

文章编号: 1002-0446(2008)01-0017-05

基于 Ethernet 的开放式机器人等离子熔射成形系统研究^{*}

夏卫生¹, 张海鸥², 王桂兰¹, 杨云珍¹, 邹阳¹

(1 华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

(2 华中科技大学数字制造与装备技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 提出了基于工业以太网 (Ethernet) 的机器人等离子熔射成形系统. 基于 Ethernet 建立 PC 与 Motoman UP-20 机器人之间的通讯连接, 开发了机器人控制软件, 实现了 PC 对机器人的主机控制以及作业文件交互等功能. 基于 MPI (MultiPoint Interface) 网络连接 PC 与等离子熔射设备的控制核心 Siemens S7-300 型 PLC. 最终实现了以 PC 机为核心, 集成成形过程监控、机器人熔射路径自适应调整和机器人实时监控等子功能的开放式机器人等离子熔射成形系统, 并自主开发了 SprayMonitor 成形过程监控软件. 实验结果表明, 该系统能够根据熔射皮膜温度、厚度等在线检测信息进行熔射路径智能自适应调整和加工策略自行调度, 实现了等离子熔射成形与机器人运动执行的一体化控制, 提高了成形系统的柔性.

关键词: 工业机器人; 等离子熔射; 成形系统; Ethernet; 皮膜温度; 智能自适应控制

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

An Open Architecture Robotic Plasma Spray Forming System Based on Ethernet

XIA Weisheng¹, ZHANG Hairou², WANG Guilan¹, YANG Yunzhen¹, ZOU Yang¹

(1 State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074 China;

2 State Key Laboratory of Digital Manufacturing and Equipment Technology,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074 China)

Abstract A robotic plasma spray forming system based on industrial Ethernet is presented. Communications between PC and Motoman UP-20 robot are set up with Ethernet, and the specific robot control software is developed, whose main functions include the host control by PC and the exchange of working jobs, etc. The control center of all plasma spray equipment, Siemens S7-300 PLC, is connected to PC by MPI (MultiPoint Interface). Finally, the open architecture robotic plasma spray forming system is realized, which uses PC as its kernel and integrates process monitoring of spray forming, adaptive adjustment of robot spray trajectories, real time monitoring of robot and other sub-functions. Moreover, the SprayMonitor software for process monitoring is developed. Experimental results show that the intelligent adaptive adjustment of robot spray trajectories and the self-dispatch of manufacturing strategies are realized by the resultant system according to such online measurement results as temperature and thickness of the sprayed coatings. Flexibility of the forming system is promoted by integrating plasma spray forming with robot motion control.

Keywords industrial robot; plasma spray forming system; Ethernet; coating temperature; intelligent adaptive control

1 引言 (Introduction)

随着新材料新技术的不断发展, 等离子熔射工艺在纳米结构涂层、梯度功能材料、固体氧化物燃料电池 (SOFC) 和生物功能涂层的制备中面临新的挑

战^[1~4], 对等离子熔射工艺的成形性、成形质量控制以及成形系统的柔性提出了更高层次的要求. 利用工业机器人完成等离子熔射作业在一定程度上提高了该工艺的自动化程度与可再现性^[5], 但是机器人

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50475134, 50675081); 国家 863 计划资助项目 (2001421150).

收稿日期: 2007-04-22

只能依照设定路径文件执行熔射操作, 缺乏根据外部传感信息等进行加工程序变换与熔射策略自行调整的能力, 致使成形系统的柔性降低, 直接影响熔射成形性与质量. 因此, 开发等离子熔射成形与机器人运动控制一体化, 集成过程监控、成形性保障等功能的机器人等离子熔射成形系统已势在必行.

当前机器人控制技术向基于 PC 机的开放型控制器方向发展, 以便于标准化与网络化^[6-7]. 如日本 Motoman 公司开发的 RTLab 机器人控制器以 PC 机为平台, 配置完全开放的软硬件系统^[8]. Nassenstein 通过德国西门子公司为 KUKA 机器人系统提供的 MPI 接口建立了机器人、等离子熔射设备的集成控制系统^[9]. 随着等离子熔射工艺的广泛应用, 专用熔射机器人系统的研发具有广阔的市场前景^[10]. 然而, 传统工业机器人并不具备上述扩展途径, 将它们集成到成形系统中存在难度. 因此, 借助传统工业机器人的网络接口, 有效扩展 PC 机的高级控制功能, 解决工业机器人完全孤立与等离子熔射成形控制的局限, 是一体化机器人等离子熔射平台开发的难题与关键之一, 迄今在国内未见相关报道.

