

文章编号 1004-924X(2017)05-1250-09

蓝宝石不同晶面磨削特性比较

胡中伟, 邵铭剑, 郭建民, 黄身桂, 徐西鹏*

(华侨大学 制造工程研究院, 福建 厦门 361021)

摘要: 比较了蓝宝石不同晶面磨削特性的差异。对蓝宝石晶体的 A 面、C 面、M 面及 R 面开展精密磨削试验, 并从磨削力、磨削力比、比磨削能及表面形貌等角度比较了蓝宝石 4 个晶面磨削特性的差异。采用金刚石砂轮在精密平面磨床上对蓝宝石 4 个晶面进行磨削, 采用测力仪测量磨削过程中的磨削力, 并根据所测得的磨削力计算磨削力比和比磨削能。最后, 采用扫描电子显微镜观测工件磨削表面形貌。试验结果显示: 蓝宝石的 4 个晶面中 C 面的磨削力最大, 其次是 M 面和 A 面, R 面的磨削力最小; 比磨削能亦为 C 面最大, 其次是 M 面和 A 面, R 面的比磨削能最小; 磨削力比则是 M 面最大, 其次是 A 面和 C 面, R 面的磨削力比最小。在相同磨削条件下, 蓝宝石不同晶面磨削材料的去除方式有所不同, A 面、M 面和 R 面主要以脆性断裂、破碎和解离方式去除为主, 且破碎坑较大, 表面相对较为粗糙; 而 C 面则存在部分脆性断裂和部分粉末化去除, 破碎坑较小, 表面相对平整。因此, 蓝宝石不同晶面的磨削特性差异明显, 其磨削力、磨削力比、比磨削能及材料去除方式均存在明显的不同。

关键词: 蓝宝石; 晶面; 磨削力; 磨削特性; 表面形貌

中图分类号: TH145.9; TN305.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172505.1250

Comparison of grinding characteristics of different crystal surfaces for sapphire

HU Zhong-wei, SHAO Ming-jian, GUO Jian-min, HUANG Shen-gui, XU Xi-peng*

(Institute of Manufacturing Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

* Corresponding author, E-mail: xpxu@hqu.edu.cn

Abstract: The different grinding characteristics of different crystal faces of a sapphire were compared. A precision grinding test of A-plane, C-plane, M-plane and R-plane for the sapphire was carried out from the grinding force, grinding force ratio, specific grinding energy and surface topography to research their grinding characteristics. Four crystal faces of the sapphire were grinded by a diamond grinding wheel on a precision surface grinder. The grinding forces were measured by a dynamometer, and the grinding force ratio and the specific grinding energy were calculated according to the measured grinding forces. The surface morphology of a workpiece was observed by a scanning electron microscopy. The results indicate that the different faces of the sapphire have different grinding forces, and the C-plane shows the maximum value, followed by the M-plane, A-plane, and the R-plane. The size orders of specific grinding energy are the same as the grinding force. However, the maximum

收稿日期: 2016-09-05; 修订日期: 2016-12-07.

基金项目: 国家自然科学基金-海峡联合基金重点项目 (No. U1305241); 国家自然科学基金-面上项目 (No. 51675192, No. 51575197)

value of grinding force ratio is for the M-plane, followed that by the A-plane and C-plane, and the R-plane is the minimum one. Under the same grinding conditions, the different crystal faces have different grinding material removal modes. The A-plane, M-plane and R-plane are mainly based on brittle fracture, fragmentation and dissociation removal, the crushing pit is larger, and the surface is rough. The C-plane is mainly based on part of the brittle fracture and part of powder removal, the broken crater is smaller, and the surface is relatively smooth. As a results, since the A-plane, C-plane, M-plane and R-plane of the sapphire have different grinding characteristics, they show different grinding mechanisms, grinding forces, grinding force ratios, specific grinding energies and material removal modes.

Key words: sapphire; crystal surface; grinding force; grinding characteristics; surface topography

1 引 言

蓝宝石因具有优良的机械、物理、化学和光学特性而被广泛应用于超导、手机屏幕、发光二极管(LED)衬底、激光、微电子和光学等领域^[1-3]。然而,蓝宝石在这些领域的应用,不仅要求具有较高的形状精度,更需要获得超精密的表面质量。不过,蓝宝石是一种典型的硬脆性难加工材料,要实现其高效、精密加工非常困难。目前,采用细粒度金刚石砂轮磨削是实现硬脆性材料精密加工的一种典型加工方法,具有形状精度和加工效率高的特点。因此,开展蓝宝石精密磨削机理研究,对实现蓝宝石的高效、精密加工具有重要意义。

