

文章编号: 1009-3087 (2007) 01-0113-05

微 - 纳米复合陶瓷超声振动磨削的塑性 - 脆性转变特征研究

吴 雁^{1,2}, 孙爱国², 朱训生¹, 赵 波¹

(1. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200030; 2. 中北大学 机械工程学院, 山西 太原 030051)

摘 要: 基于工件超声振动磨削的单磨粒运动模型, 建立超声振动磨削单磨粒最大切削厚度 a_{gmax} 公式; 基于压痕断裂力学, 给出硬脆材料超声振动磨削塑性 - 脆性转变临界条件, 进行超声振动磨削与普通磨削对比试验, 应用 SEM 和 AFM 分析陶瓷磨削表面微观形貌特征, 重点研究磨削参数对其塑性 - 脆性转变特征的影响。研究结果表明, 砂轮平均磨粒尺寸是影响塑性 - 脆性转变最为主要的因素, 砂轮速度对其影响次之, 磨削深度对塑性 - 脆性转变的影响最小; 得出只有当 a_{gmax} 小于临界切削深度 a_{gc} 时, 才能实现硬脆材料塑性域磨削的重要结论。

关键词: 超声; 振动磨削; 微 - 纳米复合陶瓷; 塑性 - 脆性转变; 临界切削深度

中图分类号: TG580. 61

文献标识码: A

Brittle-ductile Transition of Micro-nano Composite Ceramics Using Ultrasonic Vibration Grinding

WU Yan^{1,2}, SUN Ai-guo², ZHU Xun-sheng¹, ZHAO Bo¹

(1. School of Mechanical and Power Eng., Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai 200030, China; 2. School of Mechanical Eng., North Univ. of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The motion model of the contact between abrasive particle and workpiece in two-dimension ultrasonic vibration grinding was analyzed, the maximum cutting depth of a grain were obtained. Based on indentation fracture mechanics, the critical condition of ultrasonic vibration grinding brittle-ductile transition was analyzed theoretically. The ultrasonic vibration and conventional diamond grinding of $Al_2O_3 - ZrO_{2(n)}$ ceramics were performed in order to investigate the effect of ultrasonic vibration grinding conditions on the brittle-ductile transition mechanism, the micro-topography of the grinding surface were observed by AFM and SEM. Experiment results indicated that only when the maximum cutting depth of a grain less than critical depth, ductile regime grinding of ceramics can be realized, the grit size, workpiece velocity and grinding depth can affect the brittle-ductile transition.

Key words: ultrasonic; vibration grinding; micro-nano composite ceramics; brittle-ductile transition; critical depth of cut

1990年后,硬脆材料精密超精密加工机理研究主要集中在塑性切削领域,Zhang Bi^[1-2]等人的研究表明,硬脆材料裂纹或破碎的形成是由于加工过

程中形成的拉应力或剪切应力的共同作用所致;1991年美国Bifano^[3]基于能量优先假说建立了硬脆材料不产生裂纹时的临界切削深度模型;日本的Namba^[4]等人提出,硬脆材料塑性 - 脆性转变条件只与砂轮的磨粒尺寸,砂轮的每转进给量及工件材料有关,而与磨削深度无关。但是,仍有许多资料表明,磨削深度是影响塑性 - 脆性转变的一个较为重要的因素。许多研究者根据压痕断裂力学理论研究

收稿日期: 2006 - 06 - 12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50475060); 河南省创新人才基金资助项目 (省重大项目 0421001200)

作者简介: 吴 雁 (1970 -), 女, 博士生。研究方向: 硬脆材料超精密加工技术。

了切削从塑性到脆性的转变模型,研究表明,除了法向载荷外,塑性到脆性的转变也取决于所用机床的刚性、刀具刀尖圆弧半径、刀具前角、材料结晶取向以及切削的方向^[5-7]。作者所在课题组在对工程陶瓷超声加工中塑性-脆性转变特征^[8,9]的研究中发现,由于超声复合加工和普通加工的材料去除机理不同,在塑性域超声振动加工中,表面层成形的许多关键问题尚不清楚,制约了工程陶瓷精密超精密加工的实现。

