

引文格式: 王海洋, 董全林, 赵然, 等. 一种 60 kV 焊接用太空电子枪的设计研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(3): 119–124.

WANG Haiyang, DONG Quanlin, ZHAO Ran, et al. Design and research of a space electron gun for 60 kV welding[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(3): 119–124.

一种 60 kV 焊接用太空电子枪的设计研究*

王海洋¹, 董全林¹, 赵然², 张永泰³, 王思展³, 刘业楠³

(1. 北京航空航天大学, 北京 100083;

2. 迪瑞医疗科技股份有限公司, 长春 130012;

3. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

[摘要] 采取间接式阴极加热方式并选取 LaB₆ 作为阴极材料, 设计了一种焊接用太空电子枪。利用 Vaughan 综合迭代法得出了电子枪的初值, 根据这些初值设计了电子枪的 3 极结构, 并对磁透镜进行了设计。通过仿真不断地对电子枪的 3 个电极和透镜的参数进行适当地调整, 以使仿真结果满足实际设计目标要求, 同时在透镜的调试过程中进行了规律性分析。试验表明, 该设计满足总发射束流 60 mA 和交叉斑直径 0.3 mm, 以及在工作距离 300 mm 处束斑 0.4 mm 的目标参数, 此设计方法和整套设计流程可以为电子枪的设计提供一定的参考。

关键词: 焊接用太空电子枪; LaB₆ 阴极; Vaughan 综合迭代法; 磁透镜; Source 仿真

Design and Research of a Space Electron Gun for 60 kV Welding

WANG Haiyang¹, DONG Quanlin¹, ZHAO Ran², ZHANG Yongtai³, WANG Sizhan³, LIU Yanan³

(1. Beihang University, Beijing 100083, China;

2. Dirui Industrial Co., Ltd., Changchun 130012, China;

3. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

[ABSTRACT] A space electron gun for welding was designed, in which LaB₆ is chosen as cathode material and the cathode is heated by indirect cathode. The initial values of the electron gun are obtained by using the comprehensive iterative method of Vaughan. According to these initial values, the three-pole structure of the electron gun is designed, and then the double magnetic lens is designed. The results show that the parameters of the three electrodes and the lens of the electron gun are adjusted to make the simulation results meet the requirements of the actual design. At the same time, the regularity of the lens debugging process is analyzed. The simulation results show that the design meets the target parameters of 60 mA total emission beam, 0.3 mm cross spot diameter and 0.4 mm beam spot at 300 mm working distance. This design method and the whole design process can provide some reference for the design of electron gun.

Keywords: Space electron gun for welding; LaB₆ cathode; Vaughan's comprehensive iteration method; Magnetic lens; Source simulation

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.03.119

近年来,以电子光学系统为核心的仪器设备已广泛应用于生物、材料等多个学科^[1-2],并在航空航天、生物医学、半导体加工制造等众多行业领域中发挥着举足轻

重的作用^[3-5]。焊接用太空电子枪属于发展迅速且应用广泛的电子光学系统,其研究与发展促进了多个领域的进步。

* 基金项目: 北京卫星环境工程研究所创新基金(CAST-BISEE2019-040)。

电子束焊接具有能量密度高,焊接速度快,工件变形小,电子束易于控制等特点,极其适合完成太空中的焊接工作^[6]。与欧美等一些国家相比,我国太空焊接技术的研究起步较晚^[7-8]。电子枪焊接技术的研究对我国的航空航天事业发展具有十分重要的意义。本文设计了一种 60 kV 焊接用太空电子枪并进行了仿真,得到了满意的结果。

1 电子枪设计参数

电子枪设计参数如表 1 所示。

2 电子轰击间热式阴极

电子枪的性能直接影响着电子束焊接质量,要想提高电子枪的功率,有提高加速电压和增大阴极发射电流两种方法,然而,过度提高加速电压会产生 X 射线,对人体造成一定的伤害,需要采取一定的防护措施,这给电子枪的设计带来很大的不便。

因此,可通过增加阴极发射电流的方式去提高电子枪的功率,这需要选用电子发射能力较强的阴极材料。该方案不需要采取特殊的措施,安全性高,同时可以很好地满足设计要求。

2.1 阴极加热方式

阴极的加热方式通常有直热式和间热式。间热式加热方式是由灯丝通交流电以后加热发射出电子,电子再去轰击阴极致使其温度升高而发射出电子。间热式阴极具有束斑较为固定,使用寿命长,发射电流密度高等优点。因此本文设计的太空电子枪采用间热式阴极。

