

引文格式: 路开通, 彭勇, 许海鹰. 电子束熔丝增材制造过程随动测温阵列系统[J]. 航空制造技术, 2021, 64(1/2): 89-93, 102.

LU Kaitong, PENG Yong, XU Haiying. Electron beam fuse additive manufacturing follow-up temperature measurement array system[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(1/2): 89-93, 102.

电子束熔丝增材制造过程随动测温阵列系统*

路开通^{1,2}, 彭勇¹, 许海鹰²

(1. 南京理工大学材料科学与工程学院, 南京 210094;
2. 中国航空制造技术研究院高能束流发生器实验室, 北京 100024)

[摘要] 实时监测电子束熔丝增材制造过程的温度场分布对于抑制变形、提高电子束熔丝增材制造质量具有重要意义。研制了一套电子束熔丝增材制造过程的随行动态测温阵列系统, 对整个装置进行了系统设计、硬件集成、软件编写和试验验证。结果表明, 该随动测温阵列系统在电子束熔丝增材制造过程的高真空、高温、高辐射、高金属蒸气等恶劣环境中能稳定工作, 不仅能在正常状态下进行测温, 而且在增材基板受热变形时也能连续测温, 能够实现随行动态测温以及温度场实时显示、存储和重构分析等功能, 显示形象直观, 系统稳定性较强, 操作简单。

关键词: 电子束; 增材制造; 实时监测; 随动测温; 温度场

Electron Beam Fuse Additive Manufacturing Follow-Up Temperature Measurement Array System

LU Kaitong^{1,2}, PENG Yong¹, XU Haiying²

(1. School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2. Power Beam Generator Lab, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] Real-time monitoring of the temperature field distribution of the electron beam fuse additive manufacturing process is of great significance for suppressing deformation and improving the manufacturing quality of electron beam fuse addition. A set of dynamic temperature measurement array system for electron beam fuse additive manufacturing process was developed. The system design, hardware integration, software preparation and test verification were carried out for the whole device. The results show that the follow-up temperature measurement array system can work stably in the harsh environment of high vacuum, high temperature, high radiation and high metal vapor in the process of electron beam fuse addition manufacturing, and can not only measure temperature under normal conditions, but also the temperature can be continuously measured when the additive substrate is heated and deformed, and the functions such as dynamic temperature measurement and real-time display, storage and reconstruction analysis of the temperature field can be realized, and the display image is intuitive, the system stability is strong, and the operation is simple.

Keywords: Electron beam; Additive manufacturing; Real-time monitoring; Follow-up temperature measurement; Temperature field

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2021.01/02.089

电子束熔丝增材制造技术是在真空环境下, 以聚焦电子束流作为热源, 熔化不断送进的金属丝材, 熔融金属按照预定轨迹在基板上层层堆积, 实现构件无模近净成形的制造技术^[1-3]。电子束增材制造技术具有增材效

率高、能量利用率高、成形质量好等优点, 可实现大型复杂零部件的高效快速成形, 在航空航天、能源、船舶等领域有非常广泛的应用前景^[4]。

由于在电子束熔丝增材制造过程中是一层接着一层熔化并且快速凝固, 所以零件经历了涉及定向热传递的复杂的热演化历程, 一些合金零件甚至可能会遇到

* 基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1103101); 国家自然科学基金(5177052649)。

反复的固态相变^[5-7],在加工过程中由于经受多次快速重熔和高温热循环的影响,温度场、构件尺寸精度都处于不断变化之中^[8-10],由此产生的热应力在成形过程中不断累积,超过材料屈服强度而产生变形,变形量随着成形件尺寸的增大而不断变大^[11],成形质量难以保证。通过对成形件温度场的检测与分析,可以了解能量热输入以及外加复合场对于成形件的成形质量以及组织性能的影响,进而控制成形工艺以达到改善成形质量和性能的目的^[12-14]。因此,为了保证产品的加工质量,实时监测电子束熔丝增材制造过程的温度至关重要。电子束熔丝增材制造的过程中,高真空、高温、高辐射、高金属蒸气等因素都会让检测过程变得困难,现有的监测方法通常很难长时间适用于电子束熔丝增材制造过程的复杂综合环境中。华中科技大学王泽敏等^[15]利用红外相机对整个增材成形区域进行实时监控获取整个成形区域 XOY 平面的温度场云图。这种方法虽然获取温度场较简单,但并不适用于电子束熔丝增材制造过程的真空环境和高温环境。

