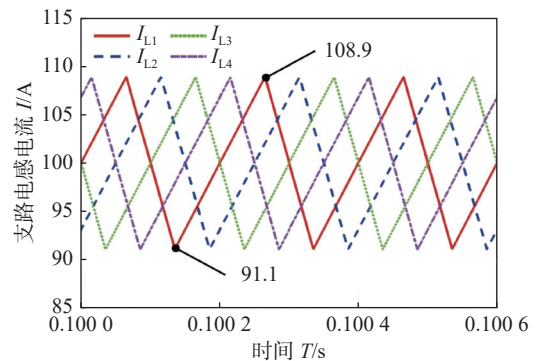


图 5 四相交错并联 Buck 变换器支路电感电流

Fig. 5 Four-phase interleaved parallel Buck converter branch inductor current



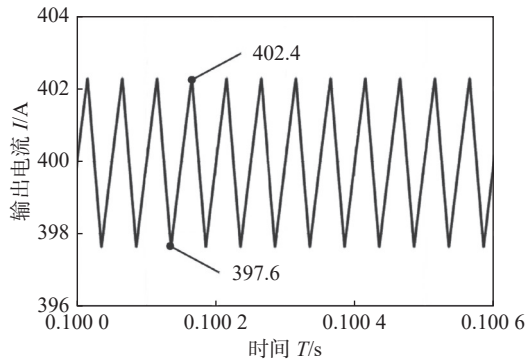


图6 四相交错并联 Buck 变换器输出总电流

Fig. 6 Four-phase interleaved parallel Buck converter total output current

仅为 4.8 A, 电流频率为 20 kHz, 且在占空比为 0.25, 0.5, 0.75 时, 4 路电感电流纹波相互抵消, 理论上电流纹波为 0 A. 由仿真结果得出, 四相交错并联 Buck 变换器具有低纹波的优势.

## 2 电源研制

### 2.1 等离子喷涂工艺对电源的要求

基于气体电离理论和等离子喷涂的实际工况, 等离子弧的伏安特性呈现水平或者上升的趋势, 即随电弧电流增大, 电弧电压基本不变或增大. 等离子弧作为等离子喷涂电源的非线性负载, 根据电弧物理理论, 常见的恒压源不能使等离子弧稳定工作, 只有具有缓降或陡降外特性的电源才能维持等离子弧的稳定性. 因此, 等离子喷涂电源应该具有陡降的外特性, 这种特性不仅可以保证等离子弧稳定工作, 而且当调节气体流量时, 电弧电流不会发生振荡, 进而保证等离子喷涂工艺质量.

为提高等离子喷涂引弧的成功率, 等离子喷涂电源应具有较高的空载电压. 从空载到稳定点火需要在几毫秒完成, 因此等离子喷涂电源应具有良好的动特性. 为进一步提高涂层质量, 应降低等离子弧根在阳极壁面的往复振动, 这就要求等离子喷涂电源应具有较低的电流纹波.

基于等离子喷涂工艺的要求, 等离子喷涂电源应具有陡降的外特性、良好的动特性、较高的输出电压和较低的电流纹波.

### 2.2 Buck 变换器设计

Buck 变换器主电路器件主要有 IGBT、续流二极管、功率电感和滤波电容. 根据四相交错 Buck 变换器额定功率 40 kW 的需求, 需要对这些器件进行选型. 表 2 是额定功率 40 kW 的四相交错并联 Buck 变换器的电气参数.

表 2 四相交错并联 Buck 变换器电气参数

Table 2 Four-phase interleaved parallel Buck converter electrical parameters

输入电压 $U_{in}/V$	输出电压 $U_{out}/V$	输出电流 $I_{out}/A$	额定功率 $P/kW$
300	100	400	40

四相交错并联 Buck 变换器的输入电压为 300 V, 额定输出电压为 100 V, 额定输出电流为 400 A. 因此选择 IGBT 和续流二极管串联的 IGBT 模块, 型号为英飞凌 FF400R06KE3, 其耐压值为 600 V, 额定电流为 400 A. 电流纹波大小和电感量直接相关, 为满足低纹波的要求, 电感量选用 200  $\mu H$ . 滤波电容在电路中起到抑制电压纹波的作用, 选型依据是其电容量和耐压能力. 一般要求 Buck 变换器的电压纹波不大于 5%. 经试验验证, 选取 8 个聚丙烯膜电容并联作为滤波电容, 单个滤波电容容量为 10  $\mu F$ , 耐压为 600 V.

### 2.3 Buck 变换器结构设计

为使元器件充分散热且结构美观, 设计 4 个 IGBT 模块和 8 个滤波电容安装在同一散热器上, 而将 4 个功率电感安装在与散热器同一高度, 在充分散热的时候, 又可降低样机的高度.