为此, 本文基于 Ethernet 建立 PC 与机器人之间的通讯连接, 开发机器人控制软件, 实现 PC 对机器人的主机控制以及作业文件交互等功能. 以 MPI 网络与 OPC (OLE for Process Control) 协议连接 PC 与等离子熔射设备的控制核心 PLC, 研发了以 PC 机为核心的成形过程监控、机器人熔射路径自适应调整和机器人实时监控等功能集成的开放式机器人等离子熔射成形系统, 并通过工艺实验对系统性能进行检验.

2 机器人等离子熔射成形系统组成 (Setup of robotic plasma spray forming system)

2.1 系统组成与工作原理

基于 Ethernet 的机器人等离子熔射成形系统组成如图 1 所示, 包括首钢 Motoman 公司生产的 UP-20 型 6 自由度工业机器人、等离子熔射电源及辅助冷却送粉送气设备、数控旋转工作台以及 PC 与 PLC 组成的等离子熔射成形控制系统等. 成形过程中, 首先由 PC 对实体进行三维造型、切片, 最后生成机器人能够识别的路径代码文件; 然后由 PLC 控制数控旋转工作台和等离子弧发生子系统, 并对现场采样数据进行初步处理后传送到上位机 PC 中; PC 根据现场反馈信息和机器人实时运行状态信息进行分析、决策, 并分别发送反馈信息给 PLC 和机器人,

控制整个系统安全运行; 最终对熔射过程进行监控, 对主要工艺参数采样并保存到加工过程文档中. 此外, PC 也可以通过 Internet 与远程监控计算机通讯, 实现远程监控等功能. 为了保证控制系统的实时性, PC 与机器人和 PLC 之间分别通过机器人专用网络接口卡和 MPI 网络进行通讯, 实现整个系统的集成.

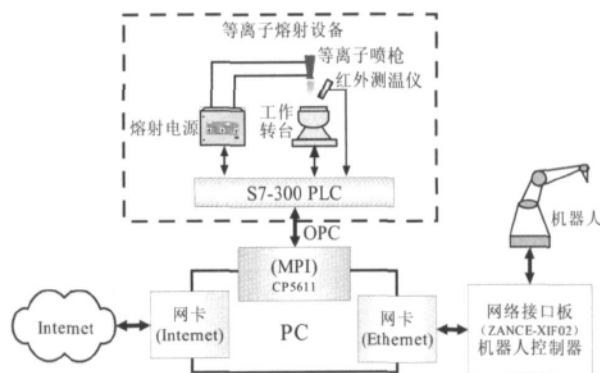


图 1 基于 Ethernet 的机器人等离子熔射成形系统组成原理图

Fig 1 Schematic diagram of robot plasma spray forming system based on Ethernet

2.2 基于 Ethernet 的机器人控制软件开发

本实验室应用的 UP-20 型机器人配置有 Canbus、Profibus 总线以及 Ethernet 等接口, 因此可以利用 Ethernet 来扩展 PC 机对机器人的直接控制功能. 本文采用网线连接机器人网络接口板与 PC 机网卡, 选择 Ethernet 作为数据通讯媒介来实现机器人与 PC 机在线通讯, 既保证了数据传送速率和实时性, 又增强了机器人的开放性能. 最终实现了作业文件、状态文件、系统信息文件等的高速交换, 以及机器人控制、IO 信号读取、自动作业替换和传输等功能.

机器人控制软件是在 Windows 2000 环境中, 应用 Visual C++ 6.0 编程工具基于 MOTOCOM 32 组件设计的. MOTOCOM 32 是一种能够在 PC 与 YASKAWA 工业机器人控制器 (YASNAC XRC, MRC, ERC 和 ERC II) 之间进行数据传输的控件^[11, 12], PC 与机器人信息交互原理如图 2 所示. 软件设计过程中, PC 机在其中断区实时处理机器人各时刻的作业状态, 保证了控制系统对机器人状态信息变化的实时响应; 同时将机器人位姿信息直接存放在数据区内, 生成在线位姿曲线, 然后根据等离子熔射自适应策略的调整结果对机器人的动作进行控制, 实现了机器人过程控制与等离子熔射监控一体化.

