

文章编号 1004-924X(2015)07-2023-08

# 切向载荷作用下氮化硅陶瓷崩碎损伤规律与机理

唐修检<sup>1,\*</sup>, 刘谦<sup>1</sup>, 田欣利<sup>1</sup>, 王 龙<sup>1</sup>, 王望龙<sup>2</sup>

(1. 装甲兵工程学院 装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072;

2. 装甲兵工程学院 全军装备表面工程重点实验室, 北京 100072)

**摘要:**针对工程陶瓷的崩碎损伤,应用单颗粒划痕实验系统研究了切向载荷作用下  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷的崩碎损伤特征和机理。比较了损伤位置、切入深度、切向速度和金刚石磨粒磨损等因素对陶瓷崩碎损伤的影响,应用 3D 激光测量显微镜观测了崩碎损伤表面的三维形貌,应用扫描电镜分析了崩碎损伤机理。结果表明:出口崩碎损伤是陶瓷崩碎损伤的主要形式;切入深度越大,切向速度越小,金刚石颗粒磨损越多,崩碎损伤就越严重。出口崩碎损伤的中心剖面线具有显著的阶梯形特征,其扩展演化规律可由逾渗理论和裂纹扩展的最小阻力原理解释。在切向载荷作用下,入口崩碎损伤在金刚石磨粒的碰撞下主要以穿晶断裂为主;内部崩碎损伤在金刚石磨粒的挤压和切割下主要以破碎和铲除的形式发生断裂;而出口崩碎损伤主要以沿晶断裂为主。

**关键词:**切向载荷;工程陶瓷;氮化硅陶瓷;崩碎损伤;单颗粒划痕;逾渗

**中图分类号:**TQ174.12;TQ174.758.12 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152307.2023

## Regulation and mechanism of edge chipping for $\text{Si}_3\text{N}_4$ ceramics worked by sliding loads

Tang Xiu-jian<sup>1,\*</sup>, LIU Qian<sup>1</sup>, Tian Xin-li<sup>1</sup>, Wang Long<sup>1</sup>, Wang Wang-long<sup>2</sup>

(1. *Science and Technology on Remanufacturing Laboratory, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China;*

2. *Key Laboratory for Surface Engineering of the Chinese People's Liberation, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: tangxiujian@sina.com*

**Abstract:** A single diamond grit scratching test system was built to explore the damage mechanism and the edge chipping characteristics of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramics. The effects of damage stations, cutting depths, cutting velocities and grit wears on the edge chipping of the  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramic were compared. A 3D laser measurement microscope was used to observe the geometric morphology of edge chipping and the Scanning Electric Microscopy (SEM) was taken to analyze the damage mechanisms of edge chipping. The results show that exit edge chipping is the main damage for ceramics. The cutting depths, cutting velocities and grit wears would affect the edge chipping obviously. The medical section curve of exit edge chipping has obvious staircase fractal characteristics, which could be explained well by percola-

收稿日期:2015-01-22;修订日期:2015-03-21.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51105378)

tion theory and the crack propagation principle of least resistance. The damage mechanism for entry edge chipping is mainly transgranular fracture, the damage mechanical for exit edge chipping is mainly intergranular fracture, and the interior edge chipping is engendered by eradicating and cutting.

**Key words:** sliding load; engineering ceramics;  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramics; edge chipping; single diamond grit scratching; percolation

## 1 引言

由于工程陶瓷性能优异,故常被作为航空、航天、汽车、军工等领域的精密零件。工程陶瓷是一种硬脆材料,其加工主要涉及金刚石砂轮的磨削,加工成本占陶瓷元件总成本的 80% 以上。因此,改善和提升工程陶瓷的磨削加工工艺有利于降低加工成本,提升加工品质,扩大应用范围。崩碎损伤是工程陶瓷磨削加工过程中的常见现象,它会破坏陶瓷元件的尺寸精度,增加加工成本,故探索陶瓷崩碎损伤的规律和机理对提高陶瓷元件的加工品质,降低加工成本具有重要意义<sup>[1]</sup>。