蓝宝石是一种典型的各向异性材料,其不同晶面上的原子密度及排布结构的不同使得不同晶面所表现出的机械、物理、化学和光学等特性都存在一定的差异,如不同晶面的弹性模量和断裂韧性、熔点、折射率等都各不相同^[2,4]。蓝宝石不同晶面的性能差异使得其在不同领域应用时需选择合理晶面,且需要对不同晶面进行加工。目前,蓝宝石商业化应用的主要晶面有 A 面、C 面、R 面和 M 面。由于不同晶面的机械性能不同,使得其磨削特性也会存在一定的差异。为了更好地适应蓝宝石不同晶面的应用需要,有必要系统研究蓝宝石不同晶面磨削特性的差异。

近年来,随着蓝宝石的应用越来越广泛,针对蓝宝石的各种加工方法的研究成为了热点,尤其是在蓝宝石研磨和抛光等超精密加工方面开展了大量的研究,但针对蓝宝石磨削机理和不同晶面加工特性差异方面的研究仍相对较少。在压痕划

擦方面,柯瑞等人^[5]利用纳米压痕对蓝宝石进行了蠕变性能研究;戴欣平等人^[6]利用纳米压痕对蓝宝石进行了微观的力学特性研究;Cecile Bonifacio 等人^[7]进行了室温下蓝宝石 M 面的纳米划痕试验;张承龙等人^[8]研究了超声辅助单颗金刚石球形压头划擦 C 面蓝宝石的特性。在磨削方面,Bafakeeh O T^[9]利用电解在线砂轮修整(ELID)技术对蓝宝石的表面粗糙度和材料去除率进行了实验研究;梁志强等人^[10-11]对椭圆超声辅助磨削加工 C 面蓝宝石金刚石砂轮的磨损情况以及材料去除机理进行了研究;梁超^[12]设计了适用于较大尺寸 C 面蓝宝石磨削的工艺,通过正交试验验证并进行了优化。在晶体各向异性方面,沈锋^[13]就各向异性对蓝宝石研磨的作用规律进行了实验分析;Honglin Zhu^[14]等人对 A 面、C 面和 M 面蓝宝石衬底不同材料去除速率和表面形貌进行了研究;周平^[4]对比研究了蓝宝石不同晶面的抛光特性发现:蓝宝石 R 面的抛光移除率最低,而蓝宝石 C 面的抛光表面质量最好。

虽然已有学者对蓝宝石不同晶面加工性能差异进行了研究,然而针对蓝宝石不同晶面的磨削机理研究却鲜有报道。因此,本文对蓝宝石的 A 面、C 面、M 面和 R 面开展了磨削试验研究,并从磨削力、磨削力比、比磨削能及表面形貌等角度系统分析了蓝宝石不同晶面磨削特性的差异。

2 磨削实验

所有磨削试验都是在德国 BLOHM 公司生产的高速精密数控磨床上进行的,其实物图如图 1(a)。所选用的砂轮为 230# 树脂结合剂金刚

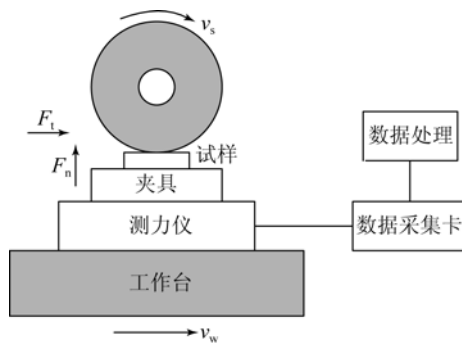
石砂轮,磨粒粒径为 $62\ \mu\text{m}$,浓度为 100%。试验前先用碳化硅滚轮对金刚石砂轮进行整形,然后用碳化硅油石对金刚石砂轮进行修锐。

为了测试磨削蓝宝石不同晶面时的磨削力,采用 Kistler9257A 测力仪和 DEWE2.0 数据采集系统进行磨削力的采集,磨削时所采集信号的平均值作为该磨削条件下的磨削力值,垂直于磨削表面的为法向磨削力 F_n ,平行于工件进给方向的为切向磨削力 F_t ,磨削力采集过程示意图如图 1(b)。文中采用 Phenom 公司生产的 Pro X 台式扫描电子显微镜对磨削表面形貌进行观测,分析了蓝宝石不同晶面材料去除方式的差异。



(a)高速精密磨床实物图

(a)High speed precision grinding machine



(b)磨削力采集过程示意图

(b)Sketch of grinding force acquisition process

图 1 高速精密磨床实物图和磨削力采集示意图

Fig. 1 High speed precision grinding machine and sketch of grinding force acquisition

磨削试样材料为蓝宝石晶体,试样尺寸为 $20\ \text{mm} \times 15\ \text{mm} \times 6\ \text{mm}$ 。在试样制作过程中,采用 X 射线晶向测量仪对试样的晶向进行测试,确保试样的磨削表面分别为 A 面、C 面、M 面和 R

面,磨削面尺寸为 $20\ \text{mm} \times 6\ \text{mm}$ 。不同晶面的弹性模量和断裂韧性如表 1 所示。

表 1 蓝宝石不同晶面的弹性模量和断裂韧性^[4]

Tab. 1 Elastic modulus and fracture toughness of sapphire with different crystal surfaces^[4]

