

基于 SPH-FEM 转换算法的砷化镓划片 损伤过程研究

黄鹏辉, 姜晨, 高睿, 蒋金鑫

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

摘要: 为了进一步提高半导体激光器巴条制造质量, 改善解理加工过程中划片损伤情况, 采用 SPH-FEM 转换算法研究划片速度和载荷对单晶砷化镓(gallium arsenide, GaAs)划片损伤的影响。基于广义胡克定律计算出砷化镓{100}晶面<110>晶向的各向异性机械力学特征参数, 采用 SPH-FEM 转换算法仿真金刚石刀头划片实验, 将划片过程中损伤的有限元转换为粒子, 研究损伤粒子在刀头作用下的运动轨迹, 确定出划片的损伤过程。研究表明, 该方法较好地解决了传统有限元法大变形区域发生网格畸变所导致的计算误差问题, 揭示了不同加工参数对砷化镓材料划片损伤的影响, 并得到了实验验证, 为脆性材料的划片损伤过程提供了新的途径和思路。

关键词: 砷化镓; 各向异性; 广义胡克定律; 划片损伤; SPH-FEM 转换算法

中图分类号: TH 161+.1 **文献标志码:** A

Study on GaAs scratching damage process based on SPH-FEM conversion algorithm

HUANG Penghui, JIANG Chen, GAO Rui, JIANG Jinxin

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to further improve the manufacturing quality of semiconductor laser bars and improve the scratching damage during cleavage processing, the SPH-FEM conversion algorithm was used to study the effects of scratching speed and load on the scratching damage of single crystal gallium arsenide (gallium arsenide, GaAs). The anisotropic mechanical characteristic parameters of GaAs {100} crystal plane<110>crystal orientation was calculated based on the generalized Hooke's law. The SPH-FEM conversion algorithm was used to simulate the diamond cutting experiment. The finite element

收稿日期: 2023-01-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51475310)

第一作者: 黄鹏辉 (1996-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 精密加工及检测技术. E-mail: 1178789163@qq.com

通信作者: 姜晨 (1978-), 男, 教授. 研究方向: 精密加工及检测技术. E-mail: jc_bati@163.com

引文格式: 黄鹏辉, 姜晨, 高睿, 等. 基于 SPH-FEM 转换算法的砷化镓划片损伤过程研究[J]. 上海理工大学学报, 2024, 46(3): 301-309. DOI: 10.13255/j.cnki.jusst.20230129001

Citation: HUANG Penghui, JIANG Chen, GAO Rui, et al. Study on GaAs scratching damage process based on SPH-FEM conversion algorithm[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2024, 46(3): 301-309.

damaged in the scratching process was converted into particles, and the motion trajectory of the damaged particles under the action of the cutter head was studied to determine the damage process of the scratching. The results showed that this method can effectively solve the calculation error problem caused by grid distortion in the large deformation area of traditional finite element methods, revealing the influence of different processing parameters on the scratching damage of gallium arsenide materials, and it had been experimentally verified. This provided a new viewpoint and approach for the scratching damage process of brittle materials.

Keywords: GaAs; anisotropic; Hooke's law; scratching damage; SPH-FEM conversion algorithm

随着半导体和光电技术的快速发展, 半导体激光器因其高效率、小尺寸、低成本和高可靠性而广泛应用于数据通信、激光医学、激光加工等领域^[1-3]。由于砷化镓(gallium arsenide, GaAs)具有高电子迁移率且为直接带隙^[4], 以其解理面为衬底材料的谐振腔是半导体激光器的核心部件, 对半导体激光器的可靠性具有重要影响^[5]。现有的划片工艺损伤在解理后的腔表面上造成大量损伤裂纹, 这直接影响了半导体激光器的输出功率。因此, 研究解理划片损伤机理以提高谐振器表面的制造质量尤为重要。

解理的断裂机制实际上是当材料受到定向机械应力时, 它可以沿一个或多个平面分裂, 这些平面称为解理面, 而解理面的形成通常分为划片和裂片两个步骤^[6]。Parlinska-Wojtan等^[7]利用不同几何形状的刀头进行压痕实验, 发现滑移和位错是GaAs压痕过程中的两种主要变形方式。基于分子动力学的仿真分析结果, Yi等^[8]研究发现相变和非晶化是GaAs在划片过程中的主要变形机制; 袁玉泉等^[9]基于分子动力学的仿真结果发现a-Fe在(110)面的表面能较低, 能快速地脆性解理扩展, 是最优解理面。董康家等^[10]通过对砷化镓各向异性机械力学参数计算并结合压痕实验发现其{100}晶面<110>晶向为裂纹最易扩展晶向。Wasmer等^[11]通过实验研究不同参数对GaAs解理加工的影响, 研究发现, 解理面形貌与划片载荷大小及刀具的几何形状相关, 而划片过程中所生成的中位裂纹则是形成解理面的初始驱动裂纹, 因此, 划片损伤对解理面质量的影响较大。

目前, 涉及到解理划片损伤的研究大多停留在工艺实验阶段, 相关的数值计算方法少有报道。因此, 本文采用SPH-FEM转换算法仿真计算划片的损伤过程, 该方法可以充分利用SPH有效克服网格畸变和FEM计算效率高的优势。计算出砷化镓{100}晶面<110>晶向的机械力学参数作为

