

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.05.016

## 磨料水射流去除等离子喷涂法热障涂层的试验研究

谢天海<sup>1</sup>, 高长水<sup>1</sup>, 郭超<sup>2</sup>, 刘壮<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016; 2. 南京航空航天大学无锡研究院, 无锡, 214000)

**摘要:** 热障涂层技术在航空发动机中具有延长热端部件使用寿命、提高功率和减少燃油消耗的优点。对热障涂层金属构件进行电火花小孔加工时,需要先去金属基体表面的热障涂层。针对等离子喷涂法(Air plasma spray, APS)制备的热障涂层进行了磨料水射流去除加工试验。采用直径为 300 μm 的低压磨料水射流,在室温下开展 APS 涂层的盲孔加工试验,以期为后续的电火花穿孔加工提供可能性。结果表明,冲蚀孔径和孔深随磨料浓度、射流压力、冲孔时间和靶距的增加而增大,涂层去除速率随磨粒硬度和粒径的增加而提高,APS 涂层的冲蚀效率明显高于 EB-PVD 涂层。

**关键词:** 磨料水射流加工; 等离子喷涂法; 热障涂层; 微小孔加工; 冲蚀孔型特征

**中图分类号:** V26      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2020)05-0792-08

## Experimental Research on Abrasive Water Jet Drilling of APS Ceramic Thermal Barrier Coating

XIE Tianhai<sup>1</sup>, GAO Changshui<sup>1</sup>, GUO Chao<sup>2</sup>, LIU Zhuang<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electric Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China; 2. Wuxi Research Institute, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Wuxi, 214000, China)

**Abstract:** Thermal barrier coating (TBC) technology has the advantage of extending hot end component life, increasing power and reducing fuel consumption in aerospace engines. However, before performing electro-discharge machining (EDM) on the thermal barrier coated metal member, it is necessary to remove the thermal barrier coating on the surface of the metal substrate. Abrasive water jet machining (AWJM) are performed on the thermal barrier coating prepared by APS. Blind hole processing test of APS coating is carried out at room temperature using a low pressure abrasive water jet having a diameter of 300 μm. The results show that the erosion pore size and pore depth increase with the increase of abrasive concentration, jet pressure, punching time and target distance, and the coating removal rate increases with the increase of abrasive grain hardness and particle size. The roundness of the erosion hole type has yet to be improved.

**Key words:** abrasive water jet machining; air plasma spray (APS); thermal barrier coating; hole drilling; hole feature

热障涂层(Thermal barrier coatings, TBCs)的使用大大提高了航空发动机的寿命和可靠性,使得航空发动机进一步向着高推重比、低油耗的方向发展<sup>[1-4]</sup>。热障涂层的制备方法主要包括两种,分别

**基金项目:** 国家重点研发计划(2018YFB1105900)资助项目;国家自然科学基金(51675273)资助项目。

**收稿日期:** 2019-04-14; **修订日期:** 2020-09-01

**通信作者:** 刘壮,男,副教授, E-mail: liuzhuang@nuaa.edu.cn。

**引用格式:** 谢天海,高长水,郭超,等. 磨料水射流去除等离子喷涂法热障涂层的试验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(5): 792-799. XIE Tianhai, GAO Changshui, GUO Chao, et al. Experimental research on abrasive water jet drilling of APS ceramic thermal barrier coating[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(5): 792-799.

为等离子喷涂法 (Air plasma spray, APS) 和电子束物理气相沉积法 (Electron beam-physical vapor deposition, EB-PVD)。两种方法制备的热障涂层的微观结构差异较大,EB-PVD 陶瓷层是典型的柱状晶结构,而 APS 热障涂层呈典型的片层状结构,具有多孔、多裂纹等缺陷<sup>[5-7]</sup>。目前,热障涂层技术已广泛应用于涡轮叶片、燃烧室导向叶片、燃烧室壁以及某些流道和喉管等处<sup>[7-8]</sup>。在航空发动机设计制造中,往往同时采用热障涂层技术和气膜冷却技术来改善叶片的工作环境<sup>[9-11]</sup>。这就需要在带热障涂层的涡轮叶片上制备大量的微小尺度气膜冷却孔道。

由于热障涂层的不导电性,给电火花加工热障涂层金属构件气膜冷却孔道带来了难度。文献 [12] 提出了一种可行的解决方法,即先利用磨料水射流冲蚀热障涂层,暴露金属基体,形成热障涂层孔型,再利用电火花进行金属基体的穿孔加工。这种方法的优点在于磨料水射流去除热障涂层无热影响区、无工具磨损、不受材料导电性能的影响等<sup>[13-14]</sup>。美国通用电气 (General Electric, GE) 公司航空发动机分公司曾利用磨料水射流对带有陶瓷热障涂层的金属部件进行小孔加工的可行性试验研究。他们发现当射流压力高达 206.85 MPa 时,热障涂层会产生崩边现象;同时射流的回弹严重影响钻孔的形状<sup>[15]</sup>。赵凯等研究了 EB-PVD 制备的热障涂层的低压磨料水射流加工,试验结果表

