

文章编号 1004-924X(2014)08-2109-08

## 热压硫化锌的超精密磨削加工

陈 冰<sup>1</sup>, 郭 兵<sup>1\*</sup>, 赵清亮<sup>1</sup>, 饶志敏<sup>1</sup>, 姚 光<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 中国航天科技集团 长征机械厂, 四川 成都 610100)

**摘要:**针对用传统车削或研磨抛光方法加工大尺寸非球面热压硫化锌透镜存在的不足,采用金刚石砂轮磨削加工方法对热压硫化锌材料进行了加工实验。通过压痕、单颗粒金刚石刻划和磨削正交实验,研究了该方法在磨削加工过程中的塑性去除机理及其亚表面损伤情况,并优化了超精密磨削加工工艺参数。压痕实验发现热压硫化锌材料在载荷作用下易于出现径向裂纹和微裂纹,其断裂韧性为  $2.643842 \text{ MPa}/\text{m}^{1/2}$ ,临界切削深度为  $1.808 \mu\text{m}$ 。单颗粒金刚石刻划实验结果表明,热压硫化锌材料在较小的切削深度下可以实现塑性去除,但在机械去除过程中易出现多种形式的亚表层损伤。磨削实验结果表明,磨削深度是影响表面光洁度的主要因素,随着磨削深度的增大表面光洁度降低,最佳表面粗糙度为  $7.6 \text{ nm}$ 。工作台进给速度是影响面形精度的主要因素,且平面磨削的面形精度 PV 值为  $0.185 \sim 0.395 \mu\text{m}$ 。研究结果表明,磨削加工热压硫化锌材料可以获得纳米级表面粗糙度。

**关键词:**热压硫化锌透镜;压痕实验;临界切削深度;单颗粒刻划;平面磨削;亚表面损伤;表面质量

**中图分类号:** TG580.6 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142208.2109

## Ultra-precision grinding of hot-pressed zinc sulfide

CHEN Bing<sup>1</sup>, GUO Bing<sup>\*1</sup>, ZHAO Qing-liang<sup>1</sup>, RAO Zhi-min<sup>1</sup>, YAO Guang<sup>2</sup>

(1. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Changzheng Machinery Factory, China Aerospace Science and Technology Corporation, Chengdu 610100, China)

\* Corresponding author, E-mail: guobingwz@gmail.com

**Abstract:** To overcome the shortcomings of traditional lapping and polishing methods in machining large size aspherical hot-pressed zinc sulfide lenses, a machining experiment on hot-pressed zinc sulfide materials was performed by diamond wheel grinding method. The single-point diamond scratching and orthogonal grinding experiments were carried out to research the ductile regime removal mechanism and subsurface damage during machining hot-pressed zinc sulfide and to obtain optimal machining parameters. The results of micro-indentation experiment show that hot-pressed zinc sulfide materials under a load are easy to produce radial cracks and micro cracks, the toughness value is  $2.643842 \text{ MPa}/\text{m}^{1/2}$  and the critical cutting depth is  $1.808 \mu\text{m}$ . Based on the results of single-point diamond scratching, it verifies that hot-pressed zinc sulfide is removed in ductile regime at a smaller cutting depth although much kinds of subsurface damage will appear during machining process. The results of orthog-

收稿日期: 2013-12-02; 修订日期: 2014-01-27.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51075093); 国家重大科技专项资助项目(No. 2011ZX 04004-051)

onal grinding experiments demonstrate that the depth of grinding is a main influencing factor on surface roughness values, which decreases with decreasing depth of grinding, and the best value is 7.6 nm. The feed rate of the working table influences the surface figure precision PV values mostly, it offers the surface accuracy(PV) between 0.185  $\mu\text{m}$  and 0.395  $\mu\text{m}$ . These results show that the roughness of hot-pressed zinc sulfide surface by grinding has been up to nano level.

**Key words:** hot-pressed zinc sulfide lens; micro-indentation experiment; critical cutting thickness; single-point diamond scratching; surface grinding; subsurface damage; surface quality

## 1 引言

红外光学元件的超精密加工是红外应用技术发展的关键技术之一,高精度的红外光学元件主要用于红外成像和制导技术中的透镜、棱镜、窗口、滤光片、整流罩等<sup>[1]</sup>。红外光学材料主要有硫化锌、金刚石、单晶锗、硅、砷化镓、氟化镁和蓝宝石等<sup>[2]</sup>,其中硫化锌是目前最主要的多光谱红外光学材料,属于功能性红外透射材料,具有机械强度高、耐磨损、耐潮解、化学稳定性好、透远红外激光光束极佳、高品质因数(Q因数)等优点,是现代国防和航空航天等领域的重要材料,已经成功应用于多种需要抵挡恶劣环境侵蚀的军事领域<sup>[3-4]</sup>。

