航空科学技术
Aeronautical Science & Technology
Feb. 15 2018 Vol. 29 No.02 09-14

飞秒激光带热障涂层叶片气膜孔加工技术研究进展

张强[1]，贺斌[2,*]，田东坡[2]，李朋[2]，焦悦[2]

1. 北京航空材料研究院 先进高温结构材料重点实验室，北京 100095

2. 中国科学院 西安光学精密机械研究所，陕西 西安 710119

摘　要：航空发动机涡轮叶片采用热障涂层技术和气膜孔冷却技术可以大大提升叶片的耐温能力，因此可以显著提高发动机的工作温度使其具有更高的推重比和效率。而在带有热障涂层叶片上实现高品质和高精度冷却气膜孔的加工是发动机制造技术的难点。由于飞秒激光加工具有材料无选择性、无热影响区及加工精度高等特点，因此飞秒激光成为加工带热障涂层叶片气膜孔的研究热点。阐述了飞秒激光与叶片涂层和基体材料的作用原理和飞秒激光微孔加工的技术特点，介绍了飞秒激光带热障涂层叶片气膜孔加工技术的研究过程和发展现状，展望了该技术在高精度带热障涂层叶片气膜孔制造中的应用前景。

关键词：飞秒激光；热障涂层；叶片；气膜孔

中图分类号：TG665　　**文献标识码：**A　　DOI：10.19452/j.issn1007-5453.2018.02.009

涡轮叶片作为航空发动机的核心部件，其设计制造水平和工作性能影响着航空发动机的使用寿命。随着航空技术的快速发展，高推重比和低油耗成为航空发动机的发展趋势，这就要求发动机涡轮叶片要在更加复杂环境和极端温度下工作。涡轮叶片作为发动机的核心部件必须同时具有较高的抗热冲击、耐高温腐蚀、抗热交变和复杂应力能力。

目前，涡轮叶片主要选择镍基单晶高温合金材料，同时在叶片结构设计上采用气膜孔冷却的方式来提高叶片的耐高温性。然而单纯地依靠发展新型耐高温合金材料、研制先进的冷却技术和提升叶片结构设计等方面在较短时间内已经难以满足叶片安全可靠工作所需的高温抗蠕变强度和高温抗腐蚀性等要求[1,2]。在涡轮叶片上同时采用热障涂层技术和先进冷却技术是解决这一问题的重要方法，带热障涂层的叶片及其工作原理如图 1 所示，即利用陶瓷材料优越的耐高温、耐腐蚀、耐磨损和隔热等性能使其以涂层形式和叶片基体复合，以提高叶片抵抗高温腐蚀的能力，使涡轮叶片同时具有金属的高韧性、高塑性和陶瓷的耐高温、耐腐蚀等双重优点[3]。而在带有涂层材料的叶片上加工圆形或异形气膜孔，将相对低温气体（约 900K）通过分布于叶片表面的气膜冷却孔喷射出来在叶片表面形成冷却气膜来实现高温高压气体的隔离。

1 带陶瓷涂层叶片气膜孔加工方法

对于带热障涂层涡轮叶片气膜孔加工的实现进行了广泛的研究，首先提出先实现叶片气膜孔的加工，再实现叶片涂层的方式，然而在喷涂涂层的过程中会出现气膜孔尺寸缩小、甚至堵孔等问题，因此，提出采用先涂层后打孔的方式实现带陶瓷涂层涡轮叶片气膜孔的加工。目前，叶片气膜孔的加工主要采取电加工工艺方式，如电火花加工、电液束流加工技术等，考虑到热障涂层具有不导电的特性，因而电加工工艺方式无法实现陶瓷涂层的加工。针对该问题，美国通用电气（GE）公司等开发了激光－电火花复合加工工艺，首先利用激光实现叶片上热障涂层的加工，然后在合金材料上采取电火花加工方式实现基体材料的去除。英国伯明翰大学研究了超声－电火花组合加工工艺，利用超声工具穿透陶瓷涂层，然后利用电火花加工或超声辅助电火花加工基体合金

收稿日期：2017-11-06　　退修日期：2017-12-06；　　录用日期：2018-01-04

* 通信作者 .Tel.：13669249849　　E-mail：laser_hebin@opt.cn

引用格式：Zhang Qiang, He Bin, Tian Dongpo, et al. Development of gas film holes machining on turbine blades with thermal barrier coating by femtosecond laser [J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29 (02): 09-14. 张强，贺斌，田东坡，等．飞秒激光带热障涂层叶片气膜孔加工技术研究进展 [J]. 航空科学技术，2018, 29 (02): 09-14.