由于磨削过程的复杂性,对于硬脆材料磨削过程中的脆塑转变机理这一问题,人们至今还没有一个统一的认识。作者基于陶瓷压痕断裂力学,根据超声振动磨削加工特点,建立超声振动磨削的塑性-脆性转变临界条件,进行微-纳米复合陶瓷脆塑磨削对比试验,采用 SEM 和 AFM 分析研究微纳米复合陶瓷磨削表面微观形貌特征,对其塑性-脆性转变机理进行理论与试验研究。

1 硬脆材料超声振动磨削的塑性-脆性转变临界条件

1.1 硬脆材料的临界切削深度模型

基于压痕断裂力学的单磨粒临界切削深度模型^[10]为:

$$a_{gc} = \text{ctg}(\alpha_0/2) \sqrt{\frac{2}{N} \left(\frac{K_d}{H} \right)^2} \quad (1)$$

其中,理想金刚石磨粒的顶角 $\alpha_0 = 90^\circ$; 综合系数 $N = (1.0 \sim 1.6) \times 10^4$; 为压头的几何因子, $N = 1.8544$; K_d 为断裂韧性, $\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$; H 为材料显微硬度, MPa 。

1.2 超声振动磨削的单磨粒最大切削厚度模型

超声振动磨削切削层平均体积等于单位时间内被砂轮切去的脆性材料体积与单位时间内砂轮表面参加工作的磨刃数之比:

$$\frac{\bar{a}_g \bar{b}_g l_s}{v_s b N_d} = \frac{v_w a_p b}{v_s b N_d} \quad (2)$$

式中, \bar{a}_g 为每一工作磨刃的平均切削厚度; \bar{b}_g 为每一工作磨刃的平均切削宽度; l_s 为砂轮与工件的接触长度^[11], $l_s = (a_p d_{sc})^{1/2}$; v_w 为工作台的往复运动速度, m/s ; a_p 为磨削深度, mm ; b 为磨削宽度, mm ; v_s 为砂轮速度, m/s ; N_d 为砂轮动态有效磨刃数, mm^{-2} 。

超声振动磨削是在平面磨削机床 GTS6016 上,通过超声波发生器驱动换能器-变幅杆装置,在垂直于砂轮线速度方向上在工件上施加超声振动。分

析表明,超声振动磨削单磨粒单位时间内的磨削宽度近似为 $\bar{b}_g = \bar{b}_{pg} + A$ (见图 1), A 为与砂轮线速度方向垂直的超声振动的振幅。

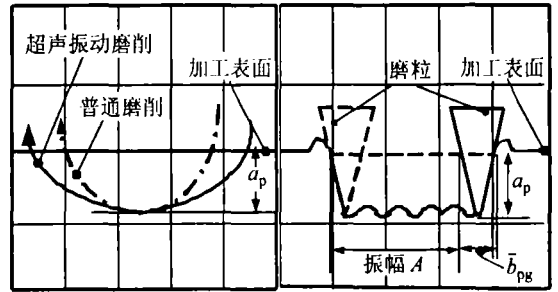


图 1 工件超声振动磨削与普通磨削的单磨粒运动模型对比图

Fig 1 A grain motion model of both conventional grinding and ultrasonic vibration grinding

Shaw^[12]等人认为,普通磨削过程中单颗磨粒平均切削宽度与磨粒的平均切削厚度之比是一个常数,即 $\bar{b}_{pg} = C \cdot \bar{a}_{pg}$, 公式 (2) 整理得:

$$C \cdot v_s N_d \bar{a}_g \bar{a}_{pg} + A \cdot v_s N_d \bar{a}_g - v_w \frac{\bar{a}_p}{N d_{sc}} = 0; \quad (3)$$

$$\bar{a}_g = \frac{v_w (a_p d_{sc}^{-1})^{0.5}}{C \cdot v_s N_d \bar{a}_{pg} + A \cdot v_s N_d}$$