崩碎损伤对陶瓷元件的破坏形式引起了许多学者的关注。Yoshifumi<sup>[2]</sup>等推导出陶瓷崩碎损伤的大小与材料去除率成正比。W. C. Chiu<sup>[3]</sup>等认为裂纹尺寸、加载应力和材料本身的断裂韧性是影响陶瓷崩碎损伤的关键因素。Herzl Chai<sup>[4]</sup>、G. A. Gogotsi<sup>[5]</sup>等研究了准静态载荷作用下陶瓷崩碎损伤的相关规律,并建立了外加载荷、边缘距离与材料性能之间的关联。B. Yang<sup>[6]</sup>研究了激光辅助加热抑制陶瓷崩碎损伤的加工方法。秦娜<sup>[7]</sup>、房丰洲<sup>[8]</sup>、许俊<sup>[9]</sup>等研究了超声旋转加工过程中陶瓷的崩碎损伤规律,并采用增加辅助支撑的方法有效减少了崩碎损伤。当前,研究陶瓷崩碎损伤机理应用最多的是崩碎损伤剥落模型和单晶压头模型<sup>[1]</sup>,但这两种模型都只考虑了准静态载荷作用下的陶瓷崩碎损伤规律,与陶瓷磨削的实际加工情况还存在较大差异。在陶瓷磨削加工过程中,当金刚石砂轮接近或离开陶瓷工件边缘时往往都具有较大的切向速度,此时,金刚石磨粒对工件边缘的作用更近似于一种切向载荷。因此,研究切向载荷作用下工程陶瓷的崩碎损伤规律更加符合陶瓷磨削加工实际,更有利于揭示陶瓷的崩碎损伤机理,依此制定的加工工艺更为合理。

在陶瓷磨削过程中,金刚石砂轮与陶瓷工件

相互接触并滑动,由于砂轮磨粒数量多、形状不规范,排列不规则,且磨削速度高,切削深度小,从而给观察和分析陶瓷崩碎损伤带来了困难。为研究问题方便,常将金刚石磨粒简化为简单的几何形状,应用金刚石的单颗粒划痕实验来研究陶瓷崩碎损伤的基本规律<sup>[10]</sup>。基于此,本研究以工程中常用的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷为研究对象,建立了单颗粒划痕实验系统,研究了切向载荷作用下损伤位置、切入深度、切向速度和磨粒磨损等主要因素对陶瓷崩碎损伤的影响,并探究了其损伤特征和机理。

## 2 陶瓷崩碎损伤实验

### 2.1 单颗粒划痕实验系统

用于研究陶瓷崩碎损伤的单颗粒划痕实验系统如图 1 所示。在该系统中,金刚石磨粒通过自制专用夹具固定在北京机电院生产的 BV75 立式加工中心的主轴上,主轴定位精度为 0.005 mm。陶瓷试样粘接在金属板块上,该金属板块通过螺纹固定在加工中心的工作台上。为了确保陶瓷试样上端面平整,精准控制金刚石磨粒的切入深度,最大限度地减少亚表面损伤深度,在进行划痕实验前应用金刚石砂轮将陶瓷上端面缓慢修磨至水平。

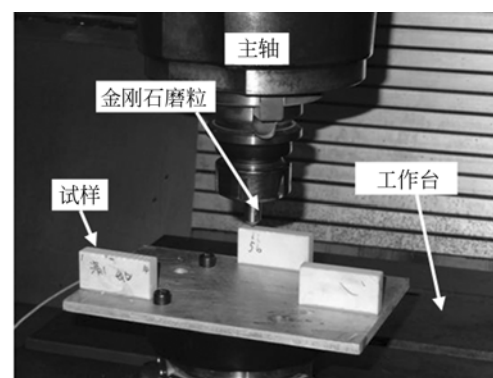


图 1 单颗粒划痕实验系统

Fig. 1 Single-point scratch test system

## 2.2 实验材料及方法

实验使用的陶瓷材料为气氛烧结  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷,尺寸为  $80\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ ,表面粗糙度为  $R_a=0.598\text{ }\mu\text{m}$ ,其基本力学性能参数如表 1 所示。使用的金刚石颗粒为天然金刚石。

表 1 试验材料的力学性能

Tab. 1 Mechanical performance of experimental materials

材料	抗拉强度	抗压强度	泊松比	弹性模量
	/MPa	/MPa	$\mu$	/GPa
$\text{Si}_3\text{N}_4$	450	2 800	0.24	310

实验时,立式加工中心的工作台分别以 10、20、30、40、50、60、70、80 和 90 m/min 的速度由外向里滑动,其效果相当于金刚石磨粒以相同的速度由里向外滑动,分别考察不同切向速度下切入深度分别为 0.02、0.03 和 0.04 mm 时的崩碎损伤情况。由于崩碎损伤随机性大,为确保实验的可靠性,对每一组相同实验条件均进行 3 次重复实验。

## 3 实验结果及分析

### 3.1 损伤位置对崩碎损伤的影响

根据损伤位置的不同,崩碎损伤可分为入口崩碎损伤(金刚石砂轮开始接触工件边缘时产生的崩碎损伤)、内部崩碎损伤(金刚石砂轮加工过程中产生的崩碎损伤)和出口崩碎损伤(金刚石砂轮离开工件边缘时产生的崩碎损伤)3 种类型<sup>[11]</sup>。图 2 描述了  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷在不同实验条件下的崩碎损伤情况。由图 2 可见,尽管实验条件各不相同,但  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷的崩碎损伤在宏观上呈现出以下特点:(1)相比于出口崩碎损伤(图 2(c)),入口崩碎损伤(图 2(a))和内部崩碎损伤(图 2(b))的几何尺寸与体积都非常小。由此可知,出口崩碎损伤是破坏陶瓷元件几何尺寸的主要因素;(2)出口崩碎损伤在形状上具有一定的相似性,以近似贝壳的形状由上向下扩展(图 2(c))。因此,减轻或避免工程陶瓷的崩碎损伤关键在于减轻或消除出口崩碎损伤。