明热障涂层与金属基体之间没有分层现象,同时在热障涂层上未发现微观裂纹,加工表面质量较好<sup>[16]</sup>。本文对低压磨料水射流冲蚀 APS 热障涂层进行了探索,重点研究磨粒种类、磨粒粒径、磨料浓度、射流压力、冲孔时间以及靶距对热障涂层孔型特征的影响,以期更全面地掌握磨料水射流加工热障涂层的工艺规律。

## 1 实验方案

试样为 3 mm 厚度的 DZ126 镍基高温合金,其表面涂覆了 APS 热障涂层。热障涂层厚度约 150 μm,含 ZrO<sub>2</sub> 陶瓷涂层和 MCoAlY 金属粘结层。试验中除磨粒种类、磨粒粒径、磨料浓度、射流压力、冲孔时间以及靶距之外,其他参数如喷嘴直径、射流温度和入射角度在试验中恒定,分别为 300 μm 直径、25 °C 室温和 90° 垂直入射。图 1 为磨料水射流加工 APS 热障涂层样件的示意图,其中图 1(a) 为冲蚀加工示意图,表 1 为具体的试验条件,试验编号 A、B、C、D、E、F 分别表示磨粒种类、磨粒粒径、磨料浓度(重量百分比)、射流压力、冲孔时间以及靶距的单因素试验。图 1(b) 为试验编号 A,磨粒种类为白刚玉时的冲蚀加工孔形图。热障涂层冲蚀孔形的测量采用了 Olympus 公司生产的 DSX510 三维光学显微镜,其摄像头的分辨率高达 0.01 μm,并采用逐行扫描的方式来获取三维图像。

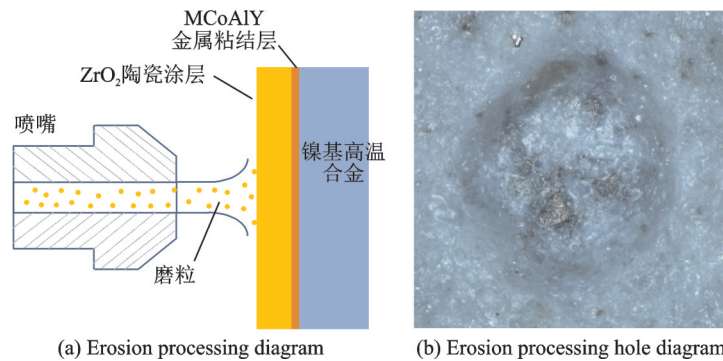


图 1 磨料水射流冲蚀 APS 热障涂层示意图

Fig.1 Abrasive water jet erosion APS thermal barrier coating

表 1 单因素试验条件

Table 1 Single factor test condition

试验编号	磨粒种类	磨粒粒径/目	磨料浓度/%	射流压力/MPa	冲孔时间/min	靶距/mm
A	白刚玉 石榴石	1 200	1.0	4.0	2.0	10
B	白刚玉	1 200, 2 500	1.0	4.0	2.0	10
C	白刚玉	1 200	0.5, 1.0, 1.5	4.0	2.0	10
D	白刚玉	1 200	1.0	4.0, 5.0	2.0	10
E	白刚玉	1 200	1.0	4.0	1.0, 2.0, 3.0	10
F	白刚玉	1 200	1.0	4.0	2.0	5, 10, 15

## 2 结果与分析

### 2.1 磨粒种类对冲蚀孔形的影响

图2所示为白刚玉及石榴石两种磨粒冲蚀加工结果的对比情况。图2中 $D_t$ 为冲蚀孔的最大直径, $L_{max}$ 为冲蚀孔的最大深度。工艺条件见表1中的试验A编号所示。如图2所示,白刚玉磨粒的冲蚀孔径为527  $\mu\text{m}$ ,石榴石磨粒的冲蚀孔径为570  $\mu\text{m}$ ,石榴石磨粒的冲蚀孔径比白刚玉的冲蚀孔径增加了8%。但是,白刚玉磨粒的冲蚀孔深比用石榴石的冲蚀孔深增加了190%,其原因与这两种磨粒之间的硬度差别密切相关。石榴石的主要