2.2 阴极及灯丝材料的选择

理想的阴极材料需要有功函数较低,工作寿命长,发射性能稳定,熔点高等特点。在热发射类型中,最常用的两种电子枪阴极材料是钨(W)和六硼化镧(LaB₆)。LaB₆是一种新型的阴极材料,具有金属良好的导电性且逸出功低,工作在 1400~1680 °C 内时,可以

获得 0~100 A/cm² 的直流发射电流,远胜于氧化物及纯金属阴极。从理论上讲,场发射性能要优于其他发射类型,但由于目前的技术不够成熟等原因,场发射还不能得到广泛的应用。

Source 是一套分析和设计电子源的程序,软件采用二阶有限元法,可对静电场和磁场进行计算以及对电子束进行分析^[9]。为了更好地研究 W 和 LaB₆ 的发射性能,利用 Munro 软件程序中 Source 模块计算两者在一定条件下(设定阴极尺寸、栅极电压等)的阴极温度与束流大小关系,利用 Matlab 做出曲线,如图 1 所示。

对比观察图 1,两者关系曲线的形状大致相同,但要获得 60 mA 的束流,W 阴极的温度要达到 2900 K,而 LaB₆ 阴极只需要 1900 K,显然与传统的钨阴极相比,LaB₆ 阴极发射性能更好。这是因为 LaB₆ 的逸出功比 W 小很多,只需要较低的温度便可获得较大束流。LaB₆ 高温下性能稳定,重复使用性能好,并且 LaB₆ 阴极的使用寿命远大于 W 阴极。因此,本研究选用 LaB₆ 作为阴极材料,以 W 作为灯丝发射电子轰击 LaB₆ 阴极。这样 LaB₆ 阴极在较低的温度下就可以发射出大量的电子,并且性能稳定,可以满足大功率电子枪的设计需求^[10]。

3 电子枪与透镜的初值计算

3.1 电子枪的初值计算

对于电子枪的设计,本研究通过加速电压 U 、发射束流 I 、注腰半径 r_w 、阴极发射电流密度 j_c 这 4 个参数来计算电子枪初值。需要计算出的初值参数主要有阴极截面半径 r_c 、阴极半锥角 θ 、阴极曲率半径 R_c 、阳极曲率半径 R_a 、阳极孔半径 r_a 、阳极头位置 Z_a 等。

首先计算得到修正电压,即

$$U_r = U(1 + 10^{-6}U) \tag{1}$$

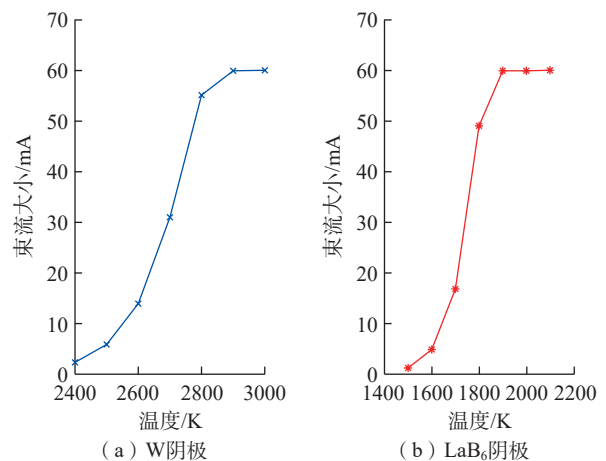


图 1 W 和 LaB₆ 温度与束流关系曲线
Fig.1 Temperature and beam relation curves of W and LaB₆

表 1 电子枪设计参数
Table 1 Design parameters of electron gun

参数	数值
功率/kW	3.6
加速电压/kV	60
束流/mA	60
电子枪交叉斑直径/mm	0.3
工作平面束斑直径/mm	0.4
工作距离/mm	300

然后可以计算出导流系数 P (单位为 μP) 和 r_c , 即

$$P = 10^6 I / U_r^{3/2} \quad (2)$$

$$r_c = (I / (\pi j_c))^{1/2} \quad (3)$$

根据式(4)得到 θ 初始值为

$$\theta = 30P^{1/2} \quad (4)$$

这一值可能和最终的结果有一定的差距, 但不会影响最终得到的结果, 因为综合迭代法能自动校正。得到 θ 值以后, 根据式(5)可以得到朗缪尔参数 $(-\delta)$, 即

