微激光辅助切削硒化锌晶体去除机理研究

耿瑞文[1,2,3] 杨蔚华[1,2*] 谢启明[4] 田助新[1,2] 李立军[1,2] 吴海华[2]
1.三峡大学水电机械设备设计与维护湖北省重点实验室,宜昌,443002
2.三峡大学石墨增材制造技术与装备湖北省工程研究中心,宜昌,443002
3.隧道工程灾变防控与智能建养全国重点实验室,山东大学,济南,250061
4.昆明物理研究所,昆明,650233

摘要:进行了硒化锌晶体在传统超精密加工和微激光辅助切削(μ-LAM)的对比实验,分析了μ-LAM时激光功率对表面形貌、表面质量的影响规律,获得了最优工艺参数。为揭示μ-LAM机理,采用变温纳米压痕技术分析了硒化锌的力学性能随温度的变化规律。研究表明,在相同的切削条件下,μ-LAM能够显著改善工件的表面质量,但激光功率过大会导致表面质量的恶化,在最优激光功率2.34 W下,可获得最优表面质量,其表面粗糙度为3.97 nm;硒化锌的硬度和弹性模量随着温度的升高而降低,最终改善了材料塑性。

关键词:硒化锌晶体;微激光辅助切削;拉曼光谱;表面质量;激光功率
中图分类号:TH161
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.09.022 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Research on Removal Mechanism of μ-LAM of ZnSe Crystal

GENG Ruiwen[1,2,3] YANG Weihua[1,2*] XIE Qiming[4] TIAN Zhuxin[1,2] LI Lijun[1,2] WU Haihua[2]
1.Hubei Key Laboratory of Hydroelectric Machinery Design and Maintenance, China Three Gorges University, Yichang, Hubei, 443002
2.Hubei Engineering Research Center for Graphite Additive Manufacturing Technology and Equipment, China Three Gorges University, Yichang, Hubei, 443002
3.State Key Laboratory for Tunnel Engineering, Shandong University, Jinan, 250061
4.Kunming Institute of Physics, Kunming, 650233

Abstract: Comparative experiments between μ-LAM and traditional ultra-precision machining were carried out. The effect of laser power of μ-LAM on surface morphology and surface quality was analyzed, and the optimal machining parameters were obtained. To reveal the mechanism of μ-LAM, variable-temperature nanoindentation technique was employed, and temperature-dependent mechanical properties were investigated. Under the same cutting conditions, the results show that the surface quality is improved significantly with μ-LAM. However, excessive laser power may lead to deterioration of surface quality. The best surface quality with surface roughness of 3.97 nm is realized at a laser power of 2.34 W. The hardness and elastic modulus of ZnSe crystal decrease with increasing temperature, resulting in an increase in plasticity.

Key words: ZnSe crystal; micro laser-assisted machining(μ-LAM); Raman spectrum; surface quality; laser power

0 引言

硒化锌(ZnSe)晶体具有低吸收率、优异的光学均匀性和化学稳定性,在中红外和可见光波段均有着良好的透过性[1]。ZnSe晶体在军事国防和工业领域有着重要的应用,其加工的窗口、棱镜、透镜等是构成红外侦查、红外制导系统的核心元件,也是高功率CO_2激光器的最佳候选材料[2]。作为典型脆性材料,ZnSe晶体也具备较低的断裂韧性和硬度,在加工中易发生脆性断裂,极易产生大量表面/亚表面损伤,如“划痕、麻点、凹坑”等缺陷。表面损伤/亚表面损伤会导致激光诱导损伤,降低光学系统的稳定性,劣化成像质量和抗激光损伤阈值。因此,抑制表面缺陷/亚表面损伤在超精密切削中显得尤为紧迫。

现阶段广泛采用超精密切削(即单点金刚石车削)加工光学元件,然而仅通过机械剪切去除的

收稿日期:2025-09-02
基金项目:湖北省水利水电重点实验室开放基金(2024KJC04);隧道工程灾变防控与智能建养全国重点实验室开放基金(TESKL202415);宜昌市自然科学研究项目(A25-3-005);湖北省教育厅科学技术研究项目(B2024020)

加工效率低下，无法满足光端制造业对光学元件的质量和效率的需要。对ZnSe晶体单点金刚石切削的研究集中于切削参数的优化。耿瑞文等[3]对ZnSe采用单点金刚石车削分析了进给率对表面质量的影响规律。HUANG等[4]研究了刀具前角对材料去除行为的影响规律，揭示了表面缺陷形成机理。SUN等[5]采用直角金刚石刀具对ZnSe晶体进行加工，通过增大刀具切削边沿滑移以提高加工质量，但该方法并不适用于“凹”面型工件。以上研究均采用传统的超精密切削，通过优化工艺参数（减小材料去除率）以改善表面质量的加工策略，将大幅制约加工效率。