砷化镓材料的本构参数, 采用SPH-FEM转换算法对划片损伤过程进行仿真计算, 揭示解理划片损伤机理, 并开展解理划片工艺验证实验, 为解理划片损伤的仿真提供了一种新的有效途径。

1 建模与试验台搭建

1.1 SPH-FEM 转换算法仿真建模

SPH算法是使用相互作用的质点来表示单晶砷化镓。每个质点都具有物理属性, 如质量、速度、泊松比等。通过求解质点组的动力学方程来确定每个粒子的运动轨迹, 以获得整个系统的力学行为。在SPH算法中, 质点的近似函数可以定义为

$$f(x) = \int_{\Omega} f(y)W(x-y, h)dy \quad (1)$$

式中: W 为3次样条核函数; y 为积分区域内的粒子; h 为光滑长度; dy 表示体积。

经过推导后的连续方程可以改写为SPH粒子的求和方式, 即

$$f(x) = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j)W_{ij} \quad (2)$$

式中: $W_{ij} = W(x_i - x_j, h)$; $\Delta W_{ij} = \partial W_{ij} / \partial x_j$; N 为计算点中心粒子 i 支持域粒子总数; m_j 为粒子 j 的质量; ρ_j 为粒子 j 的密度。

图1为根据核函数计算得到的粒子近似分布图。图中: s 表示边界条件; r_{ij} 表示粒子 j 到中心粒子 i 的长度; k 表示长度系数。

SPH-FEM转换算法^[12]中等效应变被视为元素转换的标准, 即当等效应变达到用户定义的转换阈值时, 不再以有限元积分格式计算, 而是自动转换为SPH粒子(见图2), 并参与SPH积分格式计算。有限元转换为SPH粒子后, 需要对新生成的SPH粒子进行赋值; 由于SPH粒子是由失效单元节点转换得到, 将失效节点的物理量直接传递给新生成的SPH粒子, 即将单元失效时刻的物理

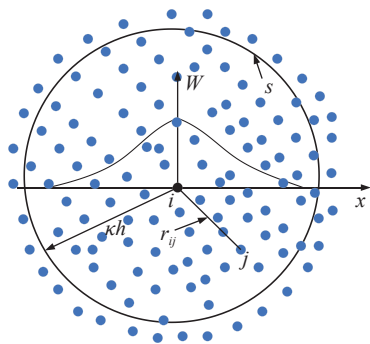


图 1 粒子近似分布图

Fig.1 Approximation distribution of particles

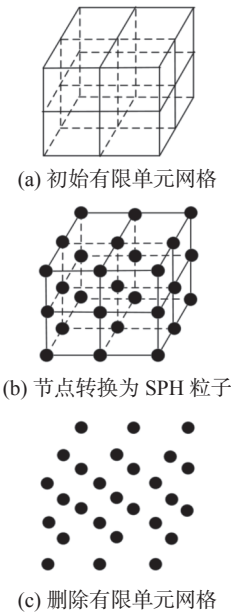


图 2 SPH-FEM 转换算法示意图

Fig.2 Schematic diagram of SPH-FEM conversion algorithm

量作为 SPH 计算的初始物理量。

拉格朗日有限元不存在 SPH 光滑长度的概念，因此，新生成 SPH 粒子的光滑长度 h_p 无法从有限元节点直接获得，需要根据质量守恒定律计算得到

$$h_p = \frac{\alpha}{N_e} \sum_i^{N_e} r_{0i} \left(\frac{\rho_{0i}}{\rho_i} \right)^{1/d} \quad (3)$$

式中： N_e 为有限元长度； ρ_0 和 ρ 分别为砷化镓材料的初始和当前密度； r_0 表示初始单元尺寸； α 表示光滑长度与单元尺寸比例系数； d 表示维数。

具体的划片模型如图 3 所示，其中金刚石刀头为边长 $20\ \mu\text{m}$ 的正三棱锥（假设刀头为刚体），工件尺寸为 $50\ \mu\text{m} \times 40\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$ ，将建立的工件划分为 70 000 个有限单元。对于脆性材料，根据刀头施加载荷和裂纹长度可计算划片深度^[13]，结果见表 1。

