

文章编号 1004-924X(2017)04-0963-06

## 镁铝尖晶石的塑性域磨削

马振芳<sup>1,2</sup>, 王 丽<sup>1</sup>, 姜 雪<sup>2</sup>, 董连和<sup>1\*</sup>

- (1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;  
2. 中国兵器东北工业集团有限公司; 吉林 长春 130103)

**摘要:** 为了避免和减小镁铝尖晶石在研磨工艺中产生的亚表面损伤, 研究了合理控制磨削参数, 实现镁铝尖晶石塑性域磨削的方法。分析了镁铝尖晶石的脆塑转变机理, 采用不同尺寸规格的金刚石砂轮磨粒和改变砂轮进给量等参数进行了大量实验, 探索了镁铝尖晶石的塑性磨削条件及影响因素, 实现了镁铝尖晶石的塑性域高精度磨削。采用 VG401MKII 型超精密磨床和 3000# 金刚石砂轮, 设定砂轮速度为 20 m/s, 工件速度为 0.3 m/s, 进给量为 0.5~3 μm/r 进行了磨削实验。结果显示: 当金刚石砂轮磨粒的平均尺寸小于 8 μm 时可以实现镁铝尖晶石的塑性磨削, 其表面粗糙度  $R_a$  可以达到 2.291 nm, 透光率可提高 17%。研究结果表明, 砂轮的磨粒尺寸和砂轮进给量对镁铝尖晶石材料的表面加工质量影响很大, 该结果为研究磨削高质量镁铝尖晶石表面提供了依据。

**关键词:** 镁铝尖晶石; 塑性域磨削; 金刚石砂轮; 表面粗糙度

**中图分类号:** TQ174.758.23; TN305.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172504.0963

## Ductile grinding of $MgAl_2O_4$ spinel

MA Zhen-fang<sup>1,2</sup>, WANG Li<sup>1</sup>, JIANG Xue<sup>2</sup>, DONG Lian-he<sup>1</sup>

- (1. College of Photoelectric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;  
2. Northeast Industrial Group Co., Ltd., Changchun 130022, China)  
\* Corresponding author, E-mail: 446994323@qq.com

**Abstract:** To avoid and reduce the subsurface damage generated in grinding process of  $MgAl_2O_4$  spinel, a ductile grinding method of  $MgAl_2O_4$  spinel by reasonably controlling grinding parameters was proposed. The brittle-ductile transition mechanism for the  $MgAl_2O_4$  spinel was analyzed, and a lots of experiments were performed by using abrasive particles of diamond wheel with different dimensions and changing the load of grinding wheel and other parameters. The ductile grinding conditions and effect factors of the  $MgAl_2O_4$  spinel were explored and a higher precision ductile grinding for the  $MgAl_2O_4$  spinel was implemented. By adopting the VG401MKII precision grinder with 3000# diamond wheel, a grinding experiment was carried out under the condition of a wheel speed of 20 μm, a workpiece speed of 0.3 m/s and the feed load of 0.5—3 μm/r. The experimental results show that the ductile grinding of  $MgAl_2O_4$  spinel could be achieved when the average dimension of abrasive particles

收稿日期: 2016-07-22; 修订日期: 2016-10-18.

基金项目: 吉林省自然科学基金资助项目 (No. 20150101062JC)

for the diamond wheel is less than  $8 \mu\text{m}$ , its surface roughness could reach  $R_a 2.291 \text{ nm}$ , and light transmittance can be improved by  $17\%$ . The research results show that the average dimension of abrasive particles for the grinding wheel and the feed load of grinding wheel have great influence on the quality of finished surfaces. It provides references for the study of grinding high-quality surfaces of  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  spinel.

