

大深径比微孔加工技术及其发展

焦悦*, 贺斌, 李朋, 田东坡

中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119

摘要: 大深径比微孔加工在航空和汽车领域有广泛需求, 如航空发动机涡轮叶片气膜孔、火焰筒气膜孔、航空喷油嘴微孔以及汽车喷油嘴微孔均需要大深径比微孔加工。目前, 大深径比微孔加工方法主要有电火花、电液束、水导激光和飞秒激光 4 种加工技术。介绍了 4 种加工技术原理和研究现状, 对比分析了各自的特点及其应用, 最后对大深径比微孔加工技术的发展趋势进行了展望。

关键词: 微孔; 大深径比; 电火花; 电液束; 水导激光; 飞秒激光

中图分类号: TN249 文献标识码: A DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2018.03.001

微孔加工技术在航空、航天和汽车等领域有着广泛的应用。航空发动机涡轮进口燃气温度高达 2100~2300K, 远远超过高温合金材料的熔化温度, 必须采用气膜冷却技术和涂层技术来降低叶片的实际温度。气膜冷却技术是将冷却空气通过气膜孔均匀流出, 在叶片表面上形成连续、稳定的气膜, 起到隔热效果, 气膜孔的位置、形状、加工精度, 均会对冷却气膜的形态产生影响, 从而影响气膜冷却效果, 因此, 涡轮叶片气膜冷却孔加工技术是提高发动机性能的关键技术之一。冷却气膜孔直径大多数在 0.3~0.5mm 之间, 深度最大达到 10mm, 深径比超越了 20:1, 并且气膜孔内壁要求无微裂纹、无重铸层, 因此, 大深径比、高品质气膜孔的加工一直是技术难点。目前, 应用于大深径比微孔加工的方法主要有电火花、电液束和飞秒激光加工技术, 同时也在发展其他复合加工技术, 如电火花电化学组合加工系统、倒置式超声复合电火花加工、超声电火花复合和水导激光加工等。

1 电火花加工技术

电火花加工 (Electrical Discharge Machining, EDM) 是利用电极与材料作用产生放电而实现材料的去除。由于其不受材料强度、韧性和硬度等物理、力学性能限制及非接触加工等特点^[1], 可以制造出各种形状的孔, 因此, 在航空、电子等制造领域中得到了广泛的关注。随着制造业的发展, 微

小孔的加工需求越来越大, 在传统电火花加工的基础上提出了微细电火花加工 (适用于 $\phi=0.5\text{mm}$ 以下的微孔加工)。其加工原理是将导电材料和电极同时放入工作液中, 在工件和电极之间加入周期性脉冲电压, 当极间电压高于工作液的绝缘强度时, 极间介质被击穿, 放电通道形成。高温高压的放电通道, 使工件和工具表面熔化、汽化, 然后依靠膨胀和局部爆炸, 使得已熔化、汽化的材料去除, 并在工件和电极表面分别留下一个很小的凹坑^[2]。上述过程反复地进行, 就达到了工件加工的目的, 图 1 为微细电火花放电原理示意图^[3]。但在大深径比微孔加工时, 随着孔深度的增加, 去除材料过程中会产生具有导电性的残渣, 这些残渣很难排出, 这样会将极间环境改变, 造成短路的现象, 且容易反复发生, 其加工性能会随之降低, 孔的加工速度会变慢, 甚至无法进行到孔预定深度的加工, 因此, 通常微细电火花微孔加工时深径比小于 20。

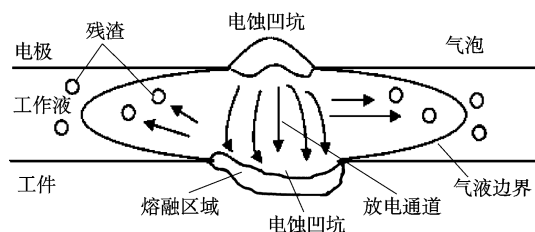


图 1 微细电火花放电原理示意图
Fig.1 Micro-EDM schematic diagram

收稿日期: 2018-01-18; 退修日期: 2018-01-23; 录用日期: 2018-03-05

* 通信作者. Tel.: 18220552042 E-mail: laser_jiaoyue@opt.cn

引用格式: Jiao Yue, He Bin, Li Peng, et al. Development of micro-holes machining with high-aspect ratio [J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29 (03): 01-07. 焦悦, 贺斌, 李朋, 等. 大深径比微孔加工技术及其发展 [J]. 航空科学技术, 2018, 29 (03): 01-07.

