

精密与超精密加工

基于层叠式夹持的夹具失效形式分析

陈芝向, 袁巨龙, 邵琦, 杭伟, 吕冰海, 赵萍

(浙江工业大学 超精密加工研究中心, 杭州 310023)

摘 要: **目的** 为了解决超薄蓝宝石晶片的双平面加工问题, 确定层叠式夹具基盘及限位片的材料, 并对限位片的失效形式进行分析。**方法** 通过分析层叠式夹具中工件在双平面加工中的受力状态及传统双平面加工工件受力状态, 确定限位片的受力状态。测量蓝宝石与基盘间的摩擦力对基盘材料进行选择, 通过受力分析结合摩擦因数计算限位片的剪切强度, 对限位片的材料进行初步选择。在平面抛光机上进行加压试验, 对限位片的失效形式进行分析。**结果** 层叠式夹具在双平面加工中受到工件施加的力小于传统双平面加工行星轮受到的力。在 3 种基盘材料中, 不锈钢材料与蓝宝石晶片间的摩擦力较大, 铸铁次之, 铝合金最小。液滴在 2 个表面间形成的液膜对不锈钢和铸铁的摩擦因数有一定的增益效果。基盘选择不锈钢材料, 限位片选择玻璃纤维板材料的情况下, 限位片所承受的加工压力随着夹持厚度的增加而呈现非线性增加。限位片的主要失效形式表现为限位区域被蓝宝石晶片的边缘切割, 受基盘及蓝宝石平面度的影响。**结论** 层叠式夹具对材料强度的要求更低, 更加适用于超薄平面零件的双平面加工。限位片失效受基盘高度差的影响, 为保证限位片的夹持效果, 应尽量降低基盘表面的高度差。

关键词: 层叠式; 超薄蓝宝石; 限位片; 双平面加工; 受力分析

中图分类号: TG356.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)04-0369-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.04.039

Analysis of Fixture Failure Form Based on Layer Stacked Clamping

CHEN Zhi-xiang, YUAN Ju-long, SHAO Qi, HANG Wei, LYU Bing-hai, ZHAO Ping

(Ultra-precision Machining Center, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

ABSTRACT: The purpose is to solve the problem of double-sides processing of ultra-thin sapphire wafers, determine the baseplate materials and the limiter materials of the layer stacked fixture and analyze the failure form of the limiter. By analyzing the stress of workpiece in double-sides machining which used layer stacked fixture and the stress of the workpiece in traditional double-sides machining, we can determine the force of limiter. By measuring the friction between sapphire and the baseplate to choose the material of baseplate, calculate the shear strength of limiter by force analysis and friction coefficient, and preliminarily select the material of limiter. The pressure experiment is carried out on the plane polishing machine to analyze the

收稿日期: 2020-06-22; 修订日期: 2020-07-02

Received: 2020-06-22; Revised: 2020-07-02

基金项目: 浙江省公益技术研究项目 (LGG19E050021); 国家自然科学基金项目 (51575492, 51775508)

Fund: Supported by Zhejiang Province Commonweal Technology Research Project (LGG19E050021), National Natural Science Foundation of China (51575492, 51775508)

作者简介: 陈芝向 (1990—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为精密与超精密加工技术。

Biography: CHEN Zhi-xiang (1990—), Male, Doctoral candidate, Research focus: precision and ultra-precision matching technology.

通讯作者: 袁巨龙 (1962—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为精密与超精密加工技术。邮箱: jlyuan@zjut.edu.cn

Corresponding author: YUAN Ju-long (1962—), Male, Doctor, Professor, Research focus: precision and ultra-precision matching technology. E-mail: jlyuan@zjut.edu.cn

引文格式: 陈芝向, 袁巨龙, 邵琦, 等. 基于层叠式夹持的夹具失效形式分析[J]. 表面技术, 2021, 50(4): 369-375.

CHEN Zhi-xiang, YUAN Ju-long, SHAO Qi, et al. Analysis of fixture failure form based on layer stacked clamping[J]. Surface technology, 2021, 50(4): 369-375.

failure mode of the limiter. The result shows that the force exerted by the stacked fixture on the workpiece in double-sides machining is less than the force received by the planetary gear clamping. Among the three substrate materials, the friction between stainless steel and sapphire wafer is greater, followed by iron, and aluminum alloy is the smallest. The liquid film formed by droplet between the two surfaces has a certain gain effect on the friction coefficient of stainless steel and iron. When the stainless steel material is selected as baseplate, and the glass fiber board material is limiter, processing pressure on the limiter shows a nonlinear increase with the increase of clamping thickness. The main failure mode of limiter is that the limit area is cut by the edge of sapphire wafer, which is affected by the flatness of baseplate and sapphire. Through experimental analysis, it is proved that layer stacked fixtures have lower material strength requirements and more suitable for double-sides machining of ultra-thin plane parts. In order to ensure the clamping strength of the limiter, a better flatness of the baseplate should be selected as much as possible.

