

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.04.016

晶圆划切用电镀划片刀外圆磨削圆度误差特性研究

王战, 桑银垒, 陈月涛, 付林泊, 杨双, 程家威, 张豫轩, 李宗高

(郑州三磨超硬材料有限公司, 河南 郑州 450001)

摘要:针对晶圆划切用电镀划片刀外圆磨削圆度误差特性进行研究。基于划片刀薄壁复合结构特性,建立融合砂轮-工件系统动力学、头尾架顶尖夹持误差传递机制与磨削几何关系的耦合动态成圆模型,采用分层加权法计算镍基金刚石镀层与铝合金基体的磨削力。通过数值仿真揭示划片刀外圆圆度误差在粗磨、精磨和光磨三阶段的动态演化规律。开展多工况磨削试验。验证表明:砂轮转速从1 000 r/min提升至4 000 r/min,可使划片刀外圆圆度误差由0.52 μm 降至0.28 μm ;在总进给量恒定条件下,粗磨进给速度变化对最终圆度精度影响微弱,但过高的进给速度(不小于20 $\mu\text{m/s}$)易引发薄壁工件变形与砂轮异常磨损。仿真与试验结果的最大相对误差为24.0%,参数影响趋势高度一致,验证了所建模型的有效性。

关键词:电镀划片刀;外圆磨削;圆度误差;动态成圆模型;工艺参数

中图分类号:TH161 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)04-0081-06

Research on Characteristics of Roundness Error in Outer Circle Grinding of Electroplated Dicing Blades for Wafer Slicing

Wang Zhan, Sang Yinlei, Chen Yuetao, Fu Linbo, Yang Shuang, Cheng Jiawei, Zhang Yuxuan, Li Zonggao

(Zhengzhou ZZSMSuperhard Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China)

Abstract: This paper investigates the characteristics of roundness error in the outer circle grinding of electroplated dicing blades for wafer slicing. Based on the thin-walled composite structure characteristics of the dicing blade, a coupled dynamic roundness generation model is established. This model integrates the wheel-workpiece system dynamics, the error transfer mechanism of the headstock and tailstock center clamping, and the grinding geometric relationships. A layered weighting method is employed to calculate the grinding forces for the nickel-based diamond coating and the aluminum alloy substrate. Numerical simulations are used to reveal the dynamic evolution laws of the outer circle roundness error during the rough grinding, finish grinding, and spark-out stages. Multi-condition grinding experiments were conducted for verification. The results indicate that increasing the wheel speed from 1 000 r/min to 4 000 r/min reduces the roundness error of dicing blade outer circumference from 0.52 μm to 0.28 μm . Under the condition of constant total feed, the variation of the rough grinding feed rate has a weak influence on the final roundness accuracy; however, excessively high feed rates (no less than 20 $\mu\text{m/s}$) can easily cause deformation of the thin-walled workpiece and abnormal wear of the grinding wheel. The maximum relative error between simulation and experimental results is 24.0%, and the trends of parameter influence are highly consistent, verifying the validity of the established model.

Keywords: electroplated dicing blade; outer circle grinding; roundness error; dynamic roundness generation model; process parameters

0 引言

随着集成电路向更小线宽、更高集成度发展,对晶圆划切工艺的精度与可靠性提出更加严苛的要求^[1-2]。电镀划片刀作为芯片制造关键工序中的核心精密切割工具^[3-4],其外圆圆度精度直接决定切割轨迹稳定性、芯片边缘完整性及良品率。