目前,硫化锌材料非球面透镜的加工大多采用单点金刚石车削或研磨抛光<sup>[5-7]</sup>,其中金刚石车削加工在应对较大尺寸硫化锌透镜时,刀具刃口的磨损极易导致中心区域与边缘表面质量不均一,导致透镜整体质量严重下降;而传统研磨抛光加工效率较低,成本较高,且不易控制其面形精度,加工的透镜质量一致性较差<sup>[8]</sup>。相比于其他加工方式,金刚石砂轮磨削技术在面对大尺寸脆性材料加工磨削加工时,具有工具磨损相对缓慢、加工精度高、材料去除率大、加工一致性好等优点<sup>[9-10]</sup>。

美国 Optimax Systems Inc. 公司的 Jessica DeGroot Nelson<sup>[11]</sup> 研究了抛光液磨粒类型和 pH 值对硫化锌材料抛光后表面粗糙度和材料去除率的影响规律,并建立了表面粗糙度和材料去除率的预测模型。航天工业总公司回长顺<sup>[12]</sup> 研究了多种抛光磨粒对热压硫化锌抛光表面光洁度的影响。长春理工大学陈琦<sup>[13]</sup> 等采用单点金刚石对  $\varphi 35$  mm 硫化锌晶体进行非球面车削工艺的研究,并使用不同的抛光粉及抛光模层材料研究了数控抛光加工硫化锌晶体的最佳工艺匹配条

件,加工后的面形精度达到 0.2  $\mu\text{m}$ ,表面粗糙度小于 1 nm。除此之外,国内外对有关硫化锌材料的机械加工鲜有报道,硫化锌材料磨削加工的研究未见报道。

本文通过压痕实验研究了热压硫化锌在载荷作用下的材料变形行为,计算了材料的显微硬度、断裂韧性和临界切削深度,利用单颗粒金刚石刻划实验分析,材料在机械加工过程中的塑性域去除机理和亚表层损伤情况。在此基础上进行了硫化锌材料的超精密磨削加工实验,分析了磨削参数对磨削后硫化锌工件表面质量的影响规律,为硫化锌材料的超精密磨削加工奠定了工艺基础。

## 2 压痕实验与分析

本文通过压痕实验研究热压硫化锌材料在机械加工过程中的损伤形式,计算有关机械加工的物理力学性能参数,以便为后续超精密磨削加工提供分析依据。

### 2.1 实验设备和方案

采用 HVS-1000Z 型数显显微硬度计,在经过抛光处理后表面质量为 6.495 nm 的热压硫化锌工件上进行显微压痕实验,实验中采用金刚石维氏压头,实验设备及工件如图 1 所示,仪器的检

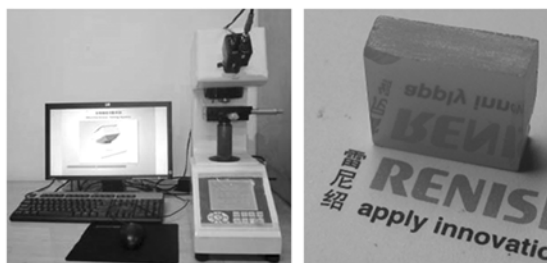


图 1 HVS-1000Z 型数显显微硬度计及抛光后的硫化锌表面

Fig. 1 HVS-1000 digital micro vickers hardness tester and surface of zinc sulfide after polishing

测分辨率为  $0.0625\ \mu\text{m}$ 。

考虑到边缘效应和相邻压痕应力场间的影响,压痕时压制的试验点离边缘的距离必须在压痕最大对角线的 3 倍以上,同时相邻压制点间保持压痕最大对角线的 2.5 倍距离以上,每种试验力压制 3 个点,求取 3 个结果的平均值。显微硬度压痕试验力分别采用 0.25, 0.50, 1, 2, 3, 5, 10 N 级别,载荷保载时间为 10 s。

## 2.2 压痕形貌分析

显微压痕实验中,通过光学显微镜观测到的材料压痕形貌及裂纹扩展情况,如图 2 所示。热压硫化锌材料在载荷为 50 gf 时开始出现径向裂纹,即脆性断裂,裂纹沿着压痕对角线方向延伸扩展且对称,因此,该材料的各向同性力学性能较好;从载荷为 100 gf 开始压痕周围出现明暗交替的云区,其区域外缘达到径向裂纹末端是由压头对工件的高静压力引起的,是在工件材料内部未