针对以上增材过程中温度测量时容易出现的问题,研制了一种电子束熔丝增材制造过程的随行动态测温阵列系统,对整个装置进行了系统设计,采用 LabVIEW 编写控制程序,实现了实时精确采集电子束熔丝增材制造过程中 600mm × 750mm 范围内各点的温度分布情况以及温度场实时显示、存储和重构分析等功能。

1 随动测温阵列系统的原理及组成

所研制的电子束增材过程随动测温阵列系统基本原理如图 1 所示。在电子束增材工装夹具内部加工螺纹通孔,用于安装温度传感器,即 K 型热电偶,且热电偶外侧带有螺纹并内置弹簧,外侧的螺纹用以将热电偶固定到增材基板上,内置的弹簧则可以保证在增材过程中受热而变形的基板与热电偶始终稳定贴合,从而实时测量增材基板的温度;将热电偶通过接线端连接到热电偶输入模块,即温度变换器,热电偶输入模块将多个热电偶的温度信号收集整理之后通过数据总线传递到工控机内部安装的数据采集卡,最终通过基于 LabVIEW 所编写的控制软件进行数据显示及存储。

2 系统硬件设计

随行动态阵列测温系统硬件包括电子束增材工装、测温热电偶、热电偶输入模块、通讯模(数据采集卡)块和工控机。

2.1 电子束增材工装设计

图 2 和图 3 为增材工装俯视图和左视图,增材工装采用不锈钢材料制成,尺寸为 900mm × 900mm 的正

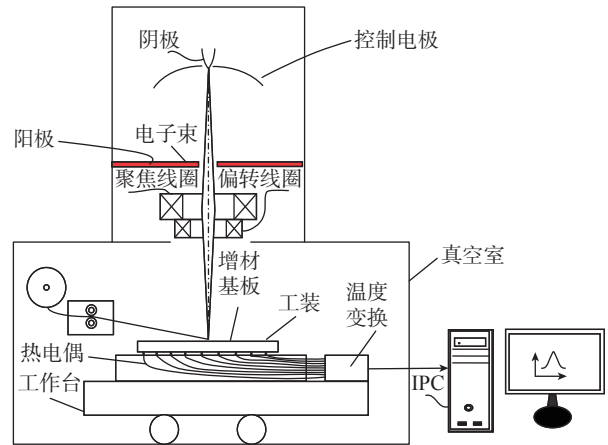


图1 电子束熔丝增材制造随动阵列测温系统
Fig.1 Electron beam fuse additive manufacturing follow-up array temperature measurement system

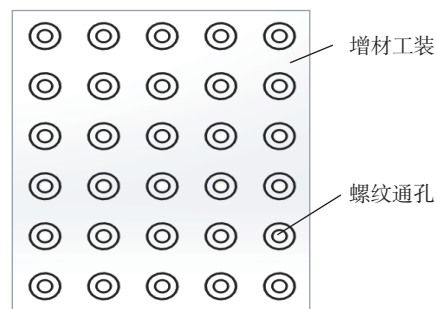


图2 增材工装俯视图
Fig.2 Top view of additive tooling

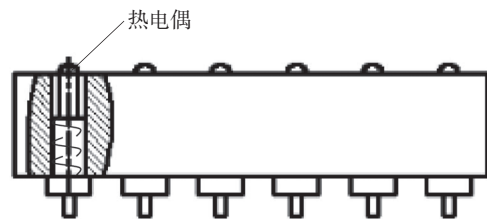


图3 增材工装左视图
Fig.3 Additive tooling left view

方形,工装下部加工有 4 条横向的筋,将工装支离工作台表面,以便将热电偶引线伸出,采用钻孔攻丝工艺在其上边加工螺纹通孔,用于安装带有螺纹的 K 型热电偶,螺纹孔阵列分布,间距为 150mm。

将增材基板固定于工装之上并调平增材平面,保证热电偶处于弹性状态,以确保在增材过程中热电偶与基板稳定贴合,不会因为基板变形而测温中断,实现了增材过程随行动态测温,如图 4 所示。