$$(-\delta) = \sqrt{\frac{14.67(1 - \cos\theta)}{P}} \quad (5)$$

再由式(6)和(7)得到中间变量 γ 和 $\tan\phi_1$, 即

$$\gamma = (-\delta) - 0.275(-\delta)^2 + 0.06(-\delta)^3 - 0.006(-\delta)^4 \quad (6)$$

$$\tan\phi_1 = \sin\theta \{ 1 - 1.25(1 + 0.6\gamma + 0.225\gamma^2 + 0.0573\gamma^3 + 0.0108\gamma^4 + 0.0021\gamma^5) / [3(-\delta)] \} \quad (7)$$

然后, 由式(8)和(9)得到阳极头处电子束半径 r_b 和 $\tan\phi_2$:

$$r_b = r_c e^{-\gamma} \quad (8)$$

$$\tan\phi_2 = 0.17409 \sqrt{P \ln\left(\frac{r_b}{r_w}\right)} \quad (9)$$

$\tan\phi_1$ 与 $\tan\phi_2$ 均表示 Z_a 处电子轨迹的斜率, 理论上应当相等, $\tan\phi_1$ 是考虑空间电荷效应后由阳极孔效应得出的结果; $\tan\phi_2$ 则是在等电位区域利用“通用电子注发散”曲线得出的结果。

当 ϕ_1 和 ϕ_2 不相等时, 利用式(10)来修正 θ 值, 重新计算公式直到满足式(11)时结束, 这时的 θ 值就确定为最后的半锥角值。

$$\theta_{\text{new}} = \theta \sqrt{\tan\phi_1 / \tan\phi_2} \quad (10)$$

$$|\tan\phi_1 / \tan\phi_2 - 1| < 0.005 \quad (11)$$

得到最后修正的 θ 值后, 电子枪的其他基础参数可以由式(12)~(15)依次计算得出:

$$R_c = \frac{r_c}{\sin\theta} \quad (12)$$

$$R_a = R_c e^{-\gamma} \quad (13)$$

$$r_a = 1.2r_b \quad (14)$$

$$Z_a = R_c - \sqrt{R_c^2 - r_a^2} \quad (15)$$

综合迭代法的流程如图2所示。

最后, 通过程序的迭代获得了电子枪的初值, 如表2所示。

3.2 透镜的初值计算

首先考虑使用单磁透镜进行聚焦, 为了保证设计的电子枪可以产生足够的束流, 可以通过 Source 程序来查看一下束流发射情况。

由图3可以看出, 为了满足工作距离 300 mm, 透镜离电子枪 3 极发射结构太远, 导致束流发散, 束流通过率较低, 能量损失较大。因此需要增加一级聚焦透镜, 使用二级聚焦透镜。

电子枪的交叉斑为 0.3 mm, 为了使电子枪能在工作平面处束斑直径达到 0.4 mm, 加入双磁透镜对电子束进行聚焦。结构示意图如图4所示, 其中 S_c 为交叉斑直径; S_w 为工作平面束斑直径。此部分主要是针对聚焦线圈的设计与计算。

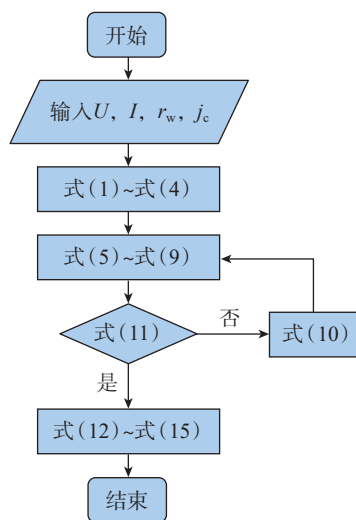


图2 综合迭代法流程
Fig.2 Comprehensive iterative procedure

表2 迭代后的电子枪初值参数

Table 2 Initial parameter of electron gun after iteration

阴极曲率半径 R_c/mm	阳极曲率半径 R_a/mm	阳极孔半径 r_a/mm	阴极截面半径 r_c/mm	阳极头位置 Z_a/mm	导流系数 $P/\mu P$	迭代阴极半锥角 $\theta/(\circ)$
22.38	10.34	0.28	0.50	12.04	0.00374	1.28



