

# 基于电火花-电解复合加工方法的 微小孔制造\*

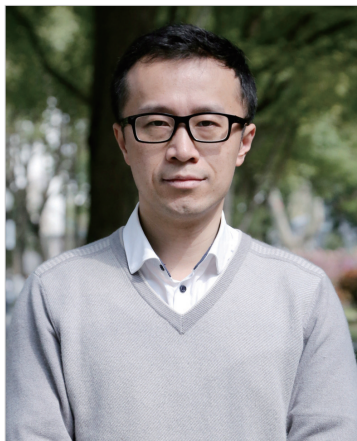
徐正扬,张辰翔

(南京航空航天大学机电学院,南京 210016)

**[摘要]** 航空发动机涡轮叶片气膜冷却孔的制造一直是难点所在。提出了微小孔电火花-电解同步复合加工方法,通过电火花加工和电化学溶解同步进行,实现小孔的高效无重铸层制造。针对电火花-电解复合加工方法进行了试验研究,观测了复合加工过程中的试验现象,研究了加工过程中的电压电流波形和加工产物成分,计算了电化学反应作用占复合加工材料去除量的比例,分析了工作液电导率对电极损耗的影响,比较了复合加工与纯电火花加工后的微小孔加工质量。试验结果表明,电火花-电解复合加工可以在微小孔制造完成的同时,有效去除孔壁上的重铸层。提出的方法可以为实现航空发动机涡轮叶片气膜冷却孔的高效无重铸层制造提供新的解决途径,并可用于其他微小群孔类零部件的加工。

**关键词:** 电火花加工; 电解加工; 复合加工; 微小孔; 重铸层

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2018.03.016



徐正扬

教授、博士生导师,从事特种加工技术的研究与教学。主持了国家自然科学基金、国家 863 计划、江苏省重点研发计划等项目,入选教育部“长江学者奖励计划”青年学者、中组部“万人计划”青年拔尖人才。

航空发动机涡轮前端的工作温度高达上千摄氏度,该部位直接受到高压高温燃气冲击。涡轮叶片通常采用镍基定向凝固高温合金和单晶高温合金制造,来满足不断提高的工作环境温度要求,但仍需要气膜冷却技术对工作在高温环境下的涡轮叶片进行冷却,保证其能够可靠工作<sup>[1]</sup>。作为气膜冷却的主要结构,涡轮叶片上的气膜冷却孔具有复杂的空间角度,且多分布在叶片前缘和叶身型面等部位,数量多达数十至数百个。工作叶片和导向叶片上的气膜冷却孔孔径一般在 0.3~0.8mm,并且要求加工后的孔壁无重铸层、无微裂纹、无晶间腐蚀,孔口光滑无锐边等<sup>[2]</sup>,因此其制造难度往往较大。

目前,电火花加工或激光加工等方法常用于气膜冷却孔的加工。其中,电火花高速穿孔加工是通过正负电极之间火花放电产生的高温来蚀

除工件材料,理论上可以加工任何导电材料,且不受工件刚度和硬度的影响<sup>[3]</sup>,具有加工速度快、工艺成熟等优点。但是,高速电火花穿孔难以避免在加工过程中存在孔壁重铸层、微裂纹、热影响区等缺陷<sup>[4]</sup>。除电火花加工外,激光加工也常用来进行气膜冷却孔的加工。激光加工利用激光焦点处产生的高温使工件材料瞬时熔化气化,从而去除材料,形成小孔<sup>[5-6]</sup>。但是,激光加工同样存在重铸层与微裂纹等缺陷,且容易损伤小孔出口对面的叶片内壁,加工时一般需要填充背衬材料。

为了实现无重铸层小孔加工,国内外研究通过电射流(国内又称电液束)加工方式来进行气膜孔加工。其利用电化学阳极溶解原理,加工时工作液经毛细玻璃管喷射形成液束流,在电场作用下,液束被阴极化并射向被加工零件,阳极金属工件

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51475237); 江苏省杰出青年基金项目(BK20170031); 江苏省重点研发计划(BE2015160)。

被“溶解”去除,从而实现小孔的成型<sup>[7-8]</sup>。该方法能够较好地实现无重铸层小孔加工,同时不存在工具损耗等问题<sup>[9]</sup>,是一种较为理想的加工方法,但加工效率稍低。