因此,研究划片刀外圆磨削过程,分析关键工艺参数对划片刀外圆圆度的影响规律,可为高精度划片刀的工艺优化与稳定生产提供一定的理论支撑。

在精密磨削加工领域,国内外学者对工件圆度误差控制进行了广泛研究。曾旭等^[5-7]建立了高精度主轴颈磨削成圆过渡过程的双转子耦合动

第一作者简介:王战(1982—),男,山西运城人,高级工程师,本科,研究方向为电镀超硬材料制品技术, wangzhan@diamondgroup.cn。

通信作者简介:陈月涛(1991—),男,河南郑州人,工程师,硕士,研究方向为电镀划片刀应用技术与市场, chen-yuetao@diamondgroup.cn。

力学模型,系统揭示了磨削参数对圆度精度及同批次精度一致性的影响规律。封超等^[8]构建了外圆磨削非线性动力学微观模型,推导出磨削动力学方程并采用 Faddeev 算法进行线性化处理,阐明了关键工艺参数对磨削稳定性的影响机制。汪龙华等^[9]建立了考虑工件中心瞬时位置变化的无心磨削动态成圆模型,综合分析了工件几何形貌和系统动力学引起的中心位移对成圆过程的影响。王毅鹏^[10]建立了沟道磨削加工过程中的定位误差、圆度误差复映及振动误差等数学模型。

Tuan^[11-12]建立了支承式无心磨削工艺中工件支承角度与圆度误差的理论映射关系,研究了关键工艺参数对 6208 轴承内圈滚道圆度的影响机制。金山^[13]分析了无心磨削的成圆机制及圆度误差形成原因,并通过田口实验法优化了工件中心高、托板倾角等关键工艺参数,有效提高了轴颈表面圆度精度。吴金津^[14]建立了轴向超声高速磨削理论模型,通过试验验证了超声振动对轴承内圆圆度的改善效果。崔奇^[15]建立了时域成圆过程解析模型,通过工件与砂轮、导轮的相互作用关系准确预测圆度误差变化。汪君琦^[16]通过力学建模、有限元仿真与磨削试验,揭示了陶瓷套圈无心外圆磨削中磨削力与材料去除效率、表面粗糙度的矛盾关系。桑银奎等^[17-18]构建了考虑工件—砂轮中心偏移与系统动力学耦合的球轴承沟道磨削动态成圆模型,定量揭示了支承夹角对圆度误差的调控机制。王贺等^[19]建立了氮化硅陶瓷端面磨削表面粗糙度预测模型,揭示砂轮粒径、线速度与进给速度对表面粗糙度的影响规律,为工艺优化提供理论支撑。吉永前等^[20]研究了 20CrMnTi 钢高效磨削机制,揭示工艺参数对表面完整性的影响规律,为优化磨削工艺、抑制表面损伤提供依据。综上所述,学者们围绕磨削圆度的影响机制已开展了大量的基础性研究。然而,现有成果主要集中于轴承套圈、主轴等传统刚性回转体零件,针对晶圆划切用电镀划片刀这类薄壁复合结构工件的圆度误差形成机制及控制方法,相关研究仍较为匮乏。

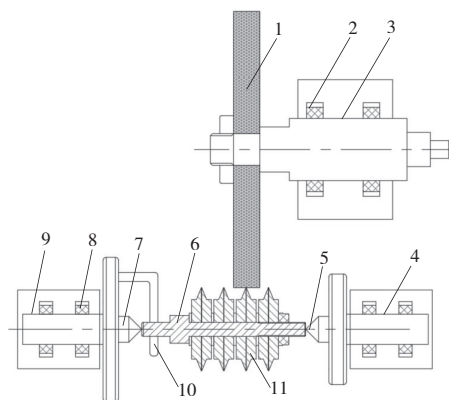
本文以晶圆划切用电镀划片刀为研究对象,基于划片刀的薄壁复合结构特性,建立融合砂轮—工件动力学特性、头尾架顶尖夹持同轴度误差与磨削几何关系的耦合动态成圆模型;研究电镀划片刀外圆磨削圆度误差形成过程;设计并进行划片刀外圆磨削试验验证划片刀外圆磨削圆度预测模型的合理性;研究磨削工艺参数对划片刀外圆圆度

