

管电极尺寸对带 TBC 高温合金电火花小孔加工的影响

于晓宇,刘壮,高长水

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:采用磨料冲蚀-电火花组合加工方法对带 TBC 高温合金进行 30°斜孔加工试验。在形成 TBC 冲蚀孔形之后,采用不同尺寸管电极加工高温合金基体,研究管电极尺寸对 TBC 冲蚀孔形及金属孔形的影响。结果发现:随着管电极尺寸增大,重熔堆积物厚度随之增大,且堆积物生成区域扩大;选用较小尺寸电极进行加工时,会严重影响两孔形的匹配程度;虽然采用较大尺寸电极可以提高孔形匹配,但容易出现 TBC 裂纹、剥落等缺陷。

关键词:高温合金;热障涂层;磨料冲蚀-电火花组合加工;电极尺寸;孔形匹配

中图分类号:V261.94 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)03-0004-03

Effect of Electrode Size on EDM Drilling of Thermal Barrier Coated Superalloy

YU Xiaoyu, LIU Zhuang, GAO Changshui

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

Abstract: A 30° oblique hole machining test is carried out on the superalloy with TBC by abrasive erosion and electric discharge combined machining method. After TBC eroded hole shape forms, different sizes of tube electrodes are used to process the superalloy substrate, and the influence of the tube electrode size on the TBC eroded hole shape and metal pass is studied. The result shows that as the size of the tube electrode increases, the thickness of the remelted deposits increases and the deposit generation area expands, the application of a smaller size electrode for processing will seriously affect the matching degree of the two hole shapes, and although the application of larger size electrodes can improve hole shape matching, defects such as TBC cracks and peeling are more likely to occur.

Keywords: superalloy; thermal barrier coating; abrasive erosion and electric discharge combined machining; electrode size; hole shape matching

0 引言

热障涂层(TBC)技术是目前可以大幅度提高航空发动机服役温度最实际可行的办法,配合气膜冷却孔能有效地提高涡轮叶片的隔热冷却效果^[1-2]。由于 TBC 的硬度高且与高温合金的物理性能差异大,而且 TBC 的弱导电性导致电火花、电化学等方法受到限制,使得 TBC 微小孔加工成为一个难题^[3]。目前带 TBC 高温合金微小孔加工方法主要有激光加工、辅助电极电火花放电加工、磨料水射流及其组合加工方法等。激光加工常用于带 TBC 高温合金微小孔的加工,但由于激光加工的热效应,小孔易出现分层裂纹^[4-6]。众多学者通过改变激光加工步骤来提高小孔的加工质量^[7-9]。辅助电极法电火花加工方法解决了电火花无法加工弱导电性材料的难题,但是无法解决大厚度涂层零件的加工^[3,10]。

赵凯等提出了磨料冲蚀-电火花组合加工方法,即先使用磨料水射流加工 TBC,当加工到金属表面时,再使用电火花加工完成金属基体穿孔加工^[11-12]。他们研究了电火花加工峰值电流、脉冲宽度和伺服速度对 TBC 孔形的影响,获得了优化工艺参数。但是,对于该方法中 TBC 孔形与金属基体孔形的匹配问题,目前尚未深入研究。本文

采用磨料冲蚀-电火花组合制孔方法,针对 30°斜孔,在电火花加工阶段采用不同直径的管电极,以研究不同管电极尺寸对 TBC 冲蚀孔形与金属孔形的影响以及两者匹配性,以期为今后带 TBC 高温合金制孔应用研究提供参考。

1 试验方案

1.1 加工装置与试样材料

试验装置为自行研制的磨料冲蚀-电火花组合加工机床,如图 1 所示。该设备将磨料水射流加工和电火花穿孔加工进行了集成。在加工试验时,完成 TBC 涂层的冲蚀加工、暴露出金属基体之后,移动工作台,将 TBC 孔精准移动至管电极轴线处,再进行电火花穿孔加工。图 2 为电火花加工阶段示意图。

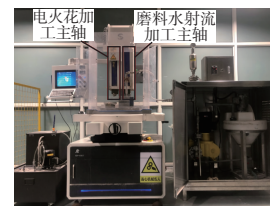


图 1 磨料冲蚀-电火花组合加工机床

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51675273)