成分为含Al、Mg、Fe或Mn等的硅酸盐,密度约为3.5~4.3  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,维氏硬度通常在6.5~7.5 GPa之间;而白刚玉的主要成分为 $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,密度约为3.8  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,维氏硬度通常在23~24 GPa之间<sup>[17-18]</sup>。从热障涂层冲蚀破坏的机理中可知,热障涂层在硬质颗粒的冲击作用下,处于作用区域的陶瓷层会形成裂纹,裂纹的进一步扩展导致涂层剥落。冲击裂纹的生成及扩展与冲击粒子的质量及硬度关联较大,磨粒硬度越大则冲蚀速率越快。因而,在相同的加工时间内,白刚玉磨粒的材料去除速率明显大于石榴石磨粒。此外,石榴石的冲蚀孔底呈“W”形,具体成因在2.2节中讨论。

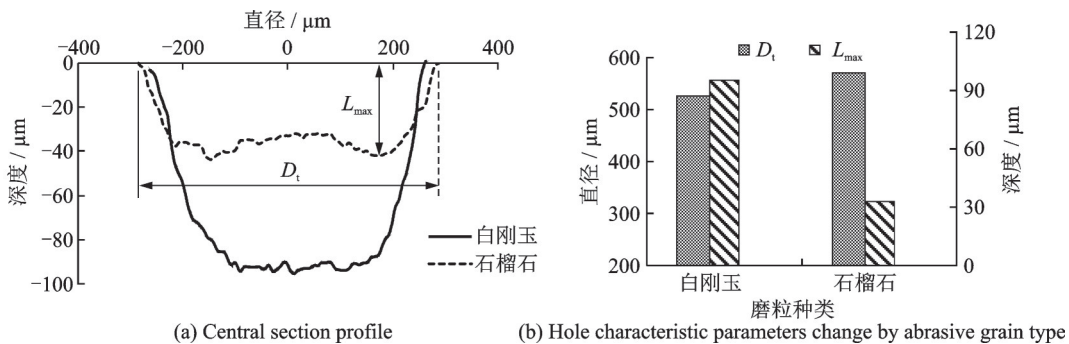


图2 磨粒种类对APS热障涂层冲蚀孔形特征影响

Fig.2 Effect of abrasive particle type on erosion characteristics of APS thermal barrier coatings

### 2.2 磨粒粒径对冲蚀孔形的影响

图3为磨粒粒径对冲蚀孔形的影响情况。工艺参数见表1中试验编号B所示。如图3所示,2500目的白刚玉加工下的孔形呈明显的“W”形,这一结果与文献[16]中的研究结果吻合,即在磨料颗粒的动能较低时,热障涂层的冲蚀孔呈“W”形<sup>[16]</sup>。从图3中可知,2500目的白刚玉冲蚀的孔深比1200目冲蚀的孔深小61%,这是由于磨粒粒径越小,所拥有的动能也就越小,所以2500目的白刚玉冲蚀的孔深比1200目的要小,这点也与Karakurt采用磨料水射流加工花岗岩的研究结果一致<sup>[19]</sup>,2.1节中石榴石磨粒的冲蚀孔底出现“W”形也是这个原因。但是,2500目白刚玉的冲蚀孔径

却比1200目的大出40%。Zhang等的研究结果可以很好地解释这一现象<sup>[20]</sup>。他们通过计算流体力学的方法模拟了磨料水射流场,研究了不同粒径、不同密度的磨粒对磨料水射流加工质量和效率的影响,如图4所示<sup>[20]</sup>,其中 $d_p$ 为磨粒粒径的大小。他们发现,粒径较大的粒子运动方向难以改变,碰撞速度也较高,对纵向深度上冲蚀影响较大。同时他们还考虑了径向位置的影响,粒径越小的磨粒越容易改变为沿平行于工件的方向喷射,从而越容易扩宽孔径。从他们的研究结论中可知,由于2500目的磨粒粒径小于1200目,在撞击热障涂层时所拥有的动能较小,在径向方向的改变量较1200目大,所以冲蚀的孔径比1200目的大40%。

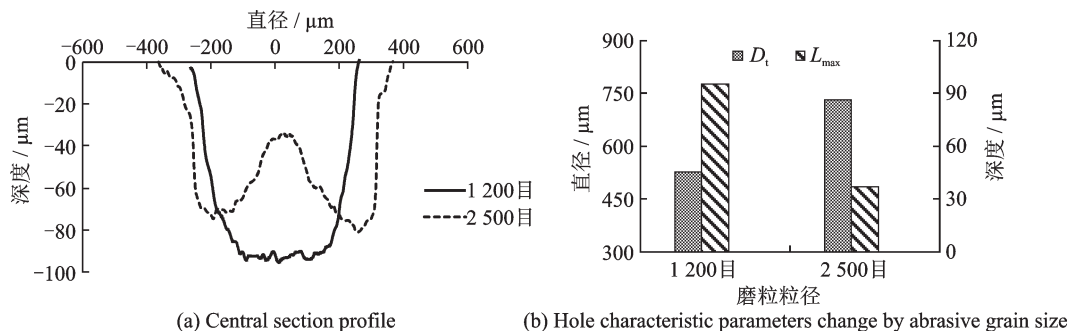


图3 磨粒粒径对APS热障涂层冲蚀孔形特征影响

Fig.3 Effect of abrasive particle size on erosion characteristics of APS thermal barrier coatings