由公式 (2) 可得出普通磨削的 (即无振幅 A 的影响) 每一工作磨刃的平均切削厚度:

$$\bar{a}_{pg} = \left(\frac{v_w}{v_s N_{pd} C} \frac{\bar{a}_p}{N d_{sc}} \right)^{1/2} \quad (4)$$

其中,动态有效磨刃数 N_d 为^[13]:

$$N_d = A_g (c_1)^{2/3} \left(\frac{2}{k_s} \right)^{1/3} \left(\frac{v_k + v_w}{v_s} \right)^{1/3} \left(\frac{a_p}{d_{sc}} \right)^{1/6} \quad (5)$$

式中, v_s 为与砂轮线速度方向垂直的超声振动速率; A_g 为与静态磨刃数有关的比例系数近似为 1.2; c_1 为与磨刃密度有关的系数, mm^{-3} 。

将公式 (4), (5) 代入公式 (3) 可求解超声振动磨削单磨粒的平均切削厚度 \bar{a}_g , 由 $a_{gmax} = 2\bar{a}_g$, 可求出超声振动磨削的单磨粒最大切削厚度 a_{gmax} 。由压痕断裂力学,当单磨粒最大切削厚度 a_{gmax} 与临界切削深度 a_{gc} 满足关系 $a_{gmax} < a_{gc}$ 时,硬脆材料可实现塑性域加工, $a_{gmax} > a_{gc}$ 时,材料以脆性断裂模式被去除。

2 工件施振超声振动磨削试验

磨削试验条件为:

- 1) 磨削材料

$\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_{2(n)}$ 微-纳米复合陶瓷;断裂韧性

$7.8 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$;维氏硬度 23 GPa 。

2)砂轮修整

SiC 砂轮修形,细颗粒磨料氧化铝磨块修锐, $v_s = 26.6 \text{ m/s}$,磨削深度 $10 \mu\text{m}$ /行程,干磨。

3)金刚石砂轮

砂轮规格 $D_o \times B \times D_i$ 为 $350 \text{ mm} \times 35 \text{ mm} \times 127 \text{ mm}$;金刚石砂轮粒度 $270^\#$, W10, W5;树脂结合剂,浓度 100%。

4)超声波振动

超声波发生器功率为 60 W ;振幅 A 为 $10.22 \mu\text{m}$;振频为 19.356 kHz ;

5)工序

半精加工:砂轮平均磨粒尺寸 $w = 40 \mu\text{m}$, $v_s = 26.6 \text{ m/s}$, $v_w = 0.2, 0.084 \text{ m/s}$,磨削深度 $1 \sim 10 \mu\text{m}$;

精密加工:砂轮平均磨粒尺寸 $w = 10 \mu\text{m}$, $v_s = 26.6 \text{ m/s}$, $v_w = 0.084 \text{ m/s}$,磨削深度 $1, 2 \mu\text{m}$;

超精密加工:砂轮平均磨粒尺寸 $w = 5 \mu\text{m}$, $v_s = 26.6 \text{ m/s}$, $v_w = 0.084 \text{ m/s}$,磨削深度 $1 \mu\text{m}$,干磨。

用 JJI-B 型三参数表面粗糙度测量仪测量磨削表面粗糙度,用 CSPM2000 型扫描探针显微镜 (AFM)和 JSM-5610LV 型扫描电镜 (SEM)对磨削表面进行观察和检测, $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_{2(n)}$ 微-纳米复合陶瓷两种磨削方式下的单磨粒最大切削厚度值见表 1。