KEY WORDS: layer stacked; ultra-thin sapphire wafer; limiter; double-sides processing; force analysis

对 LED 衬底及半导体硅片进行制备时, 主要采用双平面研磨及平面抛光的超精密加工方法。随着市场的发展, 半导体行业及 LED 衬底产业对超薄平面零件的需求大大提升^[1]。传统对超薄晶片的夹持方式为石蜡粘接及真空吸附, 其中真空吸附方式适用于精密磨削及精密切削^[2], 石蜡粘接则适用于抛光研磨, 但由于石蜡粘接的成本及效率问题^[3], 大大制约了超薄平面零件的产量。双平面抛光技术是超薄晶片的首选抛光方法, 但由于行星轮保持架强度及刚度不足的问题, 无法实现低成本的超薄平面零件加工^[4-5]。本文所探究的层叠式夹持方式基于水膜吸附^[6], 能有效解决超薄平面零件的夹持问题, 可实现超薄平面零件的双平面加工方式。

层叠式夹持方式的夹持效果主要受到吸附力及摩擦力的影响。两个表面间的吸附力包括有范德华力、静电力、毛细力以及化学键力^[7-11]。层叠夹持方式下的吸附力则主要体现为范德华力以及毛细力, 范德华力对于真实接触面积、表面粗糙度影响较大^[12-15], 而毛细力则主要受表面接触角影响^[16-18], 接触角的大小则主要由材料性能及表面粗糙度决定^[19]。

层叠夹持方式下的摩擦力影响因素主要有表面粗糙度及材料特性。粗糙度对摩擦力的影响展开了深入研究, 主要通过数学模型对微观尺度上的表面粗糙度间相互作用来预测接触对的宏观性能, 其中一种为基于 G-W 接触模型进行粗糙度长度尺度的接触压力和实际接触面积比的分布来进行研究^[20-22], 后被用于研究表面粗糙度各向异性对摩擦力的影响^[22]。由于不同材料的物理性能差异, 使得摩擦力存在较大差别^[23-25]。

本文基于层叠夹持方式, 针对双平面加工工件夹持状态进行受力分析, 研究了蓝宝石晶片与不同材料基盘间的摩擦因数, 并结合受力分析以及材料剪切强度分析确定了限位片的材料, 通过试验研究分析了限位片的夹持厚度以及失效形式。

1 工件受力分析

传统双平面加工方式下, 工件被行星轮保持架夹

持, 在行星轮的驱动下发生绕行星轮回转中心转动的运动, 行星轮在太阳轮及齿圈驱动下发生绕磨盘回转中心的公转运动。

工件在行星轮夹持下主要承受来自磨盘的摩擦力 F_{pf} 、行星轮施加的驱动力 F_h 以及工件运动过程中产生的离心力 F_l , 受力分析如图 1 所示。离心力驱动工件产生远离曲率半径方向的运动, 磨盘的摩擦力阻碍工件向合速度 v_w 方向移动, 行星轮对工件施加的力 F_h 表现为克服摩擦力及离心力的合力驱动工件运动, 方向为行星轮驱动工件运动的线速度 v_{wh} 方向。

工件受到的离心力 F_l 与工件中心轨迹在所处位置的角速度有关, 定义工件中心在某点的运动角速度为 ω_w , 则离心力的表达式为:

$$|F_l| = M\omega_w^2 \quad (1)$$

$$\omega_w = v_w / k_r \quad (2)$$

式中: M 为工件的质量; v_w 为工件中心在该点的线速度; k_r 为工件中心在该点轨迹的曲率半径。

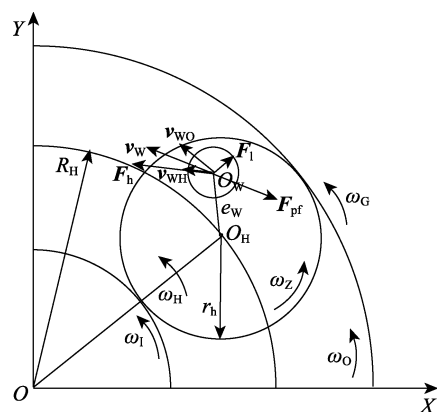


图1 工件受力分析图

Fig.1 Force analysis diagram of workpiece

由于行星轮的公转及自转运动, 位于上、下研磨盘之间的工件其运动方向时刻变化, 工件受到摩擦力的方向亦时刻变化, 当且仅当工件离心力小于工件受到的摩擦力且工件中心与研磨盘中心、行星轮中心三点一线时, 工件受到的摩擦力为上、下研磨盘施加的

