

飞秒激光工艺参数对加工 TiC 陶瓷微孔的影响

王禹茜¹ 张军战¹ 刘永胜² 杨小君³ 李玮楠³ 王春辉²

¹ 西安建筑科技大学材料与矿业学院, 陕西 西安 710055

² 西北工业大学超高温结构复合材料重点实验室, 陕西 西安 710072

³ 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119

摘要 用不同能量密度的飞秒激光在不同辅助气压下对 TiC 陶瓷进行微孔加工, 采用扫描电子显微镜(SEM)、微米 X 射线三维成像仪(Micro-CT)和 X 射线光电子能谱(XPS)对微孔的形貌和化学键进行了研究。结果表明, 在不同能量密度下, 微孔入口圆度均不小于 99%, 微孔出口圆度随能量密度的增加而增大, 随后趋于稳定, 最大出口圆度为 95%。微孔锥度随辅助气压增大而增大, 当能量密度为 0.51 J/mm²、辅助气压为 0.3 MPa 时, 微孔锥度最佳, 其长轴锥度为 -0.13°, 短轴锥度为 0.77°。激光加工过程中, C-C 键、Ti-C 键断裂, 在微孔附近形成包含金属 Ti、Ti₂O₃ 和 TiO₂ 等物质的残渣。最后对激光与材料的作用机制进行了探讨。

关键词 超快光学; 飞秒激光; 微孔加工; TiC 陶瓷; 能量密度; 辅助气压

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.1003010

Effect of Femtosecond Laser Parameters on TiC Ceramic Micro-Hole Drilling

Wang Yuqian¹ Zhang Junzhan¹ Liu Yongsheng² Yang Xiaojun³

Li Weinan³ Wang Chunhui²

¹ School of Materials and Mineral Resources, Xi'an University of Architecture and Technology
Xi'an, Shaanxi 710055, China

² Key Laboratory of Science and technology on Thermostructure Composite Materials Laboratory,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China

³ State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

Abstract Drilling micro-holes in TiC ceramic with femtosecond laser in different laser fluence and assisted gas pressure has been demonstrated. Scanning electron microscope (SEM), micrometer X-ray 3D imaging system (Micro-CT) and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) are used to investigate the morphology and chemical bonds of micro-holes. The results show that the circularities of micro-holes at the entry are not less than 99% when the laser fluence varies. The circularities of micro-holes at the exit increase as the laser fluence grows, then it tend to be stable. The maximum value of the circularity at the exit is 95%. The taper of micro-holes increases with the assisted gas pressure. When the laser fluence is 0.51 J/mm², the taper of micro-holes drilled with 0.3 MPa gas pressure is the best, its long axis taper is -0.13° and the short axis taper is 0.77°. C-C bonds and Ti-C bonds rupture while debris which contains metal Ti, Ti₂O₃ and TiO₂ forms around the micro-holes during laser drilling. Lastly, the mechanism of interactions between laser beam and materials is discussed.

Key words ultrafast optics; femtosecond laser; micro-hole drilling; TiC ceramic; laser fluence; assisted gas pressure

OCIS codes 320.7090; 350.3850; 260.5950

收稿日期: 2014-04-01; 收到修改稿日期: 2014-05-13

基金项目: 科技部国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ12007504)、国家自然科学基金(51002120, 51032006)、中国科学院瞬态光学与光子学国家重点实验室资助项目(SKLS201106)