### 3.2 切削要素对崩碎损伤的影响

在单颗粒划痕实验中,对于同一种材料而言,切入深度和切向速度是影响崩碎损伤的主要工艺

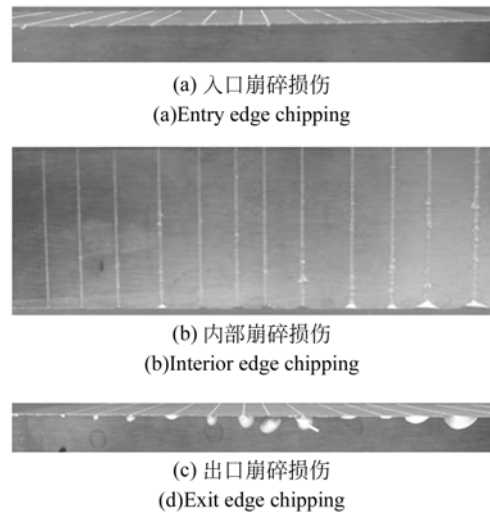


图 2 不同损伤位置的崩碎损伤表面

Fig. 2 Chipping surfaces of different damage stations

参数。鉴于出口崩碎损伤的体积远远大于入口崩碎损伤和内部崩碎损伤,此处应用出口崩碎损伤体积作为评价陶瓷崩碎损伤程度的主要参数。应用 Olympus OLS4000 3D 激光测量显微镜分别测量不同实验条件下的出口崩碎体积,得到其变化规律如图 3 所示。

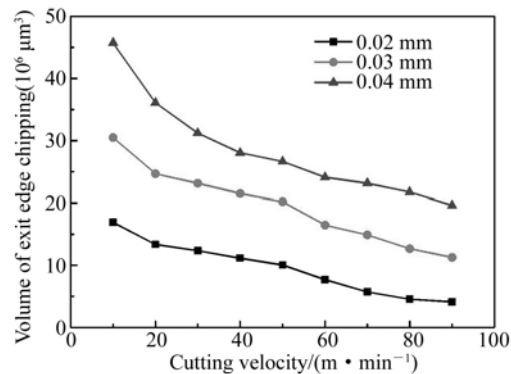


图 3 不同实验条件下的出口崩碎损伤体积

Fig. 3 Exit edge chipping volume under different experimental conditions

由图 3 可见,对于相同的切入深度,随着切向速度的增大,出口崩碎损伤的体积会逐步减小;在相同的切向速度下,切入深度越大,出口崩碎损伤体积也越大。因此,在实际的磨削加工过程中,金刚石砂轮的高转速小切深有利于得到质量好的磨削表面,低转速大切深则有利于提升磨削效率。

### 3.3 磨粒磨损对崩碎损伤的影响

金刚石颗粒磨损是影响陶瓷崩碎损伤的另一

个重要因素。图 4 显示了在不同磨损程度下刀具磨损对崩碎损伤的影响,其中划痕 1、2、3、4 分别为金刚石颗粒由无磨损到磨损逐步增大时的崩碎损伤情况。由图 4 可见,金刚石颗粒磨损越多,崩碎损伤程度就越厉害。

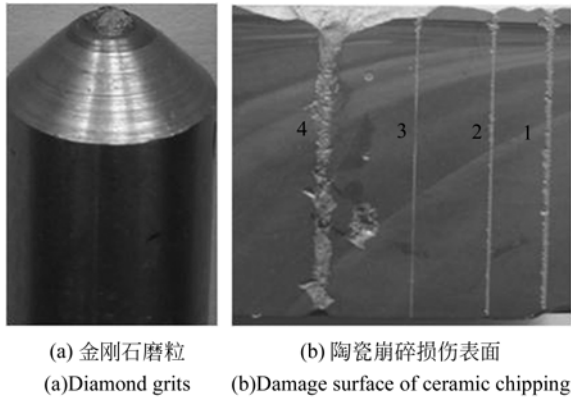


图 4 金刚石颗粒不同磨损程度下的陶瓷崩碎损伤表面  
Fig. 4 Ceramic chipping surface under different wearing degrees of diamond grits