图3 电子轨迹图
Fig.3 Electron trajectories

如图4所示,CL1的物距和像距分别为 a 和 b ,CL2的物距和像距分别为 c 和 d 。根据实际机械结构, a 、 b 、 c 之和为定值,为保证工作距离为300 mm,则像距 d 为325 mm,同时已知电子枪交叉斑直径为0.3 mm,工作平面束斑直径 S_w 为0.4 mm。根据已知条件确定待求参数,并计算CL1的设计参数,CL2的相关参数在仿真时确定。

根据光学几何关系,以上参数需满足以下关系:

$$\begin{cases} a+b+c=160 \\ S_c \cdot \frac{b}{a} \cdot \frac{d}{c} = S_w \end{cases} \quad (16)$$

综合考虑机械结构等因素,选取 $a=75$ mm, $b=20$ mm, $c=65$ mm作为初值,则CL1焦距 f_1 为

$$f_1 = \frac{ab}{a+b} \quad (17)$$

计算可得: $f_1=15.79$ mm。

焦距近似公式计算可得:

$$\frac{f_1}{D} = 0.46 \sqrt{0.63 + \left(\frac{S}{D}\right)^2} \quad (18)$$

式中, S/D 取值为1,则极靴孔直径 $D=26.9$ mm,极靴间隙 $S=26.9$ mm。

已知 $V_r=63.6$ kV,则:

$$\frac{V_r}{(NI)^2} = 0.0048 + 0.00065 \frac{S}{D} \quad (19)$$

计算得 $NI=3416$ A·T。

4 仿真与调试

4.1 电子枪的仿真调试

根据电子枪的初值以及计算结果画出电子枪的结构,然后利用Source模块对电子枪进行仿真。根据仿真结果去修改理论值得到的结构,以使仿真结果满足发射束流和束斑直径的要求,经不断调试最终确定的电子枪具体结构如图5所示。通过仿真得到电子束轨迹如图6所示。

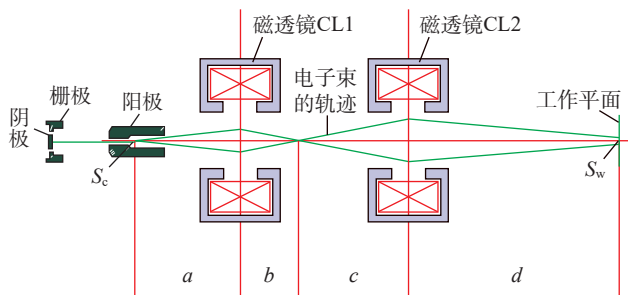


图4 电子枪光学系统示意图

Fig.4 Schematic diagram of electron gun optical system

图6中红色线为电子束的轨迹,黑色轮廓线为电子枪的电极,绿色线为等势线。可以看出,LaB₆阴极直径相对较小,因为发射面积太大会影响束流的聚焦。电子束从阴极尖端发射出来以后,聚束极对电子束实现聚焦,限制电子束的形状。阳极对电子实现加速,最终汇聚为一定形状和速度的电子束射出电子枪。

通过仿真得到的电子枪的各项参数如表3所示。可以看出,通过仿真得到电子枪总发射束流为60 mA,交叉斑直径为0.3 mm,与本文的设计目标参数一致,因此满足电子枪的设计要求。

