

引用格式:王燮阳,曹彪,庞世炫,等.高频脉冲微TIG焊接电弧基值效应研究[J].热加工工艺,2024,53(5):91-96.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20232558
http://www.rjggy.net rjggy@vip.163.com

高频脉冲微TIG焊接电弧基值效应研究

王燮阳¹, 曹彪¹, 庞世炫¹, 王奕楷¹, 黄增好²

(1. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640; 2. 广州市精源电子设备有限公司, 广东 广州 510735)

摘要:为了探索微TIG焊接的焊接电流下限,研制了一种高频脉冲微TIG焊接电源,利用脉冲基值电弧电特性的改善提高焊接稳定性。通过电弧电流、电压波形,分析了电弧的电压滞后性,探讨了脉冲频率对脉冲电弧基值效应的影响,并进一步对零基值脉冲TIG进行了研究。结果表明,高频脉冲下的微电弧基值电压较稳态电弧大幅下降,更有利于维持微电弧的燃烧;在基值电流为0A的条件下高频脉冲电弧也可维持燃烧,平均焊接电流可低至0.5A,极限0基值时间与脉冲电流大小呈正相关。对于微细漆包线和端柱的微型工件连接,零基值脉冲微TIG焊获得了较好的焊接效果。

关键词:高频脉冲;电弧稳定性;微TIG焊;零基值脉冲

中图分类号: TG444⁺.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2024)05-0091-06

Research on Base Value Effect of High-frequency Pulse Micro-TIG Welding Arc

WANG Xieyang¹, CAO Biao¹, PANG Shixuan¹, WANG Yikai¹, HUANG Zenghao²

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Guangzhou Jingyuan Electronic Equipment Co., Ltd., Guangzhou 510735, China)

Abstract: In order to explore the lower limit of welding current in micro-TIG welding, a high-frequency pulse micro TIG welding power source was innovated, the welding stability was improved by the improvement of characteristics of the pulse base arc. Through the waveform of arc current and voltage, the voltage hysteresis of the arc was analyzed, and the influence of the pulse frequency on the base value effect of pulse arc was studied, and the 0-base current, pulse TIG welding was further studied. The results show that compared with that of the steady-state arc, the base voltage of micro arc is sharply reduced under high-frequency pulse conditions, which is helpful for the sustainability of micro arc combustion. Additionally, under 0 A base current condition, high-frequency pulse arc can effectively maintain combustion, and the average welding current can reach as low as 0.5 A. The maximum 0-base current time correlates positively with the pulse current. 0-base current, pulse TIG welding achieves good welding effect for the micro-workpiece connection between fine enameled wire and end post.

Key words: high-frequency pulse; arc stability; micro-TIG welding; 0-base current pulse

微型钨极氩弧焊(tungsten inert gas welding, TIG)是一种以电极和工件间形成的微电弧为焊接热源,以氩气为保护气体的精密熔焊方法,其焊接电流通常小于10A。微TIG具有焊接能量精细可控、热影响区小、焊接质量高等优点^[1]。随着器件的微型化、工件连接的要求提高,微TIG的应用需求日渐增大。

由于微TIG焊接电流较小,其电弧处于静特性的下降区,电压较高且随电流上升大幅下降,使得维弧困难,容易断弧^[2],对电源稳定性有相当大的考

验。目前,一些外企采用变压器式电源,利用功放电路实现微电流焊接;国内相关研究大多采用提高电源空载电压(>80V)的方法满足负载需求^[3]。但是,变压器式电源体积大、功率因数低,不适合连续自动化生产;空载电压过高也会带来安全隐患,微TIG发展受限。

过去的研究中,国内外学者开发了高频脉冲TIG焊技术,利用电弧的高频效应提高其挺度和能量密度,从而提高焊接质量^[4-6]。同时发现高频变化的电弧处在非稳态,其电学特性发生了改变,基值电弧瞬时电阻相比稳态时有下降,基值电压也随之下降^[7]。由于常规TIG工作在电弧静特性的水平区,电压变化小,这一现象并未引起关注。而微TIG工作在下陷区,这一性质对其影响很大,通过改变电弧负载

收稿日期:2023-10-26

作者简介:王燮阳(2000-),男,江苏南京人,硕士研究生,主要研究方向:数字化电源与焊接电弧;E-mail:wxyabz@126.com

通讯作者:曹彪(1963-),男,贵州盘县人,教授,博士,主要研究方向:现代焊接技术与数字化电源;E-mail:mebcao@scut.edu

的工作状态,可摆脱直流稳态电弧特性的限制,为微TIG焊接向更微小电流的电弧焊接发展提供思路。

基于以上问题与常规TIG的研究结果,本文设计了一种新的高频切换电路,搭建高频脉冲微TIG焊接试验平台,分析了脉冲基值时的电弧电压特性,探讨了零基值高频脉冲微TIG焊接的可行性与极限,以期提高微TIG焊接的应用范围,并以微细漆包线为对象测试了该电源的负载适应性。

1 高频脉冲微TIG焊接电源及试验方案

1.1 主电路拓扑

本实验室搭建了高频脉冲微TIG焊接平台,采用双电源并联的主电路拓扑,以实现输出脉冲电流的快速变化,如图1所示。两路直流源并联输出后得到基值为 I_b ,峰值为 I_b+I_p ,频率和占空比可调的高频

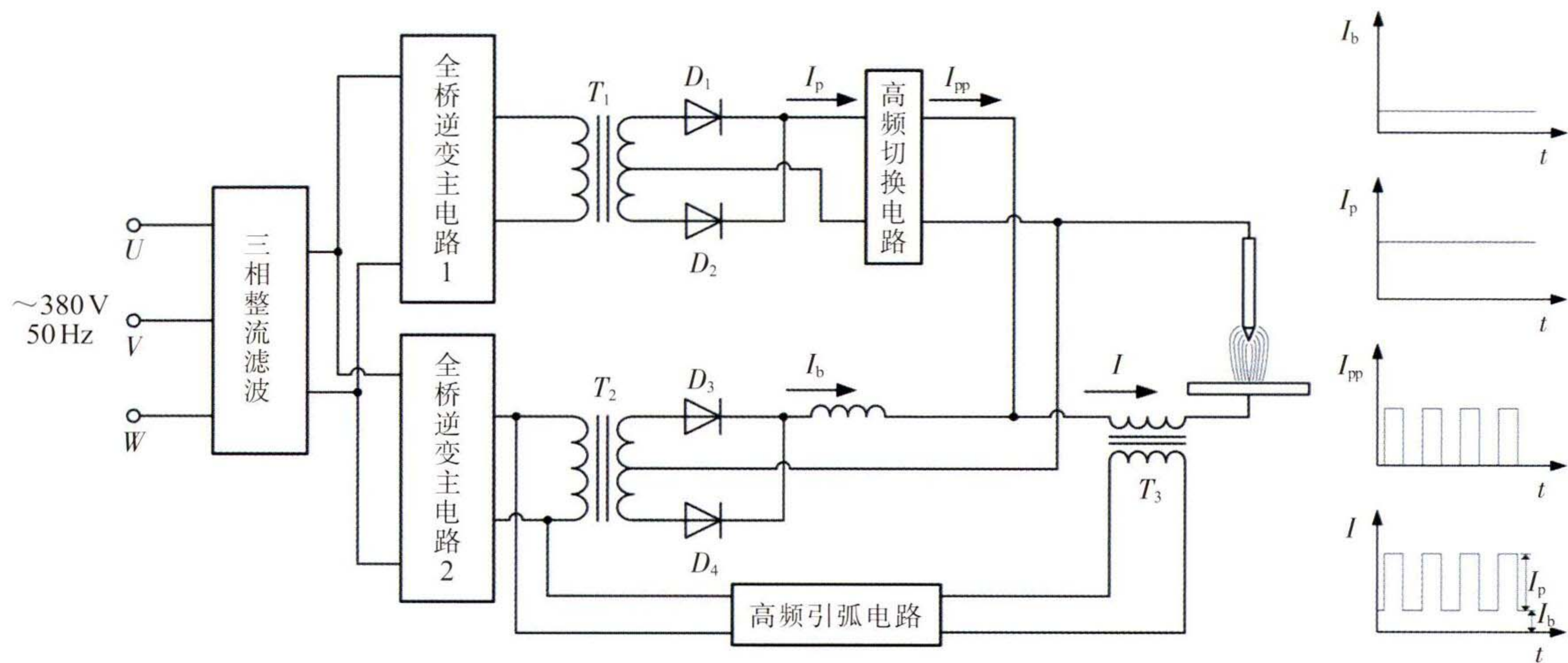


图1 电源主电路拓扑结构
Fig.1 Topological structure of the main circuit

脉冲复合电流。

1.2 高频切换电路

文献[8]表明,脉冲电流变换时上升下降速度越快,产生的高频效应越显著。因此,缩短电流上升下降时间非常重要。齐铂金等^[9]采用单个开关管和快恢复二极管的电路结构,在大电流高频脉冲TIG焊接上取得了较好的结果。王奕楷等^[10]将这一结构沿用到小电流TIG焊接上,回路寄生电感较大,在基值时会起续流作用,使得下降沿时间增加,电流波形畸变成三角波。

