

文章编号 1004-924X(2024)01-0084-11

超精密磨削 YAG 晶体的脆塑转变临界深度预测

敖萌灿¹, 黄金星¹, 曾毓贤², 吴跃勤², 康仁科¹, 高 尚^{1*}

(1. 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;

2. 华侨大学 制造工程研究院, 福建 厦门 361021)

摘要: 钇铝石榴石(YAG)晶体是制造固体激光器的重要材料,超精密磨削是加工 YAG 晶体等硬脆材料零件的重要方法,研究硬脆材料加工表面的微观变形、脆塑转变机理对超精密磨削加工具有重要的指导作用。为了实现 YAG 晶体低损伤磨削加工,获得高质量表面,基于弹性接触理论和压痕断裂力学,通过分析单磨粒划擦作用下材料表面的变形过程,考虑材料的弹性回复、微观下力学性能的尺寸效应,建立了脆塑转变临界深度的预测模型,并计算得到 YAG 晶体的脆塑转变临界深度为 66.7 nm。在此基础上,通过不同粒度砂轮超精密磨削 YAG 晶体试验对建立的脆塑转变临界深度预测模型进行验证,并计算不同粒度砂轮在相应工艺条件下的磨粒切深。结果表明,磨粒切深高于脆塑转变临界深度时,YAG 晶体磨削表面材料以脆性方式被去除,磨削表面损伤严重;磨粒切深低于脆塑转变临界深度时,磨削表面材料以塑性方式被去除,能够获得高质量磨削表面,加工表面粗糙度达到 1 nm。建立的脆塑转变临界深度预测模型能够为 YAG 晶体的低损伤超精密磨削加工提供理论指导。

关键词: 超精密磨削;YAG 晶体;纳米压痕;纳米划痕;脆塑转变

中图分类号: TN305.2;O786 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243201.0084

Prediction of brittle-to-ductile transition depth in ultra-precision grinding YAG crystals

AO Mengcan¹, HUANG Jinxing¹, ZENG Yuxian², WU Yueqin², KANG Renke¹, GAO Shang^{1*}

(1. State Key Laboratory of High-performance Precision Manufacturing, Dalian University of
Technology, Dalian 116024, China;

2. Institute of Manufacturing Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

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

Abstract: Yttrium aluminum garnet (YAG) crystals are widely used for manufacturing solid-state lasers, and ultraprecision grinding is critical for machining hard and brittle material parts, such as YAG crystals. The investigation of microdeformation and brittle-to-ductile transition mechanisms of hard and brittle material-machined surfaces is necessary for ultraprecision grinding. Based on the elastic-plastic contact theory and indentation fracture mechanics, a model for predicting the critical depth of brittle-to-ductile transitions was established to achieve low-damage grinding of YAG crystals and obtain high-quality surfaces. The deformation process of the material surface under the action of a single abrasive scratch was analyzed, consid-

收稿日期:2023-09-14;修订日期:2023-10-11.

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2022YFB3605902);国家自然科学基金资助项目(No. 51975091, No. 51991372)

ering the elastic recovery of the material and the size effect of micromechanical properties. The critical depth of the brittle-to-ductile transition of the YAG crystal is 66.7 nm. The proposed prediction model of the critical depth of the brittle-to-ductile transition was verified by ultraprecision grinding of YAG crystals with grinding wheels of different grain sizes. In addition, the grit-cutting depths of different grain-size grinding wheels under the corresponding process conditions were calculated. The results show that when the grit-cutting depth is more extended than the critical depth of the brittle-to-ductile transition, the surface material of the YAG crystal is removed in a brittle manner, and the grinding surface is severely damaged. However, when the grit-cutting depth is less than the critical depth of the brittle-to-ductile transition, the grinding surface material is removed in a ductile manner, high-quality grinding surface can be obtained, and the machined surface roughness can reach 1 nm. The proposed model for predicting the critical depth of the brittle-to-ductile transition provides theoretical guidance for low-damage ultraprecision grinding of YAG crystals.

Key words: YAG crystal; nano-indentation; nano-scratch; brittle-to-ductile transition; ultra-precision grinding

1 引言

钇铝石榴石(YAG)晶体属于立方晶系,具备良好的光学性能(如光学均匀性、光学透射率等)和热力学性能,在力学性能和化学稳定性上接近蓝宝石晶体,且没有双折射效应^[1-3],广泛应用于制备固体激光器增益介质,在军用和民用领域具有广阔的应用前景^[4-7]。工业上主要采用提拉法生产YAG晶体,该方法生产的YAG晶体呈棒状,需要经过“外圆磨削-切片-研磨-抛光”的工艺流程获得高面形精度和高表面质量的YAG晶片^[8-10]。YAG晶体是一种典型的硬脆材料,采用金刚石线锯对YAG晶棒进行切片加工时,晶片表面会产生大量的切痕、微裂纹等损伤,形成较大深度的损伤层,需要进一步通过研磨和抛光等工艺去除损伤层。其中,研磨工艺存在加工效率低、表面损伤难控制和面形精度不稳定等缺点,会影响后续抛光加工的效率和成本^[11-12]。因此,国内外学者将超精密磨削技术应用于硬脆材料基片的高质量加工。目前,超精密磨削已广泛应用于单晶Si、单晶SiC等硬脆晶体基片的高质量加工中^[13-16],其加工效率远高于研磨,且工件旋转法磨削工件的面形精度容易控制,通过采用细粒度的砂轮和优化磨削参数还能够使磨削表面以塑性域方式去除材料,获得低损伤表面,进而减小抛光的损伤去除余量,提高基片的抛光效率^[14-15]。