学者提出了场辅助复合加工制造的技术，主要基于单点金刚石切削并耦合能量场辅助切削加工，如磁辅助加工[6]、电场辅助加工[7]、离子注入改性[8]等方法，以控制光学元件的表面/亚表面损伤为目标，从源头抑制或者消除表面/亚表面缺陷，实现由制造缺陷的去除到制造缺陷的可控抑制的转换。然而上述加工技术存在辅助设备工作条件苛刻、使用成本高昂、工艺复杂等问题。

激光技术的进步推动了激光辅助加工技术的应用。微激光辅助加工（micro laser-assisted machining，μ-LAM）时工件处于光、力、热场耦合的复杂工况，与传统的激光辅助加工采用预热的方式对工件进行加热不同，微激光辅助切削通过激光光学系统设计，使激光通过金刚石刀具刀尖，直接聚焦于刀尖与工件接触区域。LIU等[9]对SiC的微激光辅助加工切削机理进行研究，激光的热效应增强了SiC的塑性变形并减少了表面缺陷。ZOU等[10]对单晶锗进行微激光辅助加工和单点金刚石车削实验，发现激光辅助加工使材料脆塑转变深度大幅提高。LIN等[11]采用正交试验对熔石英进行微激光辅助切削，发现激光功率对表面粗糙度有最大的影响，但在最优切削参数下获得的表面粗糙度为12.9 nm。HU等[12]建立了SiCp/Al微激光辅助切削温度场模型，并进行正交试验以分析各因素对表面质量的影响程度，结果表明激光功率和主轴转速对表面质量的影响最为显著。LIU等[13]研究了温度对软脆性KDP晶体的力学性能的影响，发现其脆塑转变临界深度从23 ℃的0.4 μm增长到170 ℃的3.61 μm，约增长了8.6倍，硬度下降约36.07 %。然而，现有关于微激光辅助切削研究聚焦于优化硬脆性材料的激光辅助加工的工艺参数，未涉及激光辅助加工时材料与激光的相互作用，未能深入揭示激光对ZnSe晶体的作用机制。

本研究分析硒化锌晶体的微激光辅助加工过程中激光功率对材料去除行为和表面质量的影响规律。针对激光的热效应，开展高温纳米压痕实验，分析温度对材料加工性能的影响规律。

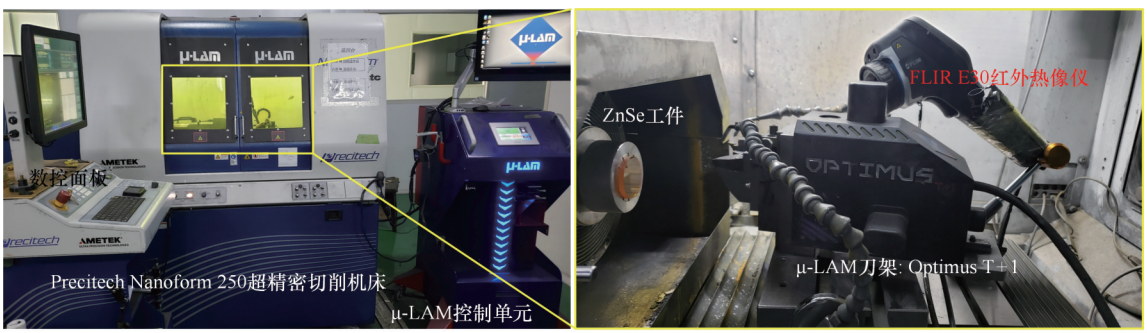
1　实验

1.1　实验设备

本实验采用的激光级ZnSe晶体由昆明物理研究所提供，样本尺寸为ϕ42×5 mm。在实验前，通过化学机械抛光去除工件表面/亚表面损伤。

微激光辅助加工实验在超精密机床（Precitech Nanoform 250，AMETEK，USA）上进行，该机床具有两个线性轴（即X、Z轴）与一个回转轴（C轴），其轴向/径向运动精度小于15 nm。由于生产中常采用圆弧半径较小的刀具，以加工衍射面和非球面光学元件，同时也能减少刀具的磨损[3]，因此本实验选用全新的小半径金刚石刀具以排除刀具磨损对实验结果的影响，刀具半径为0.115 mm，刀具前角为−25°，后角为10°。常规的超精密加工和微激光辅助加工均在同一机床、同一刀具上进行，采用干切方式，可排除冷却液对温度测量的干扰。

超精密切削机床及微激光辅助切削刀架如图1所示。在微激光辅助切削时，采用连续Nd:



(a)超精密机床　　(b)微激光辅助刀架

图1　微激光辅助切削实验装置

Fig.1　The μ-LAM experimental setups

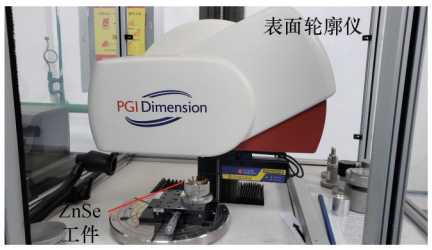
YAG激光，激光波长为1064 nm。采用红外热像仪（E30，FLIR，USA）对加工时工件表面温度分布情况进行检测。

1.2 实验设计

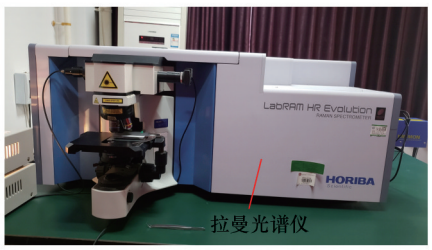
在超精密切削中，切削速度、进给量和切削深度是影响表面质量的因素。采用微激光辅助切削后，则需要考虑激光能量对切削过程的影响。因此，本实验采用单因素实验法分析对激光功率对材料去除行为的影响[14]，通过调节主轴转速S保持切削速度v=1 m/s、进给率f=0.5 μm/r，切削深度d_p=10 μm，结合前期实验结果设置激光功率P为0，2.34，4.60，9.65 W。

1.3 检测设备

为了获取工件表面三维形貌，采用场发射电子显微镜（field emission scanning electron microscopy，FESEM）（TESCAN MIRA LMS）观测加工后工件表面形貌。为了量化切削参数和激光参数在μ-LAM中对表面质量的影响规律，以表面粗糙度Ra作为检测指标，采用表面轮廓仪（PGI demension 250，Talar Harbison）进行检测，如图2a所示，测量3次并取平均值。如图2b所示，采用拉曼光谱仪对工件和切屑的物相结构进行检测。



(a)表面轮廓仪



(b)拉曼光谱仪

图2 表面/亚表面检测装置

Fig.2 Surface/subsurface characteristics detecter

2 结果与讨论

2.1 表面形貌

如图3所示，在进行μ-LAM时，ZnSe工件通过真空吸附于主轴并随之旋转，同时刀具沿进给方向移动，刀具在工件上的轨迹呈阿基米德螺旋线状，由于材料去除而形成切屑和已加工表面。金刚石刀具尖端可见明显的红色激光光斑，这是

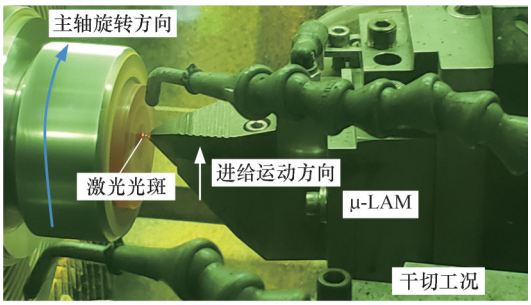


图3 微激光辅助切削ZnSe晶体过程

Fig.3 μ-LAM ZnSe crystal process

激光和材料相互作用的结果。

如图4a所示，ZnSe已加工表面的FESEM图像可见激光功率的差异对材料的表面质量产生了较大影响。对于多晶材料，FESEM图像灰度差异体现了材料力学性能的差异，灰度的边界可视为晶界。图4b所示为ZnSe晶体在激光功率为0（即传统单晶金刚石切削）时，在已加工表面观测到大量的表面缺陷，这说明材料主要去除方式为脆性去除。在工件表面出现了两种典型的缺陷，表面缺陷的特征尺寸呈现出明显的差异，为微凹坑缺陷（micro-craters）和亚微米缺陷（submicron-pits），以上两种缺陷倾向于形成在特定的晶粒内，但采用传统的超精密切削时更容易产生表面缺陷。

如图4c所示，在采用激光辅助切削且激光功率为2.34 W时，已加工工件表面光滑，晶界清晰可辨别。图4d是图4c的表面局部放大图，未观测到任何可见的表面缺陷，由此说明采用μ-LAM相较于传统的超精密切削，在激光辅助切削的作用下，可显著提高工件的表面质量。

如图4e、图4f所示，在激光功率为4.60 W时，与图4a相比，激光辅助提高了材料的可切削性能，工件表面以亚微米缺陷为主，且表面缺陷的面积随着激光的采用呈现出显著的下降趋势。如图4g所示，在激光功率为9.65 W时，工件表面大部分光滑。对其中黄色的方框进行局部放大，如图4h所示，仅存在小部分面积微凹坑缺陷。由此可见，当激光功率为2.34 W时，工件获得光滑的表面。μ-LAM有利于减小表面缺陷，提高材料表面质量。

