

文章编号 1004-924X(2023)16-2362-10

固结磨料研磨石英晶片材料去除率 建模与试验研究

贾珣璠, 朱祥龙, 杨 垒, 康仁科*, 董志刚

(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:针对固结磨料研磨石英晶片材料去除率难以预测的问题,提出一种基于接触力学和广义回归神经网络(GRNN)的石英晶片材料去除率模型。首先根据脆/塑材料去除机理、磨粒块与晶片微观接触简化形式,采用微积分、力平衡原理等方法,建立了理想情况下的材料去除率模型。然后采用微单元法,进行了三因素四水平正交试验,并通过GRNN分析研磨液流量、研磨液浓度、研磨盘转速与材料去除率修正系数的映射关系,进一步完善了材料去除率模型。最后为验证材料去除率模型,设定研磨盘转速为20 r/min,研磨液浓度为5 wt. %,研磨液流量为36 ml/min,仿真并测量不同研磨压强以及相对速度下,晶片材料去除率预测值与实际值。结果表明:研磨压强和相对速度的增加使晶片材料去除加快,材料去除率模型预测值与实际值变化趋势相同,模型误差为8.57%。材料去除率模型基本满足固结磨料研磨工艺中石英晶片材料去除率预测需求。

关 键 词: 固结磨料研磨; 石英晶片; 材料去除率; 广义回归神经网络

中图分类号: TH161+.1; TG73 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233116.2362

Modeling and experimental study on material removal rate of quartz wafer by fixed abrasive lapping

JIA Yufan, ZHU Xianglong, YANG Lei, KANG Renke*, DONG Zhigang

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

* Corresponding author, E-mail: kangrk@dlut.edu.cn

Abstract: The material removal rate of a quartz wafer by fixed abrasive lapping is difficult to predict; therefore, a model of the material removal rate based on contact mechanics and a generalized regression neural network (GRNN) is proposed. First, according to the ductile - brittle material removal mechanism and the simplified form of micro-contact between the abrasive block and wafer, an ideal material removal rate model was established by using calculus and the force balance principle. Then, a three-factor four-level orthogonal test was performed using the microelement method. The mapping relationship of the lapping fluid flow, lapping fluid concentration, lapping disk speed, and material removal rate correction coefficient was analyzed using the GRNN. The material removal rate model was further improved. Finally, to validate the material removal rate model, a lapping experiment was conducted. The lapping disk speed was set to 20 r/min, lapping fluid concentration to 5 wt. %, and lapping fluid flow rate to 36 ml/min. The pre-

收稿日期: 2023-03-08; 修订日期: 2023-04-08.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. U22A20198)

dicted and actual values of the wafer material removal rate were simulated and measured under different lapping pressures and relative velocities. It was found that the increase in lapping pressure and relative velocity accelerates the removal of the wafer material. The predicted value of the material removal rate model exhibited the same trend as the actual value, and the error of model was 8.57%. The material removal rate model meets the demand for predicting the material removal rate of quartz wafers in fixed abrasive lapping.

Key words: fixed abrasive lapping; quartz wafer; material removal rate; generalized regression neural network

1 引言

石英晶片由于其特殊的物理、化学特性被广泛应用于航天航空、激光装备、传感器、信息通讯等领域^[1],已成为世界上用量最大的光学材料之一。石英晶体硬度高、脆性大、化学性能稳定是典型的难加工材料。固结磨料研磨技术作为一种精密加工方法,具有研磨效率高、研磨效果好的优点^[2],因而逐渐受到人们关注。研磨加工时,硬磨粒固结在研磨垫上,在外加载荷作用下,磨粒会在晶片表面切入一定深度,同时研磨垫与晶片相对运动,磨粒在晶片表面产生微切削作用,使晶片材料被去除,材料去除率是衡量研磨效率和质量的重要指标。研磨过程工况复杂,加工参数繁多,晶片材料去除率受多个因素影响,为解决材料去除率难以预测的问题,亟需建立石英晶片材料去除率预测模型,以指导加工生产,实现晶片的高效高质研磨。

固结磨料研磨技术是通过单磨粒嵌入,以两体微切削作用,实现材料去除的。许多学者研究晶片材料去除机理,并建立材料去除率模型。如Wang^[3]等通过分析单磨粒在碳化硅表面切深和材料去除率关系,建立固结磨料研磨碳化硅的材料去除率方程;Dong^[4]等基于脆塑性去除机理,建立碳化硅和熔融石英材料去除模型,但未考虑磨粒分布、磨粒浓度对材料去除的影响;Ren^[5]等根据抛光垫的表面形貌建立抛光材料去除率模型,预测了在不同抛光垫状态下晶片的材料去除率;林彬^[6]等基于塑性去除机理建立了单点研磨去除深度模型,提出计算机控制光学表面成型技术(Computer Controlled Optical Surface, CCOS)的确定性加工方法;Wang^[7]等根据单晶尖晶石和多晶尖晶石材料特性,分别建立了固结单磨粒平