本文在前者的基础上对电路进行了改进,如图2所示,电路由场效应管 Q_1 和 Q_2 、快恢复二极管 D_1 和 D_2 等构成。场效应管 Q_1 、 Q_2 互补驱动,交替导通。当 Q_1 关闭、 Q_2 导通时,主电路1整流后输出电流通过电弧,经 Q_2 返回负极形成电流通路,此时为电流峰值;当 Q_1 导通、 Q_2 关闭时,输出电流经过 Q_1 直接流回负极,此时为电流基值。反向二极管 D_2 和电阻 R_3 为电感吸收回路,为电流骤降时回路寄生电感储存的能量提供泄放的回路,防止其在基值时续流并减少开关器件的电压应力。

单个开关管 Q_1 和快恢复二极管 D_1 构成的切换

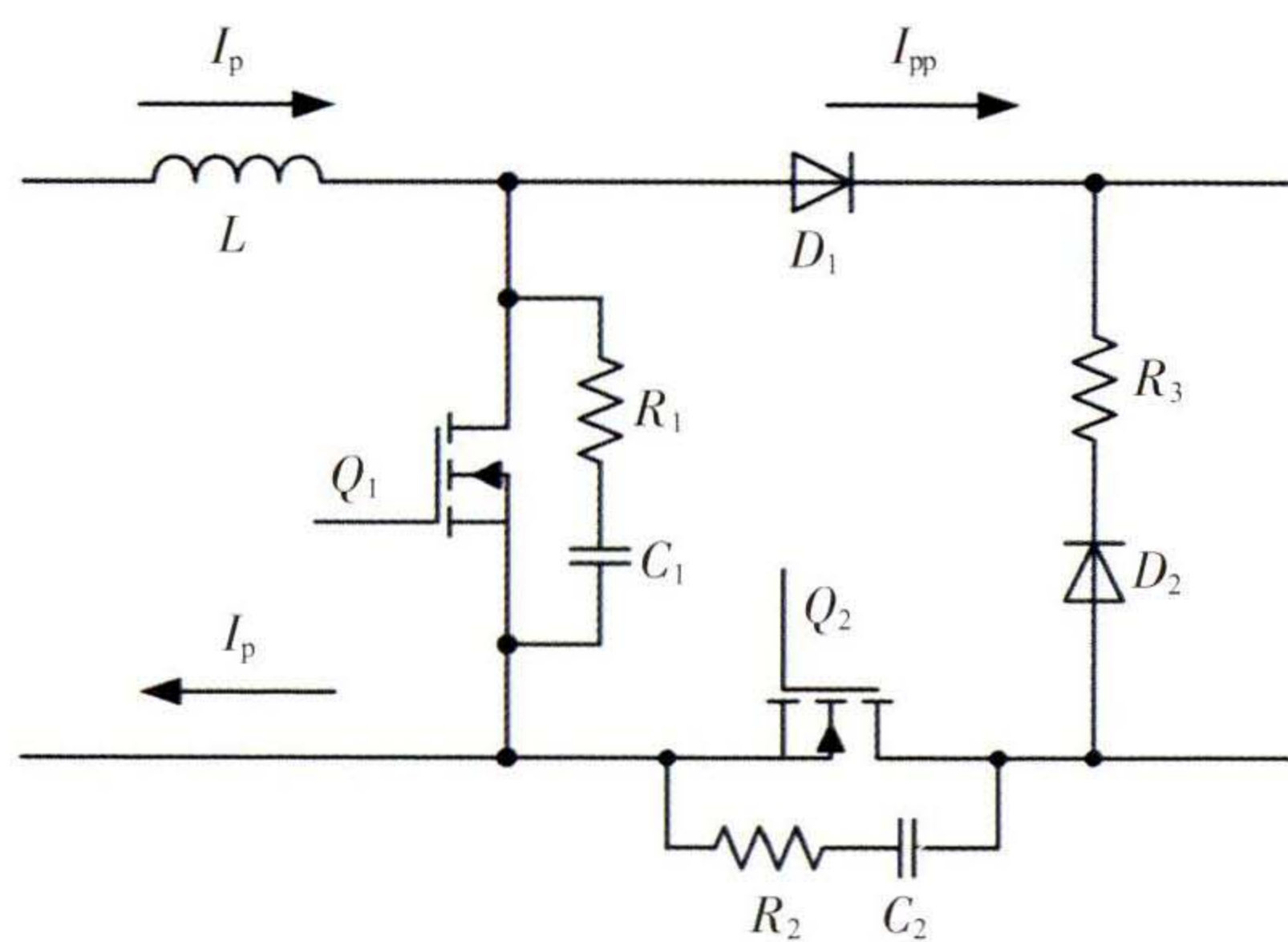


图2 高频切换电路拓扑结构
Fig.2 High frequency switching circuit topological structure

电路输出电流波形如图3(a)的 i_1 所示,受到回路中杂散电感的影响,电流下降速度较慢。增加 Q_2 、 D_2 改变电感续流回路便可以捕捉到杂散电感提供的电流,如图3(a)的 i_2 所示。利用耗能元件 R_3 便可以吸收掉回路杂散电感的能量,最终输出波形如图3(b)的 i_3 、 i_4 所示。

脉冲电流的上升沿、下降沿时间均在 $1\mu\text{s}$ 以内,电源具有很好的动态响应。在 $10\sim 60\text{kHz}$ 的频率下电流控制准确,呈现较为规整的方波,如图4所示。这种电路设计在回路存在一定寄生电感时也可