### 3.4 崩碎损伤特征分析

#### 3.4.1 入口和内部崩碎损伤特征分析

应用 Olympus OLS4000 3D 激光测量显微镜观测切入深度为 0.03 mm、切向速度为 50 m/min 时  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷入口崩碎损伤和内部崩碎损伤的几何形貌,结果如图 5 所示。

由图 5(a)和图 5(c)可见,入口崩碎损伤的深度  $d$  与磨粒切入深度基本一致。在金刚石磨粒的冲击下,靠近金刚石磨粒切入表面的边缘会产生微小的崩碎损伤,致使整个陶瓷表面切入口的几何轮廓与金刚石磨粒平面的几何轮廓有所差异,但该崩碎损伤非常小,可忽略不计。

图 5(b)和图 5(c)显示了内部崩碎损伤的基本形貌。由图 5(b)和图 5(c)可见,整个金刚石颗粒的切入点与金刚石颗粒在陶瓷材料内部的划痕基本一致。在金刚石磨粒的切向载荷作用下,陶瓷表面划痕的边缘会产生内部崩碎损伤,内部崩碎损伤尺寸受切入深度和金刚石磨粒锋利程度的影响较大,但其几何尺寸和体积与出口崩碎损伤相比相对较小。

应用垂直于切向方向的剖面与陶瓷表面的划痕相交(如图 5b 所示),得到划痕的剖面线如图 5(d)所示。由图 5(d)可见,在金刚石磨粒的作用

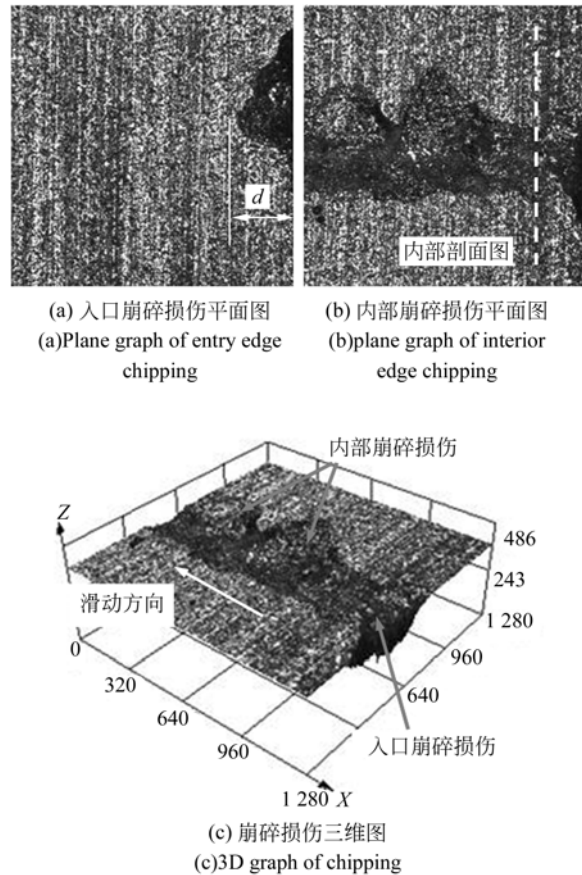


图 5 入口崩碎损伤和内部崩碎损伤几何形貌图  
Fig. 5 Geometric topography of entry and interior edge chippings

下,陶瓷表面的划痕剖面与切入的金刚石磨粒的剖面基本相似,划痕的边缘未见明显的塑性隆起。脆性材料的“切削加工”模型表明,切入深度是影响陶瓷等脆性材料去除机理的关键因素<sup>[12]</sup>。当切入深度小于  $1 \mu\text{m}$  时,陶瓷表面划痕的边缘易于产生塑性隆起;当切入深度为  $1 \sim 3.5 \mu\text{m}$  时,

陶瓷表面划痕的边缘会出现塑性变形和鳞状破裂;当切入深度达到  $10\ \mu\text{m}$  时,陶瓷表面划痕的边缘主要以铲除和破碎为主;当切入深度达到临界切深后,最初的塑性变形就会逐渐转变为脆性破裂。而在  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷的单颗粒划痕实验中,其切入深度达到  $20\sim 40\ \mu\text{m}$ ,远远大于其临界切深。因此, $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷的内部崩碎损伤在金刚石磨粒的挤压和切割下,主要以脆性断裂为主,在陶瓷表面划痕的边缘不会产生明显的塑性隆起。图 5(d) 较好的证实了这一点。

3.4.2 出口崩碎损伤特征分析

图 6 为出口崩碎损伤的几何形貌。由图 6 可见,当金刚石磨粒滑动至距离陶瓷边缘  $h$  处时,划痕边缘的裂纹在朝两侧扩展的同时(图 6(a)),也会由上向下扩展,出口崩碎表面存在明显的辉状裂纹,整个出口崩碎损伤近似呈贝壳状(图 6(b))。崩碎损伤的宽度  $l$  和深度  $d'$  远远大于陶瓷表面划痕的宽度和切入深度,其体积远远大于入口崩碎损伤和内部崩碎损伤。

