

YAG 晶体研磨工艺与研磨后亚表面损伤研究

马荣国^{1,2,3}, 张庆礼^{1,3}, 高进云^{1,3}, 孙贵花^{1,3}, 窦仁勤^{1,3}, 韩 松^{1,3}, 张 瑞^{1,3}, 陈 照^{1,2,3},
王小飞^{1,3}, 张德明^{1,3}, 孙 戡^{1,3}, 刘文鹏^{1,3}

(1. 中国科学院合肥物质科学研究院, 安徽光学精密机械研究所, 安徽省光子器件与材料重点实验室, 合肥 230031;
2. 中国科学技术大学, 合肥 230026; 3. 先进激光技术安徽省实验室, 合肥 230037)

摘 要: YAG 晶体是一种典型硬脆材料, 莫氏硬度达 8.5, 常温下不溶于任何酸碱, 加工难度较大。针对 YAG 晶体研磨加工, 本工作提出一种分步研磨工艺。基于游离磨料研磨的方法, 在研磨过程中逐级减小碳化硼(B₄C)磨料粒径, 选用磨料 W40、磨料 W28、磨料 W14、磨料 W7 分步骤研磨, 4 种磨料的粒度范围依次为: 40~28 μm、28~20 μm、14~10 μm、7~5 μm。通过研磨参数试验研究了每个步骤中研磨压力、研磨盘和摆轴转速、研磨液中 B₄C 质量分数等参数对研磨效果的影响, 得出最佳研磨参数; 通过截面显微法测量出 YAG 晶体研磨后亚表面损伤的深度, 确定后续抛光去除量, 并探究了亚表面损伤深度 h_{SSD} 与研磨后表面粗糙度 R_a 的关系。研究表明: 当研磨压力为 44.54 kPa、研磨盘和摆轴转速为 60 r/min、研磨液中 B₄C 质量分数为 15% 时, 每个研磨步骤均取得最好研磨效果: 磨料 W40、磨料 W28、磨料 W14、磨料 W7 研磨的材料去除率分别为 83.12%、57.32%、27.54%、9.53%, 研磨后表面粗糙度 R_a 分别为 0.763、0.489、0.264、0.142 μm。截面显微法测量得出分步研磨后产生的亚表面损伤深度为 3.041 μm, 需要在后续抛光中去除; 此研磨参数下 YAG 晶体研磨后亚表面损伤深度与表面粗糙度的关系为: $h_{SSD}=41.46 \times R_a^{4/3}$, 该研究可为 YAG 晶体元件的实际加工生产提供指导。

关键词: 钇铝石榴石晶体; 研磨; 亚表面损伤; 材料去除率; 表面粗糙度

中图分类号: O786, TN305.1 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2023)03-0767-08

网络出版时间: 2023-02-08



YAG Crystal Lapping Process and Subsurface Damage After Lapping

MA Rongguo^{1,2,3}, ZHANG Qingli^{1,3}, GAO Jinyun^{1,3}, SUN Guihua^{1,3}, DOU Renqin^{1,3}, HAN Song^{1,3}, ZHANG Rui^{1,3},
CHEN Zhao^{1,2,3}, WANG Xiaofei^{1,3}, ZHANG Deming^{1,3}, SUN Yu^{1,3}, LIU Wenpeng^{1,3}

(1. The Key Laboratory of Photonic Devices and Materials of Anhui Province, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 3. Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei 230037, China)

Abstract: YAG crystal is a typical hard and brittle material with Mohs hardness of 8.5 and insoluble in any acid or base at room temperature, so it is difficult to process. A step-by-step lapping process is proposed in order to explore lapping processing of YAG crystals in this paper. Based on the method of free abrasive lapping, the particle size of boron carbide (B₄C) abrasive was reduced step by step during the lapping process, and abrasive W40, abrasive W28, abrasive W14 and abrasive W7 abrasives were selected for lapping in steps, and the particle size ranges of the four abrasive abrasives were: 40~28 μm, 28~20 μm, 14~10 μm, and 7~5 μm in order. The effect of the lapping pressure, the rotational speed of the lapping disc and pendulum, and the B₄C mass fraction in the lapping solution on the lapping effect in each lapping step was investigated, and the optimal lapping parameters were derived; the depth of subsurface damage after lapping of YAG crystals was measured by cross-section microscopy method to determine the amount of subsequent polishing removal, and the relationship between the depth of subsurface damage h_{SSD} and the surface roughness R_a after lapping was investigated. The study showed that the best lapping results were obtained for each lapping step when

收稿日期: 2022-10-30。 修订日期: 2022-11-27。

基金项目: 国家自然科学基金(51802307); 先进激光技术安徽省实验室
开放研究基金项目(AHL20220ZR04, AHL2021KF07); 安徽
省科技重大专项项目(202203a05020002)。

第一作者: 马荣国(1997—), 男, 博士研究生。

通信作者: 张庆礼(1973—), 男, 博士, 研究员。

Received date: 2022-10-30. Revised date: 2022-11-27.

First author: MA Rongguo (1997—), male, Doctoral candidate.

E-mail: marongguo0551@163.com

Correspondent author: ZHANG Qingli (1973—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: zql@aiofm.ac.cn

the lapping pressure was 44.54 kPa, the rotational speed of the lapping disc and pendulum was 60 r/min, and the B₄C mass fraction in the lapping solution was 15%. The material removal rates of abrasive W40, abrasive W28, abrasive W14 and abrasive W7 lapping were 83.12, 57.32, 27.54 and 9.53 $\mu\text{m}/\text{min}$, respectively, and the surface roughness after lapping was 0.763, 0.489, 0.264, and 0.142 μm , respectively. The subsurface damage of the step-by-step lapping was 3.041 μm , which were measured by cross-section microscopy method, and needed to be removed by the subsequent polishing; The relationship between subsurface damage depth and surface roughness of YAG crystals after lapping with this lapping parameter is $h_{\text{SSD}}=41.46\times R_a^{4/3}$. The study can provide guidance for the actual processing and production of YAG crystal components.