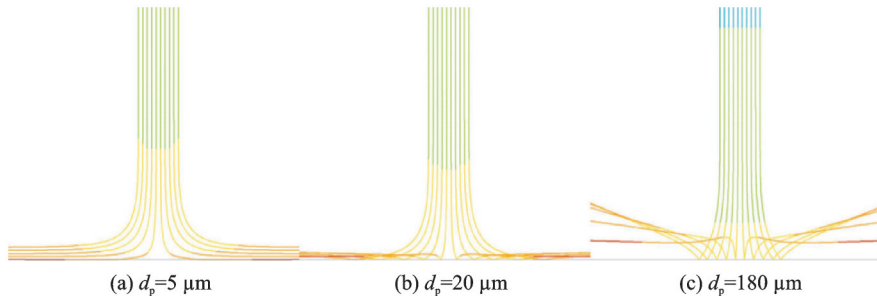


图 4 不同磨粒粒径在流场中的轨迹分布图

Fig.4 Trajectory map of different abrasive particle sizes in the flow field

### 2.3 磨料浓度对冲蚀孔形的影响

图 5 为冲蚀孔形特征随磨料浓度变化的截面及数据变化图。加工条件如表 1 中 C 试验编号所示。如图 5 所示,当磨料浓度(重量百分比,下同)从 0.5% 增加到 1.5% 时,  $D_t$  从 485  $\mu\text{m}$  增加到 595  $\mu\text{m}$ ,  $L_{\text{max}}$  从 75  $\mu\text{m}$  增加至 146  $\mu\text{m}$ 。图 6 是磨料浓度为 1.5% 时的孔形特征扫描电镜图片,从图 6 (a),(b)中可见,磨料水射流冲蚀热障涂层孔形周围未发现明显的微观裂纹。磨料浓度的增加使得在

相同压力以及时间的工艺条件下,更多的磨粒撞击目标表面,机械蚀除热障涂层的次数变多,对于冲蚀孔径以及孔深的作用均加强,这一点在众多的研究都可以证明<sup>[21-25]</sup>。Zu 等从理论上对磨料浓度和材料蚀除率进行了分析,他们认为在磨粒之间不产生干扰的情况下,磨料浓度越高,材料去除率也就越高,当磨料浓度达到某一值后,由于颗粒之间相互碰撞而丧失了一部分的动能,这部分丧失的动能转化为热能,最终使得材料去除率反而下降<sup>[26]</sup>。

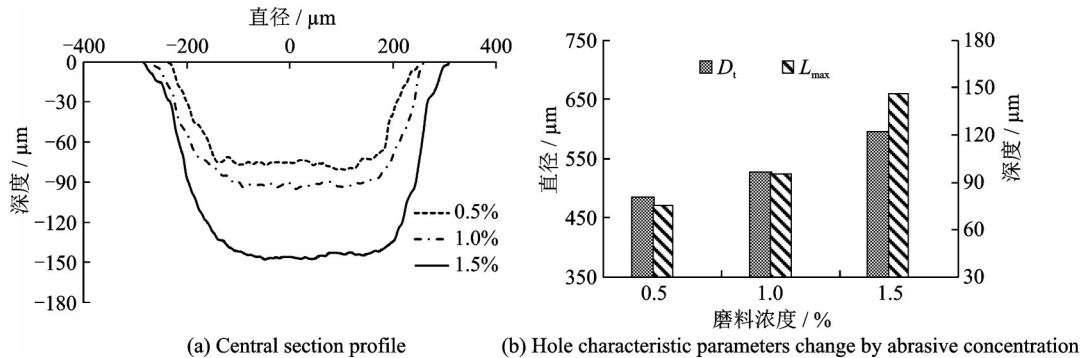


图 5 磨料浓度对 APS 热障涂层冲蚀孔型特征影响

Fig.5 Effect of abrasive concentration on erosion characteristics of APS thermal barrier coatings