微小孔电火花-电解复合加工<sup>[10]</sup>,使用超低电导率中性盐溶液作为复合加工的工作液,并通过高压内冲液、高低压复合脉冲电源等措施,使得高速电火花穿孔与电化学溶解同时进行,在工具电极端面火花放电高温蚀除工件材料的同时,电极与孔壁间的侧隙中存在电化学溶解作用不断溶解孔壁,从而去除由火花放电高温熔融作用产生的重铸层等缺陷,最终实现微小孔的无重铸层加工。本文针对航空发动机涡轮叶片气膜孔加工中存在重铸层的问题,采用电火花-电解复合加工方法进行高温合金材料微小孔加工试验,研究了采用电火花-电解复合加工方法制造无重铸层微小孔,分析了电火花-电解复合加工方法的机理,并在涡轮叶片上加工出了无重铸层的气膜冷却孔,同时保证了较高的加工效率。

## 试验及方法

### 1 电火花-电解复合加工原理

电火花-电解复合加工是采用中空管电极作为工具电极,以超低电导率中性盐溶液作为工作液,伴随高压内冲液和高压复合脉冲电源等措施,使电火花加工与电解加工可以同时进行的复合加工方法,其原理如图1所示。在进行微小孔复合加工时,工具电极接阴极,待加工的工件接阳极,工作液通过高压冲液管路从管电极内部高速流入加工区域,沿电极与孔壁间的侧面间隙流出,带走加工过程中所产生的热量和相关颗粒产物与絮状产物。超低电导率中性盐溶液,具有一定的绝缘性,使得火花放电可以产生;又具有一定的导电性,使得工具阴极与工件阳极间存在电化学反应。所以,电火花-电解

复合加工方法是一种可以使得火花放电与电化学反应同时进行的微小孔特种加工方法。

在微小孔电火花-电解复合加工过程中,随着工具电极向加工端面不断进给,工具电极端部与工件间的端面加工间隙通常小于火花放电极限距离。这使得在端面间隙内,始终存在火花放电,主要是由火花放电所产生的瞬间高温熔融作用对工件材料进行蚀除。此外,由于作为工作液的超低电导率中性盐溶液仍然存在微弱的导电性,使得在端面加工间隙内同时存在着一定的电化学溶解作用。

在工具电极侧面与小孔内壁之间的侧面加工间隙内,电火花-电解复合加工的材料去除机理与端面加工间隙内有所不同。随着加工进行,小孔深度逐步增加,在侧面间隙形成伊始,同时存在火花放电高温熔融作用和电化学溶解作用,使得位于孔壁的工件材料不断被去除,侧面间隙逐渐扩大。随侧面间隙增大,火花放电逐渐减弱,当侧面间隙距离超过火花放电极限距离后,火花放电完全停止,此时只剩下电化学溶解作用,从而将侧壁形成的重铸层溶解去除,实现无重铸层的小孔加工。

在同步复合加工过程中,为了保证侧壁重铸层的去除效果,也可通过一系列方法措施强化电化学溶解作

用。例如采用高压内冲液模式,有效排除加工产物,防止二次放电产生,并稳定间隙中溶液电导率,使得电化学溶解作用持续稳定进行;同时还可以采用高低压复合脉冲电源,施加一定脉宽的低压脉冲,此时无法产生火花放电,而只存在电化学溶解作用,从而提高电化学溶解作用在材料去除上的占比,增强重铸层去除效果。

### 2 试验装置

电火花-电解复合加工试验以专用的电火花-电解复合加工试验平台为依托,结合高速摄像机,以及实时记录电参数信号的记录仪,组成微小孔电火花-电解复合加工试验系统,如图2所示。为了清晰观察微小孔复合加工过程,设计了专用的透明夹具。如图3所示,该夹具的一侧为透明的光学玻璃,从而将工件的一侧直接展示在高速摄像机镜头前面。圆柱形中空管电极竖直加工工件侧边,从夹具预留的空隙进入加工区域。电极一半悬空一半对工件侧边进行加工,可以使得加工过程中的火花放电等现象被高速摄像机记录下来。此外,复合加工试验中,采用黄铜材料的中空管电极作为工具电极,使用镍基高温合金材料制成的试板作为工件。工具电极接阴极,工件接阳极,与记录仪联通,实时记录电火花-电解复合加工时的电压波形与