的影响规律。

1 划片刀外圆磨削圆度仿真模型构建

1.1 划片刀外圆磨削系统动态特性分析

用于晶圆划切的电镀划片刀,其外圆磨削系统主要由砂轮系统、夹具系统和该划片刀本身三部分构成。夹具系统包括双顶尖夹紧机构与芯轴,划片刀固定于芯轴上,芯轴两端在头尾架顶尖的夹持力及拨盘驱动下,实现与头尾架顶尖的同步旋转。图 1 展示了所述外圆磨削系统的结构。



1—砂轮;2—液压轴承;3—砂轮主轴;4—尾架主轴;
5—尾架顶尖;6—芯轴;7—头架顶尖;8—液压轴承;
9—头架主轴;10—拨盘;11—工件。

图1 晶圆划片刀外圆磨削系统示意图

图1表明,该磨削工艺涉及砂轮主轴与划片刀—芯轴—头尾架顶尖这两个轴系之间的相互耦合。当分析仅限于外圆径向磨削时,可将该系统简化为砂轮和划片刀外圆两个独立的单自由度系统,其简化模型如图2所示。

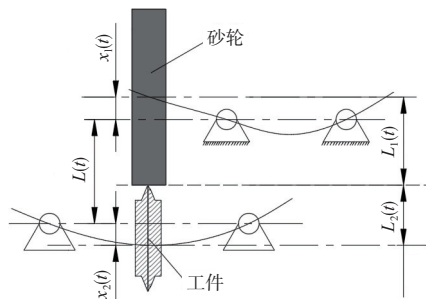


图2 磨削系统简化示意图

根据振动力学理论,砂轮与划片刀的动力学行为可由以下方程描述

$$m_1 \ddot{x}_1(t_i) + c_1 \dot{x}_1(t_i) + k_1 x_1(t_i) = F_n(t_i) + F_{ubl}(t_i) \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{x}_2(t_i) + c_2 \dot{x}_2(t_i) + k_2 x_2(t_i) = F_n(t_i) + F_{ub2}(t_i) \quad (2)$$

式中: m_1 为砂轮部件的等效质量, kg; m_2 为划片刀和芯轴的总质量, kg; c_1 和 c_2 分别为砂轮系统和工件系统的阻尼系数, N·s/m; k_1 和 k_2 则为相应系统的等效刚度常数, N/m; $x_1(t_i)$ 和 $x_2(t_i)$ 分别为砂轮与划片刀中心点的振动位移, m; $F_{ub1}(t_i)$ 和 $F_{ub2}(t_i)$ 分别为砂轮和划片刀的动不平衡力, N; $F_n(t_i)$ 为两者之间作用的法向磨削力, N。

动不平衡力可进一步表示为

$$F_{ub}(t_i) = G_e m \omega \times 10^{-3} \cos(\omega t_i) \quad (3)$$

式中: G_e 为系统动平衡精度等级, mm/s; ω 为旋转角速度, rad/s。

本文采用比磨削能法计算磨削力。考虑到电镀划片刀外圆由镍基金刚石镀层与铝合金基体构成, 且磨削过程中两者同时参与材料去除, 本文采用分层加权磨削力模型。总法向磨削力表示为

$$F_n(t) = \lambda_{Ni} \mu_{Ni} b_{Ni} a_{Ni}(t) + \lambda_{Al} \mu_{Al} b_{Al} a_{Al}(t) \quad (4)$$

式中: $F_n(t)$ 为法向磨削力, N; λ 为力比, 无量纲, 可表示为 $\lambda = F_n/F_t$; μ 为有效比磨削能, J/mm³; $a(t)$ 为瞬时磨削深度, mm。

1.2 头尾架顶尖夹持下工件回转误差建模

为定量分析头尾架顶尖夹持误差对划片刀外圆磨削精度的影响, 本文建立仅在磨削方向(一般为工件径向进给方向)上的工件中心偏移误差时域模型。

建立如图3所示坐标系: 尾架顶尖为从动支承, 其主轴径向跳动误差远小于头架, 故予忽略; 头架主轴径向跳动误差在径向平面内可分解为两个正交分量, 头尾架对中误差视为静态偏移, 不随时间变化。