为了实现YAG晶体的低损伤磨削加工,很多学者对YAG晶体的超精密磨削工艺进行了系统的研究。研究表明,通过控制磨削加工的砂轮粒度,降低磨粒切深,可以使YAG磨削表面由裂纹、破碎坑共存的“脆塑共存表面”转变为“塑性磨削表面”。塑性磨削表面无任何脆性损伤、剥落,只有塑性磨削痕迹,具有较高的表面质量^[17-18]。因此,研究YAG晶体超精密磨削中的脆塑转变深度,对于实现YAG无脆性损伤的“塑性域”加工具有重要意义。现有研究主要围绕硬脆材料加工过程中表面的材料去除方式展开。Bifano等^[19]通过开展大量工程陶瓷和光学玻璃等硬脆材料的塑性域磨削试验,首次提出硬脆材料“塑性域”加工的概念,并基于压痕断裂力学建立临界深度与硬脆材料力学性能的数学关系模型,结合大量试验结果确定了模型中的比例系数,首次建立了硬脆材料脆塑转变临界深度的预测模型。Huang等^[20]同样开展磨削试验,详细地分析Bifano建立的模型并进行修正,提高了模型预测精度。Arif等^[21]假设脆性材料加工中材料去除模式的转变伴随着能量消耗模式的相应转变,基于比切削能从塑性变形模式转变为断裂模式的变化,建立了脆性材料脆塑过渡预测模型。Venkatachalam等^[22]认为应力强度因子等于材料断裂韧性时即为脆塑变形过渡点,基于约翰逊库克材料模型并采用Irwin应力强度因子计算模型,建立了临界切削厚度预测模型。李琛^[17]和李洪

刚^[23]等基于弹塑性接触理论,详细分析了单颗金刚石压头划擦作用下硬脆材料表面的变形过程,分别建立了脆塑转变临界深度预测模型。然而,现有的脆塑转变临界深度预测模型中,各项材料力学性能都以测得稳定值代入计算,忽略了磨粒与材料不同深度接触区域的材料力学性能差异。大量研究表明,微观尺度下 YAG 等硬脆材料的硬度、弹性回复率等力学性能随压痕深度的改变会发生明显变化^[24-26],人们认为硬脆材料的微观力学性能具有明显的尺寸效应^[27-28]。这导致目前的理论研究结果与实验结果仍存在一定误差。

本文基于弹塑性接触理论和压痕断裂力学,通过分析单磨粒划擦作用下材料表面的变形过程,考虑材料的弹性回复、微观下力学性能的尺寸效应,建立脆塑转变临界深度预测模型,通过纳米压、划痕试验测得 YAG 晶体的微观力学性能代入预测模型,计算 YAG 晶体超精密磨削的脆塑转变临界深度,并通过不同粒度金刚石砂轮超精密磨削 YAG 晶体试验验证了模型的可靠性。

2 试 验

试验材料为透明的 YAG 晶体,样件尺寸为 10 mm×10 mm,厚 1 mm,已抛光预处理使初始表面粗糙度 S_a 都处于 0.5 nm 以内,如图 1 所示。

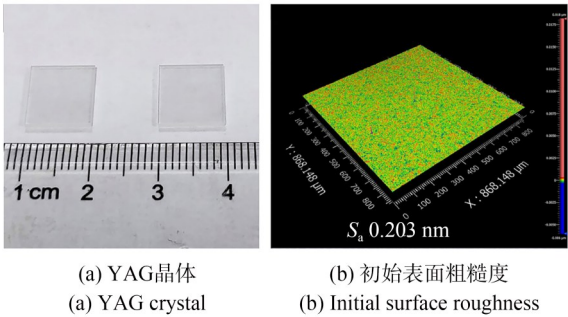


图 1 试验样品
Fig. 1 Test samples

2.1 纳米压痕试验

纳米压痕试验采用美国 KLA 公司的 Nano Indenter G200,如图 2(a)所示。采用的金刚石压头为标准 Berkovich(玻氏)压头,尖端半径 $R \approx 20$ nm,如图 2(b)所示。压痕试验参数如表 1 所示。

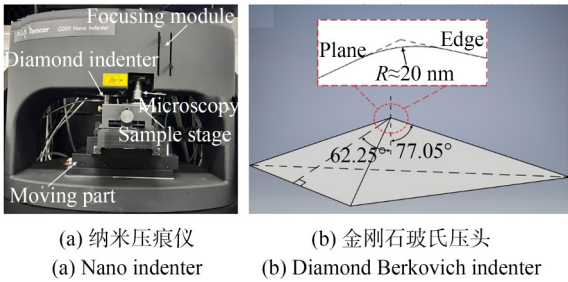


图 2 试验设备
Fig. 2 Experimental equipment

表 1 纳米压痕试验参数

Tab. 1 Nano-indentation test parameters

Indenter type	Maximum load force/mN	Time of loading/s	Time of holding/s	Time of unloading/s
Berkovich indenter	0.2, 1, 5, 10, 40, 70, 100, 300, 500	20	20	20

2.2 准静态纳米划痕试验

纳米划痕试验采用美国 KLA 公司的 Nano Indenter G200,如图 2(a)所示。有研究表明,划痕速率的提高会使硬脆材料表面的变形情况发生极大变化^[29-30]。为避免应变率效应的影

响,玻氏压头选择低划痕速率以棱朝前模式进行准静态下的试验,试验参数如表 2 所示,线性加载划痕过程如图 3 所示。使用 JSM-7610FPlus 场发射扫描电镜(JEOL,日本)观察划痕表面。

表 2 准静态纳米划痕试验参数

Tab. 2 Quasi-static nano-scratch test parameters

Loading method	Normal force/mN	Scratch speed/ $(\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	Scratch length/ μm	Indenter direction
Linear loading	0—100	0.1	100	Edge-forward