2.3 等离子熔射设备与 PC 机的 MPI 网络组建

等离子熔射过程中, 环境恶劣, 噪音等污染严

重, 干扰强, 系统工作周期长. 因此现场设备控制核心采用西门子 S7-300 型 PLC, 充分利用该型 PLC 良好的可靠性和抗干扰能力来保证系统的可靠性. 并配备了 A/D、D/A 模块和 CP5611 通讯卡, 实现了模拟量采样与输出和与上位机的通讯. 根据系统设计的实时性要求, 将实时性要求较强的监控功能, 如机器人的报警状态信息、加工过程信息、等离子熔射系统中电源设备的运行信息等, 在 PLC 过程监控模块中处理.

为实现 PC 与 PLC 通讯, 组建了等离子熔射设备与 PC 机的 MPI 网络, 通讯软件则基于 OPC 协议进行设计. OPC 协议是 OPC 基金会建立的一套标准的 OLE/COM 接口协议, 在自动化应用中实现了即插即用, 并且还允许集成各种各样的现场总线系统.

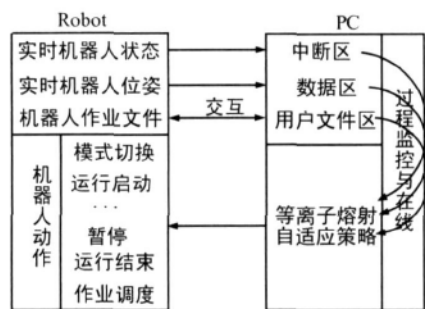


图 2 PC 与机器人信息交互

Fig 2 Information exchange between PC and robot

3 机器人等离子熔射成形系统软件设计 (Software design of robotic plasma spray forming system)

本文自主开发了 SprayMonitor 机器人等离子熔射成形监控软件, 主要模块包括: 工艺参数初始化、成形过程监控、等离子射流图像处理、OPC 客户端软件、机器人控制软件、机器人路径文件调整、智能优化和报表系统等, 同时还兼有对系统用户信息管理、用户文件管理、加工过程报表文件生成等功能. 软件系统也能够根据加工选项切换到机器人研磨和铣削加工平台, 并具有 PC 机对机器人的直接控制功能.

基于 OPC 协议与 COM (Component Object Model) 技术的层次化 SprayMonitor 软件系统结构如图 3 所示. 整体软件分为三层, 即硬件层、系统软件层和应用软件层. 硬件层包括 PC 机基本配置、PLC 硬件、UP-20 型机器人硬件等. 系统软件层包括 Windows 操作系统和设备驱动程序组件、OPC 组件和 Ethernet 通讯组件等. 应用软件包括自主设计的 SprayMonitor 软件, 也包括一些在 PC 机上运行的通用软件、专业应

用软件和第三方组件等. 图中应用软件层的各功能模块作为 OPC 客户端通过 OPC 接口与系统软件层的 OPC 服务器进行通讯, 实现对底层设备采样数据的共享. 而它们与系统软件层的机器人控制程序之间则可以直接通讯.

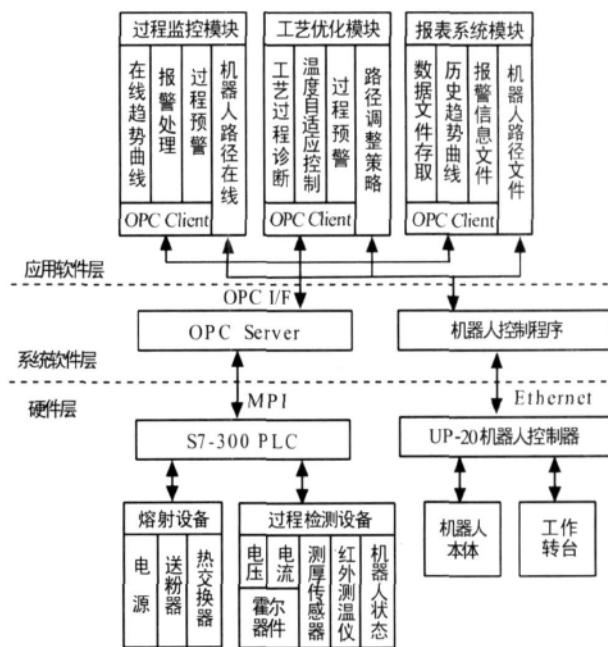


图 3 层次化 SprayMonitor 软件结构

Fig 3 Hierarchical framework of SprayMonitor software

4 成形系统性能测试实验 (Validation experiment of forming system performance)