摩擦力之差, 如式(3)所示。当工件并非位于特殊位置时, 由于工件运动方向的变化, 上、下研磨盘对工件施加的摩擦力共同阻碍工件发生变化, 方向相同, 工件受到研磨盘盘面施加的摩擦力 F_{pf} 的表达式如式(4)所示。行星轮对工件施加的力 F_h 的表达式如式(5)所示。

$$F_{pf} = F_{OD} - F_{OU} \quad (3)$$

$$F_{pf} = F_{OD} + F_{OU} \quad (4)$$

$$F_h + F_{pf} + F_l = 0 \quad (5)$$

层叠式加工方式下, 传统双平面加工方式中工件被替换成工件-夹具系统, 受力分析如图 2 所示。工件在夹持状态下, 基盘下表面工件主要承受来自下盘施加的摩擦力 F_{OD} , 基盘施加的摩擦力 F_{BD} 以及限位片施加的反向作用力 F_{xD} , 根据力的平衡法则, 三者的关系如式(6)所示。

$$F_{OD} + F_{BD} + F_{xD} = 0 \quad (6)$$

工件受到上盘及下盘的摩擦力为:

$$|F_{OD}| = \pi\mu_0 r_w^2 P + \mu_0 mg \quad (7)$$

$$|F_{OU}| = \pi\mu_0 r_w^2 P \quad (8)$$

式中: μ_0 为磨盘与工件间的摩擦因数; r_w 为工件半径; m 为夹具及工件的总质量

上下表面工件与基盘之间的摩擦力为:

$$|F_{BD}| = \pi\mu_B r_w^2 P + \mu_B (m - M)g \quad (9)$$

$$|F_{BU}| = \pi\mu_B r_w^2 P + \mu_B Mg \quad (10)$$

式中: μ_B 为基盘与工件之间的摩擦力。

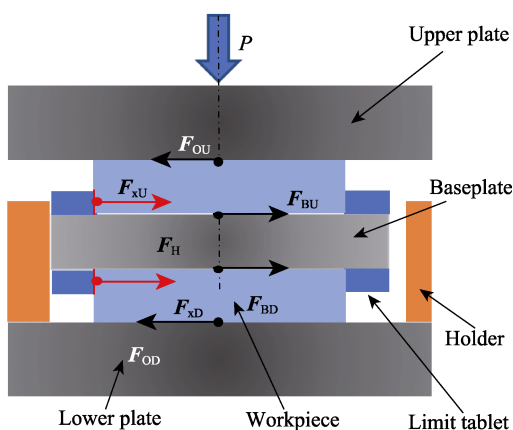


图 2 工件-夹具系统加工时的受力分析图

Fig.2 Force analysis diagram of workpiece-fixture system during processing

定义摩擦因数比 k_{OB} 为基盘-工件之间的摩擦因数 μ_B 与研磨盘-工件之间摩擦因数 μ_0 之比, 其表达式如式(11)所示。

$$k_{OB} = \frac{\mu_B}{\mu_0} \quad (11)$$

当 $F_{OD} - F_{BD} < 0$ 时, 下盘对工件施加的摩擦力不足以克服基盘对工件的摩擦力, 下盘无法驱动工件产生相对运动趋势。此时 $F_{xD} = 0$, 即限位片与工件之间

不存在力的作用。研磨盘对工件施加的摩擦力转变为对工件-夹具系统施加的摩擦力, 驱动夹具在行星轮中发生运动趋势。行星轮受太阳轮及外齿圈驱动发生公转及自转运动, 行星轮的自转、公转运动以及研磨盘的运动, 使得基盘产生绕行星轮槽孔中心为圆心的自转运动, 此时工件随夹具的运动而运动。

当 $F_{OD} - F_{BD} > 0$ 时, 工件受到研磨盘的摩擦力大于基盘对工件施加的摩擦力, 此时工件与限位片发生接触, 限位片对工件施加的反向作用力 F_{xD} 使得限位片与工件之间产生摩擦力 F_{xDf} , 其表现为阻碍工件产生受研磨盘驱动的运动。 F_{xD} 及 F_{xU} 的表达式为:

$$|F_{xD}| = |F_{OD}| - |F_{BD}| = (\pi r_w^2 P + mg)(\mu_0 - \mu_B) + \mu_B Mg \quad (12)$$

$$|F_{xU}| = |F_{OU}| - |F_{BU}| = \mu_0 \pi r_w^2 P - \mu_B (\pi r_w^2 P + Mg) \quad (13)$$

对比式(12)、式(13)及式(5)可以看出, 层叠夹持方式下工件施加给限位片的力远小于传统双平面加工方式下工件施加在行星轮上的力, 因此层叠夹持方式能有效解决由行星轮强度及变形导致超薄蓝宝石晶片难以加工的难题。

限位片在径向力下发生弹性变形的变形量为 Δr , 限位片的夹持厚度为 Δh , 定义限位片的宽度为 q , 则工件与限位片之间的应变为 $\varepsilon = \Delta r / q$, 根据材料应变及应力公式可得关于 Δr 的求解公式:

$$\Delta r = \frac{|F_{xD}| q}{2r_w \Delta h E \arcsin \frac{\sqrt{2r_w \Delta r - \Delta r^2}}{r_w}} \quad (14)$$