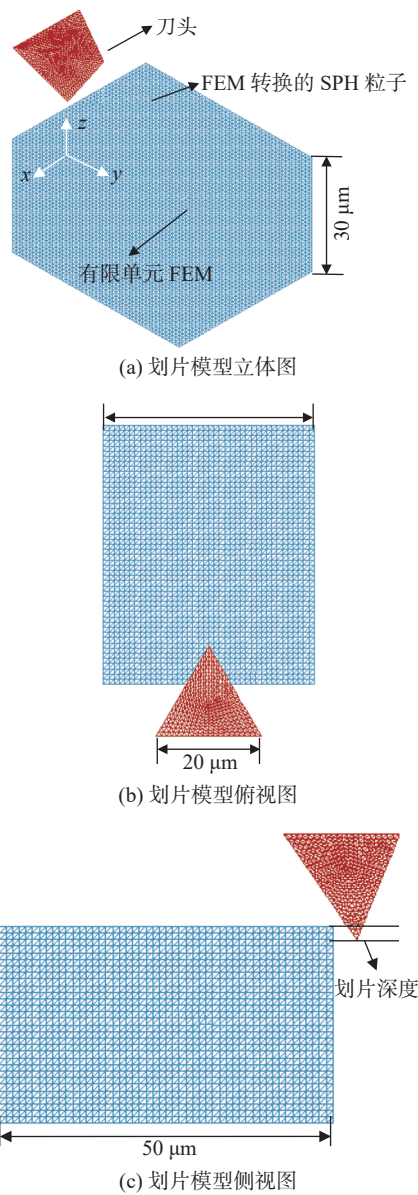


图 3 划片仿真模型

Fig.3 Simulation model of scratching

$$L_m = 0.15 (E_r/H) (K_I/H)^2 \quad (4)$$

$$K_I = 0.018 (E_r/H)^{1/2} F/c^{3/2} \quad (5)$$

$$E_r = \frac{E_i E_j}{(1 - \nu_i)^2 E_j + (1 - \nu_j)^2 E_i} \quad (6)$$

式中： L_m 为划片深度； K_I 为应力强度因子，其数值是受载荷和裂纹长度等影响的变量，划片深度主要由此参数计算； E_r 为复合弹性模量； F 为施加载荷； E_i 为 GaAs 弹性模量； E_j 为金刚石刀头弹性模量； ν_i 为 GaAs 泊松比； ν_j 为金刚石刀头泊松比；利用维氏压痕实验所测得维氏硬度 H 为 5.76 GPa； c 为不同载荷压痕下的裂纹长度。

1.2 材料性能参数

GaAs 作为一种具有各向异性的重要激光器腔

表 1 刀头施加载荷下的划片深度

Tab.1 Scratching depth under the applied load of the cutter

<i>F</i> /g	<i>c</i> /μm	<i>L_m</i> /μm
10	3.1	2.5
15	4.5	3.3
20	6.0	4.1

面材料，确定计算其<110>晶向簇力学特性参数，并提供一种适用于 GaAs 材料解理划片仿真的 HJC 本构模型参数^[14]，这对揭示解理加工机理具有重要作用。

基于广义胡克定律，结合 GaAs 的 FCC 晶胞结构，两个晶向簇上的弹性模量*E_i*和泊松比*ν_i*分别可由公式计算得出

$$\frac{1}{E_i} = S_{11} - 2\left(S_{11} - S_{12} - \frac{S_{44}}{2}\right)(l_1^2 l_2^2 + l_1^2 l_3^2 + l_3^2 l_2^2) \quad (7)$$

$$\nu_i = \frac{S_{12} + \left(S_{11} - S_{12} - \frac{S_{44}}{2}\right)(l_1^2 m_1^2 + l_2^2 m_2^2 + l_3^2 m_3^2)}{S_{11} - 2\left(S_{11} - S_{12} - \frac{S_{44}}{2}\right)(l_1^2 l_2^2 + l_2^2 l_3^2 + l_3^2 l_2^2)} \quad (8)$$

$$\frac{1}{G} = 4S_{11}(l_1^2 m_1^2 + l_2^2 m_2^2 + l_3^2 m_3^2) + 8S_{12}(l_1 l_2 m_1 m_2 + l_1 l_3 m_1 m_3 + l_2 l_3 m_2 m_3) + S_{44}[(l_1 m_2 + l_2 m_1)^2 + (l_1 m_3 + l_3 m_1)^2 + (l_2 m_3 + l_3 m_2)^2] \quad (9)$$

式中：*S₁₁*，*S₁₂*，*S₄₄*为柔度系数；*l*为 GaAs 晶格内任意方向的向量，*l₁*，*l₂*，*l₃*为该向量在 *x*，*y*，*z* 轴上的分量，*l₁²+l₂²+l₃²=1*，*l₁*，*l₂*，*l₃*∈[0,1]；*m*为垂直于*l*向量且与*l*向量终点相交平面(此平面记作剪切面)内的任意向量，*m₁*，*m₂*，*m₃*为该向量在 *x*，*y*，*z* 轴上的分量，*m₁²+m₂²+m₃²=1*，*m₁*，*m₂*，*m₃*∈[0,1]。计算结果如图 4 所示。在相