图5所示为3种激光功率下典型缺陷的形貌特征。图5a展示了亚微米缺陷，缺陷主要分布于特定的晶粒之内，说明了材料的加工性能与晶体取向相关。采用4.60 W激光辅助加工时，如图5b所示，工件表面也存在亚微米尺度缺陷，对其中的黄色区域进行放大，观测到材料表面存在的表面缺陷与传统超精密加工时工件产生的微米级缺陷相类似。图5c显示了工件表面的微米级缺陷，缺

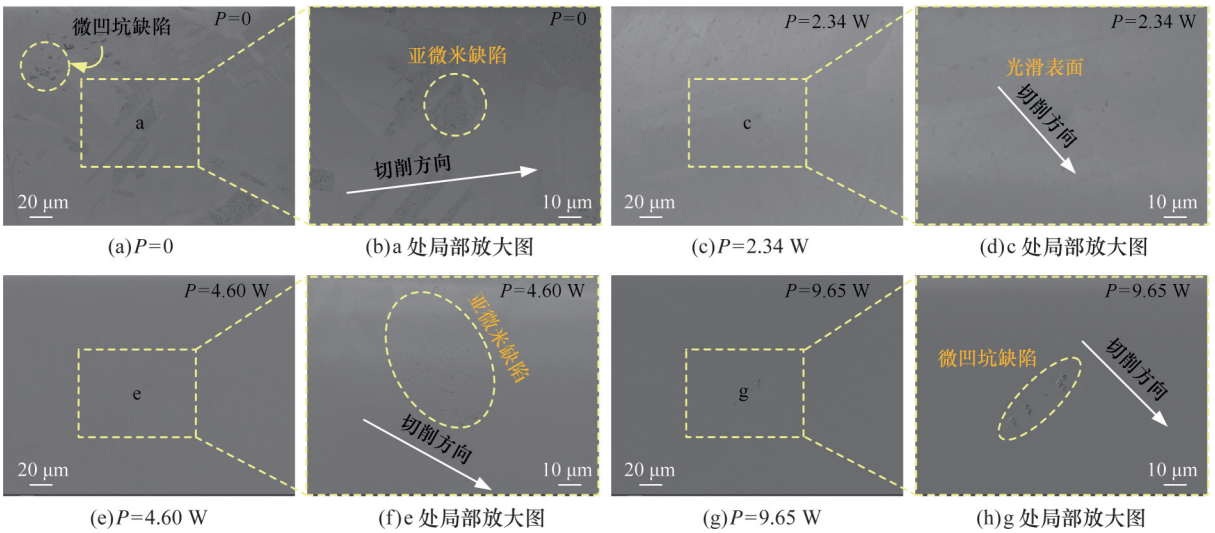


图 4　已加工表面在不同激光功率下 FESEM 图像

Fig. 4　FESEM image of machined surface under different laser powers

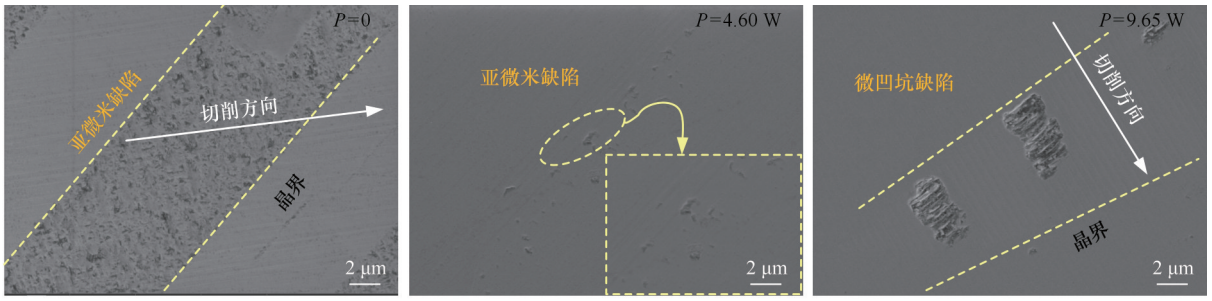


图 5　不同激光功率下典型表面缺陷的 FESEM 图像

Fig.5　FESEM image of surface defects under different laser powers

陷呈与切削方向垂直的阶梯状分布，这与 ZnSe 晶体在高压作用下的解理相关[15]，即切削方向与晶体解理面的夹角相关。微凹坑缺陷的长边与切削方向相平行且缺陷较平整，有着切屑状粉末在凹坑中填充，在宏观上严重影响表面光洁度。微凹坑的裂纹倾向于沿着解理面扩展，当多个解理系相交，工件表面呈块状的崩碎，材料以脆性断裂的方式去除，呈现出微凹坑缺陷。