材料实现气膜孔的加工。在国内，中国航空工业集团有限公司航空制造技术研究院开发了电液束流－电化学复合加工系统，利用电化学工艺实现涂层绝缘材料的加工，再利用电液束流实现叶片基体材料的加工。以上加工方式工艺过程复杂，且都属于二次加工，无法实现单步单机打孔，孔的一致性和精密性受到一定的限制[4,5]。一段式完成热障涂层和高温合金材料打孔是实现热障涂层涡轮叶片气膜孔加工的关键工艺。

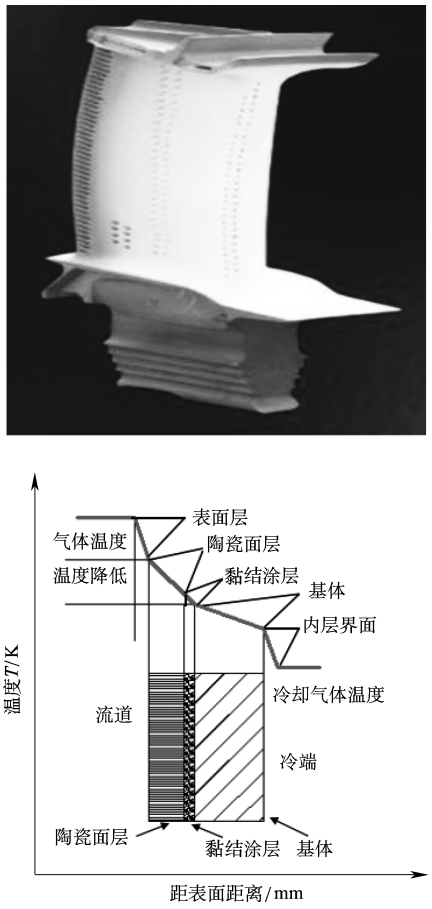


图 1 带热障涂层涡轮叶片及其工作原理

Fig.1 Turbine blade with thermal barrier coating and the working principle

激光加工在气膜孔加工方面具有很大潜力，早期激光微孔加工多采用长脉冲激光，但存在热影响区大、加工精度差、加工质量差等缺陷。而相对于长脉冲激光，超短脉冲激光在涡轮叶片气膜孔加工上具有显著优势。飞秒激光以其极短的脉冲时间和极高的峰值功率可以实现材料的冷加工，具有材料无选择性、阈值效应明显、极小热影响区、极小重铸层等特点[6]。能够解决在加工过程中高温合金和热障涂层材料差异性导致的层间撕裂、表面脱落和孔壁裂纹等问题，而且飞秒激光加工精度高，单工艺即可实现涂层、连接层和合金基体的整个孔加工，是目前解决带热障涂层叶片气膜孔加工的重要技术手段[7,8]。

2 飞秒激光带热障涂层叶片气膜孔的加工机理及特点

利用飞秒激光加工带热障涂层叶片气膜孔时需要对表面陶瓷涂层、连接层和高温合金基体进行一体式加工，如图 2 所示，既包括飞秒激光与金属材料的作用，又包含飞秒激光与非金属材料的作用。

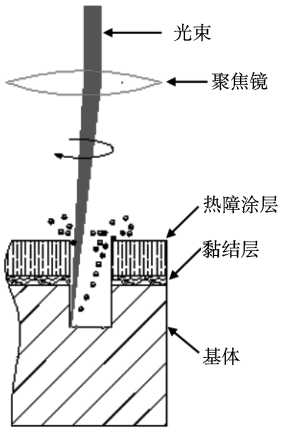


图 2 飞秒激光加工带热障涂层叶片气膜孔

Fig.2 Machining of gas film holes on turbine blades with thermal barrier coating by femtosecond laser

