

# 超声功率对 APS 涂层超声振动辅助磨料水射流冲蚀效率的影响

王诚文,高长水,刘壮

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

**摘要:** 由于广泛应用在航空发动机上的热障涂层工作环境恶劣,使用一段时间后会产生产脱落现象,为提高磨料水射流去除热障涂层的加工效率,在原基础上引入超声振动并搭建超声振动辅助加工系统,并在不同超声功率下对 APS 热障涂层进行冲蚀加工试验。试验结果表明:施加超声振动后,热障涂层的材料去除率明显提升。

**关键词:** 热障涂层;磨料水射流加工;超声振动辅助;材料去除率

**中图分类号:** V261.94 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2023)04-0009-03

## Effect of Ultrasonic Power on Ultrasonic Vibration-assisted Abrasive Water Jet Erosion Efficiency of APS Coating

WANG Chengwen, GAO Changshui, LIU Zhuang

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

**Abstract:** Thermal barrier coating, widely used in aero-engines, tends to fall off after a period of use in harsh working conditions. To improve the abrasive water jet machining process efficiency of removing thermal barrier coating, ultrasonic vibration was introduced and an ultrasonic vibration aided machining system was built on the original basis, and the erosion machining experiment on APS thermal barrier coating was carried out under different ultrasonic power. The results show that the material removal rate of thermal barrier coating is obviously improved after the application of ultrasonic vibration.

**Keywords:** thermal barrier coating; abrasive water jet machining; ultrasonic assistance; material removal rate

## 0 引言

热障涂层(thermal barrier coatings, TBCs)具有降低涡轮叶片表面温度、提高叶片抗高温氧化腐蚀能力、延长叶片服役寿命、降低发动机油耗等优点,被广泛应用于航空发动机上<sup>[1]</sup>。然而发动机零部件上的热障涂层由于其服役环境恶劣,随着使用时间的增加,会产生剥落等现象而失去其应有的功能和作用。任何带有损坏的热障涂层部件的零部件必须在本地甚至全球范围内进行维修。为了降低维修成本,需要对涂层进行去除和再修复<sup>[2-5]</sup>。

水射流去除热障涂层由于其加工环境友好和加工应力小等优点成为各个国家的研究重点,然而水射流去除热障涂层也面临着加工效率低、加工能力不足的问题。为了提高水射流加工的效率,很多学者都提出了使用脉冲水射流的方式,因为它可以通过水锤效应获得更大的材料去除率<sup>[6]</sup>。超声振动是产生脉冲射流的一种有效方法,同时也常用于辅助其他加工方法来获得更好的加工效果。黄熙程等<sup>[7]</sup>通过单颗磨粒超声振动辅助划擦 C/SiC 复合材料三维有限元仿真发现,加入超声振动辅助后磨削力减小。LEHOČÁK D 等<sup>[8]</sup>进行了脉冲水射流加工铜 CW004A

和黄铜 CW614N 的试验研究,探究了其表面完整性以及脉冲射流冲击后的表层变化和底层强化程度,结果表明与连续射流相比,脉冲射流有较明显的优势。陈雪松等<sup>[9]</sup>通过数值计算的方法研究了在超声振动辅助磨料水射流时,磨粒在流场中的运动特性,探究了脉冲射流的加工机制。本文通过将超声振动施加于工件上,改变超声振动功率,进行超声振动辅助磨料水射流冲蚀热障涂层的试验研究,探究超声功率的变化对 APS 涂层材料去除率的影响。

## 1 试验方案

### 1.1 试验装置和试样材料

试验使用磨料水射流加工机床和自主研发的超声振动动力工作台,磨料水射流加工设备可提供 0~7 MPa 的系统压力,超声振动辅助装置可提供频率为 20 kHz、振幅为 20  $\mu\text{m}$  的超声振动,并且超声振动功率可调节。加工示意图如图 1 所示。