四相交错并联 Buck 变换器模块结构模型如图 7 所示, 设计要点如下: ①将发热量较大的 4 个 IGBT 模块均匀摆放在靠近进风口的位置, 上面放置 8 个滤波电容, 以获得更好的散热效果. ②根据 4 个 IGBT 模块的间距, 绘制合适的电路板, 为 4 路 IGBT 提供驱动, 优化接线方式. ③将 4 个功率电感和散热板拉开一定距离, 放置于机箱另一侧, 使其

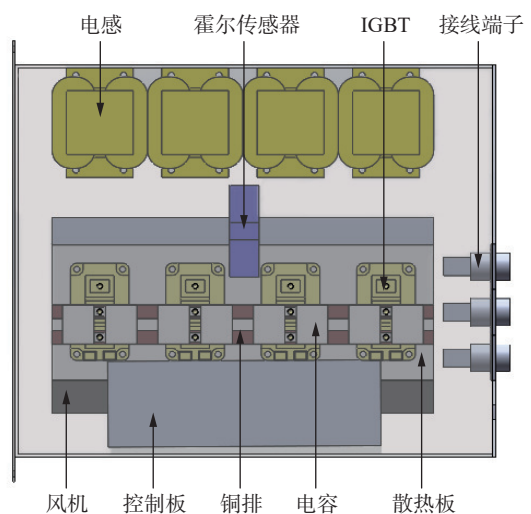


图7 四相交错并联 Buck 变换器结构图

Fig. 7 Four-phase interleaved parallel Buck converter structure diagram

得到充分散热.④采用独立风机对散热板进行散热.

经合理布局得到 1 个四相交错并联 Buck 变换器样机, 长度为 450 mm, 宽度为 405 mm, 高度为 150 mm, 因此选择 4U\*500 mm 的机箱, 对四相交错并联 Buck 变换器进行装配, 外部接口位于机箱前面板, 包括输入正极端子、输出正极端子、负极端子及通信端口.

### 3 试验验证

#### 3.1 单模块纹波验证

等离子喷涂电源因电流纹波过大会影响等离子喷涂设备的可靠性, 并且还会导致等离子弧的波动, 影响等离子喷涂涂层质量, 因此, 设计基于八相交错并联 Buck 变换器的斩波电源, 降低电流纹波, 并对斩波电源的输出电流纹波进行测量.

图 8 为四相交错并联 Buck 变换器满载 (40 kW) 时的支路电感电流与总输出电流, 第一相电感电流为 100.67 A, 第二相电感电流为 96.67 A, 其相位角相差  $90^\circ$ , 能看出明显电流纹波; 总输出电流为 396 A, 电流纹波较小且无法看出, 验证了斩波电源可以通过交错并联技术来降低电流纹波的效果.

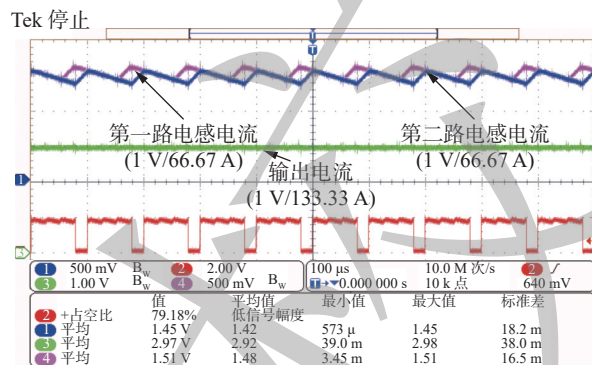


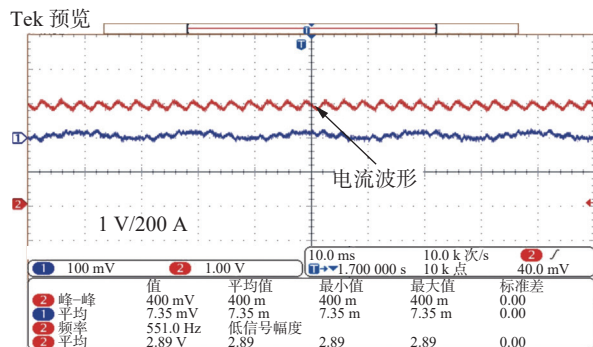
图 8 四相交错并联 Buck 变换器支路电感电流与输出电流波形图

Fig. 8 Waveform diagram of branch inductor current and output current of four-phase interleaved parallel Buck converter