飞秒激光与金属材料相互作用时，由于材料本身存在大量的自由电子，可以吸收激光光子的能量而被瞬间加热，并且电子－电子形成碰撞，在几飞秒到几十飞秒内可以实现费密（Fermi）分布的重建。但自由电子质量远小于离子质量，每次电子－离子的碰撞只能传递很少的能量，脉冲作用时间内晶格温度是几乎不变，因此可以实现金属材料的“冷加工”。而飞秒激光与非金属材料相互作用时，非金属材料本身自由电子很少，但在强电场光致电离或电子碰撞电离导致雪崩电离的作用下会产生大量的自由电子，从而使非金属材料表面薄层转变为具有金属特性的吸收等离子体，此后激光－等离子体相互作用则可以实现材料的去除[9]。因此，飞秒激光具有加工材料范围广的优势，对于带热障涂层叶片气膜孔的加工具有一定的优势。同时飞秒激光进行叶片气膜孔加工时，由于飞秒激光的特性可以实现无重铸层、无微裂纹和无热影响区的“三无”高精度微孔加工，具体特点[10]见表 1。

通过表 1 可以发现飞秒激光对于带热障涂层材料叶片气膜孔的加工具有一定的优势，可以实现高精度、高品质气膜孔的加工，并且目前飞秒激光旋切制孔技术已成功实现带

热障涂层叶片气膜孔的加工，随着这项技术的不断发展和提升，飞秒激光将成为带热障涂层叶片气膜孔加工的关键技术之一。

表 1 飞秒激光带陶瓷涂层叶片气膜孔加工特点

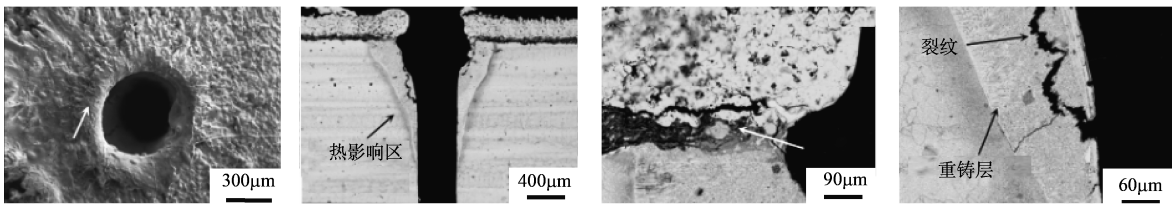
Table 1 Characteristics of gas film holes processing on turbine blades with thermal barrier coating by femtosecond laser

特 点	说 明
加工材料范围广	对可加工材料无选择性
“三无”加工	在极短脉冲时间内以极高峰值功率对材料进行作用，热量来不及扩散材料就已去除，不会产生重铸层、微裂纹和热影响区
孔精度高质量好	通过光楔控制光束运动可将孔径误差控制在 0.01mm 以内且孔径一致性保持在 0.01mm 以内，孔壁平直且内壁粗糙度高，孔口无毛刺且能实现任何锥度孔的加工

3 飞秒激光带热障涂层叶片气膜孔加工技术的发展

早期关于激光对带热障涂层叶片气膜孔的加工多选用长脉冲激光，K. T. Voisey[11] 等采用毫秒红外激光对热障涂层试样进行制孔研究，如图 3 所示。由于毫秒激光实现材料加工依靠热累积，低能量单脉冲激光无法融化陶瓷材料，进而将热量传递到周围区域引起微裂纹和重铸层；而将单脉冲能量增加时，会在孔壁形成重铸层，而且孔壁会粘附熔融的陶瓷导致孔形不规则。

张瑞峰[12] 等采用皮秒激光在带热障涂层镍基单晶合金上进行了气膜孔的加工，如图 4 所示。加工的小孔周围无飞溅物，孔壁无重铸层和热影响区等热致缺陷，孔壁表面相对比较光滑，但皮秒激光加工微孔时产生的等离子体冲击力较强会引起涂层的开裂，如图 4 (b) 所示。