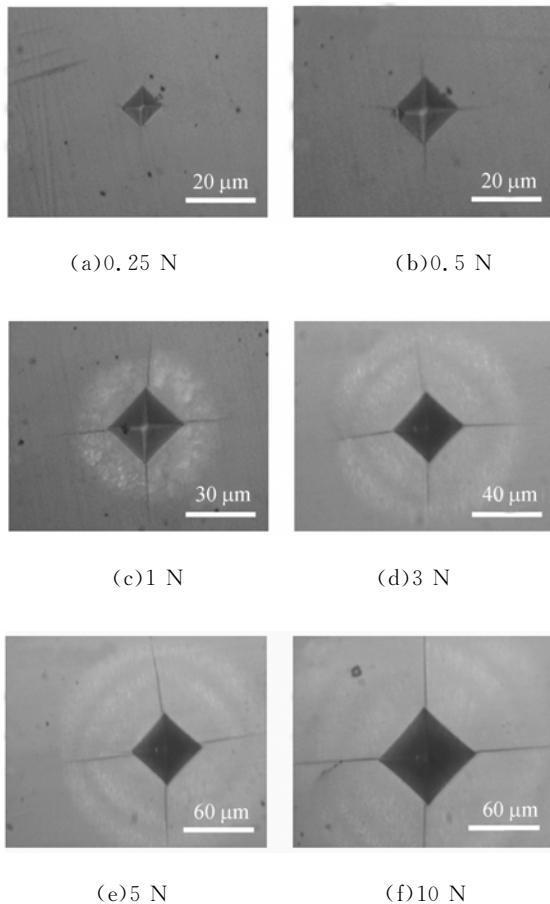


图 2 热压硫化锌显微压痕形貌

Fig. 2 Micro-indentation surface morphology of hot-pressed zinc sulfide

扩展到表面的大量微裂纹,产生的原因是材料塑性变形能力小,当受到的挤压力超过微裂纹产生的额定值时即产生微裂纹;在较小载荷的作用下即产生径向裂纹和大量微裂纹,表明材料脆性较大,硬度小。

## 2.3 材料的物理力学性能

### (1) 材料的显微硬度

计算的显微硬度为维氏硬度,计算公式为<sup>[14]</sup>:

$$H = KP/d^2, \quad (1)$$

式中:  $K$  为无量纲常数,取决于压头的形状;  $P$  为载荷;  $d$  为压痕平均对角线长度。

显微压痕实验时,测量压痕的对角线长度及裂纹长度,通过式(1)计算得到热压硫化锌材料的显微硬度为  $3.02135\ \text{GPa}$ 。

### (2) 材料的断裂韧性

断裂韧性是定量地确定材料压痕裂纹及扩展阻力的重要参数,根据 Swen Palmqvist 理论,压痕裂纹的扩展与被测材料的断裂韧性强度存在着对应关系,压痕载荷与压头形状都会影响裂纹长度。计算脆性材料断裂韧性强度的公式有多个,其中 Laugier 公式具有较小的载荷依赖性,本文选用 Laugier 公式计算断裂韧性强度<sup>[15]</sup>:

$$K_{Ic} = 0.0098 \left(\frac{E}{H}\right)^{\frac{3}{2}} PC^{-\frac{3}{2}} \quad \frac{L}{a} > 2.5, \quad (2)$$

$$K_{Ic} = 0.015 \left(\frac{L}{a}\right)^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{E}{H}\right)^{\frac{2}{3}} PC^{-\frac{3}{2}} \quad \frac{L}{a} < 2.5, \quad (3)$$

其中:  $H$  为试样材料的硬度(GPa);  $E$  为弹性模量(GPa);  $P$  为载荷(N);  $L$  为压痕裂纹长度(mm);  $a$  为压痕半径(mm);  $C = L + a$ (mm)。

根据式(2)和(3)计算得出热压硫化锌的断裂韧性强度为  $2.643842\ \text{MPa}/\text{m}^{1/2}$ 。

### (3) 材料的临界切削深度

为获得良好的磨削表面质量,须使得材料处于延性域磨削状态,即磨削深度小于材料的临界切削深度。临界切削深度是指能够产生切削作用的最小切入量,与磨削速度、工件材料、磨刃状态等有关,临界切削深度应满足<sup>[16]</sup>:

$$a_c = 0.15 \left(\frac{E}{H}\right) \left(\frac{K_{Ic}}{H}\right)^2, \quad (4)$$

其中:  $a_c$  为临界切削深度( $\mu\text{m}$ );  $E$  为材料弹性模量(GPa);  $H$  为材料硬度(GPa);  $K_{Ic}$  为材料断裂

韧性( $\text{MPa}/\text{m}^{1/2}$ )。

由式(4)得出热压硫化锌材料的临界切削深度为  $1.808 \mu\text{m}$ ,理论上磨削深度小于  $a_c$  的情况下均可以实现延性域磨削加工。

### 3 单颗粒金刚石刻划实验与分析

通过单颗粒金刚石刻划实验研究了热压硫化锌材料在磨削过程中的材料去除过程以及磨粒切削深度对材料去除过程的影响。

#### 3.1 实验设备和方案

实验在杭州机床厂生产的超精密卧轴矩台平面磨床 MUGK7120X5 上进行。磨床主轴系统采用动静压轴承,最大转速为  $4\ 000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,径向跳动小于  $0.5 \mu\text{m}$ ,砂轮垂直进给分辨率为  $0.1 \mu\text{m}$ ,X 轴和 Z 轴的最大行程分别为 500 和 200 mm,定位精度为  $0.2 \text{ mm}$ 。Y 轴导轨采用耐磨材料和高精度滚子导轨的 H 形高刚性结构,以实现  $0.1 \mu\text{m}$  的微量进给。单颗粒金刚石刻划实验中将单颗金刚石磨粒固定在直径为 200 mm 的硬铝盘外缘,使其做圆周运动完成对热压硫化锌材料的刻划,并采用 Kistler 三向测力仪监测刻划过程中的力,工件表面经过抛光处理表面粗糙度达到满足刻划要求的  $15 \text{ nm}$  以下,实验系统如图 3 所示,工艺参数如表 1 所示。