德国、日本、法国等国家以及国内哈尔滨工业大学、大连理工大学、苏州电加工机床研究所等单位对电火花微加工技术在深孔加工中的应用进行了大量的研究,并取得了一系列结果。

日本学者 Liew 等^[4]将超声加工与 EDM 技术相结合,采用一定频率的超声辅助微细电火花技术对 SiC 陶瓷进行深微孔的加工,可以实现深径比为 20 的深孔加工,其原理和加工孔的深度如图 2 所示。

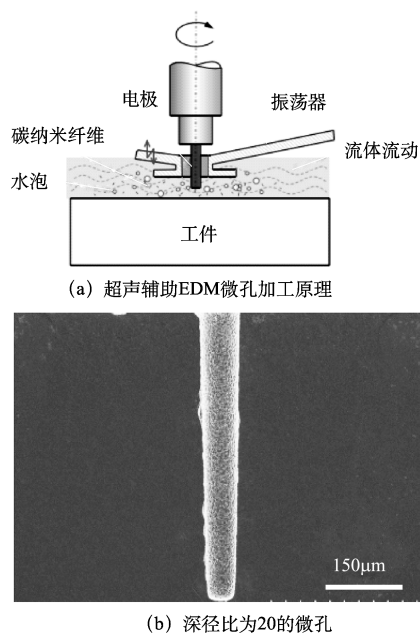


图2 超声辅助 EDM 碳化硅陶瓷深孔加工

Fig.2 Deep micro-hole processing on SiC ceramics by EDM with USM

大连理工大学张余升等利用微细电火花加工过程中采用电极摇动的方式改变放电间隙的基础上,同时利用一定频率的超声波对样件施以振动,实现深径比为 29 的微通孔加工^[5]。汪红兵等基于工件振动的超声电火花复合加工装置,在模具钢上加工直径为 0.5mm,深径比为 60 的微孔^[6]。

哈尔滨工业大学贾宝贤等提出利用倒置式超声复合电火花加工的方法实现深孔的加工,该方法利用加工过程中产生残渣的自身重力,并同时加以一定频率的超声波,其原理如图 3 所示,可以在 3mm 厚不锈钢材料上实现 $\phi=0.1\text{mm}$ 的微孔加工^[7]。

通过以上内容可以发现,在微细电火花加工技术基础上,采用超声及电极辅助等方式复合可以有效地实现大深径比微孔的加工,但由于其属于热熔加工,所以在加工过程中易产生重铸层,需通过手工抛修和磨粒流等方式

对重铸层进行去除^[8],但效率低且效果不是很理想。2012 年,哈尔滨工业大学王振龙^[9]等提出将电化学加工与电火花加工技术复合,利用电化学加工具有加工表面质量好,能与其他特种加工方法相结合组成复合加工的优势。先用电火花加工方法进行微孔的成形加工,之后用电化学方法去除微孔内壁的重铸层。但电化学加工时间对微孔加工效果具有一定的影响,加工时间短,则重铸层没有完全去除,影响孔表面质量;加工时间过长,重铸层完全去除,但微孔的加工精度低。该方法在加工过程中需要更换工作液,无法确保加工过程的一致性。经研究发现,电火花—电化学组合加工时间往往要比电火花高速穿孔时间延长数倍,制约了电火花高速穿孔的效率优势^[10],因此,在航空类高质量微孔的加工应用中受到了一定的限制。