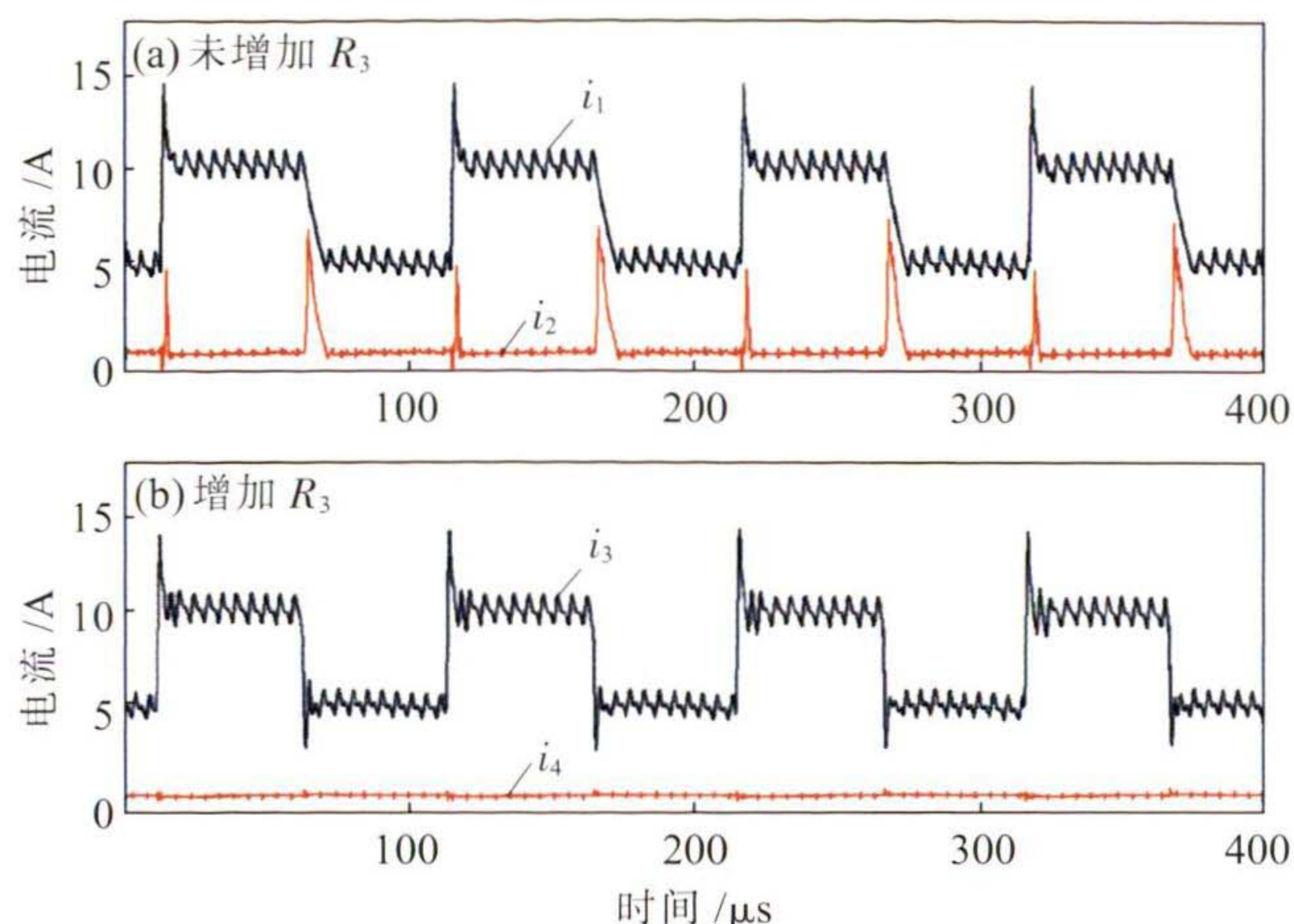


图3 增加电感吸收回路后的电流波形

Fig.3 Current waveforms after adding inductive absorption circuit

保证输出波形良好,更符合实际生产需求。

1.3 试验方案

试验系统搭建完成后,开展了微 TIG 电弧动态特性试验。焊枪装载 $\phi 1.6 \text{ mm}$ 的铈钨针作为负极,其端部打磨成 30° 锥角,正极为另一经相同处理的钨针,两极间距离为 2 mm ,使用纯度 99.99% 的氩气作为保护气,气体流速 3 L/min ,进行微 TIG 电弧定点燃烧 500 ms 的系列试验。采用霍尔电流传感器和示波器采集焊接电弧的电流电压信息。

为研究高频电弧的电特性,通过试验采集电流电压过程信息,观察脉冲电弧电压的变化规律,探究脉冲频率对电弧电压的影响,对比分析脉冲基值电

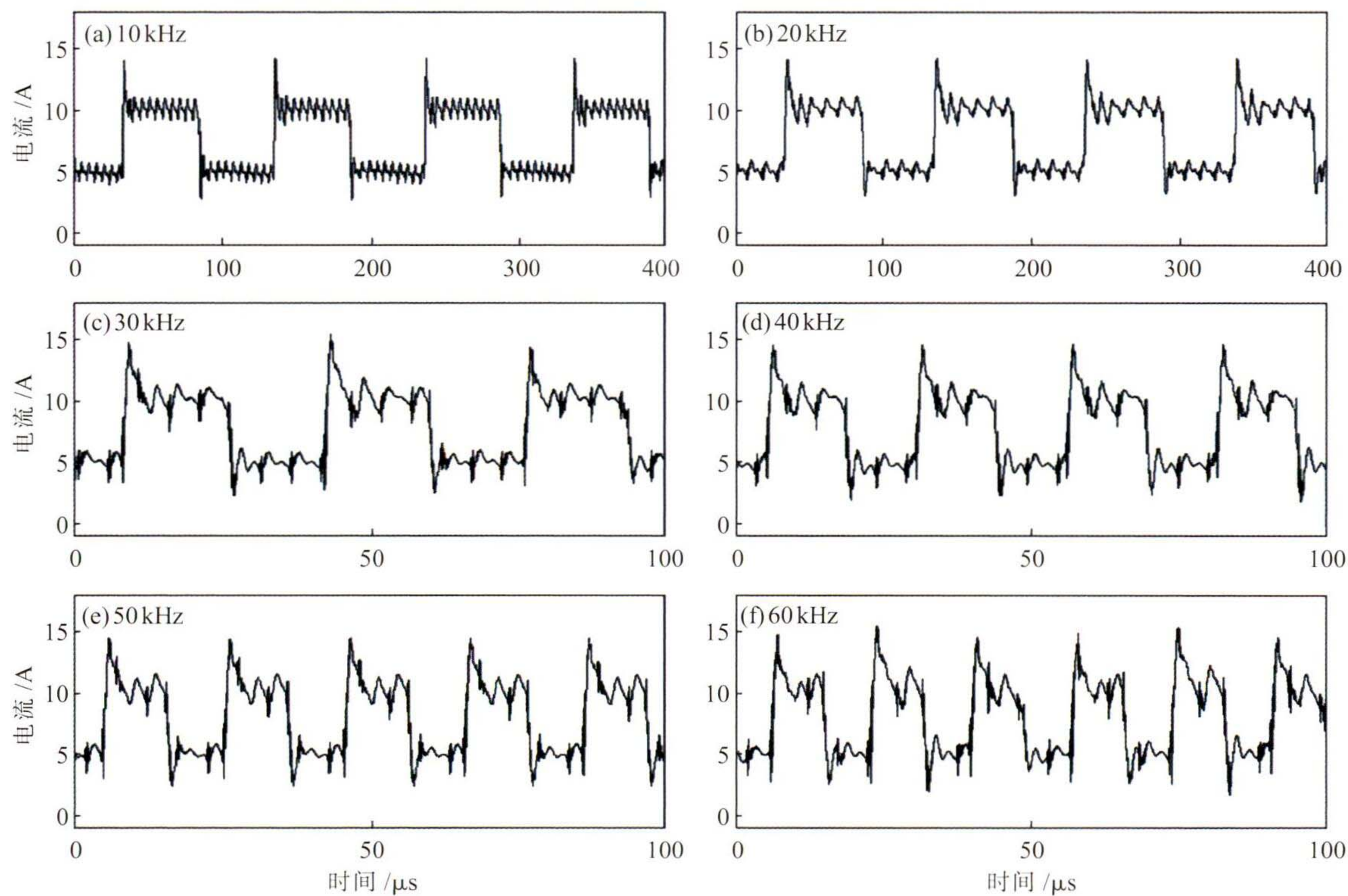


图4 10~60 kHz 脉冲频率下的焊接电流波形

Fig.4 Welding current waveform at a pulse frequency of 10-60 kHz

弧特性与稳态电弧特性的差别。试验参数见表 1。并在此基础上开展后续试验,对零基础值脉冲电弧进行深入研究。

2 结果分析与讨论

2.1 脉冲电弧的电压滞后性

试验 1 所得的电流、电压曲线如图 5 所示。为便于分析,图 5(b)中标识了 5 A 、 10 A 稳态电弧的电压值,分别用 $U(5 \text{ A})$ 和 $U(10 \text{ A})$ 表示,由试验 6、7 测试并计算得到。在脉冲电弧的电流切换瞬间,电压随之产生

表 1 高频脉冲微 TIG 焊接试验参数

Tab.1 Experiment parameters of high-frequency pulsed micro-TIG welding

试验	基值电流 I_b/A	脉冲电流 I_p/A	频率 f/kHz	占空比 $\delta(\%)$
1	5	5	10	50
2	5	5	20	
3	5	5	30	
4	5	5	40	
5	5	5	50	
6	5	0	-	-
7	10	0	-	-