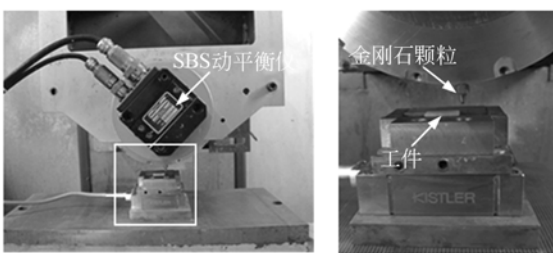


图 3 单颗粒刻划实验系统

Fig. 3 Single diamond grit scratching test system

表 1 单颗粒金刚石刻划实验工艺参数

Tab. 1 Parameters of single-point scratch test

铝盘转速 $/\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	刻划深度 $/\mu\text{m}$	进给速度 $/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$
200	10	150

#### 3.2 实验结果与分析

图 4 所示为单颗粒金刚石刻划热压硫化锌材料后的共聚焦显微形貌图和局部 SEM 图,刻划过程中,金刚石磨粒尖端由浅入深进入材料内部,在初始阶段,金刚石磨粒以较浅的深度接触材料表层区域 1,材料出现比较清晰且稳定的磨削纹痕,没有崩碎或其他脆性破坏现象,热压硫化锌材料处于塑性域去除;随着金刚石切入深度变大,划痕区域 2 出现大量微崩碎,甚至裂纹现象,热压硫化锌材料处于脆性去除模式。总体来看,刻划过程仅在金刚石进入材料初期出现较小稳定磨痕区域,因此热压硫化锌材料不易实现稳定的塑性域去除,但有效地控制加工过程中的磨削深度,可以实现塑性域去除。

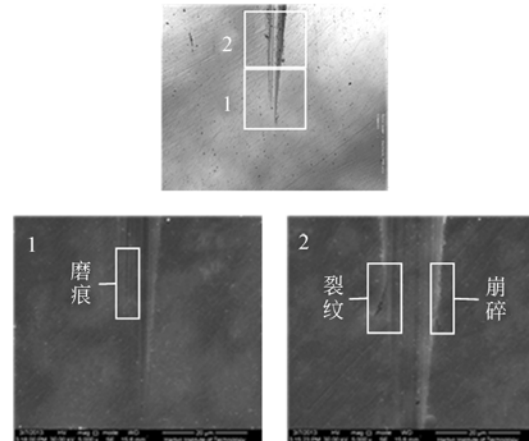


图 4 刻划表面形貌共聚焦 SEM 照片

Fig. 4 SEM photos of surface after scratching

采用角度抛光法观察刻划后的断面,研究热压硫化锌材料在刻划后的亚表层损伤情况,角度抛光原理如图 5 所示,刻划实验后沿  $45^\circ$  截面将包裹有环氧树脂保护剂的工件切开,并对抛光处理后的截面采用扫描电子显微镜检测,观察划痕沟槽引起的亚表层损伤的形貌,如图 6 所示。

图 6 所示为热压硫化锌刻划沟槽断面的 SEM 照片,放大后划痕沟槽的边侧 1 和正下方 2 可以看出在热压硫化锌材料划痕区域的亚表层出现了部分材料的脱落、崩碎现象和集中分布的裂纹。亚表层中材料发生脱落与崩碎是由于先在刻划过程中沟槽某些部位受到的径向载荷超过材料裂纹形成的额定值,形成大量的微裂纹,后受到抛光过程中抛光力的复合作用导致刻划沟槽亚表层

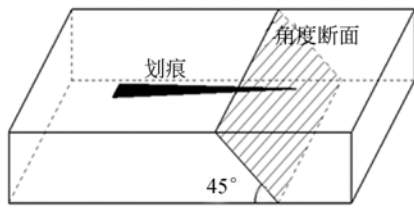


图 5 亚表层损伤检测的角度抛光原理

Fig. 5 Principle of angle polishing for subsurface damage measurement

局部出现微崩碎、脱落现象。划痕沟槽底部存在比较密集分布截面断口特征的裂纹是由径向载荷较大致使材料解理断裂引起的。划痕边侧区域的裂纹为横向裂纹,由于刻划力较大导致横向裂纹延伸到材料表面产生局部崩碎。