2.2　表面粗糙度

工件表面的结构起伏会对入射光产生散射作用，进而影响光学系统的稳定性[16]。为了分析切削参数对工件表面质量的影响，以表面粗糙度 Ra 为指标进行量化分析。

如图 6 所示，采用传统的超精密切削（P=0）时工件的表面粗糙度 Ra 为 16.90 nm，表面质量较差。采用 μ-LAM 时，尽管 3 种激光功率不同，与传统的超精密切削相比 Ra 整体呈明显下降的趋势。当激光功率为 2.34 W 时工件的表面质量最好，最低的表面粗糙度为 3.97 nm，相较于传统的超精密加工（P=0）降幅显著，数值达到 76.51 %。

随着激光功率从 2.34 W 升高到 9.65 W，工件

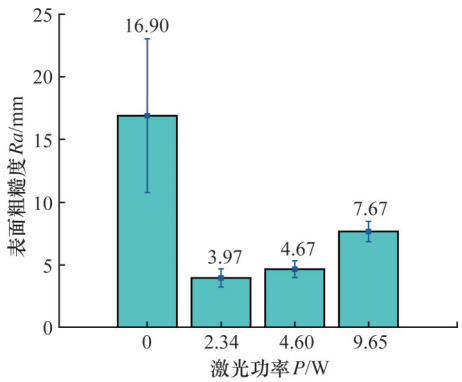


图 6　不同激光功率对表面粗糙度的影响

Fig.6　Surface roughness under different laser powers

的表面粗糙度也呈增长趋势，在功率为 9.65 W 时，Ra 获得最大值。工件表面粗糙度的波动幅度在单点金刚切削时达到最大，说明材料主要由脆塑断裂方式去除；当采用 μ-LAM 时材料的表面粗糙度在不同激光功率下的波动显著下降，这表明工件表面质量和表面均匀性得到提高。

2.3　温度场

塑性域加工是脆性材料实现超精密加工的基础，当切削尺度在微纳米尺度内，材料可通过塑性流动去除[17]，温度是影响脆性材料的脆塑转变临

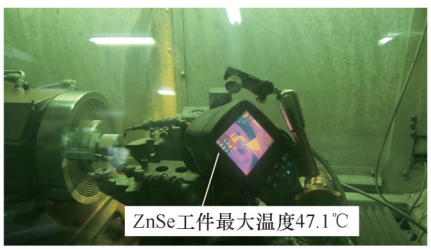
界深度的主要因素[13]。

为了分析μ-LAM对温度场的影响规律，测量了稳态时常规的单点金刚石切削（实验1）与激光辅助切削（实验2）的工件温度场分布。如图7a所示，在常规超精密切削参数下，ZnSe工件表面的最大温度为25.8 ℃，温升为1.8 ℃，工件的温升可归因于切削热，即弹塑性变形和摩擦的协同作用。

如图7b所示，在最优激光功率2.34 W下，工件表面最高温度为47.1 ℃，温升为23.1 ℃。采用μ-LAM后工件表面温升明显，结合相同工况下超精密切削温升，可见采用μ-LAM后，工件温升可归因于激光热效应和切削热，由激光辐照导致温升比例为92.2%。工件表面的温度显著提升，说明了μ-LAM在改善ZnSe切削性能的潜力。脆塑转变现象与位错运动紧密相关，当温度升高时，ZnSe晶体内原子振动加剧，变形区域的原子能量升高，更容易克服能量壁垒产生相对滑移[18]，由此提高了材料的塑性。同时，相对较小的温升能够减小工件因热变形导致的加工误差。



(a)P=0



(b)P=2.34 W

图7 不同激光功率下工件表面最大温度

Fig.7 The max temperature of sample surface under different laser powers

2.4 物相结构

工件表面和切屑的物相结构的演化特征能够反映材料的去除模式[15]。图8为初始的ZnSe工件以及分别在激光功率为0和2.34 W下的已加工表面拉曼频移图，均观察到已存在3处连续特征峰，即横向声学（2TA）、横向光学（TO）、纵向声子（LO），对应于138.4、203.9、250.9 cm^{-1}处[15]，由此表明ZnSe晶体此时的结构为闪锌（ZB）相。工件的拉曼光谱峰形在P=2.34 W下相较于P=0时特征明显，说明其亚表面损伤较小。如图8中插图所示，μ-LAM切削后工件表面产生了白色的光滑塑性变形区域。

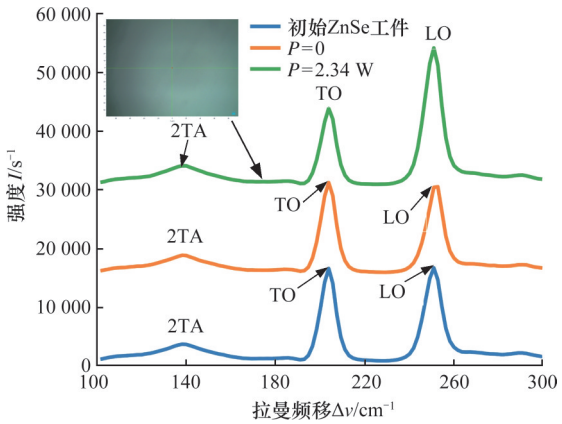


图8 传统超精密切削与微激光辅助切削的已加工表面拉曼光谱

Fig.8 Raman spectra of machined surface under traditional ultra-precision machining and μ-LAM