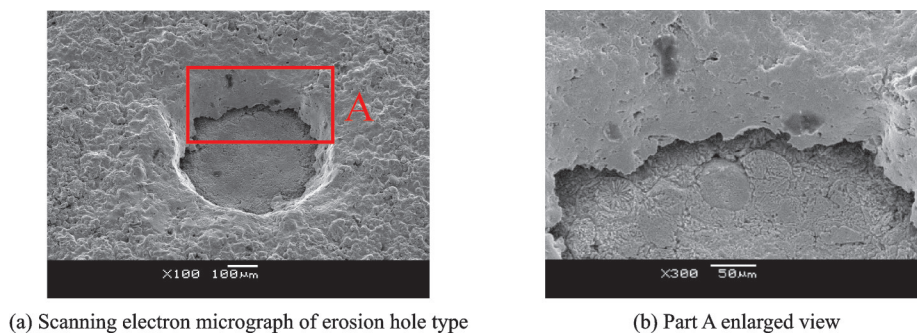


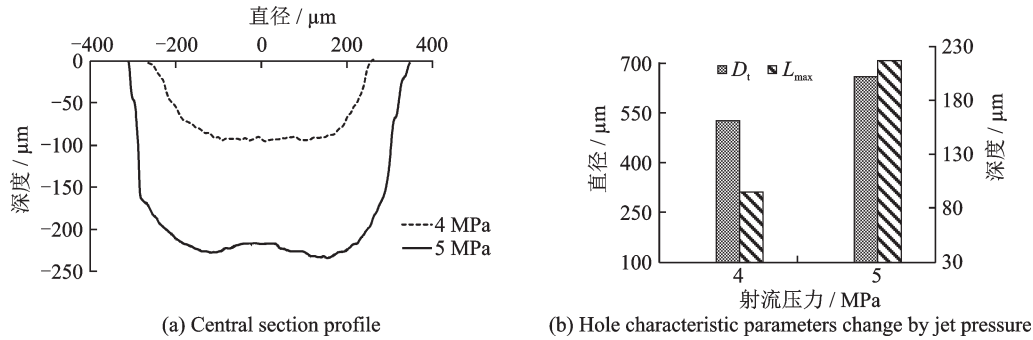
图 6 1.5% 磨料浓度下的 APS 热障涂层冲蚀孔形

Fig.6 APS thermal barrier coating erosion hole type at 1.5% abrasive concentration

### 2.4 射流压力对冲蚀孔形的影响

图 7 所示为射流压力对冲蚀孔形特征的影响情况。工艺条件如表 1 中的试验 D 编号所示。如图 7 所示,孔径和孔深均随射流压力增大而增大。相对于 4 MPa 射流压力的加工结果,5 MPa 压力

冲蚀孔的  $D_t$  和  $L_{\text{max}}$  分别增加了 25% 和 128%。从试验结果推测原因为射流压力增大时,磨粒的动能也增加,在单位时间内蚀除材料的量也就会增加,导致孔径和孔深均随着射流压力的增大而增大。

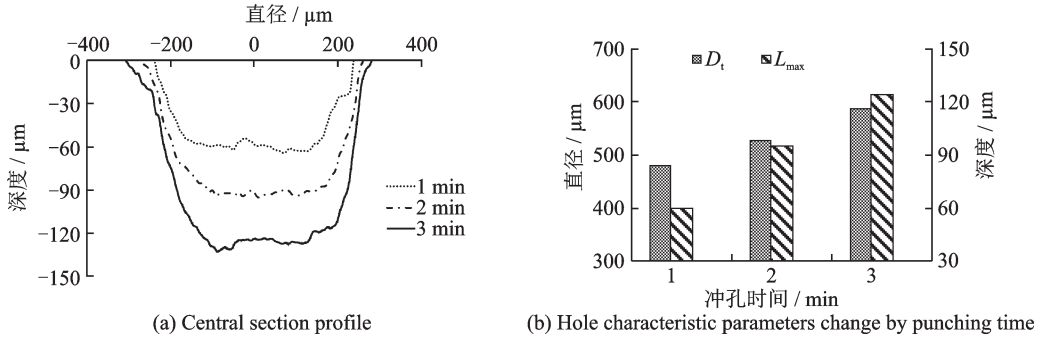


(a) Central section profile  
 (b) Hole characteristic parameters change by jet pressure  
 图7 射流压力对 APS 热障涂层冲蚀孔形特征影响  
 Fig.7 Influence of jet pressure on erosion characteristics of APS thermal barrier coatings