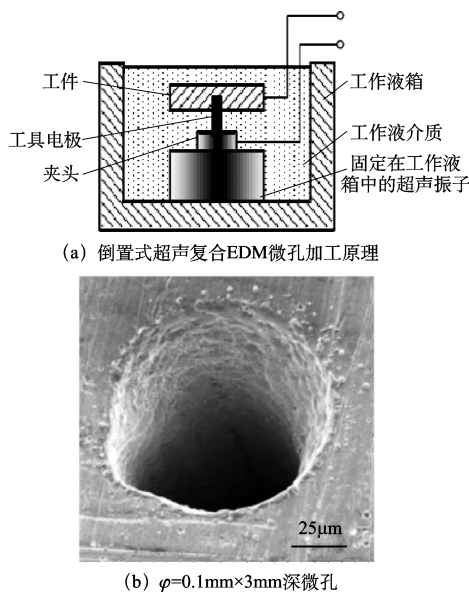


图3 倒置式超声复合 EDM 不锈钢深孔加工

Fig.3 Deep micro-hole processing on stainless steel by EDM with USM in inverted layout

2 电液束微孔加工技术

电液束加工 (Electrostream Drilling, ESD) 是一种电解加工方法,是在金属管电极小孔加工的基础上发展而来。由于其加工材料范围广,与硬度无关,且加工后无应力、无热影响区和无重铸层,可实现特殊位置上大深径比微孔的加工,因此,在航空精密微孔加工领域得到了广泛的关注。

电液束加工原理^[11]如图 4 所示,密封的毛细管被

装夹在专用的夹具上,电解液经过带有较高电压的工具阴极后带有负电,施以较高的压力将带负电的电解液压入毛细血管内,以较高的速度从毛细管端部射向带有较高电压的工件阳极进行“溶解”,从而实现微孔的加工^[12,13]。但在电液束加工深孔过程中,随着孔深度的增加,残渣在间隙或侧壁容易产生堆积,导致在两极间出现打火甚至造成短路,致使很难继续进行孔的加工,甚至造成加工失败^[11]。故在对深孔加工中,电解液通常选择为酸性溶液,保证加工过程中产生的残渣及时溶解,避免堵塞^[14]。

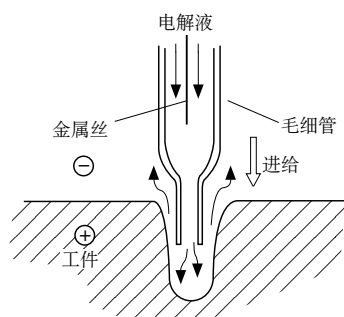


图4 ESD加工原理图

Fig.4 The processing schematic of ESD

ESD最早由美国通用电气公司提出应用于航空发动机小孔加工的项目中,实现了深径比为50的微孔加工。随后德国、英国和日本等国家也对此展开了研究,英国的罗尔斯·罗伊斯公司通过该方法实现了涡轮叶片上深径比为37.5的微孔加工,并且实现了机床的生产。

国内的科研机构也展开了相关的研究,中国航空制造技术研究院于20世纪80年代起对此进行了系统的研究,并已将其成果应用于叶片气膜孔的加工中,且实现了工程化机床的研制。中国航空制造技术研究院还展开了关于ESD方法的研究,实现了深径比为150的微孔加工,且可以实现无重铸层、无微裂纹和无热影响区,达到了国际的领先水平^[15]。

通过以上研究可以发现,电液束加工可以有效地实现大深径比微孔的加工,且该方法加工的微孔无重铸层、无热影响区、无微裂纹,但其加工效率低,通常在 $1.8\sim 2.5\text{mm/min}$ ^[16]。并且,电液束加工深孔时,其中电解液通常选择酸性物质,因此加工设备和机床维护等方面的成本较高,同时容易造成环境的污染。

