doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20190130001

工程陶瓷超声振动辅助下的预压应力压痕试验

张高峰,谢国广,王志刚,龚俊明,谢 慧,李景焘 (湘潭大学机械工程学院,湘潭 411105)

摘 要:提出了一种超声振动辅助加工下的预压应力压痕试验,采用 ZrO₂、95%Al₂O₃、SiC 工程陶瓷作为试验材料, 研究外部载荷对材料的加工损伤影响机理。结果表明,在无预压应力压痕过程中,3种材料的加工损伤表现出不同的 形式,如径向裂纹、边缘破损和微裂纹;在预压应力压痕过程中,不论是相同法向负载还是相同压痕深度条件下,上 述材料的加工损伤都受到了不同程度的抑制,同时证实了预压应力会加大压痕过程的法向力,减小压痕深度。在超 声振动辅助下的预压应力压痕试验过程中,由于超声振动的作用机理,有效减小了压痕过程的法向力、增大了压痕深 度,有利于工程陶瓷的高效低损伤加工。

关键词: 预压应力; 超声振动; 加工损伤; 法向载荷; 压痕深度 中图分类号: TG175 **文献标志码:** A

文章编号:1007-9289(2019)03-0154-08

Compressive Prestress Indentation Experiments of Engineering Ceramic Under Ultrasonic Virbration

ZHANG Gaofeng, XIE Guoguang, WANG Zhigang, GONG Junming, XIE Hui, LI Jingtao (School of Mechanical Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

Abstract: To explore the machining damage mechanisms of engineering ceramics under the effect of the external loads. Ultrasonic assisted indentation experiments of engineering ceramics under compressive pre-stress which performed with the materials of ZrO₂, 95% Al₂O₃ and SiC ceramics were proposed. Experimental results show that the machining damages of three materials present different forms during the indentation process without compressive pre-stress, respectively, such as radial crack, edge fracture and micro cracks. However, in the indentation process under compressive prestress, the machining damages are restrained when the sample manufactured with the same condition. Meanwhile, the normal forces increase and the indentation depths decrease. Moreover, in the ultrasonic assisted indentation process under compressive prestress, the normal forces decrease effectively and the indentation depths increase due to the effect of ultrasonic vibration. Hence, this machining method can make the engineering ceramic manufacture with high efficiency and a few machining damages retained.

Keywords: compressive prestress; ultrasonic vibration; machining damages; normal force; indentation depth

0 引 言

工程陶瓷因其具有良好的综合性能,如高强 度、高脆性、高硬度、耐磨损、耐高温和抗腐蚀 等,广泛应用于机械、电子设备、航空航天、汽 车、军事等领域^[1-2]。然而,传统的磨削加工效率 低且成本高,且受陶瓷材料本身硬度和脆性较高 所限制,在加工表面及亚表面很容易造成损伤, 如残余应力、粉末层、微裂纹等。这将严重影响

收稿日期: 2019-01-30; 修回日期: 2019-05-12

通信作者: 张高峰 (1971—), 男 (汉), 教授, 博士; 研究方向: 难加工材料的切削与磨削加工; E-mail: 378427846@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金 (91860133, 51775469); 湖南省-湘潭市联合基金 (2017JJ4051)

引用格式: 张高峰, 谢国广, 王志刚, 等. 工程陶瓷超声振动辅助下的预压应力压痕试验[J]. 中国表面工程, 2019, 32(3): 154-161. ZHANG G F, XIE G G, WANG Z G, et al. Compressive prestress indentation experiments of engineering ceramic under ultrasonic virbration[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(3): 154-161.