晶面	弹性模量 E/GPa	断裂韧性 K_{IC}
C(0001)	456.5	6.043
M($10\bar{1}0$)	431.2	2.509
A($11\bar{2}0$)	431.2	2.509
R($10\bar{1}2$)	386.1	2.152

磨削试验采用切入式平面磨削,选取逆磨方式,并采用水基磨削液进行冷却,其他磨削试验工艺参数如表 2 所示。

表 2 磨削试验工艺参数

Tab. 2 Grinding test parameters

工艺参数	磨削用量
砂轮直径 d_s/mm	400
砂轮速度 $v_s/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	40,60,80,100,120
工件速度 $v_w/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	1 000,2 000,4 000,6 000, 8 000,10 000
磨削深度 $a_p/\mu\text{m}$	5,10,20,30,40,50
工件材料	蓝宝石(A 面、C 面、M 面和 R 面)

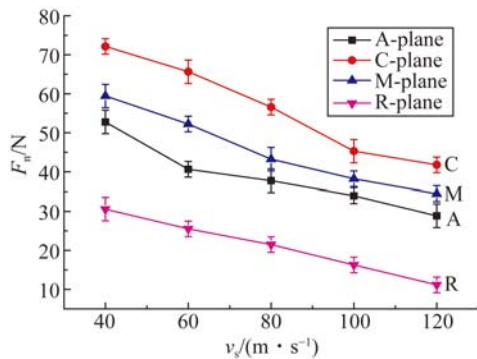
3 实验结果

3.1 蓝宝石不同晶面磨削力比较

为了对比蓝宝石 A 面、C 面、M 面及 R 面磨削特性的差异,对蓝宝石的 4 个晶面在不同磨削速度、不同磨削深度以及不同工作台速度情况下进行磨削试验。在每组磨削参数下对磨削力进行 5 次测试,取 5 次测量结果的平均值作为每组磨削参数下的平均磨削力。

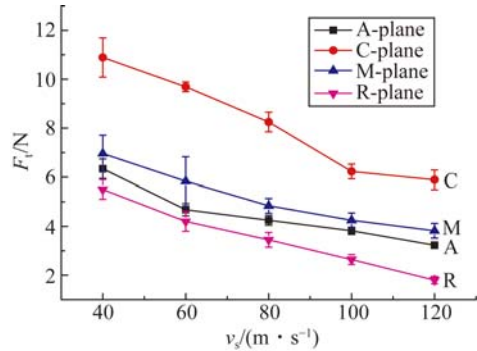
图 2 显示了在相同磨削深度($a_p = 20\ \mu\text{m}$)和工作台速度($v_w = 6\ 000\ \text{mm}/\text{min}$)及不同的磨削速度($v_s = 40, 60, 80, 100$ 和 $120\ \text{m}/\text{s}$)情况下蓝宝石 4 个不同晶面的法向磨削力 F_n 和切向磨削力 F_t 。图 3 显示了在相同磨削速度($v_s = 120\ \text{m}/\text{s}$)和工作台速度($v_w = 6\ 000\ \text{mm}/\text{min}$)及不同的磨削深度($a_p = 5, 10, 20, 30, 40$ 和 $50\ \mu\text{m}$)情况下蓝

宝石 4 个不同晶面的法向磨削力和切向磨削力。图 4 显示了在相同的磨削速度 ($v_s = 120 \text{ m/s}$) 和磨削深度 ($a_p = 20 \text{ }\mu\text{m}$) 及不同的工作台速度 ($v_w = 1\ 000, 2\ 000, 4\ 000, 6\ 000, 8\ 000$ 和 $10\ 000 \text{ mm/min}$) 情况下蓝宝石 4 个不同晶面的法向磨削力和切向磨削力。



(a) 不同晶面法向磨削力与磨削速度的关系

(a) Relationship between normal grinding forces and grinding speeds of different crystal surfaces

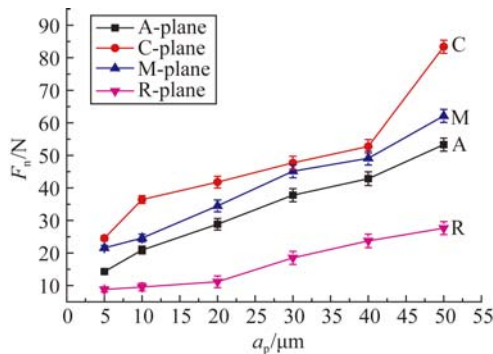


(b) 不同晶面切向磨削力与磨削速度的关系

(b) Relationship between tangential grinding forces and grinding speeds of different crystal surfaces