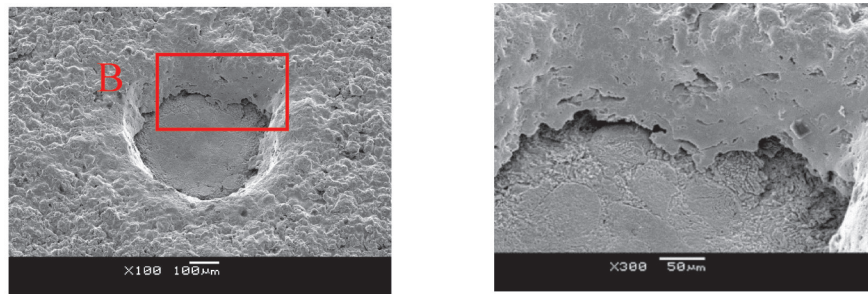
2.5 冲孔时间对冲蚀孔形的影响

图 8 给出不同冲孔时间下冲蚀孔的几何形状。工艺条件如表 1 中 E 试验编号所示。当冲孔时间为 1 min 时,  $D_t$  为 480  $\mu\text{m}$ 、 $L_{max}$  为 60  $\mu\text{m}$ 。随着冲孔时间从 1 min 增加到 3 min,  $D_t$  依次增加了

10% 和 12%;  $L_{max}$  依次增加了 58% 和 31%。深度方向的变化速率要高于孔径方向的变化速率。图 9 为冲孔时间为 2 min 时热障涂层冲蚀孔形扫描电镜图, 图 9(b) 中未发现明显的微裂纹, 孔形质量较好。



(a) Central section profile  
 (b) Hole characteristic parameters change by punching time  
 图8 冲孔时间对 APS 热障涂层冲蚀孔形特征影响  
 Fig.8 Effect of punching time on erosion characteristics of APS thermal barrier coatings



(a) Scanning electron micrograph of erosion hole type  
 (b) Part B enlarged view  
 图9 2 min 冲孔时间下的 APS 热障涂层冲蚀孔形  
 Fig.9 APS thermal barrier coating erosion hole type at 2 min punching time

2.6 靶距对冲蚀孔形的影响

图 10 显示了不同靶距下磨料水射流冲蚀热障涂层孔形的变化规律。工艺条件如表 1 中的 F 编号所示。结果表明, 当靶距从 5 mm 增加到 15 mm,  $D_t$  和  $L_{max}$  均随着靶距的增加而增加。

射流的流速随着距离的增大而成线性减小; 第 3 个区域为射流扩散区域, 此时的射流以一个相对较低的速度前进, 并扩散为液滴的形式, 如图 11 所示<sup>[27-28]</sup>。Nouraei 等人在研究磨料水射流冲蚀加工硼硅酸盐玻璃时也发现, 中心线上的粒子在离开喷嘴后的一小段距离中迅速加速, 约在 10 mm 处达到最大速度, 保持这一速度前进一定距离, 然后速度成线性减少<sup>[29]</sup>。这便能解释为何靶距从 5 mm 增大到 15 mm 时,  $D_t$  和  $L_{max}$  均增大的现象。

大量的研究表明, 当磨料水射流离开喷嘴射入空气中时, 流速可分为 3 个区域, 第 1 个区域为初始区域, 即射流的速度在一小段距离中迅速加速进而保持不变; 第 2 个区域为主要区域, 在这个区域里

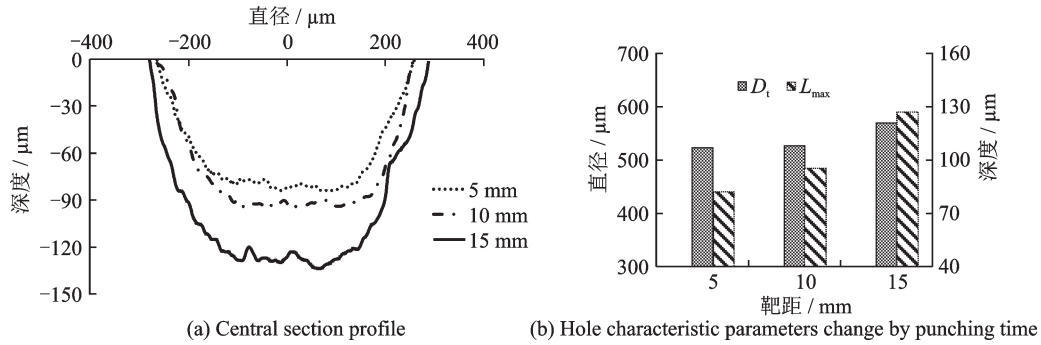


图 10 靶距对 APS 热障涂层冲蚀孔形特征影响

Fig.10 Influence of target distance on erosion characteristics of APS thermal barrier coating