如图9所示，切屑的拉曼光谱特征与已加工表面的拉曼光谱特征呈现出巨大差异，2TA拉曼峰消失，TO峰频移到246.3 cm^{-1}处。切屑的特征峰频移证实了ZnSe发生了ZB相到岩盐（RS）相的结构相变[19]。

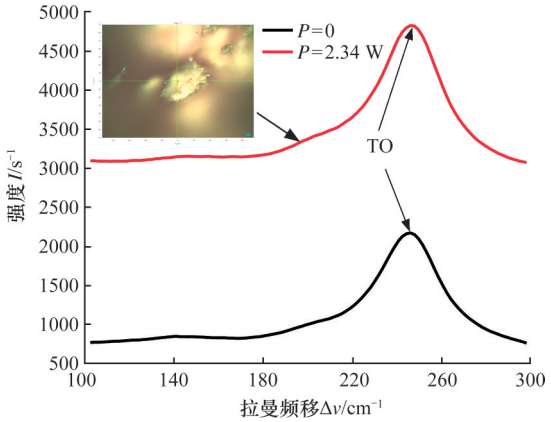


图9 传统超精密切削与微激光辅助切削下切屑的拉曼光谱

Fig.9 Raman spectra of chips under traditional ultra-precision machining and μ-LAM

文献[19]指出ZnSe晶体发生该相变的压力在12 GPa左右，岩盐相的出现标志着ZnSe由半导体（ZB）相到金属（RS）相的转变[19]，高压相变促进了塑性流动[20]。结合切削特征，切屑由第一变形区材料受剪切应力作用向上滑移而形成切屑。因此，第一变形区中金属相变的形成也有助于切屑对激光的吸收[21]，最终提高μ-LAM的有效性。

2.5 加工性能

采用变温纳米压痕实验研究ZnSe晶体在温度为24 ℃和100 ℃下的力学性质，以辅助分析激

光热效应对脆性材料加工性能的影响。

图10所示为ZnSe晶体在不同温度下载荷与压入深度曲线，纳米压痕实验经历线性加载、保载和卸载3个阶段。在加载阶段，载荷线性增至150 mN，位移（即压入深度）随载荷的增大而增大。ZnSe工件最大压入深度随着温度的升高而增大，压入深度在100 ℃时相较于24 ℃增长率为22.4%，说明了切削时温度的升高能够显著改善ZnSe晶体塑性变形能力。

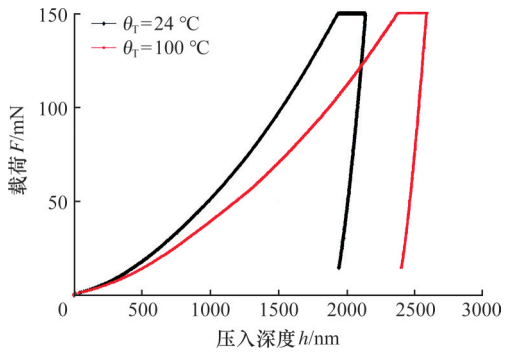


图10　ZnSe晶体不同温度下载荷与压入深度曲线

Fig.10　Curves of load and indentation depth for ZnSe crystal under different temperatures

基于Oliver-Phar法[22]，通过分析载荷位移曲线以进一步获得ZnSe晶体在不同温度下的硬度H和弹性模量E。如图11所示，在24 ℃时，ZnSe晶体的E和H分别为85.90 GPa与1.54 GPa。在100 ℃时，ZnSe晶体的E和H分别为68.57 GPa与1.02 GPa。当温度由24 ℃升高到100 ℃时，ZnSe晶体的弹性模量E和硬度H下降幅度分别为20.2%和34.1%。随着温度升高，ZnSe晶体硬度和弹性模量的大幅下降标志着材料弹性、塑性变形能力的增强。