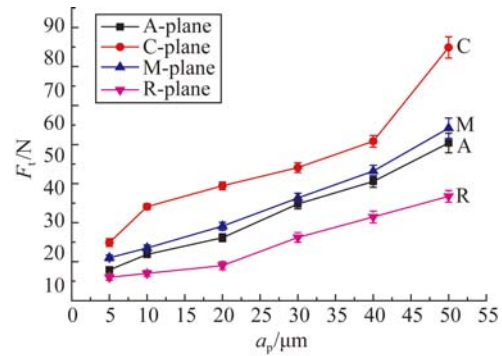
图 2 蓝宝石不同晶面磨削力随磨削速度的变化

Fig. 2 Variation of grinding forces of different crystal surfaces for sapphire with the grinding speeds



(a) 不同晶面法向磨削力与磨削深度的关系

(a) Relationship between normal grinding forces and grinding depths of different crystal surfaces

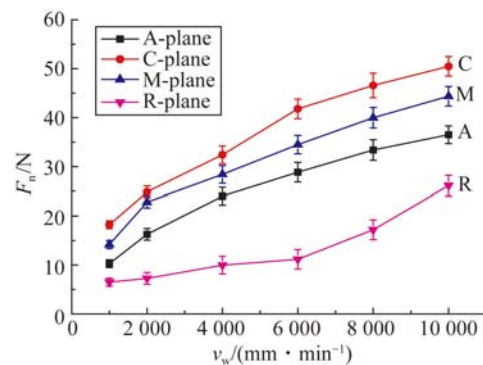


(b) 不同晶面切向磨削力与磨削深度的关系

(b) Relationship between tangential grinding forces and grinding depths of different crystal surfaces

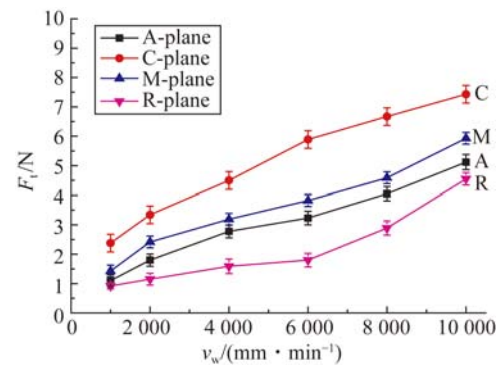
图 3 蓝宝石不同晶面磨削力随磨削深度的变化

Fig. 3 Variation of grinding forces of different crystal surfaces for sapphire with the grinding depths



(a) 不同晶面法向磨削力与工作台速度的关系

(a) Relationship between normal grinding forces and working table speeds of different crystal surfaces



(b) 不同晶面切向磨削力与工作台速度的关系

(b) Relationship between tangential grinding forces and working table speeds of different crystal surfaces

图 4 蓝宝石不同晶面磨削力随工作台速度的变化

Fig. 4 Variation of grinding forces of different crystal surfaces for sapphire with the working table speeds

从图 2、图 3 和图 4 中可以看出,蓝宝石 4 个晶面的法向磨削力和切向磨削力均随砂轮线速度的增大而减小,随着磨削深度和工作台速度的增大而增大,这与一般硬脆性材料的磨削规律相一致^[15]。而蓝宝石 4 个晶面的磨削力却存在较大的差异,在相同磨削条件下,无论是法向磨削力还是切向磨削力,均是 C 面最大,M 面和 A 面其次,而 R 面的法向磨削力和切向磨削均最小。C 面的法向磨削和切向磨削力均约为 R 面的两倍,而 M 面和 A 面的磨削力则较为接近,但 M 面的磨削力稍大。

3.2 蓝宝石不同晶面磨削力比比较

磨削力比为法向磨削力与切向磨削力的比值,即 F_n/F_t 。为了比较不同磨削参数下蓝宝石 A 面、C 面、M 面和 R 面磨削力比的差异,对不同晶面的磨削力比进行了计算,结果如图 5、图 6 和图 7 所示。

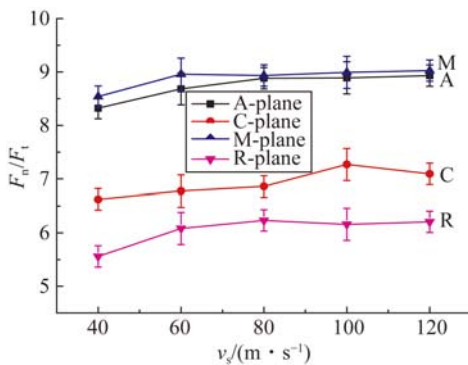


图 5 蓝宝石不同晶面磨削力比随磨削速度的变化

Fig. 5 Variation of grinding force ratios with the grinding speeds of different crystal surfaces for sapphire

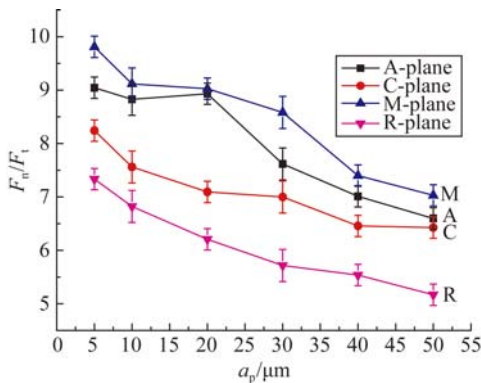


图 6 蓝宝石不同晶面磨削力比随磨削深度的变化

Fig. 6 Variation of grinding force ratios with grinding depths of different crystal surfaces for sapphire

