

# 热障涂层高温合金气膜孔电火花加工技术研究\*

王力, 张国伟, 郭永丰

(哈尔滨工业大学机电工程学院, 哈尔滨 150001)

[摘要] 针对现今航空发动机叶片气膜孔传统电火花加工方法存在的生产周期长, ND:YAG 激光加工方法加工质量较差的问题, 提出基于辅助电极法的气膜孔电火花一次加工成形技术。针对该方法开展了4项关键技术研究, 包括热障涂层高温合金数控系统、放电状态辨识系统、脉冲电源和基于模糊控制的伺服控制系统。基于上述技术, 研制热障涂层高温合金气膜孔电火花加工控制系统, 以实现加工过程中间隙放电状态的准确调节, 提高加工效率与加工质量。以  $\phi 0.5\text{mm}$  气膜孔加工为例, 与常规电火花加工控制系统进行对比试验, 验证该技术有效性, 研制试验表明, 采用自行研制热障涂层高温合金电火花加工控制系统, 可提高加工效率达 110%, 且孔口无微孔隙, 交界面无分层微裂纹缺陷, 验证试验表明, 该系统可有效提高加工效率与加工质量。

关键词: 热障涂层高温合金; 气膜孔; 一次加工成形; 电火花; 辅助电极法; 加工控制系统

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.15.078



王力

博士研究生, 主要研究方向为陶瓷-金属功能梯度材料电火花加工技术。

高发动机推力与推重比, 目前该技术已广泛用于航空发动机领域。电火花 (Electrical Discharge Machining, EDM) 加工方法作为气膜冷却孔加工的主流方法, 可实现良好的加工精度, 该方法已广泛被美国 GE、英国 R-R 等著名航空发动机生产商所使用<sup>[1-3]</sup>。然而该方法不能直接对涡轮叶片表面绝缘的陶瓷涂层进行加工, 须在金属基体预先加工气膜冷却孔, 然后向气膜冷却孔注入气流或用其他辅助措施, 再用大气等离子体或电子束物理气相沉积等技术在基体表面喷涂陶瓷涂层。但是基于该方法的气膜孔加工工艺流程复杂、加工周期长且制孔后喷涂陶瓷涂层容易出现气膜孔堵塞、孔壁沉积涂层等问题。

虽然目前激光、超声电火花组合加工、磨料水射流等加工方法均可实现热障涂层高温合金气膜孔的一次加工成形, 但无法实现加工质量与加工速度的兼备<sup>[3-5]</sup>, Nd:YAG 激光加工具有加工效率高的优点, 但存在过大再凝固层厚度、界面微裂纹等缺陷<sup>[6-7]</sup>。飞秒激光可实现良好加工质量, 但其加工效率低, 不适宜大规模生产应用<sup>[7-9]</sup>。磨料水射流加工方法则存在加工孔尺寸精度低的缺点。超声电火花组合加工为多道工艺组合加工, 加工过程中无法保持孔的加工质量与每层材料的孔径一致性。

自从 1993 年日本长冈科技大学福泽康教授与毛利尚武教授提出了辅助电极法, 电火花加工方法可实现

热障涂层高温合金热端零部件上应用气膜冷却孔技术, 可显著提高航空发动机涡轮耐高温性能, 有效提

\*基金项目: 国家自然科学基金(51875132); 黑龙江省自然科学基金(E2016037); 哈尔滨市创新基金(2015RAXXJ026); 陕西省重点实验室访问学者项目基金(14JS033)。

对绝缘陶瓷的一次加工成形<sup>[10]</sup>。基于辅助电极法,作者所在课题组提出热障涂层高温合金气膜孔电火花加工一次成形技术,并展开了相关试验研究。研究表明,对于热障涂层高温合金电火花小孔加工,陶瓷涂层与高温合金加工间隙放电状态存在显著差异。受陶瓷涂层导电膜电阻率的影响,陶瓷涂层加工间隙呈多种放电状态。

由于目前电火花加工机床皆以金属材料为加工目标,其加工过程控制系统皆以金属火花间隙放电状态为检测与辨识对象,伺服控制系统无法对热障涂层高温合金中陶瓷与金属两种材料的间隙放电状态进行实时调节,无法实现热障涂层高温合金气膜孔稳定、高效与高质量的加工。