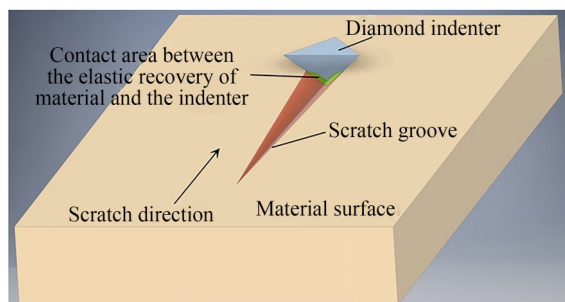


图3 棱朝前线性加载纳米划痕示意图

Fig. 3 Schematic diagram of linear loading nano-scratch with edge forward

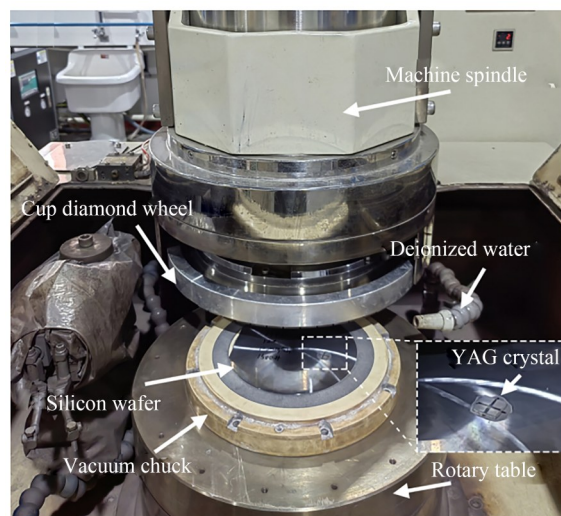
2.3 超精密磨削试验

图4所示为VG401MKII超精密磨床(OKAMOTO, 日本), 主轴配有高精度空气轴承, 轴向跳动和径向跳动可限制在 $0.05\ \mu\text{m}$ 以内。磨床的轴向刚度为 $1\ 176\ \text{N}/\mu\text{m}$, 径向刚度为 $205.8\ \text{N}/\mu\text{m}$ 。该机床采用工件旋转法磨削方式。YAG晶体用石蜡固定在硅片上距中心 $35\ \text{mm}$ 处, 硅片通过真空吸盘吸附在工作台上, 并使中心重合。杯型砂轮直径为 $350\ \text{mm}$, 磨削层通过工作台中心, 磨削时砂轮和工件分别绕各自轴线旋转, 同时砂轮沿轴向进给实现材料去除, 冷却液采用去离子水。磨削试验参数如表3所示, 为完全消除前道工艺产生的表面/亚表面损伤对试验结果的影响, 在磨削试验中的材料去除厚度确定为 $50\ \mu\text{m}$ 。使用JSM-7610FPlus场发射扫描电镜、NewView9000型3D表面轮廓仪(ZYGO, 美国)观察磨削后YAG晶体表面的粗糙度和形貌。

3 试验结果

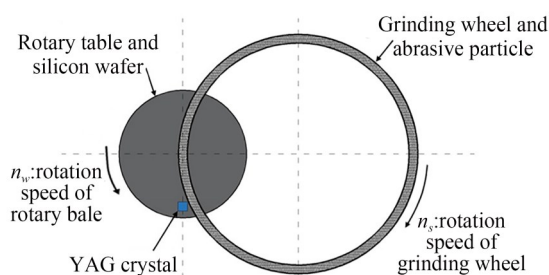
3.1 纳米压痕试验结果

如图5所示, 随着法向施加载荷的减小, 对应



(a) 工件旋转磨削机床

(a) Workpiece rotation grinding machine



(b) 相对运动示意图

(b) Schematic diagram of relative motion

图4 超精密磨削设备及方法

Fig. 4 Ultra-precision grinding equipment and method

卸载曲线最高点处的斜率逐渐变小, 同时整体变形中弹性变形量占比有所增大。首先, 基于Oliver-pharr分析法计算得到接触刚度, 进而获得YAG的力学性能^[31]。试验结果表明, 载荷较小时, 计算获得的弹性模量、微纳米硬度以及弹性

表3 工件旋转法超精密磨削试验参数

Tab. 3 Parameters of workpiece rotation ultra-precision grinding tests

Mesh number	Grit size/ μm	Wheel bond	Wheel rotation speed/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	Wafer rotation speed/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	Feed rate/($\mu\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)
#325	24.0	Resin	2 399	120	10
#600	12.5	Resin			
#1 500	4.5	Vitrified			
#3 000	2.5	Resin			

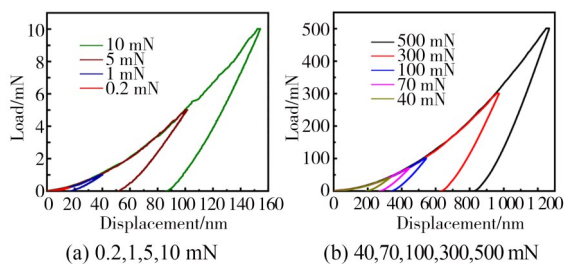


图 5 纳米压痕载荷深度曲线

Fig. 5 Load depth curves of nano-indentation

回复率越高;随着载荷的逐渐增大,材料的力学性能降低并趋于稳定,具有明显的尺寸效应,如图 6 所示。随载荷的增大,弹性回复率也由 70.5% 降低趋近稳定值 35.2%。YAG 晶体的弹性模量 E 、微纳米硬度 H 分别稳定在 325 GPa 和 20 GPa。

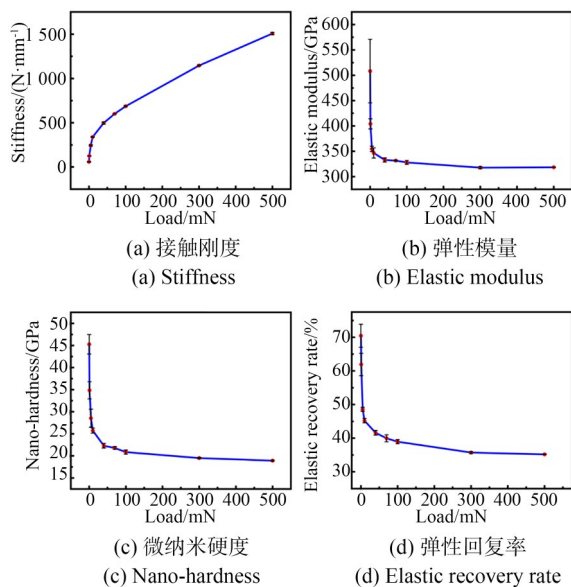


图 6 YAG 微观力学性能

Fig. 6 Micro-mechanical properties of YAG

3.2 准静态纳米划痕试验结果

划痕表面如图 7 所示,在距初始端 $5.5 \mu\text{m}$ 处首次观察到沟槽内裂纹这一脆性变形特征,视此处为脆塑转变临界位置。因为线性加载模式中载荷(由 0 mN 逐步增大到 100 mN)与划痕位移(从初始位置到 $100 \mu\text{m}$ 处)相对应,可确定该位置对应的载荷为无裂纹产生的临界载荷,即 $P^* = 5.5 \text{ mN}$ 。