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (91860133, 51775469) and Hunan Province-Xiangtan City Joint Fund (2017JJ4051)

陶瓷材料的表面性能,并且降低陶瓷部件强度, 甚至造成部件的失效^[3-5]。因此,研究如何提高陶 瓷加工的表面质量和加工效率,改善表面损伤具 有重要的理论和实用价值。

针对工程陶瓷上述的加工难点,众多国内外 学者做了大量的研究,主要分为两个方面:一是 改变陶瓷材料本身性质,主要致力于研究制备新 型陶瓷材料,如通过氧化锆相变来增韧陶瓷,加 入陶瓷纤维来强化复合材料^[6-8];加入适当的活性 炭成孔剂提高陶瓷性能^[9];激光冲击强化陶瓷表面 晶粒优化表面性能等^[10]。二是开发新的加工技术 和加工方法,主要包括高速/超高速、低进给深磨 削等高速高效磨削加工方法^[11-13]、电解加工^[14]、超声 加工^[15-16]、激光加工^[17-18]、等离子加工^[19]、磨 料水射流切割^[20]等特种加工及其复合加工方法^[21-23]。

预压应力加工即应用适当的预压应力于工件 上,辅助材料加工的新型加工技术,能够有效地 改善工程陶瓷的表面/亚表面损伤。径向超声振动 加工能在很大程度上地提高材料的去除率,对于 降低切削力起到良好的促进效果。在此基础上, 为了分析超声振动下,外部载荷对陶瓷材料裂纹 扩展的影响机理,以及陶瓷材料的强度、硬度及 韧性等材料参数对裂纹扩展的影响,文中基于预 压应力和超声振动的辅助加工方法,通过研究工 件表面在加工后的微观特性,以证实预压应力和 超声振动共同辅助加工工程陶瓷材料的优越性, 为工程陶瓷的高效低损伤加工提供试验基础。

1 材料与方案

1.1 试验材料

试验选用 ZrO2、95%Al2O3、SiC 工程陶瓷,

在其表面进行超声振动辅助下预压应力压痕试验 研究。试件的规格均为 10 mm×10 mm×10 mm。 3 种陶瓷材料主要物理性能参数见表 1。

表1 3种陶瓷的物理性能参数

Physical properties	ZrO_2	95%Al ₂ O ₃	SiC
Density/(g·cm ⁻³)	6.05	3.7	2.3
Hardness/HRA	88.5	≥86	≥90
Elastic Modulus/GPa	210	300	420
Poisson's ratio	0.3	0.2	0.14
Compressive strength/MPa	2000	2500	2000
Bending strength/MPa	950	≥300	500-800
Fracture toughness/(MPa \cdot m ^{1/2})	10	3.5	3.5

1.2 试验材料预处理

对陶瓷材料进行预处理,以便后期试验的进 行和试验结果的表征。

(1)表面磨削:试验工件的磨削加工依次为半 精磨和精磨,进给量设定为 5 μm 和 1 μm,试验 仪器采用高精密平面磨床 MGK7120X60/1。

(2) 表面抛光:磨削的工件表面需进行抛光处 理,采用晶粒度分别为 6.5、2 和 0.5 μm 的金刚石研 磨膏依次抛光,试验仪器采用 Napopoli-100 抛光机。

(3) 清洗:将抛光后的工件在无水乙醇中,超 声清洗 30 min,待干燥后,采用超景深显微镜 VHX-2000观察清洗后的陶瓷表面,显微组织如 图 1 所示。

从图 1 中 3 种陶瓷显微组织可见, ZrO2 陶瓷 具有良好的致密性; 95%Al₂O₃ 陶瓷分布有较多且 更大的气孔,且无规则;碳化硅陶瓷具有较大晶 粒尺寸,且有大量白色的硅游离分布在晶粒之间。



(a) ZrO₂

图 1 3 种工程陶瓷的显微组织 Fig.1 Microstructures of 3 types of engineering ceramics 156

(1)非预压应力下压痕试验。针对材料所具有的物理性能不同,研究3种不同工程陶瓷材料在相同压痕载荷80N的条件下,各自的表面损伤的机理。

(2) 预压应力条件下压痕试验。将预压应力应 用于工程陶瓷压痕试验工件上,研究压痕表面损 伤的机理,试验参数如表 2 所示。

(3) 有无预压应力条件下超声振动辅助压痕对 比试验。此部分用于研究非预压应力以及预压应 力条件下超声振动辅助压痕过程对工程陶瓷压痕 表面损伤的影响,试验参数如表 3 所示。

表 2 预压应力下工程陶瓷的压痕试验技术参数

 Table 2
 Parameters of indentation experiments for engineering ceramics under pre-stress