为解决上述技术瓶颈,实现热障涂层高温合金的高质量一次加工成形,作者所在课题组对热障涂层高温合金气膜孔电火花加工的关键技术展开了研究,包括:热障涂层高温合金数控系统、热障涂层高温合金放电状态辨识方法、脉冲电源及基于模糊控制的伺服控制策略,并研制了热障涂层高温合金气膜孔电火花小孔加工控制系统。通过对比试验,验证自行研制热障涂层高温合金电火花加工控制系统的有效性。

### 基于辅助电极法热障涂层高温合金气膜孔的加工原理

基于辅助电极法,实现热障涂层高温合金电火花小孔加工一次成形的加工原理如图1所示。

电火花加工过程中工作液介质为煤油工作液,并采用旋转电极内冲液的排屑方式。由于工件表层陶瓷涂层为非导电材料,加工时需施加辅助电极,并浸入至工作液以下。加工时电源正极连接辅助电极,电源负极连接黄铜工具电极。按照加工材料顺序,加工过程可分为4个阶段:图1(a)所示为辅助电极加工阶段,工具

电极与辅助电极火花放电,煤油开始高温裂解,生成游离碳颗粒,碳颗粒开始粘附于辅助电极加工表面。辅助电极/陶瓷涂层交界面加工阶段如图1(b)所示,当辅助电极逐渐蚀除,到达辅助电极/热障涂层交界面,高温裂解碳颗粒连续稳定地沉积于陶瓷涂层表面,形成数十微米厚的导电膜。导电膜可充当导电媒介,通过辅助电极连接电源正极,构成放电回路。此时,火花放电去除导电膜的同时,部分热蚀除陶瓷涂层。陶瓷涂层加工阶段如图1(c)所示,由于导电膜稳定的生成,陶瓷涂层可通过火花放电部分蚀除。黏结层与高温合金基体加工阶段如图1(d)所示,当加工至陶瓷涂层/金属黏结层,电源正极可通过工作台与金属基体,与工具电极构成放电回路,金属黏结层与基体高温合金不受导电膜导电性的制约,因此,只要热障涂层加工完毕,气膜孔可稳定地实现一次加工成形。

### 热障涂层高温合金电火花加工控制系统的研制

针对热障涂层电火花加工时金属与陶瓷的间隙放电状态的显著差异,研制电火花加工控制系统,

该系统包括以下核心模块:基于“PC+PMAC控制器”的电火花加工数控系统,热障涂层高温合金脉冲电源、基于脉宽检测的七阈值比较与击穿延时联合放电状态检测系统及基于模糊控制的伺服控制系统。电火花加工控制系统中各模块相互联系如下:脉冲电源提供放电能量,用于热障涂层高温合金材料的热蚀除,基于脉宽检测的七阈值比较与击穿延时联合放电状态检测系统则对间隙放电状态进行辨识与统计,实现材料类型区分,同时将放电状态信号与材料辨识信号按一定周期发送至基于模糊控制的伺服控制系统,伺服控制系统则根据当前信号进行伺服进给策略的制定,并基于数控系统实现具体的进给与退回等伺服动作。

#### 1 “PC+PMAC控制器”数控系统

本文采用PMAC可编程多轴控制器(Programmable Multi-Axis Controller)构建NC嵌入PC型热障涂层高温合金电火花加工数控系统。所构建“PC+PMAC控制器”型数控系统的总体架构如图2所示。