试验所用样件尺寸为 50 mm × 30 mm × 2 mm,且以 DZ125 镍基高温合金为金属基体,陶瓷层使用 7% 氧化钇稳定氧化锆,采用 APS 方法制备,厚度约为 50  $\mu\text{m}$ 。金属黏结层成分主要为 NiCrAlY,厚度约为 50  $\mu\text{m}$ 。加工结果通过 Zeiss Smartzoom 5 型超景深三维光学显微镜进行

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51675273)

第一作者简介:王诚文(1997—),男,硕士研究生,研究方向为特种加工,1305293177@qq.com。

检测。

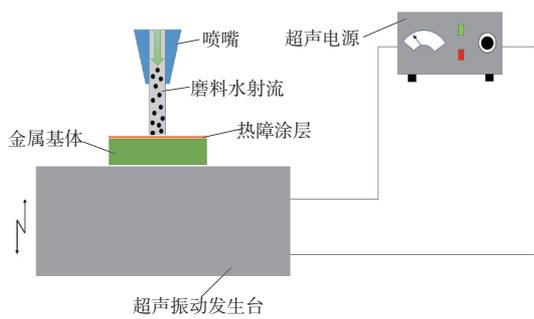


图1 超声振动辅助磨料水射流冲蚀热障涂层示意图

## 1.2 试验设计

通过调节超声电源不同功率级别改变超声功率进行对比试验,试验参数如表1所示。超声振动功率分别取0、0.125、0.140、0.180、0.240和0.310 kW,功率为0时即代表不施加超声振动。

表1 冲蚀加工试验参数

试验参数	参数值
喷嘴直径/mm	0.3
射流压力/MPa	6
冲蚀靶距/mm	10
磨料浓度/wt%	1.0
磨粒粒径大小/ $\mu\text{m}$	5
磨料种类	白刚玉
冲蚀时间/s	10
超声振动功率/kW	0,0.125,0.140,0.180,0.240,0.310

## 2 结果分析

超声振动功率对冲蚀材料去除率的影响规律如图2所示。从图中可以看出,在不同超声振动功率下,与不加超声振动相比,材料去除率都有明显的上升。不施加超声振

动时材料去除率为  $0.1919 \times 10^{-3} \text{ mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , 超声振动功率为 0.140 kW 时材料去除率为  $0.3071 \times 10^{-3} \text{ mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , 提高了 60.03%; 超声振动功率为 0.180 kW 时材料去除率为  $0.3608 \times 10^{-3} \text{ mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , 提高了 88.43%。这说明超声振动辅助可以提高磨料水射流加工的效率。

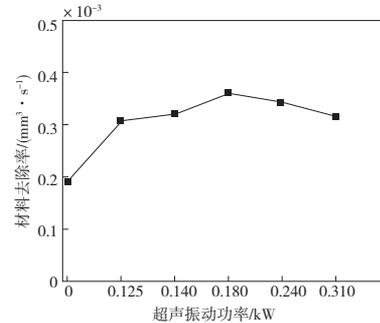


图2 超声振动功率对材料去除率的影响

不同功率  $P$  下的冲蚀形貌图如图3所示。从图中可以看出,不施加超声振动时,冲蚀凹坑呈现“W”形轮廓,这是因为磨料颗粒在初始冲击工件表面后,会被反弹并形成二次或多次冲击,后续的冲击角度会急剧减小,几乎沿着工件平面,如图4所示。大量研究表明,这部分黏性流的冲击速度是射流初始冲击速度的4~5倍<sup>[10]</sup>,在材料的去除过程起着很大的作用,尤其是当磨粒粒径较小时很容易沿着黏性流体流线以较小的冲击角冲击工件表面,因此更容易造成“W”形轮廓。而在施加超声振动以后,可以发现冲蚀凹坑轮廓依然为“W”型,说明即使在工件上施加了超声振动,这一去除过程中依然是黏性流侵蚀造成的塑性去除为主导,但是从图5所示的中心截面轮廓图中可以看出施加超声振动后“W”型轮廓得到缓解,底部相对于无超声振动时更为平整。这是因为在超声振动下,滞止区的静压呈现周期性的变化,使得大量小粒径的磨料颗粒形成动态冲击过程,影响黏性流的流体流线,增强了黏性流引起的二次冲击和多次冲击过程,使其能去除工件表面更多的材料。张旭等<sup>[11]</sup>在进行超声辅助磨料水射流冲蚀K9玻璃的试验时也发现,在使用较小粒径的碳化硅磨粒时,微孔截面呈现“W”形;当引入超声振动后,“W”形截面形貌得到改善,中心凸起部分的玻璃材料得到更多的去除。