作者简介: 王禹茜(1988—), 女, 硕士研究生, 主要从事超短脉冲激光微孔加工方面的研究。

E-mail: judie_wang@126.com

导师简介: 张军战(1972—), 男, 博士, 副教授, 主要从事高温结构陶瓷方面的研究。E-mail: xajzzhang@xauat.edu.cn

1 引言

TiC 陶瓷材料具有硬度高、耐磨损和抗高温氧化性能优良等特点^[1-2],已经广泛用于制备切削工具、矿山工具、耐磨材料,同时在航空航天、仪表及电器工业中也发挥着重要作用^[3-5]。但是,TiC 陶瓷脆性较大、断裂韧性低、硬度高,属于很难加工的一类材料^[6]。而现代工业发展要求对这类材料进行精确、可控的微加工。许多学者对陶瓷微加工进行了研究并获得了很多成果,目前主要的陶瓷加工方法有以下几种^[7]。机械力加工具有工具易磨损、材料表层会生成缺陷及较大的残余应力较大、加工精度不高等缺点^[8-9]。电化学加工可在高强度材料上加工复杂形状,但不适合加工尖角,且加工定域性不好、效率低^[10-11]。电火花加工对材料无磨损,加工不受材料硬度影响,但工作电极损耗大,且不能直接加工绝缘陶瓷^[12-13]。电子束和等离子束加工的加工条件苛刻,灵活度不高,真空设备昂贵^[14-16]。激光加工为非接触加工,消除了机械加工的机械应力、刀具磨损、加工时间过长等问题;激光束照射到材料局部区域,其热影响区较小,可实现微区加工;激光加工灵活性好,与数控机床连接,构成各种加工系统,可在同一机器上完成钻孔、切削、焊接和热处理等加工。

连续和长脉冲激光热扩散范围相对较大,加工精度有限。准分子脉冲激光可以实现微米级尺度的精密加工^[17],但因需要腐蚀性气体而在使用上受到限制。飞秒激光具有极短的脉冲宽度和极高的峰值功率,与物质作用时呈强烈的非线性效应,作用时间短,热效应小,因而可大大提高加工精度^[18]。此外,飞秒激光对材料的适应性好,不仅能加工聚合物、金属、半导体材料,还能对硬脆材料和宽带隙的电介质进行材料去除^[19]。因此,飞秒激光是最理想的微加工手段之一^[10,20-21]。

Guo 等^[22]用飞秒激光对氧化铝陶瓷坯体进行微孔加工然后烧结,获得无溅射、无裂纹的微孔。Bian 等^[23]用飞秒激光结合氢氟酸刻蚀的方法在石英玻璃上加工微曲面。Yong 等^[24]用飞秒激光在硅表面加工分层网孔微结构,使硅表面具有良好的疏水性。Samant 等^[25]运用相同参数的激光加工了 Al_2O_3 陶瓷、 Si_3N_4 陶瓷和 MgO 陶瓷,所得盲孔深度却各不相同,得出飞秒激光加工微孔不仅和材料气化与熔融有关,还和材料本征特性紧密相关。王宁^[26]研究发现,飞秒激光加工时在工件表面施加正向压力或在工件反面装低压仓或用压缩空气对工件

进行吹洗,有利于排除残渣,减弱熔融物及残渣对孔的尺寸及形貌的不利影响。

本文用飞秒激光加工 TiC 陶瓷,研究不同激光能量密度和辅助气压对 TiC 陶瓷微孔加工的影响,分析飞秒激光与 TiC 陶瓷之间的相互作用机制,为 TiC 陶瓷的飞秒激光加工工艺的优化提供参考。

2 实验过程

TiC 陶瓷由上海硕颂电子科技有限公司提供,其体积密度约为 3.0 g/cm^3 ,显气孔率小于 10%,样品厚度为 2 mm。在飞秒激光加工之前,试样用乙醇超声波清洗 15 min。飞秒激光加工实验在中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室的飞秒激光系统上进行。激光加工系统采用的是立陶宛 Light Conversion 公司的 PHAROS 系列激光器。激光器的基本参数如下:波长为 1030 nm,重复频率为 1~500 kHz,脉冲宽度为 230 fs,最大平均功率为 15 W,聚焦透镜为焦距 100 mm 的非球面透镜,光斑直径为 $30 \mu\text{m}$ 。激光器由电脑操纵,激光、定位系统和激光头扫描器可协同工作。加工时激光头上有喷嘴吹空气以获得辅助气压。飞秒激光加工实验装置如图 1 所示。

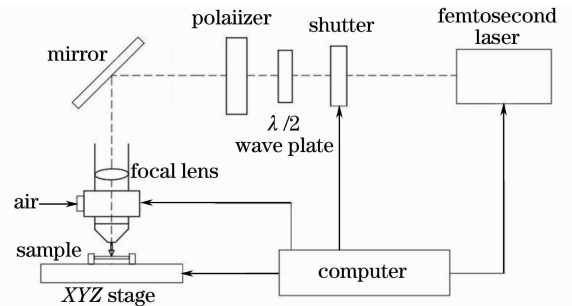


图 1 飞秒激光加工实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of femtosecond laser fabrication