本文数控系统中PMAC控制器主要完成以下4方面功能:(1)执行运动程序,接收运动程序命令,在运

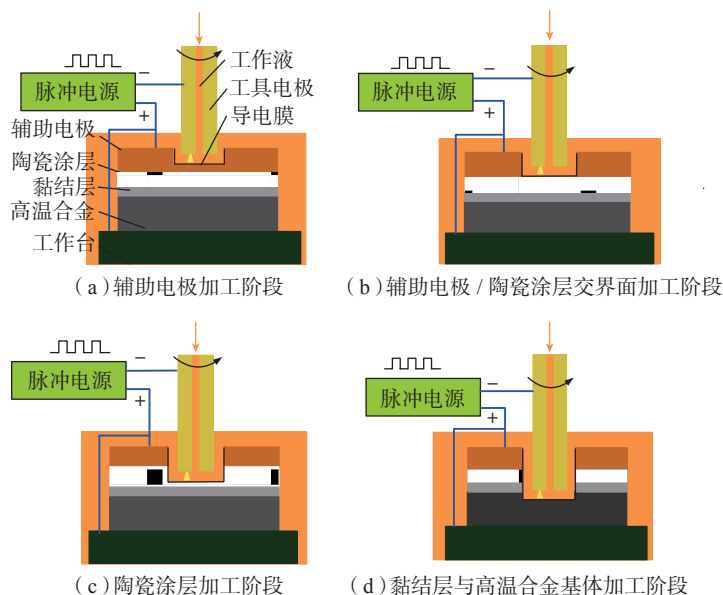


图1 热障涂层高温合金电火花小孔加工原理图

Fig.1 Machining principle of EDM for thermal barrier coated-superalloys

动程序之前,对运动程序预先进行计算,并根据需要正确地协调即将执行的动作。(2)执行 PLC 程序,实现数控系统加工状态的后台监控,PMAC 控制器通过 32 个异步 PLC 程序,高速监视外部模拟信号与数字信号输入、实现监视运动参数,改变增益值及命令停止/启动序列等功能。(3)伺服环更新、伺服环以固定频率快速对电机进行伺服更新,实现控制器对指令位置与实际位置比较与计算,输出新的位置指令。(4)PMAC 还提供了换向更新、资源管理、与主机通讯、任务优先级等功能,使得其硬件资源得到充分有效地利用,程序安全有效地运行。

## 2 热障涂层高温合金脉冲电源

电火花小孔加工过程中,脉冲电源为放电间隙提供放电能量。由于热障涂层高温合金存在绝缘陶瓷与金属两种不同材料,加工过程中需对极间放电状态进行辨识与统计,判别材料加工种类。如果脉冲电源与放电状态检测系统独立设计,则会增加电火花加工控制系统的复杂性、降低控制系统的可靠性,同时不利于系统后期软硬件的维护。因此本文基于可编程逻辑门阵列(FPGA),实现脉冲电源与放电状态检测系统的集成,使脉冲电源具备放电状态辨识、材料类型区分及提供放电能量 3 大功能。脉冲电源总体硬件电路结构如图 3 所示,电源由 5 个部分组成,包括上位机、基于 FPGA 的主控电路、驱动放大电路、放电主回路和间隙放电状态采样电路。上位机(工业控制计算机)的作用是提供人机交互界面,并通过 RS232 串口将加工参数发送给主控电路;基于 FPGA 的主控电路实现各输入信号的接收、统计、判断和可变脉冲信号的输出;驱动放大电路实现脉冲信号的放大,实现 MOSFET 的快速导通和关断;放电主回路为放电间隙提供相应参数的脉冲波形,实现工件的放电加工;间隙放电状态和

间隙绝缘状态采样电路根据参数自调整策略的要求,对间隙电压、电流波形进行采样。

### 2.1 主控电路

主控电路主要实现 3 个功能:(1)接收并保存上位机发送的放电参数信号。(2)对间隙放电采样信号进行在线统计和判别,实现非正常放电状态和材料类型的实时检测。(3)根据上位机发送的放电参数信号和参数

调整策略实时调整放电参数,并向驱动放大电路输出可变脉冲信号。电路结构如图 4 所示。

### 2.2 放电主回路

放电主回路原理如图 5 所示。放电主回路为电火花加工提供脉冲波形,通过控制回路的导通数量来进行峰值电流的调节;二极管 D2 和 D4 的作用是减弱或消除限流电阻两端杂散电感对电路的影响。

