

小束斑电子束脉冲轰击偏压电源的研制*

范 恺,许海鹰,杨 波,桑兴华

(中国航空制造技术研究院高能束流加工技术国防科技重点实验室,北京 100024)

[摘要] 为了获得一种性价比较高的电子束表面处理技术,采用定频调压电路,研制出一种新型偏压脉冲电源。这种电源由偏压主电路拓扑、偏压变压器和偏压整流滤波电路组成,其中偏压主电路由偏压基值发生电路和偏压脉冲发生电路组成。偏压基值发生电路控制偏压脉冲基值,偏压脉冲发生电路控制偏压脉冲频率和占空比。脉冲偏压电源的脉冲基值、脉冲频率、占空比均连续可调,相应实现脉冲束流的幅值、束流频率和占空比的调节。检测分析了脉冲偏压电源的输出电压波形,带载时的输出束流波形,并观察分析了电子束轰击后钨合金组织变化规律。结果表明所研制的脉冲偏压电源输出电压稳定、可调性好,能满足小束斑脉冲电子束轰击工艺的要求。

关键词: 逆变电源;电子束;脉冲偏压电源

Design of Small Beam Spot Electron Beam Pulse Bias Power Supply

FAN Kai, XU Haiying, YANG Bo, SANG Xinghua

(National Key Laboratory of Science and Technology on Power Beam Processes, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] In order to obtain a cost-effective electron beam surface treatment technology, using a constant frequency voltage regulator circuit, we developed a new type of bias pulse power supply. The power supply was composed of a bias main circuit topology, a bias voltage transformer and a bias rectification filter circuit, where the bias main circuit was composed of a bias base value generating circuit and a bias voltage generating circuit. The bias value generating circuit controls the bias voltage pulse base value, and the bias pulse generation circuit controls the bias pulse frequency and the duty ratio. The pulse base value, pulse frequency and duty ratio of the pulse bias power supply are continuously adjustable, and the amplitude, beam frequency and duty ratio of the pulse beam are adjusted accordingly. The waveforms of the output voltage of the pulsed bias power supply and the output waveform of the pulsed bias power supply are stable and tunable, which can meet the requirements of small beam spot pulse electron beam bombardment process.

Keywords: Inverter power supply; Electron beam; Pulsed bias power supply

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2017.12.104

受控热核聚变是一种理想的清洁能源,但有效利用这种聚变能,在国际上还存在诸多技术难题,其关键问题之一就是面向高温等离子体的第一壁结构材料的选择^[1-2]。目前国内外常用的材料有钨、碳基材料和铍等。等离子体与第一壁的相互作用主要产生两方面结果,一是粒子流和能量流轰击器壁产生杂质,杂质进入主约束区,对等离子体约束和品质产生不利影响;二是粒子流和能量流轰击器壁^[3-4],造成第一壁材料损伤。因此,对第一壁的损伤防护将成为受控热核聚变中重要的研究内容之一。

由于聚变反应条件十分苛刻,研究耗资巨大,世界

上建立了多种不同的测试设备进行高热复合模拟试验,其中包括电子束、等离子体束和离子束技术。目前聚焦电子束技术已经十分成熟,大部分高热流测试设备都是用能量聚焦的电子束为基础进行试验^[5-6]。

目前,脉冲电子束发生大多采用一种强束流脉冲电子束设备,其电压通常为几十千伏,输出电流为100kA以上,这种设备制造技术难度大,应用条件苛刻,难以适应高热复合模拟试验技术的发展对脉冲电子束设备的要求。因此,本研究针对脉冲轰击电源在电子束电源系统中的作用,比较了目前常用的逆变及斩波脉冲电源后,设计了一种新型的脉冲偏压电源结构,包括脉冲轰击电源的主电路拓扑结构和控制电路,通过调节高压隔