2.2 硬件系统集成

温度传感器有 4 种主要类型:热电偶、热敏电阻、电阻温度检测器(RTD)和 IC 温度传感器,IC 温度传感器

又包括模拟输出和数字输出两种类型。根据待解决的实际问题等各种因素,经研究分析,采用热电偶作温度传感器,可更好接触基板对温度进行测量,针对电子束熔丝增材制造过程中构件的温度实时测量实际工况,选用压簧式 K 型热电偶温度测量范围为 0~1370℃,其实物如图 5 所示。

温度变换模块为 4 个热电偶输入模块,此模块可以将热电偶的模拟信号转换为数字信号,每个热电偶输入模块将接收到的 8 个热电偶输入的温度数据,通过 1 根

数据总线传输给工控机中的数据采集卡。

针对本系统的实际工作环境需要,经研究分析,选用研华 PCI-1612B 型 4 端口 RS-485 PCI 通讯卡。PCI-1612B 是一款与 PCI2.1/2.2 总线规格兼容的 4 端口 RS-485 PCI 通讯卡,可提供高达 921.6Kbps 的传输速率,4 个 RS-232/422/485 端口、I/O 地址由 PCI 即插即用功能自动分配,能够大大减轻 CPU 的负载。

选用研华 IPC-610L 型工控机。所有硬件模块的连接原理如图 6 所示。工控机通过 PCI 插槽与 PCI-

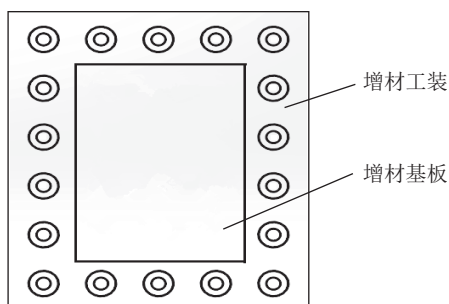


图4 放置增材基板后的增材工装俯视图
Fig.4 Top view of additive tooling after placing additive substrate