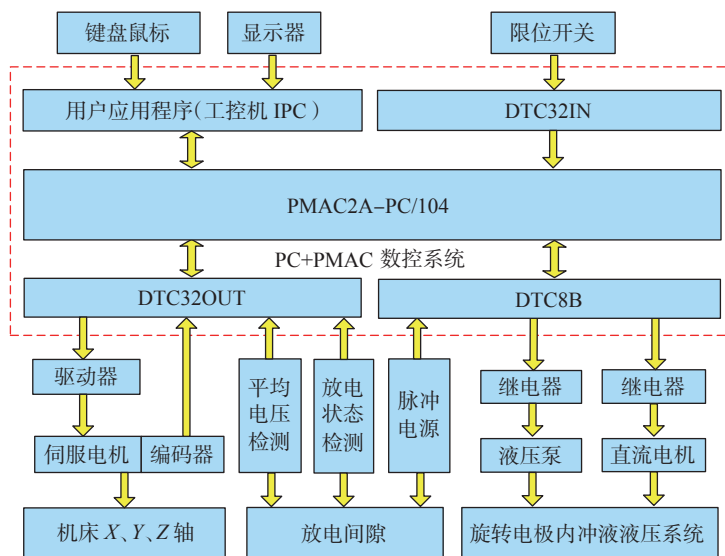


图2 数控系统总体构架  
Fig.2 Schematic of CNC system

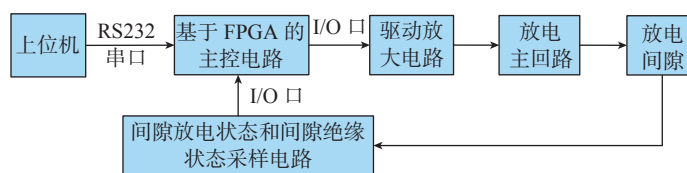


图3 脉冲电源总体结构  
Fig.3 Schematic of the pulse power supply

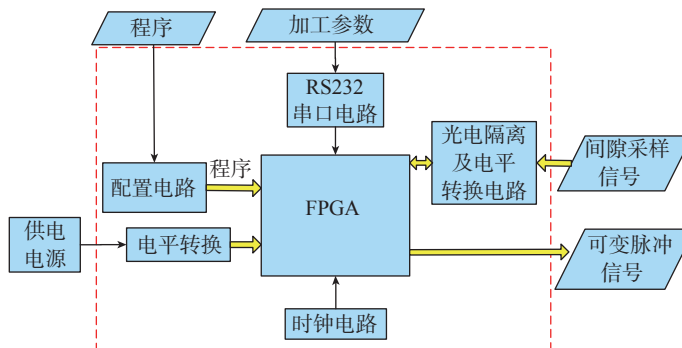


图4 基于FPGA的主控电路结构框图  
Fig.4 Block diagram of main control circuit based on FPGA

放电间隙并联回路能够在脉间阶段释放主回路中电容和杂散电感存储的电荷,缩短开路电压波形的下降沿时间。所设计的放电间隙并联回路由 MOSFET Q3 和电阻 R3 串联组成。该并联回路在脉间阶段导通,在脉宽阶段关断。与假负载相比,该并联回路具有以下优点:一方面,由于 R3 的阻值较小,脉间阶段导通时可以提高放电间隙的消电离速度;另一方面,由于脉宽阶段 Q3 关断,导致放电击穿之前主回路的电流几乎为 0,限流电阻两端几乎无压降,因此开路电压不随峰值电流的变化而变化。

### 2.3 间隙采样电路

本文设计了 8 路电压阈值采样与 2 路电流阈值采样电路来对极间放电波形进行判断,间隙采样电路原理如图 6 所示,对于放电间隙电压信号的采样,通过分压采样电路、电压钳位电路、高频滤波电路、电压比较电路及光隔离电路来实现。对于放电间隙电流信号的采样,则通过电流采样电路、高频滤波电路、电压比较电路与光耦隔离电路来实现。通过对放电间隙电压与电流状态的采样,为放电状态检测提供辨识依据。

### 3 加工间隙放电状态辨识方法

热障涂层高温合金典型放电特征可分为空载、超高阻火花、高阻火花、低阻火花、超高阻火花转高阻火花、高阻火花转低阻火花、超高阻短路、高阻短路、低阻短路、高阻转低阻短路、低阻短路转高阻短路、低阻短路转高阻短路转低阻短路、火花、拉弧和短路 15 种典型放电状态,如图 7 所示。

放电状态的辨识基于脉冲电源中间隙采样模块与 FPGA 主控模块实现,如图 6 所示,其具体原理为:极间降压电路对放电间隙中电压幅值进行降压处理,使用六路电压阈值比较器对其电压信号进行阈值比较。同时使用极间电流采样电路来检测放电间隙中电流信息,并使用电流阈

值比较器 7 来判定加工间隙是否存在击穿放电。为消除外部干扰,7 路阈值比较信号经光耦隔离后转化为 FPGA 输入所需的 TTL3.3V 电平,主控模块中 FPGA 实时接收阈值比较信号,同时基于 VHDL 语言,编写放电状态辨识程序,对 15 种放电波形进行辨识与分解,最终输出分解后的