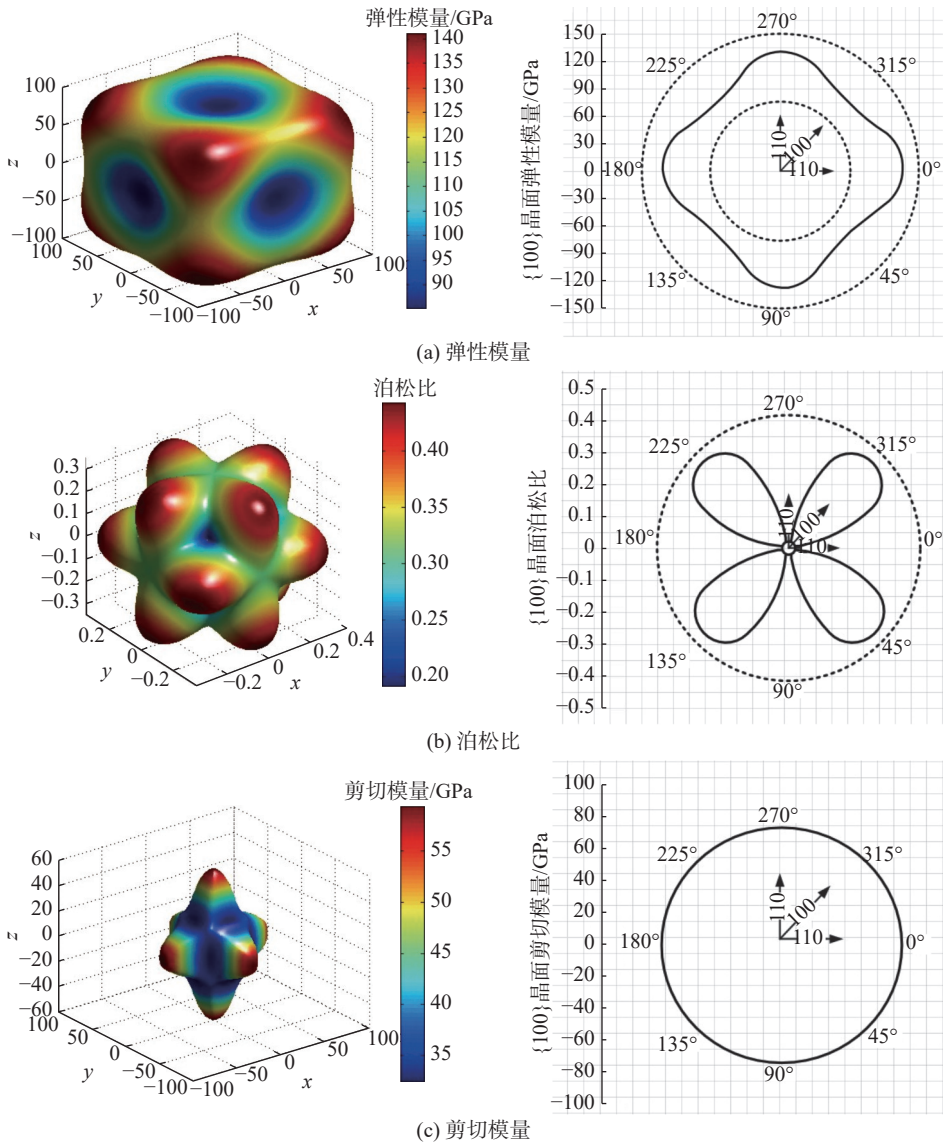


图 4 砷化镓机械力学特征参数

Fig.4 Mechanical characteristic parameters of GaAs

同晶面上, 弹性模量和泊松比均表现为周期性变化规律, 且呈现出对称性。 $\langle 110 \rangle$ 晶向簇的弹性模量和泊松比分别为 141.2 GPa 和 0.19。计算得到砷化镓 $\{100\}$ 晶面的剪切模量为 59.4 GPa。

刀头与砷化镓材料的物理力学性能见表 2^[15]及表 3^[16]。

表 2 金刚石刀头与工件材料的物理力学性能
Tab.2 Physical and mechanical properties of diamond cutter head and workpiece materials

名称	密度/(g·mm ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	剪切模量/GPa
刀头	3.50×10 ⁻³	9.64×10 ⁵	0.07	—
工件	5.32×10 ⁻³	141.26	0.19	59.4

表 3 工件材料的 HJC 本构模型参数
Tab.3 HJC constitutive model parameters of workpiece materials

标准强度	标准强度增大系数	压力增大系数	应变率	标准最大发展强度系数	初始损伤度	完全损伤度
0.93	0.088	0.77	0.003	0.35	0.04	1

1.3 边界条件

仿真是金刚石刀头沿着砷化镓工件材料的 $\langle 110 \rangle$ 晶向划片, 因此需要对划片刀头的自由度(除了划片方向)施加约束, 对砷化镓材料底部全自由度约束。解理划片的仿真工艺参数如表 4 所示。

表 4 砷化镓解理划片仿真和实验工艺参数
Tab.4 Simulation and experiment process parameters of GaAs cleavage scratching

划片速度/(mm·s ⁻¹)	划片载荷/g	划片晶向
20~40	10~20	$\langle 110 \rangle$

1.4 解理划片试验台搭建

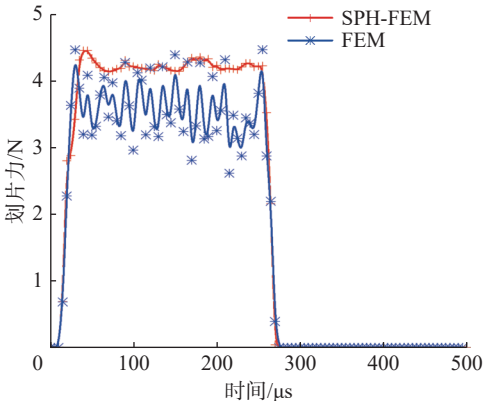
图 5 为课题组与上海微精密工程有限公司联合研制的解理划片机, 划片对象为 10 mm×5 mm×