**Key words:**  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  spinel; ductile grinding; diamond wheel; surface roughness

## 1 引言

镁铝尖晶石 ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ) 透明陶瓷是一种从紫外、可见光到中红外及毫米波段均有着良好透过率的光学材料<sup>[1-2]</sup>,能够在高温、强腐蚀、高磨损、强冲击的环境下工作,还具备强度高、硬度高和电绝缘性良好等性能,目前被广泛地应用在特殊光学仪器、耐高温的无线电设备等技术领域<sup>[3-4]</sup>。

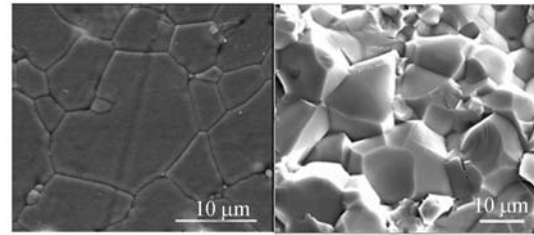
镁铝尖晶石采用高纯粉末经真空热压烧结结合热等静压技术制成。对其加工时,除考虑它的高硬度外,也需考虑它的脆性<sup>[5-6]</sup>。采用传统技术加工时,经过长周期高成本的研抛,其表面粗糙度可以达到超光滑表面水准,但是在超光滑表面之下一定深度处会由于晶粒剥落和亚表面的损伤使镁铝尖晶石存在微坑、脆性划痕和裂纹等缺陷<sup>[7-9]</sup>。

本文分析了镁铝尖晶石的脆塑转变机理,对镁铝尖晶石进行了大量的磨削实验研究,探索了镁铝尖晶石的塑性磨削条件及影响因素,实现了镁铝尖晶石的塑性域高精度磨削。

## 2 镁铝尖晶石透明陶瓷的脆塑转变机理

镁铝尖晶石是由微晶构成的电解质多晶体,由阴阳离子之间的化学键结合而成,图 1 所示为镁铝尖晶石表面及断面微观晶粒形貌。磨削过程中由于化学键的断裂容易产生裂纹;其陶瓷表面晶粒的突出部分被去除后,也会因晶粒残存部分嵌入深度很浅,容易在后续磨料颗粒的作用下剥落,形成表面微坑麻点,所以镁铝尖晶石很难达到很高的表面精度。

通常情况下,陶瓷材料的去除机理有四种模



(a) 表面的 SEM (b) 断面的 SEM  
(a) SEM of surface (b) SEM of cross-section

图 1 镁铝尖晶石的微观形貌图

Fig. 1 Morphologic diagram of  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  spinel

式,即断裂、断裂与塑性共存、塑性成形和弹性模式。如果材料在微小去除条件下从脆性破坏向塑性变形转变,使硬脆性材料的去除加工由脆性转变为塑性,即可以显著降低亚表面破坏,提高加工表面质量。

Bifano 等认为<sup>[10-11]</sup>,实现脆性材料的塑性域的磨削,要保证临界切削深度大于加工时的切削深度,并以磨削表面相对面积率为  $10\%$  以下作为实现塑性域磨削的判据。这里压痕的最大深度要满足:

$$l_c = 0.15 K \left( \frac{G}{H} \right) \left( \frac{F_{lc}}{H} \right), \quad (1)$$

式中  $G$  (MPa) 为镁铝尖晶石的弹性模量;  $H$  (GPa) 为镁铝尖晶石的显微硬度;  $F_{lc}$  ( $\text{MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$ ) 为镁铝尖晶石的断裂韧性;  $K$  为磨削液影响系数。

对于给定的镁铝尖晶石材料,磨削时单个磨粒切削的深度决定了镁铝尖晶石的去除方式。在加工条件保持不变的情况下,单个磨粒切削的深度也决定其切削刃引起的应力场的尺度大小。