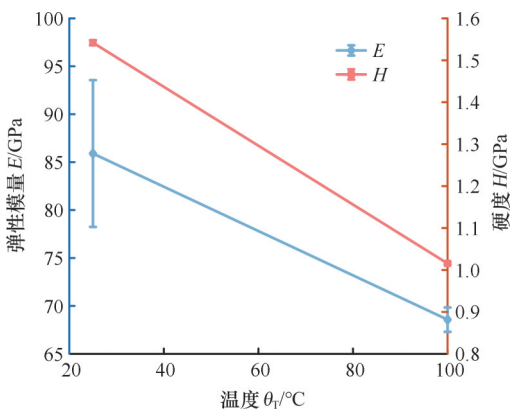


图11　ZnSe晶体硬度和弹性模量随温度曲线

Fig.11　Elastic modulus and hardness of ZnSe crystal under different temperatures

脆塑转变是脆性材料的去除模式由脆性断裂转换为塑性流动的转变，也是实现塑性域切削的基础。文献[23]基于临界载荷并结合压头几何特征推导脆塑转变临界深度：

$$d_c=\sqrt{\frac{\eta}{\zeta\tan^2\theta}}\left(\frac{K_{IC}}{H}\right)^2 \tag{1}$$

$$K_{IC}=0.016\left(\frac{E}{H}\right)^{0.5}\frac{P_L}{c^{1.5}} \tag{2}$$

式中：η为量纲一系数；ζ为压头几何系数；θ为中心线与棱边的夹角，对于Berkovick压头其值为77.05°；K_{IC}为材料断裂韧性[24]；P_L为临界载荷；c为裂纹扩展长度。

研究表明，随着温度升高，脆性材料的断裂韧性会随之增大[25]。KRAMER等[26]对多种脆性陶瓷材料硬度随温度变化规律进行研究，建立了考虑温度影响的经验模型：

$$H=H_0e^{-aT} \tag{3}$$

其中，系数H_0和α通过实验数据拟合确定，T为材料温度。根据实验结果，ZnSe晶体硬度随温度升高显著下降。

结合式(1)～式(3)，在μ-LAM加工ZnSe晶体中，引入激光有助于通过降低材料的硬度、提高断裂韧性来增加脆塑转变临界深度，最终提高ZnSe材料的塑性变形能力。

3　结论

针对脆性材料表面质量与加工效率难以兼顾的问题，以ZnSe晶体为研究对象，开展微激光辅助切削与常规超精密切削实验，并进行变温纳米压痕实验以分析温度对材料加工性能的影响规律。采用微激光辅助切削后与常规的超精密切削ZnSe晶体进行对比，μ-LAM加工ZnSe晶体后工件的表面质量得到显著提高。在激光功率为2.34 W时，最优表面粗糙度为3.97 nm，未观测到可见表面缺陷，工件表面温度为47.1 ℃，激光的热效应主导了工件温升，其比例为92.2%。对ZnSe进行μ-LAM切削，已加工表面的拉曼光谱检测表明，切屑中产生了由半导体相到金属相的结构相变，高压相变促进了工件剪切区域对激光的吸收。ZnSe晶体的加工性能随着工件温度的升高得以显著改善，相较于24 ℃，在100 ℃时ZnSe晶体弹性模量和硬度降幅分别为20.2 %和34.1%，导致材料脆塑转变临界深度的增长，最终改善了脆性材料的可加工性。

参考文献：

[1]　SUN Linhe, ZHANG Shibo, CHEN Minghan, et al. Ultrasonic-assisted Ultra-precision Turning of Zinc-selenide with Straight-nosed Diamond Tools[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2025, 285: 109823.

