

文章编号 1004-924X(2024)13-2081-10

基于磨粒三维轨迹的钽酸锂双面研磨均匀性

薛赛赛*, 郭晓光, 贾珣璠, 高 尚, 康仁科

(大连理工大学 高性能精密制造全国重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为了改善钽酸锂(LiTaO_3 , LT)晶片的材料去除均匀性, 提出一种考虑磨粒三维微切削的材料去除均匀性模型。根据钽酸锂晶体脆/塑性去除机理, 结合研磨垫表面磨粒的分布特征, 运用力平衡方程计算了研磨垫上各磨粒的切入深度与切屑截面积。通过运动学分析推导了双面研磨中磨粒运动轨迹方程, 建立了考虑磨粒三维微切削的材料去除均匀性模型, 并研究了齿圈与太阳轮转速比 m 、下研磨盘与太阳轮转速比 n 对材料去除均匀性的影响。最后, 开展了钽酸锂晶片固结磨料双面研磨实验, 测量了不同转速比 m, n 下晶片的总厚度变化, 验证了模型。实验结果表明: 材料去除均匀性受转速比 m, n 的影响较大, 当转速比 m, n 分别为 0.85, 1.3 时材料去除均匀性最佳, 此时晶片的总厚度变化为 0.83 μm , 实验结果与仿真一致。所建模型对改善钽酸锂晶片双面研磨材料的去除均匀性有一定的指导意义。

关键词: 固结磨料研磨; 钽酸锂晶片; 磨粒运动轨迹; 材料去除均匀性

中图分类号: TH161.1; TG73 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243213.2081

Double-sided lapping uniformity of LiTaO_3 based on three-dimensional trajectory of particles

XUE Saisai*, GUO Xiaoguang, JIA Yufan, GAO Shang, KANG Renke

(State Key Laboratory of High-Performance Precision Manufacturing,
Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

* Corresponding author, E-mail: 1121176472@qq.com

Abstract: To enhance the uniformity of material removal for lithium tantalate (LiTaO_3 , LT) wafers, a model based on the three-dimensional micro-cutting of abrasive particles was developed. The model starts by analyzing the brittle and plastic removal mechanisms of LiTaO_3 crystals, alongside the distribution of abrasive particles on the lapping pad. Using a force balance equation, it calculates the penetration depth and chip cross-section for each abrasive particle. A kinematic analysis subsequently derives the trajectory of these particles during double-sided lapping, leading to the establishment of the material removal uniformity model. Simulations were conducted to assess the effects of the speed ratios between the gear ring and the sun wheel (m) and between the gear ring and the lower plate (n) on material removal uniformity. Following this, experiments were performed on LiTaO_3 wafers, measuring the Total Thickness Variation (TTV) across different speed ratios m and n to validate the model. Results indicate that the uniformity of material removal is significantly influenced by these speed ratios, achieving optimal uniformity at $m=0.85$ and $n=$

收稿日期: 2024-01-30; 修订日期: 2024-03-13.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 52175382)

1.3, resulting in a TTV of $0.83\ \mu\text{m}$. The experimental findings align with the simulation, demonstrating the model's potential to guide improvements in the double-sided lapping uniformity of LiTaO_3 wafers.

Key words: fixed abrasive lapping; lithium tantalate; particle trajectory; material removal planarization

1 引言

钽酸锂晶体由于其优异的压电及电光效应,被广泛地应用于弹性表面波器件,同时也是光通信、激光及光电子领域中的基本功能材料。钽酸锂晶体多用于光学及衬底部件,这些领域往往对其加工精度尤其是平面度要求较高。但是钽酸锂晶体硬度低、脆性大,断裂韧性低,是典型的难加工软脆材料,平面度难以保证。固结磨料研磨技术因具有较高的加工效率、较低的亚表面损伤以及加工平面度高等优点,作为一种平面超精密加工方法,被越来越多地应用在钽酸锂等软脆材料的加工中。固结磨料研磨使用研磨垫去除晶片表面材料,固结磨料研磨垫是将结合剂与磨粒混合后固化,并在其中加入合适的添加剂制成的一种特殊磨具,在使用过程中不需要特殊的机床设备,可以在普通的研磨机床上进行加工,从而降低改造设备的成本^[1]。

固结磨料研磨技术是一种通过固结在研磨垫上的磨粒与晶片之间的相对运动,对晶片进行二体微切削,从而实现材料去除、改善晶片表面形貌的加工方式。研磨过程中,磨粒在载荷的作用下压入晶片,随着磨粒与晶片的相对运动进行塑性或脆性去除^[2]。由于研磨垫表面具有百万级的磨粒,磨粒的出露高度也不尽相同,因此,考虑磨粒的三维材料去除更能反映固结磨料研磨的材料去除过程。同时,相较于传统的游离磨料研磨,固结磨料研磨中磨粒运动轨迹相对确定,因此,运用这种确定性通过仿真对工艺参数进行优化,可以达到更均匀的材料去除。

众多学者研究了固结磨料研磨材料去除机理,以及工艺参数对材料去除均匀性的影响规律等,并建立了相应的模型。杨金双等^[3]建立了磨粒轨迹方程和速度方程,提出一种基于 MATLAB 离散统计的磨粒轨迹均匀性定量评价方法,并提出以分布均匀性方差作为评价指标,为参数优化提供理论依据。Wang 等^[4]发现晶片表面的