4.1 实验条件

实验材料为 Ni 基合金粉末 ZXNi45A, 基板为 100 mm × 110 mm × 4 mm 普通钢板, 表面经打毛除锈处理后用丙酮清洗. 主要工艺参数如表 1 所示. 采用等离子喷枪对基体进行预热, 用红外测温仪检测基体、皮膜温度.

表 1 等离子熔射工艺参数

Table 1 Plasma spray parameters

等离子弧 电流 (A)	等离子弧 电压 (V)	送粉速度 (g/s)	熔射距离 (mm)	扫描速度 (mm/s)	扫描间距 (mm)
400	50	0.076	200	400	5/10/15

4.2 等离子熔射皮膜温度检测方法与温控策略

图 4 为等离子熔射皮膜温度分布过程监控原理图. 红外测温仪固定在机器人末端执行器上与等离子喷枪一起运动, 相应地为其提供了一种扫描运行机制, 对熔射区域进行多点、大范围温度信息采集.

样^[13]. 机器人扫描路径为“Z”字形. 为避免强等离子弧干扰, 设定红外测温仪的检测范围偏离等离子射流加热核心区域 10 mm. 机器人等离子熔射与皮膜温度监控现场如图 5 所示. 采样数据处理过程中以机器人熔射周期为时间单位对温度采样结果进行划分, 参照统计学方法采用温度均值 TM_i 反映周期内整体温度变化趋势, 用温度标准差 TSD_i 来衡量周期内温度波动. 其中 $TA_i = \sum_j T_{ij} / n (1 \leq j \leq n)$, $TSD_i = \sqrt{\sum_j (T_{ij} - TA_i)^2 / n} (1 \leq j \leq n)$, n 为熔射周期 i 内温度数据数目.

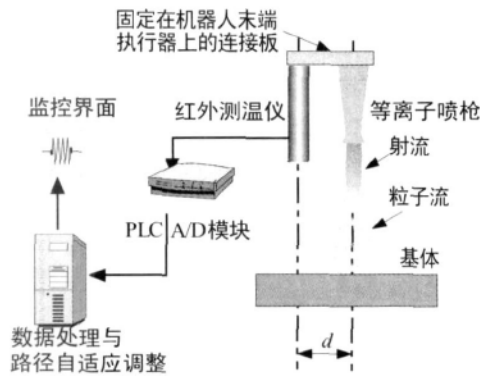


图 4 皮膜温度分布过程监控原理图

Fig 4 Schematic diagram of process monitoring for sprayed coating temperature distribution

4.3 等离子熔射皮膜温度智能自适应控制

由不同扫描间距 (D 分别为 5、10、15 mm) 条件下的实验结果可知, 温度均值满足 $TA_{D=10} > TA_{D=5} > TA_{D=15}$, 温度波动满足 $TSD_{D=5} > TSD_{D=10} > TSD_{D=15}$. 等离子熔射成形过程中, 控制系统对红外测温仪反馈温度信息进行处理, 然后根据得到的特征信息, 即周期温度均值和标准差变化等, 进行熔射路径自适应调节或者暂停熔射操作, 以期控制皮膜温度缓慢上升, 波动均匀. 部分机器人扫描路径间距自适应调整规则为:

(1) IF $\{TD_{i+1} > TD_i \text{ AND } (TD_{i+1} - TD_i) > (TD_i - TD_{i-1}) > 5\% TD_i\}$

THEN {Switching of scanning step}

(2) IF $\{TS_{i+1} > TS_i > TS_{i-1} \text{ AND } (TS_{i+1} - TS_i) > TR_0 \text{ AND } (TS_i - TS_{i-1}) > TR_1\}$

THEN {Switching of scanning step}

其中 TD_i 为周期温度均值的上升幅度, $TD_i = TA_{i+1} - TA_i$; TS_i 为第 i 周期的最高温度; TR_1 为参考温度值, 约为 TS_i 的 5~8%; i 为熔射周期数. 规则 (1) 表示当周期温度均值不断增大, 没有出现延缓趋势且上升

幅度超过 TD_i 的 5% 时, 调整扫描间距; 规则 (2) 表示当周期温度最大值一直增大, 且上升趋势超过设定参考值 TR_1 时, 变换不同扫描间距的机器人路径.