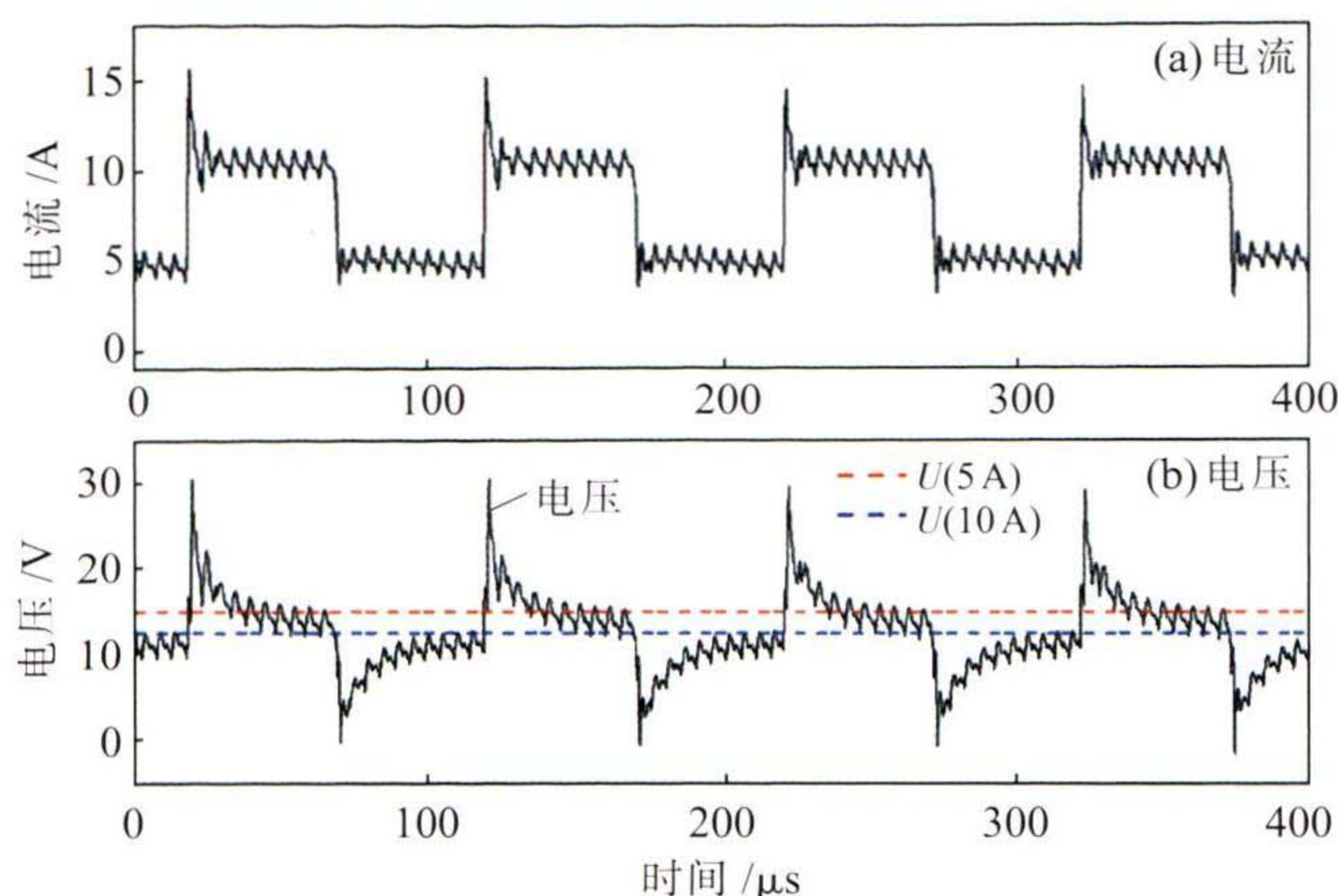


图5 10 kHz 高频脉冲微 TIG 焊接电流和电压波形
Fig.5 Current and voltage waveforms of 10 kHz high frequency pulse micro-TIG welding

突变,随后缓慢地向稳态电压恢复,在达到稳态前电流再次切换,这是高频电弧的电压滞后现象。

造成这一现象的原因有多方面,以基值电压为例展开讨论。首先,从温度角度来看,由于电弧具有热惯性,在电流骤降后,电极上的温度不会立刻耗散,阴极区域的热发射仍相当活跃,因此只需要外加较低的电场辅助热发射;随着温度降低,所需电场强度增大,电弧电压也随之增大。另一方面,从粒子行为来看,电弧一直处于电离与复合的动态平衡中。在中心弧柱区,高温电子与氩原子激烈碰撞形成电子和氩离子;而在低温的弧柱边界区,能量较低的电子倾向与氩离子发生三体复合^[11]。电流骤降后,电源供给的能量降低,电弧边缘等离子体的温度下降,导致其复合速度大于电离速度,电弧缓慢收缩,弧柱直径减少直至重新平衡。弧柱宽度不会骤降,弧柱中心区域的温度仍较高,具有较高的电导率^[12],因此,电弧电阻还保持较低数值,电压也较直流时低。