(a) 正面 (b) 剖面图 (c) 界面处裂纹 (d) 重铸层与微裂纹

图 3 毫秒激光制孔形貌

Fig.3 Morphology of millisecond laser drilling

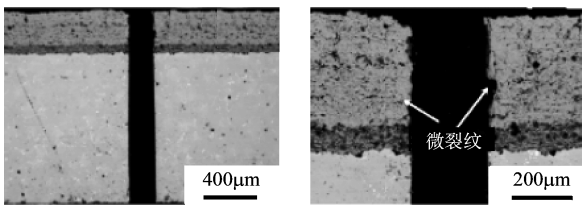


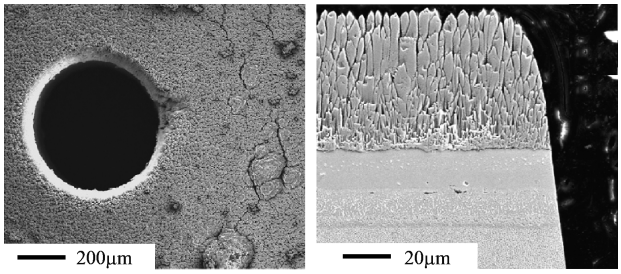
图 4 皮秒激光制孔形貌

Fig.4 Morphology of picosecond laser drilling

通过以上的研究可以发现毫秒和皮秒激光在进行带热障涂层气膜孔制孔时产生一定的缺陷，无法实现高精度、高品质气膜孔的加工，而飞秒激光以其超短脉冲时间和极高峰值功率使其在材料加工方面具有更大的优势，近年来，国内外对飞秒激光用于带热障涂层叶片气膜孔加工进行了大量研究。

D. K. Das [13] 等通过对热障涂层和基体损伤阈值的计算，可得出热障涂层的损伤阈值约为 1.52J/cm^2，而单晶高温合金的损伤阈值约为 0.33J/cm^2。以上结果表明在对热障涂层气膜孔加工过程中对于涂层和叶片基体进行加工时所需要的激光能量是不同的，因此在进行超快激光气膜孔加工时应该根据材料的不同选择不同的激光能量，既保证材料的去除，又保证不出现热累积产生热影响区等缺陷。

D. K. Das[14] 等对涂层表面的粗糙度对损伤阈值的影响规律进行了研究，发现涂层表面的粗糙度对损伤阈值没有明显的影响；并且通过研究发现随着激光脉冲数量的增加，在成分为 6%~8% (wt%) Y_2O_3 部分稳定的 ZrO_2 (YSZ 材料：氧化钇稳定的氧化锆材料) 为主的热障涂层上的损伤阈值越来越低，当脉冲数量增加到一定程度时涂层的最小损伤阈值可以降低到 0.5J/cm^2，基于这种现象提出多脉冲激光与 YSZ 材料热障涂层作用时的“孕育效应”。并且利用波长为 780nm、脉宽 150fs、重复频率 1kHz 的飞秒激光配合螺旋移动的带热障涂层试样进行微孔的加工，可以实现最大深度达 1.5mm 的微孔加工，但加工的孔都有一定的锥度，孔壁的粗糙度达到 *Ra*1.8。通过对孔表面和孔壁进行观察分析可知飞秒激光在带热障涂层试样上进行微孔加工时不会出现重铸层、微裂纹等缺陷，但热障涂层表面会有少量的烧蚀，如图 5 所示。