3 水导激光加工技术

水导激光（Water-jet Guided Laser）加工是将激光加工

和水射流加工的相复合实现微细加工的技术。其加工原理如图5所示^[17],类似于激光在光纤中传播,将光束射入头发丝粗细的水束中,激光在水束内发生全反射,同时对水束施以一定压力,由高压水束引导聚焦的激光束传输到工件表面,实现工件的加工。

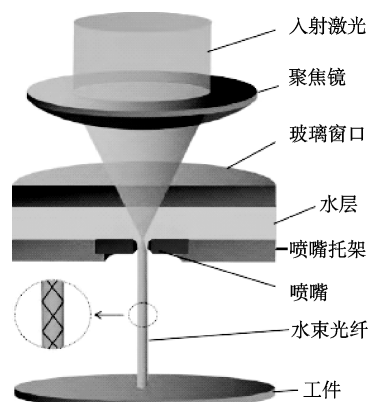


图5 水导激光加工技术原理示意图

Fig.5 The technical principle diagram of water-jet guided laser processing

与传统激光加工相比,水导激光加工光束可以在水束内发生全反射,并由水束引导至加工材料表面,无须考虑对焦点的调整,且加工距离较长,如图6(a)所示,圆柱形的光束可以有效地实现无锥度微孔的加工,并且在加工过程中,水束可以有效地去除加工后的残渣,减少残渣的堆积,如图6(b)所示,因此水导激光对于实现大深径比微孔的加工具有一定的优势。同时水束还可以实现对加工区域的冷却,减少热影响区,降低表面粗糙度。利用水导激光在TC4薄板上进行微孔加工的效果图如图7所示,可以发现加工效果较为理想^[18]。

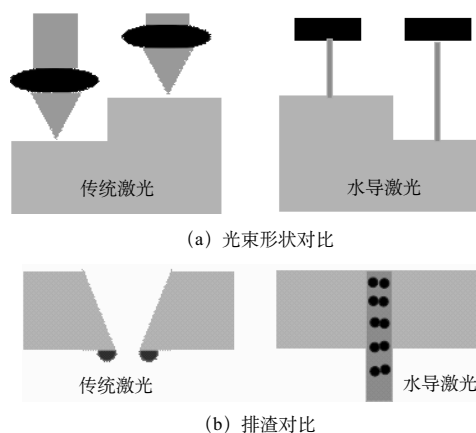


图6 水导激光微细加工与传统激光加工对比

Fig.6 The contrast between the water-guided laser processing and the traditional laser processing

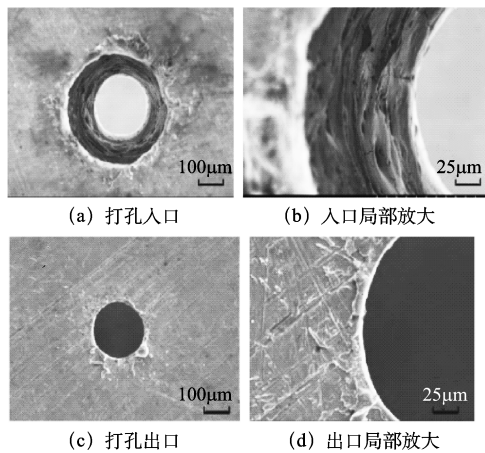


图7 水导激光打孔典型形貌及放大

Fig.7 The typical morphology and enlargement of the micro-hole drilling by water-guided laser

水导激光加工是近些年提出的一种复合加工技术。1993年,瑞士科学家 Richerzhagen 等对水束导光进行了深入研究,并将其应用于材料的加工。1997年,在瑞士成立了 Synova 公司,针对水导激光加工技术展开了深入研究,目前该公司已成功研制出多种水导激光微细加工设备,如图8所示,可以在高温合金材料上实现深径比达20的微孔加工。目前,美国通用电气公司正将该方法应用于燃气涡轮叶片的制造,且考虑将其扩展到其他航空制造领域。