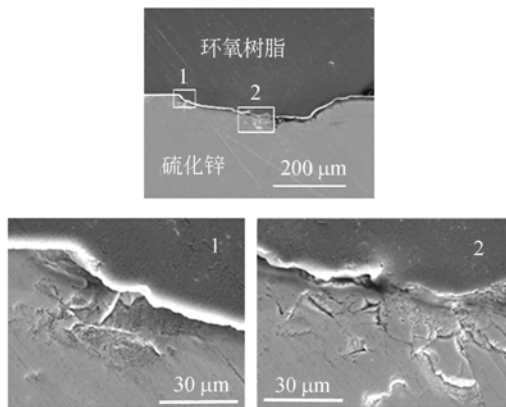


图 6 划痕沟槽断面 SEM 图

Fig. 6 SEM photos of scratch cross-sections

单颗粒金刚石刻划实验表明,热压硫化锌材料脆性较大,可以实现塑性域去除加工,但断裂韧性小,易在载荷集中的划痕底部和边侧出现较为严重的损伤,且塑性域去除加工形成稳定表面的难度较大。

#### 4 热压硫化锌平面磨削加工分析

压痕实验和刻划实验确定了热压硫化锌材料在机械加工中的重要性能指标:断裂韧性和临界切深,并表明热压硫化锌材料在较小的载荷和切削深度下可以实现塑性域去除,通过平面磨削实验进一步探究和验证材料的超精密磨削加工性能。

#### 4.1 实验设备和实验方案

采用杭州机床集团有限公司的 MUGK 7120X5 超精密卧轴矩台平面磨床,电镀金刚石砂轮与细磨粒树脂结合剂金刚石砂轮分别用于工件的粗磨和精磨。电镀金刚石砂轮直径为 200 mm,宽度为 5 mm,粒度为 100 #,细磨粒树脂结合剂砂轮直径为 200 mm,宽度为 10 mm,粒度为 2 000 #,采用的冷却液为水基乳化液。

磨削实验采用 Kistler 9256C2 平面三向测力仪在线监测磨削过程,实验装置如图 7 所示。通过压痕实验计算得到热压硫化锌材料的主要物理力学性能参数如表 2 所示。精磨之前对砂轮进行杯型轮修整,修整前后通过德国 KENYENCE LK-G5000 激光测微仪检测得知砂轮的回转误差大约为 1 μm 左右,前后高度差为 2 μm 左右。

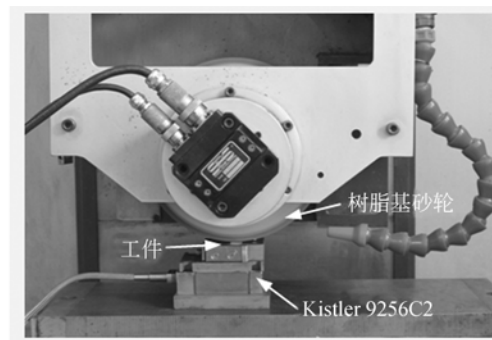


图 7 平面磨削实验系统

Fig. 7 Surface grinding system

表 2 热压硫化锌的物理力学性能参数

Tab. 2 Physical performance parameters of zinc sulfide

项目	参数
硬度/GPa	3.021 35
弹性模量/GPa	81
泊松比	0.25
断裂韧性/(MPa · m <sup>-1/2</sup> )	3.001 651 811
临界切削深度/μm	1.808 11

通过正交实验研究热压硫化锌材料在平面磨削过程中磨削深度、砂轮转速和工作台进给速度 3 种工艺参数对磨削加工表面质量的影响趋势,并优化工艺参数。选用 L<sub>16</sub>(4<sup>3</sup>)正交实验表,其中工艺参数值如表 3 所示。采用 Taylor Hobson 1250XL 表面轮廓接触仪检测磨削后工件的表面粗糙度 R<sub>a</sub> 和面形精度 PV 值,测量范围为 3 mm。

表 3 热压硫化锌平面磨削正交实验因素

Tab. 3 Orthogonal factors of surface grinding

水平	磨削深度 / $\mu\text{m}$	砂轮转速 / $(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	工作台进给速度 / $(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$
1	0.2	1600	120
2	0.4	1800	150
3	0.6	2000	180
4	0.8	2200	200

#### 4.2 实验结果与分析

采用方差分析法处理实验数据显示:  $F$  值检验(方差齐性检验), 对于表面粗糙度  $R_a$ , 通过磨削深度  $F_a = 25.54013$ , 砂轮转速  $F_b = 12.14882$ , 工作台进给速度  $F_c = 3.5602$ , 可以判断 3 个因素的影响顺序为:  $a > b > c$ , 磨削深度对表面粗糙度的影响最大, 最优组合为:  $a = 0.2 \mu\text{m}$ ,  $b = 2000 \text{ r/min}$ ,  $c = 120 \text{ mm/min}$ 。对于面形精度  $PV$ , 通过磨削深度  $F_a = 0.067057$ , 砂轮转速的  $F_b = 1.241389$ , 工作台进给速度的  $F_c = 3.485960$ , 可以判断 3 个因素的影响顺序为  $c > b > a$ , 即进给速度对面形精度的影响最大, 最优组合为:  $a = 0.4 \mu\text{m}$ ,  $b = 2000 \text{ r/min}$ ,  $c = 180 \text{ mm/min}$ 。