微孔加工以螺旋线方式进行(图 2)。在螺旋线加工的基础上增加深度方向的进给,使激光焦点从

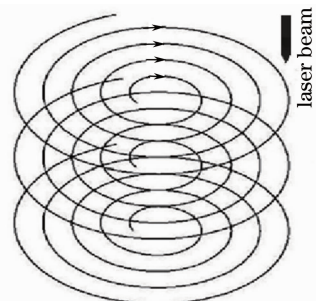


图 2 飞秒激光加工方法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of laser drilling method

材料表面不断下移,始终处于激光和材料的作用面附近,这样作用面上激光束最聚集,激光强度较强,每一层上材料均被充分去除,从而实现深孔加工^[10],且加工的微孔形貌好、缺陷较少^[27]。采取每

层单次扫描的方式,每层间距为 $10\ \mu\text{m}$ 。螺旋线扫描时转速为 $40\ \text{coils/s}$,螺旋线设定为 $50\ \text{coils}$,故加工一层需要 $1.25\ \text{s}$ 。具体加工参数如表 1 所示。

表 1 加工微孔所用的激光参数

Table 1 Laser parameters for drilling micro-holes

	Laser fluence varied	Assisted gas pressure varied
Repetition rate /kHz	100	100
Laser fluence /(J/mm^2)	0.51, 0.76, 1.02, 1.27, 1.53	0.51
Feeding speed / μm	8	8
Target radius / μm	430	340
Assisted gas pressure /MPa	0.55	0.2, 0.3, 0.4, 0.5

加工后的试样用丙酮清洗 $15\ \text{min}$,再用乙醇超声清洗 $30\ \text{min}$,烘干 $12\ \text{h}$ 后进行分析测试。用扫描电子显微镜 (SEM), (S4700, Hitachi) 表征试样的形貌,微米 X 射线三维成像仪 (Micro-CT) (Y. Cheetah, YXLON) 表征微孔的内部特征, X 射线光电子能谱 (XPS), (K-Alpha, Thermo Scientific) 分析试样加工前后的成分及成键等的变化。

3 结果与讨论

3.1 能量密度对微孔加工的影响

用不同能量密度的激光加工 TiC 陶瓷,所得微孔入口、出口的表面形貌如图 3 所示。由图 3 可以

看出,微孔入口、出口表面都比较光滑,没有明显的残渣堆积、起层等现象。能量密度为 $0.51\ \text{J}/\text{mm}^2$ 的激光加工的微孔反面圆度明显较差。

测量微孔入口与出口尺寸并计算圆度,结果如表 2 所示,其中长轴直径为圆面最大直径 (D_1),短轴直径为圆面最小直径 (D_2),圆度为短轴直径与长轴直径的比值。根据表 2,结合图 3 可以看出,在不同能量密度下,入口圆度均不低于 99% ,圆度很高;而当能量密度为 $0.51\ \text{J}/\text{mm}^2$ 时,出口圆度只有 86% ,出口圆度随能量密度增加而好转,能量密度大于 $0.76\ \text{J}/\text{mm}^2$ 时,出口圆度达 95% 并趋于稳定。

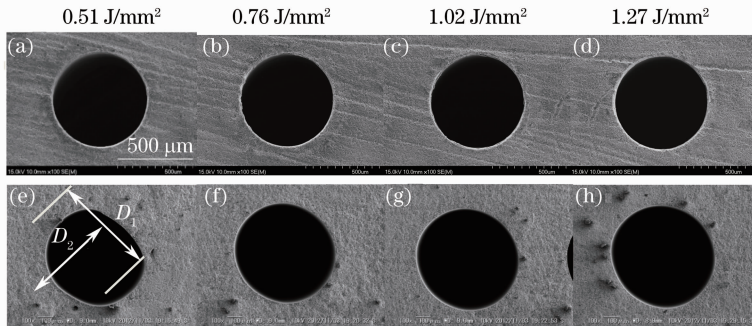


图 3 不同能量密度的激光加工微孔的 SEM 形貌。(a)(b)(c)(d)为入口形貌;(e)(f)(g)(h)为出口形貌

Fig. 3 SEM micrographs of micro-holes drilled with different laser fluence. (a)(b)(c)(d)entry holes; (e)(f)(g)(h) exit holes

表 2 不同能量密度的激光加工微孔的直径和圆度

Table 2 Diameter and circularity of micro-holes drilled with different laser fluence