Parameters	Values	
Load time/s	20	
Depth/µm	20,25,30,35	
Normal load/N	40,60,80,100,120	
Pre-stress/MPa	0,100,200,400	

表 3 预压应力下工程陶瓷超声振动压痕试验技术参数

Table 3 Parameters of ultrasonic assisted indentation experiments for engineering ceramics under pre-stress

Parameters	Values	
Load time/s	20	
Depth/µm	2-20	
Pre-stress/MPa	0,100,200,400	
Ultrasonic vibration parameters	<i>A</i> =3 μm, <i>f</i> =20 kHz	

图 2 为自建的超声振动试验平台,使用 XYZ 轴微调平台移动金刚石维氏压头,配合测力 仪和千分表,准确地控制金刚石维氏压头与陶瓷 材料表面的接触,以及维氏压头下降的深度,进 而控制压痕的深度。通过拧紧预应力夹具,推动 V型块,给工件的4个侧面施加一定的预压应 力,在压痕试验中,将Kistler测力仪安装在预应 力夹具下,测量和控制在压痕过程中法向载荷变 化。将超声发生器、超声变能器与金刚石维氏压 头相连,从而产生超声振动,同时通过振动传感 器对压头和工件接触过程中产生的振动实时监测。

图 3 为正四棱锥金刚石的维氏压头压痕加工 仪器,两面夹角为 136°。压痕试验在室温下进 行,每组参数测试 2 至 3 次。压痕后的工件表面 采用无水乙醇超声清洗 30 min,并使用超景深显 微镜观察表面形貌。



1-Transducer, 2-Horn, 3-Dial indicator, 4-Ceramic test piece, 5-Kistler dynamometer, 6-Guide, 7-Ultrasonic generator, 8-XYZ fine tuning platform, 9-Vickers diamond indenter, 10-V-clamp, 11-Prestressed fixture, 12-Computer, 13-Workbench



Fig.2 Schematic diagram of pre-stressed ultrasonic vibration indentation experimental device





2 结果与讨论

2.1 材料性能的影响分析

图 4 为压痕载荷为 80 N 情况下,非预压应力 压痕试验后的陶瓷材料表面微观形貌。从图中可 以看出,陶瓷材料的压痕表面出现了多种不同损 伤形式,主要表现为在压痕角的径向裂纹,压痕 边沿的破碎和剥落,以及微裂纹等形式。图 4(a) 为 ZrO2 陶瓷典型的维氏压痕形貌,较清晰完整, 其主要的损伤形式为 4 个角点向外延伸的径向裂 纹,同时由于 ZrO2 陶瓷良好的韧性,压痕载荷卸 载后的 4 个边存在一定的回弹。图 4(b)为 95% Al₂O₃陶瓷表面压痕,存在较多的晶粒碎裂、边沿 破碎,但轮廓四边的裂纹扩展损伤形式并不明 显。图 4(c)为 SiC 陶瓷表面压痕,轮廓不明显, 存在着边沿破碎、裂纹扩展、晶粒碎裂及剥落等 多种损伤现象。试验结果表明,相对其他两种陶 瓷,ZrO2陶瓷表面完整性优异,表现出了更好的 加工性能,主要是由于其具有较好的韧性。



 ZIO_2 (0) 9:

 $) 95 / 0 Al_2O_3$

图 4 不同工程陶瓷的压痕表面形貌

Fig.4 Micromorphologies of indentation surfaces on engineering ceramics

从图 4 可以看出,对于 SiC 和 95%Al₂O₃ 陶 瓷材料的压痕裂缝,其扩展的方式是不对称且随 机的,这主要由材料晶粒的尺寸大小与分布、材 料致密度、孔隙以及在材料中的杂质等决定的^[24]。 在压痕试验过程中,由于陶瓷材料表面较多的杂 质、气孔,将导致金刚石压头与陶瓷相接触的局 部区域致密化,接触应力无法释放进而导致应力 集中,局部接触区域内会因此发生开裂、破碎的 现象,最终会扩散到压痕边沿引起边沿断裂、破 碎、晶粒剥落以及随机和高度不对称的微裂纹扩 展等损坏形式^[24]。因此,裂纹扩展的长度并不能 通过测量或形貌观察来辨别。