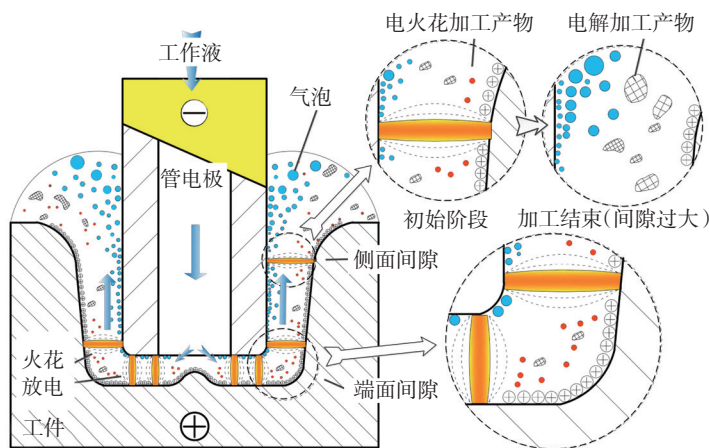


图1 微小孔电火花-电解复合加工原理示意图

Fig.1 Principle of EDM & ECM hybrid machining

电流波形。

为了研究电火花-电解复合加工的机理,以及工具电极损耗特性,进行了电火花加工与电火花-电解复合加工比较试验,相关参数如表1所示。

试验完成后,清洗并烘干工具电极和工件,用ME204E天平(分辨率为0.1mg)称量工具电极质量和工件质量。为了使试验结果准确可靠,每组试验均重复3次,然后取平均值作为该组工具电极平均质量和工件平均质量,进而比较得出该组电极和工件进行加工的相对损耗率,即以质量相对损耗率来计量工具电极的损耗情况,公式为:

$$G_g = \frac{m_g}{M_G} \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $G_g$  为工具电极的相对损耗率,%;  $m_g$  为工具电极的损耗质量;  $M_G$  为工件材料的去除质量。

## 结果与讨论

### 1 电火花-电解复合加工试验现象

通过观测电火花加工与电火花-电解复合加工的过程现象,发现两种加工方式存在明显不同。如图4所示,纯电火花加工时,火花放电强度高、放电密集、火花明显,加工区域只有少量气泡。而在电火花-电解复合加工时,有大量气泡产生,说明采用的超低电导率中性盐溶液作为工作液具有一定的导电性,使得复合加工过程中产生了电化学反应,生成了氢气泡。

### 2 电火花-电解复合加工波形

电火花-电解复合加工波形如图5所示。从整个波形可以看出,全部加工过程大致分为:加工前、加工初段、加工中段、加工末段、加工结束,共5个阶段。其中,加工前指工具电极对刀完成,放电加工尚未开始阶段;加工初段指从开始放电到击穿工件表面,电极开始进入工件内部进行加工的阶段;加工中段即是电极对工件进行穿孔加工的阶段;加

工末段是指电极击穿工件,打穿出口的阶段;加工结束是指小孔加工完成后,电极回退直至完全退出加工完成的小孔。

由加工过程波形可以看出,在加工初段,放电电压较高,放电峰值电流也较高,而在加工中段,放电电压

和峰值电流均较加工初段略有下降。分析其原因,可能是由于在加工初段,电极只在工件表面加工出凹坑,尚未完全打入工件内部形成盲孔,放电能量集中,故而放电电压和峰值电流较高。而随着加工进行,电极不断进给,孔深增加,被复合加工中电化