Laser fluence / J/mm^2	Entry diameter		Exit diameter		Entry circularity ($D_{\text{en}2}/D_{\text{en}1}$)	Exit circularity ($D_{\text{ex}2}/D_{\text{ex}1}$)
	Long axis $D_{\text{en}1}/\mu\text{m}$	Short axis $D_{\text{en}2}/\mu\text{m}$	Long axis $D_{\text{ex}1}/\mu\text{m}$	Short axis $D_{\text{ex}2}/\mu\text{m}$		
0.51	639.38	631.41	656.95	567.03	99%	86%
0.76	638.68	635.79	671.39	638.69	100%	95%
1.02	647.46	641.48	683.38	650.14	99%	95%
1.27	655.03	654.84	691.55	657.77	100%	95%
1.53	651.25	648.45	694.01	656.13	100%	95%

这种结果和激光与材料的作用有关。当激光对材料进行加工时,材料通过多光子吸收电离出种子自由电子,自由电子与离子碰撞,使等离子体密度上升。这一过程中,激光能量密度越大,材料吸收的光子能量越多,激光对材料的去除能力越强^[28]。能量密度低的激光对材料的去除能力比较弱,所加工的微孔出口圆度也较差。

此外,由表 2 还可以看出,随着能量密度增加,微孔直径呈增大趋势,但增幅很小。由于激光能量服从高斯分布,所以增大能量密度时,激光作用于同一试样上的焦斑的直径增大^[29],所以在每层加工圈数均为 50 coils 的情况下,微孔直径随能量密度增加而略有增大。

3.2 辅助气压对微孔加工的影响

在激光加工过程中,通常需要喷射辅助气体增强材料去除的能力,同时保护激光头免受残渣的冲

击^[30]。由上节可知,气压为 0.55 MPa 时,能量密度为 0.51 J/mm² 的激光加工效果明显不好。为了探讨辅助气压对 TiC 陶瓷微孔加工的影响,在能量密度为 0.51 J/mm² 时,改变辅助气压对 TiC 陶瓷进行微孔加工。

能量密度为 0.51 J/mm² 的激光在不同的辅助气压下加工的微孔的直径和锥度如表 3 所示。锥度角计算公式为^[21]

$$\theta = \arctan[(D_{en} - D_{ex})/2h], \quad (1)$$

式中 D_{en} 为微孔入口直径, D_{ex} 为微孔出口直径, h 为试样厚度(2 mm)。

由表 3 可以看出,在不同辅助气压下,微孔的锥度角在 $-0.30^\circ \sim 2.17^\circ$ 之间,锥度角随着辅助气压的增大而增大;当辅助气压为 0.3 MPa 时,微孔的锥度角最接近于 0° 。因此,对能量密度为 0.51 J/mm² 的激光加工 TiC 陶瓷而言,最佳辅助气压为 0.3 MPa。

表 3 不同辅助气压加工的微孔的直径和锥度

Table 3 Diameter and degree of taper of micro-holes drilled with different assisted gas pressure

Assisted gas pressure / MPa	Entry diameter		Exit diameter		Long axis taper $\theta / (^\circ)$	Short axis taper $\theta / (^\circ)$
	Long axis $D_{en1} / \mu\text{m}$	Short axis $D_{en2} / \mu\text{m}$	Long axis $D_{ex1} / \mu\text{m}$	Short axis $D_{ex2} / \mu\text{m}$		
0.2	533.75	527.62	554.5	474.11	-0.30	0.77
0.3	530.66	523.66	539.78	470.03	-0.13	0.77
0.4	547.72	539.63	510.35	458.31	0.54	1.17
0.5	531.21	530.53	436.78	379.02	1.35	2.17

图 4 是能量密度为 0.51 J/mm² 的激光在不同辅助气压下所加工微孔的纵截面 micro-CT 照片。由图 4 可以看出,辅助气压较小时所加工的微孔接近于圆柱形,随着气压变大,微孔加工效果变差。这是因为适当的辅助气压可以促使孔中的熔融物和残渣飞溅出去,从而得到较好的圆度和锥度。但是,过大的气压会通过强制对流的方式促使熔融物迅速冷却,从而抑制熔融物的去除,也就造成了气压过大时通孔的加工效果反而不好^[27]。能量密度越大,激光钻孔时产生的熔融物和残渣也就越多,促使熔融物和残渣飞溅出去的最佳辅助气压也越大。所以,能量密度较低时,应选择相对较低的辅助气压进行加工。