第一作者简介:于晓宇(1998—),男,江苏滨海人,硕士研究生,研究方向为特种加工。

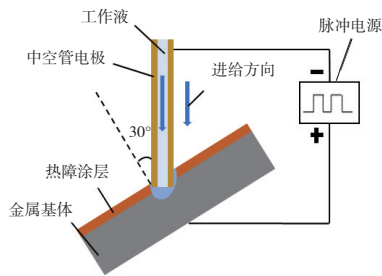


图2 电火花加工示意图

试验样品以 GH2132 高温合金为金属基体,采用大气等离子喷涂 (APS) 方法在其表面制备 TBC 涂层。其中,陶瓷涂层的主要成分为 7%YSZ,厚度约为 $50\mu\text{m}$;金属黏结层的主要成分为 NiCrAlY,厚度约为 $50\mu\text{m}$,试样尺寸为 $30\text{mm}\times 20\text{mm}\times 2\text{mm}$ 。加工完成后的试件经超声波清洗后烘干,在扫描电镜 (SEM) 下观测小孔的加工表面及入口尺寸。

1.2 试验设计

试验参数如表 1 所示。首先采用磨料冲蚀加工 TBC 孔形,获得一组先导孔。然后利用电火花穿孔方法在先导孔位置继续加工高温合金孔形。其中,管电极直径变化范围为 $0.20\text{mm}\sim 0.35\text{mm}$ 。通过改变管电极直径进行对比试验,研究管电极直径对加工结果的影响。

表1 组合加工试验参数

加工方法	参数名称	参数值
磨料冲蚀	喷嘴直径 D/mm	0.3
	冲蚀角度 $\alpha/(\circ)$	30
	射流压力 P/MPa	5
	冲蚀靶距 S/mm	10
	磨料浓度 $A/\text{wt}\%$	1
	磨料种类	白刚玉
	冲蚀时间 t/s	45
电火花	放电电压 U/V	70
	峰值电流 I/A	17.5
	脉冲宽度 t_{on}/ms	14
	脉冲间隔 t_{o}/ms	24
	伺服速度 $v/(\text{mm}/\text{min})$	30
	冲液压力 F/MPa	6
	管电极直径 d/mm	0.20, 0.25, 0.30, 0.35

2 结果分析

图 3 为采用不同管电极直径 ($d = 0.20\text{mm}$ 、 0.25mm 、 0.30mm 、 0.35mm) 所加工出的小孔形貌 SEM 图。从图 3(a) 中看出 $d = 0.20\text{mm}$ 时加工出来的孔口附近表面光滑,无明显堆积物和裂纹,这可能是因为在使用 $d = 0.20\text{mm}$ 管电极加工时对金属材料去除的速率较低,能够有足够的时

间将蚀除产物从孔中排出并且不会堆积在孔口处。但金属孔的尺寸明显小于 TBC 冲蚀孔,两孔之间有明显的不匹配特征,在 TBC 孔口的前缘处观察到了少量呈颗粒状的堆积物,成分分析结果如图 4 所示,其主要成分为 Cr、Fe、Ni、O 等元素,还有少量的陶瓷材料成分元素 Zr、Si 等。这应该是在进行电火花加工时,金属蚀除物和少量的 TBC 材料混合产物被抛出后在 TBC 孔的前缘粘附并再次凝固。除此之外,在 TBC 孔的后缘有明显的陶瓷涂层剥落去除的现象。