均切削深度方程。Lin^[8]等采用CCOS技术加工石英玻璃,发现玻璃表面脆性和塑性去除并存现象,成功建立了表面轮廓模型,预测了材料去除率。实际研磨过程中,石英晶片表面塑性去除和脆性去除并存^[9],而非单一去除形式,而且上述模型也无法解释研磨液对材料去除率的影响,因此,仅通过去除机理推导得到的材料去除率模型很难直接应用于固结磨料研磨过程。

还有很多学者进行大量试验,研究工艺参数对材料去除率的影响,通过实验数据来拟合材料去除率方程。王占奎^[10]等采用Box-Behnken实验设计方法,建立了工艺参数对材料去除率响应分析模型,得到石英玻璃材料去除率回归方程;黄传锦^[11]等探索了不同研磨液在研磨过程中的作用机理,并分析研磨转速、压强与氧化镓晶体研磨材料去除率之间映射关系;李军^[12]等考虑研磨液浓度对固结磨料研磨垫加工性能的影响,研究不同三乙醇胺浓度下石英晶体固结磨料研磨过程的材料去除率。材料去除率工艺参数繁多,采用试验方法无法全面考虑影响因素,也将消耗大量人力、物力,并且仅采用实验数据拟合的模型也不具有广泛适用性。

为缓解上述问题,有必要结合去除机理与试验数据,充分研究相对速度、研磨压强、研磨垫参数、研磨液参数对石英晶片材料去除率的影响,建立更精确的材料去除模型,来指导晶片的高效高质研磨加工。

在本文中,基于接触力学和广义回归神经网络(Generalized Regression Neural Network, GRNN)建立石英晶片固结磨料研磨材料去除率模型。根据磨粒分布均匀假设、脆塑性去除机理、磨粒块与晶片微观接触简化形式,采用微积分、力平衡原理等方法,分析出露单磨粒的受

力和材料去除情况,建立理想情况下的材料去除率模型。采用微单元研磨方法,进行三因素四水平正交试验,并通过 GRNN 分析研磨液流量、研磨液浓度、研磨盘转速与材料去除率修正系数的映射关系,进一步完善材料去除率模型。

2 固结磨料研磨材料去除率模型

2.1 磨粒分布情况

固结磨料研磨是研磨垫表面磨粒在晶片表面不断划擦、耕犁的过程。假设金刚石磨粒均为两个同底正四棱锥上下拼接而成,磨粒的十二条棱边均相等,上下两顶点之间距离表征磨粒粒径 D ,磨粒半锥角为 β ,单颗金刚石磨粒体积为:

$$V = \frac{D^3}{6}. \quad (1)$$

磨粒块中磨粒粒径呈正态分布,粒径均值为 $\bar{D}$,标准差为 σ ,根据正态分布 3 sigma 原则可知,磨粒粒径 D 的取值区间为 $(\bar{D} - 3\sigma, \bar{D} + 3\sigma)$,分布函数可表示为:

$$f(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(D-\bar{D})^2}{2\sigma^2}}. \quad (2)$$

如图 1 所示,研磨垫表面由均匀分布的圆柱形磨粒块组成,磨粒块半径为 r ,厚度为 l ,相邻两个磨粒块圆心之间距离均为 g 。

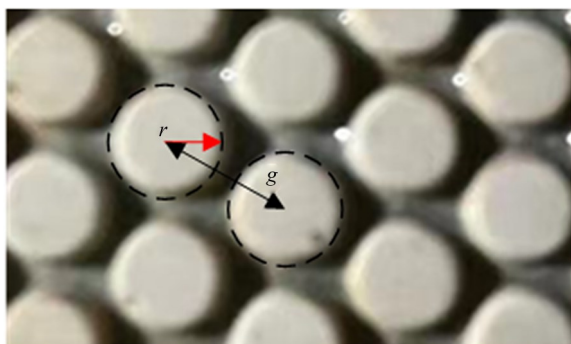


图 1 固结磨料研磨垫表面形貌

Fig. 1 Surface morphology of fixed abrasive lapping pad

当晶片面积为 S 时,实际与磨粒块的接触区域面积为 S_l 可写为:

$$S_l = S \cdot \frac{2\pi r^2}{\sqrt{3} g^2}. \quad (3)$$

磨粒块中金刚石磨粒含量用 ω (单位体积内

金刚石磨粒质量)来表示, ω 可以写成式(4):

$$\omega = \frac{m_{s-c}}{S_l l}, \quad (4)$$

其中: m_{s-c} 为与晶片接触的磨粒块中金刚石磨粒的总质量,等于所有磨粒质量相加,可用晶片接触的磨粒块中金刚石磨粒数量 N_z 和金刚石磨粒密度 ρ_c 表示为:

$$m_{s-c} = \rho_c \cdot N_z \int_{\bar{D}-3\sigma}^{\bar{D}+3\sigma} V_D f(D) dD. \quad (5)$$