轨迹分布对晶片的表面质量尤其是平面度起着重要作用,并通过表面粗糙度以及总厚度变化 (Total Thickness Variation, TTV) 表征晶片表面均匀性。徐雳等^[5]从轨迹分布的均匀性、致密性以及曲率变化出发,对加工过程中的转速进行优化。Zhang 等^[6]基于抛光垫上单磨粒在 SiC 衬底表面的运动方程,提出了磨粒分布半径、齿圈与太阳轮转速比以及下盘与太阳轮转速比的适当分布范围,对运动参数进行优化。Pan 等^[7]为了研究双面研磨晶片凹凸表面形状的形成机理,考虑晶片在行星轮中的偏心和旋转,建立了一种运动学模型。上述研究表明,运动轨迹分布会直接影响到晶片材料去除均匀性。然而,以往的研究大多将磨粒视为质点,仅通过运动学对参数进行优化,未考虑不同磨粒的实际三维微切削去除情况。由于研磨垫上磨粒的出露高度不同,切削形式和单磨粒的切屑截面积也有差异,因此,单纯从运动学角度建立的模型并不能反映实际材料去除的均匀程度,建立的运动轨迹仿真模型是不完善的。

为了建立更接近实际的材料去除均匀性模型,实现更均匀的材料去除,本文考虑单磨粒的切屑截面积,基于磨粒三维微切削材料去除建立材料去除均匀性模型,并开展实验验证。首先,根据钽酸锂晶体脆/塑性去除机理,计算不同切入深度磨粒的切屑截面积;基于磨粒出露高度分布、力平衡方程等,推算出磨粒切入晶片的深度;随后引入运动学分析,以材料去除均匀性系数 (CTD) 作为衡量标准,建立考虑磨粒三维微切削的材料去除均匀性模型,研究了转速比 m, n 对材料去除均匀性的影响;最后开展了相关实验,以总厚度变化作为评价指标对材料去除均匀性模型进行验证。

2 单磨粒材料去除量与切入深度计算

为了计算晶片上各区域的材料去除量,首先

需要研究不同切深下单磨粒的材料去除形式以及切屑截面积;在此基础上结合磨粒在研磨垫上的分布特征,计算研磨垫上各磨粒的切入深度,最终,才能计算出晶片表面不同位置处的材料去除量。

2.1 单磨粒材料去除机理

无论是单点金刚石车削还是超精密研磨都是在亚微米或纳米尺度切深状态下获得超光滑表面,因此,只有充分了解钽酸锂晶体在微纳尺度下的力学特性,才能有效控制和改善加工表面质量。传统的材料去除过程一般分为脆性去除和塑性去除两种。在脆性去除过程中,材料去除是通过裂纹的扩展以及交叉来完成的,会影响被加工表面的质量和完整性,加工表面质量较差。当磨粒切入深度小于脆/塑转变临界切深时,脆性材料同样能够进行塑性去除。塑性去除过程中,由于避免了脆性去除带来的崩碎等缺陷,表面质量可以得到极大的提升。

美国学者 Bifano 等^[8]在硬脆材料的研磨加工过程中建立了脆/塑临界转变深度的表达式,临界转变深度 D_c 可表示为:

$$D_c = \beta \left(\frac{E}{H_v} \right) \left(\frac{K_c}{H_v} \right)^3, \quad (1)$$

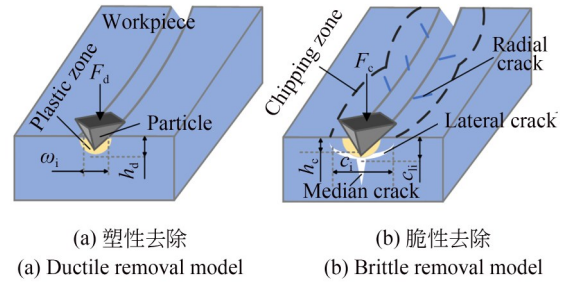
式中: E 表示弹性模量, K_c 表示断裂韧性, H_v 表示维氏硬度, β 为常数,不仅与加工条件有关,并且对微观结构、晶体学、成分和制造历史等因素敏感,导致常数 β 不可靠^[9]。

随着近年来精密仪器设备的出现,对脆/塑临界转变深度的测量技术日益成熟。Huang 等^[9]对 Bifano 的经典公式进行了修正,得到了适用性更广泛、更接近实际测量值的脆/塑临界转变深度的表达式:

$$D_c = \Delta \left(\frac{K_c}{H} \right)^2 \quad (2)$$

$$\Delta = 8.7 \left(\frac{H_v}{E} \right)^{\frac{1}{2}}$$

固结磨料研磨加工中表面微观形貌的生成过程如图 1 所示。假设金刚石磨粒为正八面体,上下两顶点之间的距离表征磨粒粒径 D ,半锥角为 ϕ ,如图 2 所示^[10]。当切入深度小于临界转变深度 D_c 时材料进行塑性去除,如图 1(a)所示, h_d 为磨粒切入深度, F_d 为磨粒所受法向载荷。根据