2.2 高频脉冲微 TIG 焊接电弧的基值效应

图 6 展示了电弧的峰值、基值平均电压与脉冲频率的关系,数据来源于试验 1~5。随着脉冲频率

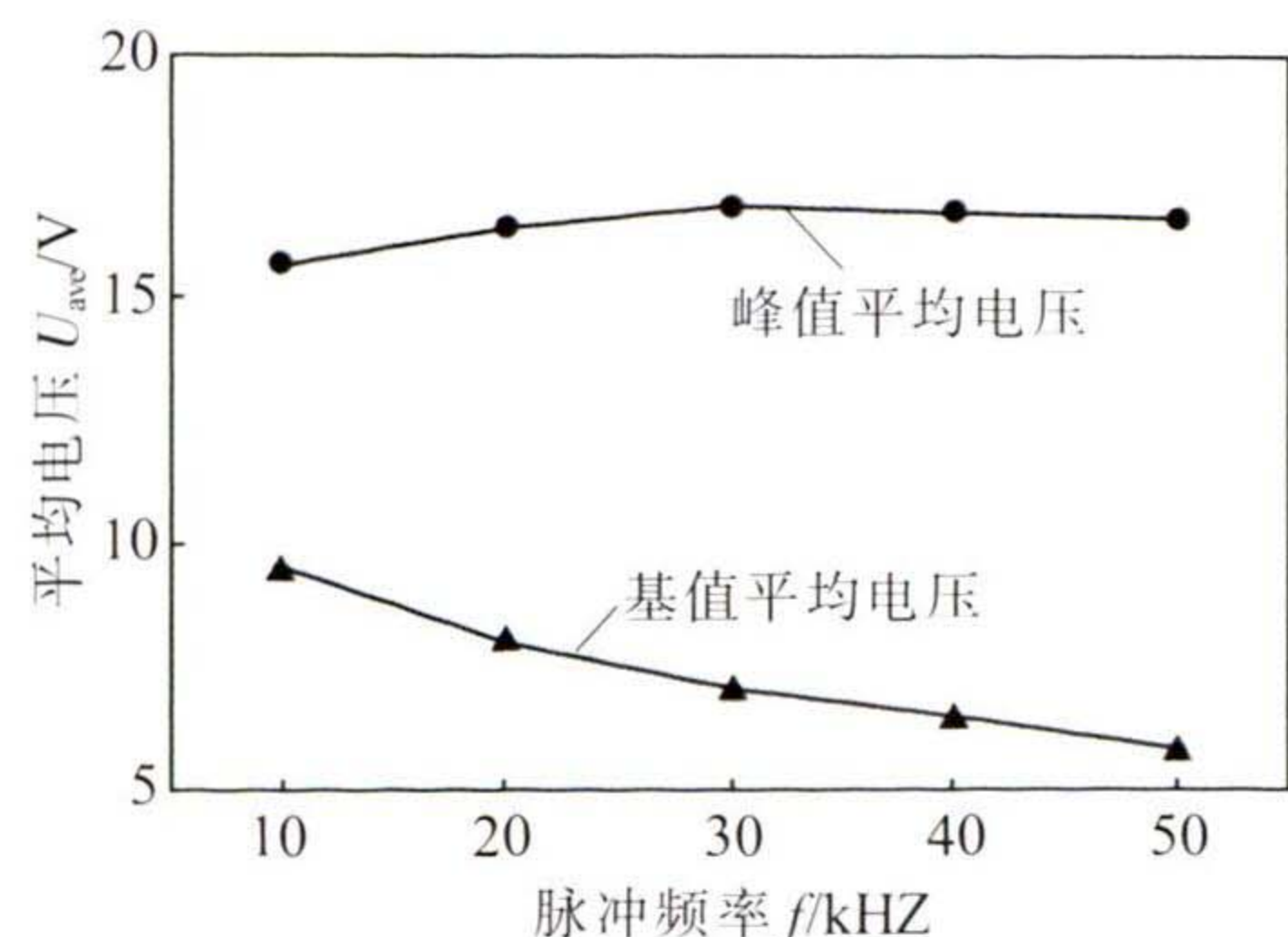


图 6 脉冲频率对电弧电压的影响
Fig.6 The effect of pulse frequency on arc voltage

的增大,基值平均电压呈现显著的下降趋势。这与 2.1 节中的电弧电压滞后行为密切相关,频率越高,基值时间越短,阴极温度、弧柱区电离度就保持得越高,电弧电压就越低。

峰值平均电压小幅增大后趋向平稳,略高于稳态电弧电压。该电压主要源自高频切换电路中电感的感应电压,与 Boost 电路升压原理相同,因此不会增加逆变电源的负担。即使电弧电压短时超过电源空载电压,也不会发生断弧。

为了更好地比较脉冲基值电弧特性与电弧静特性的差别,在 20kHz 脉冲频率下,保持峰值电流 (I_b+I_p) 为 10A,改变基值电流并测量其平均电压。所得脉冲电弧基值特性曲线如图 7 中 U_2 所示。

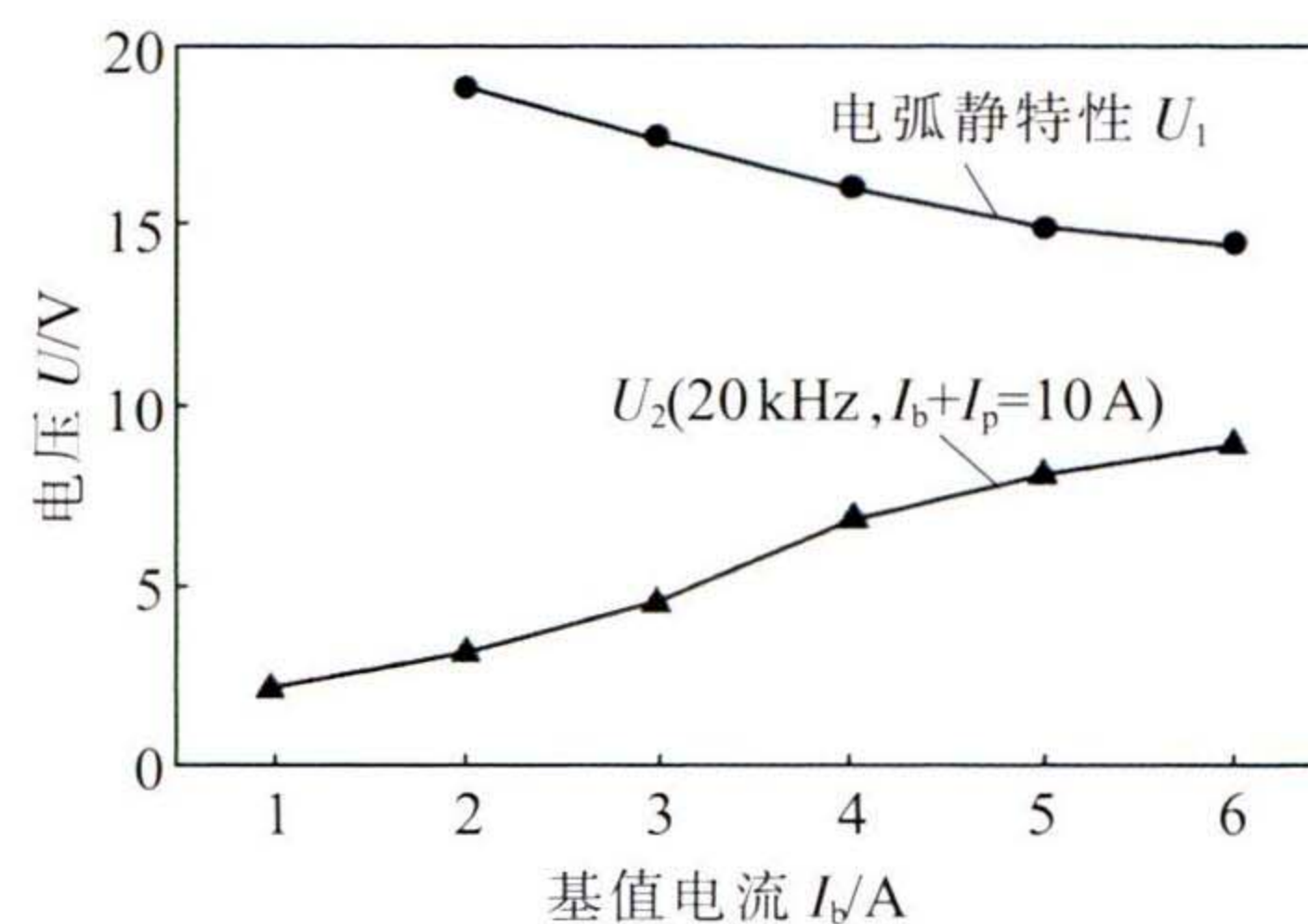


图 7 20 kHz 脉冲电弧的电压随基值电流的变化曲线
Fig.7 Curve of voltage of pulse arc with base current under 20 kHz frequency

图 7 中 U_1 为本文试验条件下的直流电弧电压-电流曲线,即电弧的静特性曲线。可见,5A 以下的电弧电压很大,且呈现负阻性。负阻性负载会引起动态电路的不稳定,对逆变电源稳定性和负载适应性有很大考验。

U_2 为高频脉冲微 TIG 焊基值电弧的电压-电流曲线,呈现出与静特性相反的上升趋势。此时电弧电阻主要取决于峰值电流,总体呈现正阻性。并且电弧电压远小于直流电弧,大大降低了电源维系电弧的难度,提高了弧源系统的稳定性,在 1A 基值电流条件下依然稳定燃烧。

综上,高频脉冲电弧在基值时,弧柱能维持较高的电导率,电弧稳定性改善,较低的电压即可维持极小电流电弧的燃烧,这就是高频脉冲电弧的基值效应。随着脉冲频率提高,这一效应更明显,这为 TIG 焊接向更低电流的焊接领域发展提供了可能。

2.3 零基值高频脉冲电弧的探索

在传统脉冲 TIG 焊接中,基值阶段保证不断弧,一般都叠加维弧电流来维系等离子通道。2.2 节

的分析表明,电流骤降后的一定时间内,电弧的电导率仍然较高。这说明不施加维弧电流,仅依靠峰值电弧留下的高温等离子体实现电弧的复燃是可行的。对此,以 20kHz、10 A 脉冲电流、0 基值电流、50% 占空比为焊接参数进行试验,电流电压曲线如图 8 所示。结果表明,在基值电流为 0 的条件下,即缺乏维弧电流,高频脉冲微电弧也可以持续稳定燃烧。峰值初期的尖峰电压 $U_{peak}=30.5\text{V}$,远小于氩气的击穿电压,说明上一段脉冲留下的热量和等离子氛围促进