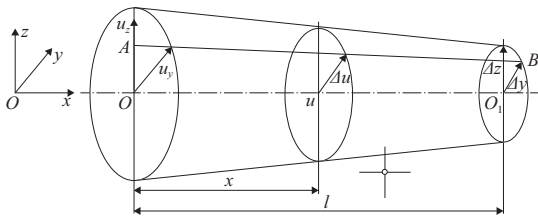


图3 头尾架顶尖回转误差模型示意图

以头架顶尖理想中心为原点 O , 工件轴线方向为 x 轴, 磨削方向为 y 轴, 与之垂直的水平方向为 z 轴。工件长度为 l , 磨削点距头架端的距离为 x 。头架主轴径向跳动误差可分解为 y 轴向分量

u_y 和 z 轴向分量 u_z 。头尾架顶尖对中误差体现为 y 轴向的偏移量 Δ_y 与 z 轴向偏移量 Δ_z 。

头架主轴径向跳动通常包含多阶谐波分量, 在 y 轴方向可表示为

$$u_y(t) = \sum_{k=1}^n a_k \cos(k\omega_1 t + \varphi_k^y) \quad (5)$$

式中: a_k 为第 k 阶误差幅值, μm ; ω_1 为主轴旋转角速度, rad/s; φ_k^y 为 y 轴向初始相位角, rad。

尾架顶尖的静态偏移 Δ_y 将导致工件轴线绕头架点发生刚性倾斜。在磨削点 x 处, 由此引起的 y 轴向偏移量为

$$\Delta_y(x) = \frac{x}{l} \Delta_y \quad (6)$$

磨削点 x 处的总 y 轴向偏移为头架顶尖跳动误差的线性传递部分与对中误差引起的倾斜部分的叠加

$$u(t) = \left(1 - \frac{x}{l}\right) u_y(t) + \frac{x}{l} \Delta_y \quad (7)$$

将式(5)代入, 得到磨削方向上工件中心偏移误差的时域模型

$$u(t) = \left(1 - \frac{x}{l}\right) \sum_{k=1}^n a_k \cos(k\omega_1 t + \varphi_k^y) + \frac{x}{l} \Delta_y \quad (8)$$

1.3 电镀划片刀外圆磨削成圆过程模型

该模型以磨削过程中每一瞬时的物理状态为驱动, 实现对工件轮廓逐次迭代更新, 从而准确反映由微小初始误差经系统柔性和动态效应放大后所导致的最终圆度偏差。

如图4所示, 在划片刀外圆磨削过程中, 外圆与砂轮始终满足如下位置关系

$$L_2(t_i) + L_1(t_i) = L(t_i) + x_1(t_i) + x_2(t_i) \quad (9)$$

$$L_1(t_i) = r_{s0} - \Delta_s(t_i) - y_s(t_i) \quad (10)$$

$$L_2(t_i) = r_{w0} - \Delta_w(t_i) - y_w(t_i) - y_d(t_i) + u(t_i) \quad (11)$$

$$L(t_i) = r_{s0} + r_{w0} - \Delta r_{w0}(t_i) - \Delta e(t_i) - a_p(t_i) \quad (12)$$

式中: $L_1(t_i)$ 为 t 时刻砂轮中心到磨削接触点的距离; $L_2(t_i)$ 为 t 时刻外圆中心到磨削接触点的距离; $L(t_i)$ 为 t 时刻砂轮径向进给过程中, 砂轮中心与工件中心的距离; $\Delta_s(t_i)$ 为砂轮 t_i 时刻的磨损量; r_{s0} 为磨削前砂轮外圆半径; $y_s(t_i)$ 为 t 时刻砂轮表层(含磨料、结合剂)压缩变形; $\Delta_w(t_i)$ 为工件 t_i 时刻的磨损量; r_{w0} 为磨削前划片刀半径; $y_w(t_i)$ 为 t 时刻划片刀本体在接触点处的接触变形; $y_d(t_i)$ 为 t 时刻头尾架顶尖装夹系统的弹性变形; $u(t_i)$ 为头尾架顶尖夹持误差; $\Delta r_{w0}(t_i)$ 为划片刀外圆初始圆度误差; $\Delta e(t_i)$ 为砂轮回转误差;