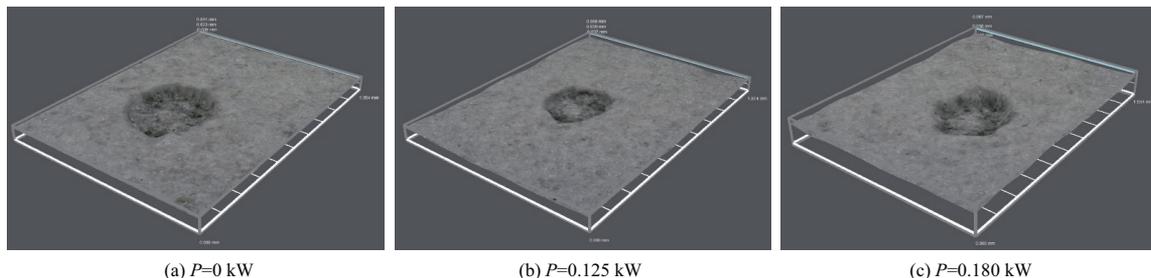


图3 不同超声功率下的冲蚀形貌图

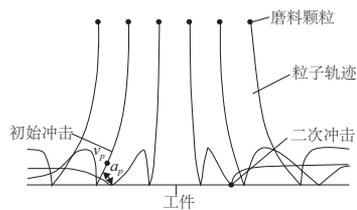


图4 磨料水射流冲击过程中的颗粒轨迹

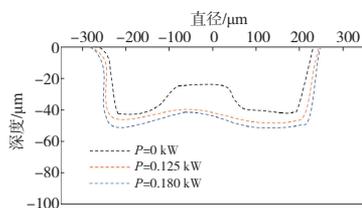


图5 不同超声功率下的中心截面轮廓图

此外,从图5所示的轮廓图中还可以看出施加超声振动后,冲蚀凹坑的深度有明显加深,因此可以推断超声振动促进了材料去除过程中的脆性去除。传统的磨料水射流在一定的射流压力和流量下,射流对于工件的冲击速度应该是维持在某个数值固定不变的,因此其产生的是连续的定常射流。随着射流冲击速度增大,在冲击区域的高压水和被冲击工件表面间会形成一块具有高静压的滞止区域。由于滞止区的存在,达到工件表面上的磨料颗粒的冲击速度会减弱,并且冲击角度会偏离,使得在垂直冲蚀时实际冲击角度总是小于 $90^\circ$ ,不利于材料的去除。在给工件施加超声振动后,当工件振动方向与连续射流的流动方向相反时,射流的相对冲击速度增加,而当两者运动方向相同时,射流的相对速度又会减小。随着工件的高频超声振动,射流的相对冲击速度也会以相同规律变化。因此低脉动的连续射流变为高脉动的非定常射流,射流的湍流动能增加,对工件表面产生高强度动压力作用。图6所示为施加超声振动前后磨料水射流冲蚀热障涂层的SEM图,可以看出加入超声振动后磨粒在工件表面的划擦痕迹更为明显,说明磨粒对工件的垂直冲蚀作用更强,并且QI H等<sup>[12]</sup>研究发现,在工件上施加超声振动后,滞止区的静压有明显下降,并且磨料粒子的冲击角度也较无超声振动时要大,因此削弱了高压滞止区对射流冲击作用的影响,提高材料去除率。