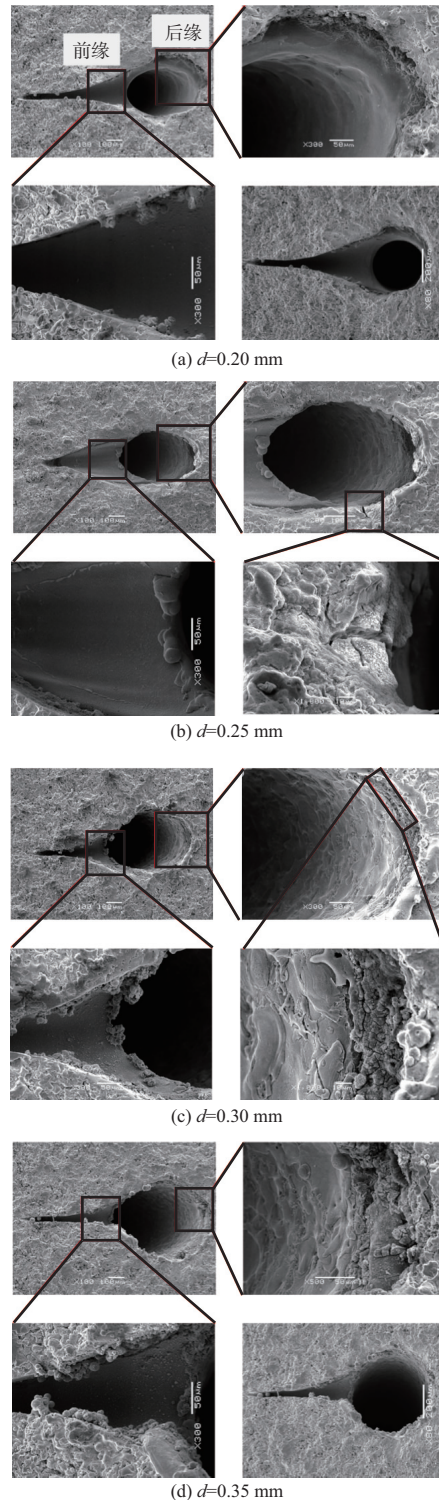


图3 不同尺寸的管电极加工出小孔的表面形貌 SEM 图

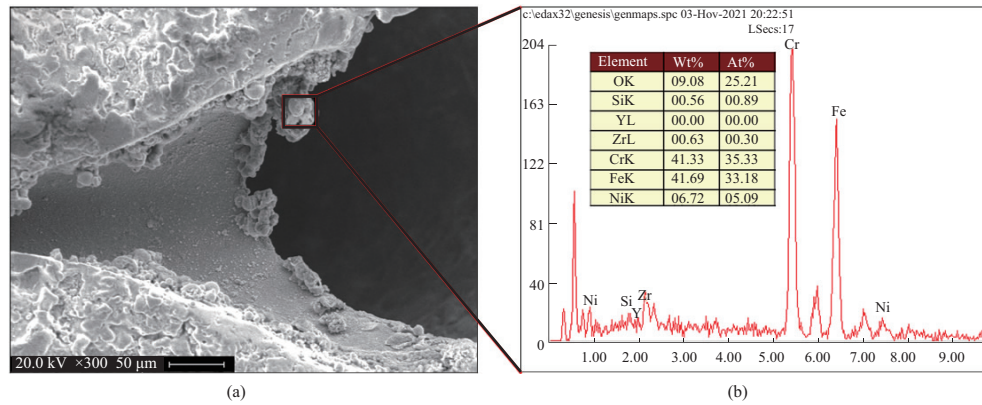


图4 孔口堆积物成分分析结果

从图3(b)整体上看, $d=0.25\text{ mm}$ 时加工出来的两孔之间的尺寸差距比 $d=0.20\text{ mm}$ 时小得多,孔的加工效果较好,表面较为光滑,存在少量的堆积物。但是观察TBC孔的后缘处可以发现,在TBC上产生了微裂纹,且往孔的内部延伸,这应该就是电火花放电产生的高温作用引起TBC的崩裂。从图中未发现电火花放电造成的TBC与金属基体之间的分层现象,这说明高温放电对界面结合部位的影响比较小。

从图3(c)和图3(d)可以看出,当 $d=0.30\text{ mm}$ 和 0.35 mm 时,孔口附近均产生了更多且更厚的堆积物,且在孔的后缘也存在少许堆积物。这是因为随着管电极直径的增加,材料去除速率提高,导致蚀除物抛出后在孔口堆积难以及时冲洗干净,随后在孔口凝固形成堆积物。当 $d=0.30\text{ mm}$ 时TBC受到电火花放电的影响,部分涂层孔形被再次蚀除,可以说是电火花加工对TBC孔形产生了扩孔影响,使得TBC孔与金属孔在短径长度上一致,且TBC上存在明显的微裂纹,这应该是电火花放电产生的高温作用所引起的。可以发现当 $d=0.35\text{ mm}$ 时孔后缘的损伤情况比 $d=0.30\text{ mm}$ 时的加工结果更加严重,由微裂纹变成了TBC的大块剥落,同时伴随着裂纹的产生。虽然此时TBC孔的短径与金属孔的短径保持一致,两孔间匹配性较好,但电火花放电加工时对TBC产生了严重的影响。