* 基金项目:航空科学基金项目(2015ZE25005)。

离变压器前级低压电路方式生成脉冲偏压,通过控制前级低压电路实现偏压脉冲频率、幅值和占空比的调节,对应实现脉冲束流频率、幅值和占空比连续可调,此模式相对于常用的后级高压控制简单可靠。采用基于该电源的小束斑脉冲轰击设备对钨合金进行小束斑轰击试验,初步探讨了小束斑电子束脉冲对钨合金组织性能的影响及变化规律。

1 脉冲偏压电源电路设计

1.1 偏压电源作用

为实现三级电子枪正常工作,需要脉冲电子束轰击电源同时具备加速电源、灯丝加热电源及偏压电源3套电源。脉冲电子束轰击电源结构如图1所示^[7-8]。

脉冲偏压电源产生一个相对于灯丝为负的电压,悬浮于加速电源上,实现对电子束流大小的控制。电子束流和偏压对应关系如图2所示,可以看出,输出束流随着偏压的增大而减小,当偏压高于一定电压值后,无束流产生。

脉冲偏压电源施加的偏压如图3(a)所示,对应产生的脉冲束流如图3(b)所示。

可以看出,当偏压为脉冲偏压 U_p 时,由于偏压对电子束的抑制作用,无束流产生,当偏压为基值偏压 U_b 时,对应产生脉冲束流为 I_b 。通过调整基值偏压 U_b 的

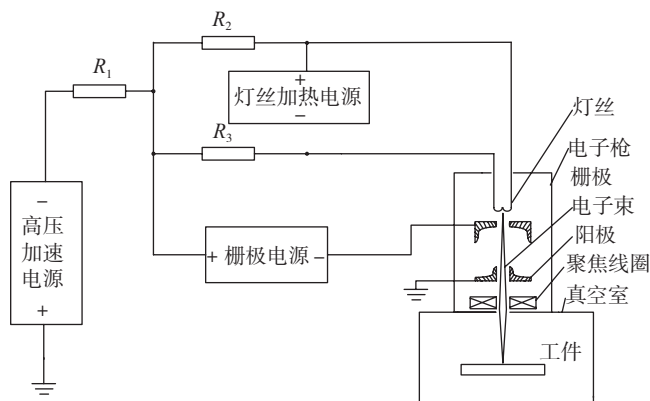


图1 脉冲电子束轰击电源示意图

Fig.1 Schematic diagram of pulsed electron beam bombardment power supply

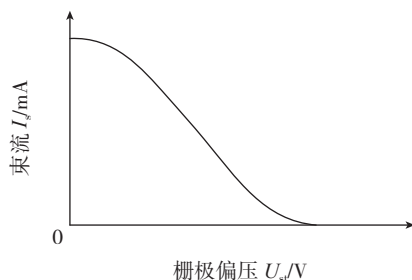
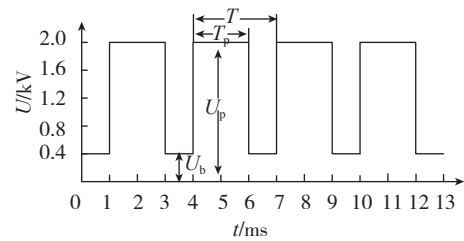
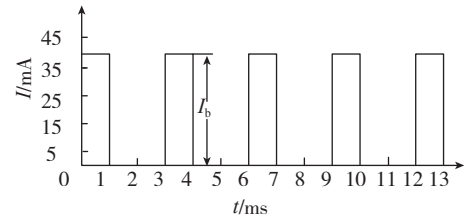