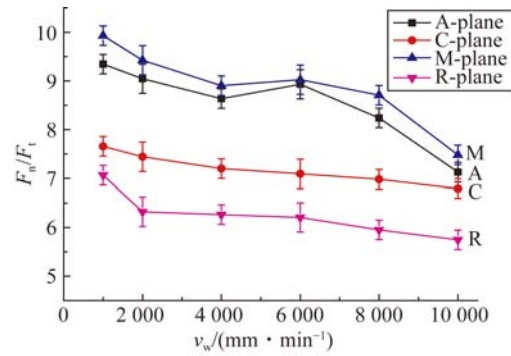


图 7 蓝宝石不同晶面磨削力比随工作台速度的变化
Fig. 7 Variation of grinding force ratios with working table speeds of different crystal surfaces for sapphire

从图 5、图 6 和图 7 中可以看出,蓝宝石 4 个晶面的磨削力比均随着磨削速度的增大而稍微增大,而随着磨削深度和工作台速度的增大而减小,这与磨削一般硬脆性材料的规律是一致的^[16]。然而,蓝宝石 4 个晶面的磨削力比是不同的,其中 M 面和 A 面的磨削力比较大,且 M 面的磨削力比与 A 面的磨削力比较接近,C 面的磨削力比较小,而 R 面的磨削力比最小。M 面的磨削力比为 7.0~10.0,A 面的磨削力比为 6.5~9.5,C 面的磨削力比为 6.5~8.5,而 R 面的磨削力比为 5.0~7.5。

3.3 蓝宝石不同晶面比磨削能比较

比磨削能是指单位时间磨削去除单位体积工件材料所消耗的能量,其计算公式如式(1)所示^[17]:

$$u = \frac{F_t \times v_s \times 10^3}{v_w a_p B_w} (\text{J}/\text{mm}^3), \quad (1)$$

其中: B_w 为工件宽度(mm)。

为了更好地比较蓝宝石 A 面、C 面、M 面及 R 面磨削特性的差异,对不同磨削条件下蓝宝石 4 个晶面磨削的比磨削能按式(1)进行了计算,结果如图 8、图 9 和图 10 所示。

由图 8、图 9 和图 10 可以看出,蓝宝石不同晶面比磨削能均随磨削速度的增大而增大,随着磨削深度和工作台速度的增大而减小,且随着磨削深度的增大,比磨削能的减小趋势变缓,这与一般材料的磨削规律是相同的^[18]。然而,蓝宝石 4 个晶面磨削的比磨削能存在一定的差异,C 面的比磨削能最大,其次是 M 面和 A 面,R 面的比磨削能最小,其中 M 面和 A 面的比磨削能相近,M 面的比磨削能稍大,而 C 面的比磨削能约为 A 面的 1.5 倍,约为 R 面的 2 倍。

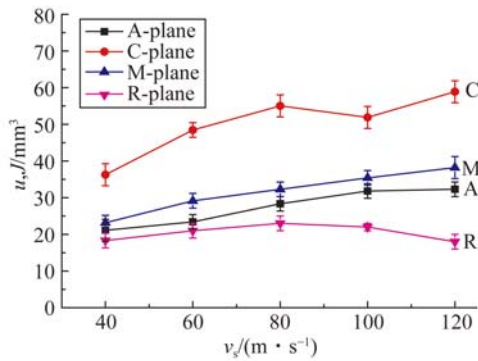


图 8 蓝宝石不同晶面比磨削能随磨削速度的变化

Fig. 8 Variation of different crystal surface specific grinding energies with the grinding speeds

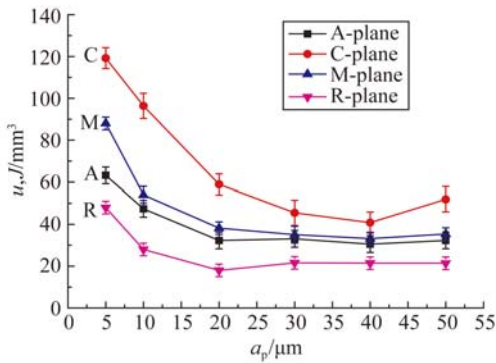


图 9 蓝宝石不同晶面比磨削能随磨削深度的变化

Fig. 9 Variation of different crystal surface specific grinding energies with the grinding depths

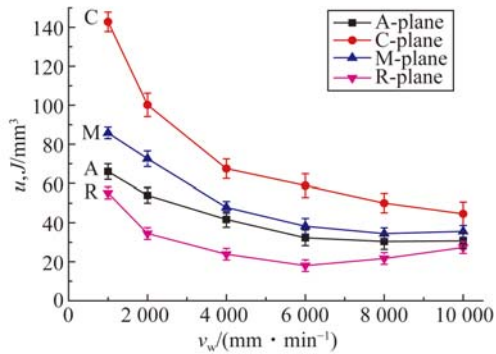


图 10 蓝宝石不同晶面比磨削能随工作台速度的变化

Fig. 10 Variation of different crystal surface specific grinding energies with the working table speeds