由正交实验得到实验结果中的面形精度  $PV$  值为  $0.185 \sim 0.395 \mu\text{m}$ , 对于金刚石砂轮的精密超精密磨削, 其面形精度较差, 原因是树脂基结合剂金刚石砂轮的刚度较低, 不易获得较好的面形精度, 且热压硫化锌材料偏软, 弹性形变较大, 导致加工后的面形精度较低。实验最优表面粗糙度  $R_a$  为  $7.6 \text{ nm}$ , 表明热压硫化锌可以实现高光洁度的超精密磨削, 其中磨削深度对表面粗糙度的影响最大, 采用扫描电子显微镜对砂轮转速同为  $2000 \text{ r/min}$ , 磨削深度和进给速度不同的磨削工件进行表面检测, 得到工件的微观表面形貌如图 9 所示。

从图 9 中可以看出随着磨削深度的增大, 表面微观形貌逐渐发生了显著的变化。当磨削深度为  $0.2 \mu\text{m}$  时, 工件的表面有极微细的划痕但很平坦光滑, 且整个表面没有带状磨痕也没有微细崩碎, 表明工件完全处于塑性域磨削; 当磨削深度为  $0.4 \mu\text{m}$  时, 工件的表面遍布沿磨削方向较浅且均匀分布的磨削痕迹, 表现为塑性去除, 工件表面偶有微小块崩碎, 晶粒脱落, 呈均匀分布。当磨削深度为  $0.6 \mu\text{m}$  时, 工件的表面磨削痕迹明显加深且分布不均匀, 部分表面平滑部分表面磨削痕迹较深, 微小块崩碎明显增多, 偶尔出现沿着同

一条磨痕连续的簇状剥落, 材料去除方式存在脆性去除机制但仍以塑性去除为主; 当磨削深度为  $0.8 \mu\text{m}$  时, 工件的表面磨削痕迹很深且较均匀, 工件表面有大块状崩碎和剥落, 且遍布有微小块崩碎, 表面形貌急剧恶化, 材料去除方式为脆性去除和塑性去除的混合机制。