图5所示为不同管电极直径对孔口最大堆积物厚度的影响。由图中发现随着管电极直径的增加,最大堆积物厚度随之增大,而且堆积物生成区域从孔前缘处发展为整个孔口附近。这与不同尺寸的管电极的材料去除率有关,较小尺寸的管电极去除率低,能够及时地将蚀除产物冲洗干净,而较大尺寸的管电极会产生更多蚀除物且不能及时清理,更容易在孔口堆积。

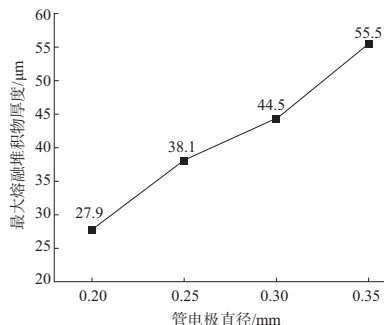


图5 管电极直径对最大堆积物厚度的影响

通过之前的磨料冲蚀孔形演变规律中可以得知,在该磨料冲蚀加工参数下,TBC孔短径的长度在 $395\text{ }\mu\text{m}$ 左右,变动幅度不大。图6所示为管电极直径对孔径的影响,发现在使用 $d=0.20\text{ mm}$ 的管电极时,加工出来的金属孔与TBC孔之间存在着明显的不匹配性,应选用更大尺寸的管电极。使用 $d=0.25\text{ mm}$ 的管电极时两孔之间的尺寸差距有所减小。使用 $d=0.30\text{ mm}$ 管电极加工发现,孔的短径尺寸基本一致,得到了很好的匹配度,但也说明TBC孔壁受到电火花放电的影响,部分TBC材料被蚀除,但是对TBC的影响较小,与TBC冲蚀孔的原始短径长度($395\text{ }\mu\text{m}$)相差不大。但在使用更大尺寸的管电极($d=0.35\text{ mm}$)时,虽两孔间匹配性很好,但电火花放电加工时使TBC孔扩大了约 $65\text{ }\mu\text{m}$,对TBC产生了严重的影响,且斜孔后缘处更加容易出现陶瓷材料上产生裂纹以及材料剥落等缺陷。

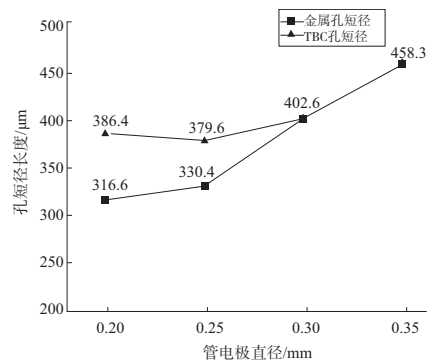


图6 管电极直径对加工孔径的影响

在进行电火花加工时,不宜选用较小尺寸(0.20 mm)的管电极进行加工,会严重影响两孔形间的匹配程度,选用较大尺寸的管电极(0.35 mm)可以提高孔形匹配性,但也容易出现裂纹、剥落等缺陷。针对本小节中使用的冲蚀加工参数下加工出的TBC孔,推荐使用直径为 0.30 mm 的管电极,加工出的孔拥有较好的孔形匹配度和较少的表面缺陷。

3 结语

本文在固定的磨料冲蚀加工参数下,研究了不同的管

(下转第15页)

5 结语

本文采用数值计算、统计分析与试验校对的方法,研究了雷诺数效应对压气机性能影响,针对效率修正模型开展了验证工作,可以得到以下结论。

1) 雷诺数降低对压气机效率的影响不可忽略,峰值效率及对应的压比、流量都有不同程度的下降。

2) 压气机的多变效率与弦长雷诺数之间满足幂函数关系式,可以此作为效率修正的基本模型。

3) 效率幂率关系中的系数 K 是一个具体的与压气机型号有关的常数,由设计点参数决定;三级风扇的指数 $-m$ 呈现出了转速相关性,会受到气动参数改变的影响,而七级压气机的指数 $-m$ 则离散在 -0.1 周围,这说明 $-m$ 的取值本身较为复杂,应综合考虑各方面因素。

参考文献:

- [1] 赵胜丰,卢新根,朱俊强. 雷诺数对跨声速压气机转子内部流动失稳触发机理的影响[J]. 推进技术,2013,34(1):25-30.
- [2] 石建伟,常方圆,宋文武,等. 低雷诺数下 NACA64-418 翼型的流动分离研究[J]. 热能动力工程,2020,35(2):254-264.