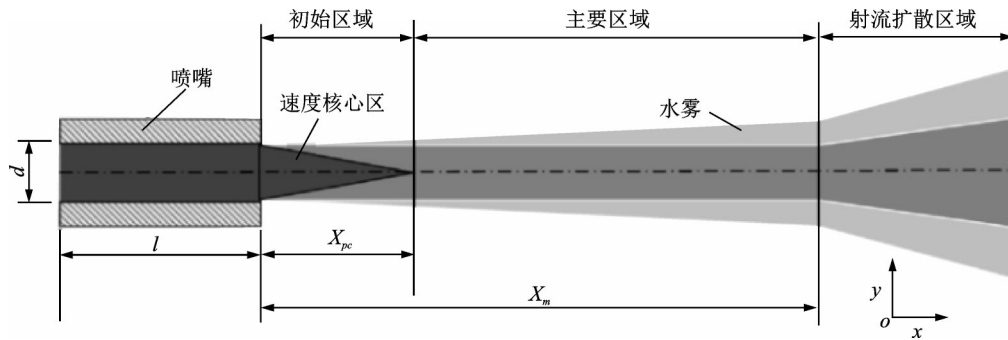


图 11 水射流在空气中的结构<sup>[29]</sup>

Fig.11 Structure of water jet in the air<sup>[29]</sup>

### 3 结 论

本文主要研究了磨料水射流去除 APS 热障涂层的加工试验。通过选择合适的加工参数进行单因素试验,研究表明,在相同的实验条件下,白刚玉对 APS 热障涂层的冲蚀效率相对石榴石较高,冲蚀孔径相差 8%,而孔深提高了 190%;冲蚀孔径及孔深随射流压力、磨料浓度、冲孔时间和靶距的增加均有不同程度的增大,尤其射流压力对孔型的影响最大。较硬的磨粒对热障涂层的冲蚀影响更大,而且磨粒的粒径越大,单个磨粒的冲击动能也就越大,热障涂层的冲蚀速率也就越快。

与 EB-PVD 制备的热障涂层冲蚀孔形不同的是,采用 APS 制备的热障涂层冲蚀的孔形在磨粒动能较低的情况下呈现“W”形,当射流压力、磨料浓度以及冲孔时间等逐渐增加的时候,孔形呈“U”形,且当磨粒动能增大时,存在热障涂层崩边的现象。从两者的制备方法上可以分析产生这种现象的原因,即 APS 热障涂层是典型的多孔、多裂纹的层状结构,热障涂层与金属基体的结合力较低,抗剥落寿命得不到保障,而 EB-PVD 热障涂层内部强度较高,且与金属基体的结合力较强。从材料去

除效率来看,APS 热障涂层的冲蚀速率也要比 EB-PVD 涂层快。

### 参考文献:

[1] 李钊,蔡文波.热障涂层技术在航空发动机涡轮叶片上的应用[J].航空发动机,2015,41(5): 67-71.  
LI Zhao, CAI Wenbo. Application of thermal barrier coating on aeroengine turbine blades[J]. Aeroengine, 2015,41(5): 67-71.

[2] 张志强,宋文兴,陆海鹰.热障涂层在航空发动机涡轮叶片上的应用研究[J].航空发动机,2011,37(2): 37-41.  
ZHANG Zhiqiang, SONG Wenxing, LU Haiying. Application of thermal barrier coating on aeroengine turbine blade[J]. Aeroengine,2011,37(2): 37-41.

[3] 朱晨,于建海,郭亚飞,等.航空发动机热障涂层存在的问题及其发展方向[J].表面技术,2016,45(1): 13-19.  
ZHU Chen, YU Jianhai, GUO Yafei, et al. Problems of aircraft engine thermal barrier coating and its developing direction[J]. Surface Technology, 2016,45(1): 13-19.

[4] 文生琼,何爱杰,王皓.热障涂层在航空发动机涡轮叶片上的应用[J].燃气涡轮试验与研究,2009,22(1):