[2]　XIAO Huapan, YIN Shenxin, CHEUNG C F, et al. Ma-

terial Removal Behavior Analysis of ZnSe Crystal during Side-forward Nanoscratching[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2023, 241: 107968.
[3] 耿瑞文，谢启明，张万清，等. 硒化锌晶体超精密切削材料去除机理研究[J]. 红外与激光工程，2021，50(6)：20200403.
GENG Ruiwen, XIE Qiming, ZHANG Wanqing, et al. Study on the Material Removal Mechanism of ZnSe Crystal via Ultra-precision Diamond Turning[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(6): 20200403.
[4] HUANG Weihai, TSUCHIDA T, YAN Jiwang. Surface Morphology Formation and Subsurface Microstructure Evolution of Zirconia in Ultrasonic Vibration-assisted Burnishing [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2024, 333: 118586.
[5] SUN Linhe, CHEN Minghan, HE Tao, et al. Enhancing Ductile Regime Ultra-precision Diamond Turning of Curved Zinc Selenide (ZnSe) Optics by Using Straight-nosed Diamond Tools with Cutting-edge-slipping[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 120: 234-249.
[6] GAO Rui, LOH Y M, LI Kangsen, et al. Study on the Material Removal Mechanism of Cemented Carbide Magnetic Materials in Magnetic Field-assisted Mass Polishing [J]. Tribology International, 2025, 208: 110647.
[7] HO C C, KAO J Y. Electric Field Assisted Field Monitoring Laser Drilling in Transparent and Hard Brittle Materials [J]. Optics & Laser Technology, 2023, 163: 109344.
[8] KE Jinyang, ZHANG Jianguo, CHEN Xiao, et al. Investigation on the Material Removal Mechanism in Ion Implantation-assisted Elliptical Vibration Cutting of Hard and Brittle Material[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2024, 203: 104220.
[9] LIU Changlin, KE Jinyang, YIN Tengfei, et al. Cutting Mechanism of Reaction-bonded Silicon Carbide in Laser-assisted Ultra-precision Machining[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2024, 203: 104219.
[10] ZOU Chunyang, SHI Guangfeng, MENG Siwei, et al. Experimental Study on In-situ Laser-assisted Diamond Turning of Single Crystal Germanium[J]. Precision Engineering, 2025, 94: 608-622.
[11] LIN Chuangting, FU Yufan, HE Wenbin, et al. Thermal Analysis of In-situ Laser Assisted Diamond Cutting of Fused Silica and Process Optimization[J]. Optics & Laser Technology, 2024, 172: 110539.
[12] HU Wangjie, LU Shijin, ZHANG Junjie. Coupling Optical-thermal Simulations of Laser-induced Temperature Fields in In-situ Laser-assisted Diamond Turning[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 261: 125193.
[13] LIU Qi, LIAO Zhirong, AXINTE D. Temperature Effect on the Material Removal Mechanism of Soft-brittle Crystals at Nano/Micron Scale[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2020, 159: 103620.
[14] ZHANG Wenxuan, WONG K, MORALES M, et al. Implications of Using Two Low-power Continuous-wave Lasers for Polishing [J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2020, 2(3): 035101.
[15] HUANG Weihai, YAN Jiwang. Surface Formation Mechanism in Ultraprecision Diamond Turning of Coarse-grained Polycrystalline ZnSe [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2020, 153: 103554.
[16] 何春雷，任成祖，王姝淇，等. 超精密车削表面衍射效应的研究进展[J]. 机械工程学报，2022，58(3)：266-275.
HE Chunlei, REN Chengzu, WANG Shuqi, et al. Research Progress of Diffraction Effect on the Ultra-precision Cutting Surface [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(3): 266-275.
[17] 都建标，张强，宗文俊. 硬脆及黑色金属材料的单点金刚石车削加工技术综述[J]. 机械工程学报，2023，59(7)：156-175.
DU Jianbiao, ZHANG Qiang, ZONG Wenjun. Summary of Single Point Diamond Turning Technology for Hard, Brittle and Ferrous Metal Materials[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(7): 156-175.
[18] CHEN Xiao, LIU Changlin, KE Jinyang, et al. Subsurface Damage and Phase Transformation in Laser-assisted Nanometric Cutting of Single Crystal Silicon[J]. Materials & Design, 2020, 190: 108524.
[19] CUI Shouxin, HU Haiquan, FENG Wenxia, et al. Pressure-induced Phase Transition and Metallization of Solid ZnSe[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 472(1/2): 294-298.
[20] ITKIN G, HEARNE G R, STERER E, et al. Pressure-induced Metallization of ZnSe [J]. Physical Review B, Condensed Matter, 1995, 51(5): 3195-3197.
[21] MOHAMMADI H, RAVINDRA D, KODE S K, et al. Experimental Work on Micro Laser-assisted Diamond Turning of Silicon (111)[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2015, 19: 125-128.
[22] HOU Dongyang, LIU Ming, LIU Sheng, et al. Indentation Fracture of 4H-SiC Single Crystal [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2024, 270: 109096.
[23] MA Lianjie, GONG Yadong, CHEN Xiaohui. Study on Surface Roughness Model and Surface Forming Mechanism of Ceramics in Quick Point Grinding[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, 77: 82-92.
[24] CUADRADO N, CASELLAS D, ANGLADA M, et al. Evaluation of Fracture Toughness of Small Volumes by Means of Cube-corner Nanoindentation[J]. Scripta Materialia, 2012, 66(9): 670-673.
[25] NAKAO S, ANDO T, SHIKIDA M, et al. Effect of Temperature on Fracture Toughness in a Single-crystal-silicon Film and Transition in Its Fracture Mode[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2008, 18 (1): 015026.
[26] KRAMER B M, JUDD P K. Computational Design of Wear Coatings[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 1985, 3(6): 2439-2444.

（编辑　王旻玥）

作者简介：耿瑞文，1993年生，博士、讲师。研究方向为红外光学脆性材料场辅助超加工。E-mail: precious. grw@gmail. com。
杨蔚华*（通信作者），1975年生，教授。研究方向为数字化机械装备设计与先进制造技术研究。E-mail: ywhuactgu@126. com。

本文引用格式：
耿瑞文，杨蔚华，谢启明，等. 微激光辅助切削硒化锌晶体去除机理研究[J]. 中国机械工程，2026，37(9)：2298-2304.
GENG Ruiwen, YANG Weihua, XIE Qiming, et al. Research on Removal Mechanism of μ-LAM of ZnSe Crystal[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(9): 2298-2304.