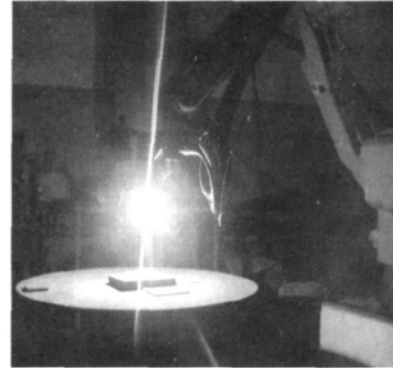


图 5 机器人等离子熔射与皮膜温度监控现场

Fig 5 In-situ scene of robot plasma spraying and coating temperature monitoring

4.4 实验结果与分析

等离子熔射过程中基体/皮膜温度变化曲线如图 6 所示. 当等离子喷枪运动到熔射范围边缘时, 由于皮膜不能充满红外测温仪视场范围, 导致检测温度偏低, 对应于图 6 温度曲线中每个周期内的较低温度点. 在周期温度均值和标准差的计算中舍弃了这些温度采样点, 以保证处理结果的真实性.

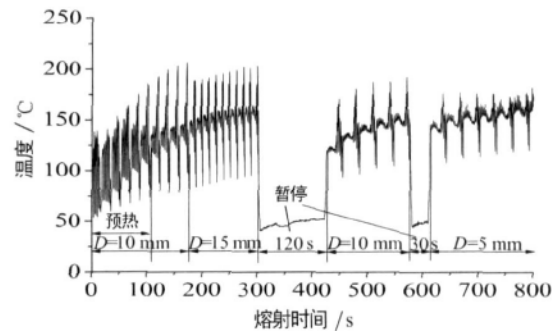


图 6 等离子熔射成形过程中基体/皮膜温度变化曲线

Fig 6 Temperature evolution of substrate and sprayed coating during plasma spraying

由图 6 可知, 当扫描间距为 10 mm 时, 温度均值上升最快, 而且温度波动比较均匀, 因此采用该路径对基体进行预热. 这样可以在较短时间内使基体温度上升到临界温度, 不仅有利于去除基体表面湿气和改善粉末粒子与基体之间的结合度, 而且有效避免了金属基体表面形成氧化层. 实验过程中采用该路径运行 6 个周期后, 基体温度均值上升到 131 ℃, 周期温度波动从 26 ℃降为 19 ℃. 然后开始送粉进行

熔射, 4 个周期后由于温度持续上升, 温度最大值超过了 200 °C, 因此系统调用间距为 15 mm 的路径来降低温度上升趋势. 然而, 在熔射进行 10 个周期之后, 虽然温度上升趋势变缓, 温度均值上升仅 10 °C 左右, 但是从图 7 可以看出, 温度波动出现了反弹趋势, 因此系统随后执行暂停程序将等离子弧偏离熔射范围后暂停 2 min. 暂停结束后运行间距为 10 mm 的路径方式继续熔射, 同时检测冷却后皮膜温度分布. 由于温度均值上升较快, 接近 10 °C (见图 7), 所以采取了一个 30 s 的短暂停. 最后利用扫描间距小、单层沉积厚度大的优势, 采用间距为 5 mm 的路径进行熔射, 在 8 个周期后由于皮膜厚度达到预定要求, 从而结束整个熔射过程.

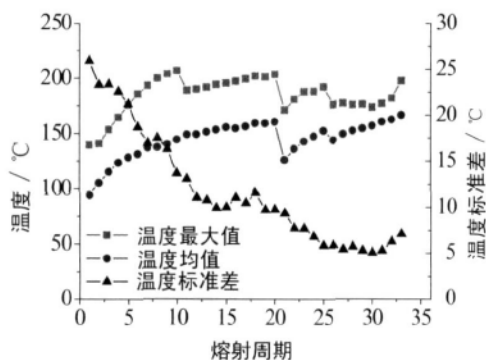


图 7 熔射过程中周期温度最大值、均值和方差变化曲线

Fig 7 Curves of temperature maximum, average and standard deviation during plasma spraying