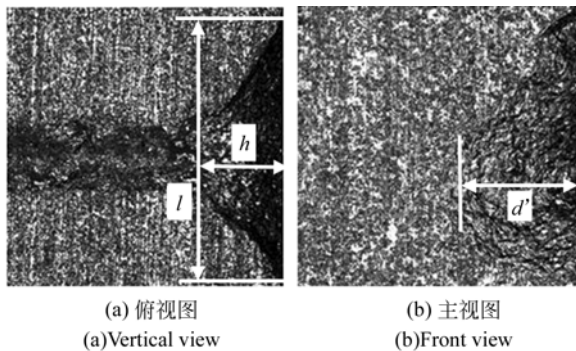


图 6 出口崩碎损伤几何形貌图

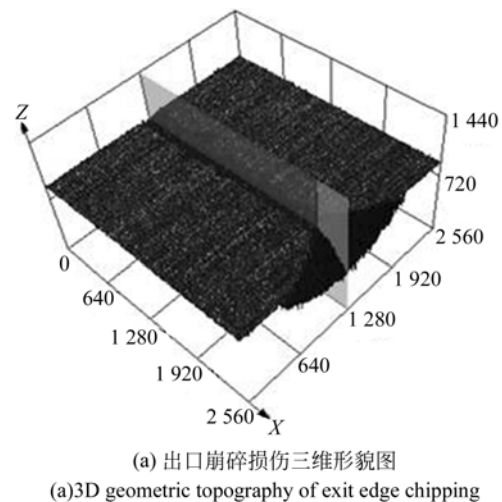
Fig. 6 Geometric topography of exit edge chipping

为进一步探讨陶瓷出口崩碎损伤的损伤规律,应用经过划痕中心线的垂直剖面与出口崩碎损伤表面相交(图 7(a)),得剖面线如图 7(b)所示。

Herzl Chai<sup>[4]</sup>、G. A. Gogotsi<sup>[5]</sup> 等在对静态单晶压头崩碎损伤模型的研究中认为该剖面线代表了陶瓷崩碎损伤主裂纹的扩展方向,张璧<sup>[13]</sup> 应用裂纹扩展的最小阻力原理定性解释了该曲线向材料自由表面扩展的现象。因此,研究出口崩碎损伤中心剖面线的相关特征有利于了解陶瓷崩碎损伤的裂纹扩展规律。

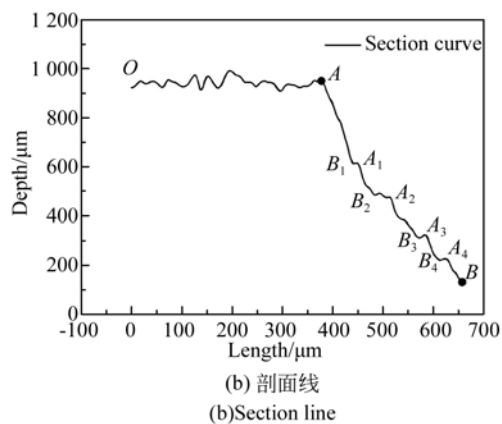
图 7(b)中,曲线 OA 为金刚石磨粒由点 O 滑

动到点 A 时划痕底部中央的剖面线,曲线 AB 为金刚石磨粒滑出陶瓷工件边缘时产生的出口崩碎损伤中心剖面线。由图 7(b)可见,曲线 OA 变化比较平缓,说明在金刚石磨粒的划擦下,划痕底部比较平整,材料去除平稳。但当金刚石磨粒滑动到点 A 后,剖面曲线就会急剧向下扩展,直至点 B 产生出口崩碎损伤。整个剖面曲线可看作是若干段相似的阶梯形曲线如  $OB_1$ 、 $B_1B_2$ 、 $B_2B_3$ 、 $B_3B_4$ 、 $B_4B$  所组成,而每一段阶梯形曲线又均由一段稍短的近似水平直线(如 OA、 $B_1A_1$ 、 $B_2A_2$ 、 $B_3A_3$ 、 $B_4A_4$ )和一段较长的向陶瓷表面倾斜的曲线(如  $AB_1$ 、 $A_1B_2$ 、 $A_2B_3$ 、 $A_3B_4$ 、 $A_4B$ )组成。陶瓷崩碎损伤过程中裂纹扩展的这种阶梯形分形特征可采用逾渗理论和裂纹扩展的最小阻力原理来定性解释<sup>[14]</sup>。逾渗的基本特征就是在庞大无序的系统中,当相互联结程度(如密度、占