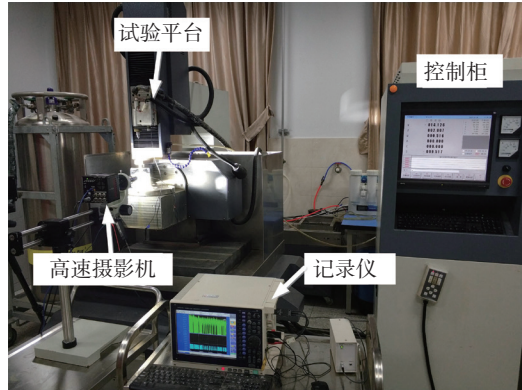


图2 微小孔电火花-电解复合加工试验系统

Fig.2 Experimental system of small hole EDM & ECM hybrid machining

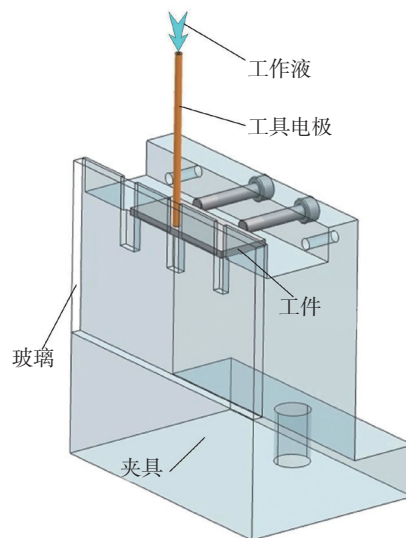


图3 透明观测夹具

Fig.3 Transparent observation fixture

表1 加工试验参数

项目	内容
工具电极材料及尺寸	黄铜, $\phi 0.5\text{mm}$
工件材料及厚度	镍基高温合金, 2.0mm
工作液工作方式及压力	管电极内冲液, 4MPa
工具电极转动速率	100r/min
峰值电流	12A
工作电压	80V
工作液	0.005mS/cm 的去离子水, 1.2mS/cm, 2.6mS/cm, 4.0mS/cm, 5.0mS/cm, 7.3mS/cm, 8.7mS/cm, 10.4mS/cm 的 $\text{NaNO}_3$ 溶液

学溶解作用去除材料的加工面积也随之增加,故而加工能量被电化学反应分走的比例也随之增加,从而导致放电电压和峰值电流随之下降。当电极击穿工件后,一方面工作液从出口漏出,一方面加工端面不复存在,此时由电化学反应加工的面积减少,放电能量可能再度趋于集中,故而放电电压上升,放电峰值电流提高。

此外,对电流波形进行对比,可以发现复合加工电流波形与纯电火花加工电流波形存在不同,如图6所示。在放电点之间,电火花加工电流为0A,而复合加工中仍然存在微小的电流。这表明复合加工过程中存在微量的电化学反应作用。

### 3 电火花-电解复合加工材料去除比例

根据所观测的电火花-电解复合加工电流波形,可以进一步研究在电火花-电解复合加工中电化学反应的平均电流密度,从而对复合加工中电化学反应作用占加工过程中材料去除总量的比例 $\lambda$ 进行计算。其中,非火花放电时认为复合加工处于电化学反应状态。通过对电流波形进行分析和统计发现,加工电流 $I$ 在0~800mA范围内波动,非火花放电状态的时间 $t$ 占整个加工周期约72%,采用直径为500 $\mu\text{m}$ 的管电极对2mm厚的工件进行微小孔电火花-电解复合加工,加工后的小孔孔径 $D$ 约为560 $\mu\text{m}$ ,整个加工周期为20s。为简便计算,假设电化学反应时电流波形近似正弦波动。则电流密度 $i$ 可为:

$$i = \frac{\bar{I}}{A} = \frac{\bar{I}}{A_0 + A_1} = 10.62(\text{A}/\text{cm}^2) \quad (2)$$

式中, $\bar{I}$ 为平均电流, $A_0$ 为工具电极端面加工面积, $A_1$ 为工具电极侧壁加工面积。

电火花-电解复合加工所获得孔的实际体积为:

$$V = \frac{\pi D^2 h}{4} \quad (3)$$

式中, $D$ 为小孔直径, $h$ 为工件厚度。

复合加工中电化学反应作用去除材料体积 $V_{\text{ECM}}$ 为:

$$V_{\text{ECM}} = \frac{\eta k Q}{\rho} = \eta \omega Q = \eta \omega \bar{I} t \quad (4)$$

式中, $\eta$ 为电流效率, $\rho$ 为金属工件密度, $k$ 为元素质量电化学反应当量, $Q$ 为通过两相界面的电量, $\omega$ 为元素体积电化学反应当量, $t$ 为电解电流通过时间。

电火花-电解复合加工中电化学反应作用去除材料的比例为:

$$\lambda = \frac{M_{\text{ECM}}}{M_{\text{EDM}} + M_{\text{ECM}}} = \frac{V_{\text{ECM}}}{V_{\text{EDM}} + V_{\text{ECM}}} = \frac{V_{\text{ECM}}}{V} = \eta \omega \bar{I} t / \frac{\pi D^2 h}{4} = 6.6\% \quad (5)$$

式中, $M_{\text{ECM}}$ 为电化学反应作用去除材料质量, $M_{\text{EDM}}$ 为火花放电高温熔融作用去除材料质量, $V_{\text{EDM}}$ 为火花放电高温熔融作用去除材料体积, $\bar{I}$ 约为400mA,电解电流通过时间 $t$ 为14.4s,试验测得的实际体积电化学反应当量 $\eta \omega$ 约为20.3 $\text{mm}^3/(\text{A} \cdot \text{h})$ 。