0.35 mm 的砷化镓样片。在进行划片实验时, 首先将样片放置蓝膜上并且将蓝膜吸附在真空吸盘上保持固定; 然后通过 Z 轴的旋转将样片调平, 通过 X 轴和 Y 轴移动使得划片刀头对准 $\langle 110 \rangle$ 晶向, 通过力传感器设定刀头加载力; 随后设定划片速度, 进行划片操作; 完成一条参数后, 按照上述重新设定加工参数, 直至完成所有划片, 实验划片参数见表 4。

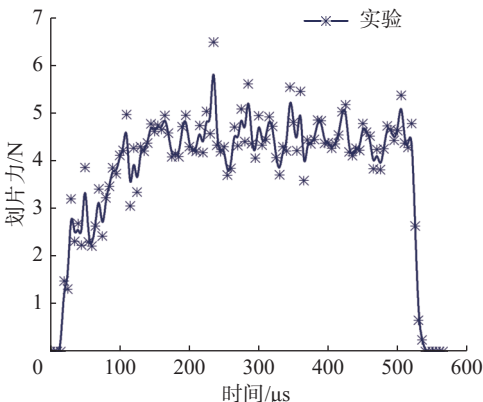
2 实验与仿真结果及分析

2.1 SPH-FEM 转换算法与 FEM 算法对比

图 6 所示为 SPH-FEM 和 FEM 两种算法在 10 g、20 mm/s 条件下得到的划片力变化曲线和实验划片力曲线。两种方法模拟结果虽然在数值波动上与实验结果存在差异, 但是在数值大小上比较相似, SPH-FEM 转换算法计算稳定状态下的划片力平均值与实验误差为 5.6%, 而 FEM 算法的误差为 22.3%。由此可知, SPH-FEM 算法计算精度



(a) 仿真结果



(b) 实验结果

图 6 SPH-FEM 算法与 FEM 算法的划片力与实验对比
Fig.6 Comparison of scoring force and experiment results between SPH-FEM algorithm and FEM algorithm

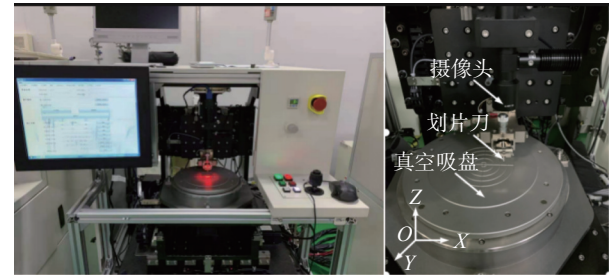


图 5 解理加工划片设备

Fig.5 Cleavage processing scratching equipment

更高。根据 SPH-FEM 转换算法计算的划片力变化曲线可知：当划片时间小于 $50\text{ }\mu\text{s}$ 时，由于金刚石刀头刚接触工件材料，损伤粒子数量较多，在刀头前端及边缘堆积无法排出，导致划片力从 0 突然上升，波动幅度较大；随着划片的稳定进行(图中的 $50\sim 250\text{ }\mu\text{s}$)，工件材料得到缓冲，且损伤颗粒大部分沿着刀头边缘流出，划片力相对稳定；当划片时间为 $250\sim 500\text{ }\mu\text{s}$ 时，金刚石刀头脱离工件材料表面，划片力最终减小至 0。

比较 SPH-FEM 转换算法与 FEM 算法计算的划片力变化曲线可以观察到：采用两种方法所得到的划片力大小结果与实验测量结果都比较接近。然而，GaAs 划片过程是粒子压碎去除的过程，压碎的粒子脱离工件材料表面出现了粉末状颗粒，此时出现了剧烈的网格畸变。FEM 算法模拟所得的划片力曲线存在较大幅度的波动，划片力数值上也产生了较大误差。相比之下，SPH-

FEM 转换算法所得到的划片力曲线变化相对稳定且未出现大幅度波动，从而验证了 SPH-FEM 转换算法能克服划片压碎去除区域发生网格畸变所导致的计算误差问题。

2.2 划片损伤过程分析

如图 7 所示，研究出划片损伤的机制是：由于金刚石刀头的挤压作用使工件材料产生了大量压碎损伤颗粒，部分损伤颗粒沿着刀头边缘流出，部分残留在划痕边缘产生粒子堆积隆起现象。根据图 8 划片的亚表面损伤图可知：划片损伤的实际宽度大于金刚石刀头的划片宽度，由于刀头尖端附近和刀头边缘的损伤粒子堆积挤压形成压应力从而萌生裂纹，裂纹沿着划槽向外扩展，扩展一段时间后就会停止而残留下来，因此，最大损伤宽度应是划片质量的重要评价指标；解理裂片过程中残留裂纹沿着解理面发生拓展，从而导致解理面出现损伤，影响谐振腔工作性能。