$a_p(t_i)$ 为砂轮名义进给量。

上述变量存在以下关系

$$\Delta_s(t_i) = \Delta_s(t_i - T) + a_s(t_i) \quad (13)$$

$$\Delta_w(t_i) = \Delta_w(t_i - T) + a_w(t_i) \quad (14)$$

式中: $a_w(t_i)$ 表示工件的瞬时磨削量; $a_s(t_i)$ 表示砂轮瞬时磨损量。

砂轮半径的瞬时磨损量如下

$$a_s(t_i) = k_s F_n(t_i) v_s \Delta t \quad (15)$$

式中: k_s 为砂轮磨损系数; v_s 为砂轮线速度, m/s。

对于砂轮和电镀划片刀的接触变形, 有近似表达式如下

$$y_k(t_i) = y_s(t_i) + y_w(t_i) + y_d(t_i) \quad (16)$$

$$y_k(t_i) = \frac{F_n(t_i)}{k_a} \quad (17)$$

式中: $y_k(t_i)$ 为磨削点总变形量, 其值为砂轮表层变形量、划片刀本体接触变形量和头尾架顶尖装夹系统的弹性变形量的总和; k_a 为砂轮、划片刀本体和头尾架顶尖的等效接触刚度, N/m。

综述上述几何与动力学关系, 可得刀片外圆瞬时磨削深度集成表达式

$$a_w(t_i) = a_p(t_i) + u(t_i) + \Delta e(t_i) + \Delta r_{w0}(t_i) - r_s(t_i - T) - y_k(t_i) - a_s(t_i) - x_1(t_i) - x_2(t_i) - r_w(t_i - T) \quad (18)$$

$$r_w(t_i) = r_w(t_i - T) - a_w(t_i) \quad (19)$$

综上所述, 磨削系统的完整动力学模型由式(1)和式(2)定义, 几何耦合关系由式(9)定义。通过联立求解该方程组, 可获得磨削过程中系统的瞬时振动位移, 进一步求出瞬时磨削深度 $a_w(t_i)$, 从而实现对划片刀半径动态演变过程及圆度误差生成的定量表征。

2 划片刀外圆动态成圆仿真分析

2.1 仿真算法流程

本文所述算法用于电镀结合剂划片刀外圆磨削圆度的高精度预测, 通过闭环数值模拟再现磨削过程中轮廓的动态演化。仿真算法流程如图4所示。

2.2 仿真条件

为定量评估所提动态成圆模型对电镀划片刀磨削圆度误差的预测能力, 本文依据晶圆划切刀具的加工工艺开展数值仿真。模型输入涵盖3类参数: 砂轮参数、工件参数及工艺设定参数。具体参数取值如表1—表3所示。

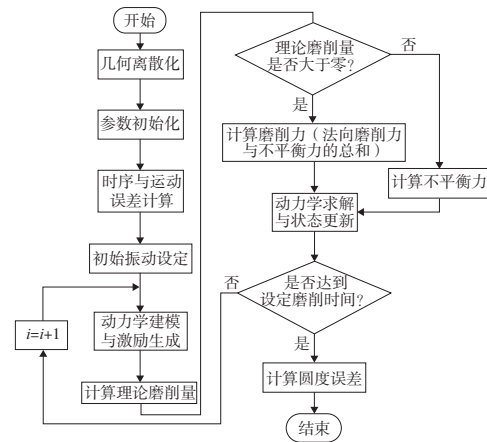


图4 划片刀外圆磨削仿真流程图

表1 工件参数

参数	数值
材料	铝/镍
质量/kg	0.02
弹性模量 E_{Al} /GPa	69
弹性模量 E_{Ni} /GPa	190
宽度 b_{Al} /mm	0.80
宽度 b_{Ni} /mm	0.10
外圆直径/mm	59
平衡精度等级	G0.40