3.3 加工机制分析

X 射线光电子能谱能够有效地表征材料表面的电子结构和原子间的化学键^[31]。对 3.1 节中能量密度为 0.51 J/mm² 和 1.53 J/mm² 的激光所加工的微孔入口边缘作 XPS 分析,再将其与未加工的试样所做 XPS 分析进行对比,结果如图 5 所示。

由图 5(a)可知,未加工试样的 C 1s 峰有 281.8, 284.6, 285.9, 288.6 eV, 分别对应 C-Ti, C-C (sp²),

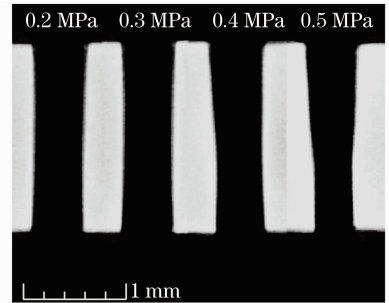


图 4 在不同辅助气压下所加工微孔的纵截面的 micro-CT 照片

Fig. 4 Micro-CT photos of longitudinal section of micro-holes drilled with different assisted gas pressure C-O (sp³), C=O 键^[32-33]。激光加工后的 C 1s 峰位置基本没变,但加工后 C-C (sp²) 键强度降低, C-Ti 键几乎观察不到了。这说明化学键发生了断裂;激光加工前后, C-O(sp³) 键和 C=O 键强度都很弱。

图 5(b)是 Ti 2p 光电子图谱, Ti 2p 峰由一对自旋轨道 Ti 2p_{3/2} 和 Ti 2p_{1/2} 峰组成。未加工试样的 Ti 2p 峰有 455.5, 456.8, 457.9, 458.9, 459.7, 461.5, 463.9 eV。其中主峰为 455.5 eV 和

461.5 eV, 分别是 Ti-C 键的 Ti 2p_{3/2} 峰和 Ti 2p_{1/2} 峰^[34-35], 其余很弱的峰均为 Ti 的氧化物, 可以忽略。能量密度为 0.51 J/mm² 的激光加工后的 Ti 2p 光电子图谱中, 454.1, 456.2 和 458.1 eV 为 Ti 2p_{3/2} 轨道的激发态能量, 460.3, 461.8 和 463.4 eV 为 Ti 2p_{1/2} 轨道的激发态能量。454.1, 456.2 和 458.1 eV 分别对应于 Ti 2p_{3/2} 轨道的金属

Ti^[36-37]、Ti₂O₃^[38] 和 TiO₂^[39-40]。当能量密度为 1.53 J/mm² 时, 激光加工后的 Ti 2p 光电子图谱和 0.51 J/mm² 时的 Ti 2p 光电子图谱类似。表 4 总结了激光加工前后 C 1s 和 Ti 2p 光电子结合能的变化。加工前主要是 Ti-C 键存在, 而加工后主要是金属 Ti、Ti₂O₃ 和 TiO₂ 存在, 这说明 TiC 陶瓷与激光作用后, Ti-C 键断裂并有金属 Ti 和 Ti 的氧化物生成。

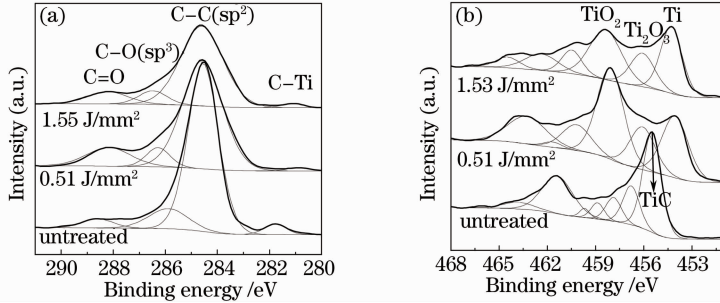


图 5 未加工试样和不同能量密度所加工微孔边缘的 XPS 分析。(a) C 1s 峰; (b) Ti 2p 峰

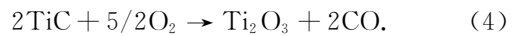
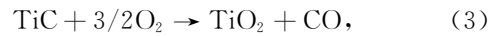
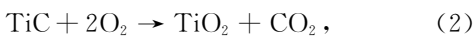
Fig. 5 XPS of the edge of micro-holes drilled with different laser fluence and untreated sample. (a) C 1s; (b) Ti 2p

表 4 加工前后 C 1s 和 Ti 2p 光电子的结合能

Table 4 Binding energies of C 1s and Ti 2p photoelectrons before and after laser treated