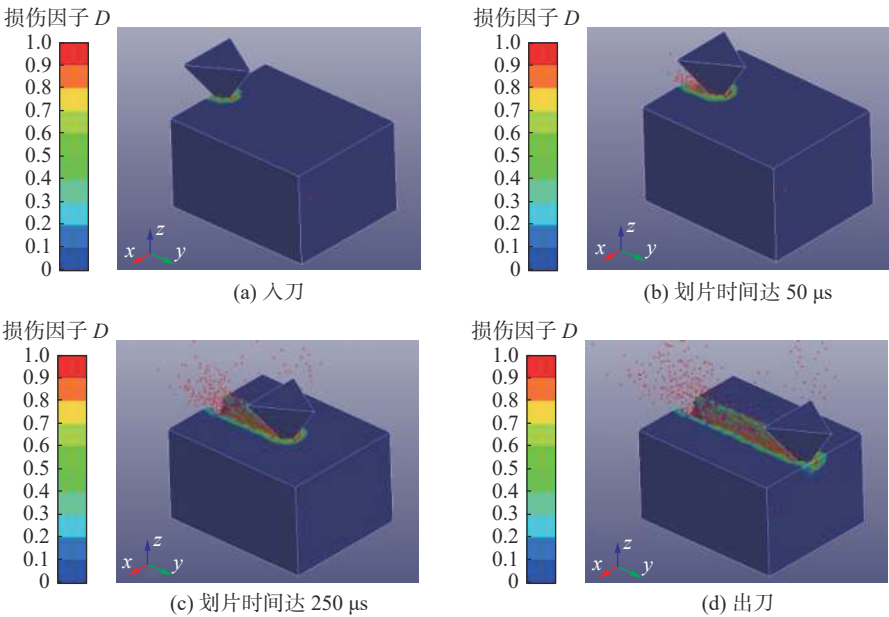


图 7 GaAs 划片损伤过程图

Fig.7 Diagram of the damage process in GaAs scratching

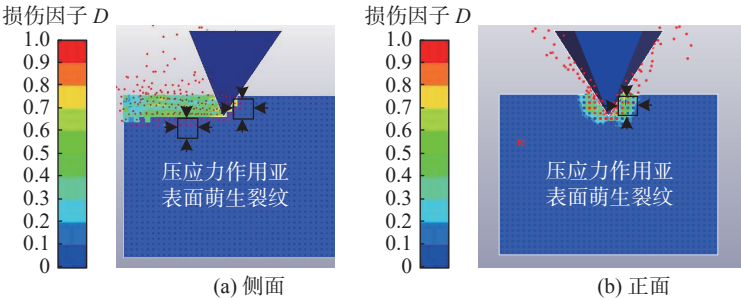


图 8 划片亚表面损伤

Fig.8 Damage of the scratching subsurface

2.3 划片参数对划片力的影响

划片力是描述划片损伤的关键因素, 划片过程中划片力越小且稳定时, 刀头挤压工件所产生的正应力越小, 所萌生的裂纹数量越少, 使得划片损伤较小, 划片质量较高, 减轻了裂片过程中干扰裂纹扩展所导致的解理面损伤。因此, 本文详细地研究了不同划片参数对划片力影响。

2.3.1 划片载荷对划片力的影响

根据表 5 中的参数进行数值仿真, 得到划片力的曲线图, 如图 9 所示。根据图 10 数据可知: 当划片速度和刀头的倾斜角度一定时, 随着划片载荷的增加, 划片深度也随之加深, 刀头与工件材料的接触面积变大导致划片阻力变大, 从而划片力也在增加; 划片过程中压碎的粒子数量增加, 更多的粒子无法及时沿着刀头的两个侧面流出而发生堆积现象, 萌生更多裂纹导致生成的划片质量较差。

表 5 载荷对损伤形貌影响仿真划片参数
Tab.5 Simulation scratching parameters for the effect of load on damage morphology

划片载荷/g	划片速度/(mm·s ⁻¹)	刀头倾斜角度/(°)
10, 15, 20	30	75

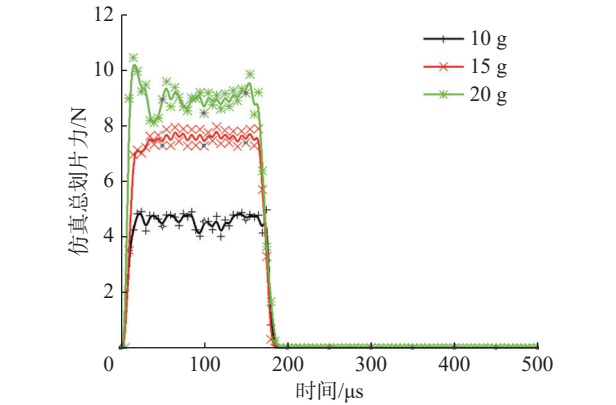


图 9 划片力随时间的变化趋势
Fig.9 Trend of scratching force over time

2.3.2 划片速度对划片力的影响

根据表 6 的划片参数进行划片仿真, 刀头与工件材料之间的摩擦作用和压碎粒子的堆积都会影响划片力。如图 11 所示: 当划片经过一段时间缓冲后, 划片力趋于稳定; 当达到稳定的弛豫时间后, 划片力会随着速度的增加而减小。当划片载荷和刀头倾斜角度一定时, 划片速度的增加对划片力大小的影响并不明显(如图 12 所示), 因此, 通过改变划片速度来改善划片质量并不会产