通过式(1)~(5),可计算 N_z 为:

$$N_z = \frac{4\sqrt{3} S l \omega \pi r^2}{g^2 \rho_c \cdot (3\sigma^2 \bar{D} + \bar{D}^3)}. \quad (6)$$

磨粒块中磨粒呈空间均匀分布,因此磨粒块任意高度下磨粒数量相同均为 N_z/l ,但当露出高度大于 $D/3$ 时,树脂基体对磨粒把持力较小,易使磨粒在切向力作用下脱落,当磨粒粒径标准差较小时,磨粒出露高度 ϵ 的概率密度分布函数约为:

$$\phi(\epsilon) = \begin{cases} \frac{1}{l}, & \bar{D}/3 > \epsilon > 0 \\ 0, & \epsilon > \bar{D}/3 \end{cases}. \quad (7)$$

2.2 材料去除机理

如图 2 所示,磨粒与硬脆晶片之间的机械去除形式分为两种:脆性去除和塑性去除。磨粒切削深度大于临界切深时,切削类型由塑性切削转变为脆性切削。临界切深仅与材料本身特性有关。临界切深 h_c 可用材料断裂韧性 K_{IC} 、材料硬度 H_v 、材料弹性模量 E 表示:

$$h_c = 0.15 \left(\frac{E}{H_v} \right) \left(\frac{K_{IC}}{H_v} \right)^2. \quad (8)$$

如图 2(a) 所示,当磨粒切深大于临界切深时,晶片处于脆性去除阶段^[13]。磨粒接触点的晶

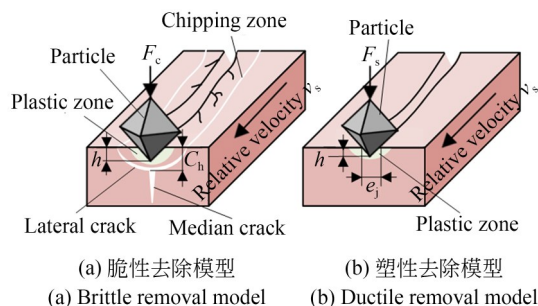


图 2 材料去除示意图

Fig. 2 Framework of material removal model

片材料形成近似于半球形塑性变形区,塑性变形区外是弹性区,当磨粒划过该加工区时,该区域卸载。弹性区变形恢复,塑性区材料受到挤压。当弹/塑边界上的拉应力大于材料强度极限时,在压痕界面上会出现弧状横向裂纹。

横向裂纹深度 C_h 为^[14]:

$$C_h = 0.226 \left(\frac{E}{H_v} \right)^{1/2} \left(\frac{F_c}{H_v} \right)^{1/2}, \quad (9)$$

其中: h 为磨粒压入深度, F_c 为磨粒所受法向载荷,两者之间近似计算公式为^[15]:

$$h = \left(\frac{1}{2 \tan \beta \sqrt{\tan^2 \beta + 2}} \cdot \frac{F_c}{H_v} \right)^{1/2}. \quad (10)$$

横向裂纹随着磨粒的离开而向材料表面进行扩展,从而形成切屑,实现脆性材料去除,横向裂纹截面近似半圆形,材料去除截面面积为:

$$S_{\text{area-c}} = \frac{1}{2} \pi C_h^2. \quad (11)$$

因此,在脆性 q 去除形式下,单位时间内单颗磨粒切削材料的质量 m_c 为:

$$m_c = \rho S_{\text{area-c}} v_s, \quad (12)$$

其中: ρ 为晶片密度, v_s 为磨粒与晶片之间的相对速度。

如图 2(b)所示,磨粒切深小于临界切深时,晶片表面去除形式为塑性去除,塑性切削公式为^[16]:

$$F_s = 2h^2 H_v. \quad (13)$$

此时材料去除截面近似三角形,塑性去除俯视如图 3 所示,截面边长 e_j :

$$e_j = 2h \cos \theta_a. \quad (14)$$

因磨粒切入的方向不同,截面边长也发生变化,切入角 θ_a 在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 范围内均匀分布,截面边

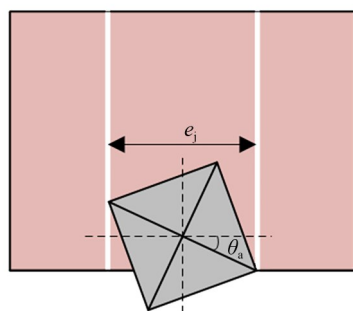


图 3 磨粒切削俯视图

Fig. 3 Top view of abrasive particle cutting

长均值为:

$$E(e_j) = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/4} 2h \cos \theta_a d\theta_a. \quad (15)$$