Keywords: yttrium aluminum garnet crystal; lapping; subsurface damage; material removal rate; surface roughness

YAG 晶体具有熔点高、机械性能优良、导热性能良好、抗光照能力强等特点,是固体激光器中最常用的激光晶体材料^[1–5]。YAG 激光器广泛应用于激光切割^[6]、临床医学^[7]、空间通讯^[8]、激光武器^[9]等领域。大尺寸高精度 YAG 晶体元件加工对于高功率固体激光具有重要意义。但 YAG 晶体硬度高、脆性大,常温下不溶于酸碱,加工效率低,且加工过程中易出现划痕、凹坑、崩边等损伤,严重影响元件的表面质量^[10–11]。相比于在工业上被大规模应用的硅单晶等材料, YAG 晶体元件用量相对小,对 YAG 晶体加工缺乏专用的配套设备,目前大多采用古典加工方法进行加工。对于尺寸约 200 mm 的 YAG 晶体元件,国内仅有为数不多的单位能加工,且严重依赖加工人员的技能和直觉,加工缺乏具体的工艺条件及参数,导致元件加工质量的重复性、一致性差,同时加工效率低下,典型的加工元件时间在 1~2 个月,这使得高精度大尺寸晶体元件加工无法实现大规模、批量化高效生产。因此深入研究 YAG 晶体的加工工艺很有必要。

研磨是 YAG 晶体加工流程中介于切割和抛光之间的重要步骤,主要目的是快速去除线切割后的表面切痕,修正工件的几何尺寸,提高平面度,降低表面粗糙度,为最终的抛光工序做准备^[12]。抛光过程材料去除效率较小,如果研磨质量较差将大大增加抛光的难度^[13];研磨的质量和效率直接决定了 YAG 晶体抛光精度、效率和成本。研磨工艺和参数选取不当,不但会降低加工效率,还会使工件表面质量变差,增加后续抛光成本,因此 YAG 晶体研磨工艺的研究对实现 YAG 晶体元件超精密加工具有重要意义。

游离磨料研磨是一种传统的研磨方法,其加工设备比较简单、可操作性强,广泛应用在光学零件加工生产中^[14–15],是 YAG 晶体元件研磨的主流方法。此方法是通过高硬度磨粒在压力和摩擦力的作用下对工件表面进行滚轧、挤压从而达到材料去除的目的^[15]。YAG 晶体研磨时材料的去除形式包括延

性去除和脆性去除 2 种。延性去除时材料以塑性方式去除,产生的损伤和缺陷较少。当磨粒压入晶体表面的压应力大于材料自身断裂强度时出现脆性去除,脆性去除会导致晶体表面出现横向和径向裂纹,横向裂纹会扩展至表层导致晶体表面破碎,形成凹坑、划痕等表面损伤,径向裂纹会向晶体深层扩展形成微观裂纹、位错,造成亚表面损伤^[14]。研磨过程中材料的脆性去除是主要去除形式,因此会不可避免的引入表面损伤和亚表面损伤,表面损伤存在于工件表面,容易观察到从而去除,而亚表面损伤主要隐藏在表面下以微裂纹形式存在,观察和检测较为困难。亚表面损伤会直接降低 YAG 晶体元件的光学性能指标^[13],需在抛光工序中去除,首先需要准确检测出亚表面损伤的大小^[12]。

针对 YAG 晶体研磨加工,本工作提出一种分步研磨工艺,依次用磨料 W40、磨料 W28、磨料 W14、磨料 W7 碳化硼(B₄C)分步骤研磨,磨料粒径逐级减小,每个研磨步骤开始前需完全去除上一步骤带来的损伤,分步研磨可提高研磨的效率和质量^[16]。通过参数试验研究了研磨压力、研磨盘和摆轴转速以及研磨液中 B₄C 质量分数对 YAG 晶体每个研磨步骤材料去除率(R_{MRR})和表面粗糙度(R_a)的影响规律;根据试验结果得出最佳研磨参数,确定分步研磨工艺;采用所得工艺参数研磨 YAG 晶体,通过截面显微法测量得到研磨后的亚表面损伤大小,并对亚表面损伤深度 h_{SSD} 与研磨后表面粗糙度 R_a 的关系进行研究。

1 实验

1.1 研磨参数试验

试验样品选用尺寸为 12 mm×12 mm×2 mm 的 (110)面线切割 YAG 毛坯晶片。将晶片每 3 片 1 组用石蜡均匀粘贴在 K9 玻璃载片上作为工件盘,如图 1 所示。

研磨采用无锡中光精密仪器设备厂生产的 JP015.4B 型 4 轴抛光机。研磨过程如图 2 所示。由

图 2 可见, 研磨盘由主轴带动绕轴心转动; 摆轴转动带动摆臂左右往复摆动, 工件盘跟随摆臂在旋转的研磨盘上左右摆动, 研磨时摆臂的摆动可使磨粒运动轨迹更加均匀^[17], 有助于改善研磨的表面质量。研磨液均匀滴加在研磨盘中心位置, 由研磨盘转动的离心作用和工件盘的摆动使磨粒分散; 为了保证磨粒分布均匀, 使主轴和摆轴保持相同转速。选用直径 140 mm 带有凹槽的铸铁研磨盘; 研磨压力通过在工件盘上方加载不同质量的配重块来实现; 研磨液由 B₄C 磨料和去离子水配置而成, 并在研磨前使用电动搅拌器对其进行充分搅拌。