表 1 不同粒度的砂轮的单颗磨粒最大切削厚度

Tab 1 The maximal cutting depth of a grain for diamond wheel

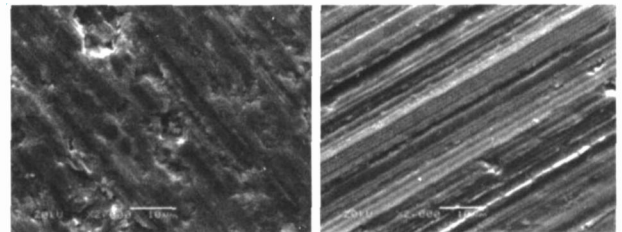
磨粒平均尺寸 / μm	单磨粒最大切削厚度值 $a_{\text{gmax}} / \mu\text{m}$							
	$a_p = 1 \mu\text{m}$		$a_p = 2 \mu\text{m}$		$a_p = 4 \mu\text{m}$		$a_p = 6 \mu\text{m}$	
	普通	超声	普通	超声	普通	超声	普通	超声
40 ($v_w = 0.084 \text{ m/s}$)		0.66	1.6	0.68	1.8	0.79	2.0	0.89
40 ($v_w = 0.2 \text{ m/s}$)		0.7	1.9	1.2	2.4	1.4	2.6	1.5
10 ($v_w = 0.084 \text{ m/s}$)	0.36	0.18	0.4	0.17				
5 ($v_w = 0.084 \text{ m/s}$)	0.18	0.09	0.2	0.08				

3 结果与分析

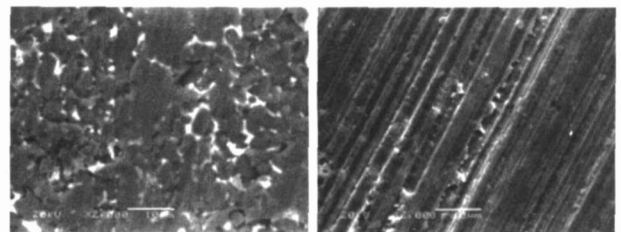
分别选用磨粒平均直径为 $40 \mu\text{m}$, $10 \mu\text{m}$, $5 \mu\text{m}$ 的金刚石砂轮进行普通磨削和超声振动磨削试验。由公式 (1) 计算试验材料的临界切削深度 $a_{\text{gc}} = 1.75 \mu\text{m}$ 。

3.1 金刚石砂轮平均磨粒尺寸对陶瓷磨削的塑性-脆性转变的影响

图 2 是在 $w = 40 \mu\text{m}$, $v_s = 26.6 \text{ m/s}$, $a_p = 2 \mu\text{m}$ 条件下,经不同方式磨削的表面 SEM 微观形貌图。由图 2 (a) 可见,磨粒平均直径 $40 \mu\text{m}$ 的砂轮普通磨削表面具有很明显的材料破损现象,工件表面上有大量的断裂性凹坑存在,只有很少部分的条纹,且条纹不连续,沟槽底部凹凸不平,破碎残存在沟底,表面粗糙度 R_a 为 $0.189 \mu\text{m}$ 。由表 1 可见,在此磨削条件下 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_{2(n)}$ 材料的最大切削厚度 $a_{\text{gmax}} < a_{\text{gc}}$,材料以脆性断裂模式为主要去除机理;图 2 (b) 超声振动磨削表面,由理论计算 $a_{\text{gmax}} < a_{\text{gc}}$,径向裂纹产生并扩展,并延伸到磨削表面,随着磨粒的逐渐卸载,已产生的横向裂纹在光滑的磨痕上形成微小的脆性剥落坑,材料表面呈现塑性模式的材料去除,表面粗糙度 R_a 为 $0.131 \mu\text{m}$;振动磨削表面材料的脆性断裂明显少于普通磨削表面。



a)普通磨削 ($v_w = 0.084 \text{ m/s}$) (b)超声振动磨削 ($v_w = 0.084 \text{ m/s}$)