可以看出,在电火花-电解复合

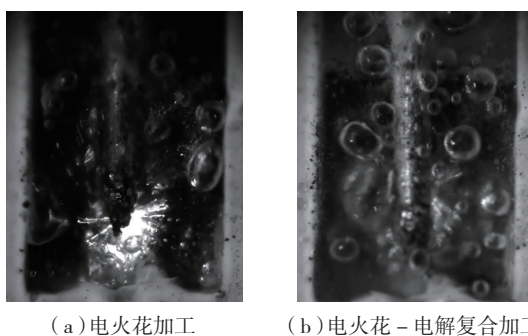


图4 不同加工方式的试验观测  
Fig.4 Process phenomena of different process methods

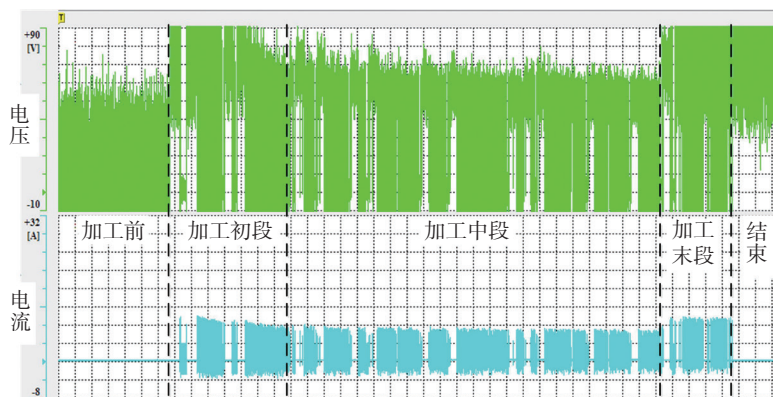


图5 电火花-电解复合加工波形  
Fig.5 Waveform of EDM & ECM hybrid machining

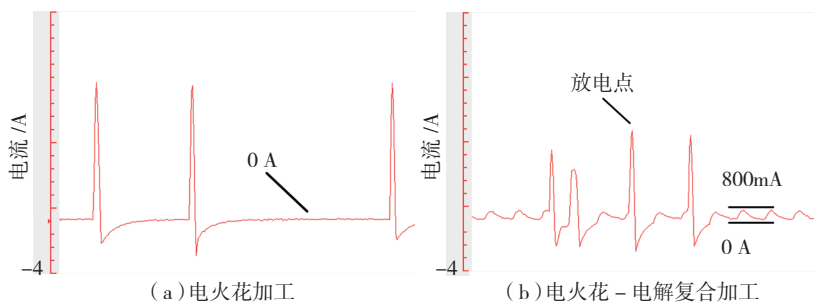


图6 不同加工方式电流波形对比  
Fig.6 Current waveform contrast of different process methods

加工过程中,绝大部分工件材料的去除是由火花放电所产生,由电化学溶解作用去除的材料比例仅占较小的份额,可以说电化学溶解主要作用于孔壁表面,用于重铸层的溶解去除。

#### 4 电火花-电解复合加工产物

将电火花加工与电火花-电解复合加工所获得的产物进行液固分离,使用原子吸收光谱法分别检测液体与固体沉淀物中各项主要金属元素的含量,其结果如表2所示。其中,铜、锌元素为工具电极的组成元素,镍、铬等其他元素为工件元素。对比电火花加工与复合加工后的清液成分,可以发现复合加工后镍、铬等工件元素在清液中含量较高,这说明电化学溶解使得工件元素被置换到工作液中。沉淀物中的各元素含量则表明,在电火花加工时,工件材料会以颗粒剥离的方式被去除,最终形成大量固体颗粒沉淀;而在复合加工时,除火花放电高温熔融去除工件材料外,还存在由电化学溶解使得工件材料以离子形式被溶解到工作液中,使得最终沉淀物中各元素含量低于电火花加工。

试验结果发现,复合加工后固态沉淀物中铜、锌等工件元素的含量仅是纯电火花加工的20%左右。这说明电火花-电解复合加工过程中工具电极损耗较少,即相比于电火花加工,复合加工降低了电极损耗。