材料去除截面面积为:

$$S_{\text{area-s}} = \frac{hE(e_j)}{2}. \quad (16)$$

在塑性切削状态下,在单位时间内单颗磨粒切削材料的质量为:

$$m_s = \rho S_{\text{area-s}} v_s. \quad (17)$$

2.3 材料去除率建模

研磨过程中,石英晶片材料去除是研磨垫表面多磨粒共同作用的结果,研磨垫与晶片接触微观形貌如图 4 所示,在力 F 作用下,研磨垫基准面与晶片下表面基准面之间仍有一段距离,该距离为支撑高度 d 。压入深度为 h 的磨粒,其出露高度 ϵ 为:

$$\epsilon = h + d. \quad (18)$$

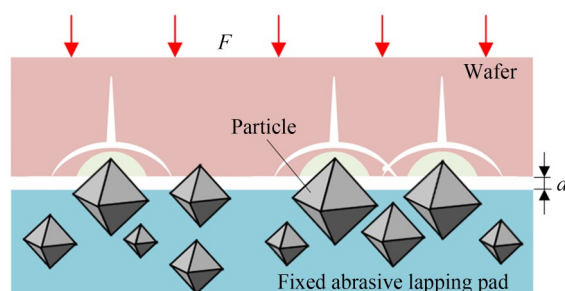


图 4 研磨垫与晶片微观接触形貌

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

根据力平衡原理可知,研磨压力 F 等于与晶片接触的各个磨粒所受载荷总和:

$$F = \int_{d+h_c}^{\bar{D}/3} F_c N_z \phi_{(\epsilon)} d\epsilon + \int_d^{d+h_c} F_s N_z \phi_{(\epsilon)} d\epsilon. \quad (19)$$

研磨压强为 P 时,研磨压力 F 为:

$$F = PS. \quad (20)$$

将式(6)~式(8)、式(10)、式(13)、式(18)和式(19)代入到平衡方程(20)中,可以计算得支撑高度 d 。将 d 代入式(9)~式(12)、式(14)~式(17)中可以得到理想状态下材料去除率为:

$$MRR_1 = \frac{\left(\int_{d+h_c}^{\bar{D}/3} m_c N_z \phi_{(\epsilon)} d\epsilon + \int_d^{d+h_c} m_s N_z \phi_{(\epsilon)} d\epsilon \right)}{S\rho}. \quad (21)$$

在使用式(21)对晶片进行材料去除率预测时发现,预测值与实际值之间有偏差,这是由于影响材料去除率的因素不仅包括研磨压强 P 、相对速度 v 、固结磨料研磨垫参数,还包括研磨液参数。

在研磨盘旋转的加工条件下,研磨液经研磨垫间隙分布在研磨垫表面,研磨液以去离子水做溶剂,不含磨粒,仅含有表面活性剂、微量氧化剂,持续滴加的研磨液会润滑晶片与磨粒之间的接触界面,带走研磨过程中产生的热量及材料磨屑,加快研磨垫的自修整^[12,17-18]。图5(a)是未使用研磨液时研磨垫的钝化过程,由于与晶片材料相互作用的磨粒不可避免地会产生磨损、钝化,材料去除率会降低,图5(b)是使用研磨液时研磨垫自修整过程,研磨垫中与研磨液接触域的树脂基体在氧化作用下会自行剥离,使钝化磨粒及时脱落,露出锋锐的新磨粒,因此使用研磨液后,会大大提高晶片的材料去除率、保持研磨垫长时间加工性能恒定,但研磨液对基体腐蚀作用不是越剧烈越好。如图5(c)所示,研磨液对树脂基体腐蚀速度太快会导致大量磨粒脱落为游离磨粒,产

生三体形式材料去除,这反而使晶片的材料去除率降低。

因此考虑研磨液参数对固结磨料研磨垫加工性能的影响,修正后的材料去除率方程为:

$$MRR = K \cdot MRR_1, \quad (22)$$

其中: K 为材料去除率修正系数,此处主要反映研磨液参数对材料去除率的影响。

3 材料去除率修正系数预测

3.1 GRNN神经网络

基于李军^[12]和王子琨^[18]等人的研究发现:研磨液浓度、研磨液流量将直接影响固结磨料研磨垫自修整性,而研磨盘转速是研磨液分布的重要因素,也会间接影响晶片的材料去除率。为了准确获得材料去除率修正系数 K 与研磨液浓度、研磨液流量和研磨盘转速之间的映射关系,采用神经网络算法对 K 值进行预测。GRNN是径向基神经网络的一种,具有强大的非线性映射能力和柔性网络结构^[19],在样本数据较少时,也能达到较好的预测效果。如图6所示,GRNN结构有四层,分别为输入层、模式层、求和层和输出层。