分析了磨削时金刚石砂轮和镁铝尖晶石的接触状态,磨削层平均体积等于单位时间内被砂轮磨去的镁铝尖晶石的体积与单位时间内砂轮表面参加工作的磨刀数之比,即

$$l b_c a = \frac{v_w a_p b}{v_s b N_d}, \quad (2)$$

式中  $l$  为每一工作磨刃的平均磨削厚度;  $b_c$  是每一工作磨刃的平均磨削宽度;  $a$  为砂轮与工件的接触长度;  $v_w$  (mm/s) 为镁铝尖晶石样品的进给速度;  $a_p$  (mm) 为砂轮磨削镁铝尖晶石的深度;  $v_s$  (mm/s) 为金刚石砂轮磨削时的线速度;  $N_d$  ( $\text{mm}^{-2}$ ) 为金刚石砂轮的动态有效磨刃数。其中取  $a = \sqrt{a_{pd}}$ ,  $d_e$  (mm) 是金刚石砂轮当量直径。

通过计算,可以得出金刚石砂轮单个磨粒在镁铝尖晶石表面的最大切削深度为:

$$l_{cmax} = 2l = \left[ \frac{4v_w}{v_s N_d C} \right]^{\frac{1}{2}} \left[ \frac{a_p}{d_e} \right], \quad (3)$$

式中  $C = \frac{b_c}{l}$  为磨削常数。当单颗磨粒最大切深  $l_{cmax}$  小于镁铝尖晶石的临界压痕深度时,即  $l_c > l_{cmax}$  时,材料的去除为塑性域磨削<sup>[12]</sup>。从以上理论分析可知,具备适当的加工条件后,只要合理控制磨粒尺寸和磨削深度等加工参数,就能够实现塑性域磨削。

### 3 尖晶石陶瓷磨削实验条件

实验采用不存在杂质相的镁铝透明尖晶石陶瓷,测量镁铝尖晶石样件的直径为  $(35 \pm 0.05)$  mm,厚度为  $(3 \pm 0.01)$  mm。测试得到其透射率约为 71%,弹性模量  $E$  为 190 GPa,断裂韧性为 1.9,显微硬度  $H$  为 16.17 GPa。磨削时采用  $(20 \pm 10)$  °C 高压、大流量去离子水对工件进行冷却,  $K=1$ 。根据公式(1)计算得到该尖晶石的压痕临界深度  $l_c$  大约为 24.3 nm。

磨削采用 VG4016MK III 型超精密磨床和不同磨粒规格的金刚石砂轮,其对应的参数如表 1 所示。

表 1 磨床与砂轮参数

Tab. 1 Parameters of grinder and grinding wheel

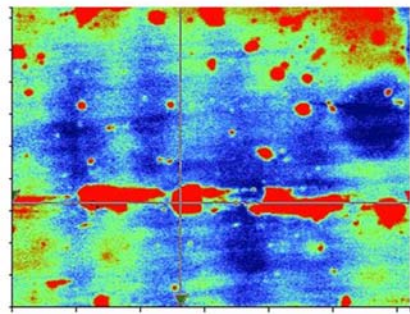
VG4016MK III 磨床参数		金刚石砂轮参数	
磨头主轴转速/ $\text{kr} \cdot \text{min}^{-1}$	$0 \sim 80$	砂轮形状	杯形
主轴进给速度/ $\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$1 \sim 16$	磨粒规格	400、800、1500、3000 #
主轴回转精度/ $\mu\text{m}$	0.1	磨粒平均直径/ $\mu\text{m}$	40、20、8、2
工件进给速度/ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	$0 \sim 2.5$	结合剂	树脂
工件回转精度/ $\mu\text{m}$	0.05	浓度	0.25

在磨削过程中对砂轮进行修整能够保证磨粒的尖锐度和磨削表面的均匀性,在砂轮圆周速度  $v_s = 3$  m/s 时,采用 Gv # 800 型修整器以速度  $v_w = 0.6$  m、切削深度  $a_p = 0.8$   $\mu\text{m}$  等技术参数对金刚石砂轮进行修整。