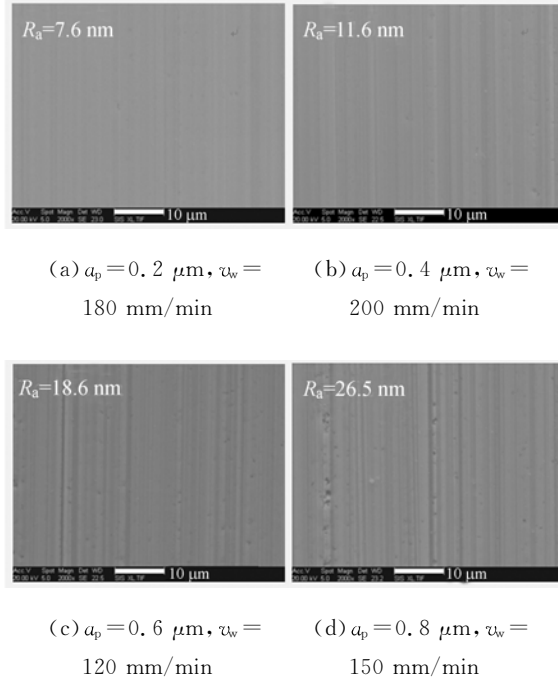


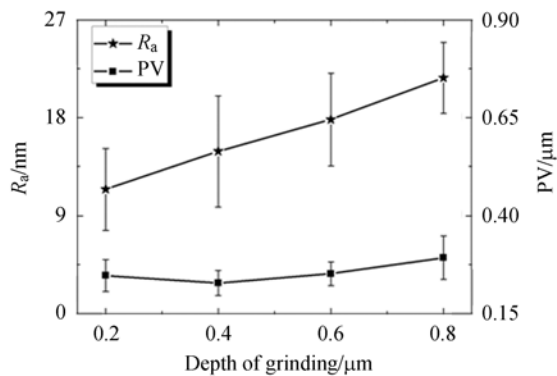
图 9 不同工艺参数下的工件表面 SEM 照片

Fig. 9 SEM photos of different grinding parameters

磨削工艺参数(磨削深度、主轴转速和工作台进给速度)对表面粗糙度和面形精度的影响如图 10 所示。从图中可以看出, 随着磨削深度的增大, 热压硫化锌材料的表面粗糙度  $R_a$  值越来越大, 面形精度  $PV$  值先减小后增大, 但变化范围较小。当磨削深度为  $0.4 \mu\text{m}$  时获得最优平均面形精度,  $PV$  值为  $0.228 \mu\text{m}$ 。可见降低磨削深度可以获得较好的表面光洁度, 但并不一定能提高面形精度。相比磨削深度对表面粗糙度和面形精度影响规律的不同, 砂轮转速对两者的影响规律大体相同, 均为先减小后增大, 表面粗糙度的平均偏差随砂轮转速的增大而减小, 且在砂轮转速为  $2000 \text{ r/min}$  时两者均获得最优值。随着工作台进给速度的增大, 工件表面粗糙度增大, 而工作台进给速度对面形精度的影响较大且没有规律可循, 在进给速度为  $180 \text{ mm/min}$  时获得最优平均面形精度,  $PV$  值为  $0.218 \mu\text{m}$ 。

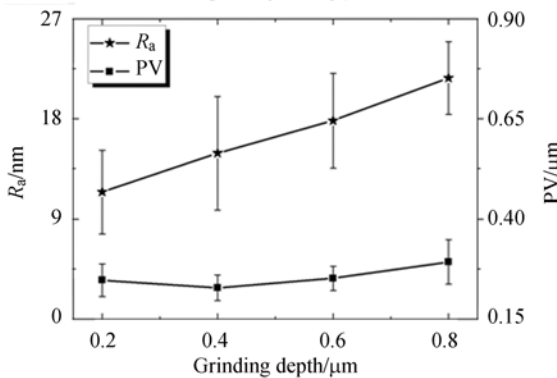
平面磨削实验结果表明热压硫化锌材料在金

金刚石精密磨削加工下可以达到纳米级表面光洁度,但是表面质量并不稳定,出现材料崩碎和晶粒剥落的情况。究其原因是材料脆性大,树脂基金刚石砂轮基体较软,在磨削热压硫化锌材料时难以形成较好的面形精度。



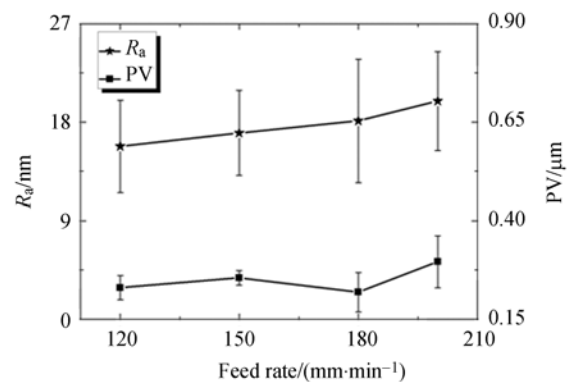
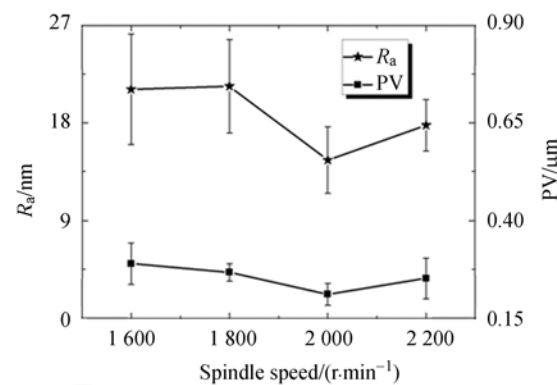
(a) 磨削深度

(a) Depth of grinding



(b) 砂轮转速

(b) Spindle speed



(c) 工作台进给速度

(c) Feed rate

图 10 磨削工艺参数对表面粗糙度和面形精度的影响  
Fig. 10 Effect of grinding parameters on roughness and surface accuracy

## 5 结 论

本文对红外材料热压硫化锌的磨削加工性能进行研究,得出以下结论:(1)热压硫化锌材料为各向同性材料,脆性较大,断裂韧性小,材料的亚表层损伤以微裂纹居多,加工过程极易产生裂纹,甚至崩碎、剥落,不易实现稳定的塑性域去除加工。(2)压痕实验计算出热压硫化锌材料的临界切削深度为  $1.808 \mu\text{m}$ ,然而平面磨削实验可以看出在远小于临界切深的磨削深度(0.6 或  $0.8 \mu\text{m}$ )即出现了脆性去除,磨削加工的实际情况与理论计算存在一定的差距。(3)磨削深度是影响表面粗糙度的最主要因素。随着磨削深度的增大,表面光洁度降低;工作台进给速度是影响面形精度的主要因素。采用较小的磨削深度、进给速度可以减少热压硫化锌表面的微崩碎数量,进而提高其磨削表面光洁度。(4)采用细磨粒树脂基金刚石砂轮对热压硫化锌材料进行超精密磨削,可以达到纳米级表面粗糙度  $R_a$  为  $7.2 \text{ nm}$ ,其面形精度 PV 值为  $0.185 \sim 0.395 \mu\text{m}$ (测量区域为  $3 \text{ mm}$ )。