图2 束流与偏压关系示意图

Fig.2 Relationship between beam current and gate bias voltage



(a) 脉冲偏压



(b) 脉冲束流

图3 脉冲束流与脉冲偏压关系示意图

Fig.3 Relationship between pulsed beam current and pulse bias

大小来调整脉冲束流 I_b 的大小,通过调整脉冲偏压的频率和占空比调整脉冲束流的频率和占空比。

本研究所设计偏压电源与传统的经典电子枪偏压电源有所不同,体现在偏压的控制上。主要创新有两点:(1)常规的电子束偏压电源如改为脉冲输出,不容易实现脉冲束流值大小的灵活调节,其束流值是在0V到最大值之间跳动。而本研究所设计偏压电源,由于将其分为基值电路和脉冲电路两部分,脉冲电路对应控制其输出电压的频率、占空比和脉宽等参数,而控制其束流大小的基值电压幅值是可调的,这就可以实现对脉冲束流从0V到最大值之间任意大小的灵活调节。(2)相对于在高压部分进行调节的偏压电源,本研究所设计的电源易于控制,而且偏压脉冲电源是悬浮于-60kV的加速电压上工作,引入了变压器隔离之后,前级低压控制电路和后级高压电路被隔离开,减小了高压放电对电源低压电路及电网上其他设备造成的干扰,整个电源安全系数较高。

1.2 偏压电源主电路设计

脉冲偏压主电路拓扑如图4所示,主要结构包括前级低压控制电路、偏压变压器和整流滤波电路。

前级低压控制电路由偏压基值发生电路及偏压脉冲发生电路两部分电路构成。偏压基值发生电路控制电路部分为由振荡发生电路、偏压信号给定电路及输出电路3部分构成的基值定频调幅电路,如图4所示,前级低压控制电路中,定频调幅电路输出方波经过1:60的功率偏压变压器,将输入的15V低压交流电转换为900V频率相同的交流电。偏压变压器将原边电压升压,最后经由整流电路 B_1 和滤波电容 C_1 组成的整流滤波电路将交流方波整流为直流。

偏压脉冲发生电路低压控制部分为由振荡发生电

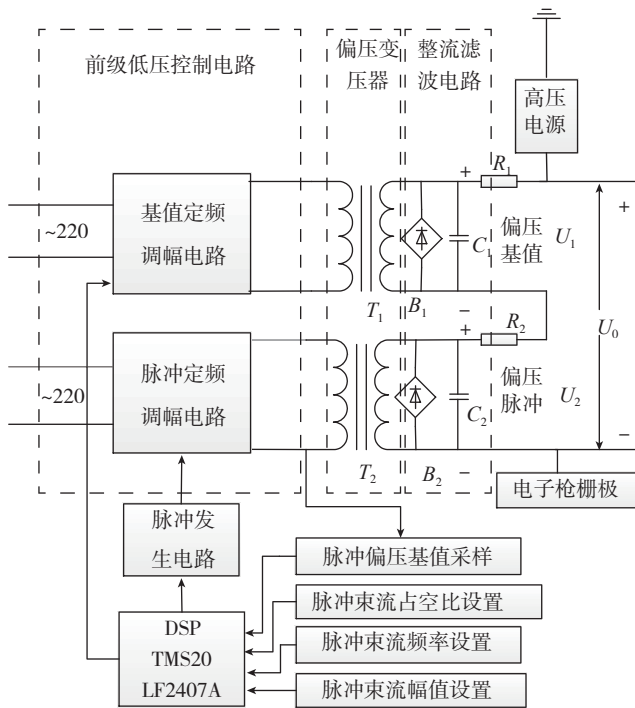


图4 脉冲偏压电源主电路结构

Fig.4 Main circuit structure of pulse bias power supply

路、脉冲信号给定电路及输出电路3部分构成的脉冲定频调幅电路。脉冲定频调幅电路输出一定频率的脉冲交流,连接到偏压变压器 T_2 原边,偏压变压器将原边电压升压,最后经由整流电路 B_2 和滤波电容 C_2 组成的整流滤波电路将交流方波整流为脉冲电压。

该电路工作过程有两种模式,当不需要输出束流时,即基值发生电路和脉冲发生电路均输出电压时,测量整流滤波电路的输出电压 U_0 。由于基值电路输出电压 U_1 和脉冲发生电路输出 U_2 相串联,且两电路由同一给定信号并联输入,当基值电压 U_1 降低一定电压值 ΔU 时,相应的 U_2 同时增加 ΔU ,故在输出端测得偏压 $U_0 = U_1 + U_2$ 为稳定不变的直流电压,此时无电子束输出。