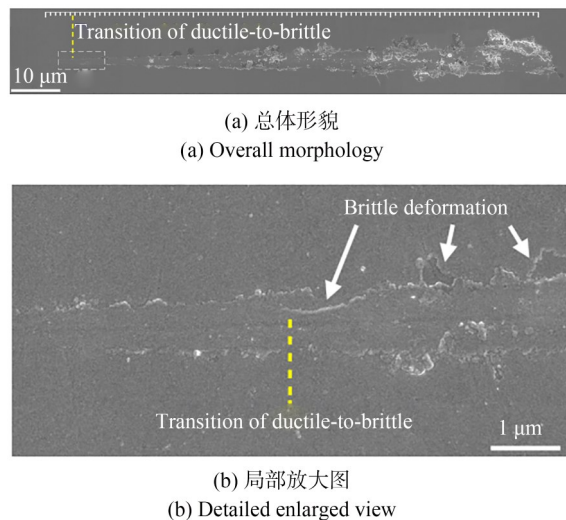


图 7 YAG 准静态划痕沟槽的表面形貌

Fig. 7 Surface morphology of YAG quasi-static scratch groove

3.3 超精密磨削试验结果

超精密磨削试验后 YAG 晶体表面的形貌及粗糙度分别如图 8 和图 9 所示。对比不同砂轮磨削试验的加工表面,可以观察到 #325, #600 砂轮磨削表面存在破碎坑、裂纹等损伤, #325 砂轮磨削表面的破碎坑尺寸更显著且表面粗糙度 S_a 接近微米级。由此表明, #325, #600 砂轮磨削加工时,晶体表面材料的去除方式以脆性断裂为主。#1 500, #3 000 砂轮磨削表面则大幅改善,磨粒

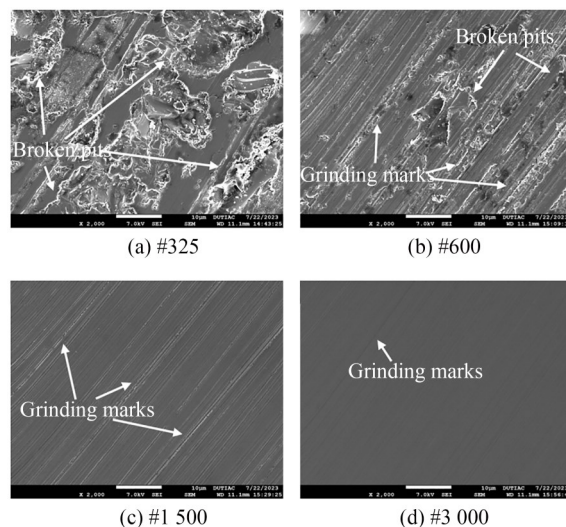


图 8 磨削试验样件的表面形貌

Fig. 8 Surface morphology of grinding test samples

划擦过的磨削纹路规则排列,表面没有发现破碎坑、裂纹等脆性损伤。#3 000砂轮磨削表面的细微磨纹更为平整,表面粗糙度 S_a 接近 1 nm。#1 500, #3 000 砂轮磨削以塑性流动方式去除晶片表面材料。

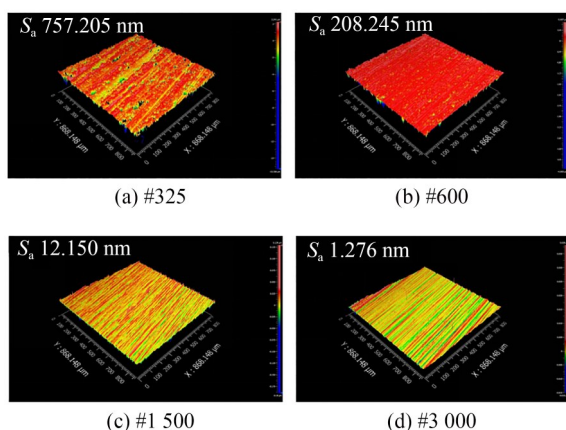


图9 磨削试验样件的表面粗糙度

Fig. 9 Surface roughness of grinding test samples

4 讨 论

磨削加工硬脆材料时,控制磨粒切深低于脆塑转变临界深度,可实现“塑性域”加工,获得低损伤表面。准确的脆塑转变临界深度预测模型能为硬脆材料的低损伤加工提供理论指导。因此,本文基于分析单磨粒准静态划痕过程中表面材料变形情况,考虑材料的弹性回复及其尺寸效应,建立脆塑转变临界深度预测模型。

划痕过程中,压头与材料的实际接触投影面积与压头法向载荷以及划痕硬度的关系如下:

$$H_s = \frac{F_N}{A_N}, \quad (1)$$

其中: H_s 为材料硬度, F_N 为压头法向载荷, A_N 为压头与材料的接触投影面积。

如图10所示,玻氏压头与材料的实际接触投影面积与划痕深度呈几何关系。划痕过程中,实际接触投影面积要考虑两部分: A_{N1} 蓝色区域为压头划动朝前端与材料划擦推挤的接触投影面积; A_{N2} 黄色区域为压头划过后表面材料弹性回复的接触投影面积。 A_{N1} 与压头形状和切深呈