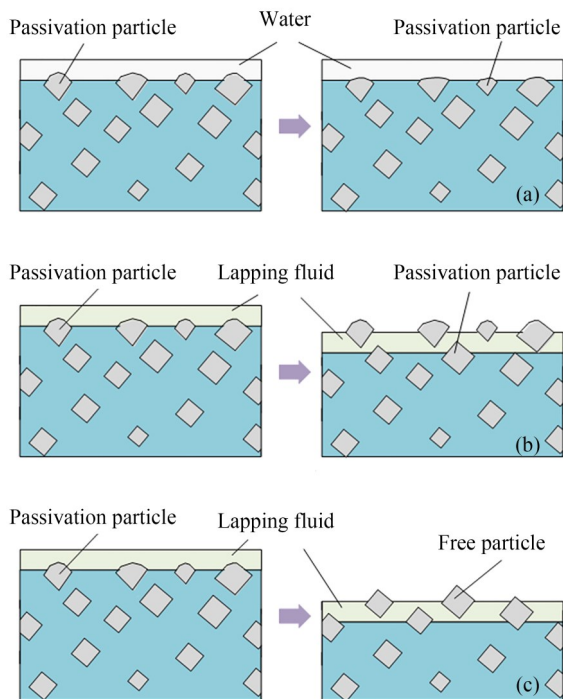


图5 固结磨料研磨垫自修整示意图

Fig. 5 Framework of self-sharpening of fixed abrasive pad

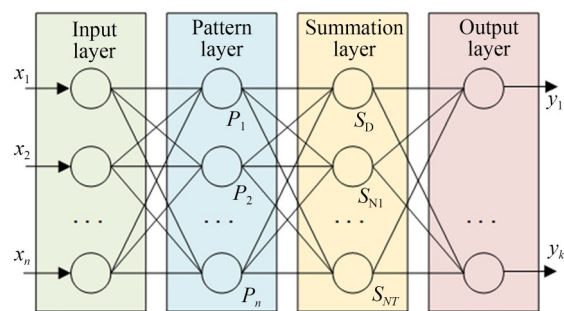


图6 GRNN神经网络架构

Fig. 6 GRNN neural network structure

网络输入 $X=[x_1, x_2, \dots, x_n]^T$,输出 $Y=[y_1, y_2, \dots, y_k]^T$ 。 n 为输入向量的维数, k 为输出样本维数。模式层神经元个数为 n ,传递函数为:

$$P_i = \exp \left[-\frac{(X - X_i)^T (X - X_i)}{2\sigma^2} \right], \quad (23)$$

其中: X 为模型的输入变量, X_i 为第 i 个神经元对应的输入学习样本, $i=1, 2, \dots, n$ 。

求和层传递函数有两种,一种如式(24),对模式层的输出进行算数求和,一种如式(25),对模式层输出进行加权求和,其中 $j=1,2,\cdots,k$ 。

$$S_D=\sum_{i=1}^n P_i,$$

(24)

$$S_{N_j}=\sum_{i=1}^n y_{ij} P_i.$$

(25)

输出层中神经元的个数为 k ,输出函数为:

$$y_j=\frac{S_{N_j}}{S_D}.$$

(26)

GRNN 模型中需要调整的参数仅有光滑因子 δ , δ 值越小,网络对样本数据逼近性越强, δ 值越大,网络逼近过程越光滑。

3.2 试验设计

设计试验研磨装置如图 7 所示,采用浙江森永光电设备有限公司的 ED9B-10L-3M 研磨机,在试验过程中,中心轮、齿圈转速均为 0,研磨盘转速为 n_p ,研磨盘上表面粘接有固结磨料研磨垫。采用加载块为晶片提供研磨压强,加载块底面尺寸为 $20\times 20\text{ mm}$ 。使用石蜡粘接法将石英晶片固定在加载块底面中心处,石英晶片尺寸为 $5\times 5\times 3\text{ mm}$,远大于晶片底面尺寸,因此石英晶片表面压强可视为均匀分布。

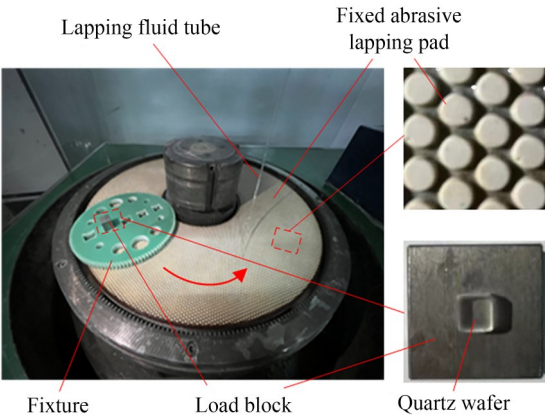


图 7 固结磨料研磨装置
Fig. 7 Fixed abrasive lapping equipment

加工时,固结磨料研磨垫与晶片运动状态如图 8 所示,将加载块放置在夹具中,加载块和晶片始终静止,研磨垫中心为 O_p ,晶片中心为 O ,设定偏心距 e 为 258 mm,石英晶片相对于固结磨料研磨垫的相对速度 v_r 为 $2\pi n_p e$ 。

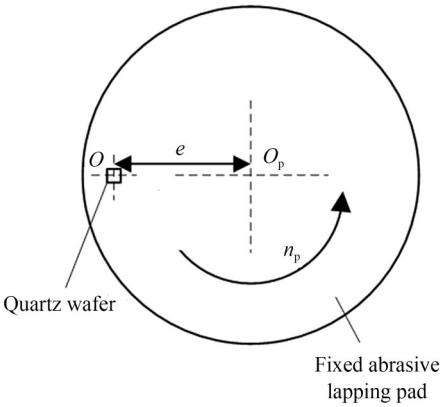


图 8 运动原理图
Fig. 8 Motion schematic diagram

试验中因素及水平对应表如表 1 所示。

表 1 因素及水平对应表

Tab. 1 Correspondence table of factor and level

Level	Concentration	Flow rate	Disc speed
	$f(\text{wt. \%})$	$c(\text{ml/min})$	$n_p(\text{r/min})$
1	0	12	10
2	3	24	20
3	6	36	30
4	9	48	40