2.2 预压应力的影响分析

B. R. Lawn^[25]提出脆性材料 Vickers 压痕中位/ 径向裂纹系统如图 5 所示,主要由弹性和残余应 力分量两部分所决定,但径向裂纹的长度 *c* 由残 余应力所决定,即:

$$c = c_{+}^{R} = (\chi_{\rm r} P/K_{c})^{2/3} P \ge P^{*}$$
 (1)

式中, *χ*_r为残余应力场无量纲压头/试样常数, *P* 为施加载荷值 (N), *P**为临界载荷值, *K_c* 为断裂韧性 (MPa·m^{1/2})。

进而提出了针对于陶瓷材料径向裂纹系统 (Radial crack)的断裂韧性公式:

$$(K_c/Ha^{1/2})(H/E)^{0.4} = 0.028(c_+^R/a)^{-3/2}$$
 (2)

式中*H*为材料维氏硬度 (GPa), *a* 为压痕径向 长度 (mm), *E* 为弹性模量 (GPa)。

对于特定的压痕系统,已经通过试验证明 χ 不



Fig.5 Configuration of media/radial crack

会随负载或裂缝尺寸的变化而改变^[26],但将_{Xe}和 _{Xr}视为可调参数,如果确定_{Xe}和_{Xr}的相对值,即可 确定裂缝的长度。

D. B. Marshall^[27,28] 提出对材料施加一个预压 应力 σ_s , $\chi_e 和 \chi_r$ 会产生如下变化:

$$\chi = \chi_e + \chi_r \tag{3}$$

$$\chi_{\rm e}/\chi_r = 3 - \Delta \tag{4}$$

$$\Delta = \left\{ 256 \chi_r(\pi \Omega)^{3/2} / K_c^4 \right\}^{1/3} \sigma_s P^{1/3}$$
(5)

在文中预压应力压痕试验中,相当于在陶瓷 表面上施加一种压应力,即预压应力 σ_s 为负值, 因此 χ_e/χ_r 的比值会增加,从而 χ_r 的相对值会减 少,最终导致径向裂纹长度 c 以及压痕径向长度 a 的减少。

压痕深度 $d = a/tan \Psi$,结合公式1和2可得:

$$d = \left[(K_c/H) (H/E)^{0.4} / 0.028 \right]^{6/7} (\chi_r P/K_c)^{6/7}$$
 (6)

因此可知,预压应力的施加导致_X值的减少,不仅会造成压痕径向长度 *a* 的减小,也会抑制压痕的深度。

2.2.1 相同法向载荷下的影响

图 6 为 P=120 N 时预压应力 ZrO₂ 陶瓷加工表 面形貌,从图中可以看出,轮廓的 4 个角出现了 典型的径向裂纹,不断向外扩展,但其裂纹的长 度 c 随着施加的预压应力值的增加而减小;同时 压痕径向长度 a 也会有所减小。图 7(a) 为不同法 向载荷下裂纹长度 c 的试验结果,式 1 表示为为 线性关系,在较小范围内裂纹长度与压痕法向载 荷的比值趋近于线性关系,由χr所决定。可以看 出,预压应力值的增加会导致斜率(裂纹长度/法 向载荷)的降低,验证了随着预压应力施加会减小 χr的值。

在压痕加工过程中,材料内部的第一主应力 始终为拉应力,预压应力的施加会减小压痕过程 中的拉应力^[29],因此减小径向裂纹长度 c 以及陶



图 6 载荷 120 N 下预压应力 ZrO2 陶瓷压痕表面形貌

Fig.6 Micromorphologies of indentation surfaces on pre-stressed ZrO_2 ceramic under the load of 120 N



图 7 不同预压应力下的 ZrO2 陶瓷压痕表面裂纹平均长度

Fig.7 Average length of micro cracks on ZrO₂ ceramic under different values of prestresses

瓷表面的加工损伤;但同样也会降低其实际压痕 深度。另外,由图6可以看出压痕的边缘存在一 定内凹趋,且其程度会随预应力值的增大而增 大,这主要是由 ZrO₂ 陶瓷良好的韧性这一性质所 决定的。