(a) 出口崩碎损伤三维形貌图

(a) 3D geometric topography of exit edge chipping



(b) 剖面线  
(b) Section line

图 7 出口崩碎损伤的三维形貌及剖面线

Fig. 7 3D geometric topography and section line of exit edge chipping

据数、比例或浓度等)逐渐增加或减少到某一临界值(逾渗阈值)时,系统内突然出现某种长程联结性的转变,这种长程连接性的突然转变即为逾渗转变。陶瓷作为一种典型的脆性材料,其裂纹的扩展损伤演化过程具有显著的逾渗特征。在切向载荷挤压下,陶瓷材料内部的微裂纹密度不断增加,但在临界载荷之前,这些微裂纹不会贯通扩展形成宏观裂纹。随着切向载荷的不断增大,当材料内部的微裂纹密度超过某一临界值时,这些微裂纹就会瞬间贯通,形成宏观裂纹,其损伤演化过程具有显著的逾渗特征。当金刚石磨粒滑动至图 7(b)所示点 A 且能量积聚足够大时,陶瓷材料内部的微裂纹就会瞬间贯通扩展形成宏观裂纹。根据裂纹扩展的最小阻力原理,此时裂纹将沿着曲线  $AB_1$  向材料自由表面扩展并散发出大量能量,因此,陶瓷材料内部积聚的能量减少,当能量减少到一定程度后,裂纹停止扩展。但在金刚石磨粒滑动的继续挤压下,陶瓷材料内部积聚的能量继续增加,当金刚石磨粒由点  $B_1$  滑动到点  $A_1$  使能量积聚到足够大时,陶瓷材料内部的微裂纹又会瞬间贯通,朝着材料自由表面扩展。如此反复,直至产生出口崩碎损伤,反应在陶瓷碎裂表面上,即会产生明显的辉状裂纹。图 6(b)所示的出口崩碎损伤表面形貌也较好地证实了这一特点。

对曲线  $AB_1$ 、 $A_1B_2$ 、 $A_2B_3$ 、 $A_3B_4$ 、 $A_4B$  及  $AB$  分别进行直线和二次多项式拟合,拟合结果如表 2 和图 8 所示。

表 2 出口崩碎损伤剖面线的分段直线拟合

Tab. 2 Sectional line fitting of section curve for exit edge chipping

曲线段	$AB_1$	$A_1B_2$	$A_2B_3$	$A_3B_4$	$A_4B$	$AB$
直线拟合精度	0.989	0.923	0.948	0.962	0.985	0.954
多项式拟合精度	0.997	0.986	0.957	0.989	0.990	0.983

由表 2 和图 8 可见,不管是对分段曲线  $AB_1$ 、 $A_1B_2$ 、 $A_2B_3$ 、 $A_3B_4$ 、 $A_4B$ ,还是对整个曲线  $AB$ ,二次多项式更符合出口崩碎损伤中心主裂纹的扩展轨迹。

### 3.5 崩碎损伤机理分析

应用场发射扫描电镜分别观察陶瓷崩碎损伤的微观形貌,如图 9~11 所示。图 9 为入口崩碎损伤 SEM 图,由图 9 可见,在金刚石磨粒的剧烈

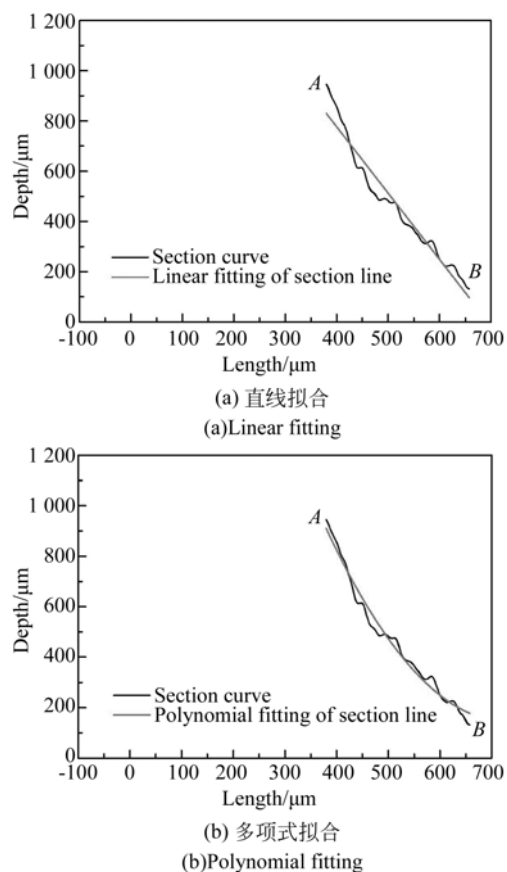


图 8 出口崩碎损伤剖面线的数值拟合

Fig. 8 Numerical fitting of section line for exit edge chipping

撞击下,陶瓷的入口崩碎损伤存在明显的撕裂区,金刚石磨粒切入的区域存在明显的撞击痕迹,损伤表面较为粗糙,部分裂纹穿过晶体形成穿晶断裂,这主要是由金刚石颗粒对陶瓷试样的冲击应力所造成的<sup>[8]</sup>。