使用德国赛多利斯(SARTORIUS)BS224S ($220\text{ g}/0.1\text{ mg}$)精密天平称取研磨前后石英晶片重量,研磨前后石英晶片重量差 Δm ,计算试验中材料去除率 MMR 为:

$$MMR=\frac{\Delta m}{S\rho}.$$

(27)

根据表 2 中参数计算材料去除率修正系数 K 值。

表 2 试验参数

Tab. 2 Parameters used in the test

Parameter	Value	Parameter	Value
ρ_c	3.52 g/cm^3	g	5.3 mm
$\bar{D}$	$9\text{ }\mu\text{m}$	ω	0.5 g/cm^3
σ	$9/12$	ρ	2.2 g/cm^3
β	45°	K_{IC}	$0.73\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$
r	1.9 mm	H_v	6.67 GPa
l	1.5 mm	E	72.5 GPa
P	48 kPa	S	25 mm^2

3.3 试验结果

每次研磨时间为 15 min,共进行 16 组试验,每组试验前需都采用修整轮对研磨垫修整 3 min,以保证加工初始研磨垫上磨粒出露情况一致。测量每组试验中石英晶片材料去除率,并根据式(22)计算得 K 值,试验结果如表 3 所示。

表 3 MMR 和 K 值试验结果
Tab. 3 MMR and K -value test results

No.	f	c	n_p	MMR($\mu\text{m}/\text{min}$)	K
1	1	1	1	13.01	0.128
2	1	2	2	28.62	0.141
3	1	3	3	47.11	0.154
4	1	4	4	65.68	0.161
5	2	1	2	48.31	0.237
6	2	2	1	25.39	0.250
7	2	3	4	86.51	0.213
8	2	4	3	69.41	0.227
9	3	1	3	59.50	0.195
10	3	2	4	85.99	0.211
11	3	3	1	23.49	0.231
12	3	4	2	42.79	0.210
13	4	1	4	57.96	0.142
14	4	2	3	55.73	0.183
15	4	3	2	35.02	0.172
16	4	4	1	13.47	0.132

3.4 网络训练及分析

使用表 3 中数据对 GRNN 进行训练时,将数据进行归一化处理,将上述试验数据随机分为训练集和验证集,为提高预测精度和训练速度,采用八折交叉验证方法,每次训练都随机取样,令 δ 以增量 0.01 在 $[0.01, 2]$ 内递增变化,以选取最佳 δ 值,采用平均绝对百分比误差 MAPE,作为评价模型准确性的指标。

$$\text{MAPE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{O_i - G_i}{O_i} \right| \times 100\%, \quad (28)$$

其中: N 为测试集样本个数, O_i 表示实际输出值,

G_i 表示预测值。八折交叉验证结果显示:MAPE 最小为 5.77%,此时 δ 值为 0.910,验证集为组 10,14。

4 模型验证试验与结果

将最佳 δ 值和最佳训练集代入 GRNN 中,获得三个工艺参数与材料去除率模型修正系数 K 的映射关系,进一步完善材料去除率模型,材料去除率计算步骤如图 9 所示:

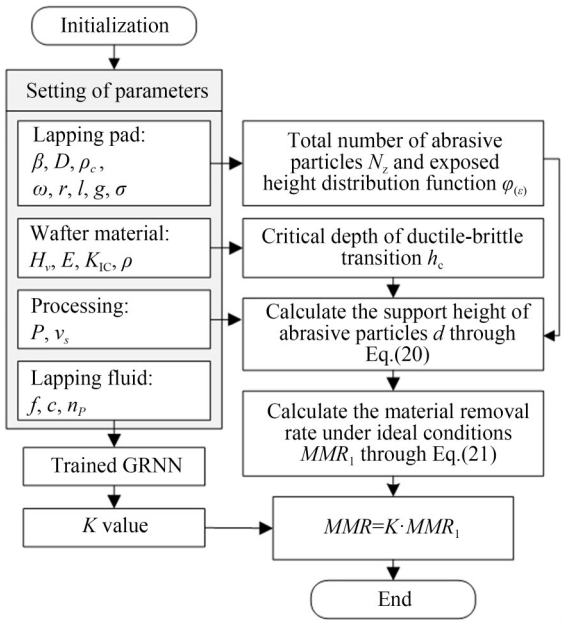


图 9 MMR 计算步骤

Fig. 9 Calculation steps of MMR

设定研磨盘转速 n_p 为 20 r/min,研磨液浓度为 5 wt. %,研磨液流量为 36 ml/min,将研磨液浓度、研磨液流量、研磨盘转速输入进训练好的 GRNN 中,得到此时材料去除率修正系数 $K=0.201$ 。