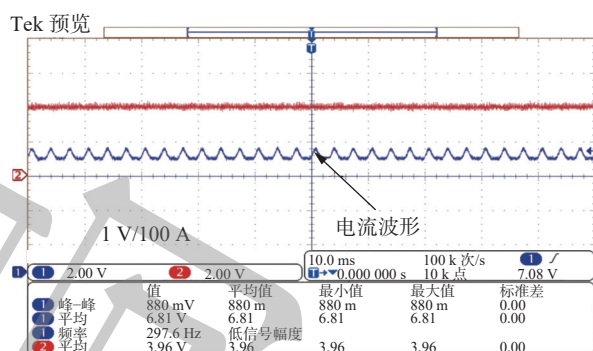
#### 3.2 不同电源纹波对比

图 9 是可控硅整流电源、逆变电源、斩波电源 3 种等离子喷涂电源在实际喷涂过程中输出电流的波形, 根据输出电流的峰-峰值和平均值, 可以对比不同等离子喷涂电源的电流纹波率.

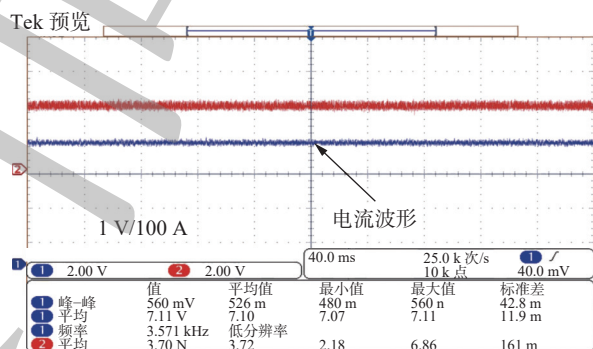
可控硅电源输出电流 578 A 时, 峰-峰值为 80 A, 电流纹波率为 13.84%; 逆变电源输出电流 681 A 时, 峰-峰值为 88 A, 电流纹波率为 12.92%; 斩波



(a) 可控硅电源



(b) 逆变电源



(c) 斩波电源

图 9 3 种等离子喷涂电源电流纹波对比

Fig. 9 Comparison of current ripple of three plasma spraying power supplies. (a) thyristor power supply; (b) inverter power supply; (c) chopper power supply

电源输出电流 711 A 时, 峰-峰值为 56 A, 电流纹波率为 7.88%. 斩波电源在满足等离子喷涂设备正常运行时, 电流纹波率明显低于可控硅电源和逆变电源. 因此, 斩波电源作为等离子喷涂电源可以有效降低等离子弧的波动、延长喷枪寿命、提高涂层的质量.

#### 3.3 效率对比

早期的磁放大器式二极管整流电源的效率仅为 50%~60%, 高性能可控硅整流电源的效率为 70%~80%, 最新研制的逆变电源也仅在 85% 左右. 因此, 等离子喷涂电源的效率亟需大幅度的提高.

图 10 为恒流模式下 1 组四相交错并联 Buck 变换器模块的效率曲线. 电流在 100~400 A 范围

时,四相交错并联 Buck 变换器效率都能达到 87% 以上. 电流为 350 A 时,效率最大为 94.5%, 额定电流为 400 A 时,效率为 92.7%. 相比传统的等离子喷涂电源,斩波电源的效率得到有效提高,提高了能量利用率.

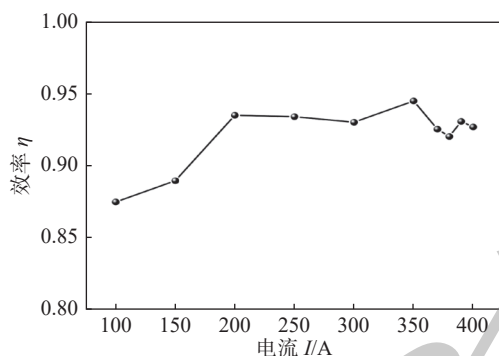


图 10 四相交错并联 Buck 变换器效率

Fig. 10 Four-phase interleaved parallel Buck converter efficiency

## 4 结论

(1) 分析了电流纹波产生机理. 按照等离子喷涂电源 80 kW 的功率需求, 搭建 2 个 40 kW 的四相交错并联 Buck 变换器的模块并进行交错并联, 完成了基于八相交错并联 Buck 变换器的等离子喷涂斩波电源的研制.

(2) 通过仿真和试验验证了斩波电源的性能. 相比可控硅整流电源和逆变电源, 斩波电源输出电流纹波率仅为 7.88%, 电源最高效率为 94.5%, 满足了等离子喷涂电源低纹波和高效率的需求.