图5 压簧式K型热电偶
Fig.5 Pressure spring type K thermocouple

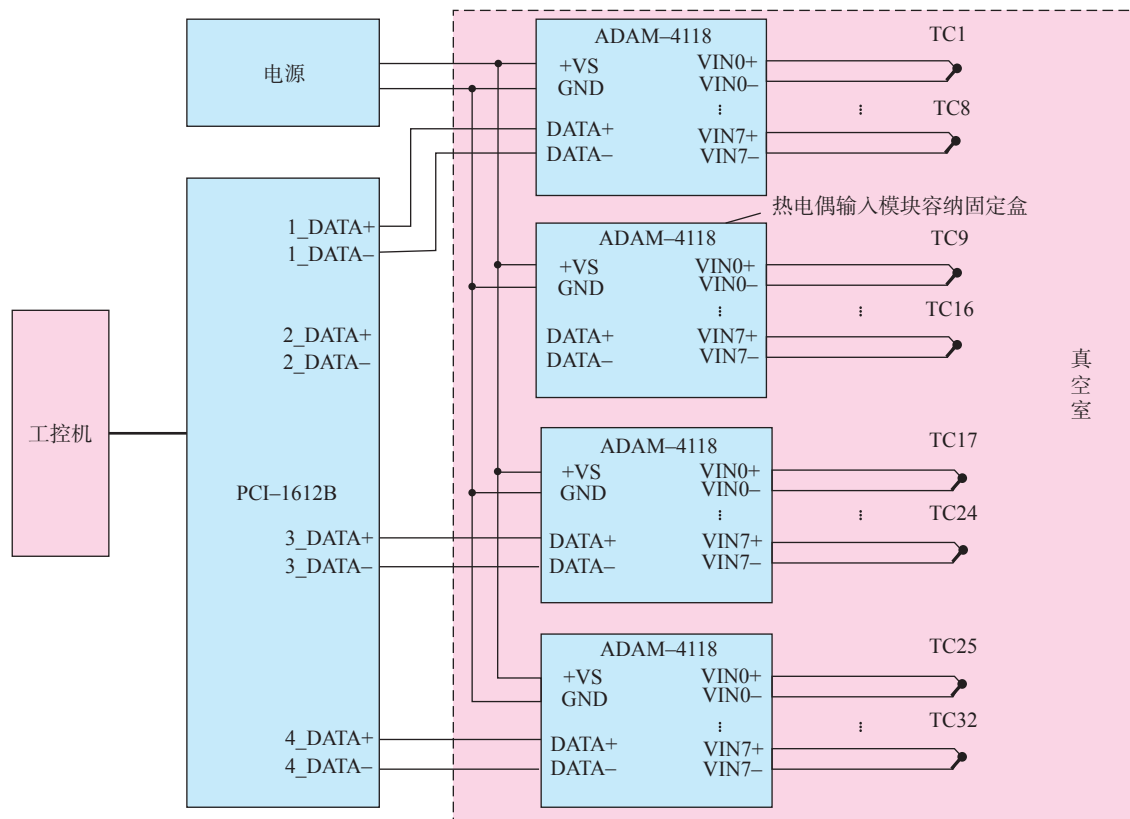


图6 系统集成电气硬件原理图
Fig.6 System integration electrical hardware schematic

1612B 通讯卡进行数据交换, PCI-1612B 具备 4 个 RS-485 通讯端口, 分别与 4 个 ADAM-4118 热电偶输入模块的 DATA+、DATA- 直连, 第 1 个热电偶输入模块的 0 通道至 7 通道接入 8 个 K 型热电偶, 4 个热电偶输入模块共计可以接入 32 个 K 型热电偶。

工装平面的温度数据由热电偶测得, 原始信号为模拟信号, 实质为电压信号; 30 个点的温度数据传输至热电偶输入模块进行模数转换, 温度信号被转换为数字信号, 此时 30 个点的温度信号为一连串的二进制字符串, 所有温度信号被传输至工控机中的数据采集卡; 用 LabVIEW 中的“截取字符串函数”将其截取为 30 个字符串数据, 通过“分数/指数字符串至数值转换函数”将字符串形式的温度数据转换为数值形式, 其后通过“创建矩阵函数”将 30 个温度数据以 6×5 的矩阵排列, 分别用“三维等高线绘图、三维散点图绘图函数”将温度矩阵显示出来, 即为工装平面的三维温度场分布图。

3 系统软件设计

采用 LabVIEW 软件, 以图形化编辑语言 G 编写程序, 所设计的串口资源参数配置界面、数据采集界面和回看数据界面分别如图 7~9 所示。

图 7 中, 串口资源参数配置界面用于工作开始前设置串口参数; 设置好串口参数后, 通过选项卡调节到数据采集界面如图 8 所示, 选择好数据文件存储位置, 开始工作; 工作结束后, 点击选项卡按钮调节至回看数据界面如图 9 所示, 点击小文件夹图标, 选择某一数据表格, 单击布尔开关和软件开始按钮, 拖动进度条便可进行不同时刻的温度场分布情况回看及分析。

4 工程安装及测试结果

将研制的电子束增材过程随动测温阵列系统安装在中国航空制造技术研究院的型号为 EBWD-15F-400V 电子束熔丝增材制造设备的真空室中, 真空室体积为 40m^3 , 实物如图 10 所示。

将增材基板固定于工装之上, 调平增材平面, 保证热电偶与增材基板处于弹性接触状态, 将真空室抽取到预定真空, 打开随动测温阵列系统, 采用 $60\text{kV}/90\text{mA}$ 电子束流以直径 300mm 圆形扫描加热增材基板 3min 。所监测的结果如表 1 和图 11 所示。表 1 为软件系统自动以表格的形式所记录的温度数据。图 11 为利用表格中记录的温度数据重构的温度场分布图。

表 1 中第 1 列为数据采集的即时时间, 每秒每个点采集 7 次数据, 每 1 行的第 2 列到最后一列为测温阵列中 1 到 30 个点的温度数据, 由于版面有限, 仅显示了部分数据。