2.2.2 相同压痕深度的影响分析

图 8 为压痕深度 25 μm 预压应力 ZrO2 陶瓷的 压痕形貌,可以看出,其表面损伤同样为典型的 径向裂纹,裂纹的长度 c 随施加的预压应力值的 增加而减小,即提高预压应力能更好地抑制表面 裂纹扩展。由图 7(b) 看出,图像直线斜率会随预 压应力增大而减小,即_λr的值减小,但压制压痕 深度相同,由式 6 可知试验过程中所产生的法向 载荷值更大。图 8 所反映的图形斜率实质上是裂 纹长度和压痕深度压痕试验过程中,其实际压痕 深度一致,但在相同载荷压痕试验中,其实际深 度会发生变化,即随着预压应力的增加,压痕深 度会减少。



图 8 压痕深度 25 μm 下预压应力 ZrO2 陶瓷压痕表面形貌 Fig.8 Micromorphologies of indentation surfaces of pre-stressed ZrO2 ceramic with the indentation depth of 25 μm

2.3 超声振动的影响分析

如图 9 所示,超声振动的施加会使得金刚石 压头在进给方向上产生一个微小的波动,导致与 加工表面产生一个挤压与分离的过程,挤压的过 程加深压痕深度,从而增大表面压痕的尺寸;而 分离的过程会改善金刚石压头与陶瓷相接触的局



```
图 9 超声加工过程中金刚石维氏压头的运动轨迹
```

Fig.9 Movement path of the Vickers diamond indenter during ultrasonic machining

部区域致密化的情况,释放接触应力进而减少应 力集中,减少开裂、破碎等损伤,改善表面加工 质量。

对3种材料在非预压应力条件下进行超声振动辅助压痕试验,压痕深度为10μm,压痕表面 形貌如图 10所示。可以看出,3种陶瓷表面压痕 轮廓都较完整,且表面压痕的尺寸都得到了明显 增大;而表面损伤主要为边沿剥落和破碎的形 式,并未出现径向裂纹以及边沿微裂纹。





Fig.10 Micromorphologies of ultrasonic assisted indentation surfaces on engineering ceramics

图 10(c) 为 SiC 陶瓷的超声振动辅助压痕形貌 图,可以看出,尽管 SiC 陶瓷脆性较高,但其压 痕轮廓较完整,没有明显的裂纹和微裂纹扩展等 损伤形式,相比无预压应力压痕(如图 4(c)),表 面质量改善效果明显。因此,进一步证明了针对 脆性材料,超声振动加工的优越性,相比于普通 微加工,采用超声振动加工技术可以获得很好的 表面加工质量^[30-32]。

图 11 是 SiC 陶瓷在预压应力和超声振动共同 加工深度为 14 μm 时的压痕表面形貌。可以看 出,压痕表面主要表现为边沿剥落和破碎的损伤 形式,并且增大预压应力,表面的损伤逐渐减 少。进一步证明了在工程陶瓷超声振动加工下, 预压应力的应用能更好地改善陶瓷表面加工损 伤。综上所述,预压应力和超声振动相结合的辅 助加工方法能实现脆性材料高效率高质量的加工。



图 11 SiC 陶瓷在超声振动与预压应力共同作用下的压痕表面 形貌

Fig.11 Micromorphologies of ultrasonic assisted indentation surfaces on SiC ceramic under different values of pre-stress

2.4 压痕法向载荷

针对不同压痕参数下的普通压痕试验,统计 其法向载荷值,并作出压痕深度与法向载荷的对 应曲线图,如图 12 所示。



图 12 不同预压应力下普通压痕的法向载荷

Fig.12 Normal load of indentation process under different values of pre-stress

图 12 分别给出了 ZrO2 陶瓷和 95%Al₂O3 陶 瓷法向载荷值随压痕深度的变化趋势。由图可 知,在加工相同压痕深度的过程中所产生的法向 载荷,ZrO2 陶瓷的值要大于 95%Al₂O3 陶瓷,这 主要是因为材料的硬度对压痕法向载荷值的大小 有较大的影响,由表 1 可知,ZrO2 陶瓷的硬度相 比于 95%Al₂O3 陶瓷要大。同时,预压应力的应 用会提高所产生的法向载荷,与0 MPa 预压应力 试验相比,当预压应力值达到 400 MPa 时的法向 载荷值提高了 15%~25%。