3.4 蓝宝石不同晶面磨削表面形貌

为了更好地比较蓝宝石不同晶面的磨削特性差异,采用扫描电子显微镜分别对磨削后蓝宝石 A 面、C 面、M 面及 R 面的表面形貌进行了观测,以揭示蓝宝石 4 个晶面磨削材料去除方式的差

异。选取单颗磨粒最大未变形切削厚度较小时的磨削参数,即磨削速度 v_s 为 120 m/s、磨削深度 a_p 为 5 μm 以及工作台速度 v_w 为 6 000 mm/min 时 4 个晶面磨削后的表面形貌进行了观测,其结果如图 11 所示。

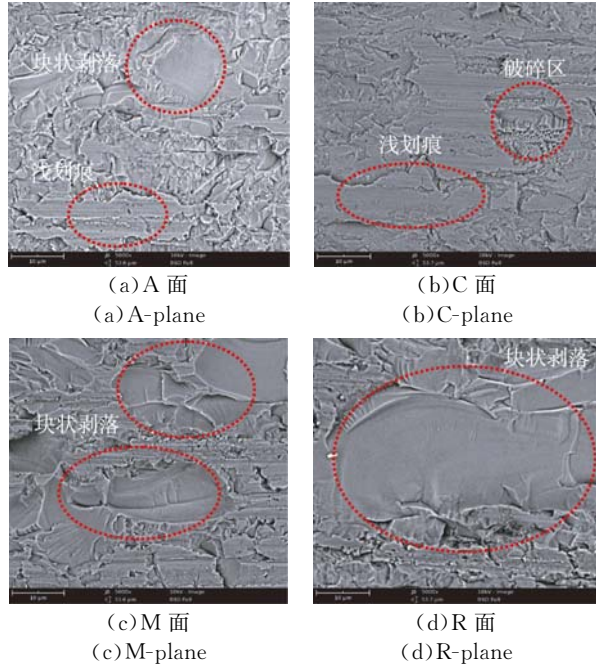


图 11 蓝宝石不同晶面的磨削表面形貌(5 000 倍)
Fig. 11 Surface topographies of different crystal surfaces of sapphire (5 000 times)

图 11(a)中蓝宝石 A 面磨削表面形貌显示:磨削表面存在大量的脆性断裂和破碎,但也存在少量较小的块状剥落和少许较浅的划痕。这说明蓝宝石 A 面磨削时以脆性断裂和破碎为主要材料去除方式,伴随有少量的块状剥落去除。由于块状剥落去除量较少,且块状较小,A 面磨削后表面相对较为平整。

图 11(b)中蓝宝石 C 面磨削表面形貌显示:磨削表面存在部分脆性断裂和破碎区,但也存在大量的浅划痕区,不存在块状剥落现象,磨削表面平整,表面粗糙度较小,表面质量最好。

图 11(c)中蓝宝石 M 面磨削表面形貌显示:磨削表面存在大量的断裂和破碎区,尤其还存在大量的块状解离剥落情况,没有发现明显的浅划痕区,说明蓝宝石 M 面磨削时材料主要以脆性断裂和破碎方式去除为主,但还伴有大量的块状解离剥落方式去除。由于存在大量的块状解离剥落

去除,磨削表面存在较多微小凹坑,表面粗糙度相对较大。

图 11(d)中蓝宝石 R 面磨削表面形貌显示:磨削表面也存在大量的断裂和破碎区,特别是存在大量的块状解离剥落情况,且剥落块较大,在磨削表面留下大量的剥落坑,使得磨削表面粗糙度较大。

对比 4 个晶面磨削表面形貌发现,C 面以部分脆性断裂和部分粉末化去除方式为主,A 面、M 面和 R 面均以脆性断裂和破碎去除方式为主,但存在不同程度的块状解离剥落现象,其中 A 面块状解离剥落较少,且块状体较小,其次是 M 面,而 R 面块状解离剥落最多,且块状体较大。因此,磨削后 C 面的粗糙度最小,其次是 A 面,M 面,而 R 面的粗糙度较大。

4 讨 论

磨削是一个复杂的加工过程,磨削表面质量的好坏不仅与磨削机床、砂轮和磨削工艺等有关,也受工件材料性能的影响,尤其是工件的材料机械性能,如弹性模量和断裂韧性。蓝宝石是一种典型的各向异性材料,不同晶面上原子的排布结构和排布密度的差异使得蓝宝石不同晶面的性能也不同,蓝宝石 4 个晶面的弹性模量和断裂韧性如表 1 所示,均存在较大差异。弹性模量是衡量材料产生弹性变形难易程度的材料参数^[19],而断裂韧性则是材料阻止宏观裂纹失稳扩展能力的度量,也是材料抵抗脆性破坏的韧性参数^[20]。磨削是利用砂轮表面磨粒对工件进行微小切削的,在磨削过程中材料表面要经过划擦、耕犁和切削等过程,由于蓝宝石不同晶面的弹性模量和断裂韧性的差异使得磨削过程中材料对砂轮去除材料过程的阻碍不同,因此,蓝宝石不同晶面的磨削特性也必然存在一定的差异。