表2 砂轮参数

参数	数值
磨料	金刚石
结合剂	树脂
粒度/ μm	100
硬度等级	M
质量/kg	20
外圆直径/mm	500
宽度/mm	50
弹性模量 E /GPa	15
平衡精度等级	G0.40

表3 磨削工艺参数

参数	数值
砂轮转速/(r/min)	3 000
划片刀转速/(r/min)	400
粗磨进给速度/($\mu\text{m/s}$)	10
精磨进给速度/($\mu\text{m/s}$)	5
粗磨时间/s	15
精磨时间/s	10
光磨时间/s	5

2.3 动态成圆过程仿真分析

划片刀外圆磨削过程中,圆度误差呈现显著的阶梯式动态演变规律,如图5所示。1)在粗磨阶段(0~15 s),初始误差10 μm ,采用高粒度磨粒砂轮与大进给速度,通过高磨削率消除车削工序残留的宏观形状误差,划片刀外圆圆度误差快速降至4.4 μm ;受砂轮磨损和磨削颤振影响,圆度误差波动幅度稳定于 $\pm 0.2 \mu\text{m}$ 。2)细磨阶段(15~25 s),细磨阶段优化为细粒度磨粒砂轮与低进给速度,以微磨削作用修正残余微误差;圆度误差平缓收敛至1.8 μm ,波动幅度进一步缩至 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 。3)光磨阶段(25 s后),通过微抛光机制进一步降低划片刀外圆圆度误差,圆度误差则以较快速率稳定于0.25 μm 左右。

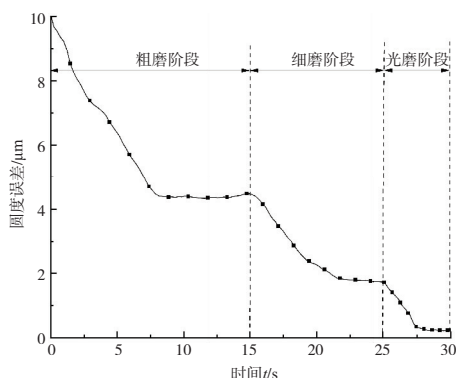


图5 划片刀外圆圆度演变过程

3 划片刀外圆磨削试验验证

3.1 试验方法

为了验证电镀划片刀外圆磨削圆度预测模型是合理的,在数控外圆磨床上进行特定工艺参数下的磨削试验。通过系统比较磨削后外圆圆度误差的仿真预测值与实际测量值,可对所建模型的正确性进行定量验证。

本次试验以高精度数控外圆磨床为核心加工设备,如图6所示。关键测量设备为圆度仪,用于精确量化划片刀外圆的圆度误差。选取电镀完成后的划片刀为试验对象,试验所采用的工件参数、砂轮参数以及磨削工艺参数如表1—表3所示。



图6 划片刀外圆数控磨床

基于试验设计的经济性原则,分析多工艺参数对电镀划片刀外圆磨削圆度的影响规律。设计的划片刀外圆磨削试验通过改变砂轮进给速度和砂轮转速,每个参数分别进行4组对照试验,7组磨削试验的加工参数如表4所示。

表4 试验工艺参数

工况	砂轮转速/ (r/min)	粗磨进给 速度/($\mu\text{m}/\text{s}$)	粗磨进给 时间/s
1	1 000	10	15
2	2 000	10	15
3	3 000	10	15
4	4 000	10	15
5	3 000	5	30
6	3 000	15	10
7	3 000	20	7.5

3.2 试验结果与仿真对比分析

1) 砂轮转速的影响

如图7所示,划片刀外圆磨削试验与仿真均表明,砂轮转速的提升对圆度误差具有显著改善作用:试验测量值由1 000 r/min时的0.52 μm 减小至4 000 r/min时的0.28 μm ,仿真预测值同步呈现0.44~0.24 μm 的递减趋势,二者变化规律高度吻合,相对误差稳定于13.1%~24.0%。该结果验证了动态成圆模型的合理性。