图 13 为超声振动和预压应力共同加工压痕下 法向载荷值随压痕深度的变化趋势,可见会在一 定程度上的减小 ZrO2 陶瓷与 95%Al2O3 陶瓷的法 向载荷值。同时,在 400 MPa 预压应力的超声振 动试验过程中,比不施加超声振动的情况下所产 生的法向载荷降低了 25%~40%。法向载荷的降低 有助于切削加工过程中材料的去除,可以极大提 高加工的效率。



图 13 不同预压应力下超声振动压痕的法向载荷

Fig.13 Normal load of ultrasonic assisted indentation process under different values of pre-stress

3 结 论

通过在 ZrO₂、95%Al₂O₃、SiC 这 3 种工程陶 瓷表面进行预压应力、超声振动及预压应力下的 超声振动的压痕试验,可以得到以下结论:

(1)由于受工程陶瓷的物理、力学性能及其微观结构的影响,在压痕试验过程中,会造成多种表面损伤现象,主要表现为在压痕角的径向裂纹,压痕边沿的破碎和剥落,并且在压痕表面会发生晶粒剥落和破碎以及微裂纹等微细损伤现象。

(2) 在相同法向载荷情况下,预压应力压痕试验结果表明,预压应力会抑制径向裂纹的扩展,减少陶瓷表面的加工损伤;同时也会降低其压痕的尺寸和实际压痕深度。

(3) 在超声振动的辅助加工的情况下,3 种陶 瓷表面压痕轮廓都较完整,且表面压痕的尺寸都 得到了明显增大。且由于较浅的压痕深度,陶瓷 表面损伤主要为边沿剥落和破碎的形式,并未出 现径向裂纹以及边沿微裂纹。

(4)结合预压应力和超声振动两者的辅助加工 方法,可以对工程陶瓷等脆性材料进行高效率和 高质量的加工。

参考文献

- [1] AGARWAL S, RAO P V. Experimental investigation of surface/subsurface damage formation and material removal mechanisms in SiC grinding[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 48(6): 698-710.
- [2] XIE J, LI Q, SUN J X,et al. Study on ductile-mode mirror grinding of SiC ceramic freeform surface using an elliptical torus-shaped diamond wheel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 222: 422-433.
- [3] MALKIN S, HWANG T W. Grinding mechanisms for ceramics[J]. CIRP Annals, 1996, 45(2): 569-580.
- [4] MAMALIS A G, KUNDRAK J, HORVATH M, et al. On the precision grinding of advanced ceramics[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2002, 20(4): 255-258.
- [5] ZHANG B, ZHENG X L, TOKURA H, et al. Grinding induced damage in ceramics[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 132(1-3): 353-364.
- [6] GARVIE R C, HANNINK R H, PASCOE R T. Ceramic steel[J]. Nature, 1975, 258: 703-704.
- [7] KUO C W, SHEN Y H, YEN F L, et al. Phase transformation behavior of 3mol% yttria partially-stabilized ZrO2(3Y-PSZ) precursor powder by an isothermal method[J]. Ceramics International, 2014, 40(2): 3243-3251.
- [8] WANG C H, WANG M C, DU J K, et al. Phase transformation and nanocrystallite growth behavior of 2mol% yttriapartially stabilized zirconia (2Y-PSZ) powders[J]. Ceramics International, 2013, 39(5): 5165-5174.
- [9] HU Y, XIAO Z, WANG H P, et al. Fabrication and characterization of porous CaSiO₃ ceramics[J]. Ceramics International, 2019, 45(3): 3710-3714.
- [10] SHUKLA P, ROBERTSON S, WU H, et al. Surface engineering alumina armour ceramics with laser shock peening[J]. Materials & Design, 2017, 134: 523-538.
- [11] HUANG H, LIU Y C. Experimental investigations of machining characteristics and removal mechanisms of advanced ceramics in high speed deep grinding[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(8):

811-823.