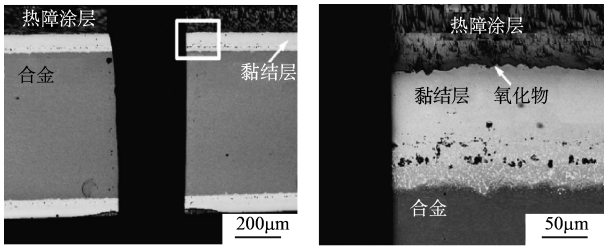


(a) 表面烧蚀 (b) 横截面

图 5 飞秒激光加工微孔表面烧蚀和内壁形貌

Fig.5 Morphology of the holes machining by femtosecond laser

D. K. Das [13] 等还利用飞秒激光对带热障涂层试样进行了微孔加工，观察孔加工后的组织形貌变化和裂纹产生情况，发现通过优化工艺参数可得到如图 6 所示的加工结果，在整个陶瓷层连接区和基体范围内没有发现传统激光加工时出现的开裂、重铸层、热影响区等缺陷，涂层和连接区域界面上有一层能抗腐蚀的 Al_2O_3 氧化膜（TGO），界面处没有出现由于热传导引起的开裂，涂层表面也没有发生剥落。

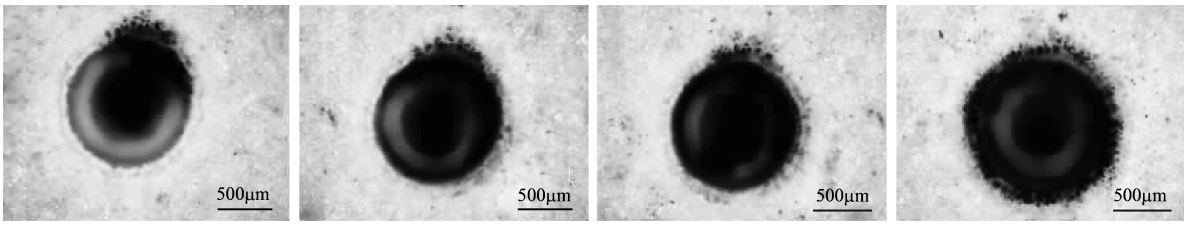


(a) 横截面形貌 (b) 界面处放大形貌

图 6 飞秒激光加工 EB–PVD 热障涂层微孔的微观图

Fig.6 Morphology of holes processed by femtosecond laser on EB–PVD thermal barrier coatings

针对飞秒激光加工热障涂层试样微孔孔口边缘发黑的现象，张学谦等[15] 使用脉宽 50fs、重频 1kHz 的飞秒激光利用旋切扫描方式实现带热障涂层高温合金气膜孔的加工，可以获得无裂纹、无附着残渣及无重铸层的锥孔，但在孔的入口处发现有黑色附着物，且随着加工次数的增加，黑色附着物逐步覆盖整个入口边缘，且黑色附着物会对涂层造成一定的热效应，如图 7 所示。

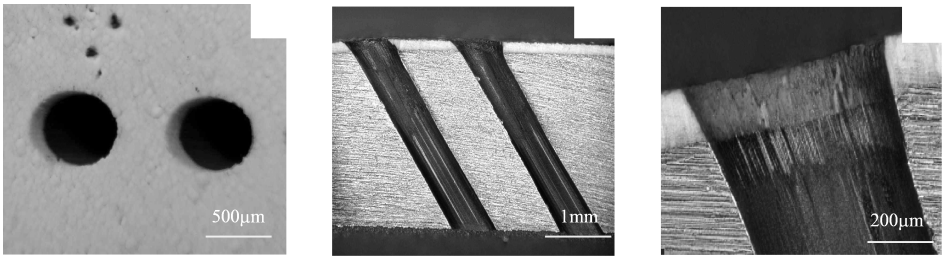


(a) 加工3次 (b) 加工5次 (c) 加工7次 (d) 加工9次

图 7 飞秒制孔涂层表面附作物

Fig.7 Surface residue on thermal barrier coating after femtosecond laser processing