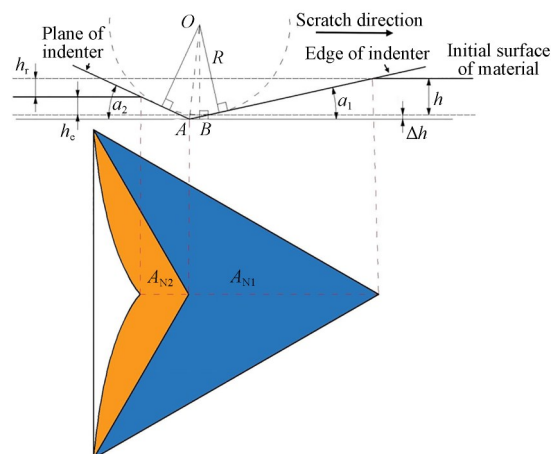


图10 划痕过程中玻氏压头与材料的实际接触投影面积

Fig. 10 Projection of actual contact area between Berkovich indenter and material during scratch

几何关系,具体为:

$$A_{N1} = \frac{\sqrt{3}}{2} (h + \Delta h)^2 \cot^2 a_1, \quad (2)$$

其中 Δh 为理想划痕深度与实际划痕之差,由式(3)计算:

$$\Delta h = R \frac{\cos \gamma}{\cos \beta} - R = R \left(\frac{\cos \frac{a_2 - a_1}{2}}{\cos \frac{a_1 + a_2}{2}} - 1 \right), \quad (3)$$

其中: h 为压头划痕深度, h_r 为残余深度; $a_1 = 12.95^\circ$ 和 $a_2 = 24.75^\circ$, 分别为玻氏压头的棱边和面与水平线之间的夹角; R 为所采用的玻氏压头的尖端半径,为 20 nm。计算得到 $\Delta h = 1.025$ nm。

因为 A_{N2} 为材料弹性回复后与压头后端接触区域的投影面积,其计算要考虑到弹性回复率。许多学者在硬脆材料上发现压痕压入深度越小,弹性变形的占比越大,弹性回复率越高^[24-26]。所以,本文根据过往研究推导出弹性回复率与压入深度之间具体的函数关系,并用压痕试验结果拟合出曲线。

由纳米压痕中硬度的定义可知,法向载荷 P 与接触投影面积 A 成正比,而接触投影面积 A 与深度 h_0 的关系为^[31]:

$$A = C_0 \cdot h_0^2, \quad (4)$$

式中: C_0 为常数,对于玻氏压头 C_0 为 24.5。

在载荷深度曲线的加载过程中,法向载荷与

压入深度的平方成正比。在载荷最大为 F_N 时, 深度同为最大值 $h_{\max}$, 即有^[32]:

$$F_N = C \cdot h_{\max}^2, \quad (5)$$

其中 C 为与材料种类相关的常数。整理式(5)得到:

$$h_{\max} = \left(\frac{F_N}{C} \right)^{0.5}. \quad (6)$$

在压痕试验分析材料特性常用的 Oliver-pharr 分析法中, 载荷位移曲线的卸载部分可表示为^[31]:

$$P = a \cdot (h - h_r)^m, \quad (7)$$

其中: a 与 m 为拟合参数, h_r 为残余深度, P, h 分别为卸载时的载荷和对应深度。在卸载过程中, 载荷最大时, 深度为 $h_{\max}$, 卸载的弹性回复量 $h_e = h_{\max} - h_r$, 代入式(7)得到:

$$h_e = h_{\max} - h_r = \left(\frac{F_N}{a} \right)^{\frac{1}{m}}. \quad (8)$$

将式(6)与式(8)代入弹性回复率的定义式可推导出弹性回复率与压入深度的关系如下:

$$\delta = \frac{h_{\max} - h_r}{h_{\max}} = \frac{\left(\frac{F_N}{a} \right)^{\frac{1}{m}}}{\left(\frac{F_N}{C} \right)^{0.5}} = \frac{\sqrt{C}}{\sqrt{a}} F_N^{\frac{1}{m} - \frac{1}{2}} = \frac{\sqrt{C}}{\sqrt{a}} h_0^{\frac{2}{m} - 1}. \quad (9)$$

因 C, a, m 都为拟合参数, 令 $A = \frac{\sqrt{C}}{\sqrt{a}}$, $B = \frac{2}{m} - 1$, 得弹性回复率与深度成幂函数关系, 即:

$$\delta(h_0) = A \cdot \left(\frac{h_0}{\bar{h}} \right)^B. \quad (10)$$

应用纳米压痕试验测得数据对式(10)进行拟合, $\bar{h}$ 用于消除量纲, 为 1 nm。

使用压痕测得各载荷下的弹性回复率数据用于式(10)的拟合, 得到 A 为 110.74, B 为 -0.168, 拟合优度 $R^2 > 0.95$, 如图 11 所示。

对式(10)从两侧划痕边缘到中部(划痕深度为 h)进行积分计算, 可得弹性回复接触投影面积:

$$A_{N2} = 2 \cot a_2 \int_0^h h_0 \cdot \delta(h_0) dh_0 = \frac{2A \cot a_2}{(B+2)\bar{h}^B} h^{B+2}. \quad (11)$$

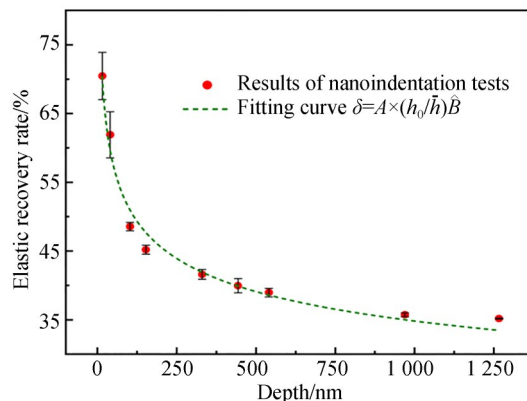


图 11 弹性回复率尺寸效应的拟合曲线

Fig. 11 Fitting curve of elastic recovery size effect

划痕过程中实际接触投影面积为:

$$A_N = A_{N1} + A_{N2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cot^2 a_1 \cdot h^2 + \frac{2A \cot a_2}{(B+2)\bar{h}^B} h^{B+2} + \sqrt{3} \cot^2 a_1 \Delta h \cdot h + \frac{\sqrt{3}}{2} \cot^2 a_1 \cdot \Delta h^2. \quad (12)$$