- [12] DENKENA B, BREIDENSTEIN B, BUSEMANN S, et al. Impact of hard machining on zirconia based ceramics for dental applications[J]. Procedia CIRP, 2017, 65: 248-252.
- [13] RAMESH K, YEO S H, GOWRI S, et al. Experimental evaluation of super high-speed grinding of advanced ceramics[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 17: 87-92.
- [14] SARWAR M A U, DAHMARDEH M, NOJEH A, et al. Batch-mode micropatterning of carbon nanotube forests using UV-LIGA assisted micro-electro-discharge machining[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(11): 2537-2544.
- [15] DING K, FU Y C, SU H H, et al. Experimental studies on drilling tool load and machining quality of C/SiC composites in rotary ultrasonic machining[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(12): 2900-2907.
- [16] POPLI D, GUPTA M. A Chipping reduction approach in rotary ultrasonic machining of advance ceramic[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(2): 6329-6338.
- [17] ADALARASAN R, SANTHANAKUMAR M, RAJMO-HAN M. Optimization of laser cutting parameters for Al6061/SiCp /Al2O3 composite using grey based response surface methodology (GRSM)[J]. Measurement, 2015, 73: 596-606.
- BANIK S R, KALITA N, GAJRANI K K, et al. Recent trends in laser assisted machining of ceramic materials[J].
 Materials Today: Proceedings, 2018, 5(9): 18459-18467.
- [19] SALONITIS K, VATOUSIANOS S. Experimental investigation of the plasma arc cutting process[J]. Procedia CIRP, 2012(3): 287-292.
- [20] AHMED D H, NASER J, DEAM R T. Particles impact characteristics on cutting surface during the abrasive water jet machining: Numerical study[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 232: 116-130.
- [21] MOHAMMADI H, POYRAZ H, RAVINDRA D, et al. Surface finish improvement of an unpolished silicon wafer using micro-laser assisted machining[J]. International Journal of Abrasive Technology, 2015, 70: 107-121.
- [22] MOHAMMADI H, RAVINDRA D, KODE S K, et al. Experimental work on micro laser-assisted diamond turning of

silicon(111)[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2015,19: 125-128.

- [23] CHAREE W, TANGWARODOMNUKUN V, DUMKUM C. Ultrasonic-assisted underwater laser micromachining of silicon[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 231: 209-220.
- [24] FAISAL N H, AHMED R, PRATHURU A K, et al. An improved Vickers indentation fracture toughness model to assess the quality of thermally sprayed coatings[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2014, 128: 189-204.
- [25] LAWN B R, EVANS A G, MARSHALL D B. Elastic/plastic indentation damage in ceramics: The media/radial crack system[J]. Journal of American Ceramic Society, 1980, 63(9-10): 574-581.
- [26] LAWN B R, FULLER E R. Equilibrium penny-like cracks in indentation fracture[J]. Journal of Materials Science, 1975, 10: 2016-2024.
- [27] MARSHALL D B, LAWN B R, CHANTIKUL P. Residual stress effects in sham contact cracking: Part 2 strength degradation[J]. Journal of Materials Science, 1979, 14(9): 2225-2235.
- [28] MARSHALL D B, LAWN B R. Residual stress effects in sharp contact cracking: Part 1 Indentation fracture mechanics[J]. Journal of Materials Science, 1979, 14(8): 2001-2012.
- [29] CONWAY J C, KIRCHNER H P. The mechanics of crack initiation and propagation beneath a moving sharp indentor[J]. Journal of Materials Science, 1980, 15: 2879-2883.
- [30] WANG J J, ZHA H T, FENG P F, et al. On the mechanism of edge chipping reduction in rotary ultrasonic drilling: A novel experimental method[J]. Precision Engineering, 2016, 44: 231-235.
- [31] ALAVI S H, HARIMKAR S P. Evolution of geometric and quality features during ultrasonic vibration-assisted continuous wave laser surface drilling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 232: 52-62.
- [32] WANG J J, FENG P G, ZHANG J F, et al. Modeling the dependency of edge chipping size on the material properties and cutting force for rotary ultrasonic drilling of brittle materials[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 101: 18-27.