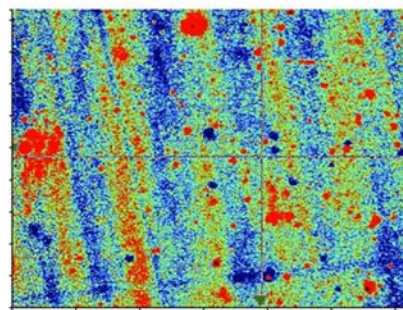
实验采用逆磨的磨削方式。逆磨时磨削力恒定,对镁铝尖晶石的面型精度有改善作用。此外,镁铝尖晶石属于硬脆陶瓷材料,在磨削过程中能够承受压力,但是承受拉力时容易断裂,因此采用磨削时对基片产生挤压效应的逆磨方式进行磨削,这样对避免崩边和塌边现象更加有利。

### 4 实验结果与分析

根据公式(3)可以看出,金刚石磨粒的尺寸、砂轮的速度以及工件的速度对单个磨粒的最大磨削深度都有重要的影响。这里采用以上 4 种不同尺寸的磨粒在砂轮速度  $v_s = 20$  m/s,工件速度  $v_w$



(a) 20  $\mu\text{m}$  磨粒,断裂模式  
(a) 20  $\mu\text{m}$  grains, fracture mode



(b) 8  $\mu\text{m}$  磨粒,塑性磨削  
(b) 8  $\mu\text{m}$  grains, ductile grinding

图 2 磨削镁铝尖晶石表面形貌图

Fig. 2 Surface topography of  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  spintel grinding

$=0.3 \text{ m/min}$  的情况下对镁铝尖晶石进行磨削加工。用 BrukerGT-K0K1 白光干涉光学轮廓仪对实验样件进行观察,得到磨削镁铝尖晶石表面形貌如图 2 所示,图 2(a)中磨削痕迹比较明显的,属于断裂模式,图 2(b)中尖晶石表面均匀性较好,透明度高,没有观察到裂纹,呈塑性域磨削。美国 Komanduri 等学者经过大量实验证明得到磨粒的切削深度约是磨粒切削刃口半径的  $1/10 \sim 1/3$ <sup>[13-14]</sup>,这里磨削时采用的金刚石砂轮的平均磨粒尺寸小于  $8 \mu\text{m}$ ,因为使用的金刚石砂轮的磨粒的刃口半径远小于金刚石砂轮的平均磨粒尺寸时,金刚石砂轮磨粒刃口半径可能是亚微米甚至更小。图 3 所示为金刚石砂轮的扫描电子显微镜(SEM)图,显示金刚石砂轮的切削深度可以小到几十纳米甚至几纳米,远远小于镁铝尖晶石的脆塑转变临界值。当镁铝尖晶石处于塑性模式磨削状态时,磨削后的光学表面不存在任何微裂纹缺陷。

基于塑性磨削条件,用 3000 # 金刚石砂轮,在砂轮速度为  $20 \text{ m/s}$ ,镁铝尖晶石速度为  $0.3 \text{ m/s}$ ,

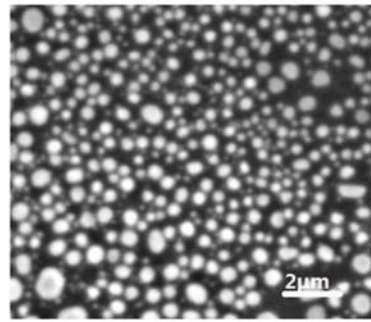


图 3 金刚石砂轮 SEM 图

Fig. 3 SEM image of diamond grinding wheel

进给量为  $0.5 \mu\text{m/r}$  条件下进行了磨削实验,并对磨削的镁铝尖晶石表面进行了检测分析。观察范围为  $45 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$  内测得的尖晶石的磨削表面图形及其 3D 表面形貌如图 4、图 5 所示。