#### 5 电火花-电解复合加工电极损耗

图7是分别在电导率0.005mS/cm的去离子水中进行电火花加工和在不同电导率的NaNO<sub>3</sub>溶液中进行复合加工的工具电极相对损耗率对比图。可以看出,随着工作液电导率的升高,工具电极相对损耗率逐渐降低,尤其在开始使用1.2mS/cm的NaNO<sub>3</sub>溶液时,电极相对损耗率下降最快,损耗率相对减少了近一半。而当工作液由去离子水转变为电导率10.4mS/cm的NaNO<sub>3</sub>溶液后,复合加工的工具电极相对损耗率相比纯电

火花加工时减少了85.4%。

在试验过后,用SEM扫描电镜对工具电极的表面形貌进行拍摄,由图8可以看出,采用去离子水作为工作液进行电火花加工后,工具电极表面存在大量由于火花放电造成的蚀除痕迹;而采用电火花-电解复合加工的工具电极,其只在电极端部存在火花放电高温熔融的痕迹,电极侧面几乎不存在火花放电的蚀除凹坑。这说明复合加工过程中,侧壁主要存在电化学溶解作用,同时侧面加工

间隙较大,间隙内较难发生“二次放电”,有效减少了工具电极的损耗。

#### 6 微小孔复合加工结果

试验完成后,分别检测电火花加工的小孔形貌与电火花-电解复合加工的小孔形貌。如图9所示,在电火花加工后的小孔孔口处,可以观察到存在熔融后的产物成分堆积,且电火花加工的小孔孔径较小。而复合加工后的小孔入口处可以观察到电化学溶解作用去除工件材料痕迹,并且小孔的孔口边缘较为光滑,存在一

表2 加工产物元素含量分析

元素	清液		沉淀物	
	电火花加工	复合加工	电火花加工	复合加工
Cu	0.005	0.001	6.38	1.28
Zn	0.004	0.001	6.08	1.30
Co	0.002	0.002	1.81	1.45
Al	0.001	0.003	0.58	0.73
Ni	0.009	0.110	20.8	15.70
Cr	0.001	1.250	0.70	0.67
Mo	0.100	0.940	0.59	0.36
W	0.470	1.830	1.08	0.46

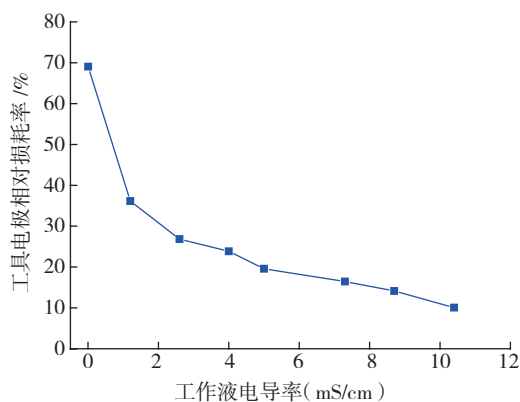
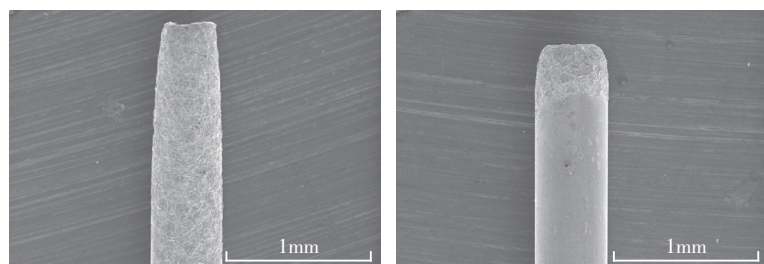


图7 工具电极相对损耗率

Fig.7 Tool electrode relative wear rate



(a) 电火花加工

(b) 电火花-电解复合加工

图8 不同加工方式工具电极损耗对比

Fig.8 Comparison of tool electrode wear in different process methods

定的倒圆。同时,由于侧壁存在电化学反应溶解作用,具有一定的扩孔效应,使得复合加工的孔径比电火花加工的小孔孔径稍大。

根据检测结果,在镍基高温合金材料试板上加工公称直径为 0.5mm 的微小孔时,孔径误差在 +0.08mm 以内,孔壁表面粗糙度  $R_a$  在 1.6 $\mu\text{m}$  以下,具体检测结果如表 3 所示。