当有束流输出时,即偏压基值发生电路有输出电压 U_1 ,而偏压脉冲发生电路输出电压 $U_2 = 0$ 时,由于脉冲发生电路输出为 $0V$,故整流滤波电路输出端电压为基值电压输出,即 $U_0 = U_1$,此时有电子束输出,束流大小与偏压基值电路输出电压相关,低基值偏压对应大束流值。

1.3 偏压电源控制电路设计

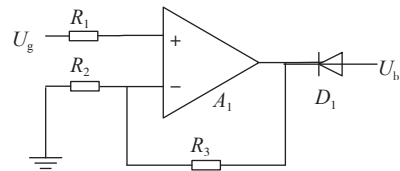
偏压电源控制电路主要为前级低压控制电路,其中输出电路及给定信号的控制调节为控制电路主要部分。

图5为偏压给定信号电路图,图5(a)为偏压基值给定信号电路,输入给定电压 U_g ,经运放 A_1 将信号放大后,通过开关二极管与输出电路串联,输出基值给定电压 U_b 。图5(b)为偏压脉冲给定信号电路,其中脉冲信号发生电路主要产生脉冲频率、占空比幅值可调的脉

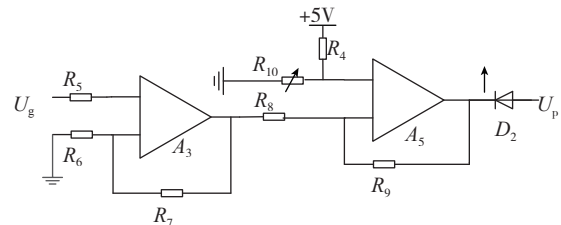
冲电压,将其作用于偏压给定信号时,脉冲给定输出电压 U_p 被拉低至 $0V$ 。在输入同一给定信号 U_g 时,可以看出基值及脉冲两个输出给定信号为幅值相同,相位相反的直流电压。经输出模块,输出幅值相同,相位相反的方波,经偏压变压器升压,整流滤波电路输出串联后,输出稳定不变的直流偏压。

图6为输出电路调节原理图,振荡电路与偏压信号通过开关二极管并联输出后,通过 R_1 输入运放 A_4 负输入端,在偏压基值电路中,当输入信号为偏压给定信号时,电压由 $0V$ 向正跳变,由于电容 C_1 的充电作用,运放负输入端产生一个短时间正电压,导致运放输出端输出负电压,此时三极管 Q_2 导通,输出电压为正,当输入信号为振荡方波低电平时,电压由正电压向 $0V$ 跳转,由于电容 C_1 的放电作用,运放负输入端产生一个短时间负电压,导致运放输出正电压,并保持稳定不变,此时三极管 Q_1 导通,输出电压为负,在一个完整周期内,输出一个完整方波信号,此方波信号频率与定频调幅电路频率相同。

偏压脉冲产生电路调节过程为:由偏压脉冲电路输出频率幅值和占空比一定的交流脉冲波,对其采样后输



(a) 基值给定信号电路



(b) 偏压脉冲给定信号电路

图5 偏压给定信号电路图

Fig.5 Bias voltage given signal circuit diagram

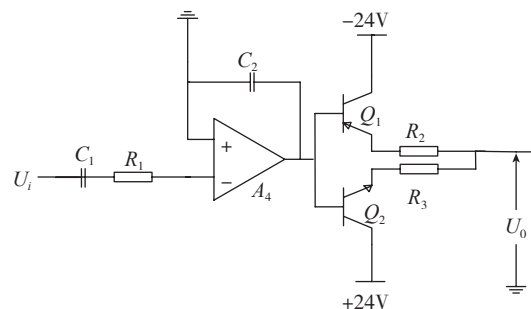


图6 输出电路调节原理图

Fig.6 Adjustment schematic of output circuit

入 DSP 对反馈值进行闭环运算处理,输出信号对脉冲发生电路进行调节,控制其输出脉冲的频率和占空比。从而控制偏压给定信号的频率及占空比,完成对整个偏压脉冲电路的调节。