熔射过程中周期温度最大值、均值和方差变化曲线如图 7 所示. 由图可知, 采用变间距熔射方式结合暂停熔射操作之后基体温度均值上升趋势得到了有效的控制, 而且单个熔射周期内温度波动依次下降, 在第 17 周期附近出现了较小的缓升趋势. 当最后采用熔射间距为 5 mm 的路径时, 温度波动已经很低, 整个熔射范围内温度均匀. 对比图中 26~33 周期的温度均值和最大值曲线也可以得出同样结论. 熔射过程中, 周期温度均值和最大值变化趋势基本一致, 温度最大值随熔射进行而逐渐增大, 在第一次 2 min 暂停之后有较大下降, 而且温度最大值的变化被控制在 200 °C 以内.

5 结论 (Conclusion)

(1) 建立了基于 Ethemet 的机器人等离子熔射成形系统, 实现了 PC 对成形过程监控与机器人运动的协调, 提高了成形系统的柔性.

(2) 自主开发了基于 OPC 协议与 COM 技术的层

次化 SprayMonitor 监控软件, 实现了以 PC 机为核心的成形过程监控、机器人熔射路径自适应调整和机器人实时监控等功能. 同时机器人控制模块扩展了 PC 对机器人的主机控制以及作业文件交互等功能.

(3) 采用智能自适应控制理论实现了等离子熔射过程中皮膜温度自适应调控. 该系统能够根据等离子熔射皮膜温度与厚度信息、电源与机器人运行状态等对成形过程进行监控, 并对机器人路径进行自适应调整, 提高了等离子熔射工艺的柔性, 保证了熔射皮膜成形性.

(4) 能够将等离子熔射、机器人铣削和研磨加工设备集成到成形系统中, 对机器人等离子熔射快速制模的全部子工艺进行集中控制, 同时为专用等离子熔射机器人系统的研制提供了技术基础.

参考文献 (References)

- [1] 邓春明, 周克崧, 刘敏, 等. 等离子喷涂技术在固体氧化物燃料电池中的应用 [J]. 中国表面工程, 2005, 18(6): 1-4
- [2] 吴子健, 张虎寅, 吕艳红. 热喷涂纳米涂层制备方法及其材料的研究现状和展望 [J]. 材料保护, 2005, 38(10): 44-47
- [3] Anders A. Plasma and ion sources in large area coating: A review [J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 200(5-6): 1893-1906
- [4] Wang H, Wang L. Thermal spraying application and development trends [A]. Thermal Spray Connects: Explore Its Surfacing Potential [C]. Dusseldorf, Germany: DVS-Verlag, 2005: 29-32
- [5] 张海鹏, 韩光超, 王桂兰. 快速制造模具技术 [J]. 中国机械工程, 2002, 13(22): 1903-1906
- [6] 谭民, 景奉水. 开放式先进机器人控制器开发 [DB/OL]. <http://www.cas.ac.cn/html/dir/2001/10/19/2023.htm>, 2001-10-19
- [7] 王天然, 曲道奎. 工业机器人控制系统的开放体系结构 [J]. 机器人, 2002, 24(3): 256-261
- [8] 曾孔庚. 开放式新型科研教学机器人——Mokman RTLab [J]. 机器人技术与应用, 2005, (2): 27-30
- [9] Nassenstein K, Luckenbach D. Progress in thermal spray processes [A]. Thermal Spray Connects: Explore Its Surfacing Potential [C]. Dusseldorf, Germany: DVS-Verlag, 2005: 378-382
- [10] Anon. Advantage of Automated Thermal Spray [DB/OL]. <http://www.robots.com/thermal-spray-robot.htm>
- [11] 首钢 Mokman 机器人公司. 最新弧焊机器人介绍 [Z]. 2004
- [12] 首钢 Mokman 机器人公司. Mokman 使用说明书 [Z]. 2001
- [13] 夏卫生, 张海鹏, 王桂兰. 等离子熔射皮膜温度分布在线监控与过程诊断 [J]. 焊接技术, 2007, 36(1): 59-62

作者简介:

夏卫生 (1979-), 男, 博士. 研究领域: 机器人等离子熔射成形智能控制, 固体氧化物燃料电池制备与性能分析.

张海鹏 (1955-), 男, 博士, 教授. 研究领域: 快速成形与制模, 新材料成形技术.