## 参考文献:

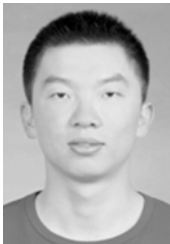
[1] 罗贞礼. 红外光学材料硫化锌概览[J]. 新材料产业, 2012 (8): 41-44.  
LUO ZH L. An overview of the infrared optical ma-

terial zinc sulfide [J]. *Advanced Materials Industry*, 2012 (8): 41-44. (in Chinese)

[2] 李跃龙,黎建明,苏小平,等. 红外窗口和整流罩材料研究现状与发展趋势[J]. 人工晶体学报, 2007, 36(4): 877-884.

- LI Y L, LI J M, SU X P, *et al.*. Research trends and current status in infrared window and dome materials [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2007, 36(4): 877-884. (in Chinese)
- [3] 杜锦屏, 台玉萍. 纳米硫化锌的制备及应用研究新进展[J]. 化工时刊, 2012, 26(1): 45-48.  
DU J P, TAI Y P. Preparation and application of nanocrystalline zinc sulfide [J]. *Chemical Industry Times*, 2012, 26(1): 45-48. (in Chinese)
- [4] FU L L F, WANG X, *et al.*. Defects in CVDZnS [J]. *Rare Metals*, 2011, 30(4): 387-391.
- [5] 谢晋, 耿安兵, 熊长新, 等. 红外线聚光非球面透镜的单元金刚石镜面切削方法[J]. 光学精密工程, 2004, 12(6): 566.  
XIE J, GENG A B, XIONG CH X, *et al.*. Single-point diamond mirror turning of infrared aspheric lens [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(6): 566. (in Chinese)
- [6] 史永杰, 郑堤, 王龙山, 等. 非球面精密数控研抛中研抛力的控制[J]. 光学精密工程, 2011, 19(5): 1013-1021.  
SHI Y J, ZHENG T, WANG L SH, *et al.*. Polishing force control in precise NC polishing of aspheric parts [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 1013-1021. (in Chinese)
- [7] 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)
- [8] 王毅, 倪颖, 余景池. 小型非球面数控抛光技术的研究[J]. 光学精密工程, 2007, 15(10): 1527-1533.  
WANG Y, NI Y, YU J CH. Computer-controlled polishing technology for small aspheric lens [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10): 1527-1533. (in Chinese)
- [9] BRINKSMIEIER E, MUTLUGÜNES Y, KLOCKE F, *et al.*. Ultra-precision grinding[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2010, 59(2): 652-671.
- [10] KUKS V G. Grinding aspheric surfaces of optical workpieces with a full-size tool[J]. *Journal of Optical Technology*, 2012, 79(3): 157-159.
- [11] NELSON J D G, DRUCKER J A, HAEFNER A A, *et al.*. Varying electro-kinetic interactions to achieve predictable removal rates and smooth surfaces on ZnS[C]. *SPIE*, 2009, 7426: 74260A-1.
- [12] 回长顺, 王永春. 热压硫化锌整流罩光学加工工艺研究[J]. 红外与激光技术, 1994, (4): 10.  
HUI CH SH, WANG Y CH. Research on optical processing technology of hot-pressed zinc sulfide fairing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1994, (4): 10. (in Chinese)
- [13] 陈琦, 付秀华, 贾宗合, 等. 硫化锌晶体加工工艺技术研究[J]. 长春理工大学学报, 2013, 36(3-4): 120-124.  
CHEN Q, FU X H, JIA Z H, *et al.*. Research on processing technology of ZnS crystal [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2013, 36(3-4): 120-124. (in Chinese)
- [14] 包亦望, 邱岩, 卜晓雪. 陶瓷材料的力学性能评价新方法[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(A02): 347-350.  
BAO Y W, QIU Y, PU X X. A new method of mechanics performance evaluation for Ceramic materials [J]. *Rare metal materials and engineering*, 2007, 36(A02): 347-350. (in Chinese)
- [15] LAUGIER M T. New formula for indentation toughness in ceramics [J]. *Journal of materials science letters*, 1987, 6(3): 355-356.
- [16] BIFANO T G. *Ductile-regime grinding of brittle materials* [D]. US: North Carolina State University, 1988.

#### 作者简介:



陈冰(1986—),男,河南南阳人,博士研究生,2011年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事硬脆材料球面非球面超精密磨削加工技术研究。E-mail: binghamchen86@gmail.com

#### 导师简介:



赵清亮(1968—),男,河南新乡人,教授,博士生导师,德国洪堡学者,入选2007年度教育部新世纪优秀人才支持计划,1991年于北京理工大学获学士学位,1996年、1999年于哈尔滨工业大学分别获硕士、博士学位,主要研究领域为超精密加工技术、硬脆和难加工材料的高效加工技术。E-mail: zhaqinglx@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)