可以看出,3000 # 砂轮磨削的镁铝尖晶石表面即使在高分辨率的白光干涉仪检测下也看不见微观裂纹和脆性崩碎产生的凹坑,呈现规则的划痕状,表面非常光滑。

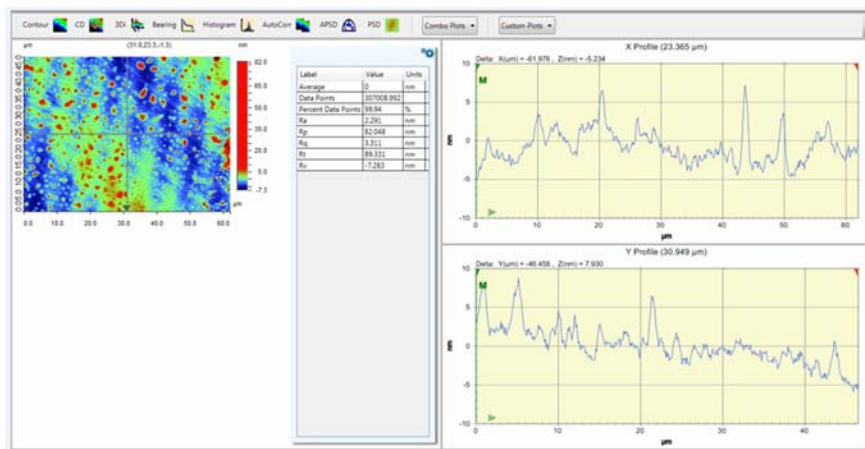


图 4 磨削后镁铝尖晶石的表面测量图

Fig. 4 Surface measurement figure of  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  spinel after grinding

经多次实验分析可知,由于金刚石砂轮表面上的有效磨粒不是均匀地去除镁铝尖晶石表面上等于金刚石砂轮切削深度的厚度,当砂轮与镁铝尖晶石基片接触时,只有砂轮和尖晶石表面相互凸出的波峰才会相互磨削,发生切削现象;而波谷与波峰之间、波谷与波谷之间,彼此不直接接触,因而不发生磨削,材料不会被去除,所以镁铝尖晶石表面存在部分磨痕。

由公式(1)、(3)分析可知,镁铝尖晶石的脆塑

转变条件的关键影响因素是金刚石砂轮的磨粒切削深度。X、Y 方向的扫描结果显示其表面最低处为  $-7.283 \text{ nm}$ ,则最大切削深度大约为  $7.283 \text{ nm}$ ,满足  $l_c > l_{\text{max}}$ ,呈现明显的塑性去除特性,这说明已经实现了镁铝尖晶石的塑性磨削状态。

检测结果表明镁铝尖晶石最终磨削表面粗糙度 rms 值为  $3.315 \text{ nm}$ , $R_a$  值为  $2.291 \text{ nm}$ 。

镁铝尖晶石表面粗糙度越大,散射光的作用越大,造成光强损失越大,因此,降低尖晶石表面

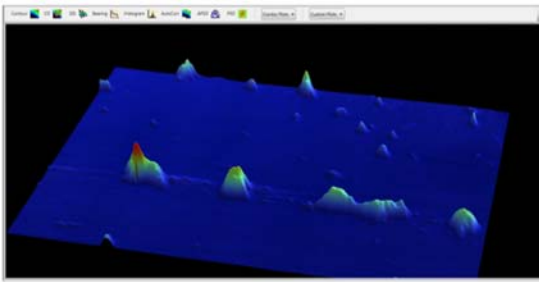


图 5 磨削后镁铝尖晶石的 3D 形貌图

Fig. 5 3D topography of MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> spinel after grinding

的粗糙度能够提高其透光性。测量 3000 # 砂轮磨削过的镁铝尖晶石透光率可达 89% 左右,图 6 所示为磨削前后尖晶石的透光情况。



图 6 镁铝尖晶石磨削前和磨削后的透光率对比

Fig. 6 Transmittance comparison of MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> spinel before and after grindings