	Binding energy / eV					
	Untreated			Treated (0.51 J/mm ²)		
	C 1s	Ti 2p _{3/2}	Ti 2p _{1/2}	C 1s	Ti 2p _{3/2}	Ti 2p _{1/2}
C-C (sp ²)	284.6			284.6		
C-O (sp ³)	285.9			286.3		
C=O	288.6			288.2		
TiC	281.8	455.5	461.5	280.9		
Ti met					454.1	460.3
Ti ₂ O ₃					456.2	461.8
TiO ₂					458.1	463.4

在激光加工过程中, 激光与材料相互作用, 其机制可用多光子吸收理论进行分析^[41-42]。在 TiC 陶瓷中, Ti-C 键的键能约为 418.7 kJ/mol, C-C 键的键能约为 381.0 kJ/mol, 将键能换算成光子能量约为 4.2 eV 和 3.8 eV。对于波长为 1030 nm 的飞秒激光而言, 单个光子能量只有 1.2 eV, 必然发生多光子吸收。激光作用于 TiC 陶瓷时, 至少需要 4 个光子的能量来破坏化学键。经过飞秒激光辐照, 材料发生了 Ti-C、C-C 键的断裂, 生成自由电子和离子。由于所形成的等离子体具有很高的能量和运动速度, 它们会从孔中喷射而出, 从而材料被局部去除, 孔得以形成。在此过程中, 一部分 Ti 离子与空气中的氧结合, 氧化为 TiO_x^[6] (2)~(4) 式; 此外, 还有一些直接以金属 Ti 的形式存在于孔周围表面残渣中。



4 结 论

1) 在不同能量密度下, 微孔入口圆度均不低于 99%, 而出口圆度随能量密度增加而增大, 随后趋于稳定, 最大出口圆度为 95%。随能量密度增加, 微孔直径呈增大趋势, 但增幅很小。

2) 微孔锥度随气压增大而增大, 当能量密度为 0.51 J/mm²、辅助气压为 0.3 MPa 时, 微孔锥度最佳, 长轴锥度为 -0.13°, 短轴锥度为 0.77°。较低能量密度的激光应选择较低的辅助气压。

3) 在激光加工 TiC 陶瓷的过程中, 经过飞秒激光辐照, TiC 陶瓷中的 Ti-C 键断裂, 一部分 Ti 离子与空气中的氧反应形成 Ti₂O₃ 和 TiO₂, 还有一部分以金属 Ti 的形式存在于残渣中。