4.2 透镜的仿真调试

在不断仿真调试的过程中,采用单一变量法进行了对CL1和CL2的激励,以及其位置4个参数变化的规律性分析,如图7和8所示。

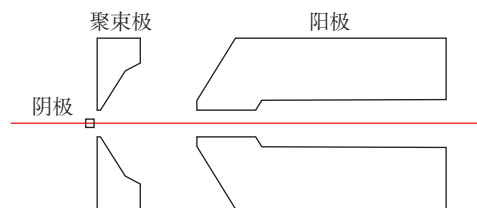


图5 电子枪结构图

Fig.5 Electron gun structure drawing

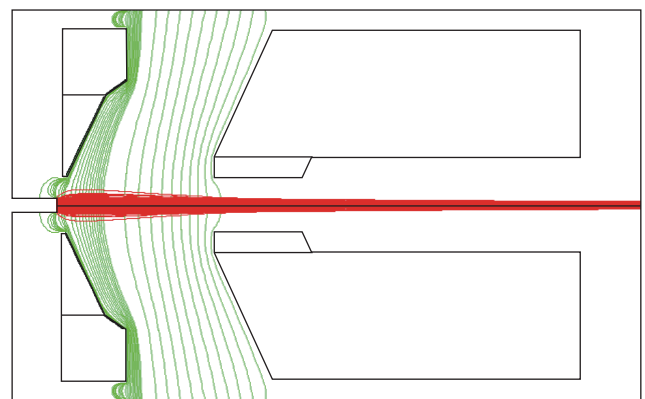


图6 电子枪轨迹仿真图

Fig.6 Electron gun trajectory simulation

表3 电子枪仿真参数

Table 3 Electron gun simulation parameters

参数	数值
总发射束流/A	0.06
束斑直径/mm	0.3
最大亮度/(A·cm ⁻² ·sr ⁻¹)	5.7×10 ⁴
阴极发射面到电子枪的出口位置/mm	53