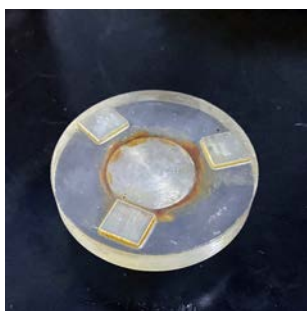


图 1 YAG 晶片粘贴方式
Fig. 1 YAG crystal bonding mode

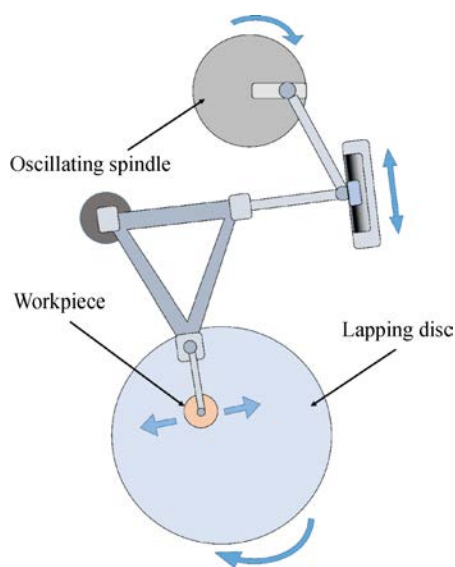


图 2 研磨过程示意图
Fig. 2 Diagram of the lapping process

研磨试验中, 依次选用磨料 W40、磨料 W28、磨料 W14、磨料 W7 4 种粒度不同的 B₄C 磨料分步骤研磨。研磨参数选择上: 研磨压力分别取 18.39、32.55、44.54、52.14 kPa; 研磨盘和摆轴转速分别选 40、50、60、70、80 r·min⁻¹; 分别选取 B₄C 质量分数为 5%、10%、15%、20%、25% 的研磨液; 每个研磨步骤各进行 12 组试验, 每组试验研磨时间

15 min。通过试验结果对比, 得出该步研磨的最佳参数。

加工效率和研磨后工件的表面质量是评价研磨效果好坏的指标, 因此可用材料去除率和研磨后的表面粗糙度来反映研磨效果^[18]。用精密天平测量研磨前后质量, 螺旋测微计测量研磨前的初始厚度, 材料去除率 R_{MRR} 可由式(1)计算。

$$R_{MRR} = \frac{\Delta m \times h_0}{M_0 \times t} \times 10^3 \quad (1)$$

式中: R_{MRR} 的单位为 $\mu\text{m}/\text{min}$; Δm 为 YAG 晶体研磨前后的质量之差, 单位为 g; h_0 和 M_0 分别为研磨加工前 YAG 晶体的厚度和质量, h_0 单位为 mm, M_0 的单位为 g; t 为研磨过程所用时间, 单位为 min。用粗糙度仪测量研磨后 YAG 晶体的表面粗糙度 R_a , 分别测量工件盘上每个晶片中间和 4 角的 R_a , 对 3 个晶片的 15 个数据取平均作为本次研磨的 R_a 。

1.2 亚表面损伤深度测量

截面显微法具有样品制作容易、操作过程简单、损伤观测直接等优点, 是亚表面损伤检测的常用方法^[19]。截面显微法工作原理是将亚表面损伤沿深度方向展现在抛光的截面上, 用显微观测手段直接观察截面, 不仅能得到损伤的大小^[20], 还能直观的观察到亚表面损伤的形貌, 图 3 为截面显微法的操作过程。

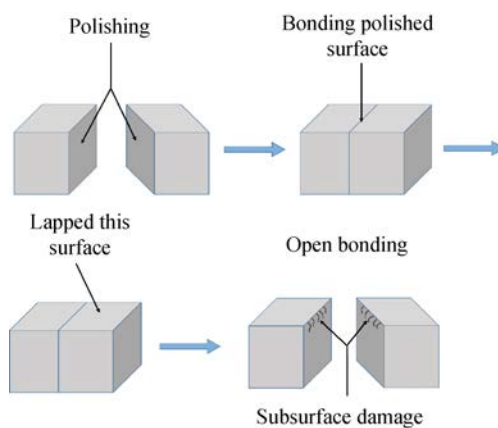


图 3 截面显微法示意图
Fig. 3 Schematic of cross-section microscopy method

选样品尺寸为 12 mm×3 mm×2 mm 的 YAG 晶体, 12 mm×3 mm 的面为(110)面。对垂直于(110)方向的面进行研磨抛光, 抛光表面在金相显微镜观察下没有划痕和裂纹等损伤。用光学专用胶水将 2 个样品的抛光面粘接到一起, 对(110)面进行研磨。采用实验 1.1 所得的最佳实验参数对 YAG 晶体分步研磨, 每种磨料分别研磨 15 min 保证充分研磨; 研