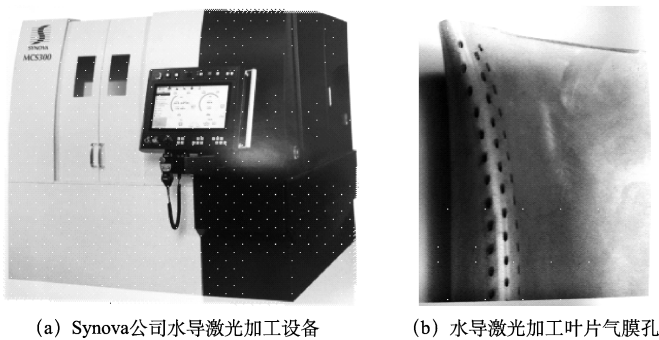


图8 Synova 公司水导激光加工设备及加工的叶片

Fig.8 The laser processing equipment and the processing blades by water-guided laser of Synova company

国内对于水导激光加工技术的研究处于起步阶段。2007年,哈尔滨工业大学率先开展了对该技术相关理论的深入研究,江苏大学也相继开展了相关的研究。但总体来说,国内还处于前期阶段,需继续对此展开相关深入的研究。

4 飞秒激光加工技术

超短脉冲激光具有加工材料范围广,非接触且峰值功率高和脉冲超短等特点,可以实现无重铸层和无热影响区的

冷加工。图9为德国汉诺威激光中心实验室 Chichkov 等在 $100\mu\text{m}$ 的不锈钢片上利用不同脉冲宽度的光束实现微孔加工的效果,从图中可以发现飞秒激光微孔加工精度较高^[19]。X. Liu 等人利用飞秒激光在厚度约为 0.5mm 的钢片上实现了直径为 $35\mu\text{m}$ 的通孔加工^[20]。飞秒激光对于实现大深径比微孔的加工具有一定的优势,因此在航空、航天等精密微孔加工领域得到了广泛关注。

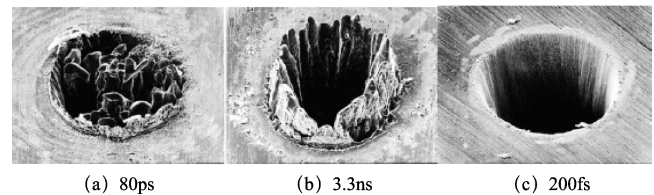


图9 不同脉宽激光在 $100\mu\text{m}$ 的薄层钢材下钻孔结果

Fig.9 The results of drilling on $100\mu\text{m}$ thin steel by laser with different width pulses

飞秒激光在微孔加工初始阶段,形成坑状结构,随着脉冲数的增多,激光将通过孔壁反射、衍射以及等离子体吸收等多种方式传播至孔底,使得孔深度增加。然而,孔深逐步增加的过程中,会存在多种形式等离子体^[21],如图10所示。超快激光在空气中聚焦后产生电离形成等离子体,在进行微孔加工过程中,激光与材料相互作用,进行烧蚀形成材料-蒸汽等离子体,而在作用过程中产生的烧蚀产物会沿微孔向外喷发,当后续脉冲作用时,与烧蚀产物相互作用引发空气电离等离子体。因此,严重影响了光束的传输和残渣的排出,而此时残渣将会强烈吸收激光,导致到达加工位置时光能量随着孔深的增加而不断的减小,加工效率大幅降低,最终会导致微孔加工到达一定深度后将很难继续进行^[22]。因此,残渣的有效去除是实现大深径比微孔加工的关键技术之一。