对镁铝尖晶石使用不同粒度金刚石砂轮进行大量磨削实验,得到的金刚石砂轮平均磨粒尺寸 ( $W$ ) 与镁铝尖晶石表面粗糙度关系曲线见图 7。

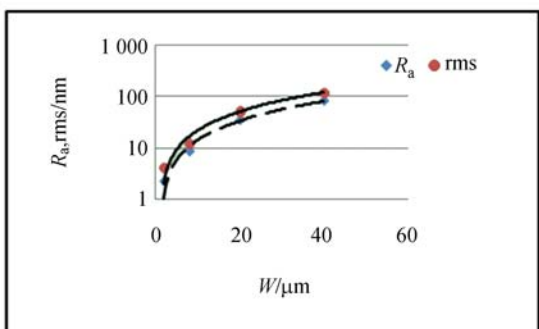


图 7 金刚石砂轮平均磨粒尺寸与镁铝尖晶石表面粗糙度关系

Fig. 7 Relationship between wheel average grain size and surface roughness

由图可知,磨削表面粗糙度主要取决于磨粒尺寸的大小,粗糙度随着金刚石砂轮磨粒的尺寸增大而增大,反之亦然。采用不同粒度的金刚石砂轮进行磨削,其表面粗糙度  $R_a$  和 rms 均变化较大。

根据公式(3)知道,除磨粒直径对表面粗糙度有较大影响之外,磨削过程中金刚石砂轮的进给量也对镁铝尖晶石表面的粗糙度起到决定性作用,图 8 所示为金刚石砂轮进给量 ( $f$ ) 与镁铝尖晶石表面粗糙度的关系。

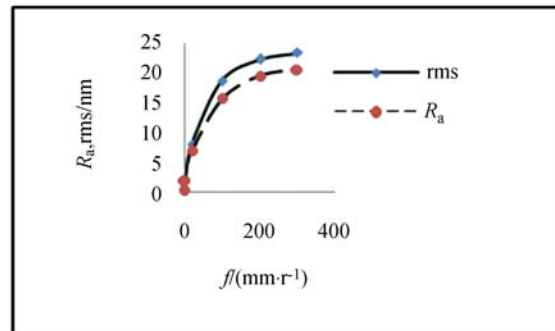


图 8 金刚石砂轮进给量与镁铝尖晶石表面粗糙度的关系

Fig. 8 Relationship between wheel amount of feed and surface roughness

磨削采用了逆磨的方式,随着镁铝尖晶石的移动和金刚石砂轮的转动,磨削的法向力较小,因此磨削过程中在镁铝尖晶石表面造成的裂纹向其深处延伸的趋势较小。另外,由于磨削过程中对金刚石砂轮进行了即时的修整,保证了磨粒在加工过程中一直具有锋利的磨削刃,并且数量多又具有等高性,从而极大地降低了磨削时产生的压力。因此,磨削过程中磨粒所造成的破碎区较小,使表面达到镜面,且精度很高,故容易实现塑性方式磨削。

## 5 结 论

本文研究了镁铝尖晶石透明陶瓷的脆塑转变机理,采用逆向磨削的方法进行了大量实验,实现了镁铝尖晶石无裂纹的塑性磨削,表面粗糙度 rms 值达到 3.315 nm、 $R_a$  值达到 2.291 nm,透光率也提高了 17%。在塑性磨削条件下,对金刚石砂轮磨粒的平均尺寸和进给量对表面粗糙度的影响进行了探讨,研究结果对在镁铝尖晶石的磨削机理和工艺研究有一定的指导意义。