代入式(1), 可得到划痕深度 h 与法向载荷 F_N 的关系:

$$\frac{\sqrt{3}}{2} \cot^2 a_1 \cdot h^2 + \frac{2A \cot a_2}{(B+2)\bar{h}^B} h^{B+2} + \sqrt{3} \cot^2 a_1 \Delta h \cdot h + \frac{\sqrt{3}}{2} \cot^2 a_1 \cdot \Delta h^2 = \frac{F_N}{H_s}, \quad (13)$$

其中划痕深度 h 随法向载荷 F_N 单调递增, 所以式(13)中明确临界载荷可求得对应的深度 $\dot{h}$ 。

表面形变过程中, 在形变区域边缘存在压入深度极低只发生弹塑性变形的情况, 此时压头接触深度 h 始终小于实际最大压痕深度 $h_{\max}$, 如图 12 所示。两者关系如下^[31]:

$$h_{\max} - h = \epsilon \cdot \frac{F_N}{S}, \quad (14)$$

其中: ϵ 为压头形状的影响系数, 对于玻氏压头为 0.75, F_N 为法向载荷, S 为对应法向载荷时的接触刚度, 在压痕试验测得接触刚度数据中插值取得。

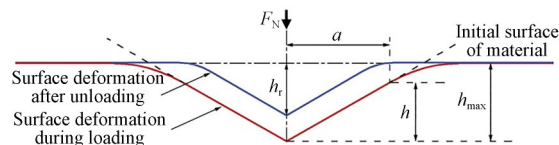


图 12 表面变形形貌截面示意图

Fig. 12 Schematic diagram of cross section of surface deformation morphology

准静态划痕试验与压痕试验的材料变形过程均匀缓慢,避免了应变率的影响,所以脆塑性临界深度预测模型也应考虑式(14)的情况,那么划痕时在脆塑转变临界位置有:

$$h^* = \dot{h} + \epsilon \frac{P^*}{S}, \quad (15)$$

式中: P^* 为法向载荷,接触刚度 S 为164 N/mm。

Lawn等基于压痕断裂力学得出材料发生脆塑性转变时的临界载荷公式为^[33]:

$$P^* = \lambda_0 K_c \left(\frac{K_c}{H} \right)^3, \quad (16)$$

其中: λ_0 为材料的无量纲修正系数, K_c 为断裂韧性,取2.2 MPa·m^{1/2}^[34]。代入准静态划痕试验观察的脆塑转变临界载荷值5.5 mN,求出YAG晶体的 λ_0 为1 878.28。

联立式(13)、式(15)和式(16)可得最终脆塑转变临界切深预测模型:

$$\begin{aligned} & \frac{\sqrt{3}}{2} \cot^2 a_1 \cdot \dot{h} (\lambda_0)^2 + \frac{2A \cot a_2}{(B+2)\bar{h}^B} \dot{h} (\lambda_0)^{B+2} + \\ & \sqrt{3} \cot^2 a_1 \Delta h \cdot \dot{h} (\lambda_0) + \frac{\sqrt{3}}{2} \cot^2 a_1 \cdot \Delta h^2 = \lambda_0 \left(\frac{K_c}{H} \right)^4, \end{aligned} \quad (17)$$

$$h^* = \dot{h} (\lambda_0) + \lambda_0 \cdot \epsilon \frac{K_c^4}{S \cdot H^3}, \quad (18)$$

其中 h^* 为预测硬脆材料的临界切深。

将纳米压、划痕试验中获得相关力学参数与各项系数代入式(17)和式(18),计算出预测脆塑转变临界深度 h^* 为66.7 nm。

目前,学界普遍认为材料力学性能是影响硬脆材料的脆塑转变临界深度的关键因素,而磨削速度则影响的是磨粒的实际切深^[19-21]。由准静态纳米压、划痕试验测得的微观力学性能最终计算出的临界深度 h^* ,可由更高划擦速度的磨削试验进行验证。

用Zhang等^[35]建立的工件自旋转法磨粒切削深度解析模型来计算实际的磨粒切深:

$$d_g = 1.823 r_g \cdot \sqrt[3]{\frac{f R_1 n_w \tan \theta}{n_s^2 \eta k W (D+W) \left(1 + \sqrt{\frac{\pi H \tan \theta}{E_t^*}} \right)^2}}, \quad (19)$$

其中: r_g 为磨粒的平均半径, f 为进给率, R_1 是工件距离工作台旋转中心的径向距离为35 mm,

n_w, n_s 分别为工作台和砂轮的转速, θ 是磨粒切削角为38°, η 为砂轮的磨粒体积比取0.25, k 为砂轮有效磨粒比取0.15, W 是磨齿宽度为3 mm, D 是砂轮直径为350 mm, H 为加工工件硬度, E_t^* 为砂轮结合剂的杨氏模量(树脂与陶瓷结合剂分别为40 GPa和80 GPa)。

由式(19)计算得到#325, #600, #1 500, #3 000砂轮磨削试验中磨粒的切削深度分别为160.7, 83.7, 33, 16.7 nm,与脆塑转变临界深度 h^* 进行对比,结果如图13所示。由图13可知, #325, #600砂轮的磨粒切深高于脆塑转变临界深度 h^* ,磨削加工时表面材料的去除方式主要为脆性去除,加工表面质量较差,出现大量显著的破碎坑、裂纹等表面损伤,与图8(a), 8(b)和图9(a), 8(b)中#325, #600砂轮的磨削结果相符。Bifano首先提出了“塑性域”磨削概念,并把工件表面可观测的脆性断裂区域少于10%作为判定“塑性域”去除模式的指标^[19]。人们将磨削表面形貌无破碎、凹坑等损伤或表面呈现塑性变形特征作为依据来判断是否为“塑性域”磨削^[36-38]。#1 500, #3 000砂轮磨削试验的磨粒切深低于脆塑转变临界深度 h^* ,磨削加工时表面材料以塑性流动方式去除,可实现“塑性域”加工,获得低损伤、高质量的加工表面,与图8(c), 8(d)和图9(c), 9(d)中#1 500, #3 000砂轮的磨削结果相符。