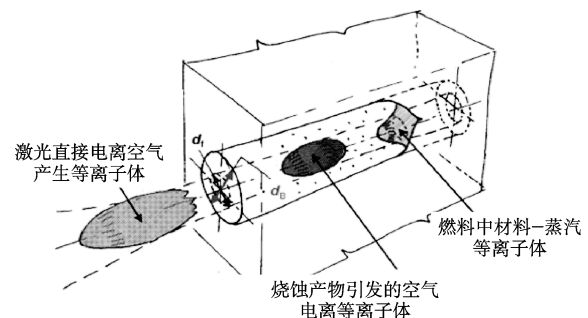


图10 飞秒激光微孔加工

Fig.10 Micro-hole processing by femtosecond laser

目前,飞秒激光大深径比微孔加工得到了国内外的广泛关注。2003年, G. Kamlage 等利用飞秒激光在不锈钢

钢材料上进行了微孔加工,如图 11 所示,可以实现深径比为 10 的通孔加工^[23]。德国的 Rofin-LASAG 公司利用飞秒激光在厚度为 10mm 的碳钢材料上实现了直径为 $90\mu\text{m}$ 的通孔加工,深径比达 100,加工效果如图 12 所示。

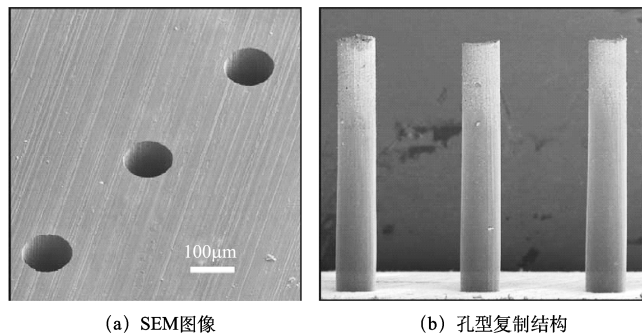


图 11 不锈钢材料上深径比为 10 的高品质飞秒激光微孔加工
Fig.11 The high-quality micro-hole processing with the aspect ratio of 10 on stainless steel by femtosecond laser

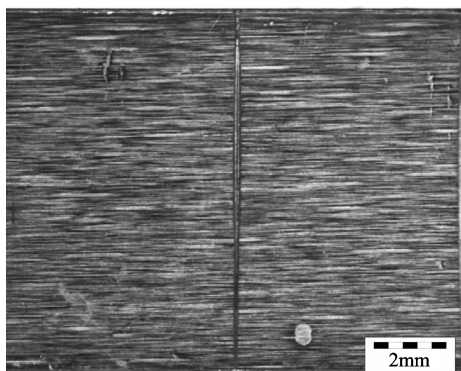


图 12 深径比为 100 的飞秒激光微孔加工(碳钢)
Fig.12 The high-quality micro-hole processing with the aspect ratio of 100 on carbon steel by femtosecond laser

国内的相关机构也展开了关于飞秒激光大深径比微孔加工的研究,北京理工大学姜澜教授等^[22]对飞秒激光大深径比微孔加工的机理进行了研究,提出真空条件下可以有效地提大深径比,此外,利用贝塞尔光束长径比的优势,通过改变光束本身激光脉冲能量和相对位置等参数,实现多种尺寸的深小孔结构加工。

西安光学精密机械研究所光子制造中心的研究人员利用飞秒激光,同时采用旁轴吹气的方式,在不锈钢材料上实现深径比为 20 的深孔加工,加工结果如图 13 所示。目前已经成功应用于叶片气膜孔的加工,同时实现了深孔加工机床的自主研发。

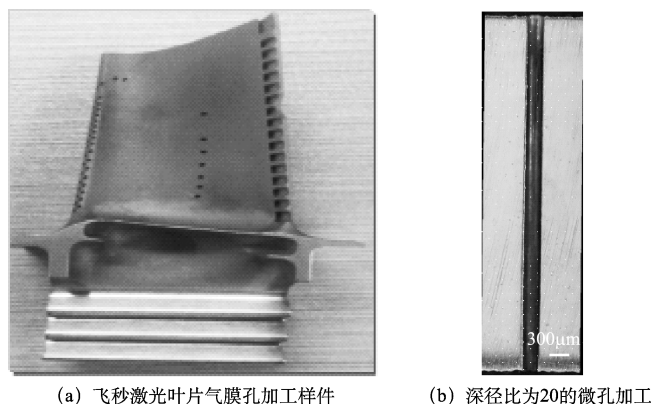


图 13 飞秒激光叶片气膜孔加工样件效果图
Fig.13 The film hole processing on blade by femtosecond laser