对加工样件进行金相腐蚀,观察孔壁重铸层情况。如图 10 所示,可以清晰观察到,电火花加工后的小孔孔壁上存在明显的重铸层。而电火花-电解复合加工后的小孔孔壁表面则观察不到重铸层残留。这说明复合加工过程中的电化学反应确实有效地去除了火花放电高温熔融所产生的重铸层,提高了小孔的加工质量。

针对加工效率,试验使用直径 500 $\mu\text{m}$  的管电极,在厚度为 2mm 的镍基高温合金试板上以 10 个小孔为一组连续进行电火花-电解复合加工,从加工开始到结束,加工时间约在 20s。即在复合加工时,小孔轴向加工速度可超过 100 $\mu\text{m}/\text{s}$ ,表明该电火花-电解复合加工方法具备了较高的加工效率,可以实现小孔的高效无重铸层加工。具体加工时间如表 4 所示。

### 涡轮叶片气膜孔复合加工

试验表明,电火花-电解复合加工方法可以加工出孔壁无重铸层、孔口有倒圆的微小孔。在此基础上,针对航空发动机涡轮叶片,按照实际加工要求,进行气膜冷却孔电火花-电解复合加工试验,在叶片上加工出全部气膜冷却孔,如图 11 所示,表明该电火花-电解复合加工方法可以用于气膜冷却孔的加工。

### 结论

(1) 提出了微小孔电火花-电解同步复合加工方法。研究了微小

孔电火花-电解复合加工的机理,分析了复合加工过程中特殊的加工现象与电压电流波形,证明了复合加工过程中同时存在火花放电和电化

溶解作用。

(2) 通过试验,研究了电火花-电解复合加工中电化学反应所占复合加工中工件材料的去除比例,

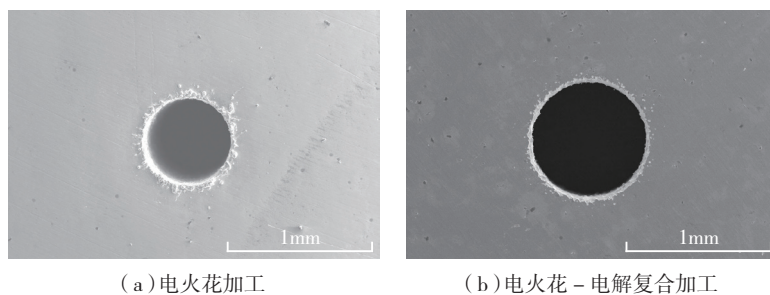


图9 不同加工方式下小孔孔口形貌

Fig.9 Orifice morphology of small hole from different process methods

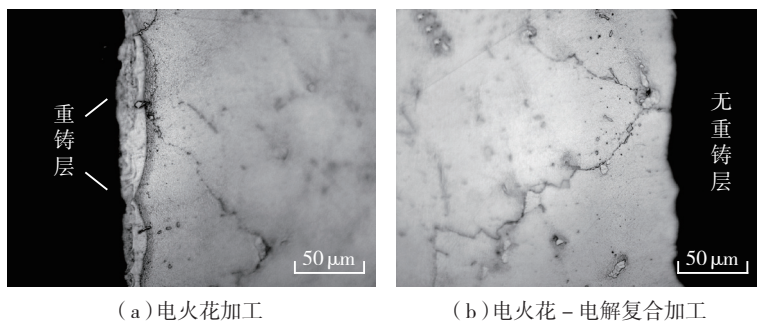


图10 不同加工方式下小孔重铸层金相图

Fig.10 Recast layers of small hole metallographic photo from different process methods

表3 微小孔电火花-电解复合加工检测结果

孔径/mm	孔径误差/mm	孔表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$
0.574	+0.074	1.2
0.559	+0.059	1.1
0.555	+0.055	1.1
0.576	+0.076	1.0
0.571	+0.071	1.2

表4 微小孔电火花-电解复合加工时间

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
时间/s	18	18	19	18	18	20	19	20	20	19

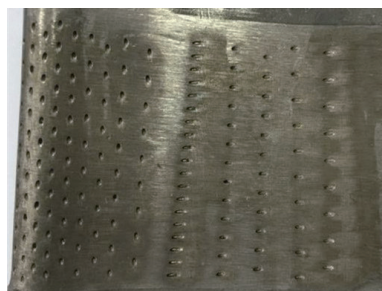


图11 电火花-电解复合加工涡轮叶片气膜孔

Fig.11 Film cooling holes on blade of EDM & ECM hybrid machining

分析了复合加工时工具电极的损耗情况,以及微小孔的加工质量。结果表明,电化学溶解作用仅占复合加工材料去除总量的6.6%,材料去除大部分通过电火花高速穿孔完成,而电解加工主要作用于重铸层的去除;采用复合加工方法,工具电极相对损耗相比电火花加工大幅度降低,同时复合加工后的小孔无重铸层残留。