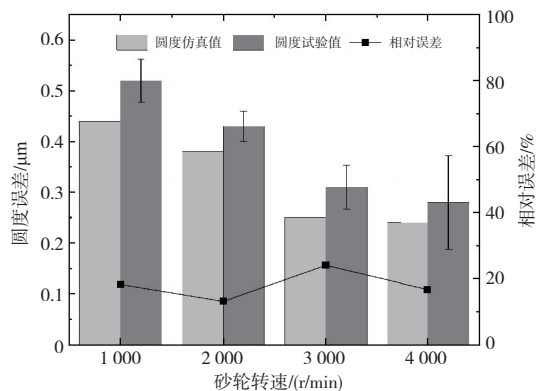


图7 不同砂轮转速下试验值与仿真值对比

砂轮转速提升改善圆度误差的核心机制在于砂轮线速度增大显著降低瞬时磨削深度,削弱瞬时磨削力幅值及其高频波动,从而抑制工件-夹具系统的弹性变形与振动响应。仿真与试验趋势一致,但仍存在偏差,可能是因为高转速下高温影响砂轮与工件的热膨胀;砂轮磨粒磨损加剧,导致实际切削效率低于模型假设。

2) 进给速度的影响

基于图8的试验与仿真对比分析,在粗磨阶段总进给量恒定条件下,当砂轮进给速度依次调整为 $5\text{ }\mu\text{m/s}$ 、 $10\text{ }\mu\text{m/s}$ 、 $15\text{ }\mu\text{m/s}$ 与 $20\text{ }\mu\text{m/s}$ 时,划片刀外圆磨削后的圆度误差试验均值则分别为 $0.28\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.31\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.27\text{ }\mu\text{m}$ 与 $0.32\text{ }\mu\text{m}$,对应仿真预测值分别为 $0.23\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.25\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.24\text{ }\mu\text{m}$ 与 $0.27\text{ }\mu\text{m}$ 。仿真值整体略低于实测值,但相对误差稳定于 $12.5\%\sim 24.0\%$ 。

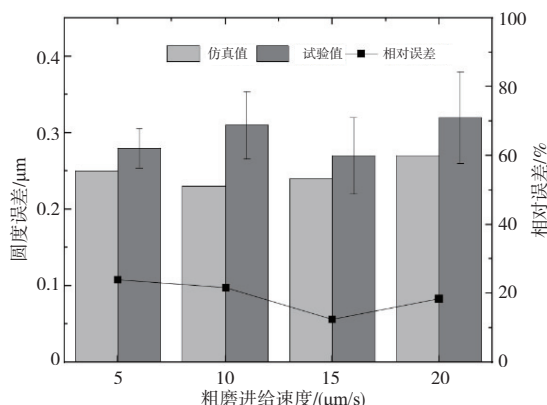


图8 不同进给速度下试验值与仿真值对比

数据表明,粗磨阶段进给速度的差异化设定对最终圆度精度影响微弱(试验值波动幅度仅 $0.05\text{ }\mu\text{m}$)。这主要是因为,多阶段磨削工艺具备显著的误差梯度修正能力——粗磨阶段形成的初始误差差异,经由精磨与光磨阶段的低应力精密成形过程被逐渐修整与收敛。

粗磨进给速度虽对最终圆度影响有限,但若进给速度超阈值设定(不小于 $20\text{ }\mu\text{m/s}$),将显著增加工艺风险,瞬时磨削力剧增,极易导致薄壁划片刀侧向变形,增加工件报废率;同时加大砂轮磨损,缩短砂轮服役寿命,增加刀具成本与生产停机概率。