参 考 文 献

- 1 P Ettmayer, W Lengauer. The story of cermets[J]. Powder Metallurgy International, 1989, 21(2): 37-38.
- 2 Zhang Xinghong, He Xiaodong, Chen Guiqing, *et al.*. Research on TiC-Ni cermets by SHS and PSEVDO heat isostatic pressing[J]. Powder Metallurgy Technology, 1999, 17(1): 24-28.
张幸红, 赫晓东, 陈贵清, 等. 自蔓延加压法合成 TiC-Ni 基金属陶瓷[J]. 粉末冶金技术, 1999, 17(1): 24-28.
- 3 Liu Peisheng. Introduction to Porous Materials[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. 15-16.
刘培生. 多孔材料引论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. 15-16.
- 4 Zhou Yu, Song Guiming, Wang Yujin, *et al.*. Fracture behavior of TiC_p/W composites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1999, 9(suppl. 1): 158-165.
周 玉, 宋桂明, 王玉金, 等. TiC_p/W 复合材料的断裂行为[J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(suppl. 1): 158-165.
- 5 Guan Dehui, Yu Baohai, Bi Jing. Development and application of the cermets composite cutting tools for plastic granulation[J]. Powder Metallurgy Technology, 1998, 16(1): 36-40.
关德慧, 于宝海, 毕 敬. 金属陶瓷复合塑料粒切刀的研制及应用[J]. 粉末冶金技术, 1998, 16(1): 36-40.
- 6 P Rudolph, K W Brzezinka, R Wäsche, *et al.*. Physical chemistry of the femtosecond and nanosecond laser-material interaction with SiC and a SiC-TiC-TiB₂ composite ceramic compound[J]. Applied Surface Science, 2003, 208-209: 285-291.
- 7 A N Samant, N B Dahotre. Laser machining of structural ceramics-a review[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2009, 29: 969-993.
- 8 Luo Zhihai, Yang Runze. The situation and development of engineering ceramics machining technology [J]. Machinery, 2010, 48(556): 46-49.
罗志海, 杨润泽. 工程陶瓷加工技术的现状与发展[J]. 机械制造, 2010, 48(556): 46-49.
- 9 Gu Wencai, Guo Zhongning, Yu Zhaoqin, *et al.*. Processing technology of arrayed micro holes and its application [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2008, 37(10): 13-17, 39.
古文才, 郭钟宇, 于兆勤, 等. 微细阵列孔加工技术及其应用[J]. 机电工程技术, 2008, 37(10): 13-17, 39.
- 10 Xia Bo, Jiang Lan, Wang Sumei, *et al.*. Femtosecond laser drilling of micro-holes [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0201001.
夏 博, 姜 澜, 王素梅, 等. 飞秒激光微孔加工[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0201001.
- 11 C K Malek, V Saile. Applications of LIGA technology to precision manufacturing of high-aspect-ratio micro-components and-systems: a review[J]. Microelectronics Journal, 2004, 35(2): 131-143.
- 12 Jia Zhenyuan, Ren Xiaotao, Liu Wei, *et al.*. Rapid EDM systems for micro and small holes with high-aspect-ratio[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(12): 3055-3061.
贾振元, 任小涛, 刘 巍, 等. 大深径比微小孔快速电火花加工系统[J]. 光学精密工程, 2009, 17(12): 3055-3061.
- 13 Shao Mingdong, Guo Jiang, Sun Jiming. Technical study of electrical discharge machining to micro-hole on B₄C ceramic[J]. OME Information, 2011, 28(12): 51-56.
邵明东, 郭 疆, 孙继明. 碳化硼陶瓷电火花小孔加工精度的工艺研究[J]. 光机电信息, 2011, 28(12): 51-56.
- 14 Yu Wei, Wang Xichang, Gong Shuili, *et al.*. Rapid scanning electron beam processing technology and its potential application in aviation manufacturing industry [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, (16): 44-47.
余 伟, 王西昌, 巩水利, 等. 快速扫描电子束加工技术及其在航空制造领域的潜在应用[J]. 航空制造技术, 2010, (16): 44-47.
- 15 Zhang Wenfeng, Zhu Di. Electron beam machining and its application to the surface engineering [J]. New Technology & New Process, 2003, (8): 40-43.
张文峰, 朱 荻. 电子束加工技术及其在表面工程中的应用[J]. 新技术新工艺, 2003, (8): 40-43.
- 16 P C Priarone, S Ruffa, J S Bedolla, *et al.*. A DoE approach to hole quality evaluation in drilling of an electronbeam melted titanium aluminide[C]. Procedia CIRP, 2013. 8: 481-486.
- 17 Y Chen, K Naessens, R Baets, *et al.*. Ablation of transparent materials using excimer lasers for photonic applications [J]. Optical Review, 2005, 12(6): 427-441.
- 18 He Fei, Cheng Ya. Femtosecond laser micromachining: frontier in laser precision micromachining[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(5): 595-622.
何 飞, 程 亚. 飞秒激光微加工: 激光精密加工领域的新前沿[J]. 中国激光, 2007, 34(5): 595-622.
- 19 Gao Fei, Yuan Xiao, Cheng Guanghua, *et al.*. Applications of femtosecond laser micromachining[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(suppl): 415-418.
高 飞, 袁 孝, 程光华, 等. 飞秒激光在微加工中的应用[J]. 中国激光, 2006, 33(suppl): 415-418.
- 20 X C Wang, H Y Zheng, P L Chu, *et al.*. Femtosecond laser drilling of alumina ceramic substrates[J]. Applied Physics A, 2010, 101(2): 271-278.
- 21 D K Dasa, T M Pollock. Femtosecond laser machining of cooling holes in thermal barrier coated CMSX4 superalloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209: 5661-5668.
- 22 D Guo, K Cai, Y Huang, *et al.*. A novel anti-spatter and anti-crack laser drilling technique: application to ceramics[J]. Applied Physics A, 2003, 76: 1121-1124.
- 23 H Bian, Q Yang, F Chen, *et al.*. Scalable shape-controlled fabrication of curved microstructures using a femtosecond laser wet-etching process[J]. Materials Science and Engineering C, 2013, 33(5): 2795-2799.
- 24 J Yong, Qing Yang, Feng Chen, *et al.*. Stable superhydrophobic surface with hierarchical mesh-porous structure fabricated by a femtosecond laser[J]. Applied Physics A, 2013, 111(1): 243-249.
- 25 A N Samant, N B Dahotre. Differences in physical phenomena governing laser machining of structural ceramics[J]. Ceramics International, 2009, 35: 2093-2097.
- 26 Wang Ning. Study on laser machining process for tiny hole on synthetic corundum material[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2007, 24(1): 108-111.
王 宁. 人造宝石刚玉晶体材料的激光微孔技术研究[J]. 华东交通大学学报, 2007, 24(1): 108-111.
- 27 Wentung Chien, Shiannchin Hou. Investigating the recast layer formed during the laser trepan drilling of inconel 718 using the taguchi method [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 33(3-4): 308-316.
- 28 Wang Yuying. Study trends and future prospects of femtosecond laser precise machining[J]. OEM Information, 2007, (3): 21-24.
王玉英. 利用飞秒激光器进行精密加工的研究动向与未来展望[J]. 光机电信息, 2007, (3): 21-24.
- 29 Jiang Tao, Zhao Qingliang, Dong Zhiwei, *et al.*. Interaction mechanism of femtosecond laser and wide band-gap material[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(6): 1044-1048.
姜 涛, 赵清亮, 董志伟, 等. 飞秒激光与宽带隙材料相互作用机理研究[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(6): 1044-1048.
- 30 D K Y Low, L Li, A G Corfe. Effects of assist gas on the physical characteristics of spatter during laser percussion drilling of NIMONIC 263 alloy[J]. Applied Surface Science, 2000, 154-