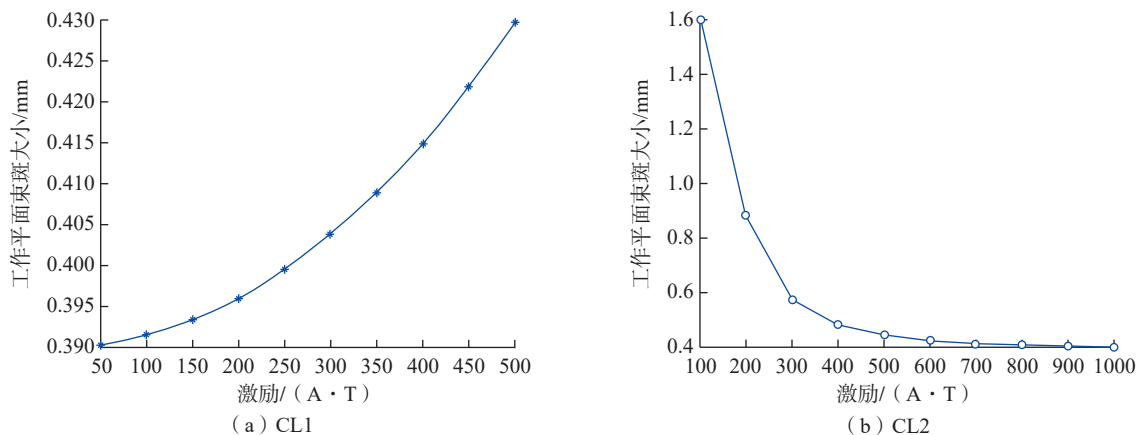


图7 磁透镜激励与束斑关系

Fig.7 Relationship between magnetic lens excitation and beam spot

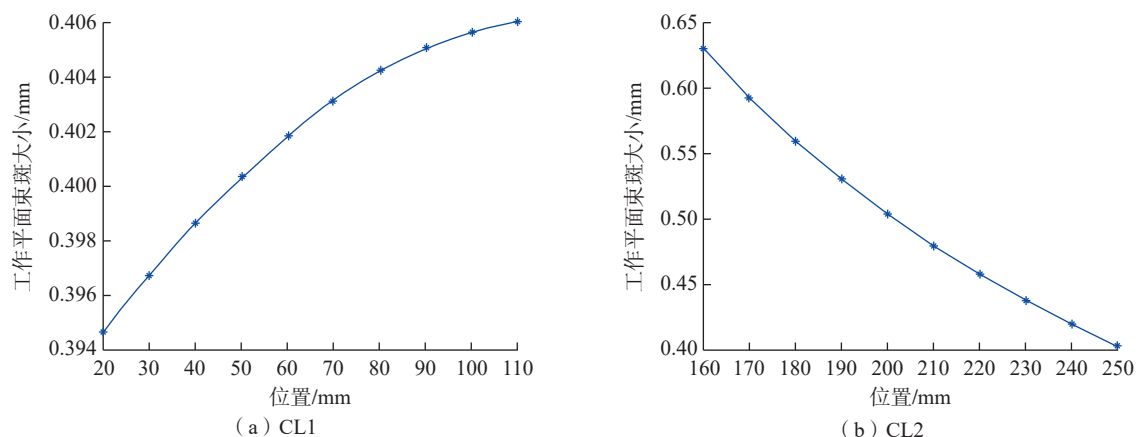


图8 磁透镜位置与束斑关系

Fig.8 Relationship between magnetic lens position and beam spot

从图7可以看出, CL1 激励越大,工作平面束斑就会越大;恰恰相反, CL2 激励越大,工作平面束斑就会越小,而且调节 CL2 激励对工作平面束斑的影响更加明显。从图8可以看出, CL1 位置越远,工作平面束斑就会越大;而 CL2 位置越远,束斑就会越小,显然 CL2 位置的变动比 CL1 对工作平面束斑大小的影响更加明显。工作平面束斑越小,电子枪的工作性能越好,在追求性能的同时一定要结合实际情况,比如为了减小束斑而过度加大 CL2 位置是不可取的,这样会增加电子枪的长度,从而造成结构的不合理。所以在调试过程中要调节多个参数,在满足工作平面束斑大小的情况下各个参数也都要处于合理的范围内。

通过调试得到了透镜的最终参数, CL1 调为弱激励 300 A·T,位置为 75 mm; CL2 激励为 1000 A·T,位置为 250 mm。

最后利用 Aber 程序来计算光路图,如图9所示。

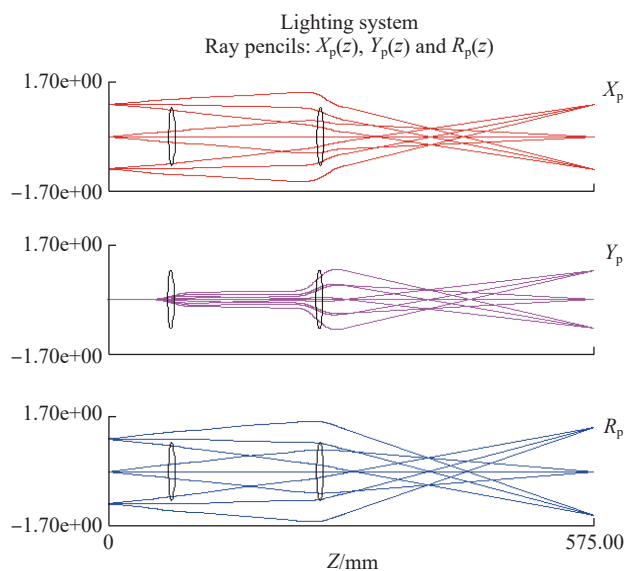


图9 聚焦透镜光路图

Fig.9 Optical path diagram of focusing lens

5 结论

本文实现了一种焊接用太空电子枪系统的设计,完成了对电子枪和磁透镜的设计,并通过仿真调试验证了电子枪满足总发射束流 60 mA 和交叉斑直径 0.3 mm,以及在工作距离 300 mm 处束斑 0.4 mm 的设计目标要求。本文的设计方法和过程,可以为太空电子枪的设计和相關研究提供一定的参考与借鉴。