式中: E 为限位片材料的弹性模量。

通过式(14)可计算求得变形量 Δr 关于夹持厚度 Δh 的关系式, 故此时限位片与工件之间的接触面积 S 关于夹持厚度 Δh 的关系如式(15)所示。

$$S = 2r_w \Delta h \arcsin \frac{\sqrt{2r_w \Delta r - \Delta r^2}}{r_w} \quad (15)$$

限位片受到的剪切强度为:

$$\tau = \frac{|F_{xD}|}{S} = \frac{(\pi r_w^2 P + mg)(\mu_0 - \mu_B) + \mu_B Mg}{2r_w \Delta h \arcsin \frac{\sqrt{2r_w \Delta r - \Delta r^2}}{r_w}} \quad (16)$$

通过对限位片的剪切强度计算, 验证限位片受到剪切强度的可靠性, 从而初步确定限位片材料。

2 摩擦力试验及限位片选择

2.1 不同材料基盘摩擦力试验及分析

为分析不同材质基盘在层叠夹持方式下工件与基盘之间的摩擦学行为, 对吸附表面进行摩擦力试验观测, 并建立摩擦因数关于压力的拟合方程。本试验的基本思路是在两平面吸附后, 在不同压力下测量 3 种不同材料基盘的摩擦力及摩擦因数, 具体试验参数如表 1 所示。

表 1 切向力试验参数
Tab.1 Tangential force test parameters

Parameter	Value
Pressure/N	0.8, 2.8, 4.8, 6.8, 8.8
Move speed of X axis/(mm·s ⁻¹)	0.1
Test material	
Ra/nm	4.923
PV/μm	3.415
Contact state	Dry, Wet (droplet volume 50 μL)
Material of baseplate	Stainless steel, Al alloy, iron
	Stainless steel 68.2
Roughness of baseplate/nm	Al alloy 60.2
	Iron 63.8
Flatness of baseplate/μm	10

图3及图4为不同材料分别在干摩擦状态下以及水膜吸附状态下不同材料的摩擦力及其拟合摩擦因数。对比图3a及图3b可以看出,在干摩擦状态下不

锈钢材料与蓝宝石之间的摩擦力最大,铸铁次之,铝合金最小。对于两个表面之间摩擦力的成形方式,存在诸多的讨论,其中较为普遍的理论为基于微凸体之间的粘着以及犁沟作用。从粘着角度来看,两个表面间由于微凸体的接触及变形,两者之间形成极大的粘着力,而粘着力的大小与屈服极限以及材料的剪切强度有关,不锈钢及铸铁材料的剪切强度远大于铝合金的剪切强度,因此在发生切向位移时,其剪切力远大于铝合金的剪切力,同时不锈钢材料的剪切强度大于铸铁材料;在犁沟效应来看,在同等粗糙度条件下,犁沟力受屈服极限影响,屈服极限越大,犁沟力越大。

对比图3及图4可以看出,在两者被吸附状态下,铸铁及不锈钢材料均有不同程度的摩擦力增大现象,液滴在粗糙表面的微凸峰之间产生了诸如范德华力之类的粘附力,使得两个接触的微凸峰之间的切向粘着力增大,此时粘着力对切向力的增大效果高于水在两个表面间的润滑作用,使得两个表面间的摩擦力增大。

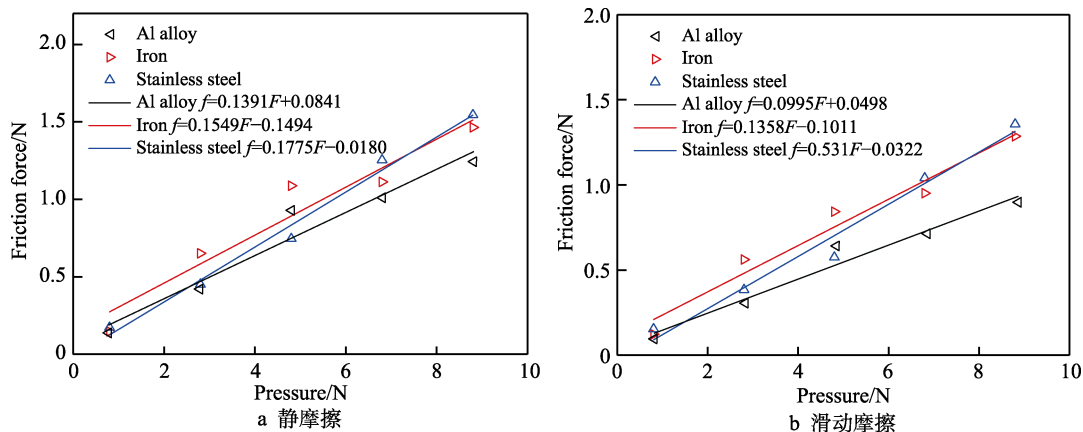


图3 干摩擦状态下工件与基盘间的摩擦力及摩擦因数

Fig.3 Friction force and coefficient of friction between workpiece and baseplate under dry friction: a) static friction, b) sliding friction