- 155; 689—695.
- 31 Ye Cong, Xuanke Li, Yun Qin, *et al.*. Carbon-doped TiO₂ coating on multiwalled carbon nanotubes with higher visible light photocatalytic activity[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2011, 107: 128—134.
- 32 T Bansal, C A Durcan, N Jain, *et al.*. Synthesis of few-to-monolayer graphene on rutile titanium dioxide[J]. Carbon, 2013, 55: 168—175.
- 33 V Kiisk, T Kahro, J Kozlova, *et al.*. Nanosecond laser treatment of graphene[J]. Applied Surface Science, 2013, 276: 133—137.
- 34 G Li, L F Xia. Structural Characterization of TiC_x films prepared by plasma based ion implantation[J]. Thin Solid Films, 2001, 396: 16—22.
- 35 L Zhu, J He, D Yan, *et al.*. Titanium carbonitride thick coating prepared by plasma spray synthesis and its tribological properties [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(13): 1849—1855.
- 36 J F Moulder, W F Stickle, F E Sobol, *et al.*. Handbook of X-Ray Photoelectron Spectroscopy[M]. Eden Prairie, Minnesota: Physical Electronics Inc., 1995. 213.
- 37 A Cunha, A P Serro, V Oliveira, *et al.*. Wetting behaviour of femtosecond laser textured Ti-6Al-4V surfaces [J]. Applied Surface Science, 2013, 265: 688—696.
- 38 A D Bonis, A Galasso, N Ibris, *et al.*. Rutile microtubes assembly from nanostructures obtained by ultra-short laser ablation of titanium in liquid[J]. Applied Surface Science, 2013, 268: 571—578.
- 39 S Yoon, C A Bridges, R R Unocic, *et al.*. Mesoporous TiO₂ spheres with a nitrated conducting layer for lithium-ion batteries [J]. Journal of Materials Science, 2013, 48(15): 5125—5131.
- 40 S Zimmermann, U Specht, L Spieß, *et al.*. Improved adhesion at titanium surfaces via laser-induced surface oxidation and roughening[J]. Materials Science & Engineering A, 2012, 558: 755—760.
- 41 Li Xiaoxi, Jia Tianqing, Feng Donghai, *et al.*. The mechanism of ablation of sapphire by an ultra-short pulse laser[J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(7): 2154—2158.
- 李晓溪, 贾天卿, 冯东海, 等. 超短脉冲激光照射下氧化铝的烧蚀机理[J]. 物理学报, 2004, 53(7): 2154—2158.
- 42 G Miyaji, W Kobayashi, K Miyazaki. Femtosecond-laser-induced nanostructure formation and surface modification of diamond-like carbon film[J]. Electrochimica Acta, 2007, 53(1): 167—170.

栏目编辑: 胡冰