10 种热障涂层高温合金放电状态,同时 FPGA 对分解后每种放电状态以 50MHz 方波进行实时统计,为后续材料类型区分与伺服控制提供依据。

### 4 基于模糊控制的伺服控制系统

热障涂层高温合金模糊控制系统结构如图 8 所示,其原理为:基于脉宽检测的七阈值比较与击穿延时

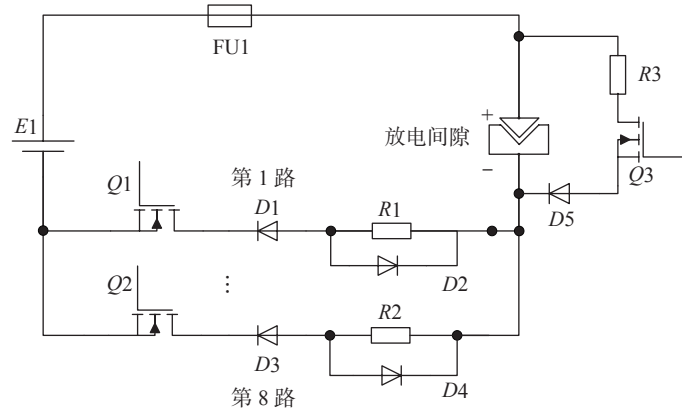


图5 放电主回路原理图

Fig.5 Schematic diagram of the discharge main circuit

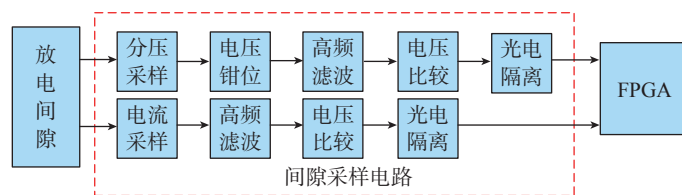


图6 间隙采样电路模块原理图

Fig.6 Schematic of gap inspection circuit

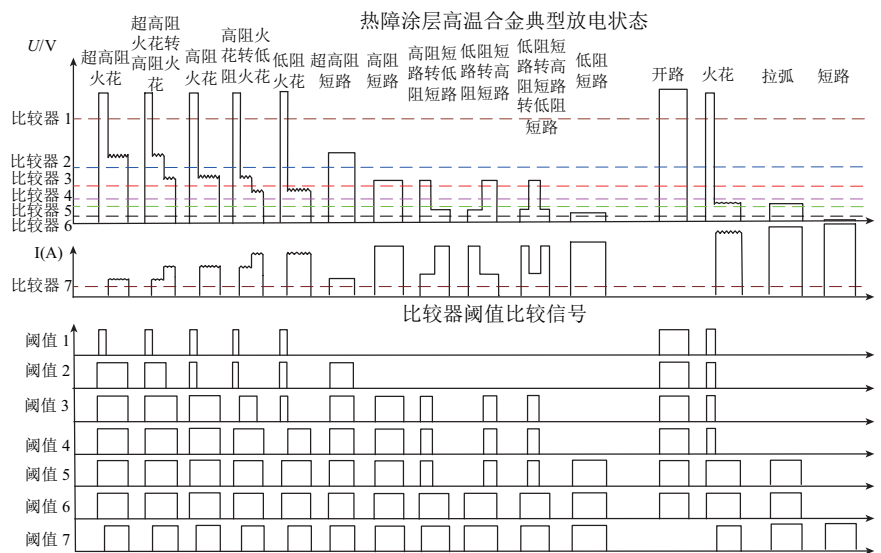


图7 基于脉宽检测的七阈值比较与击穿延时联合辨识原理

Fig.7 Inspection principle of combination of seven thresholds and ignition delay method

联合辨识方法对加工间隙放电状态进行辨识,同时将放电状态发送至放电状态统计模块进行材料辨识,统计区分当前加工材料类型,如当前加工为陶瓷涂层,模糊控制器则以统计周期内低阻火花率与开路率作为陶瓷模糊控制运算的输入变量,模糊控制器根据陶瓷材料相应的模糊规则进行推理与计算,基于材料类型与输出响应  $V_{sc}$ ,执行模块则更新当前陶瓷涂层阈值控制的伺服参考电压值,通过基于陶瓷涂层阈值控制的伺服控制策略,调节当前陶瓷涂层加工间隙放电状态。当加工金属高温合金时,模糊控制器则统计周期内金属火花率与开路率作为模糊控制运算的输入变量,模糊控制器根据金属材料相应模糊规则进行推理与计算,并做出相应输出响应  $V_{sm}$ ,执行模块则更新当前金属阈值控制的伺服参考电压值,通过基于金属阈值控制的伺服控制策略,调节当前加工间隙放电状态,使得电火花加工系统可基于加工材料种类,改善相应加工间隙放电状态。