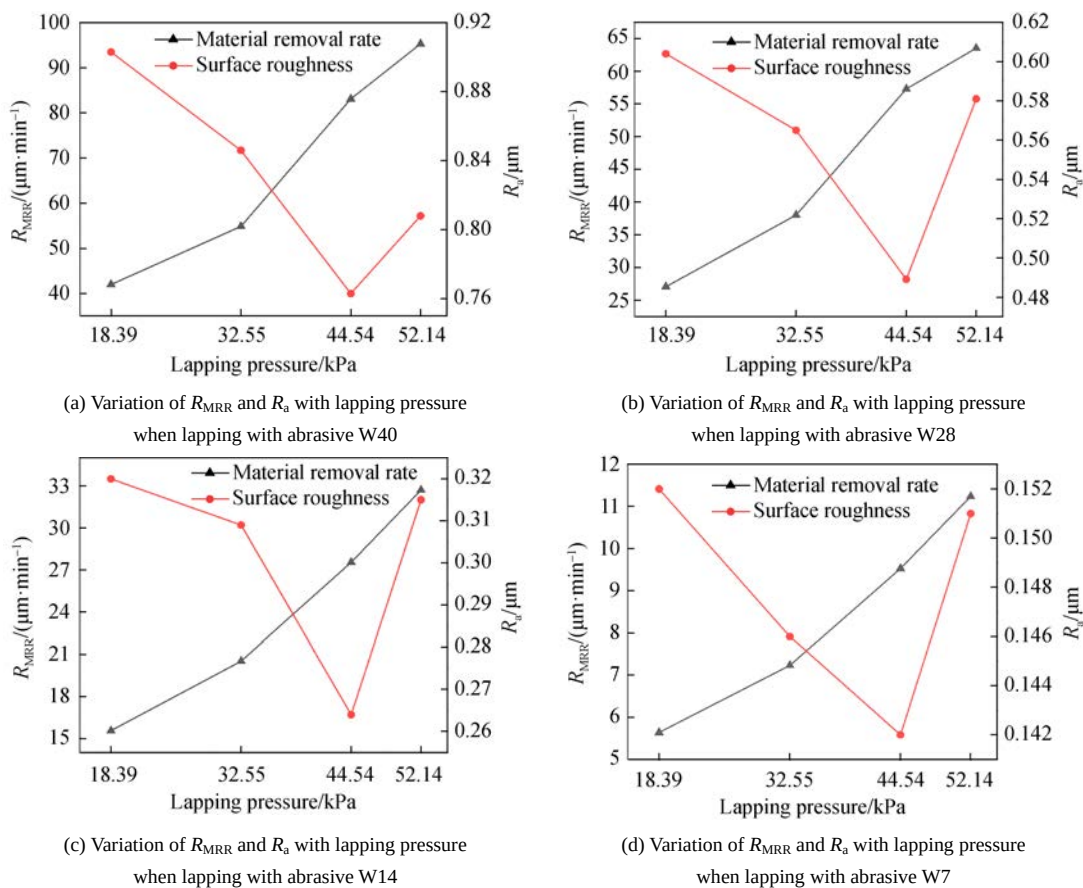
磨结束后, 将样品用去离子水和超声波清洗机清洗干净, 然后将粘接的样品浸泡在丙酮中使黏接面分离。将分离后的样品在 250 °C 的磷酸中腐蚀 5 min, 使损伤显示出来, 用金相显微镜观察截面亚表面损伤的形貌并用显微镜自带的测量系统测量亚表面损伤深度。

2 结果与讨论

2.1 研磨参数试验结果及分析

2.1.1 研磨压力对材料去除率和表面粗糙度的影响

图 4 为材料去除率 R_{MRR} 和表面粗糙度 R_a 随研磨压力变化曲线。由图 4 可见:



Rotational speed of the lapping disc and the pendulum are taken as 60 r/min, and the mass fraction of B_4C in the lapping solution is 15%.

图 4 材料去除率和表面粗糙度随研磨压力变化曲线

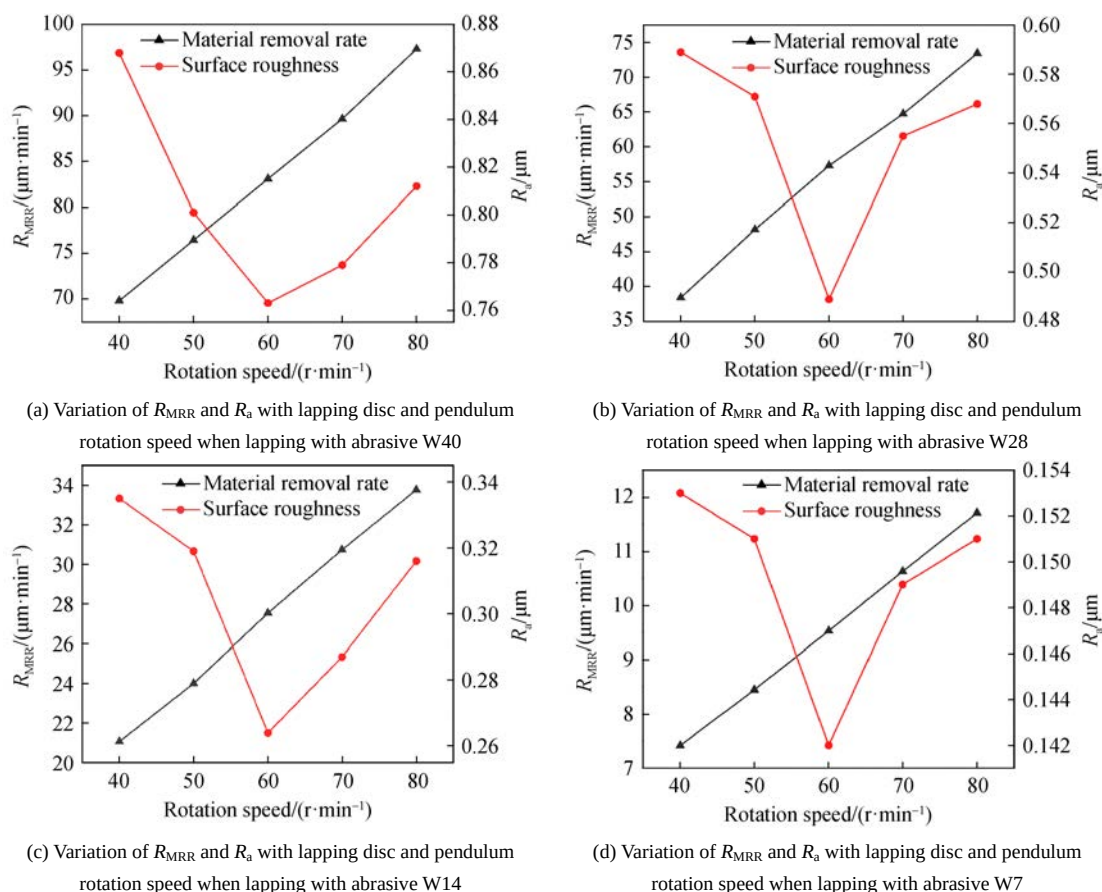
Fig. 4 Variation curve of material removal rate (R_{MRR}) and surface roughness (R_a) with lapping pressure