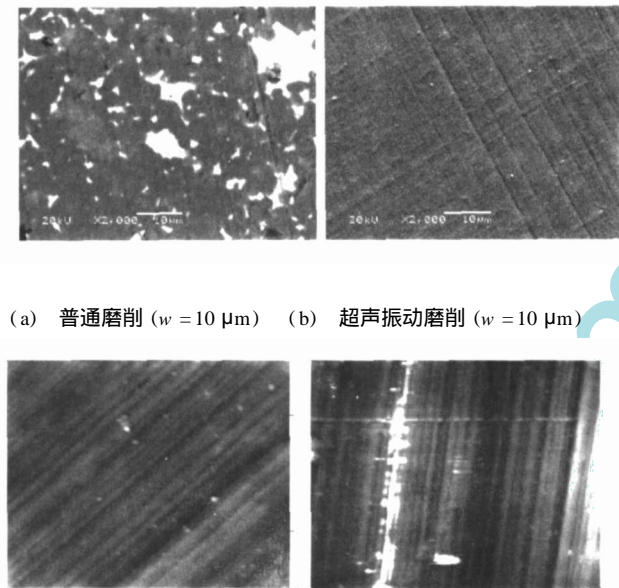


(c)普通磨削 ($v_w = 0.2 \text{ m/s}$) (d)超声振动磨削 ($v_w = 0.2 \text{ m/s}$)

图 2 磨削表面 SEM 微观形貌图 ($w = 40 \mu\text{m}$, $v_s = 26.6 \text{ m/s}$, $a_p = 2 \mu\text{m}$)

Fig 2 The SEM micro-topography of the grinding surface of ceramics under $w = 40 \mu\text{m}$, $v_s = 26.6 \text{ m/s}$, $a_p = 2 \mu\text{m}$

图 3 为磨粒平均直径分别为 $10\ \mu\text{m}$ 、 $5\ \mu\text{m}$ 的砂轮的磨削表面微观形貌照片。采用普通磨削和超声振动磨削两种方法,工艺条件为 $v_s = 26.6\ \text{m/s}$, $a_p = 1\ \mu\text{m}$, $v_w = 0.084\ \text{m/s}$ 。图 3(c)、(d) 为磨粒平均直径 $w = 5\ \mu\text{m}$, 在 $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ 面积的 AFM 照片。由表 1 计算可知,两种磨削方法均满足 $a_{\text{gmax}} < a_{\text{gc}}$, 陶瓷磨削表面均可清楚地看到切削沟槽边沿出现如金属切削一样的塑性加工痕迹,具有明显的耕犁现象,大量的磨削条纹存在,且磨削条纹完全连续,工件表面上看不到微裂纹缺陷,表面几乎没有破碎现象,无论是超声振动磨削还是普通磨削,材料均以塑性模式被去除,表面粗糙度较图 2(a)、(b) 的磨削表面粗糙度低一个量级。



(a) 普通磨削 ($w = 10\ \mu\text{m}$) (b) 超声振动磨削 ($w = 10\ \mu\text{m}$)

(c) 普通磨削 ($w = 5\ \mu\text{m}$) (d) 超声振动磨削 ($w = 5\ \mu\text{m}$)
图 3 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_{2(n)}$ 磨削表面微观形貌图 ($v_s = 26.6\ \text{m/s}$, $a_p = 1\ \mu\text{m}$, $v_w = 0.084\ \text{m/s}$)

Fig 3 The SEM and AFM micro-topography of the grinding surface of ceramics under $v_s = 26.6\ \text{m/s}$, $a_p = 1\ \mu\text{m}$, $v_w = 0.084\ \text{m/s}$