脉冲束流控制原理图如图 7 所示,在 $[0 \sim t_1]$ 时间内,无脉冲信号给出,偏压基值电路及偏压脉冲电路均正常输出电压,整流滤波电路正常输出,偏压输出为一幅值固定的直流电,此时无束流输出。

$[t_1 \sim t_2]$ 时间内,有脉冲信号,此时偏压基值电路正常输出电压,偏压脉冲电路中,偏压给定信号电位拉低为 0V,无给定信号,电压输出为 0V,基值整流滤波电路正常输出,偏压脉冲整流滤波电路无输出,偏压电压值即为基值电压,电子束输出束流。由图 7 中可以看出,控制基值电压输出,可调节束流输出值,控制外部脉冲输入信号关断的频率和占空比,可控制脉冲输出的频率和占空比,从而调节束流频率和占空比。

1.4 束流采样电路设计

当电子束流从电子枪阴极发射,经聚焦线圈汇聚轰击工件时,此过程可等效成有相同大小的电流从阳极流入阴极。因此为测量电子束流大小,可在主回路中串入采样电阻,通过测量采样电阻两端电压来求得束流值大小。由于通过电阻的电压和电流的线性关系,选取合适的电阻,即可将采样电阻的电压信号 U_b 转换成所需的束流反馈信号 I_b 。 R_b 取样电阻用 90Ω 精密电阻,可计

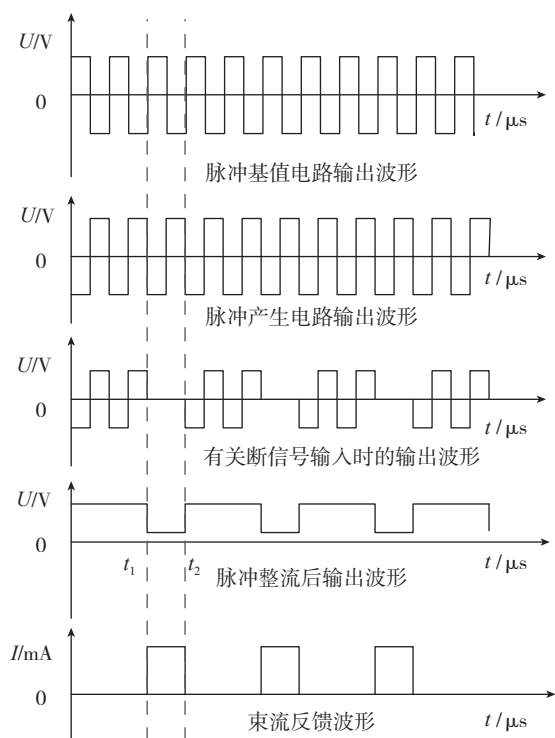


图7 脉冲束流工作时序图

Fig.7 Working sequence of pulsed beam

算当电压为 9V 时,轰击束流为 100mA。束流计算方式为:

$$I_b = \frac{U_b}{R_b}$$

2 试验

2.1 空载无脉冲信号输入试验

不连接电子枪,空载,无脉冲信号时,偏压给定信号从 0V 逐渐增加,记录对应的整流滤波电路串联输出直流电压,直至偏压给定信号增至最大 5V。检测结果如图 8 所示。

可以看出,当电压从 0V 开始增大时,对应的输出电压为 1.91kV,随着给定电压逐渐增大,输出的偏压值略有波动,但最小电压为 1.87kV,最大电压值为 1.93kV,可以说串联输出直流电压随着偏压给定信号的增大基本保持不变,输出偏压较为稳定。图 9 为偏压给定信号为 3V 时,利用 TPS2024 示波器采样得到的整流滤波电路输出直流电压值。

2.2 轰击试验

利用航空工业北京航空制造工程研究所自制电子枪, $1m^3$ 真空室及相配套的加速电源、灯丝加热电源、本研究所研制的脉冲偏压电源所组成的脉冲电子束轰击电源对 $10mm \times 10mm$ 的 W90 合金进行电子束表面轰击试验,具体轰击参数如表 1 所示。试验中所有试样轰击距离为 260mm,轰击次数为 100 次。