- [3] 王正鹤,赵辉,卫萌,等. 雷诺数对跨声速压气机失速分离特性的影响[J]. 工程热物理学报,2019,40(9):1988-1996.
- [4] 姚卡,徐昂,史磊,等. 基于雷诺数的离心压气机模化研究[J]. 汽轮机技术,2019,61(4):275-279.
- [5] HEIDELBERG L J, BALL C L. Effect of Reynolds number on overall performance of a 3.7-inch-diameter six-stage axial-flow compressor[R]. Florida, USA: NTRS, 1972.
- [6] WEIGEL C, BALL C L. Reynolds number effect on overall performance of a 10.8-centimeter (4.25-inch) sweptback bladed centrifugal compressor[R]. Florida, USA: NTRS, 1972.
- [7] 温泉,梁德旺,李逢春,等. 雷诺数效应对小流量多级轴流压气机的性能影响[J]. 航空动力学报,2004,19(1):81-88.
- [8] WASSSELL A B. Reynolds number effects in axial compressors[J]. Journal of Engineering for Power, 1968, 90(2):149-156.
- [9] 肖洪,吴虎,廉筱纯. 雷诺数对涡扇发动机性能及稳定性影响[J]. 航空动力学报,2005,20(3):394-398.
- [10] 郭捷,王咏梅,杜辉,等. 低雷诺数条件对涡扇发动机风扇/压气机性能和稳定性影响的试验研究[J]. 航空发动机,2004,30(4):4-6.

收稿日期:2021-11-16

(上接第6页)

电极直径下 TBC 孔形与金属孔形两者的匹配情况,通过观测小孔的加工表面及入口尺寸,分析对加工结果的影响,具体结论如下:

1) 从管电极直径对加工结果影响的试验结果中发现,随着管电极尺寸的增大,最大堆积物厚度随之增大,而且堆积物生成区域从孔前缘处发展为整个孔口附近;

2) 针对本文试验参数下,不宜选用较小尺寸(0.20 mm)的管电极进行加工,会严重影响两孔形间的匹配程度;随着管电极直径增加可以提高孔形匹配性,但管电极直径过大也容易出现裂纹、剥落等缺陷。推荐使用直径为 0.30 mm 的管电极,加工结果拥有较好的孔形匹配度和较少的表面缺陷。

参考文献:

- [1] 王博,刘洋,王福德,等. 航空发动机及燃气轮机涡轮叶片热障涂层技术研究及应用[J]. 航空发动机,2021,47(增刊1):25-31.
- [2] 周绪强,王红顺,王艳. 浅谈燃气涡轮发动机热障涂层技术发展[J]. 内燃机与配件,2019(24):22-23.
- [3] MOHRI N, FUKUZAWA Y, TANI T, et al. Assisting electrode method for machining insulating ceramics[J]. CIRP Annals, 1996, 45(1):201-204.
- [4] VOISEY K T, CLYNE T W. Laser drilling of cooling holes through plasma sprayed thermal barrier coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 176(3):296-306.

- [5] SEZER H K, LI L. Mechanisms of acute angle laser drilling induced thermal barrier coating delamination[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2009, 131(5):051014.
- [6] KAMALU J, BYRD P, PITMAN A. Variable angle laser drilling of thermal barrier coated nimonic[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 122(2/3):355-362.
- [7] EBRAHIMZADE V, UCHTMANN H, SINGHEISER L, et al. Microstructure and cyclic oxidation behavior of APS TBC systems drilled with various laser methods[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 378:125018.
- [8] WANG R J, DONG X, WANG K D, et al. Two-step approach to improving the quality of laser micro-hole drilling on thermal barrier coated nickel base alloys[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 121:406-415.
- [9] MARIMUTHU S, SMITH B, KIELY A, et al. Delamination-free millisecond laser drilling of thermal barrier coated aerospace alloys[J]. Journal of Laser Applications, 2019, 31(4):042001.
- [10] KUCUKTURK G, COGUN C. A new method for machining of electrically nonconductive workpieces using electric discharge machining technique[J]. Machining Science and Technology, 2010, 14(2):189-207.
- [11] 赵凯. 热障涂层金属构件的磨料水射流与电火花组合制孔基础研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2019.
- [12] 谢天海. EB-PVD 涂层零件的磨料冲蚀与电火花组合加工试验研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2020.

收稿日期:2021-12-13