5 结束语

对比分析电火花加工、电液束加工、水导激光加工和飞秒激光大深径比微孔加工工艺方法可以发现,几种工艺方法均可以实现大深径比微孔的加工。水导激光和飞秒激光是值得关注的研究方向,但水导激光加工由于是新兴技术,仅有 Synova 公司实现了设备的研制,且价格昂贵,因此需对其进一步深入研究。而飞秒激光可以实现无重铸层、无微裂纹的高品质微孔加工,且加工效率较高。因此,飞秒激光加工技术是实现大深径比微孔加工的主要技术手段,同时也是航空发动机涡轮叶片气膜孔高品质加工的重要发展趋势。目前已经对飞秒激光微孔加工的机理进行了一定研究,但仍需要对其进一步的深入研究,并且在实际生产应用中,需要建立更为系统化的高质量、大深径比微孔加工的工艺规范。

AST

参考文献

- [1] 连峰,张会臣. 钛合金的电火花加工技术及最新研究进展 [J]. 现代制造工程, 2012 (2): 18-23.
Lian Feng, Zhang Huichen. Technology and development of Ti alloy machined by EDM[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2012 (2): 18-23. (in Chinese)
- [2] 赵万生. 先进电火花加工技术(精) [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
Zhao Wansheng. Advanced electrical discharge machining technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [3] Kunieda M. Fundamentals and future in electrical discharge

- machining: I fundamentals[J]. Journal of the Japan Society of Precision Engineering, 2005, 71: 189-194.
- [4] Liew P J, Yan J, Kuriyagawa T. Fabrication of deep micro-holes in reaction-bonded SiC by ultrasonic cavitation assisted micro-EDM[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2014, 76 (1): 13-20.
- [5] 张余升. 大深径比微细孔电火花加工技术研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- Zhang Yusheng. Study on micro hole drilling with high aspect ratio by micro EDM[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [6] 汪红兵, 张义平, 李志荣, 等. 大深径比微小深孔超声电火花加工工艺研究 [J]. 现代制造工程, 2015 (6): 110-114.
- Wang Hongbing, Zhang Yiping, Li Zhirong, et al. Research on an ultrasonic vibration assisted electrical discharge machining technology of micro deep hole with high aspect ratio[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2015 (6): 110-114. (in Chinese)
- [7] 贾宝贤, 房长兴. 倒置式电火花超声复合加工装置 [J]. 电加工与模具, 2010 (4): 64-67.
- Jia Baoxian, Fang Changxing. EDM with USM machining equipment in inverted layout[J]. Electrical Processing and Mold, 2010 (4): 64-67. (in Chinese)
- [8] 尹大鹏. 航空发动机涡轮叶片冷却气膜孔加工技术 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- Yin Dapeng. Machining technology of cooling air film holes on turbine blades of aero plane engines[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [9] 何小龙. 精密微孔电火花电化学组合加工技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- He Xiaolong. Research on precision micro-hole machined by EDM-ECM combined processing[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
- [10] 张彦. 微小孔电火花-电解复合加工基础研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- Zhang Yan. Fundamental research on electrochemical and discharge machining for micro hole[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)
- [11] 贾继欣. 基于盐溶液的微小孔电液束加工技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- Jia Jixin. Research on the machining of micro-holes by electrolytestream drilling based on sodium nitrate[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)
- [12] Caccese V, Blomquist P A, Berube K A, et al. Effect of weld geometric profile on fatigue life of cruciform welds made by laser/GMAW processes[J]. Marine Structures, 2006, 19 (1): 1-22.
- [13] Lee C H, Chang K H, Jang G C, et al. Effect of weld geometry on the fatigue life of non-load-carrying fillet welded cruciform joints[J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16 (3): 849-855.
- [14] 贾继欣, 曲宁松, 房晓龙, 等. 毛细管电极电液束加工微小孔试验研究 [J]. 电加工与模具, 2011 (2): 29-32.
- Jia Jixin, Qu Ningsong, Fang Xiaolong, et al. Investigation on electrostream drilling of micro-holes[J]. Electrical Processing and Mold, 2011 (2): 29-32. (in Chinese)
- [15] 施文轩, 张明岐. 电液束加工技术的新发展 [C]//2001 年中国机械工程学会年会暨全国特种加工学术年会, 2001.
- Shi Wenxuan, Zhang Mingqi. New development of electrohydraulic processing technology[C]//China Mechanical Engineering Society Annual Conference and the National Specialty Processing Annual Conference, 2001. (in Chinese)
- [16] 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 (13): 61-64.
- Zhu Hainan, Qi Xinxia. Development of machining technology gas holes on turbine blades[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011 (13): 61-64. (in Chinese)
- [17] 杨立军, 孔宪俊, 王扬, 等. 激光微孔加工技术及应用 [J]. 航空制造技术, 2016, 514 (19): 32-38.
- Yang Lijun, Kong Xianjun, Wang Yang, et al. Laser micro-holes machining technology and its application[J]. aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 514 (19): 32-38. (in Chinese)
- [18] 王扬, 李春奇, 杨立军, 等. 非常规激光加工技术的研究 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40 (3): 448-454.
- Wang Yang, Li Chunqi, Yang Lijun, et al. Research on unconventional laser machining[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40 (3): 448-454. (in Chinese)
- [19] Chichkov B N, Momma C, Nolte S, et al. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids[J]. Applied Physics A, 1996, 63 (2): 109-115.
- [20] Liu X, Du D, Mourou G. Laser ablation and micromachining