在加速电压、基值电压、给定束流相同的情况下,不同脉宽频率得到的电子束大小是不同的,在加速电压 30kV,基值电压 300V,给定束流 27mA 的条件下,随着脉宽从 0.5s 增加至 2s,束流反馈值略有增大,从 23mA 增加至 24.8mA。这可能是由于上升沿时间较长所导致,可以看出负载情况下反馈束流值并没有达到给定值,但已满足一般脉冲电子束轰击逆变电源要求。当加速电压、轰击频率、脉宽、占空比相同时,可以看出随着基值电压的降低,电子束流值增大,且线性度较好。

当轰击条件为给加速电压 30kV,给定束流 40mA,轰击频率 1Hz,占空比 10% 时,在 90Ω 采样电阻上检测

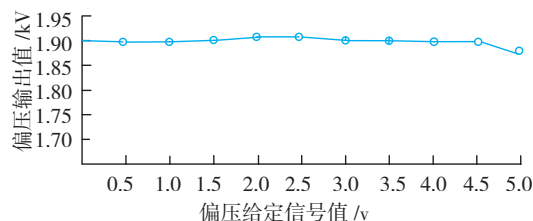
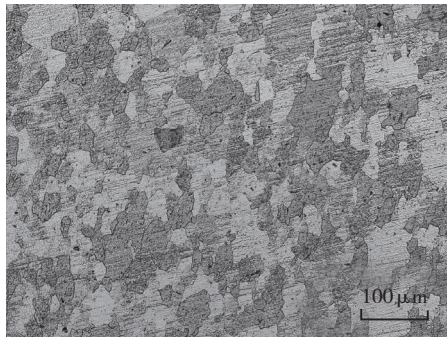


图8 偏压电源输入输出对应关系图

Fig.8 Bias power supply input and output correspondence diagram

表1 电子束轰击工艺参数

试件	加速电压 U/kV	基值电压 U_b/V	给定束流 I_b/mA	轰击频率 F/Hz	占空比 $D/\%$	脉宽 t/s	聚焦电流 I_f/mA	束流反馈 I_r/mA
1	30	300	27	0.4	20	0.5	360	23
2	30	300	27	0.33	33	1	360	24.3
3	30	300	27	0.25	50	2	360	24.8
4	30	150	40	0.4	20	0.5	480	34
5	30	150	40	0.33	33	1	480	35.4
6	30	150	40	0.25	50	2	480	36.3
7	35	200	35	0.4	20	0.5	430	32.4
8	35	200	35	0.33	33	1	400	33.2
9	35	200	35	0.25	50	2	400	34



(a) 钨 90 合金电子束轰击 200 倍金相图



(b) 未轰击钨 90 合金 200 倍金相图

图9 钨90合金脉冲电子束轰击金相图

Fig.9 Tungsten 90 alloy pulsed electron beam bombardment metallographic diagram

到束流反馈信号为 3.4V,在此试验条件下测得偏压电源输出波形图,输出电压基本稳定、可调性好,满足轰击电源稳定输出的要求。

图 9 为 7 号试样与未轰击合金表面金相组织图。电子束与材料表面作用时,携带能量瞬间沉积在表面,沉积能量转化为比内能,使材料表面组织发生变化^[9-10],多次轰击后,材料表面重熔变得粗糙,无明显裂纹,晶粒组织细化。随着束流参数及加速电压的增加,烧蚀与重熔过程愈加剧烈。所有试样从表面并未看出严重损伤,这可能与工艺参数中工作距离、轰击次数、束流大小等参数选择不合适有关,电子束轰击对钨合金材料性能具

体影响需进一步试验进行探索研究。

3 结论

本研究所研制脉冲电子束轰击偏压电源由基值电路与脉冲电路两部分构成,通过调节基值电路输出电压幅值从最大到 0V,可控制束流从 0mA 增加至最大值,通过调节脉冲电路的脉冲频率及占空比,可调节输出束流的脉冲频率及占空比,实现脉冲频率 0.1~50Hz 连续可调,占空比 10%~60% 连续可调。试验结果表明所研制的脉冲偏压电源具有输出电压稳定,控制精度高,可调性好等优点。