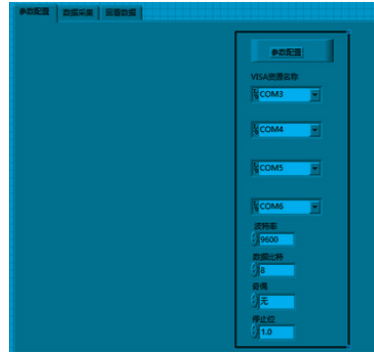


图7 串口资源参数配置界面

Fig.7 Serial port resource parameter configuration interface

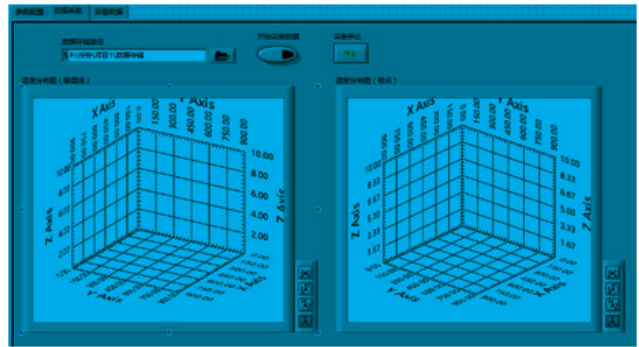


图8 数据采集界面

Fig.8 Data acquisition interface

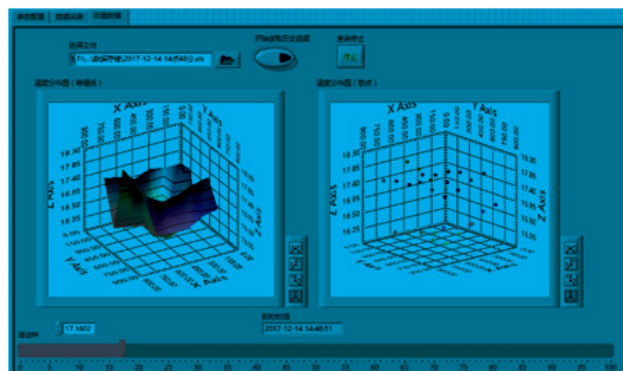


图9 回看数据界面

Fig.9 Look back at data interface

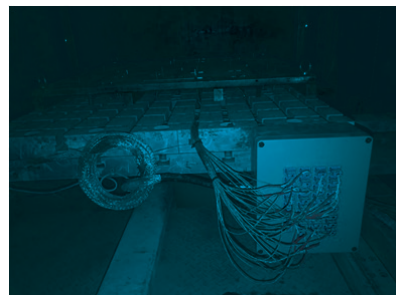


图10 系统在真空室内安装图

Fig.10 System vacuum chamber installation diagram

表1 表格形式所记录的温度数据

Table 1 Temperature data recorded in tabular form °C

| 采集时间 | 采集点 | | | | | |
|----------|------|------|------|------|------|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | ... |
| 11:43:00 | 39.3 | 43.8 | 37.3 | 37.7 | 42.9 | ... |
| 11:43:00 | 39.3 | 43.8 | 37.3 | 37.8 | 43.1 | ... |
| 11:43:00 | 39.3 | 43.8 | 37.3 | 37.8 | 43.1 | ... |
| 11:43:00 | 39.3 | 43.8 | 37.3 | 37.8 | 43.0 | ... |
| 11:43:00 | 39.2 | 43.7 | 37.2 | 37.7 | 42.9 | ... |
| 11:43:00 | 39.2 | 43.7 | 37.2 | 37.7 | 42.9 | ... |
| 11:43:00 | 39.2 | 43.8 | 37.3 | 37.8 | 43.0 | ... |
| 11:43:01 | 39.2 | 43.7 | 37.3 | 37.7 | 42.9 | ... |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |

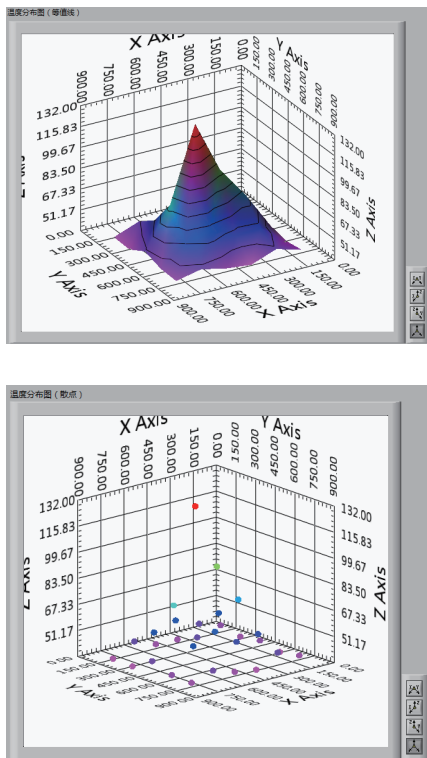


图11 所测温度数据重构的温度场分布图

Fig.11 Temperature field distribution of the measured temperature data reconstruction