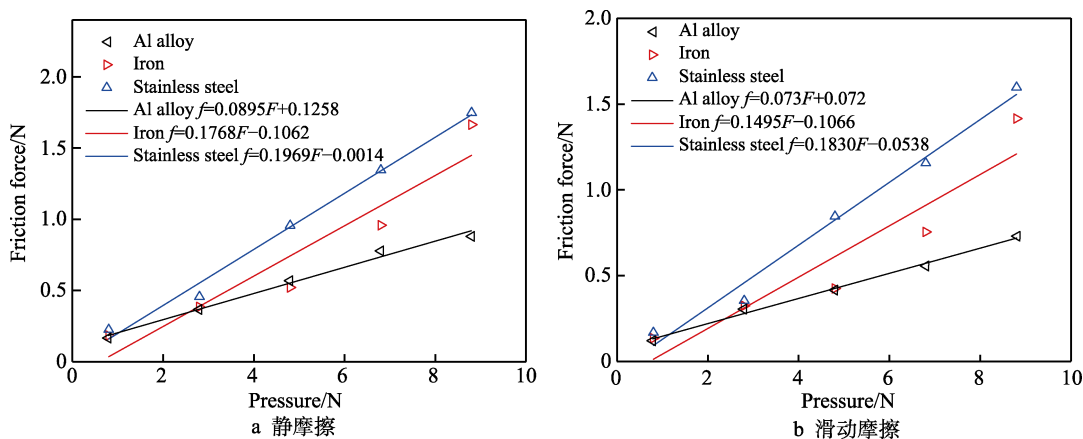


图4 工件与基盘间的湿摩擦力及湿摩擦因数

Fig.4 Friction and coefficient of friction between workpiece and baseplate under wet lubrication: a) static friction, b) sliding friction

2.2 基盘及限位片材料的选择

根据图4的分析可知,在夹持阶段工件与基盘间的摩擦因数 μ_B 分别为:铝合金 $\mu_B=0.073$,不锈钢 $\mu_B=$

0.1830,铸铁 $\mu_B=0.1495$ 。本例分析选择滑动摩擦因数最小的铝合金作为基盘材料,由于在加工过程中工件与抛光垫之间存在抛光液,在相对较高的线速度下抛光液对工件与抛光垫之间有较好的润滑作用,故本

例分析定义 $\mu_0=0.5$ 。结合式(12)及式(16)所示的限位片径向受力公式及限位片剪切强度计算公式,可得工件施加在限位片上的剪切强度为:

$$\tau=\frac{0.427(\pi r_w^2 P+mg)+0.073 Mg}{2r_w \Delta h \arcsin \frac{\sqrt{2r_w \Delta r-\Delta r^2}}{r_w}} \quad (17)$$

定义工件半径 $r_w=25.4\text{ mm}$,基盘及工件质量 $m=1\text{ kg}$,工件质量为 $M=0.003\text{ kg}$,夹持厚度 $\Delta h=0.1\text{ mm}$ 。当采用玻璃纤维板作为限位片材料时,玻璃纤维的弹性模量 $E=38\text{ GPa}$,极限剪切强度为 53.9 MPa 。结合式(17),工件受到 0.1 MPa 的压力时,限位片受到的剪切强度 $\tau=53.4\text{ MPa}<53.9\text{ MPa}$,但考虑加工过程中的冲击等因素,在后续的加工试验中,将工件受到的压力限制在 0.1 MPa 以内。

在实际加工中,基盘材料应选择摩擦因数较大的材料,降低工件对限位片的径向作用力,因此在 3 种材料中选择不锈钢材料制作基盘。

3 限位片夹持厚度试验研究

由前文研究可知,选择不锈钢材料以及玻璃纤维板作为层叠式夹具的基盘及限位片材料。限位片夹持厚度对超薄蓝宝石的加工厚度具有重要影响,进行压力试验来进一步研究限位片的可承受压力及失效形式。

3.1 试验设计

为了比较不同夹持厚度下限位片夹持的可靠性,对限位片夹持下的工件施加不同的载荷,以测试限位片在该夹持厚度下能承受的最大加工载荷。在试验过程中,限位片的厚度逐渐减小,具体试验参数如表 2 所示。为保证试验的可靠性,本次试验采用 Nanopoli-100 单面抛光机进行加工,如图 5 所示,盘面直径为 $\phi 300\text{ mm}$,可加工最大尺寸工件 $\phi 100\text{ mm}$ 。