该电源相对于常规电子束脉冲电源而言,可灵活调节脉冲电源的基值电压,达到输出束流大小可调的目的。同时由于引入了高频偏压变压器,使得高压电路与前级低压电路隔离开,减小了高压放电对电源低压电路及电网上其他设备造成的干扰,整个电源安全系数更高。

利用所研制的脉冲电子束轰击偏压电源组成的脉冲电子束轰击电源对 W90 合金进行轰击试验,随着束流参数及加速电压的增加,烧蚀与重熔过程愈加剧烈;随着脉冲脉宽的增加,束流反馈值增大;随着基值电压的降低,束流反馈值增大。满足小束斑脉冲电子束轰击工艺的要求。

参考文献

- [1] 周张健,钟志宏,沈卫平,等. 聚变堆中面向等离子体材料的研究进展[J]. 材料导报,2005,19(12): 5-8.
ZHOU Zhangjian, ZHONG Zhihong, SHEN Weiping, et al. Progress in plasma materials for fusion reactors[J]. Materials Review, 2005,19 (12): 5-8.
- [2] 程念安. 脉冲强流束小焦斑探讨[J]. 爆轰波与冲击波, 2002(2): 54-57.
CHENG Nianan. Intensity beam pulse small focal spot to explore [J] Detonation and Shock Waves, 2002 (2): 54-57.
- [3] 莫力林,韦寿祺. 大型电子束轰击炉束功率控制系统的设计[J]. 硬质合金, 2009, 26(4): 240-245.
MO Lilin, WEI Shouqi. Design of power control system for large

electron beam bombardment furnace beam [J]. Cemented Carbide, 2009, 26(4): 240–245.

[4] 韦寿祺, 莫金海, 何少佳. 大功率电子束轰击炉电子枪电源控制策略 [J]. 真空科学与技术报, 2008, 28(2): 58–62.

WEI Shouqi, MO Jinhai, He Shaojia. Power supply control strategy of electron gun for high power electron beam bombardment [J]. Vacuum Science and Technology, 2008, 28(2): 58–62.

[5] 张向东, 郝胜智, 高泰瑞. 强流脉冲电子束处理纯钛的表面组织与性能 [J]. 核技术, 2011, 34(1): 22–26.

ZHANG Xiangdong, HAO Shengzhi, GAO Tairui. The surface microstructure and properties of titanium treated by high current pulsed electron beam [J]. Nuclear Technology, 2011, 34(1): 22–26.

[6] 郝胜智, 吴平生, 张向东, 等. 强流脉冲电子束表面处理 [J]. 金属热处理, 2008, 33(1): 77–81.

HAO Shengzhi, WU Pingsheng, ZHANG Xiangdong, et al. Surface treatment of high current pulsed electron beam [J]. Heat Treatment of Metals, 2008, 33(1): 77–81.

[7] 高玉魁. 脉冲电子束改性 TC4 钛合金微观组织和性能 [J]. 材料热处理学报, 2010(4): 120–124.

GAO Yukui. Microstructure and properties of TC4 titanium alloy modified by pulsed electron beam [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2010(4): 120–124.

[8] 曹辉, 郝仪, 孙树臣. 电子束表面改性对镁合金耐磨性的影响 [J]. 轻金属, 2011(4): 45–49.

CAO Hui, HAO Yi, SUN Shuchen. Effect of electron beam surface modification on wear resistance of magnesium alloys [J]. Light Metals, 2011(4): 45–49.

[9] 许洪斌, 胡建军, 陈元芳, 等. 脉冲电子束照射下材料表面熔化深度的数值解析 [J]. 重庆大学学报 (自然科学版), 2008, 31(12): 1351–1354.

XU Hongbin, HU Jianjun, CHEN Yuanfang, et al. Numerical analysis of melting depth of material surface under pulsed electron beam irradiation [J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2008, 31(12): 1351–1354.