## 参考文献:

- [1] BIFANO T G, DOW T A, SCATTERGOOD R O. Ductile-regime grinding; a new technology for machining brittle materials[J]. *Journal of Engineering for Industry*, 1991, 113(2):184-189.
- [2] PUTTICK K E, FRANKS A. The physics of ductile-brittle machining transitions: single-point theory and experiment [J]. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 1990, 56(5):788-792.
- [3] 傅玉灿, 田霖, 徐九华, 等. 磨削过程建模与仿真研究现状[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(7): 197-205.  
FU Y C, TIAN L, XU J H, *et al.*. Development and application on the grinding process modeling and simulation[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(7):197-205. (in Chinese)
- [4] 朱楠楠, 朱永伟, 李军, 等. 铈酸锂晶体的研磨亚表面损伤深度[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(12): 3387-3394.  
ZHU N N, ZHU Y W, LI J, *et al.*. Subsurface damage depth of lithium niobate crystal in lapping[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(12):3387-3394. (in Chinese)
- [5] CHENG J, YIN G Q, WEN Q, *et al.*. Study on grinding force modelling and ductile regime propelling technology in micro drill-grinding of hard-brittle materials[J]. *Journal of Material Processing Technology*, 2015, 223: 150-163.
- [6] 郭晓光, 翟昌恒, 张亮, 等. 光学石英玻璃纳米级加工性能[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(11): 2959-2966.  
GUO X G, ZHAI C H, ZHANG L, *et al.*. Nano-processing performance of optical glass[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(11): 2959-2966. (in Chinese)
- [7] YAO P, YOSHIHARA N, HITOMI N, *et al.*. Ductile and brittle mode grinding of fused silica[J]. *Key Engineering Materials*, 2010, 447-448: 21-25.
- [8] 仇中军, 邹大程, 闫广鹏. 基于修整力的树脂结合剂金刚石砂轮机械修整[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(4):996-1003.  
QIU ZH J, ZOU D CH, YAN G P. Mechanical dressing of resin bond diamond grinding wheel based on dressing force[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(4): 996-1003. (in Chinese)
- [9] 张文生, 张飞虎, 董申. 光学脆性材料的金刚石切削加工[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(2): 139-143.  
ZHANG W S, ZHANG F H, DONG SH. Diamond cutting of optical brittle materials[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(2):139-143. (in Chinese)
- [10] LI B Z, NI J M, YANG J G, *et al.*. Study on high-speed grinding mechanisms for quality and process efficiency[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 70(5-8): 813-819.
- [11] 王平, 张春河, 张飞虎, 等. 光学玻璃的磨削加工方法[J]. *光学精密工程*, 1996, 4(1): 53-58.  
WANG P, ZHANG CH H, ZHANG F H, *et al.*. Grinding manufacture or optical glass[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1996, 4(1):53-58. (in Chinese)
- [12] 张修铭, 于永涛, 白斌, 等. 小切深磨削条件下工件表面硬化机理[J]. *中国机械工程*, 2015, 26: 949-953, 954.  
ZHANG X M, YU Y T, BAI B, *et al.*. Surface hardened mechanism of grinding conditions in small depth of cut[J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26(7):949-953, 954. (in Chinese)
- [13] GUO B, ZHAO Q L. Wheel normal grinding of hard and brittle materials[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 79(5-8): 873-880.
- [14] 陈明君, 董申, 李旦, 等. 脆性材料超精密磨削时影响表面质量因素的研究[J]. *机械工程学报*, 2001, 37(3): 1-4, 10.  
CHEN M J, DONG SH, LI D, *et al.*. Study on the influence factors of the surface quality in ultra-precision grinding machining of brittle materials[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2001, 37(3):1-4, 10. (in Chinese)

## 作者简介:



马振芳(1972—),女,内蒙古赤峰人,博士研究生,高级工程师,1997年于长春理工大学获学士学位,2007年于长春理工大学获硕士学位,主要从事光学零件的制造、检测及管理工作。E-mail: mzhf1998@126.com

## 导师简介:



董连和(1953—),男,吉林长春人,教授,博士生导师,主要从事先进光学制造,光学隐身等方面的研究工作。E-mail:446994323@qq.com