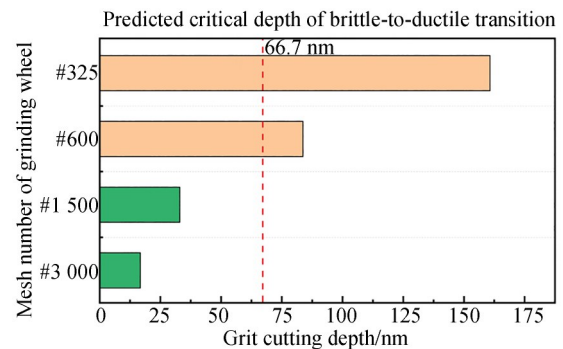


图13 磨粒切削深度示意图

Fig. 13 Schematic diagram of abrasive cutting depth

5 结 论

本文开展YAG晶体在不同载荷下的纳米压痕试验,检测其微观力学性能弹性模量 E 、微纳

米硬度 H 和弹性回复率。随载荷增大, 弹性模量 E 、微纳米硬度 H 各趋近稳定值 325 GPa 和 20 GPa, 弹性回复率由 70.5% 降至 35.2%, 具有尺寸效应。开展准静态线性加载纳米划痕试验, 测得 YAG 晶体表面的无裂纹产生的临界载荷为 5.5 mN。通过分析单磨粒划擦下 YAG 晶体材料表面的微观变形过程, 基于弹塑性接触理论和压痕断裂力学, 考虑材料的弹性回复、微观下力学性能的尺寸效应, 建立了脆塑转变临界深度的预测模型。结合 YAG 晶体的微观力学性能及无裂纹产生的临界载荷, 计算得到 YAG 晶体的脆塑转变临界深度为 66.7 nm。采用不同粒度砂轮

开展磨削试验对预测模型进行验证, 并计算不同粒度砂轮在相同工艺条件下的磨粒切深。结果表明, #325, #600 砂轮磨粒切深高于 YAG 晶体脆塑转变临界深度, 以脆性方式去除表面材料, 加工表面有大量显著的破碎坑、裂纹等损伤; #1 500, #3 000 砂轮磨粒切深低于预测脆塑转变临界深度, 以塑性方式去除表面材料, 加工表面无脆性去除的损伤, 粗糙度 S_a 达到 1 nm, 实现了“塑性域”加工。本文建立的硬脆材料脆塑转变临界切深预测模型, 能够较好地解释 YAG 晶体超精密磨削过程中的材料去除机理, 从而指导 YAG 晶体的低损伤磨削加工, 获得高质量表面。

参考文献:

- [1] MILISAVLJEVIC I, ZHANG G, WU Y. Solid-state single-crystal growth of YAG and Nd:YAG by spark plasma sintering[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 106: 118-127.
- [2] FENG Z, MA C Y, ZHANG C G, *et al.* Transparent YAG ceramic/sapphire composite fabricated by pressureless direct thermal diffusion bonding [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, 41 (15): 7845-7851.
- [3] NEGRI J R, PIRZIO F, AGNESI A. Jitter investigation of narrow-bandwidth passively Q-switched Nd:YAG unidirectional ring laser[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(12): 3094-3097.
- [4] BORDATCHEV E V, HAFIZ A M K, TUTUNEA-FATAN O R. Performance of laser polishing in finishing of metallic surfaces[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 73(1/2/3/4): 35-52.
- [5] SACHDEVA A, PICKERING E M, LEE H J. From electrocautery, balloon dilatation, neodymium-doped: yttrium-aluminum-garnet (Nd:YAG) laser to argon plasma coagulation and cryotherapy[J]. *Journal of Thoracic Disease*, 2015, 7 (Suppl 4): S363-S379.
- [6] MINCUZZI G, PALMA A L, DI CARLO A, *et al.* Laser processing in the manufacture of dye-sensitized and perovskite solar cell technologies [J]. *ChemElectroChem*, 2016, 3(1): 9-30.
- [7] 位超杰, 闫仁鹏, 李旭东, 等. 三维成像激光雷达应用的亚纳秒激光器研究进展[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(6): 1270-1280.
- [8] WEI CH J, YAN R P, LI X D, *et al.* Research progress of sub-nanosecond lasers for 3D imaging lidar[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(6): 1270-1280. (in Chinese)
- [9] ROSS D, YAMAGUCHI H. Nanometer-scale characteristics of polycrystalline YAG ceramic polishing[J]. *CIRP Annals*, 2018, 67(1): 349-352.
- [10] MCKAY J, BAI T Y, GOORSKY M S. Chemical mechanical polishing and direct bonding of YAG [J]. *ECS Transactions*, 2018, 86(5): 217-222.
- [11] PEI Z J, FISHER G R, LIU J. Grinding of silicon wafers: a review from historical perspectives [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, 48(12/13): 1297-1307.
- [12] 刘宁, 朱永伟, 李学, 等. 硬脆材料平面研磨的材料去除机理研究进展[J]. *材料导报*, 2022, 36 (7): 80-91.
- [13] LIU N, ZHU Y W, LI X, *et al.* Research progress of material removal mechanism in plane lapping and polishing of hard-brittle materials[J]. *Materials Review*, 2022, 36(7): 80-91. (in Chinese)
- [14] 袁巨龙, 王志伟, 文东辉, 等. 超精密加工现状综述[J]. *机械工程学报*, 2007, 43(1): 35-48.
- [15] YUAN J L, WANG ZH W, WEN D H, *et al.* Review of the current situation of ultra-precision machining[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(1): 35-48. (in Chinese)
- [16] SUN J L, CHEN P, QIN F, *et al.* Modelling and experimental study of roughness in silicon wafer self-rotating grinding [J]. *Precision Engineering*, 2018, 51: 625-637.
- [17] ZHANG C Y, GUO B, ZHAO Q L, *et al.* Ultra-