[10] 王泽庭. 高压电子束焊机电源的研究与实现 [D]. 北京: 北方工业大学, 2011.

WANG Zeting. Research and implementation high voltage electron beam welding machine power [D]. Beijing: North China University of Technology, 2011.

通讯作者: 范恺, 硕士, 研究方向为新型特种电源, E-mail: 273160798@qq.com。

(责编 铃兰)

(上接第98页)

an elliptical pad [J]. Optical Instruments, 2011, 33(1): 83–88.

[6] 肖晓兰, 阎秋生, 潘继生, 等. 超精密磁流变复合抛光技术研究进展 [J]. 广东工业大学学报, 2016, 33(6): 28–33.

XAO Xiaolan, YAN Qiusheng, PAN Jisheng, et al. A review on ultra-precision compound polishing technology of magnetorheological [J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2016, 33(6): 28–33.

[7] SINGH A K, JHA S, PULAK M P. Mechanism of material removal in ball end magnetorheological finishing process. Wear, 2013, 302(1–2): 1180–1191.

[8] XIE X H, HAO Y, ZHOU L, et al. High thermal expansion

optical component machined by ion beam figuring [J]. Optical Engineering, 2012, 51(1): 13401–13401.

[9] 焦长君, 李圣怡, 王登峰, 等. 离子束加工光学镜面的材料去除特性 [J]. 光学精密工程, 2007, 15(10): 1520–1526.

JIAO Changjun, LI Shengyi, WANG Dengfeng, et al. Material removal property in ion figuring process for optical components [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(10): 1520–1526.

[10] TAIN Y, KAWATA K. Development of high efficiency fine finishing process using magnetic fluid [J]. Annals of the CIRP, 1984, 33(1): 217–220.

[11] SHIMADA K, AKAGAMI Y. Characteristics of magnetic compound fluid (MCF) in a rotating rheometer [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2002, 252(1): 235–237.

[12] WU Y B, SHIMADA K. Effects of particles blend ratio on surface quality in surface polishing using magnetic polishing liquid (MPL) [J]. Advances in Abrasive Technology, 2005, 291–292(6): 337–342.

[13] SHIMADA K, AKAGAMI Y, KAMIYAMA S, et al. New microscopic polishing with magnetic compound fluid (MCF) [J]. J. Intell. Mater. Syst. Struct, 2002, 13(7): 405–408.

[14] 王续跃, 吴勇波. 磁性复合抛光液配制及其抛光性能试验研究 [J]. 大连理工大学学报, 2006, 46(6): 832–836.

WANG Xuyue, WU Yongbo. MPT development and polishing characteristics test [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2006, 46(6): 832–836.

[15] GUO H R, WU Y B. Ultrafine polishing of electroless nickel-phosphorus-plated mold with magnetic compound fluid slurry [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2014, 29(11–12): 1502–1509.

[16] 李文妹, 姜晨, 许继鹏, 等. 光学玻璃磁性复合流体抛光液研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(6): 266–273.

LI Wenmei, JIANG Chen, XU Jipeng, et al. Research for magnetic compound fluid slurry of optical glass [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(6): 266–273.

通讯作者: 王振忠, 博士、副教授, 主要研究方向为精密加工装备及系统控制、精密检测, E-mail: wangzhzhong@xmu.edu.cn。

(责编 铃兰)

(上接第103页)

Technology, 2014, 70: 227–236.

[15] BAUFELD B, BRANDI E, BIEST O. Wire based additive layer manufacturing: comparison of microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V components fabricated by laser-beam deposition and shaped metal deposition [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(6): 1146–1158.

[16] 张安峰, 李涤尘, 梁少端, 等. 高性能金属零件激光增材制造技术研究进展 [J]. 航空制造技术, 2016(22): 16–22.

ZHANG Anfeng, LI Dichen, LIANG Shaoduan, et al. High performance metal parts laser additive technology research progress [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(22): 16–22.

通讯作者: 夏然飞, 硕士、初级工程师, 研究方向为增材制造、汽车制造, E-mail: xiaranfei1@163.com。

(责编 铃兰)