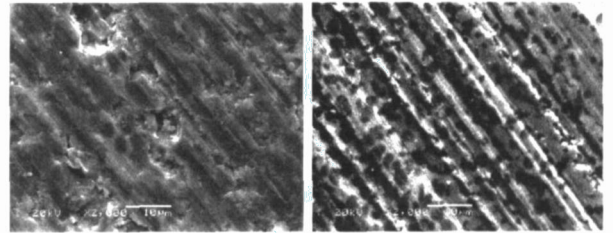
3.2 工作台往复运动速度对陶瓷磨削的塑性 - 脆性转变的影响

图 2(c)和 (d)为工作台往复运动速度 $v_w = 0.2\ \text{m/s}$ 的材料磨削表面微观形貌照片,与图 2(a)和 (b)相比,两种磨削方式下其表面质量均下降。由公式 (3), (4) 可以看出,随着工作台运动速度 v_w 的增大,单磨粒的最大切削厚度值 a_{gmax} 相应增大(见表 1),在图 2(c)磨削条件下, $a_{\text{gmax}} > a_{\text{gc}}$, 工件普通磨削表面呈完全破碎状态,表面粗糙度 R_a 为 $0.213\ \mu\text{m}$ 。图 2(d)对应 a_{gmax} 接近 a_{gc} , 材料以脆 - 塑混合

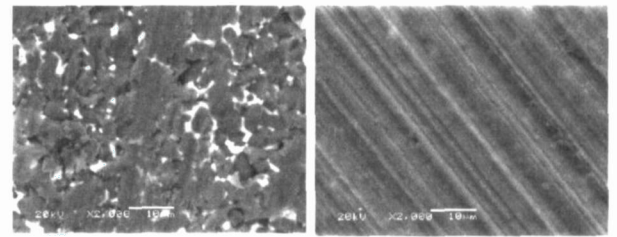
模式被去除。

3.3 磨削深度对陶瓷磨削的脆塑转变的影响

图 4 为 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_{2(n)}$ 磨削表面 SEM 微观形貌图,采用普通磨削和超声振动磨削两种方法,工艺条件为 $w = 40\ \mu\text{m}$, $v_s = 26.6\ \text{m/s}$, $v_w = 0.084\ \text{m/s}$



(a) 普通磨削 ($a_p = 4\ \mu\text{m}$) (b) 超声振动磨削 ($a_p = 4\ \mu\text{m}$)



(c) 普通磨削 ($a_p = 6\ \mu\text{m}$) (d) 超声振动磨削 ($a_p = 6\ \mu\text{m}$)

图 4 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_{2(n)}$ 磨削表面 SEM 微观形貌照片 ($w = 40\ \mu\text{m}$, $v_s = 26.6\ \text{m/s}$, $v_w = 0.084\ \text{m/s}$)

Fig 4 The SEM micro-topography of the grinding surface of ceramics under $w = 40\ \mu\text{m}$, $v_s = 26.6\ \text{m/s}$, $v_w = 0.084\ \text{m/s}$

由公式 (3) ~ (5) 可知,磨削深度 a_p 对陶瓷磨削的塑性 - 脆性转变的影响是比较小的。由图 4(a)可见,工件磨削表面有一部分破碎,存在少量连续的磨削条纹,材料以脆 - 塑混合模式被去除,主要是因为此磨削条件满足 $a_{\text{gmax}} > a_{\text{gc}}$ 。图 4(c)可见,磨削表面呈完全破碎状态,工件表面材料大面积剥落,只见少量磨削条纹,此磨削条件满足 $a_{\text{gmax}} > a_{\text{gc}}$, 材料以脆性模式被去除。图 4(b)和 (d)为超声振动磨削表面,经表 1 计算,在此磨削条件下满足 $a_{\text{gmax}} < a_{\text{gc}}$, 材料以塑性模式被去除。图 4(a)和 (b)与图 2(a)和 (b)相比,表面微观形貌近似,表面粗糙度相接近,表面质量没有太大的变化,磨削深度对材料表面塑性 - 脆性转变特性的影响不显著,主要是因为磨削深度发生变化时,单磨粒的最大切削深度 a_{gmax} 变化较小,并且对于超精密磨削加工,磨削深度一般在 $0.1 \sim 2\ \mu\text{m}$ 之间,其变化范围更小,磨削深度对硬脆材料精密超精密磨削的塑性 - 脆性转变的影响仅次于工作台往复运动速度。