- precision grinding of AlON ceramics: surface finish and mechanisms[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, 39(13): 3668-3676.
- [15] JIANG B C, ZHAO D W, LIU Y H, *et al.* Surface figure control in fine rotation grinding process of thick silicon mirror[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 98(1/2/3/4): 771-779.
- [16] 高尚, 李天润, 郎鸿业, 等. 工件旋转法磨削硅片的亚表面损伤深度预测[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(17): 2077-2087.
- GAO SH, LI T R, LANG H Y, *et al.* Prediction for subsurface damage depth of silicon wafers in workpiece rotational grinding[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(17): 2077-2087. (in Chinese)
- [17] 李琛. 稀土氧化物激光晶体超精密磨削机理及工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- LI C. *Study on Ultra-precision Grinding Mechanism and Technology of Rare Earth Oxide Laser Crystal*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [18] LI C, LI X L, WU Y Q, *et al.* Deformation mechanism and force modelling of the grinding of YAG single crystals[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2019, 143: 23-37.
- [19] 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.
- [20] 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 Ceramic Society*, 2020, 103(11): 6096-6100.
- [21] ARIF M, ZHANG X Q, RAHMAN M, *et al.* A predictive model of the critical undeformed chip thickness for ductile-brittle transition in nano-machining of brittle materials[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, 64: 114-122.
- [22] VENKATACHALAM S, LI X, LIANG S Y. Predictive modeling of transition undeformed chip thickness in ductile-regime micro-machining of single crystal brittle materials[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(7): 3306-3319.
- [23] LI H G, GAO S, KANG R K, *et al.* The Deformation Pattern of Aluminum Nitride Ceramics Under Nanoscratching[M]. Proceedings of the 7th International Conference on Nanomanufacturing (nanoMan2021). Singapore: Springer Singapore, 2022: 285-297.
- [24] JIANG W, CHENG X W, CAI H, *et al.* The response of yttrium aluminum garnet (YAG) grains and grain boundaries to nanoindentation[J]. *Journal of Materials Science*. 2018, 53(24): 16198-16206.
- [25] LI C, ZHANG F H, WANG X, *et al.* Investigation on surface/subsurface deformation mechanism and mechanical properties of GGG single crystal induced by nanoindentation[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(14): 3661-3668.
- [26] WANG H M, HUANG Z Y, LU Z W, *et al.* Determination of the elastic and plastic deformation behaviors of Yb: Y₃Al₅O₁₂ transparent ceramic by nanoindentation[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 682: 35-41.
- [27] HUANG Y, ZHANG F, HWANG K C, *et al.* A model of size effects in nano-indentation[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2006, 54(8): 1668-1686.
- [28] PHARR G M, HERBERT E G, GAO Y F. The indentation size effect: a critical examination of experimental observations and mechanistic interpretations[J]. *Annual Review of Materials Research*, 2010, 40: 271-292.
- [29] LI C, ZHANG F H, PIAO Y C. Strain-rate dependence of surface/subsurface deformation mechanisms during nanoscratching tests of GGG single crystal[J]. *Ceramics International*, 2019, 45(12): 15015-15024.
- [30] GAO S, LI H G, KANG R K, *et al.* Effect of strain rate on the deformation characteristic of AlN ceramics under scratching[J]. *Micromachines*, 2021, 12(1): 77.
- [31] OLIVER W C, PHARR G M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments[J]. *Journal of Materials Research*, 1992, 7(6): 1564-1583.
- [32] PATHAK S, KALIDINDI S R. Spherical nanoindentation stress-strain curves[J]. *Materials Science and Engineering*, 2015, 91: 1-36.
- [33] LAWN B R, EVANS A G. A model for crack initiation in elastic/plastic indentation fields[J]. *Jour-*

- nal of Materials Science*, 1977, 12 (11): 2195-2199.
- [34] MAH T I, PARTHASARATHY T A. Effects of temperature, environment, and orientation on the fracture toughness of single-crystal YAG[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1997, 80 (10): 2730-2734.
- [35] ZHANG Y, KANG R K, GAO S, *et al.* A new model of grit cutting depth in wafer rotational grinding considering the effect of the grinding wheel, workpiece characteristics, and grinding parameters [J]. *Precision Engineering*, 2021, 72: 461-468.
- [36] YANG M, LI C H, ZHANG Y B, *et al.* Maximum undeformed equivalent chip thickness for ductile-brittle transition of zirconia ceramics under different lubrication conditions[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2017, 122: 55-65.
- [37] YIN L, VANCOILLE E Y J, RAMESH K, *et al.* Surface characterization of 6H-SiC (0001) substrates in indentation and abrasive machining [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004, 44(6): 607-615.
- [38] 马廉洁, 巩亚东, 顾立晨, 等. 可加工微晶玻璃陶瓷磨削表面成形机制[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(15): 201-207.
- MA L J, GONG Y D, GU L CH, *et al.* Mechanism of surface forming in grinding machinable glass ceramics [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(15): 201-207. (in Chinese)

作者简介:



敖萌灿(1999—),男,重庆人,硕士研究生,2021年于大连理工大学获得学士学位,主要研究方向为硬脆材料超精密磨削技术。E-mail: 32104027@mail.dlut.edu.cn

通讯作者:



高 尚(1982—),男,辽宁沈阳人,博士,副教授,博士生导师,2005年、2007年、2014年于大连理工大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要研究方向为难加工材料精密与超精密加工技术、半导体制造技术与设备。E-mail: gaoshang@dlut.edu.cn