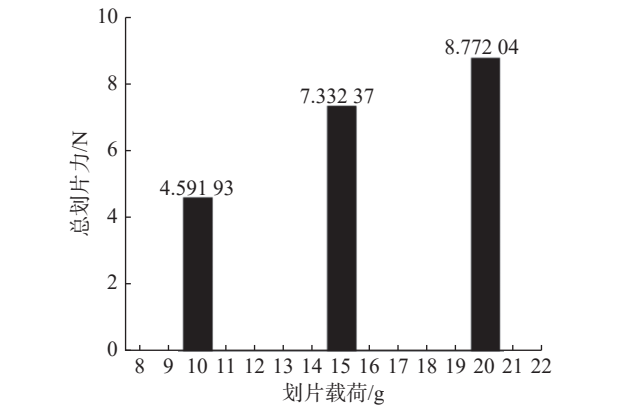


图 10 划片载荷对稳定阶段划片力的影响
Fig.10 Effect of scratching load on the scratching force during the stable stage

表 6 速度对损伤形貌影响仿真划片参数
Tab.6 Simulation scratching parameters for the effect of speed on damage morphology

划片载荷/g	划片速度/(mm·s ⁻¹)	刀头倾斜角度/(°)
15	20, 30, 40	75

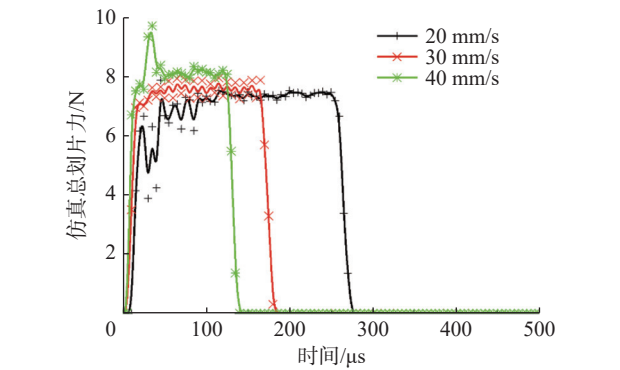


图 11 划片力随时间变化趋势
Fig.11 Trend of scratching force over time

生明显作用。

2.4 实验结果与仿真结果分析

根据 SPH-FEM 转换算法的仿真结果可知: 划片损伤与划片速度和划片载荷呈正相关关系, 而且划片载荷对划片质量的影响远大于划片速度对其产生的影响。因此, 本文选取划片载荷 10 g、划片速度 20~50 mm/s 和划片速度 20 mm/s、划片载荷 10~25 g 下的划片损伤形貌进行分析, 如图 13 和图 14 所示。研究发现: 10 g、20 mm/s 时的划片质量较好; 在稳定划片参数区间内, 相同载荷条件下, 随着划片速度的增加, 划片损伤特征发生微小变化; 相同速度条件下, 随着划片载荷的增加, 划片损伤发生明显加剧。结果表明: 划片载

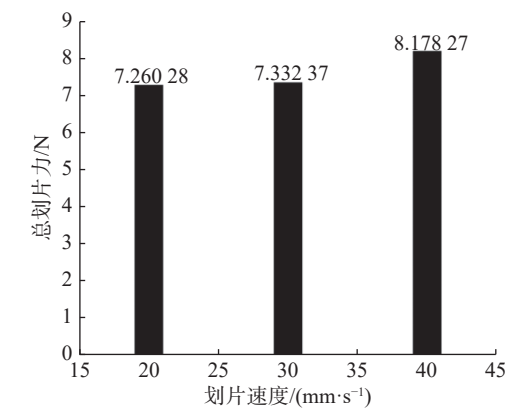


图 12 划片速度对稳定阶段划片力的影响

Fig.12 Effect of scratching speed on the scratching force during the stable stage

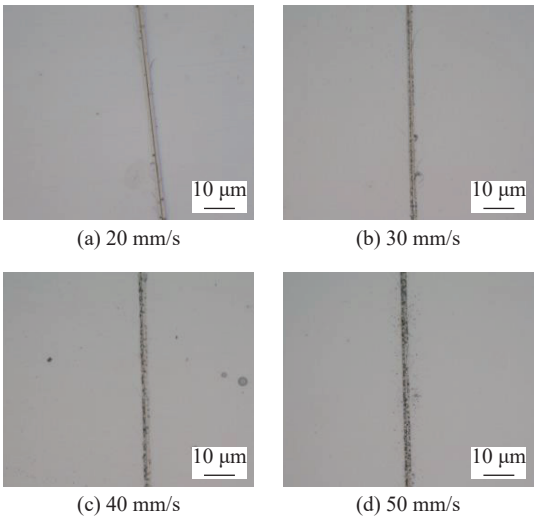


图 13 划片载荷 10 g 时不同划片速度的划片损伤形貌

Fig.13 Morphology of scratching damage at different scratching speeds when scratching load is 10 g