- with ultrashort laser pulses[J]. Quantum Electronics IEEE Journal, 1997, 33 (10): 1706–1716.
- [21] Breitling D, Dausinger F. Fundamental aspects in machining of metals with short and ultrashort laser pulses[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2004, 5339: 49–63.
- [22] 夏博, 姜澜, 王素梅, 等. 飞秒激光微孔加工 [J]. 中国激光, 2013, 40 (2): 1–12.
- Xia Bo, Jiang Lan, Wang Sumei, et al. Femtosecond laser drilling of micro-holes[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40 (2): 1–12. (in Chinese)
- [23] Kamlage G, Bauer T, Ostendorf A, et al. Deep drilling of metals by femtosecond laser pulses[J]. Applied Physics A, 2003, 77 (2): 307–310.
- 作者简介**
焦悦 (1992—) 女, 硕士。主要研究方向: 飞秒激光微加工工艺。
Tel: 18220552042
E-mail: laser_jiaoyue@opt.cn

Development of Micro-holes Machining with High-aspect Ratio

Jiao Yue*, He Bin, Li Peng, Tian Dongpo

Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, CAS, Xi'an 710119, China

Abstract: The machining of micro-holes with high aspect ratio has wide applications in aviation and automotive fields, such as the turbine blade film holes, flame tube film holes, as well as aviation fuel injection nozzle micro-holes and automotive nozzle micro-holes processing, there are a large number of high aspect ratio holes. At present, the Electrical Discharge Machining (EDM), Electro-Stream Drilling (ESD), water-jet guided laser and femtosecond laser processing technology are mainly used for the processing of high aspect ratio micro-hole. In this paper, the principle and the current research status of the EDM, ESD, water-jet guided laser and femtosecond laser machining technology were introduced firstly. The characteristics and their applications were compared and analyzed. Finally, the development trend of high aspect ratio micro-hole processing technology was prospected.

Key Words: micro-holes; high aspect ratio; EDM; ESD; water-jet guided laser; femtosecond laser

Received: 2018-01-18; Revised: 2018-01-23; Accepted: 2018-03-05

*Corresponding author. Tel.: 18220552042 E-mail: laser_jiaoyue@opt.cn