(a) 塑性去除

(b) 脆性去除

(a) Ductile removal model

(b) Brittle removal model

图 1 不同形式下的材料去除

Fig. 1 Material removal in different models

定义及几何关系 h_d 与 ω_i 可表示为:

$$h_d = \sqrt{\frac{F_d}{2H_v}} \quad (3)$$

$$\omega_i = 2h_d \tan 2\phi$$

这种去除模式下,切屑截面形状近似为三角形,切屑截面积 S_d 为:

$$S_d = \frac{1}{2} h_d \omega_i = h_d^2 \tan^2 \phi. \quad (4)$$

当切入深度大于临界转变深度 D_c 时材料进行脆性去除,如图 1(b)所示, h_c 为磨粒切入深度, F_c 为磨粒所受法向载荷。两者关系近似为^[10]:

$$h_c = \left(\frac{1}{2 \tan \phi \sqrt{\tan^2 \phi + 2}} \times \frac{F_c}{H_v} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

横向裂纹深度 c_{li} 为^[10]:

$$c_{li} = 0.226 \left(\frac{E}{H_v} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{F_c}{H_v} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

这种去除模式下,切屑截面形状近似为半圆形,切屑截面积 S_c 为:

$$S_c = \frac{1}{2} \pi c_{li}^2 = \frac{0.16 E \tan \phi \sqrt{\tan^2 \phi + 2}}{H_v} h_c^2. \quad (7)$$

2.2 研磨垫表面磨粒分布特征

在研究固结磨料研磨垫表面磨粒数量的过程中,可以通过晶胞理论来理解磨粒在基体中的分布,这里选择体心立方结构^[11],如图 2 所示。

固结磨料研磨垫制造过程中,磨粒均匀分散在结合剂中,因此,磨粒在结合剂层中服从均匀分布的说法被广泛应用在固结磨料研磨的理论研究中。本文同样采用均匀分布进行后续计算。

根据定量金相学可知,磨粒在晶胞模型中的

质量分数与整个研磨垫磨料层中磨粒的质量分数相等,可以表示为:

$$C = \frac{M}{V}, \quad (8)$$

式中: C 表示磨料层中磨粒的质量分数, M 表示晶胞模型中磨粒质量, V 表示晶胞模型体积。

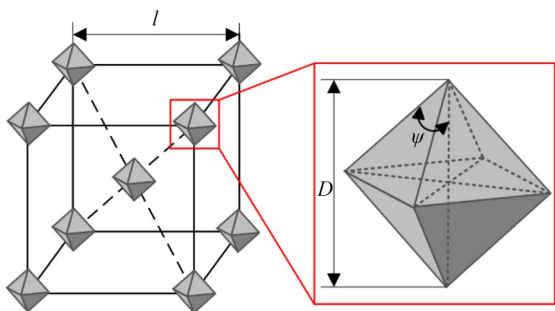


图2 磨粒晶胞模型

Fig. 2 Abrasive unit cell model

由图2可得,一个晶胞中 M 与 V 可以表示为:

$$\begin{aligned} M &= \frac{\rho D^3}{3}, \\ V &= l^3, \end{aligned} \quad (9)$$

式中: ρ 表示磨粒密度, l 表示晶胞边长。

将式(9)代入式(8)可得晶胞模型边长:

$$l = \sqrt[3]{\frac{\rho}{3C}} D. \quad (10)$$

研磨垫表面形貌如图3所示,由均匀分布的小圆柱磨粒块组成,磨粒块半径为 r ,厚度为 H ,相邻两磨粒块圆心之间的距离为 s 。由于磨粒在晶胞中的体积分数等于在磨粒块中的体积分数,则一个磨粒块内磨粒的总个数 N_t 为:

$$N_t = \frac{2\pi r^2 H}{l^3}. \quad (11)$$

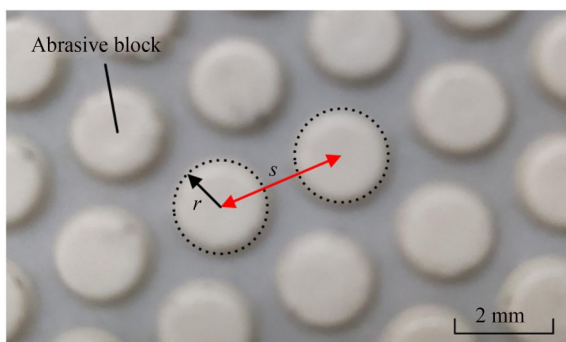


图3 研磨垫表面形貌

Fig. 3 Surface morphology of fixed abrasive pad

则磨粒块中单位高度的磨粒数为:

$$N_s = \frac{N_t}{H}. \quad (12)$$

假设磨粒在基体中出露高度大于 $D/2$ 时脱落,则一个磨粒块表面磨粒总数 N_i 可以表示为:

$$N_i = N_s \frac{D}{2}. \quad (13)$$

根据式(10)~式(13),一个磨粒块中的出露磨粒数 N_i 可表示为:

$$N_i = \frac{3C\pi r^2}{\rho D^2}. \quad (14)$$

根据图3计算出的研磨垫表面磨粒块分布密度 η 可以表示为:

$$\eta = \frac{2\pi r^2}{\sqrt{3} s^2}. \quad (15)$$

若晶片面积为 S_w ,则接触域内磨粒总数 N_z 可以表示为:

$$N_z = \frac{2\sqrt{3} \pi r^2 C S_w}{\rho S^2 D^2}. \quad (16)$$

2.3 磨粒切入深度计算

晶片与磨粒接触的微观结构如图4所示。施加载荷后,晶片表面与研磨垫表面之间具有一定的间隙,用 d 表示,磨粒出露高度用 ϵ 表示,磨粒切入晶片的深度用 h 表示,由几何关系可得:

$$\epsilon = h + d. \quad (17)$$

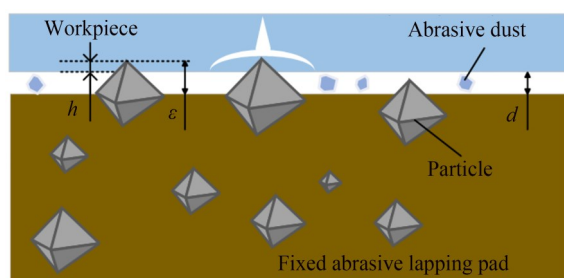


图4 磨粒与晶片接触微观形貌

Fig. 4 Micro contact morphology between fixed abrasive lapping pad and workpiece

根据前文假设磨粒在研磨垫表面的出露高度服从均匀分布,且出露高度大于 $D/2$ 时脱落,则出露高度 ϵ 服从 $(0, D/2)$ 的均匀分布^[12],出露高度为:

$$\phi_{(\epsilon)} = \begin{cases} 2/D & 0 < \epsilon < D/2 \\ 0 & D/2 < \epsilon \end{cases}. \quad (18)$$

根据力平衡原理可知,研磨压力 F 等于有效磨粒所承载荷之和:

$$F = \int_d^{d+D_c} F_d N_z \phi_{(\epsilon)} d\epsilon + \int_{d+D_c}^{D/2} F_c N_z \phi_{(\epsilon)} d\epsilon.$$

(19)

将式(7)、式(8)、式(17)和式(18)带入到力平衡方程式(19)中,可以得到:

$$d = \frac{D}{2} - \sqrt[3]{D_c^3 + \frac{3FD - 4H_v N_z D_c^3}{4\sqrt{3} H_v N_z}}.$$

(20)

将式(20)带入式(17)得到磨粒切入深度:

$$h = \epsilon - \left(\frac{D}{2} - \sqrt[3]{D_c^3 + \frac{3FD - 4H_v N_z D_c^3}{4\sqrt{3} H_v N_z}} \right).$$

(21)

从式(21)中可以看出,切入深度与磨料粒度、施加载荷、晶片硬度以及磨粒出露高度等参数有关。利用 MATLAB 仿真软件对研磨垫上磨粒进行模拟,各磨粒的切入深度如图 5 所示。

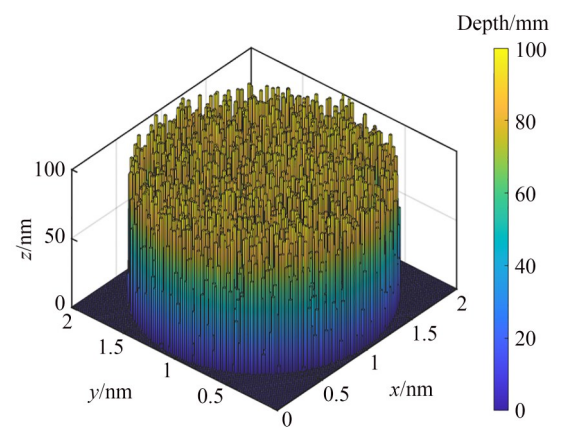


图5 磨粒切入深度
Fig.5 Penetration depth of abrasive

3 固结磨料研磨材料去除均匀性

为了建立考虑磨粒三维微切削的钽酸锂晶片去除均匀性模型,本文计算了研磨垫上各磨粒的切入深度,在此基础上需要研究磨粒在晶片表面的轨迹分布,从而计算出晶片表面不同位置处的材料去除量,最终才能模拟出材料去除均匀性。

3.1 固结磨粒的运动轨迹

磨粒与晶片之间的相对运动是实现研磨的必要条件之一,通过两者之间的相对运动才能实

现磨粒滑擦、切削等,从而达到材料去除的目的。根据以往的研究发现,研磨过程中运动参数对加工质量的影响最大,磨粒轨迹分布均匀性会影响晶片加工表面的平整度、纹理方向以及表面完整性。研究研磨过程中,磨粒轨迹的分布规律对保证晶片表面材料去除均匀性具有重要的意义^[13]。

表 1 森永 ED9B-10L-3M 双面研磨机的具体参数

Tab.1 Specific parameters of MoriNaga ED9B-10L-3M double-sided lapping machine

Parameter	Value
Speed of lower plate $\omega_p/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	0~45
Speed of sun wheel $\omega_1/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	0~20
Speed of gear ring $\omega_3/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	0~16
Number of teeth of sun wheel Z_1	98
Number of teeth of planetary wheel Z_2	108
Number of teeth of gear ring Z_3	314

相较于以往采用单磨粒研究轨迹分布均匀性的方法,本文采用更接近实际情况的多磨粒对轨迹分布均匀性进行仿真,建立更完善的材料去除均匀性模型,从而实现更均匀的材料去除。

加工设备为森永 9B 双面研磨机,型号为 ED9B-10L-3M,具体参数如表 1 所示。双面研磨运动示意图如图 6 所示。坐标系 $X_1O_1Y_1$ 的原点设在研磨盘中心,坐标系 $X_2O_2Y_2$ 的原点设在晶片中心,随着行星轮运动。