## 参考文献

- [1] Mehboob G, Liu M J, Xu T, *et al.* A review on failure mechanism of thermal barrier coatings and strategies to extend their lifetime[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(7): 8497 – 8521.
- [2] Yedida V V S, Vasudev H. A review on the development of thermal barrier coatings by using thermal spray techniques[J]. *Materials Today:Proceedings*, 2022, 50: 1458 – 1464.
- [3] Hung F S. Material application of a transformer box: A study on the electromagnetic shielding characteristics of Al-Ta coating film with plasma-spray process[J]. *Coatings*, 2019, 9(8): 495 – 502.
- [4] 陈永雄, 梁秀兵, 程江波, 等. 异质双丝电弧喷涂制备复合涂层的工艺优化[J]. *焊接学报*, 2019, 40(2): 38 – 41.  
Chen Yongxiong, Liang Xiubing, Cheng Jiangbo, *et al.* Process optimization of a hybrid twin-wire arc sprayed composite coating[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(2): 38 – 41.
- [5] Singh S, Kumar R, Goel P, *et al.* Analysis of wear and hardness during surface hardfacing of alloy steel by thermal spraying, electric arc and TIG welding[J]. *Materials Today:Proceedings*, 2022, 50: 1599 – 1605.
- [6] Zimmermann S, Mauer G, Rauwald K H, *et al.* Characterization of an axial-injection plasma spray torch[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2021, 30(7): 1724 – 1736.
- [7] Liu J B, Wang L M, Liu J H. Influence of process parameters on microstructure of reactive plasma cladding TiC-Fe-Cr coating[J]. *China Welding*, 2021, 30(2): 35 – 41.
- [8] 李辉, 崔新安, 赵晓兵, 等. 氩气与氢气流量对等离子喷涂铁基非晶涂层性能的影响[J]. *机械工程材料*, 2021, 45(5): 39 – 44.  
Li Hui, Cui Xinan, Zhao Xiaobing, *et al.* Effect of Ar and H<sub>2</sub> flow rate on properties of Fe-based amorphous coating prepared by plasma spraying[J]. *Material for Mechanical Engineering*, 2021, 45(5): 39 – 44.
- [9] 杜贵平, 黄石生. 60 kW 级软开关等离子喷涂高效电源研究[J]. *电工技术学报*, 2005, 20(4): 94 – 97.  
Du Guiping, Huang Shisheng. Study of 60 kW plasma spray power supply with soft-switching technology[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2005, 20(4): 94 – 97.
- [10] Curry N, Leitner M, Körner K. High-porosity thermal barrier coatings from high-power plasma spray equipment—processing, performance and economics[J]. *Coatings*, 2020, 10(10): 957 – 981.
- [11] 陈增泉. GP-80 型高能等离子喷涂设备[J]. *焊接*, 1984(8): 28.  
Chen Zengquan. GP-80 high-energy plasma spraying equipment[J]. *Welding & Joining*, 1984(8): 28.
- [12] 陈克选, 李春旭. PLC 控制等离子喷涂设备的研制[J]. *甘肃工业大学学报*, 1999(1): 19 – 22.  
Chen Kexuan, Li Chunxu. Development of PLC controlled plasma-spray equipment[J]. *Journal of Gansu University of Technology*, 1999(1): 19 – 22.
- [13] 张慧, 姜秀. 80 kW 高性能可控硅等离子喷涂电源的研制[J]. *航空制造技术*, 1999(S1): 44 – 45.  
Zhang Hui, Jiang Xiu. 80 kW high performance thyristor supply used for plasma spraying[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 1999(S1): 44 – 45.
- [14] 王永锋. 逆变等离子喷涂电源的研制[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2006, 4(S1): 100 – 103.  
Wang Yongfeng. Development of invert plasma spray power supply[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2006, 4(S1): 100 – 103.
- [15] 汪殿龙, 张志洋, 冀维金. 基于 TMS320F2812 的等离子喷涂数字化软开关逆变电源[J]. *电焊机*, 2014, 44(3): 18 – 21, 69.  
Wang Dianlong, Zhang Zhiyang, Ji Weijin. Research on digital soft-switching plasma spray inverter based on TMS320F2812[J]. *Electric Welding Machine*, 2014, 44(3): 18 – 21, 69.
- [16] Cheng X F, Peng Z Z, Yang Y L, *et al.* A 5.6 kW 11.7 kW per kg four-phase interleaved Buck converter for the unmanned aerial vehicle[J]. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2022, 17(2): 1077 – 1086.

第一作者: 汪殿龙, 博士, 教授, 博士研究生导师; 主要从事新型电源技术及应用的科研和教学工作; Email: wdl@hebust.edu.cn.

(编辑: 高忠梅)