为探究石英晶片固结磨料研磨材料去除率模型准确性,改变研磨压强和相对速度,进行验证性试验:设定晶片与研磨垫相对速度为 0.54 m/s,仿真并测量研磨压强分别为 24 kPa, 36 kPa, 48 kPa, 60 kPa 时,晶片材料去除率预测值和实际值,材料去除率预测值和实际值如图 10 所示。

在其他参数不变条件下,设定研磨压强为

48 kPa, 偏心距 e 分别为 178 mm, 218 mm, 258 mm, 298 mm, 此时晶片与研磨垫相对速度分别为 0.37 m/s, 0.46 m/s, 0.54 m/s, 0.62 m/s, 仿真并测量不同相对速度下材料去除率预测值和实际值, 材料去除率预测值和实际值如图 11 所示。

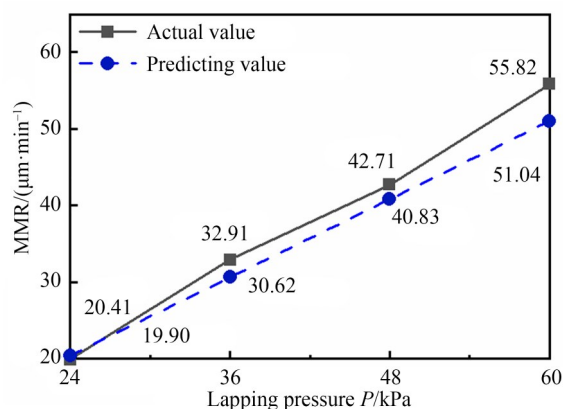


图 10 不同压强下材料去除率

Fig. 10 Material removal rate under different pressures

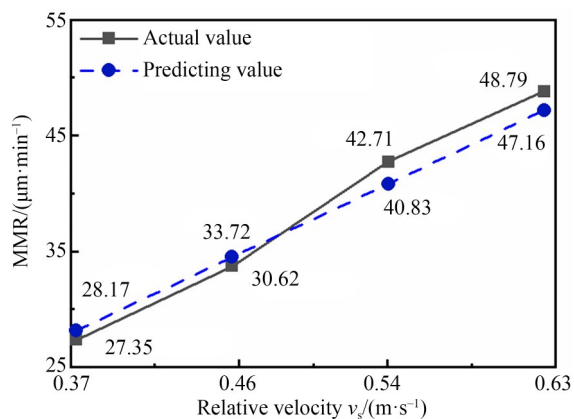


图 11 不同相对速度下材料去除率

Fig. 11 Material removal rate under different relative velocities

试验序号为 i , 以 $error$ 作为材料去除率模型

误差:

$$error = \max \frac{(MMR_{\text{实际值}i} - MMR_{\text{预测值}i})}{MMR_{\text{实际值}i}} \quad (29)$$

从图 10 和图 11 中可以看出, 改变研磨压强和相对速度, 材料去除率模型预测值与实际值变化趋势相同, 根据式 (29) 计算模型误差 $error$ 为 8.57%, 材料去除率模型准确性较好。从试验结果可以看出, 相对速度和研磨压强较大时, 材料去除率实际值大于仿真值, 这可能是由于相对速度和研磨压强增大, 导致晶片与研磨垫接触界面出现摩擦热效应, 从而改变研磨垫基体与研磨液反应速度, 提高研磨垫加工性能, 而在材料去除率模型中并未考虑研磨压强和相对速度对研磨垫加工性能的影响。

5 结 论

本文同时考虑材料去除机理和研磨垫钝化现象, 采用接触力学理论和 GRNN 方法, 提出一种石英晶片固结磨料研磨材料去除率模型并进行了试验验证。通过简化固结磨料研磨过程, 基于磨粒分布均匀假设、塑脆材料去除机理以及晶片与研磨垫的微观接触形式建立理想状态下材料去除率方程, 采用微研磨法进行三因素四水平正交试验, 并使用 GRNN 预测研磨液浓度、研磨液流量和研磨盘转速作用下材料去除率模型修正系数 K , 完善了材料去除率模型, 并进行验证性试验。试验结果表明: 研磨盘转速为 20 r/min, 研磨液浓度为 5 wt. %, 研磨液流量为 36 ml/min, 研磨压强从 24 kPa 增加到 60 kPa, 相对速度从 0.37 m/s 增加到 0.62 m/s 时, 材料去除率模型预测值与实际值趋势相同, 模型误差仅为 8.57%。该模型具有较好的精度, 基本满足了石英晶片固结磨料研磨加工中材料去除率的预测需要。

参考文献:

- [1] MUROZAKI Y, SAKUMA S, ARAI F, *et al.* Improvement of the measurement range and temperature characteristics of a load sensor using a quartz crystal resonator with all crystal layer components

[J]. *Sensors*, 2017, 17(5): 1067.