根据齿轮啮合可以得到行星轮自转 ω_n 、公转

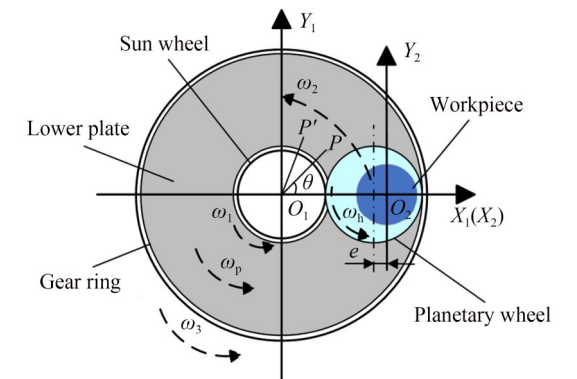


图6 双面研磨运动示意图
Fig.6 Schematic diagram of double-sided lapping movement

ω_2 与太阳轮转速 ω_1 、齿圈转速 ω_3 之间的关系,表示为:

$$\begin{aligned}\omega_h &= \frac{Z_1\omega_1 + Z_3\omega_3}{Z_1 + Z_3} \\ \omega_2 &= \frac{Z_3\omega_3 - Z_1\omega_1}{Z_3 - Z_1}\end{aligned}\quad (22)$$

根据坐标变换可以得到研磨垫上一点 P 在晶片上的轨迹方程:

$$\begin{aligned}X_p &= R_p \cos((\omega_p - \omega_h - \omega_2)t + \theta) - L \cos(\omega_h t) - e \\ Y_p &= R_p \sin((\omega_p - \omega_h - \omega_2)t + \theta) + L \sin(\omega_h t)\end{aligned}\quad (23)$$

式中: R_p 表示研磨垫上一点 P 到 O_1 的距离, ω_p 表示研磨盘转速, L 等于太阳轮与行星轮半径之和,为定值, e 表示晶片中心偏离行星轮中心的距离。考虑到加工效率,一个行星轮中放置两个晶片,同时考虑到行星轮的刚度,选择偏心距 e 为55 mm。由于 ω_h, ω_2 可以用 ω_1, ω_3 表示,所以轨迹仅与 $R_p, t, \omega_1, \omega_3, \omega_p$ 有关。为方便后续的研究,定义转速比为 $m = \omega_3/\omega_1, n = \omega_p/\omega_1$,根据Sahab等^[14]的研究发现,在太阳轮转速大于齿圈转速的模式下研磨效果更好,因此 m 取值小于1,这与机床设置的最大转速相符;同时考虑到加工效率以及稳定性,研磨盘转速一般大于太阳轮转速,因此 n 的取值大于1。

3.2 晶片不同位置材料去除量统计方法

以往的轨迹仿真大多把磨粒看成是质点,而实际上各磨粒的切削形式与切入深度并不相同,考虑这些因素的仿真更接近实际情况。由上文可知,在恒定压力的作用下支撑高度保持不变,因此,不同出露高度的磨粒切入深度与切屑截面积不同。这里磨粒的确定不同于以往看作质点的只有 XY 两个数据的平面坐标,而是额外增加一个 Z 坐标作为磨粒的出露高度。

为了研究晶片表面不同位置处的材料去除量,需要将晶片划分为不同部分,分别计算不同部分的材料去除量。常用方法是将晶片离散化,离散化过程如图7所示,用 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的小方格将工件表面划分为不同的部分,分别计算不同小方格内的材料去除量,由于边缘部分不是严格的正方形,这些数据会带来较大的误差,因此在计算过程中将边缘部分舍弃。

假设第 k 颗磨粒的切屑截面积为 S_k ,在第 i 个小方格内的轨迹长度为 $L_k(i)$,则该磨粒在此小方

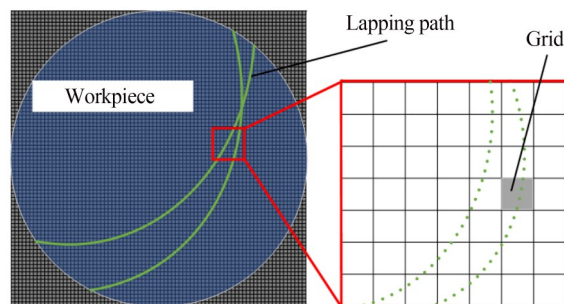


图7 晶片离散化示意图

Fig. 7 Schematic diagram of wafer discretization

格内的材料去除体积 V_i 可以表示为:

$$V_i = S_k L_k(i). \quad (24)$$

为了计算出磨粒在不同小方格内的轨迹长度,常用的处理方法是将研磨轨迹进行离散,用切削次数近似表征轨迹长度,转化过程如图7所示。以 $X_k(i)$ 表示第 k 颗磨粒在第 i 个小方格内的切削次数,则 $X_k(i)$ 近似正比于 $L_k(i)$,即:

$$X_k(i) \propto L_k(i). \quad (25)$$

当切入深度已知时,可以通过式(4)和式(7)计算出各磨粒的切屑截面积,随后将第 i 个小方格内的材料去除体积 V_i 转化为以切削次数表示的材料去除量 z_i 。

根据式(25)对式(24)进行转化,从而可以使用MATLAB处理材料去除量,通过统计每个小方格内切削次数的方法间接表示该区域内的材料去除体积。通过转化,以 N 表示磨粒数目,则第 i 个小方格内的材料总去除量 Z_i 可以表示为:

$$Z_i = \sum_{k=1}^N z_i = \sum_{k=1}^N S_k X_k(i). \quad (26)$$

3.3 转速比对材料去除均匀性的影响

根据以往对磨粒轨迹的研究发现,仅改变转速而转速比不变时,磨粒轨迹分布相同,因此,本研究通过改变转速比 m, n 研究其对材料去除均匀性的影响,从而优化转速,实现更均匀的材料去除。