随着研磨压力的增加, 4 种 B_4C 磨料研磨的 R_{MRR} 均大致呈线性增长。研磨压力由 18.39 kPa 增加到 52.14 kPa, 去除效率均增加 2 倍左右; 4 种磨料研磨的 R_a 随研磨压力的增加先减小后增大, 压力为 44.54 kPa 时磨料 W40、磨料 W28、磨料 W14、磨料 W7 研磨后的 R_a 均取得最小值, 分别为 0.763、0.489、0.264 μm 和 0.142 μm 。

因为研磨压力较小时, 单颗磨粒无法嵌入研磨盘或嵌入深度小, 磨粒切削力小, 且此时只有大颗粒的 B_4C 磨粒才有机会参与到研磨中, 粒径太小的颗粒没有办法与 YAG 晶体表面直接接触, 因此有效磨粒数较少, 研磨的均匀性变差, R_{MRR} 较小, R_a 较大; 当加载的压力增大时, 大颗粒磨粒嵌入深度

增大, 切削力增大, 较小粒径磨粒有机会和工件表面接触参与研磨, 有效磨粒数增加, R_{MRR} 变大, R_a 减小; 当研磨压力持续增加, 单个磨粒对晶体表面的压力不断增大, 脆性去除更显著, 材料去除更快, 但产生更多的损伤; 并且压力增大导致研磨盘和工件间间隙减少, 缺少研磨液流动润滑, 导致摩擦力增大机械作用增强, 材料去除增大但带来更多损伤, 因此 R_{MRR} 增大, R_a 也增大。因此, 在分步研磨中各步骤的研磨压力均选择 44.54 kPa 可达到最好研磨效果。

2.1.2 研磨盘和摆轴转速对材料去除率和表面粗糙度的影响 图 5 为材料去除率和表面粗糙度随研磨盘和摆轴转速变化曲线。由图 5 可见: 研磨盘和



Lapping pressure is 44.54 kPa and the mass fraction of B_4C in the lapping solution is 15%.

图 5 材料去除率和表面粗糙度随研磨盘和摆轴转速变化曲线

Fig. 5 Variation curve of R_{MRR} and R_a with lapping disc and pendulum rotation speed

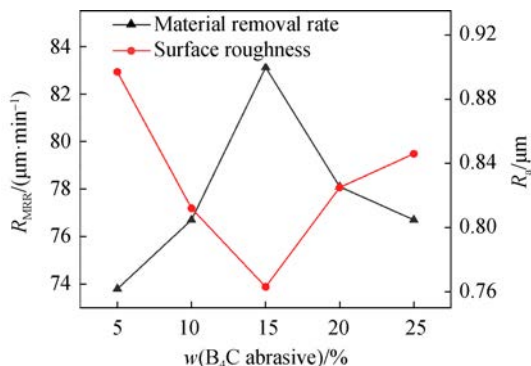
摆轴转速在 40~80 r/min 的范围内, 当转速逐渐增加, 磨料 W40、磨料 W28、磨料 W14、磨料 W7 研磨的 R_{MRR} 均大致呈线性增长; R_a 的值先减小随后逐渐增大, 在 60 r/min 处均取得最小值。因为当转速过低时, 研磨盘转动的离心作用和工件盘摆动的分散作用很弱, 磨粒分布不均匀, 研磨不充分, 导致 R_a 较大, 转速过低还导致相同时间里 B_4C 磨粒划擦 YAG 晶体表面的次数下降, R_{MRR} 较小。当研磨盘和摆轴的转速提高时, 研磨盘的离心作用和工件盘的摆动增强, 磨粒分布变得更加均匀, R_a 减小; 同时晶体表面被划擦的次数增加, R_{MRR} 增加。当继续增加转速, 离心作用过大导致研磨液分布均匀性变差, 部分研磨液被甩出研磨盘, 研磨稳定性变差, 同时转速太快导致研磨盘和工件间产生较高热量, 这些因素导致表面质量变差, 因此 R_{MRR} 继续增加, R_a 变大。通过试验得出: 分步研磨时, 各步骤研磨盘和摆轴转速选择 60 r/min 可达到最好研磨效果。

2.1.3 研磨液中 B_4C 磨料质量分数对材料去除率和表面粗糙度的影响 图 6 为材料去除率和表面粗糙度随 B_4C 质量分数的变化曲线。由图 6 可见:

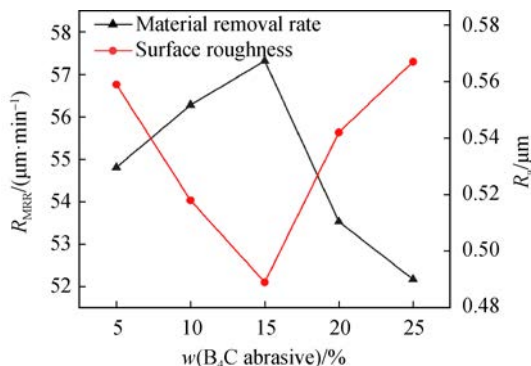
当研磨液中 B_4C 的质量分数不断增加时, 磨料 W40、磨料 W28、磨料 W14 研磨的 R_{MRR} 先增大后减小, 均在 15% 时取得最大值, 磨料 W14 研磨的 R_{MRR} 下降速率相对较缓; 磨料 W7 的 R_{MRR} 随 B_4C 质量分数变大而变大, 在 15% 之前增长较快, 15% 以上增长缓慢。4 种磨料研磨后的 R_a 都随研磨液中 B_4C 质量分数的变大先减小后变大, 均在 15% 时取得最小值。出现以上现象的原因是当研磨液中 B_4C 的质量分数过低时, 单位面积内只有较少的磨粒, 且分布较为稀疏, 导致研磨不够充分和均匀, 此时的 R_{MRR} 较小, R_a 较大。当 B_4C 的质量分数增加时, 更多的磨粒参与磨削, R_{MRR} 变大; 此时研磨盘上 B_4C 磨粒的分布范围更大, 研磨更加充分均匀, R_a 变小。当 B_4C 质量分数过高时, 磨粒分布较为聚集导致研磨液流动性较差, 磨粒的运动速度变慢, 使 R_{MRR} 变小。由图 6a 和图 6b 可以看出, 磨料 W40 和磨料 W28 研磨的 R_{MRR} 在 15% 后下降非常明显; 但由图 6c 和图 6d 可以看出, 磨料 W14 相比于粒径较大的其他磨料, R_{MRR} 到达拐点后下降速率较缓, 更小粒径的磨料 W7 研磨的 R_{MRR} 甚至持续增加, 这

是因为质量分数过高磨粒团聚现象更加显著, 粒径越小团聚现象越严重, 小磨粒团聚成大磨粒导致实际的平均粒径增大, 对材料去除有正向作用, 但会给表面带来更大损伤。同时磨料质量分数过高引起

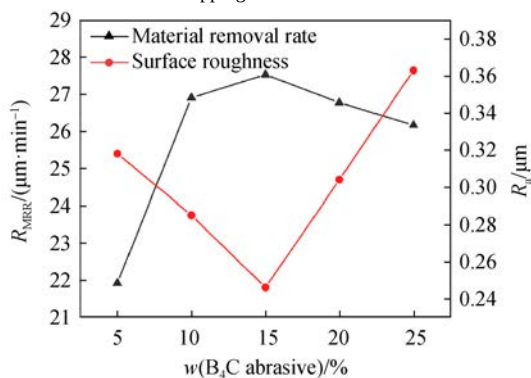
的研磨液流动性变差会造成磨粒堆积, 导致研磨过程中局部的热量过高, 使 YAG 晶体的表面损伤增多, 因此 B_4C 的质量分数大于 15% 后, 4 个步骤研磨后的 R_a 值均快速上升。



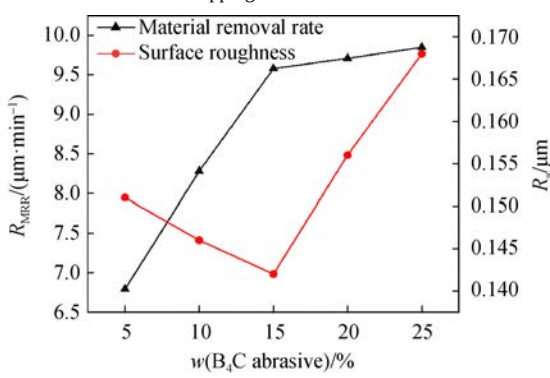
(a) Variation of R_{MRR} and R_a with mass fraction of B_4C when lapping with abrasive W40



(b) Variation of R_{MRR} and R_a with mass fraction of B_4C when lapping with abrasive W28



(c) Variation of R_{MRR} and R_a with mass fraction of B_4C when lapping with abrasive W14



(d) Variation of R_{MRR} and R_a with mass fraction of B_4C when lapping with abrasive W7

Lapping pressure is 44.54 kPa, and the rotational speed of both the lapping disc and the pendulum is 60 r/min; w is mass fraction.