### 结果与讨论

为验证自行研制电火花加工过程控制系统的有效性,进行热障涂层高温合金小孔加工对比试验研究,试验对比对象为苏州三光科技股份有限公司 DS703T 电火花小孔加工控制系统。采用峰值电流 8A,脉宽 16 $\mu$ s,脉间 0.5,外径 0.5mm 黄铜管电极,100  $\mu$ m 厚紫铜为辅助电极,2mm 厚热障涂层高温合金进行对比试验。图 9 为气膜孔加工对比试验加工结果,与常规电火花加工控制系统相比,自行研制电火花加工系统平均加工效率可提高 110%。

图 10 为采用两种加工系统所加工的气膜孔入口形貌,自行研制电火花加工系统加工气膜孔孔口无孔隙缺陷产生。而采用常规加工控制系统,其孔口则出现大尺度孔隙缺陷。

对两种加工控制系统下气膜孔剖面形貌进行对比,采用常规加工控制系统加工的气膜孔存在陶瓷涂层/黏结层分层裂纹缺陷,而自行研制电火花加工系统所加工的气膜孔,其陶瓷涂层/黏结层及黏结层/基体界面均无分层缺陷产生。

综上对比试验表明,与常规电火花加工控制系统相比,自行研制电火花加

工控制系统可获得更快的加工速度及更好的加工质量。

### 结论

(1) 提出基于辅助电极法的涡轮叶片气膜孔电火花加工技术,实现了带涂层气膜孔一次加工成形,为热障涂层高温合金气膜孔高效率与高质量的一次加工成形提供有效的加工

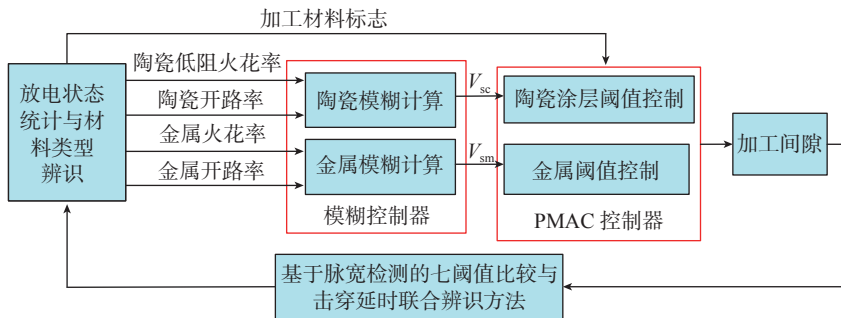


图8 热障涂层高温合金模糊控制策略示意图

Fig.8 Structure diagram of fuzzy control system for TBCs

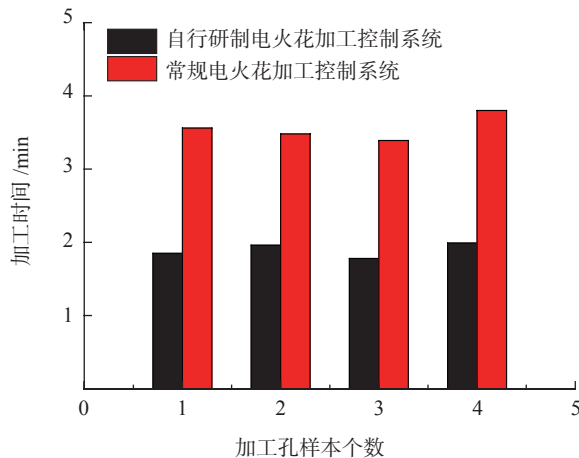
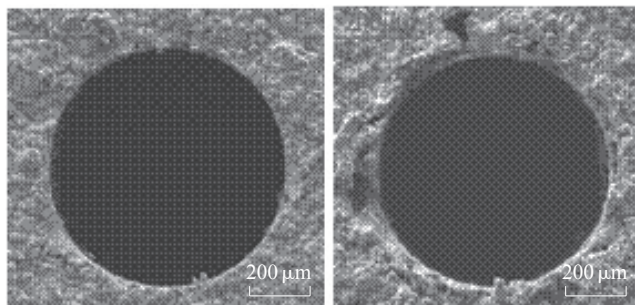