- [2] LV B H, YUAN J L, YAO Y X, *et al.* Study on fixed abrasive lapping technology for ceramic balls [J]. *Materials Science Forum*, 2006, 532/533: 460-463.

- [3] 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.
- [4] DONG Z, CHENG H. Study on removal mechanism and removal characters for SiC and fused silica by fixed abrasive diamond pellets[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2014, 85: 1-13.
- [5] REN L L, ZHANG F H, ZHAO S J, *et al.* Correlation between polishing pad's properties and material removal during full-aperture polishing[J]. *International Journal of Applied Glass Science*, 2019, 10(3): 287-301.
- [6] 林彬, 李凯隆, 曹中臣, 等. 固结磨料确定性研磨表面生成建模与实验分析[J]. 天津大学学报, 2019, 52(9): 917-931.
- LIN B, LI K L, CAO Z C, *et al.* Surface generation modeling and experimental analysis of the fixed abrasive deterministic lapping process[J]. *Journal of Tianjin University*, 2019, 52(9): 917-931. (in Chinese)
- [7] ZHANKUI W, MINGHUA P, MINGCHAO L, *et al.* Effect of material structure on spinel machinability in its fixed abrasive lapping[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 68: 141-153.
- [8] BIN L, JUNPENG Z, ZHONG-CHEN C, *et al.* Theoretical and experimental investigation on surface generation and subsurface damage in fixed abrasive lapping of optical glass[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 215: 106941.
- [9] 刘德福, 段吉安. 光纤端面研磨加工机理研究[J]. 光学精密工程, 2004, 12(6): 570-575.
- LIU D F, DUAN J. Mechanism research on lapping of optical fiber end-face[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(6): 570-575. (in Chinese)
- [10] 王占奎, 杨亚坤, 逢明华, 等. 石英玻璃固结磨料研磨工艺参数响应面模型的研究[J]. 表面技术, 2021, 50(7): 376-385.
- WANG Z K, YANG Y K, PANG M H, *et al.* Response surface model of processing parameters for lapping quartz glass with a fixed abrasive pad[J]. *Surface Technology*, 2021, 50(7): 376-385. (in Chinese)
- [11] 黄传锦, 周海, 朱永伟, 等. 研磨液在氧化镓晶体研磨中的作用[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(1): 43-47.
- HUANG C J, ZHOU H, ZHU Y W, *et al.* Effect of lapping fluid on β -Ga₂O₃ crystal lapping process[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 47(1): 43-47. (in Chinese)
- [12] 李军, 夏磊, 王小明, 等. 三乙醇胺浓度对固结磨料研磨垫自锐性能的影响[J]. 光学精密工程, 2014, 22(12): 3287-3293.
- LI J, XIA L, WANG X M, *et al.* Effect of triethanolamine concentration on self-sharpening performance of fixed abrasive pad[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(12): 3287-3293. (in Chinese)
- [13] LAWN B R, EVANS A G. A model for crack initiation in elastic/plastic indentation fields[J]. *Journal of Materials Science*, 1977, 12(11): 2195-2199.
- [14] LAMBROPOULOS J C, JACOBS S D, RUCKMAN J. Material removal mechanisms from grinding to polishing[J]. *Ceram. Trans.*, 1999, 102: 113-128.
- [15] LAWN B, WILSHAW R. Indentation fracture: principles and applications[J]. *Journal of Materials Science*, 1975, 10(6): 1049-1081.
- [16] 王旭, 张学军. 固着磨料加工碳化硅反射镜的微观理论模型[J]. 光学精密工程, 2009, 17(3): 513-518.
- WANG X, ZHANG X J. Micro theoretical model for grinding SiC mirror with fixed abrasive[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 513-518. (in Chinese)
- [17] LEE T, KIM H, LEE S, *et al.* Self-dressing effect using a fixed abrasive platen for single-sided lapping of sapphire substrate[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2017, 31(12): 5649-5655.
- [18] 王子琨, 朱永伟, 金振弘, 等. 乙醇浓度对亲水性固结磨料垫自修整特性的影响[J]. 光学精密工程, 2018, 26(4): 843-849.
- WANG Z K, ZHU Y W, JIN Z H, *et al.* Effect of ethanol solution on self-condition property of hydrophilic fixed abrasive pad[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(4): 843-849. (in Chinese)

- [19] 高向东,周晓虎,李彦峰,等. 磁光成像漏磁特征在焊接缺陷轮廓重构中的应用[J]. 光学精密工程, 2019, 27(8): 1863-1869.
GAO X D, ZHOU X H, LI Y F, *et al.* Applica-

tion of magneto-optical imaging magnetic flux leakage characteristics in contour reconstruction of welding defects[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(8): 1863-1869. (in Chinese)

作者简介:



贾珣璠(1999—),女,河北石家庄人,硕士研究生,2020年大连理工大学获得学士学位,现为大连理工大学硕士研究生,主要从事晶体材料研磨抛光加工领域。E-mail: jyffla@163.com