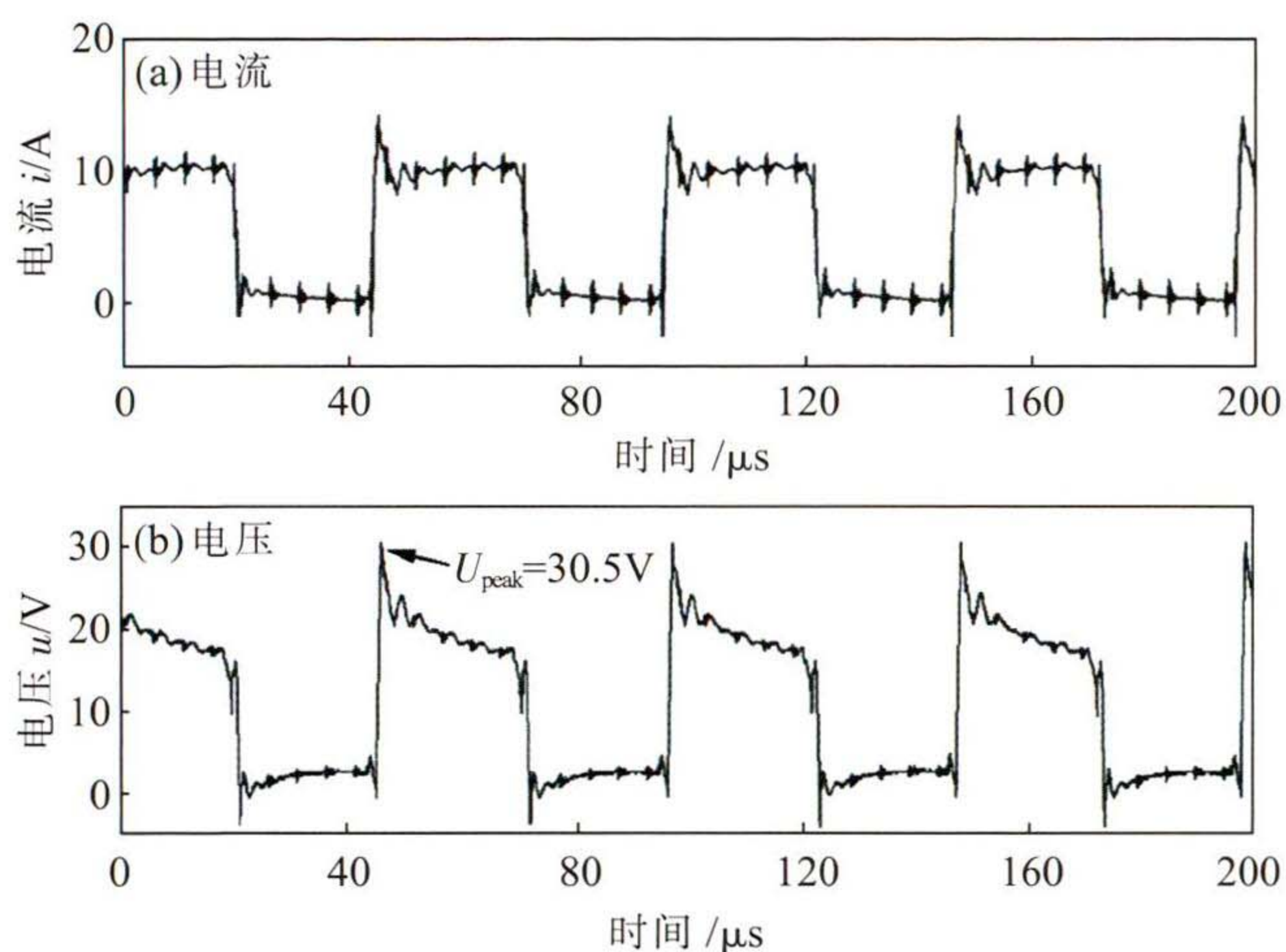


图 8 零基值、10 A 脉冲电流焊接的电流和电压波形
Fig.8 Current and voltage waveforms of pulse arc welding under 0 base current and 10 A pulse current

了电弧的复燃。

为了进一步探究这一现象,明晰电弧复燃的极限条件,进行以下试验:选择 10 A 为脉冲电流,保持峰值电流时间为 $10\mu\text{s}$,0 基值时间为 $15\mu\text{s}$,如图 9 (a)所示,再逐渐增大基值时间直至不能稳定燃烧。通过逐步增大 0 基值时间,得到 10 A、 $10\mu\text{s}$ 脉冲电弧的极限零基值时间为 $45\mu\text{s}$ 。

分别以 5~10 A 为脉冲电流,峰值电流时间 $10\mu\text{s}$ 不变,按照相同的试验方法,分别得到了其对应的极限 0 基值时间,如图 10 所示。随着脉冲电流的增大,电弧的极限 0 基值时间也增大,脉冲电流与极限零基值时间的线性回归相关系数达到 0.993,两者具有较强的线性关系。在高频电弧的应用中,可以通过改变 0 基值时间适当调节平均电流。

图 11 为本文焊接电源极限条件下的焊接曲线。可看出,当脉冲电流为 5 A、脉冲频率为 40 kHz、占空比为 10%时,平均电流仅为 0.5 A,此为本文焊接电源能稳定焊接的最小焊接电流。

2.4 焊接效果分析

为检验电源的负载适应性,采用表 2 中的工艺参数,对直径为 $\phi 0.04\text{mm}$ 的漆包线与 $0.4\text{mm}\times 0.3\text{mm}$ 的方形黄铜端柱进行焊接,取得了较好的焊接效果,如图 12 所示。