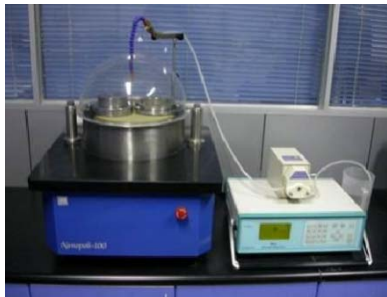


图 5 Nanopoli-100 单面抛光机
Fig.5 Polishing equipment of Nanopoli-100

3.2 限位片失效结果及分析

本次试验结果如图 6 所示。在本次试验中,夹持厚度为 0.152 mm 的试验组并未发生碎裂,因此并未在图中表示。从图 6 中可以看出,随着夹持厚度的增

表 2 试验参数
Tab.2 Experimental parameter

Parameter		Value
Slurry	Abrasive	SiO ₂
	Abrasive size/nm	80
	Quality score/wt%	5
	pH	12.2
Rotation speed of plate/(r·min ⁻¹)		60
Ultra-thin sapphire wafer	Diameter/mm	φ50.8
	Flatness/μm	3.760
	Thickness/mm	0.17
Thickness of limiter/mm		0.082, 0.105, 0.119, 0.152
Hight difference of baseplate/μm		10
Quality of baseplate/kg		2.1
Weight/kg		0.7
Number of weight		1-15
Processing time/h		1
Flow rateof slurry/(mL·min ⁻¹)		25

加,限位片所能承受的法向力的极限值随之增加,但并非线性变化。材料的极限剪切强度受材料性能的影响,当材料的变形量为定值时,结合式(15)及式(16)可知,随着夹持厚度的增加,限位片发生变形的面积随之增大,能承受更大的法向力。

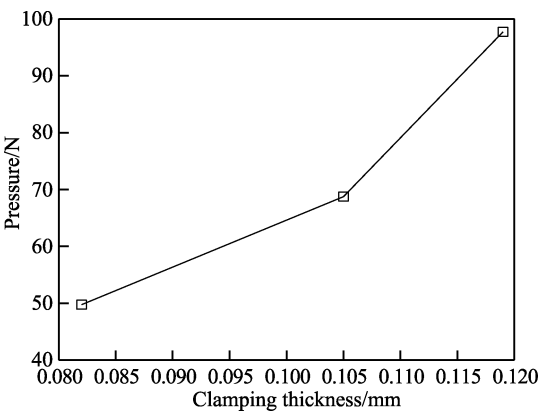


图 6 夹持厚度与加工压力的关系
Fig.6 Relationship between clamping thickness and pressure

图 7a 为限位片的失效形式,可以看出限位片的失效状态为限位区域被蓝宝石边缘切割,从而形成斜坡,无法对工件进行限位。通过观察进一步发现限位片失效边缘与基盘边缘处存在较小的高度差。失效分析图如图 7b 所示,蓝宝石在加工过程中,由于基盘及蓝宝石晶片存在平面度变化,因此在压力的作用下,晶片与基盘表面贴合后边缘发生翘曲,抛光垫施加在工件上的摩擦力驱动工件挤压限位区域,限位区域与蓝宝石晶片间的接触区域减小,受到的剪切应力急剧增大,破坏限位片的材料结构,促使限位片失效。

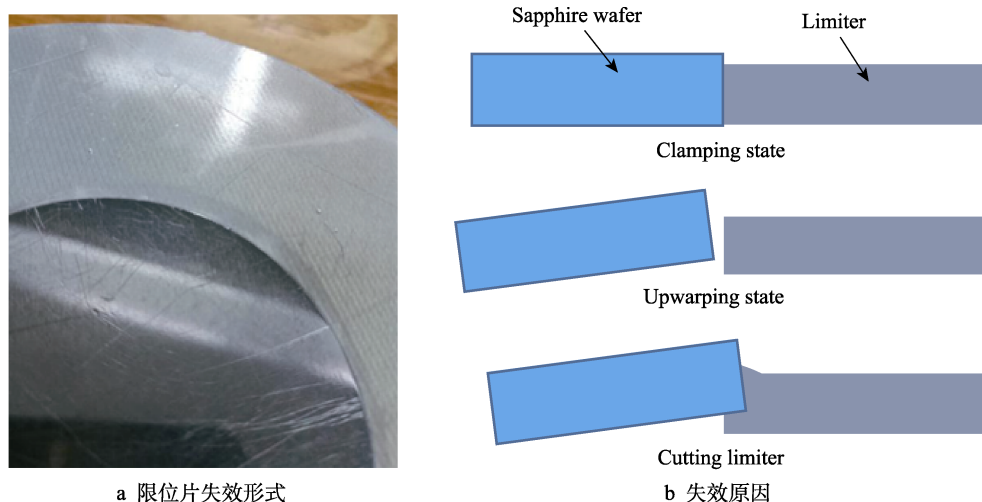


图 7 限位片失效形式及其原因
Fig.7 Failure form and reason of limiter: a) failure mode in experiment, b) reason for failure