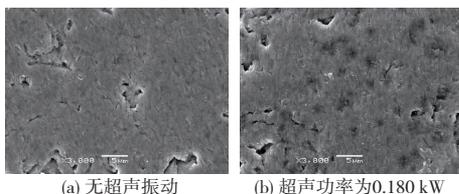


图6 磨料水射流冲蚀热障涂层扫描电镜图

从图2所示的规律图还可以看出,施加超声振动后,材料去除率随着超声功率的增大先增加后减小,说明存在一个最佳的功率匹配值,在该功率下超声振动对于磨料水射流加工提供的作用最大,在本实验中为 $0.180\text{ kW}$ 左右。这是因为当超声振动功率较小时,对射流的速度扰动效果

较弱,随着功率的增大,射流的脉动效果增强,射流中磨料颗粒对于工件的冲蚀起到积极的作用,材料去除率会增加。但如果超声振动功率过大,会干扰水射流中磨粒的运动方向,使得磨粒的冲击角度变小,造成磨粒的冲蚀动能降低,材料去除率反而会下降。

### 3 结语

本文进行了不同的超声振动功率下磨料水射流冲蚀热障涂层的试验研究,结果表明引入超声振动后的材料去除率有明显提升,且随着超声振动功率的增大,材料去除率先增加后减小。具体原因如下:

1) 超声振动会影响工件表面黏性流的流体流线,增强黏性流引起的二次和多次冲击过程,使其能去除工件表面更多的材料;

2) 超声振动可以将定常的连续射流变为高速度脉动的非定常射流,使得工件表面滞止层的静压降低,减弱其对射流冲击的阻碍作用,促进材料的脆性断裂以提高材料去除率。

#### 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] YANG X,ZHANG J,LU Z,et al. Removal and repair techniques for thermal barrier coatings: a review [J]. Transactions of the IMF,2020,98(3):121-128.
- [3] 李晗晔,袁福河,孙慧艳,等. 航空发动机涂层去除技术的研究现状[J]. 材料保护,2015,48(12):37-41.
- [4] HERNANDEZ J C, CHI W Y, YONG W F, et al. Investigation on high power laser removal of thermal barrier coating (TBC) and bond layer (MCrAlY) from inconel 718 alloy [J]. Journ of Peening Science and Technology, 2019(1):201-219.
- [5] BERGS T,BORRMANN J P,SCHÜLER M,et al. Pure waterjet controlled depth machining for stripping ceramic thermal barrier coatings on turbine blades[J]. Procedia CIRP,2019,85:261-265.
- [6] FOLDYNA J,SITEK L,SCUCKA J,et al. Effects of pulsating water jet impact on aluminium surface [J]. Journal of Materials Processing Technology,2009,209(20):6174-6180.
- [7] 黄熙程,苏宏华,何静远,等. 单颗磨粒超声振动辅助划擦C/SiC复合材料三维有限元仿真[J]. 机械制造与自动化,2022,51(1):98-100,112.
- [8] LEHOČKÁ D,KLICHOVÁ D,FOLDYNA J,et al. Comparison of the influence of acoustically enhanced pulsating water jet on selected surface integrity characteristics of CW004A copper and CW614N brass [J]. Measurement,2017,110:230-238.
- [9] 陈雪松,侯荣国,吕哲,等. 超声辅助磨料水射流加工机制及去除模型研究[J]. 机床与液压,2020,48(17):79-82,87.
- [10] KOWSARI K,AMINI M H,PAPINI M,et al. The effects of fluid vapor pressure and viscosity on the shapes of abrasive slurry-jet micro-machined holes and channels [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,2016,110:80-91.
- [11] 张旭,秦世康,齐欢,等. 超声辅助微细磨料水射流冲蚀K9玻璃的实验研究[J]. 表面技术,2021,50(11):346-353.
- [12] QI H,WEN D H,LU C D,et al. Numerical and experimental study on ultrasonic vibration - assisted micro - channelling of glasses using an abrasive slurry jet [J]. International Journal of Mechanical Sciences,2016,110:94-107.

收稿日期:2022-01-17