图6 材料去除率和表面粗糙度随 B_4C 质量分数变化曲线

Fig. 6 Variation curve of R_{MRR} and R_a with mass fraction of B_4C

因此在 YAG 晶体分步研磨中各步骤均选择质量分数 15% 的 B_4C 研磨液可达到最好的研磨效果。

2.1.4 分步研磨工艺 从上述研磨试验可得出 YAG 晶体分步研磨最佳参数: 研磨压力 44.54 kPa, 研磨盘和摆轴转速 60 r/min, 研磨液中 B_4C 质量分数 15%。用此研磨工艺参数对 YAG 毛坯晶片分步研磨, 每步研磨时间 15 min, 最终可得表面粗糙度 $R_a=0.142 \mu m$ 的表面。

图 7 为材料去除率和表面粗糙度随磨粒粒度的变化。由图 7 可见:

当 B_4C 磨料粒径逐级减小时, R_{MRR} 值和 R_a 值均逐渐减小, 且下降趋势基本相同。磨料 W40 研磨的 R_{MRR} 最大, 为 $83.12 \mu m/min$, 磨料 W28、磨料 W14、磨料 W7 研磨的 R_{MRR} 分别为 57.32、27.54、9.53 $\mu m/min$ 。原本布满线切割切痕的不平表面经磨

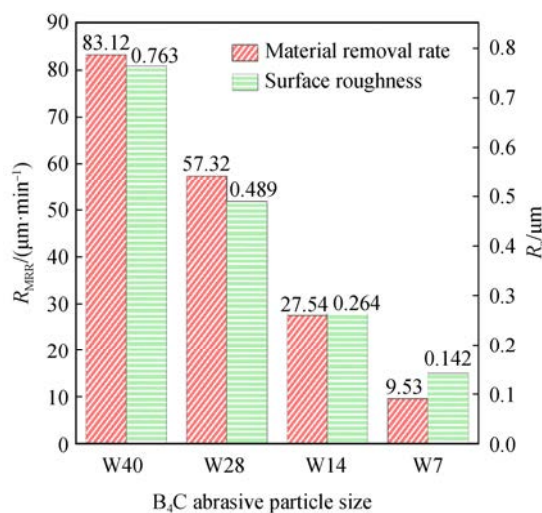


图7 材料去除率和表面粗糙度随磨粒粒度的变化

Fig. 7 Variation of material removal rate and surface roughness with B_4C abrasive particle size

料 W40 研磨后变得平整均匀, $R_a=0.763\text{ }\mu\text{m}$; 再分别经过磨料 W28、磨料 W14、磨料 W7 研磨后 R_a 进一步优化为 0.489、0.264、0.142 μm 。研磨效果随磨料粒径如此变化是因为粒径越大的磨粒在 YAG 晶体表面滚动时切入晶体的部分越大, 切削能力越强, 脆性去除现象更为显著, 所以材料去除加快, R_{MRR} 更大; 脆性去除增多会给 YAG 晶体表面带来更大的损伤, 导致 R_a 增大; 反之粒径越小 R_{MRR} 和 R_a 越小。由图 7 还可以看出, 磨料 W40 和磨料 W28 研磨后对应的柱形图代表 R_a 的绿柱均低于代表 R_{MRR} 的红柱, 磨料 W14 的绿柱稍高于红柱, 磨料 W7 对应的绿柱远高于红柱, 这是因为磨粒粒径越小团聚现象越严重, 小磨粒团聚成大磨粒对 YAG 晶体表面造成更大损伤, 造成柱形图上绿柱的偏离。

得到最佳研磨参数后, 可以进一步确定研磨工艺。磨料 W40 研磨的 R_{MRR} 大, R_a 也较大, 此步研磨的目的是去除线切割的切痕, 时间不宜过长, 使表面平整即可, 因为该步骤去除量大, 研磨时间过长会大大减少加工余量, 可能导致元件太薄报废。磨料 W28 研磨的 R_{MRR} 相对较大, R_a 较为适中, 此步研磨的目的是一是去除磨料 W40 研磨步骤产生的损伤; 二是改善 YAG 晶体表面的平面度; 三是根据图纸要求修正元件的几何尺寸, 磨料 W28 研磨后元件基本成形。磨料 W14 研磨主要是去除磨料 W28 研磨后的损伤, 此步目的是加快研磨效率, 因为磨料 W7 研磨的去除率较小, 若使用磨料 W7 去除上一步骤损伤所需时间较长。磨料 W7 研磨步骤的作用是去除磨料 W14 研磨的亚表面损伤, 减小表面粗糙度, 为抛光做准备。

2.2 亚表面损伤测量结果及分析

图 8 为磨料 W14、磨料 W7 研磨后的截面显微图像。由图 8a 和图 8b 可见:

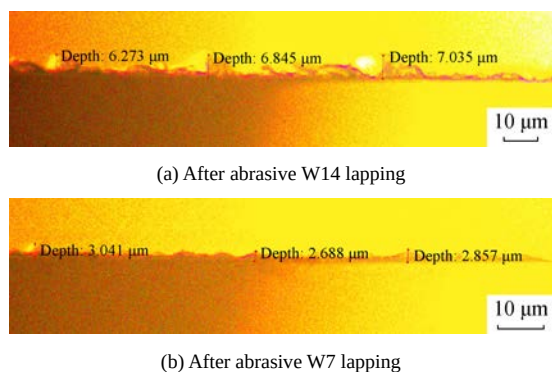


图 8 磨料 W14、磨料 W7 研磨后的截面显微图像

Fig. 8 Micrograph of the cross section after lapping of abrasive W14 and abrasive W7

磨料 W14 研磨后亚表面损伤的裂纹比磨料 W7 的更为明显, 说明粒径较大的磨料研磨过程中脆性去除更显著, 造成损伤更大。根据显微镜自带测量系统测量所得磨料 W14 研磨引入的亚表面损伤为 7.035 μm , 最后步骤磨料 W7 研磨引入的亚表面损伤为 3.041 μm 。

对于 YAG 晶体研磨后亚表面损伤研究: 慕卿^[21]使用 7 μm Al_2O_3 对 YAG 晶体进行研磨后, 通过角度抛光显微法测得亚表面损伤深度为 9.1 μm ; 安润丽使用粒度为 10 μm 的金刚石固结磨盘研磨 YAG 晶体, 通过差动腐蚀法和角度抛光显微法分别测得亚表面损伤值为 5.01 μm 和 6.86 μm ^[17]。由此可见通过本工作的研磨工艺可以得到较小的亚表面损伤。