在磨粒材料去除模拟中,选取少量磨粒进行模拟的结果是不准确的,而选取实际百万级的磨粒数目进行模拟是不现实的,这里选取10 000颗具有前文建立的研磨垫表面实际磨粒分布特征的磨粒进行模拟,设置相应的单步仿真时间间隔为1 ms。

为了描述材料去除的均匀程度,定义材料去

除均匀性系数CTD为:

$$CTD=\frac{1}{u}\sqrt{\frac{1}{S-1}\sum_{i=1}^S(Z_i-u)^2},\tag{27}$$

其中: u 表示全部小方格内的材料去除量均值, S 表示划分的小方格数目。根据定义,CTD越小表示划分的小网格内的切削次数越接近,即晶片表面材料去除越均匀。

仿真过程中,首先应当判断磨粒的出露高度,根据不同的材料去除形式选择合适的切屑截面积计算公式,并转化为在晶片不同小方格内的切削次数,最后计算所有磨粒在不同小方格内的切削次数总和。模型建立流程如图8所示,其他参数如表2所示。

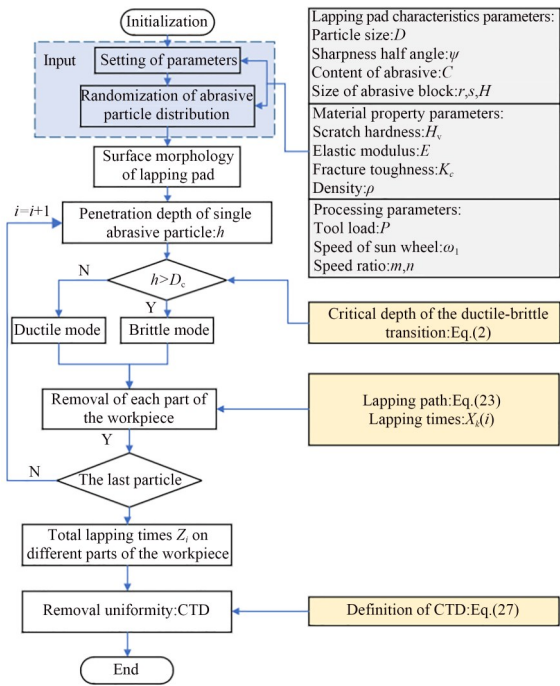


图8 CTD计算流程
Fig. 8 CTD calculation process

表 2 实验参数

Tab. 2 Experimental parameters			
Parameter	Value	Parameter	Value
ρ	3.5 g/cm ³	s	5.3 mm
D	4 μm	C	0.5 g/cm ³
ψ	45°	H_v	11.2 GPa
r	1.9 mm	E	222.4 GPa
H	1.5 mm	S_w	81 cm ²

根据前文建立的模型,通过改变转速比 m,n 可以得到CTD随 m,n 的变化,仿真结果如表3所示。对表3数据进行拟合,得到CTD随 m,n 的变化情况,如图9所示。由图9可以看出,当 m 在0.85, n 在1.3附近时均匀性最好,此时均匀性系数CTD=0.130 0。

表 3 不同 m,n 下的CTD
Tab. 3 CTD at different m and n

m	n	CTD	m	n	CTD
0.6	1.0	0.143 3	0.8	1.9	0.154 7
0.6	1.3	0.159 9	0.8	2.2	0.155 7
0.6	1.6	0.171 7	0.9	1.0	0.200 9
0.6	1.9	0.153 4	0.9	1.3	0.135 4
0.6	2.2	0.156 3	0.9	1.6	0.147 2
0.7	1.0	0.141 8	0.9	1.9	0.154 6
0.7	1.3	0.142 9	0.9	2.2	0.154 6
0.7	1.6	0.152 9	1.0	1.0	0.214 6
0.7	1.9	0.155 7	1.0	1.3	0.182 8
0.7	2.2	0.152 1	1.0	1.6	0.140 8
0.8	1.0	0.157 7	1.0	1.9	0.132 9
0.8	1.3	0.132 2	1.0	2.2	0.139 9
0.8	1.6	0.140 4			

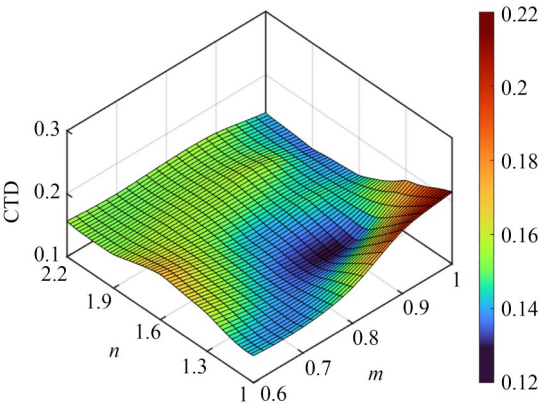


图9 CTD随 m,n 的变化规律
Fig. 9 Variation law of CTD with m and n

当 m 为0.85不变时,CTD随 n 的变化规律如图10所示。从图中可以看出,在 n 从1.0逐渐增加到2.2的过程中,CTD先减小后增加,并且 n 为1.0时最大, n 为1.3时最小。