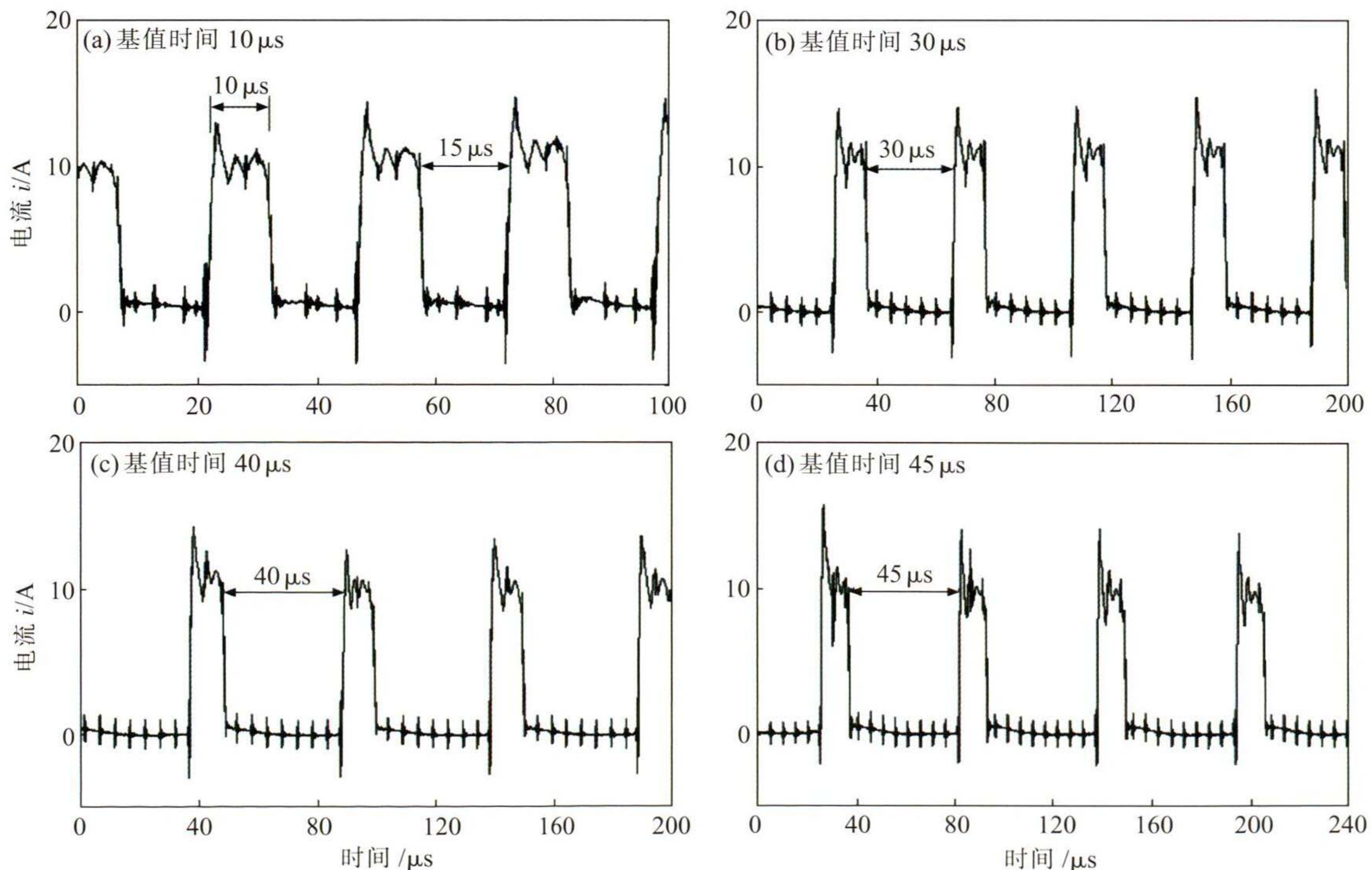


图 9 零基值和 10 A 脉冲电流和不同基值时间下电弧的电流波形
Fig.9 Current waveforms of arc at 0 base current, 10 A pulse current and different base time

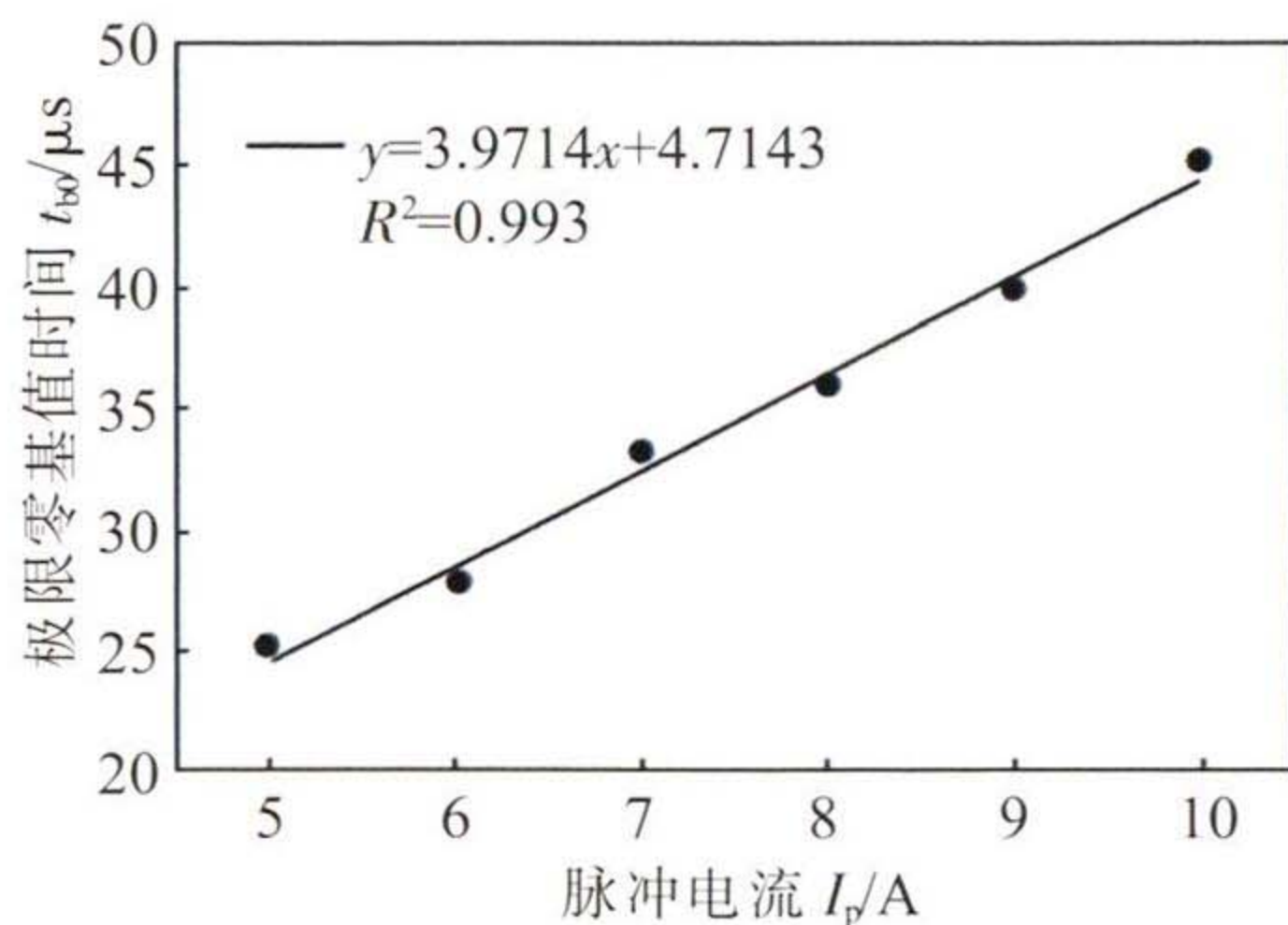


图 10 电弧极限零基值时间与脉冲电流的关系
Fig.10 The relationship between the 0-base time limit of arc and pulse current