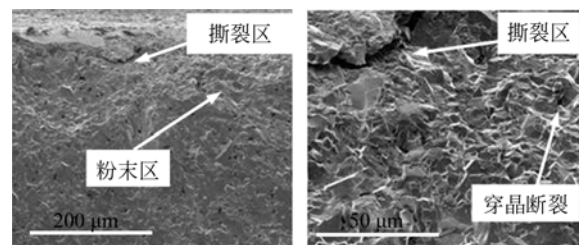


图 9 入口崩碎损伤 SEM 图

Fig. 9 SEM images of entry edge chipping

图 10 显示了内部崩碎损伤的微观形貌。由图 10(a)可见,在金刚石磨粒的划擦作用下,陶瓷表面会产生明显的犁沟,犁沟底部部分材料在金

刚石磨粒的挤压和划擦作用下会产生撕裂,从而影响已加工表面的完整性。与常用的“切削加工”模型相比,当金刚石磨粒的切入深度大于陶瓷材料的临界切深后,陶瓷表面划痕的边缘就会产生内部崩碎损伤,且内部崩碎损伤的断口形貌相当粗糙(图 10(b)),划痕边缘未见塑性隆起,这主要是由陶瓷材料本身的脆性所引起的。

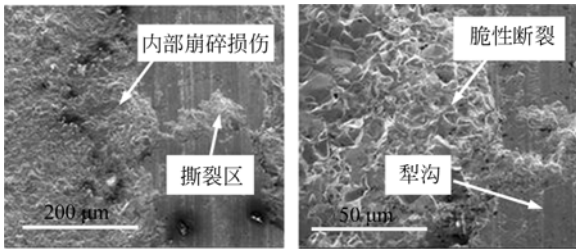


图 10 内部崩碎损伤 SEM 图

Fig. 10 SEM images of interior edge chipping

图 11 显示了出口崩碎损伤的微观形貌。由图 11 可见,当金刚石磨粒离开陶瓷边缘时,陶瓷边缘会产生较为显著的出口崩碎损伤,通常切入深度越深,所产生的出口崩碎损伤体积就越大。与入口崩碎损伤相比,出口崩碎损伤表面较为光滑,损伤体积较大,且断裂表面常呈贝壳状,材料内部的损伤主要以穿沿晶断裂为主。出口崩碎损伤与入口崩碎损伤的差异主要是由材料性能引起的,通常陶瓷材料的抗压强度比抗拉强度大一个数量级以上。在滑动载荷的作用下,陶瓷入口主要承受压应力,因而损伤较小;而出口则承受拉应力,因而损伤非常大。S. Ng<sup>[6]</sup>等人的研究认为通过在崩碎出口增加支撑材料,改变其应力状态,可有效改善陶瓷的出口崩碎损伤。

#### 参考文献:

- [1] 唐修检,田欣利,吴志远,等. 工程陶瓷边缘碎裂行为与机理研究进展 [J]. 中国机械工程, 2010, 21(1): 114-119.  
TANG X J, TIAN X L, WU ZH Y, et al. Research progresses on behavior and mechanism of edge chipping for engineering ceramics [J]. *China Mechanical Engineering*, 2010, 21(1): 114-119 (in Chinese).
- [2] YOSHIFUMI O, TETSUO M, MINORU S. Chip-

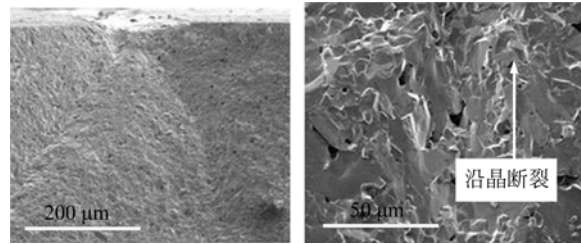


图 11 出口崩碎损伤 SEM 图

Fig. 11 SEM images of exit edge chipping

## 4 结 论

本文通过金刚石单颗粒划痕实验研究了切向载荷作用下不同损伤位置、切入深度、切向速度和金刚石磨粒磨损等因素对  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷崩碎损伤规律及机理的影响,结果表明:(1)出口崩碎损伤的体积远远大于入口崩碎损伤和内部崩碎损伤的体积,是  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷崩碎损伤的主要形式。大切入深度、小切向速度和金刚石颗粒的磨损均会增加陶瓷的崩碎损伤程度。(2)出口崩碎损伤的中心剖面线反映了出口崩碎损伤主裂纹的扩展特征,其扩展轨迹具有显著的阶梯形分形特征,可采用二次多项式进行高精度拟合。逾渗理论和裂纹扩展的最小阻力原理可较好地定性解释出口崩碎损伤表面的辉状裂纹现象。(3)入口崩碎损伤在金刚石磨粒的冲击下主要以穿晶断裂为主,材料损伤体积较小;内部崩碎损伤在金刚石磨粒的切割和挤压下,主要以破碎和铲除的形式发生断裂;出口崩碎损伤在金刚石磨粒拉应力的作用下,主要以沿晶断裂为主。