磨削力作为研究磨削过程的一个重要参数,能够反映磨削过程的基本特征。磨削力是由于磨削时磨粒受到工件材料变形的阻力以及磨粒与工件表面间的摩擦力所形成的。因此,磨削力的大小与工件材料性能有着密切关系。蓝宝石 4 个晶面的弹性模量和断裂韧性不同,使得磨削 4 个晶面时的磨削力也存在明显差异。由于蓝宝石 C

面的弹性模量和断裂韧性均最大,使得在 C 面磨削过程中去除材料时所引起的阻力最大,因此,无论是法向磨削力还是切向磨削力 C 面均最大,相应地,M 面和 A 面的磨削力较小,R 面的磨削力最小。

磨削力比为法向磨削力与切向磨削力的比值,是评价材料可磨削性能的一个重要指标,不仅与砂轮的锐利程度有关,且随被磨削材料性能的不同而不同。通常情况下,材料弹性模量越大说明越难磨,其磨削力越大,尤其是法向磨削力大。而材料的断裂韧性越大,则在磨削材料去除过程中所引起的滑擦和耕犁阻力越大,切向磨削力越大。C 面的法向磨削力最大,但由于其切向磨削力也很大,使得其磨削力比较小;虽然 M 面和 A 面的法向磨削力和切向磨削力均较 C 面小,但其磨削力比却比 C 面大,这说明 M 面和 A 面的可磨削性比 C 面差;R 面的切向磨削力最小,但其法向磨削力也比其他 3 个晶面要小得多,所以其磨削力比最小。

比磨削能是指磨除工件上单位体积的材料所消耗的能量。在磨削加工过程中,比磨削能主要是由磨屑形成能、滑擦能和耕犁能 3 部分组成。材料断裂韧性越大,在磨削过程中所消耗的滑擦能和耕犁能越多,而材料的弹性模量越大,磨削去除材料时的阻力越大,磨屑形成所需能量也就越大。因此,C 面的比磨削能最大,M 面和 A 面的比磨削能较小,R 面的比磨削能最小。

磨削表面质量受加工参数、机床性能和砂轮特性等影响,也与被磨工件的材料性能有着密切关系。在相同磨削条件下,材料性能不同,可能会造成其磨削材料去除方式不同,使得磨削表面质量不同。在蓝宝石 4 个晶面中,C 面的断裂韧性最大,其在磨削材料去除过程中对裂纹的扩展具有一定的阻碍作用,使得 C 面的磨削表面破碎较小,较为平整。而 M 面、A 面和 R 面的断裂韧性则相较 C 面要小得多,材料表现得很脆,故在磨削材料去除过程中会在磨削表面产生大量的表面裂纹,表面较为粗糙。又由于 M 面、A 面和 R 面内部原子结构的差异,使得在磨削这 3 个晶面过程中,容易产生一定量的材料块状解离剥落,在表面形成凹坑,尤其是 R 面更为严重,因此,R 面的磨削表面最为粗糙。

5 结 论

本文通过对蓝宝石不同晶面开展高速精密磨削试验,从磨削力、磨削力比、比磨削能及磨削表面形貌等角度对比了蓝宝石4个晶面磨削特性的差异。试验结果表明:蓝宝石C面的磨削力最

大,M面和A面其次,而R面最小;蓝宝石的磨削力比是M面和A面较大,C面较小,R面最小;蓝宝石的比磨削能则是C面最大,M面和A面其次,R面最小;蓝宝石4个晶面的材料去除方式不同,C面以部分脆性断裂和部分粉末化去除方式为主,而M面、A面和R面则是以脆性断裂方式去除为主,并伴有一定量的块状解离剥落。

参考文献:

- [1] DOBROVINSKAYA E R, LYTVYNOV L A, PISHCHIK V. *Sapphire: Material, Manufacturing, Applications* [M]. US:Springer,2009:42-45.
- [2] HANEY E J, SUBHASH G. Static and dynamic indentation response of basal and prism plane sapphire [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2011, 31(9):1713-1721.
- [3] 多布文斯卡亚,李托维诺夫,皮斯奇克. 蓝宝石——材料·制造·应用[M]. 张明福,译.北京:科学出版社,2013.
DOBROVINSKAYA E R. *Sapphire: Material, Manufacturing, Applications* [M]. ZHANG M F, Trans. Beijing:Science Press, 2013. (in Chinese)
- [4] 周平. 单晶蓝宝石的延性研磨加工研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2010.
ZHOU P. *Study on Ductile Lapping of Crystal Sapphire Wafer* [D]. Hangzhou:Zhejiang University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [5] 柯瑞,张宇民,陈子羿,等. 蓝宝石单晶纳米压痕蠕变性能研究[J]. *人工晶体学报*, 2014, 43(3):487-491.
KE R, ZHANG Y M, CHEN Z Y. Study on creep properties of sapphire single crystal [J]. *Journal of artificial crystal*, 2014,43(3):487-491. (in Chinese)
- [6] 戴欣平,赵萍,文东辉. 单晶蓝宝石的延性研磨加工[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(6):1316-1324.
DAI X P, ZHAO P, WEN D H. Ductile lapping of single crystal sapphire [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6):1316-1324. (in Chinese)
- [7] HUANG L, BONIFACIO C, SONG D, *et al.*. Investigation into the microstructure evolution caused by nanoscratch-induced room temperature deformation in M-plane sapphire [J]. *Acta Materialia*, 2011, 59(13):5181-5193.
- [8] ZHANG C L, FENG P F, ZHANG J F. Ultrasonic vibration-assisted scratch-induced characteristics of C-plane sapphire with a spherical indenter [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, 64:38-48.
- [9] BAFAKEEH O T, KHOSHAIM A B, MARINESCU I D. ELID fine grinding of sapphire rollers with emphasis on roughness and material removal rate [J]. *Procedia Manufacturing*, 2016, 5:1249-1264.
- [10] LIANG Z Q, WANG X B, WU Y B, *et al.*. An investigation on wear mechanism of resin-bonded diamond wheel in Elliptical Ultrasonic Assisted Grinding (EUAG) of monocrystal sapphire [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212(4):868-876.
- [11] LIANG Z Q, WANG X B, WU Y B, *et al.*. Experimental study on brittle-ductile transition in elliptical ultrasonic assisted grinding (EUAG) of monocrystal sapphire using single diamond abrasive grain [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, 71:41-51.
- [12] 梁超. 大尺寸蓝宝石整流罩加工工艺优化及实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2013.
LIANG C. *Research on parameter optimization of large size sapphire machining process and experimental* [D]. Harbin:Harbin University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [13] 沈锋. 各向异性对单晶蓝宝石精密研磨的作用规律[J]. *科技信息*, 2010(24):142,145.
SHEN F. The effect of anisotropy on the precision lapping of single crystal sapphire [J]. *Science and technology information*, 2010(24):142,145. (in Chinese)
- [14] ZHU H L, TESSAROTO L A, SABIA R, *et al.*. Chemical mechanical polishing (CMP) anisotropy in sapphire [J]. *Applied Surface Science*, 2004, 236(1-4):120-130.
- [15] 刘折. ZTA纳米复相陶瓷超声ELID复合磨削机理研究[D]. 焦作:河南理工大学,2014.
LIU Z. *Experimental studies on ultrasonic vibration and electrolytic in-process dressing (ELID)*

- [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2014. (in Chinese)
- [16] 周晓玉. 超细晶粒硬质合金磨削实验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
ZHOU X Y. *The experimental research on grinding of ultra-fine grain cemented carbide* [D]. Changsha: Hunan University, 2013. (in Chinese)
- [17] ZHANG D K, LI C H, JIA D Z, *et al.*. Specific grinding energy and surface roughness of nanoparticle jet minimum quantity lubrication in grinding [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2015, 28(2):570-581.
- [18] 程敏. 硬质合金材料 PA30 和 YG8 超高速磨削工艺研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
CHENG M. *The research on super high speed grinding technology in YG8 and PA30 cemented carbide* [D]. Changsha: Hunan University, 2011. (in Chinese)
- [19] 刘伟香, 周忠于. 纳米结构陶瓷涂层磨削力的研究[J]. *机械制造与自动化*, 2012, 41(1):71-72.
LIU W X, ZHOU Z Y. Research on grinding force of nanostructure ceramic coatings [J]. *Machine Building & Automation*, 2012, 41(1):71-72. (in Chinese)
- [20] 李南翔. 超音速火焰喷涂 WC-Co 涂层性能研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2010.
LI N X. *Research on properties of HVOF sprayed WC-Co coatings* [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2010. (in Chinese)

导师简介:



胡中伟(1979—),男,湖北咸宁人,博士,讲师,硕士研究生导师,2011年于湖南大学获得博士学位,主要从事高效精密加工的研究。E-mail:huzhongwei@hqu.edu.cn



邵铭剑(1992—),男,福建厦门人,硕士研究生,主要从事高效精密加工的研究。E-mail:shaomingjian@hqu.edu.cn

作者简介:



徐西鹏(1965—),男,浙江温州人,博士,教授,博士生导师,1992年于南京航空航天大学获得博士学位,现为华侨大学党委常委、副校长,研究生院院长,主要从事高效精密加工的研究。E-mail:xpxu@hqu.edu.cn