4 结语

1) 本文构建了晶圆划切用电镀划片刀外圆磨削动态成圆仿真模型。基于砂轮-工件系统动力学特性、头尾架顶尖夹持误差传递机制与磨削几何关系,建立包含振动位移、砂轮磨损、接触变形及初始圆度误差等多物理场耦合的微分方程组,形成以砂轮转速、进给参数、机床刚度及几何位姿为输入变量的划片刀外圆圆度误差预测模型。

2) 本研究实现了划片刀外圆磨削成圆过程的动态仿真。通过迭代算法获取划片刀外圆圆度误

差的时域演化曲线,清晰呈现粗磨快速衰减—精磨平缓收敛—光磨稳定定型的三阶段误差演化规律。

3) 本研究多工况试验验证了模型有效性。随着砂轮转速从 $1\text{ }000\text{ r/min}$ 提升至 $4\text{ }000\text{ r/min}$,划片刀外圆圆度误差由 $0.52\text{ }\mu\text{m}$ 降至 $0.28\text{ }\mu\text{m}$;改变粗磨进给速度对最终精度影响微弱(波动不大于 $0.05\text{ }\mu\text{m}$),但不小于 $20\text{ }\mu\text{m/s}$ 时易导致薄壁工件侧向变形与砂轮异常磨损。仿真与试验最大相对误差 24.0% ,参数影响趋势高度一致,充分验证模型可靠性。

参考文献:

- [1] 洪秋. 复合电沉积超薄金刚石划片刀的制备与性能研究[D]. 长沙:湖南大学,2023.
- [2] 李志雄. 超薄划片刀切割3D堆叠硅晶圆及碳化硅衬底的工艺研究[D]. 湘潭:湘潭大学,2024.
- [3] 王战,栗云慧,窦文涌,等. 金刚石微粉粒度、形貌及杂质含量对划片刀电镀上砂的影响[J]. 超硬材料工程,2024,36(2):21-26.
- [4] 栗云慧,邵俊永,王战,等. 划片刀磨料粒度分布对不同硅晶圆划切品质的影响[J]. 超硬材料工程,2024,36(5):26-32.
- [5] 曾旭. 高精度主轴颈磨削成圆过渡过程规律及精度一致性研究[D]. 长沙:湖南大学,2024.
- [6] Zeng X, Xiong W L, Ye H Y, et al. Research on roundness error consistency model for crank journal cylindrical grinding [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 120 (5) : 3705-3717.
- [7] Zeng X, Xiong W L, Zhang H Q, et al. Research on the consistency model of roundness error in journal cylindrical grinding with random parameters [J]. Precision Engineering, 2023, 82 : 270-280.
- [8] 封超,张金峰,王保义,等. 基于 MATLAB 的外圆磨削工艺参数对过程稳定性的影响分析[J]. 工具技术, 2024, 58(6):103-109.
- [9] 汪龙华,赵丽梅,曹振,等. 无心磨削动态成圆模型与数值仿真[J]. 制造技术与机床,2023(6):127-132.
- [10] 王毅鹏. 角接触球轴承套圈磨削加工误差研究分析[D]. 洛阳:河南科技大学,2022.
- [11] Tuan N A. The effects of process parameters on workpiece roundness in the shoe-type centerless grinding operation for internal raceway of ball bearings[J]. Coatings, 2023, 13(11):1864.
- [12] Tuan N A. Multi-objective optimization of process parameters to enhance efficiency in the shoe-type centerless grinding operation for internal raceway of ball bearings[J]. Metals, 2021, 11(6):893.

(下转第97页)

- 收稿日期: 2024-02-28

[18] 桑银垒,余永健,曾献智,等. 角接触球轴承内圈沟道磨削圆度误差分析[J]. 轴承,2025(10):13-19.

[19] 王贺,谢飞. 氮化硅陶瓷型套端面磨削表面粗糙度研究[J]. 机械制造与自动化,2024,53(5):77-81.

[20] 吉永前,王鑫清,郭晋竹,等. 20CrMnTi 钢高效磨削机理实验研究[J]. 工具技术,2026,60(2):83-91.

收稿日期:2026-05-25