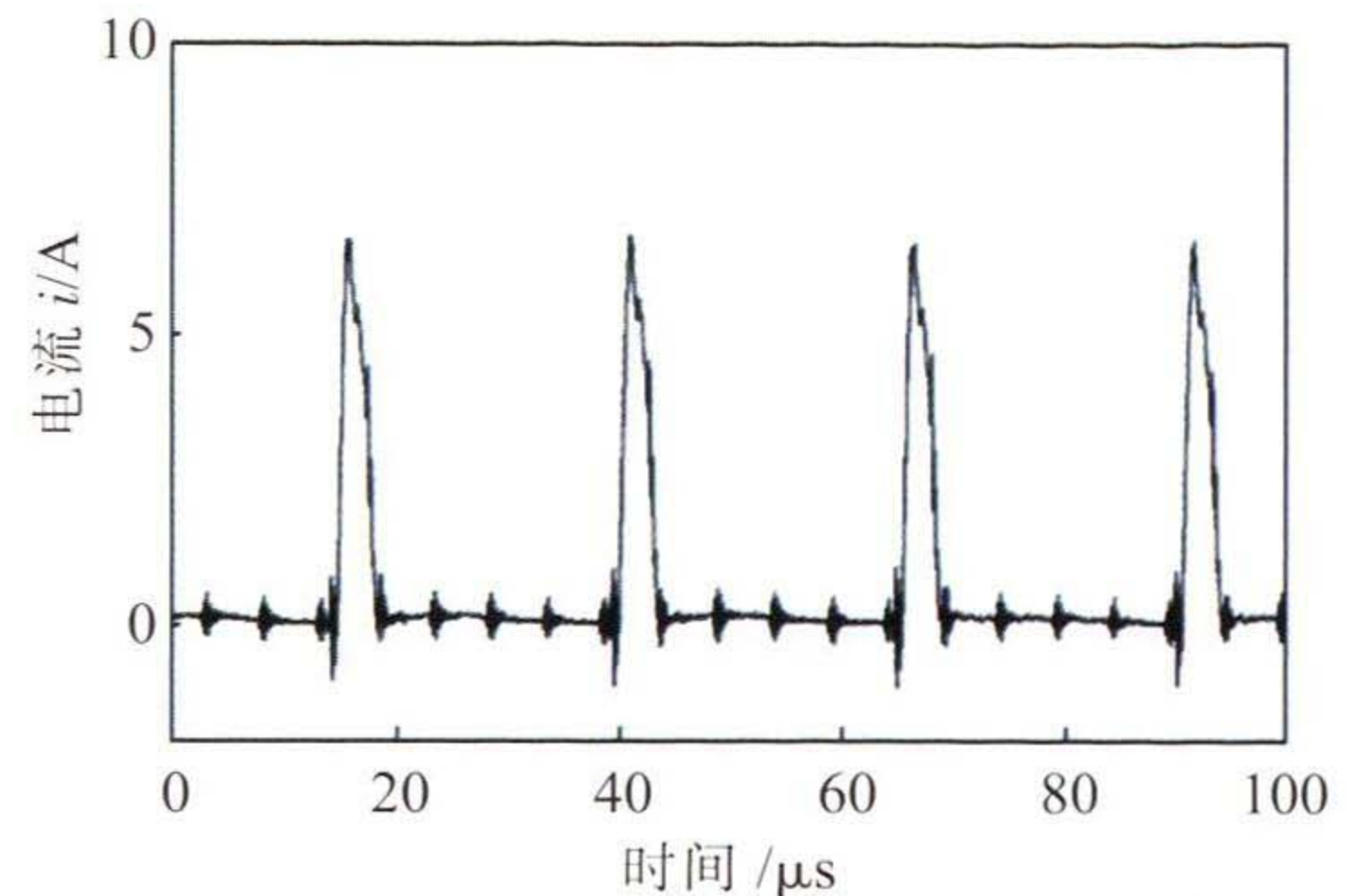


图 11 脉冲电流 5 A、频率 40 kHz、占空比 10%时焊接电流波形
Fig.11 Welding current waveform at pulse current of 5 A, frequency of 40 kHz and duty ratio of 10%

表 2 漆包线与端柱封装焊接的工艺参数

Tab.2 Process parameters of encapsulation welding between enameled wire and end post

基值电流 I_b/A	脉冲电流 I_p/A	脉冲频率 f/kHz	占空比 $\delta(\%)$	焊接时间 t/ms	电极间距 d/mm	氩气流量 $Q/(L \cdot min^{-1})$
0	5	40	20	40	2	3

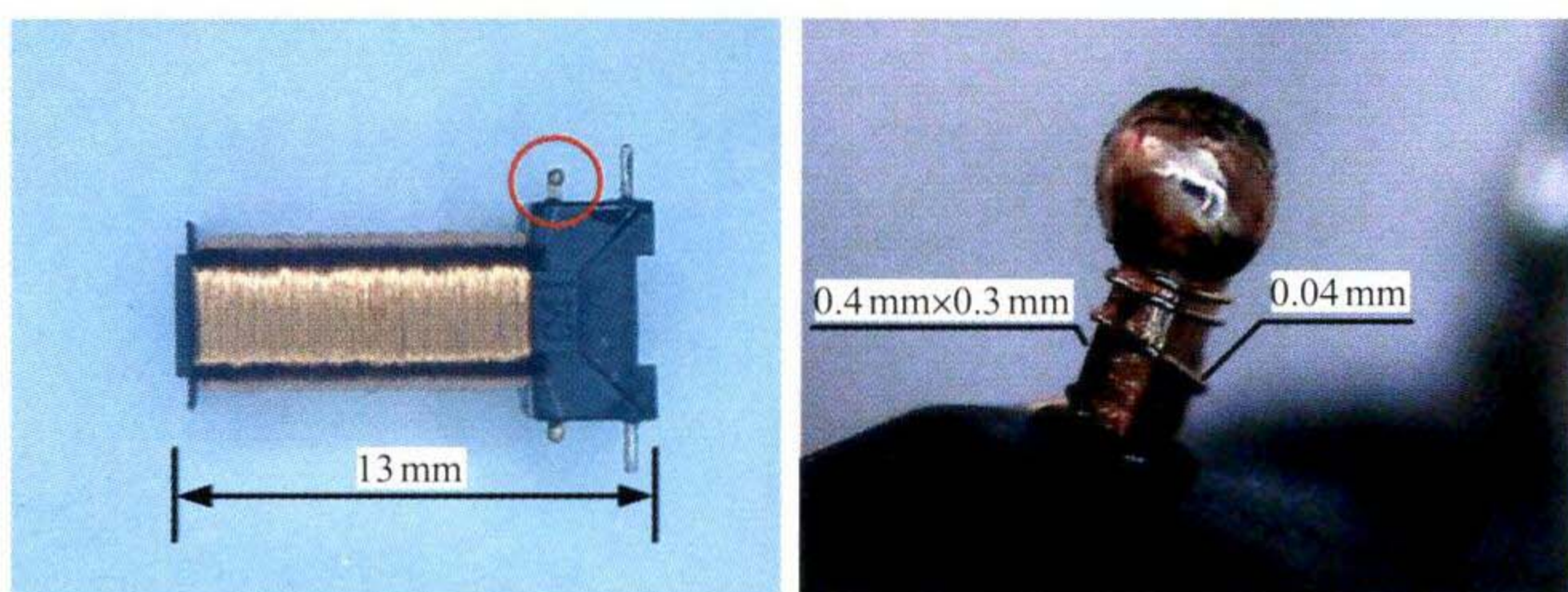


图 12 实际焊接接头效果图
Fig.12 Actual pictures of the welded joint

3 结论

(1) 设计了新型拓扑结构的高频切换电路,研制了高频脉冲微 TIG 电源。输出脉冲微电流频率最高可达 60kHz, 脉冲电流的上升、下降沿均在 $1 \mu s$ 以内。

(2) 电弧等离子体行为存在滞后性,使得高频脉冲电弧在基值阶段能维持较高的电导率,基值电压远低于稳态电弧电压,这一效应随频率增大而增强。基值脉冲电弧的伏安特性相对于电弧静特性更加平稳,有利于维持微 TIG 焊的电弧稳定。

(3) 在高频脉冲微 TIG 焊接中,不叠加基值电流(维弧电流)依然可以实现稳定焊接,保持电弧燃烧的极限 0 基值时间与脉冲电流大小成线性相关,电源的最小稳定焊接电流低至 0.5 A。采用该电源对漆包线和端柱封装进行焊接,取得了良好的焊接效果。

参考文献:

- [1] Gordon L. Micro-arc welding /brazing of metal to metal and metal to ceramic joints:US,247770[P]. 1981-03-26.
- [2] Pang Shixuan, Cao Biao. Low current arc ignition stability in micro-TIG welding [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021,69:12-20.
- [3] 范文艳. 基于 SiC 器件的快频脉冲 TIG 焊接电源研究[D]. 广州:华南理工大学,2019.
- [4] Da Cunha T V, Bohorquez C E N. Effects of current pulsation at ultra-high frequency on physical aspects of the arc and its implications in the weld bead morphology in the GTAW process[J]. Weld World,2021,65(2):251-261.
- [5] 李显,宋永伦,卢振洋,等. 2219 铝合金高频耦合脉冲 TIG 焊接工艺[J]. 焊接学报,2015,36(5):17-20.
- [6] 汪殿龙,陈彦朝,李海洋,等. 高频脉冲电流耦合交流 CMT 焊对 2060 铝合金接头组织与力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2017,46(21):13-16.
- [7] 赵家瑞,张东元,孙栋,等. 矩形波直流脉冲 TIG 焊电弧稳定性的研究[J]. 焊接学报,1988(3):171-180.
- [8] 赵家瑞. 电流脉冲频率对 TIG 焊电弧影响机理的研究[J]. 电焊机,1993(2):16-18.
- [9] 齐铂金,许海鹰,周兴国,等. 快变换超音频直流脉冲 TIG 焊[J]. 焊接学报,2009,30(7):57-60.
- [10] 王奕楷,庞世炫,王燮阳,等. 高频脉冲复合直流微 TIG 焊接电源及其电弧形态特征[J]. 焊接,2023(3):54-59.
- [11] 安藤弘平,长谷川光雄. 焊接电弧现象(增补版)[M]. 施雨湘,彭日辉,译. 北京:机械工业出版社,1985.
- [12] 胡坤平,宋永伦,夏源,等. 交流 TIG 电弧的过零过程及其状态特征[J]. 焊接学报,2006(12):29-33. 