4 结论

1) 通过与传统双平面加工方式行星轮受到的力进行对比,层叠式夹具受到工件施加的力相对较小,更适合于超薄蓝宝石晶片的加工。

2) 选择 3 种同条件下的材料进行摩擦力试验,摩擦力的大小与材料物理性能有关,不锈钢材料的摩擦因数最高,铸铁次之,铝合金最低,不锈钢材料更适合用于制作层叠式夹具的基盘。在液滴的吸附作用下,不锈钢及铸铁发生了不同程度的摩擦因数增大的现象,说明水膜吸附在特定情况下对摩擦因数有增益效果。

3) 限位片材料为玻璃纤维板时,限位片夹持厚度与加工压力之间的变化呈现非线性变化。限位片的失效与基盘表面高度差有关,限位区域被蓝宝石边缘切割形成斜坡,导致限位片失效。

参考文献:

- [1] WILLIAMS W, MULLANY B, PARKER W, et al. Using quantum dots to evaluate subsurface damage depths and formation mechanisms in glass[J]. *Cirp annals-manufacturing technology*, 2010, 59(1): 569-572.
- [2] 杨利军. 大尺寸硅片真空夹持系统的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
YANG Li-jun. Study on vacuum clamping system for silicon wafer[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.
- [3] 胡夕伦, 闫宝华, 刘琦. LED 晶片减薄中贴片方法对减薄厚度均匀性的影响[J]. *信息技术与信息化*, 2018(2): 163-165.
HU Xi-lun, YAN Bao-hua, LIU Qi. Effect of SMD method on thinning thickness uniformity in LED thinning[J]. *Information technology and informatization*, 2018(2): 163-165.
- [4] LI Z Y, DENG Z H, HU Y X. Effects of polishing parameters on surface quality in sapphire double-sided CMP[J]. *Ceramics international*, 2020, 46(9): 13356-13364.
- [5] MICHIO M, UNEDA D, KOSUKE G. Development of measurement device for polishing pad surface asperity on the upper platen of a double-sided polisher and its application for evaluation of polishing characteristics[J]. *Journal of the Japan Society for Abrasive Technology*, 2017, 453: 535-536.
- [6] 黄晟, 杭伟, 陈芝向, 等. 不锈钢基板表面粗糙度对水膜吸附夹持的影响[J]. *表面技术*, 2019, 48(9): 97-103.
HUANG Sheng, HANG Wei, CHEN Zhi-xiang, et al. Effect of surface roughness of stainless-steel substrate on water-film adhesion[J]. *Surface technology*, 2019, 48(9): 97-103.
- [7] LEGTENBERG R, TILMANS H A, ELDERS J, et al. Stiction of surface micromachined structures after rinsing and drying: Model and investigation of adhesion mechanisms[J]. *Sensors and actuators A: Physical*, 1994, 43(1-3): 230-238.
- [8] MITRA U, ROSSI B, KHAN B. Mechanism of plasma hydrogenation of polysilicon thin-film transistors[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1991, 138(11): 3420-3424.
- [9] TAS N, SONNENBERG T, JANSEN H, et al. Stiction in surface micromachining[J]. *Journal of micromechanics and microengineering*, 1996, 6(4): 385-397.
- [10] ZHAO Y P, WANG L S, YU T X. Mechanics of adhesion in MEMS: A review[J]. *Journal of adhesion science & technology*, 2003, 17(4): 519-546.
- [11] VAN SPENGEN W M, PUERS R, DE WOLF I. On the physics of stiction and its impact on the reliability of microstructures[J]. *Journal of adhesion science & technology*, 2003, 17(4): 563-582.
- [12] BRADLEY R S. The cohesive force between solid surfaces and the surface energy of solids[J]. *London Edinburgh & Dublin philosophical magazine & journal of science*, 1932, 13(86): 853-862.