参考文献

- [1] RAHE C, KELLY S T, RAD M N, et al. Nanoscale X-ray imaging of ageing in automotive lithium ion battery cells[J]. Journal of Power Sources, 2019, 433: 126631.
- [2] VANESSA W. X-ray tomography for battery research and development[J]. Nature Reviews Materials, 2018, 3(9): 293-295.
- [3] ZHANG L, LIU Y, LI S, et al. Additive manufacturing of titanium alloys by electron beam melting: A review[J]. Advanced Engineering Materials, 2018, 20(5): 1700842.
- [4] RAJENDRAN A R, MANOHARAN D A. A survey on future research about electron beam welding for aerospace applications[J]. China Welding, 2018, 27(1): 60-64.
- [5] WONG J Y. 3D printing applications for space missions[J]. Aerospace Medicine and Human Performance, 2016, 87(6): 580-582.
- [6] 倪士勇, 黄以平, 刘春东. 高压电子束焊机中电子束发生系统的设计计算[J]. 机械工程与自动化, 2007(4): 126-128.
- NI Shiyong, HUANG Yiping, LIU Chundong. Design and calculation of electron beam generating system in high voltage electron beam welder[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2007(4): 126-128.
- [7] FRAGOMENI J M, NUNES A C. A study of the effects of welding parameters on electron beam welding in the space environment[J]. Aerosp Sci Technol, 2003, 7(5): 373-384.
- [8] PATON B E, LOBANOV L M, NAIDICH Y V, et al. New electron beam gun for welding in space[J]. Science and Technology of Welding & Joining, 2019, 24(4): 320-326.
- [9] 陶振凯, 狄杰建, 赵玉侠. 基于 60kV/6kW 电子枪的 15kW 电子枪的研制[J]. 焊接技术, 2014(12): 41-43.
- TAO Zhenkai, DI Jiejian, ZHAO Yuxia. Development of 15kW electron gun based on 60kV/6kW electron gun[J]. Welding Technology, 2014(12): 41-43.
- [10] 何成旦, 李鹤岐, 许启晋. 电子枪新型阴极的设计[J]. 甘肃工业大学学报, 2003, 29(3): 1-5.
- HE Chengdan, LI Heqi, XU Qijin. Design of new cathode of electron gun[J]. Journal of Lanzhou Institute of Technology, 2003, 29(3): 1-5.

通讯作者: 董全林, 教授, 博士生导师, 研究方向为电子束技术、惯性导航与制导研究等。

(责编 七七)

(上接第 92 页)

- [14] 陆凯, 李迎光, 刘旭, 等. 数据驱动的飞机结构件加工特征识别方法[J]. 航空制造技术, 2021, 64(8): 32-40, 57.
- LU Kai, LI Yingguang, LIU Xu, et al. A data-driven method for machining feature recognition for aircraft structural parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(8): 32-40, 57.
- [15] HAJDU D, INSPERGER T, STEPAN G. The effect of non-symmetric FRF on machining: A case study[C]//Volume 6: 11th International Conference on Multibody Systems, Nonlinear Dynamics, and Control. Boston: American Society of Mechanical Engineers, 2015.
- [16] 张仕良. 基于深度神经网络的语音识别模型研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- ZHANG Shiliang. Research on deep neural networks based models for speech recognition[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.
- [17] WANG R Q, LI F G, NIU J B, et al. Prediction of pose-dependent modal properties and stability limits in robotic ball-end milling[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2022, 75: 102307.
- [18] RICHARDSON M H, FORENTI D L. Parameter estimation from frequency response measurements using rational fraction polynomials[C]//Proceedings of the 1st international modal analysis conference. Orlando: Union College Schenectady, 1982: 167-186.

通讯作者: 李法贵, 硕士, 研究方向为机器人铣削加工。

孙玉文, 教授, 博士, 研究方向为弱刚性/复杂曲面零件精密加工技术、数字化制造与智能制造、机器人加工技术及系统等。

(责编 晓月)

(上接第 118 页)

- [11] 周正干, 黄凤英, 魏东. 复合材料孔隙率超声检测方法综述[J]. 航空制造技术, 2009, 52(15): 104-106.
- ZHOU Zhenggan, HUANG Fengying, WEI Dong. Ultrasonic testing method for porosity in composite[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(15): 104-106.
- [12] 肖鹏, 刘卫平, 刘奎, 等. 碳纤维复合材料孔隙分布及形貌分析研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(2): 62-66.
- XIAO Peng, LIU Weiping, LIU Kui, et al. Study on distribution and morphology characteristic of voids in CFRP composites[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2016(2): 62-66.
- [13] 于雅琳, 叶金蕊, 刘奎, 等. 含孔隙复合材料超声衰减分析的细观有限元模型[J]. 复合材料学报, 2014, 31(1): 171-178.
- YU Yalin, YE Jinrui, LIU Kui, et al. A mesoscale ultrasonic attenuation finite element model of void-containing composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(1): 171-178.
- [14] ŠERCER M. Campbell: Manufacturing processes for advanced composites[M]. Elsevier Science, 2003.

通讯作者: 刘钧天, 工程师, 研究方向为复合材料制造工艺。

(责编 七七)