对比表1中的温度数据和数据回看界面对应的温度场分布图可知,扫描中心部位局部温度达到130℃以上,而其最边缘处温度只有40℃左右,由于温度梯度较大,增材基板出现了边缘翘曲的变形情况。借助此直观形象的温度数据及温度场分布结果,可以优化工艺参数,对电子束束流的能量输入及扫描范围和位置进行精确控制,抑制零件变形。

5 结论

(1) 针对电子束熔丝增材过程中温度测量时容易出现的问题,研制了一种电子束熔丝增材制造过程的随行动态测温阵列系统,可以在电子束熔丝增材制造过程的高真空、高温、高辐射、高金属蒸气等恶劣环境中稳定工作。

(2) 所研制系统实现了实时精确采集电子束熔丝增材制造过程中600mm×750mm范围内各点的温度分布情况,实时动态显示且能够实现温度数据存储以及温度数据重构温度场显示功能。

参考文献

- [1] TAMINGER K M B, HAFLEY R A, DICUS D L. Solid freeform fabrication: Aneabling technology for future space missions[C]// Proceedings of 2002 International Conference on Metal Powder Deposition for Rapid Manufacturing. San Antonio: Metal Powder Industries Federation, 2002.
- [2] TAMINGER K M, HAFLEY R A. Electron beam freeform fabrication: A rapid metal deposition process[C]// Proceedings of the 3rd Annual Automotive Composites Conference. Troy, 2003.
- [3] 陈哲源, 锁红波, 李晋炜. 电子束熔丝沉积快速制造成型技术与组织特征[J]. 航天制造技术, 2010(1): 40-43.
CHEN Zheyuan, SUO Hongbo, LI Jinwei. Rapid manufacturing molding technology and microstructure characteristics of electron beam fused deposition[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2010(1): 40-43.
- [4] 赵攀峰, 刘方军, 张伟. 电子束高频偏转扫描线圈的设计与仿真[J]. 航空制造技术, 2019, 62(3): 75-80.
ZHAO Panfeng, LIU Fangjun, ZHANG Wei. Design and simulation of electron beam high frequency deflection scanning coil[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(3): 75-80.
- [5] WANJARA P, BROCHU M, JAHAZI M. Electron beam free forming of stainless steel using solid wire feed[J]. Materials & Design, 2007, 28(8): 2278-2286.
- [6] 齐海波, 林峰, 颜永年, 等. 316L 不锈钢粉末的电子束选区熔化成形[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(11): 1941-1944.
QI Haibo, LIN Feng, YAN Yongnian, et al. Electron beam selective melting forming of 316L stainless steel powder[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2007, 47(11): 1941-1944.
- [7] 韩建栋, 林峰, 齐海波, 等. 粉末预热对电子束选区熔化成形工艺的影响[J]. 焊接学报, 2008, 29(10): 77-80.
HAN Jiandong, LIN Feng, QI Haibo, et al. Effect of powder

(下转第102页)

于工程实践,有效地解决了该机型自润滑关节轴承装配卡滞问题,取得了很好的应用效果,可在同类型的自润滑关节轴承装配中推广应用。

参考文献

[1] 杨程,赵升吨,安苏娟,等.一种轴承内外套圈毛坯复合温挤压成形工艺及模具[J].锻压技术,2012,37(1):10-13.

YANG Cheng, ZHAO Shengdun, AN Sujuan, et al. Combined warm extrusion process and its die of bearing inner and outer rings[J]. Forging & Stamping Technology, 2012, 37(1): 10-13.

[2] 周境,朱海明,周坤.自润滑向心关节轴承[J].轴承,2003(7):11-12.

ZHOU Jing, ZHU Haiming, ZHOU Kun. Radial spherical plain bearing with self-lubrication[J]. Bearing, 2003(7): 11-12.

[3] KIM B C, PARK D C, KIM H S, et al. Development of composite spherical bearing[J]. Composite Structures, 2006, 75(1-4): 231-240.

[4] 沈雪瑾,曹磊,陈有光,等.织物衬垫自润滑关节轴承的研究现状与展望[J].轴承,2009(3):57-61.

SHEN Xuejin, CAO Lei, CHEN Youguang, et al. Research status and prospect of spherical plain bearings with self-lubricating fabric liner[J]. Bearing, 2009(3): 57-61.