当 n 为1.3不变时,CTD随 m 的变化规律如图11所示。从图中可以看出,在 m 从0.6逐渐增

加到 1.0 的过程中,CTD 先减小后增加,并且 m 为 1.0 时最大, m 为 0.85 时最小。

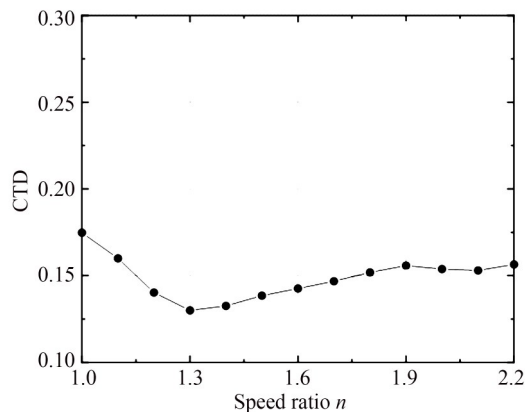


图 10 CTD 随 n 的变化规律

Fig. 10 Variation law of CTD with n

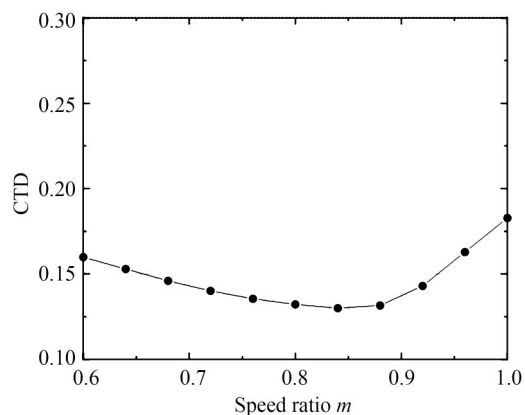


图 11 CTD 随 m 的变化规律

Fig. 11 Variation of CTD with m

4 实验与结果分析

磨粒在晶片表面的轨迹分布均匀性以及切入晶片的深度会直接决定加工后晶片的表面质量,磨粒轨迹分布的均匀性程度会导致晶片不同位置的材料去除量不同,进而影响研磨后晶片的平面度。实验的主要目的是确定晶片的材料去除均匀性,并与仿真得到的均匀性系数 CTD 进行比较,验证模型的准确性。实验在浙江森永光电设备有限公司的 ED9B-10L-3M 双面研磨机上进行,实验工件为 4 英寸 Y-36° 的钽酸锂晶片。

TTV 采用成都泰美克晶体技术有限公司自研的手动晶片测试装置进行测量。实验装置如

图 12 所示。根据 3.3 节可以得到转速比 m, n 会影响加工面形,保持压强为 6 kPa, ω_1 为 $8 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 不变,其他实验参数如表 2 所示。模型验证中, $m=0.85$ 时, n 分别取 1.0, 1.3, 1.6, 1.9, 2.2; $n=1.3$ 时, m 分别取 0.55, 0.65, 0.75, 0.85, 0.95。

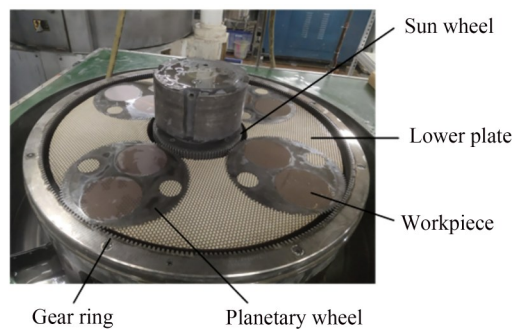
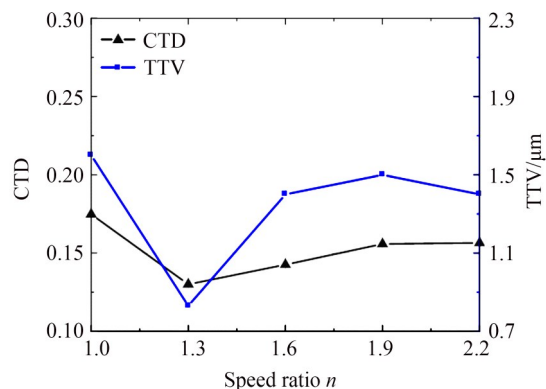


图 12 固结磨料研磨装置

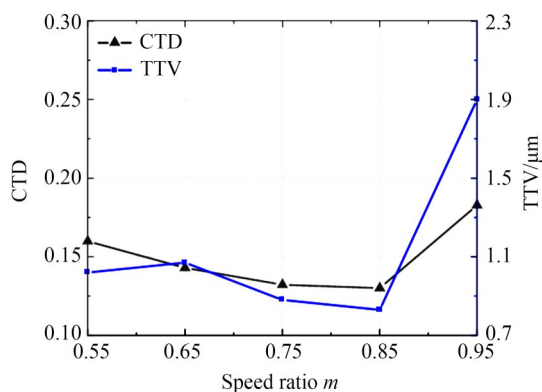
Fig. 12 Consolidated abrasive lapping devices

由于均匀性系数 CTD 越小,材料去除越均匀,加工后晶片的 TTV 越小。为了分析转速比对材料去除均匀性的影响规律,绘制了 TTV 与 CTD 随转速比的变化曲线,如图 13 所示。

从图 13 可以看出,仿真得到的 CTD 与实验得到的 TTV 的变化趋势相似,验证了材料去除均匀性模型的正确性。仿真值与实验值之间的误差可能来自于研磨垫的不均匀磨损,以及研磨垫表面的“退让”,模型建立过程中并没有考虑此因素对材料去除均匀性的影响。根据此模型进行加工,当转速比 $m=0.85, n=1.3$ 时晶片的 TTV 仅为 $0.83 \mu\text{m}$ 。