- ping in high precision slot grinding of Mn-Zn ferrite [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1995, 44 (1): 273-277.
- [3] CHIU W C, THOULESS M D, ENDRES W J. An analysis of chipping in brittle materials [J]. *International Journal of Fracture*, 1998, 90(4): 287-298.
- [4] CHAI H. On the mechanics of edge chipping from spherical indentation [J]. *International Journal of Fracture*, 2011, 167(1): 28-35.
- [5] GOGOTSI G A, MUDRIK S P. Fracture barrier

- estimation by the edge fracture test method[J]. *Ceramics International*, 2009, 35(5): 1871-1875.
- [6] YANG B, SHEN X, LEI S. Mechanisms of edge chipping in laser-assisted milling of silicon nitride ceramics [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009, 49(3-4): 344-350.
- [7] 秦娜. 旋转超声波磨削制孔的切削力建模与试验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2011.  
QIN N. *Cutting Force Model and Experimental Study on Core Drilling by Ultrasonic-Vibration-Assisted Grinding* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [8] 杜鹃, 李占杰, 宫虎, 等. 硬脆材料加工诱导崩边断裂的机理分析及控制方法研究[J]. *机械科学与技术*, 2013, 32(10): 1451-1455.  
DU J, LI ZH J, GONG H, *et al.*. Study on the mechanisms and control method of edge chipping fracture in the machining of brittle and hard materials [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2013, 32(10): 1451-1455. (in Chinese)
- [9] 许俊, 胡红斐, 唐勇军, 等. 旋转超声加工陶瓷过程中崩边的有限元分析及实验验证[J]. *电加工与模具*, 2014(4): 33-37.  
XU J, HU H F, TANG Y J, *et al.*. Finite element analysis and experimental verification of ceramics edge-chipping in rotary ultrasonic machining [J]. *Electromachining Mould*, 2014(4): 33-37. (in Chinese)
- [10] 王健全, 田欣利, 张保国, 等. 单颗粒金刚石划擦  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷的磨削力研究[J]. *现代制造工程*, 2013(8): 1-4.  
WANG J Q, TIAN X L, ZHANG B G, *et al.*. Experimental research on scratching force of single diamond for silicon nitride ceramics [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2013(8): 1-4. (in Chinese)
- [11] NG S, LE D, TUCKER S, *et al.*. Control of machining induced edge chipping on glass ceramics [C]. *Proceedings of the 1996 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 1996: 229-236.
- [12] 田欣利, 于爱兵. 工程陶瓷加工的理论和技术 [M]. 第 1 版. 北京: 国防工业出版社, 2006: 90.  
TIAN X L, YU A B. *Theory & Technology of Engineering Ceramic Machining* [M]. The 1st edition, Beijing: National Defense Industry Press, 2006: 90. (in Chinese)
- [13] 张璧, 孟鉴. 工程陶瓷磨削加工损伤的探讨[J]. *纳米技术与精密工程*, 2003, 1(1): 48-56.  
ZHANG B, MENG J. Grinding damage in fine ceramics [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2003, 1(1): 48-56. (in Chinese)
- [14] 唐修检, 张保国, 田欣利, 等. 基于灰色-尖点突变理论的氧化铝陶瓷边缘碎裂损伤规律与机理研究[J]. *人工晶体学报*, 2014, 43(4): 945-953.  
TANG X J, ZHANG B G, TIAN X L, *et al.*. Study on the failure regulars and mechanisms of edge chipping for  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ceramics based on grey-cusp catastrophe theory [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2014, 43(4): 945-953. (in Chinese)

## 作者简介:



唐修检(1980—),男,湖南安仁人,硕士,讲师,2002年、2005年于装甲兵工程学院分别获得学士、硕士学位,主要从事难加工材料的超精密加工与质量检测等方面的研究。E-mail: tangxiujian@sina.com

## 导师简介:



田欣利(1956—),男,北京人,博士,教授,博士生导师,1982年于西安冶金建筑学院获得学士学位,1991年、1996年于天津大学分别获得硕士、博士学位,主要从事难加工材料的超精密加工与质量检测等方面的研究。E-mail: tianxli719251@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)