[5] ALEX O, JULIAN D B. Modeling capabilities required for the double nosing process in the assembly of spherical plain bearings[J]. Journal of Engineering Manufacture, 2012, 226(5): 930-940.

[6] WANG X M, LÜ S W, YANG R C. Numerical investigation on press forming of self-lubricating spherical plain bearings[J]. International Journal of Materials and Product Technology, 2013, 47: 46-62.

[7] 吴连平,杨晓翔.关节轴承冷挤压装配的有限元仿真分析[J].轴承,2014(7):18-21.

WU Lianping, YANG Xiaoxiang. Finite element simulation analysis of cold extrusion assembly for spherical plain bearings[J]. Bearing, 2014(7): 18-21.

[8] 陈继刚,杨育林,夏振伟,等.整体型外圈关节轴承成形技术现状及发展趋势[J].轴承,2013(9):58-62.

CHEN Jigang, YANG Yulin, XIA Zhenwei, et al. Current status and development trends of forming technology for spherical plain bearing with one piece outer ring[J]. Bearing, 2013(9): 58-62.

[9] 宗春丽,谢兴会,周琳.水工用镶嵌式自润滑关节轴承的设计[J].轴承技术,2004(1):3-4.

ZONG Chunli, XIE Xinghui, ZHOU Lin. Design of hydraulic self-lubricating joint bearing for hydraulic engineering [J]. Zhou Cheng Ji Shu, 2004(1): 3-4.

通讯作者:舒阳,工程师,主要研究方向为装配设计与仿真, E-mail: 363184053@qq.com.

(责编 阳光)

(上接第93页)

preheating on the melt forming process of electron beam selective zone[J]. Transactions of the China Welding Society, 2008, 29(10): 77-80.

[8] 郭超,林峰,葛文君.电子束选区熔化成形316L不锈钢的工艺研究[J].机械工程学报,2014,50(21):152-158.

GUO Chao, LIN Feng, GE Wenjun. Study on the process of melting and forming 316L stainless steel by electron beam selection[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(21): 152-158.

[9] 黄志涛,锁红波,巩水利,等.TC18钛合金电子束熔丝成形技术研究[J].航天制造技术,2015,58(4):14-17.

HUANG Zhitao, SUO Hongbo, GONG Shuli, et al. Research on TC18 titanium alloy electron beam fuse forming technology[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2015, 58(4): 14-17.

[10] GAO Y, XING J, ZHANG J, et al. Research on measurement method of selective laser sintering (SLS) transient temperature[J]. Optik, 2008, 119(13): 618-623.

[11] 熊进辉,李士凯,耿永亮,等.电子束熔丝沉积快速制造技术研究现状[J].电焊机,2016,46(2):7-11.

XIONG Jinhui, LI Shikai, GENG Yongliang, et al. Research status of rapid manufacturing technology for electron beam fused deposition[J]. Electric Welding Machine, 2016, 46(2): 7-11.

[12] 张朴,孔力,刘文中,等.电子束焊接温度场实时监测系统的设计[J].工业仪表与自动化装置,2008(5):20-22.

ZHANG Pu, KONG Li, LIU Wenzhong, et al. Design of real-time monitoring system for electron beam welding temperature field[J]. Industrial Instrument & Automation, 2008(5): 20-22.

[13] 樊志伟.基于CCD的焊接温度场实时检测系统[D].武汉:华中科技大学,2005.

FAN Zhiwei. CCD-based real-time detection system for welding temperature field[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.

[14] ZALAMEDA J N, BURKE E R, HAFLEY R A, et al. Thermal imaging for assessment of electron-beam free form fabrication (EBF(sup 3)) additive manufacturing welds[C]//Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXV. International Society for Optics and Photonics, 2013.

[15] 王泽敏,李方志,曾晓雁.一种用于高能束增材制造的温度场主动调控系统及其控制方法:201510987779.5[P].2015-12-24.

WANG Zemin, LI Fangzhi, ZENG Xiaoyan. A temperature field active control system for high energy beam additive manufacturing and its control method: 201510987779.5[P]. 2015-12-24.

通讯作者:彭勇,副教授,硕士研究生导师,主要研究方向为高能束流品质测试评价, E-mail: ypengnj@163.com; 许海鹰,研究员、博士,主要研究方向为电子束源技术, E-mail: xhyxy@126.com.

(责编 古京)