4 结 论

基于工件超声振动磨削的单磨粒运动模型,推导了振动磨削单磨粒最大切削厚度公式,并得出当 $a_{gmax} < a_{gc}$ 时才能实现硬脆材料塑性域磨削加工的结论。结果表明,当 $a_{gmax} > a_{gc}$ 时,材料以脆性断裂模式被去除;当 $a_{gmax} = a_{gc}$,材料以脆性断裂和塑性变形混合模式被去除;当满足 $a_{gmax} < a_{gc}$ 时,可获得加工精度很高的磨削表面;砂轮平均磨粒尺寸是影响塑性-脆性转变最为主要的因素,砂轮速度对其影响次之,磨削深度对脆塑转变的影响最小;通过减小砂轮的磨粒尺寸,降低工作台往复运动速度,减小磨削深度,均有利于实现硬脆材料的塑性域磨削;超声振动磨削比普通磨削更易于实现硬脆材料的塑性域磨削。

参考文献:

- [1] Deng Zhaohui, Zhang Bi, Zhou Zhixiong, et al Surface/sub-surface damage in ceramic grinding[J]. Journal of Hunan University, 2002, 29(5): 61 - 71. [邓朝晖,张璧,周志雄,等.陶瓷磨削的表面/亚表面损伤[J].湖南大学学报,2002,29(5): 61 - 71.]
- [2] Zhang Bi, Zheng X L, Tokura H, et al Grinding induced damage in ceramics[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 132(1-3): 353 - 364.
- [3] Bifano T G, Dow T A, Scattergood R O. Ductile-regime grinding: a new technology for machining brittle materials[J]. ASME J of Eng for Ind, 1991, 113: 184 - 189.
- [4] Namba Y, Wada R, Unno K, et al Ultra-precision surface grinder having a glass-ceramics spindle of zero-thermal expansion[C]// Annals of the CIRP. 1989, 38(1): 331 - 334.
- [5] Zhou Ming, Wang X J. Brittle-ductile transition in the diamond cutting of glasses with the aid of ultrasonic vibration[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 121: 243 - 251.
- [6] Yan Jiwang, Syoji Katsuo, Kuriyagawa Tsunemoto, et al Ductile regime turning at large tool feed[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 121: 363 - 372.
- [7] Ngoi B K A, Sreejith P S. Ductile regime finish machining: a review[J]. Int J Adv Manuf Technology, 2000, 16: 547 - 550.
- [8] Zhao Bo, Liu C S, Jiao Feng, et al Surface characteristics in the ultrasonic ductile honing of ZrO_2 ceramics using coarse grits[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 123: 54 - 60.
- [9] Zhao Bo, Wu Y, Liu C S, et al The study on ductile removal mechanisms of ultrasonic vibration grinding nano- ZrO_2 ceramics[J]. Key Engineering Material, 2006, 304-305: 171 - 175.
- [10] Shi Xingkuan, Teng Lin, Lee Yaqing, et al Study on the critical condition of ductile grinding of hard brittle materials[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 1996, 32(4): 10 - 13. [史兴宽,滕霖,李雅卿,等.硬脆材料延性域磨削的临界条件[J].航空精密制造技术,1996,32(4): 10 - 13.]
- [11] 李伯民,赵波.现代磨削技术[M].北京:机械工业出版社,2003.
- [12] Shaw M C. Ultrasonic grinding[J]. Micro Technology, 1956, 10: 257 - 262.
- [13] 陈明君.超精密非球面磨削技术的研究[D].黑龙江:哈尔滨工业大学,2003.

(编辑 张津徐)