- [13] DERJAGUIN B V. Friction and adhesion IV: The theory of adhesion of small particles[J]. *Kolloid zeits*, 1934, 69: 155-164.
- [14] DE BOER J H. The influence of van der Waals' forces and primary bonds on binding energy, strength and orientation, with special reference to some artificial resins[J]. *Transactions of the Faraday Society*, 1936, 32: 10-37.
- [15] HAMAKER H C. The London van der Waals attraction between spherical particles[J]. *Physica*, 1937, 4: 56.
- [16] PLAMEN V P, RADOEV I T I B P. Capillary bridges: A tool for three-phase contact investigation[J]. *Surface energy*, 2015, 23: 324
- [17] PETKOV P V, RADOEV B, KLIMENT S, et al. Investigation of single and binary of "Sandwich" type convex liquid capillary bridges, stretched between two flat surfaces[J]. *Colloids and interfaces*, 2019, 3(4): 68.
- [18] PETKOV P V, RADOEV B P. Statics and dynamics of capillary bridges[J]. *Colloids and surfaces A: Physico-chemical and engineering aspects*, 2014, 460: 18-27.
- [19] TADMOR R, DAS R, GULEC S, et al. Solid-liquid work of adhesion[J]. *Langmuir*, 2017, 33(15): 3594-3600.
- [20] GREENWOOD J A, WILLIAMSON J B P. Contact of nominally flat surfaces[J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1966, 295(1442): 300-319.
- [21] PERSSON B N. Theory of rubber friction and contact mechanics[J]. *The journal of chemical physics*, 2001, 115(8): 3840-3861.
- [22] CARBONE G, LORENZ B, PERSSON B N, et al. Contact mechanics and rubber friction for randomly rough surfaces with anisotropic statistical properties[J]. *The European physical journal E*, 2009, 29(3): 275-284.
- [23] CAI P, WANG Y, WANG T, et al. Improving tribological behaviors of friction material by mullite[J]. *Tribology international*, 2016, 93: 282-288.
- [24] ALEMANI M, GIALANELLA S, STRAFFELINI G, et al. Dry sliding of a low steel friction material against cast iron at different loads: Characterization of the friction layer and wear debris[J]. *Wear*, 2017, 376: 1450-1459.
- [25] ARRAZOLA P J, ATTIA H, MELKOTE S N, et al. Advances in material and friction data for modelling of metal machining[J]. *Cirp annals-manufacturing technology*, 2017, 66(2): 731-754.

(上接第 350 页)

- [18] 李海燕, 崔业翔, 王晴, 等. 溶剂挥发法制备聚砜包覆桐油自修复微胶囊[J]. *中国塑料*, 2016, 30(5): 34-40.
LI Hai-yan, CUI Ye-xiang, WANG Qing, et al. Preparation of polysulfone containing tung oil self-healing microcapsules by solvent evaporation method[J]. *China plastics*, 2016, 30(5): 34-40.
- [19] 倪卓, 杜学晓, 王帅, 等. 微胶囊对微胶囊/环氧树脂复合材料增韧作用[J]. *复合材料学报*, 2011, 28(4): 63-69.
NI Zhuo, DU Xue-xiao, WANG Shuai, et al. Effects of microcapsules on toughening properties for microcapsule/epoxy composites[J]. *Acta materia compositae sinica*, 2011, 28(4): 63-69.
- [20] LI H, CUI Y, LI Z, et al. Fabrication of microcapsules containing dual-functional tung oil and properties suitable for self-healing and self-lubricating coatings[J]. *Progress in organic coatings*, 2018, 115: 164-171.
- [21] JIN F, LI Y, HU S, et al. Poly (styrene-divinylbenzene) microspheres prepared by seed swelling polymerization in the presence of tung oil methyl esters[J]. *Materials science forum*, 2011, 675-677: 341-344.
- [22] TONG X, ZHANG T, YANG M, et al. Preparation and characterization of novel melamine modified poly(urea-formaldehyde) self-repairing microcapsules[J]. *Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects*, 2010, 371(1-3): 91-97.
- [23] ZHOU X, MAO J, QIAO Z. Electroless plating of copper layer on surfaces of urea-formaldehyde microcapsule particles containing paraffin for low infrared emissivity[J]. *Particuology*, 2016, 24: 159-163.
- [24] 第五方. 不锈钢表面复合型缓蚀剂的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
DI-WU F. The study of corrosion inhibitor compound on the surface of stainless steel[D]. Xi'an: Xidian University, 2009.
- [25] TONG X, LI C. Preparation and characterization of self-healing microcapsules containing two-component[J]. *Advanced materials research*, 2013, 734-737: 2176-2180.
- [26] 张勇, 樊伟杰, 张泰峰, 等. 涂层自修复技术研究进展[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2019, 39(4): 299-305.
ZHANG Yong, FAN Wei-jie, ZHANG Tai-feng, et al. Review of intelligent self-healing coatings[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2019, 39(4): 299-305.

(上接第 368 页)

- [22] BLACK P J. The structure of FeAl_3 . I[J]. *Acta crystallographic section A*, 1955, 8: 43-48.
- [23] KORCHEF A, NJAH N, CHAMPION Y, et al. Material flow during equal channel angular pressing of aluminum containing $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ precipitates[J]. *Advanced engineering materials*, 2004, 6(4): 222-228.
- [24] BOULOUMA A, DRICI A, BENALDJIA A, et al. The formation of $(\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}, \text{Al}_{13}\text{Fe}_4)$ phases from Al-Fe-Si system by TE mode[C]// 4th international congress in advances in applied physics and materials science. USA: [s. n.], 2015: 1653.
- [25] KORCHEF A, CHAMPION Y, NJAH N. X-ray diffraction analysis of aluminum containing $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ processed by equal channel angular pressing[J]. *Journal of alloys and compounds*, 2007, 427: 176-182.