(3)采用微小孔电火花-电解复合加工方法,在涡轮叶片上进行了气膜冷却孔加工,验证了方法的可行性。

### 参考文献

- [1] 朱海南. 特种加工技术在先进航空发动机中的应用与展望[J]. 金属加工(冷加工), 2016(24): 4-6.
- ZHU Hainan. Application and prospect of non-traditional machining technology in advanced aero engines[J]. Metal Working (Metal Cutting), 2016(24): 4-6.
- [2] 朱海南, 齐歆霞. 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 Xinxia. Development of machining technology gas holes on turbine blades[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 54(13): 71-74.
- [3] 白基成, 郭永丰, 杨晓冬. 特种加工技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2015.
- BAI Jicheng, GUO Yongfeng, YANG Xiaodong. Technology of non-traditional machining[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2015.
- [4] 王德新, 盛文娟, 徐斌, 等. 叶片气膜孔簸箕槽电火花加工工艺[C]//中国机械工程学会特种加工分会. 第15届全国特种加工学术会议论文集(上). 南京, 2013: 150-154.
- WANG Dexin, SHENG Wenjuan, XU Bin, et al. Study on technology of the EDM to dustpan slots of the gas holes on blade[C]//Non-Traditional Machining Institution of the Chinese Mechanical Engineering Society. Proceedings of the 15th National Conference on Non-Traditional Machining (I). Nanjing, 2013: 150-154.
- [5] 张文武, 郭春海, 张天润, 等. 涡轮叶片先进气膜冷却与相关激光打孔技术进展[J]. 航空制造技术, 2016, 59(22): 26-31.
- ZHANG Wenwu, GUO Chunhai, ZHANG Tianrun, et al. Advanced film cooling technology of turbine blades and progress in relevant laser drilling technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(22): 26-31.
- [6] 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.
- [7] 王建业, 徐家文. 电解加工原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- WANG Jianye, XU Jiawen. Principle and application of electrochemical machining[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2001.
- [8] 施文轩, 张明岐, 殷旻. 电液束加工工艺的研究及其发展[J]. 航空制造技术, 2001, 44(6): 25-27.
- SHI Wenxuan, ZHANG Mingqi, YIN Min. Research and development of electro-stream machining technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2001, 44(6): 25-27.
- [9] 潘志福, 张明岐, 傅军英, 等. 航空发动机高品质小孔电液束加工技术[J]. 航空制造技术, 2015, 58(23/24): 64-66.
- PAN Zhifu, ZHANG Mingqi, FU Junying, et al. Electro-stream machining technology of high quality hole in aeroengine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(23/24): 64-66.
- [10] ZHANG Y, XU Z Y, ZHU Y, et al. Machining of a film-cooling hole in a single-crystal superalloy by high-speed electrochemical discharge drilling[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 29: 560-570.

通讯作者: 徐正扬, E-mail: xuzhy@nuaa.edu.cn.

## Fabrication of Small Hole Based on EDM & ECM Hybrid Machining Method

XU Zhengyang, ZHANG Chenxiang

( College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China )

**[ABSTRACT]** The fabrication of film cooling holes on turbine blade of aero-engine is always a difficult problem. In this paper, the EDM & ECM hybrid machining method for small holes drilling is presented, in which electrical discharge machining (EDM) and electrochemical machining (ECM) occur simultaneously. According to experimental studies on the EDM & ECM hybrid machining method, machining process phenomenon, waveforms of voltage and current were observed. The composition of processed product was analyzed, and the ratio of material removal by electrochemical dissolution was also calculated. Effects of different working fluid conductivities on tool electrode wear performances were studied. Machining qualities of small holes by hybrid machining and pure EDM were compared. The results of experiments indicate that the EDM & ECM hybrid machining can effectively remove the recast layers on the side wall of the hole in the machining process. Thus, a novel way to machining the film cooling holes can be provided with high efficiency and free of recast layer. It also can be used for machining other small hole structures in aero-engine.

**Keywords:** Electrical discharge machining; Electrochemical machining; Hybrid machining; Small hole; Recast layer

(责编 海山)