对于以上保证无缺陷情况下的孔径锥度、涂层表面黑色附作物及热影响区问题，西安光学精密机械研究所贺斌等进行了一系列的研究，研究发现扫描方式、激光能量、排渣方式等工艺参数对飞秒激光加工热障涂层试样微孔的缺陷产生及孔径质量具有很大的影响。其自主研发的五轴激光微孔加工设备搭配脉宽 290fs、重频 200kHz 的红外飞秒激光器进行飞秒激光旋切带热障涂层叶片气膜孔加工，将光束进行螺旋扫描获得无涂层剥落、无裂纹、表面无热影响区、无重铸层的孔加工，在此基础上根据金属材料和非金属材料损伤阈值的差异性，对陶瓷涂层连接层及基体金属进行激光能量匹配实现涂层表面无发黑现象和无附着物，通过优化旋切扫描路径和激光能量实现高精度微孔的加工，如图 8 所示。



(a) 正面形貌 (b) 横截面形貌 (c) 涂层及基体界面形貌

图 8 飞秒激光在带热障涂层加工微孔结果

Fig.8 Morphology of femtosecond laser processed holes in thermal barrier coatings

目前，利用飞秒激光可以在热障涂层试样上完成无附着残渣、无裂纹、无重铸层、无热影响区且孔形合格的微孔加工，但飞秒激光在整个材料去除过程中的作用机理和效应都还处于研究之中，另外激光能量、光束扫描参数及排渣方式等工艺参数对加工效果都有很大的影响，其影响规律目前也处于研究之中，而且带热障涂层试样在经过飞秒激光微孔加工后在高温及交变载荷的应用过程中其抗高温腐蚀性能及力学性能还有待进一步的分析和研究。

4 结束语

带热障涂层涡轮叶片上分布的大量气膜冷却孔的加工可以实现高推重比、高性能发动机的应用，因此对带热障涂层叶片气膜孔的加工提出了更高的要求。飞秒激光微孔加工技术以其高精度、高质量、冷加工等优势实现发动机高品质微孔加工，随着飞秒激光制孔技术在各个方面的不断完善和提升，目前可以实现无重铸层、微裂纹和热影响区的高精度带热障涂层叶片气膜孔的加工，且可以确保热障涂层加工后无发黑和脱落，因此飞秒激光微孔加工技术将成为实现带热障涂层叶片气膜孔加工的重要方式。 AST

参考文献

[1] 隋育松，徐可君，江龙平，等 . 陶瓷涂层在航空发动机涡轮叶片表面处理中的应用 [J]. 材料保护，2001，34（3）：38–40.
Sui Yusong，Xu Kejun，Jiang Longping，et al. Application of ceramic coating on surface treatment of aeroengine turbine blade[J]. Materials Protection，2001，34（3）：38–40.（in Chinese）

[2] 田贺，何利民，牟仁德 . 航空发动机热障涂层技术研究进展 [J]. 科技创新与应用，2013（30）：38–39.
Tian He，He Limin，Mu Rende. Research progress of aero-engine thermal barrier coatings[J]. Innovation and Application of Science and Technology，2013（30）：38–39.（in Chinese）

[3] 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（01）：59–62.
Wen Shengqong，He Aijie，WANG Hao. Development of TBCs on turbine blade of aero-engine[J]. Gas Turbine Experiment and Research，2009（01）：59–62.（in Chinese）

[4] Jones M G，Hayashi S R，Wei B. Method for drilling hollow components：U.S.，US6362446 [P]. 2002.

[5] 张学谦，邢松龄，刘磊，等 . 带热障涂层的高温合金飞秒激光旋切打孔 [J]. 中国激光，2017，44（01）：123–128.
Zhang Xueqian，Xing Songling，Liu Lei，et al. Trepanning of supper-alloy with thermal barrier coating using femtosecond laser[J]. Chinese Journal of Lasers，2017，44（01）：123–128.（in Chinese）

[6] 夏博，姜澜，王素梅，等 . 飞秒激光微孔加工 [J]. 中国激光，2013，40（02）：6–17.
Xia Bo，Jiang Lan，Wang Sumei，et al. Femtosecond laser drilling of micro-holes[J]. Chinese Journal of Lasers，2013，40（02）：6–17.（in Chinese）

[7] Chichkov B N，Momma C，Nolte S，et al. Femtosecond，picosecond and nanosecond laser ablation of solids[J]. Applied Physics A：Materials Science & Processing，1996，63（2）：109–115.