(a) CTD 与 TTV 随转速比 n 的变化规律
(a) Variation of CTD and TTV with n



(b) CTD与TTV随转速比 m 的变化规律
(b) Variation of CTD and TTV with m

图 13 CTD与TTV随转速比 m, n 的变化规律

Fig. 13 Variation of CTD and TTV with m and n

5 结 论

本文针对钽酸锂固结磨料双面研磨工艺,建立了考虑磨粒三维微切削的材料去除均匀性模

型。考虑材料去除机理与研磨垫表面磨粒出露特征,采用接触力学和MATLAB数值仿真方法,得到了研磨过程中齿圈与太阳轮转速比 m 、齿圈与下研磨盘转速比 n 对材料去除均匀性的影响规律。保持压强为6 kPa, ω_1 为 $8 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 不变,通过改变转速比 m, n 对建立的模型进行了实验验证。实验结果表明:研磨过程中的转速比对材料去除均匀性有较大的影响,当转速比 m 为0.85, n 从1.0增加到2.2的过程中,材料去除均匀性先变好后变坏,当 n 为1.3时材料去除最均匀;当转速比 n 为1.3, m 从0.55增加到0.95的过程中,材料去除均匀性同样为先变好后变坏,当 m 为0.85时材料去除最均匀。即当 m 为0.85, n 为1.3时材料去除最均匀,研磨后晶片平面度最好,与模拟结果相同。按照此工艺参数进行加工,加工后晶片的TTV仅为 $0.83 \mu\text{m}$,满足钽酸锂晶片的精密研磨要求,为后续抛光奠定基础,研究结果对钽酸锂双面研磨工艺具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 袁巨龙, 张韬杰, 杭伟, 等. 基于固结磨料盘的钽酸锂高效研磨加工试验研究[J]. 表面技术, 2019, 48(10): 349-354, 371.
YUAN J L, ZHANG T J, HANG W, et al. Experimental research on high efficiency lapping machining of lithium tantalate based on fixed abrasive pad[J]. *Surface Technology*, 2019, 48(10): 349-354, 371. (in Chinese)
- [2] 盛鑫, 朱永伟, 任闯, 等. 固结硅基聚集体金刚石磨料垫的研磨性能[J]. 光学精密工程, 2023, 31(6): 839-848.
SHENG X, ZHU Y W, REN CH, et al. Lapping performance of fixed silicon-based agglomerated diamond abrasive pad[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(6): 839-848. (in Chinese)
- [3] 杨金双, 朱祥龙. 行星式双面研磨轨迹均匀性研究[J]. 机械研究与应用, 2015, 28(6): 41-43.
YANG J SH, ZHU X L. Research on uniformity of trajectory in planetary double-side lapping process[J]. *Mechanical Research & Application*, 2015, 28(6): 41-43. (in Chinese)
- [4] WANG L J, HU Z W, FANG C F, et al. Study on the double-sided grinding of sapphire substrates with the trajectory method[J]. *Precision Engineering*, 2018, 51: 308-318.
- [5] 徐雳, 刘冰, 吴石, 等. 双面研磨/抛光机磨削轨迹研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2018, 23(4): 43-50.
XU L, LIU B, WU SH, et al. Double-sided lapping/polishing machine grinding trajectory studies[J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2018, 23(4): 43-50. (in Chinese)
- [6] ZHANG P, YANG J F, LI L. Trajectory uniformity of the double-sided mechanical polishing of SiC single crystal substrate[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2020, 107: 104814.
- [7] PAN B, KANG R K, ZHU X, et al. Formation mechanism of concave and convex surface shapes in double-sided lapping[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2022, 309: 117749.
- [8] 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.
- [9] HUANG H, LAWN B R, COOK R F, et al. Critique of materials-based models of ductile machining in brittle solids[J]. *Journal of the American Ceram-*

- ic Society*, 2020, 103(11): 6096-6100.
- [10] 贾琦璿, 朱祥龙, 杨垒, 等. 固结磨料研磨石英晶片材料去除率建模与试验研究[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(16): 2362-2371.
- JIA Y F, ZHU X L, YANG L, *et al.* Modeling and experimental study on material removal rate of quartz wafer by fixed abrasive lapping [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(16): 2362-2371. (in Chinese)
- [11] LIU P F, LIN B, YAN S, *et al.* Numerical simulation and experimental validation of fixed abrasive grinding pad topography [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 83(5): 1253-1264.
- [12] WANG X, ZHANG X J. Theoretical study on removal rate and surface roughness in grinding a RB-SiC mirror with a fixed abrasive [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(5): 904-910.
- [13] 明子航. 弹性基体磨具磨抛加工轨迹与表面质量研究[D]. 西安: 长安大学, 2023.
- MING Z H. *Study on Grinding Track and Surface Quality of Elastic Matrix Abrasive Tools* [D]. Xi'an: Changan University, 2023. (in Chinese)
- [14] ABDUL R M S, NOR H S, AMIRUL A R. Effect of double-sided process parameters in lapping silicon wafer [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 393: 259-263.

作者简介:



薛赛赛(1995—),男,河南商丘人,硕士研究生,2021年于大连理工大学获得学士学位,主要从事晶体材料研磨抛光加工的研究。E-mail: 1121176472@qq.com