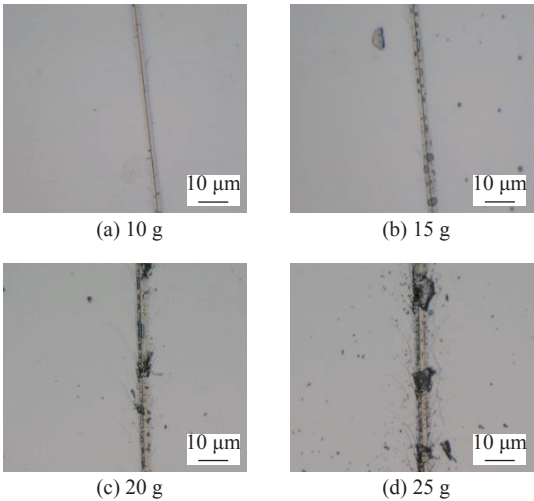


图 14 划片速度 20 mm/s 时不同划片载荷的划片损伤形貌

Fig.14 Morphology of scratching damage at different scratching loads when scratching speed is 20 mm/s

荷对划片损伤的影响大于划片速度对其的影响；在划片损伤稳定的工艺参数区间内，较小的划片载荷和划片速度更容易得到较高质量的划痕，与 SPH-FEM 转换算法的仿真结果基本一致。

3 结 论

采用 SPH-FEM 转换算法模拟了金刚石刀头划擦砷化镓的过程，该转换算法较好地解决了有限元法网格畸变的问题；比较 SPH-FEM 和 FEM 两种方法模拟下的划片力变化曲线，发现由于划片是压碎去除过程，网格出现畸变造成有限元算法产生了误差，而 SPH-FEM 转换算法仿真结果更接近实验结果，从而验证了本文转换算法在加工过程仿真的可行性和优越性；同时揭示了不同加工参数对划片力变化的影响，并得到了实验验证，为脆性材料的加工损伤过程仿真提供了一种新的途径和思路。

参考文献：

[1] 赵碧瑶, 井红旗, 仲莉, 等. 半导体激光器边缘绝热封装改善慢轴光束质量 [J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0105002.

[2] 张继业, 张建伟, 曾玉刚, 等. 高功率垂直外腔面发射半导体激光器增益设计及制备 [J]. 物理学报, 2020, 69(5): 054204.

[3] RA Y H, RASHID R T, LIU X H, et al. An electrically pumped surface-emitting semiconductor green laser[J]. *Science Advances*, 2020, 6(1): eaav7523.

[4] WU L, YU B J, FAN Z T, et al. Effects of normal load and etching time on current evolution of scratched GaAs surface during selective etching[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2020, 105: 104744.

[5] GAO R, JIANG C, LANG X H, et al. Experimental investigation of influence of scratch features on GaAs cleavage plane during cleavage processing using a scratching capability index[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2021, 8(3): 761-770.

[6] WASMER K, BALLIF C, GASSILLOUD R, et al. Cleavage fracture of brittle semiconductors from the nanometer to the centimeter scale[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2005, 7(5): 309-317.

[7] PARLINSKA-WOJTAN M, WASMER K, THARIAN J, et

- al. Microstructural comparison of material damage in GaAs caused by Berkovich and wedge nanoindentation and nanoscratching[J]. *Scripta Materialia*, 2008, 59(3): 364–367.
- [8] YI D F, LI J Y, ZHU P Z. Study of nanoscratching process of GaAs using molecular dynamics[J]. *Crystals*, 2018, 8(8): 321.
- [9] 袁玉全, 曾祥国, 胡燕飞. 分子动力学模拟 α -Fe 拉伸与疲劳裂纹扩展机理 [J]. 信阳师范学院学报: 自然科学版, 2016, 29(1): 31–37.
- [10] 董康佳, 姜晨, 任绍彬, 等. 砷化镓晶体力学特性的各向异性计算 [J]. 无机材料学报, 2021, 36(6): 645–651.
- [11] WASMER K, BALLIF C, POUVREAU C, et al. Dicing of gallium-arsenide high performance laser diodes for industrial applications: part II. Cleavage operation[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 198(1/3): 105–113.
- [12] XIAO N, ZHOU X P, GONG Q M. The modelling of rock breakage process by TBM rolling cutters using 3D FEM-SPH coupled method[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017, 61: 90–103.
- [13] 耿瑞文, 杨晓京, 谢启明, 等. 基于划刻实验的单晶锗材料去除机理研究 [J]. 无机材料学报, 2019, 34(8): 867–872.
- [14] JOHNSON G R, HOLMQUIST T J. An improved computational constitutive model for brittle materials[J]. *AIP Conference Proceedings*, 1994, 309(1): 981–984.
- [15] 段念, 黄身桂, 于怡青, 等. 不同圆角半径金刚石划擦单晶 SiC 过程中的材料去除机理研究 [J]. 机械工程学报, 2017, 53(15): 171–180.
- [16] CRONIN D S, BUI K, KAUFMANN C, et al. Implementation and validation of the Johnson-Holmquist ceramic material model in LS-Dyna[C]//4th European LS-DYNA Users Conference. Ulm, Germany, 2003: 47–60.

(编辑: 丁红艺)