图9 两种控制系统的加工效率对比

Fig.9 Comparison of machining time between two control systems



(a) 自行研制控制系统 (b) 常规控制系统

图10 气膜孔入口形貌对比

Fig.10 Comparison of entrance morphology of cooling holes

手段。

(2) 研制了热障涂层高温合金气膜孔电火花加工控制系统。该系统包括以下核心模块：“PC+PMAC 控制器” 数控系统、热障涂层高温合金脉冲电源、基于脉宽检测的七阈值比较与击穿延时联合辨识系统, 及基于模糊控制的伺服控制系统。

(3) 验证试验表明, 自行研制的热障涂层高温合金气膜孔电火花加工控制系统可对加工过程中放电间隙放电状态进行有效调节, 与常规电火花加工控制系统相比, 加工效率可提高 110%, 气膜孔孔口无大尺度孔隙, 且剖面无分层缺陷产生, 可显著提高加工效率与加工质量。

### 参 考 文 献

- [1] 朱海南, 齐欲霞. 涡轮叶片气膜孔加工技术及其发展[J]. 航空制造技术, 2011, 54(13): 71-74.
- ZHU Hainan, QI Yuxia. Development of machining technology gas holes on turbine blades[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 54 (13): 71-74.
- [2] WHITFIELD C A, SCHROEDER R P, THOLE K A, et al. Blockage effects from simulated thermal barrier coatings for cylindrical and shaped cooling holes[J]. Journal of Turbomachinery, 2015, 137(9): 091004.
- [3] HASHISH M, WHALEN J. Precision drilling of ceramic-coated components with abrasive-waterjets[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1993, 115(1): 148-154.
- [4] DAS D K, POLLOCK T M. Femtosecond laser machining of cooling holes in thermal barrier coated CMSX4 superalloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(15): 5661-5668.
- [5] THOE T B, ASPINWALL D K, KILLEY N. Combined ultrasonic and electrical discharge machining of ceramic coated nickel alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 93: 323-328.
- [6] JERBY E, THOMPSON A M. Microwave drilling of ceramic thermal-barrier coatings[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2004, 87(2): 308-310.
- [7] FAN Z J, XIA D, WANG K D, et al. Effect of drilling allowance on TBC delamination, spatter and re-melted cracks characteristics in laser drilling of TBC coated superalloys[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 106: 1-10.
- [8] 孙瑞峰, 张晓兵, 曹文斌, 等. 带热障涂层镍基单晶高温合金的激光制孔研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(5): 1193-1198.
- SUN Ruifeng, ZHANG Xiaobing, CAO Wenbin, et al. Laser drilling of Ni-base single-crystal superalloy through thermal barrier coatings[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(5): 1193-1198.
- [9] GUPTA U, NATH A K, BANDYOPADHYAY P P. Laser micro-hole drilling in thermal barrier coated nickel based superalloy[J]. Materials Science and Engineering, 2016, 149: 012076.
- [10] MOHRI N, FUKUZAWA Y, TAKAYUKI T, et al. Assisting electrode method for machining insulating ceramics[J]. Annals of the CIRP, 1996, 45(1): 201-204.

通讯作者: 郭永丰, 博士、教授, 研究方向为特种加工及机电控制技术、微细制造及纳米加工技术、绝缘超硬材料的电火花加工技术, E-mail: guoyf@hit.edu.cn.

## Research on EDM of Cooling Holes in Thermal Barrier Coated-Superalloys

WANG Li, ZHANG Guowei, GUO Yongfeng

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**[ABSTRACT]** Aiming at the problem of long production cycle of cooling holes in the aero-engine blades with EDM method and the poor processing quality of the ND:YAG laser drilling, one step EDM of cooling holes was proposed based on assisting method. Due to significant difference in gap discharge state between ceramic coatings and superalloys, current EDM control systems were able to achieve a stable and accurate control, which cannot make a compromise on processing efficiency and quality. Therefore, Key techniques for EDM of cooling holes were studied, including discharge state identification method of thermal barrier coated-superalloy, pulse power supply and servo control strategy based on fuzzy control. Based on the above technology, the EDM control system for drilling thermal barrier coated-superalloys was developed. The comparison experiments show that compared with the conventional EDM control system, the self-developed system can improve processing efficiency by 110%, and can obtain better machining quality.

**Keywords:** Thermal barrier coated-superalloy; Cooling hole; A processing forming; EDM (Electrial Discharge Machining); Assisting electrode; Control system

(责编 大漠)