- 59-62.  
WEN Shengqiong, HE Aijie, WANG Hao. Development of TBCs on turbine blade of aero-engine[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2009, 22(1): 59-62.
- [5] WELLMAN R G, NICHOLLS J R. A review of the erosion of thermal barrier coatings[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2007, 40: 293-305.
- [6] 杨丽, 周益春, 齐莎莎. 热障涂层的冲蚀破坏机理研究进展[J]. 力学进展, 2012, 42(6): 704-721.  
YANG Li, ZHOU Yichun, QI Shasha. Research progress in erosion mechanisms of thermal barrier coatings[J]. Advances in Mechanics, 2012, 42(6): 704-721.
- [7] MILLER R A. Thermal barrier coatings for aircraft engines: History and directions. [J] Journal of Thermal Spray Technology, 1997, 6(1): 35-42.
- [8] NITIN P P, Maurice G E H J. Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications[J]. Science's Compass, 2002, 296: 280-284.
- [9] 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.
- [10] 朱莉娅, 徐国强. 涡轮冷却技术对航空发动机性能的影响[J]. 推进技术, 2014, 35(6): 793-798.  
ZHU Liya, XU Guoqiang. Influence of turbine cooling technology on aero-engine performance[J]. Journal of Propulsion Technology, 2014, 35(6): 793-798.
- [11] 赵文毓, 王力军. 航空燃气轮机冷却方式的研究[C]//中国航空学会2007年学术年会. 深圳: 中国航空学会, 2007.  
ZHAO Wenyu, WANG Lijun. Research on cooling method of aviation gas turbine[C]//Proceedings of 2007 Annual Conference of China Aviation Society. Shenzhen: China Aviation Society, 2007.
- [12] ZHAO Kai, GAO Changshui, LIU Zhuang, et al. Prediction of surface roughness in abrasive assisted electrochemical jet machining of micro-channels[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2018, 13: 5460-5473.
- [13] KANG Can, LIU Haixia. Small-scale morphological features on a solid surface processed by high-pressure abrasive water jet[J]. Materials, 2013, 6: 3514-3529.
- [14] MENG Junqing, WEI Qingen, MA Yechao. Numerical simulation study on the flow field out of a submerged abrasive water jet nozzle[J]. Mathematical and Computational Applications, 2016, 21(2): 2.
- [15] 陈炳怡. 磨料水力喷射加工陶瓷热障涂层部件小孔的工艺试验[J]. 航空发动机, 1995(3): 36-38.  
CHEN Bingyi. Water jet drilling of holes in the part coated with ceramic thermal barrier coatings[J]. Aero-engine, 1995(3): 36-38.
- [16] 赵凯, 刘壮, 高长水, 等. 磨料水射流冲蚀热障涂层实验研究[J]. 电加工与模具, 2018(4): 60-64.  
ZHAO Kai, LIU Zhuang, GAO Changshui, et al. Experimental study on abrasive water jet drilling of ceramic thermal barrier coating[J]. Electromachining & Mould, 2018(4): 60-64.
- [17] YANG Jun, GAO Faming. Hardness and bonding of silicate garnets[J]. Journal of Chemical Crystallography, 2011, 41: 1285-1288.
- [18] JI Wenbin, ZOU Bin, LIU Yanan, et al. Frictional behavior and wear resistance performance of gradient cermet composite tool materials sliding against hard materials[J]. Ceramics International, 2017, 43: 7816-7826.
- [19] KARAKURT I, AYDIN G, AYDINER K. An experimental study on the depth of cut of granite in abrasive waterjet cutting[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2012, 27: 538-544.
- [20] ZHANG Xuecheng, ZHOU Cunlong, JIANG Li-anyun, et al. Influence of process parameters on abrasive particle motion characteristics in abrasive water jet descaling[J]. International Journal of Advance Manufacturing Technology, 2017, 90: 2741-2749.
- [21] IWAI Y, NAMBU K. Slurry wear properties of pump lining materials[J]. Wear, 1997, 210: 211-219.
- [22] WANG R J, WANG C Y, WEN W, et al. Experimental study on a micro-abrasive slurry jet for glass polishing[J]. International Journal of Advance Manufacturing Technology, 2017, 89: 451-462.
- [23] XIE Yongsong, JIANG Jiaren, KIDUS YOSEPH T, et al. Wear resistance of materials used for slurry transport[J]. Wear, 2015, 332-333: 1104-1110.
- [24] 王荣娟, 王成勇, 文武, 等. 磨料浆体射流抛光模具钢的试验研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2018, 38(3): 70-74.  
WANG Rongjuan, WANG Chengyong, WEN Wu,

- et al. Experimental study on micro-abrasive slurry jet for polishing mold steel[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2018,38(3): 70-74.
- [25] MOHAMMED A A, AHMED A K M, KARAM M E, et al. Effect of slurry concentration on erosion wear behavior of AISI 5117 steel and high-chromium white cast iron[J]. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2018, 70(4): 628-638.
- [26] ZU J B, BURSTEIN G T, HUTCHINGS J M. A comparative study of the slurry erosion and free-fall particle erosion of aluminum[J]. *Wear*, 1991, 149(1/2): 73-84.
- [27] LEU M C, MENG P, GESKIN E S, et al. Mathematical modeling and experimental verification of stationary waterjet cleaning process[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 1998, 120: 571-579.
- [28] LI H Z, WANG J, FAN J M. Analysis and modelling of particle velocities in micro-abrasive air jet[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2009, 49: 850-858.
- [29] NOURAEI H, WODOSLAWSKY A, PAPINI M, et al. Characteristics of abrasive slurry jet micro-machining: A comparison with abrasive air jet micro-machining[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, 213: 1711-1724.

(编辑:陈珺)