[8] Kaiser A，Rethfeld B，Vicanek M，et al. Microscopic processes in dielectrics under irradiation by subpicosecond laser pulses[J]. Physical Review B，2000，61（17）：11437–11450.

[9] 夏博 . 飞秒激光高质量高深径比微孔加工机理及其在线观测 [D]. 北京：北京理工大学，2016.
Xia Bo. Mechanism and online observation of high-aspect-ratio，high-quality micro-holes drilling with femtosecond laser[D]. Beijing：Beijing Institute of Technology，2016.（in Chinese）

[10] 唐一波 . 飞秒激光与二元合金相互作用机理及无相变烧蚀机制研究 [D]. 衡阳：南华大学，2014.
Tang Yibo. The no phase change abating mechanism of binary alloy target when interaction with the femtosecond laser[D]. Hengyang：University of South China，2014.（in Chinese）

[11] Voisey K T，Clyne T W. Laser drilling of cooling holes through plasma sprayed thermal barrier coatings[J]. Surface & Coatings Technology，2004，176（3）：296–306.

[12] 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（05）：1193–1198.
Sun Ruifeng，Zhang Xiaobing，Cao Wenbin，et al. Laser drilling of Ni-base single-crystal superalloy through thermal barrier coatings[J]. Rate Metal Materials and Engineering，2014，43（05）：1193–1198.（in Chinese）

[13] Feng Q. Picard Y N，Medonald J P，et al. Fem to second lacer mochining of single-crystal superalloys through thermal barrier Coatings[J]. Materials Science & Engineering A，2006，430（1-2）.

[14] Das D K, Pollock T M. Femtosecond laser machining of cooling holes in thermal barrier coated CMSX4 superalloy[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2009, 209 (15): 5661-5668.

[15] 张学谦,邢松龄,刘磊,等 . 带热障涂层的高温合金飞秒激光旋切打孔 [J]. 中国激光, 2017, 44 (01): 123-128.
Zhang Xueqian, Xing Songling, Liu Lei, et al. Trepanning of supper-alloy with thermal barrier coating using femtosecond laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44 (01) : 123-128. (in Chinese)

（责任编辑　朱赫）

作者简介

张强（1970— ）男,高级工程师。主要研究方向:铸造高温合金。

贺斌（1985— ）男,博士,助理研究员。主要研究方向:超快激光加工、增材制造。

Tel: 13669249849　E-mail: laser_hebin@opt.cn

Development of Gas Film Holes Machining on Turbine Blades with Thermal Barrier Coating by Femtosecond Laser

Zhang Qiang[1], He Bin[2,*], Tian Dongpo[2], Li Peng[2], Jiao Yue[2]

1. Advanced High Temperature Structural Materials Key Laboratory, Beijing Aeronautical Materials Research Institute, Beijing 100095, China

2. Chinese Academy of Sciences, Xi'an Institute of Optics and Fine Mechanics, Xi'an 710119, China

Abstract: The gas film holes machining on turbine blades with thermal barrier coating can greatly increase the operating temperature of the engine, which has higher thrust weight ratio and efficiency. However, the gas film holes which have the characteristics of high quality and high precision machining on turbine blades with thermal barrier coating is the difficult problem in the field of aviation manufacturing. Femtosecond laser micro-hole machining has the characteristics of no selective material, no heat affected zone and high machining precision. So it is the research hotspots in the field of gas film holes processing on turbine blades with thermal barrier coating. In this paper, the principle of femtosecond laser micromachining material was described. And the technical characteristics of femtosecond laser micro-hole machining were introduced. Then, the research process and development status of femtosecond laser machining of gas film holes on thermal barrier coatings were introduced. Finally, the prospect of the application of this technology in the manufacturing of high precision gas film holes machining on turbine blades with thermal barrier coating was prospected.

Key Words: femtosecond laser; thermal barrier coating; blade; gas film hole

Received: 2017-11-06; **Revised:** 2017-12-06; **Accepted:** 2018-01-04

***Corresponding author.Tel.:** 13669249849 **E-mail:** laser_hebin@opt.cn