根据印压断裂力学理论建立的亚表面损伤深度与表面粗糙度的模型表明, 游离磨料研磨后 h_{SSD} 与 R_a 满足 $h_{SSD} \sim R_a^{4/3}$ 的非线性关系^[12]。磨料 W14 研磨后 $R_a=0.264\text{ }\mu\text{m}$, $h_{SSD}=7.035\text{ }\mu\text{m}$; 磨料 W7 研磨后 $R_a=0.142\text{ }\mu\text{m}$, $h_{SSD}=3.041\text{ }\mu\text{m}$, 将以上 2 组实验数据根据上述模型关系进行拟合。

图 9 为亚表面损伤深度与表面粗糙度间的关系曲线。由图 9 可见, 实验数据较好地满足模型的非线性关系, 可得出在本工作的研磨参数下 YAG 晶体研磨后亚表面损伤深度与表面粗糙度的关系为: $h_{SSD}=41.46 \times R_a^{4/3}$ 。

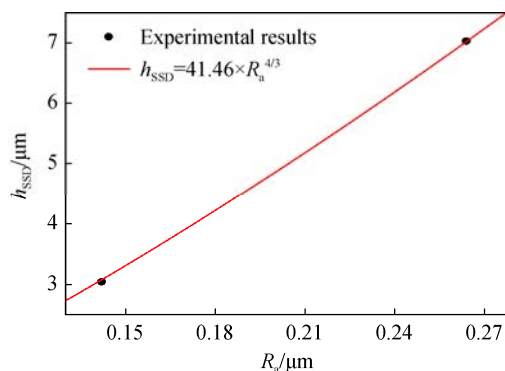


图 9 亚表面损伤深度与表面粗糙度间关系曲线

Fig. 9 Relationship between subsurface damage and surface roughness

由研磨试验可知, 磨料 W7 研磨的 R_{MRR} 为 9.53 $\mu\text{m}/\text{min}$, 去除磨料 W14 研磨产生的 7.035 μm 亚表面损伤较为容易, 因此磨料 W7 研磨步骤应主要关注研磨后表面粗糙度和面形的好坏, 以确定能否进入抛光阶段。抛光应将磨料 W7 研磨引入的亚表面损伤去除, 即抛光工序的去除量至少为 3.041 μm 。

3 结论

1) 通过参数试验探究了每个步骤研磨后的材料去除率和表面粗糙度随研磨压力、研磨盘和摆轴转速、研磨液中磨料质量分数的变化规律, 解释了其中原因, 得出每个步骤的最佳研磨参数: 研磨压力 44.54 kPa、研磨盘和摆轴转速 60 r/min、研磨液中 B₄C 质量分数为 15%。此工艺参数下磨料 W40、磨料 W28、磨料 W14、磨料 W7 研磨的材料去除率分别为 83.12、57.32、27.54、9.53 μm/min, 研磨后表面粗糙度 R_a 分别为 0.763、0.489、0.264、0.142 μm。

2) 通过截面显微法得出分步研磨后亚表面损伤深度为 3.041 μm, 为后续抛光去除量提供参考; 通过实验数据拟合得到的研磨参数下, YAG 晶体研磨后亚表面损伤深度与表面粗糙度的关系为 $h_{SSD}=41.46 \times R_a^{4/3}$ 。

本工作通过研究得出了 YAG 晶体研磨具体详细的加工参数、工艺方法、研磨后亚表面损伤深度等数据, 对探索大尺寸激光晶体研磨加工、降低实际生产中的对人工的依赖、发展 YAG 晶体高精度自动化加工具有重要意义。

参考文献:

- [1] ZHANG Ge, JIANG Benxe, ZHANG Pande, et al. Growth mechanism of YAG single crystal in planar waveguide by solid-state crystal growth method[J]. Ceram Inter, 2018, 44(15): 18949–18954.
- [2] XU Shizhen, QIU Jianrong, LI Chengbin, et al. Direct writing waveguides inside YAG crystal by femtosecond laser[J]. Opt Commun, 2009, 282(24): 4810–4814.
- [3] DONG Jun, SHIRAKAWA A, UEDA K I, et al. Efficient laser oscillation of Yb: Y₃Al₅O₁₂ single crystal grown by temperature gradient technique[J]. Appl Phys Lett, 2006, 88: 161115.
- [4] QIU Hongwei, YANG Peizhi, DONG Jun, et al. The influence of Yb concentration on laser crystal Yb:YAG[J]. Mater Lett, 2002, 55(1): 1–7.
- [5] 孙志明. 钇铝石榴石晶体的机械研磨抛光工艺研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
SUN Zhiming. Study on Mechanical Lapping and Polishing Process of Yttrium Aluminum Garnet Crystal(in Chinese, dissertation). Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [6] 杨遇春. YAG固体激光器与激光材料加工[J]. 激光与红外, 1997(6): 326–329.
YANG Yuchun. Laser Infrared(in Chinese), 1997(6): 326–329.
- [7] 蒋光伟, 李亚华, 李正佳, 等. 1.32 μm Nd:YAG激光器及其医学应用[J]. 应用激光, 1998(2): 88–90.
JIANG Guangwei, LI Yahua, LI Zhengjia, et al. Appl Laser(in Chinese), 1998(2): 88–90.
- [8] 泽言. 空间通讯: 可见频带Nd:YAG激光器的实际应用[J]. 激光与红外, 1978(S3): 8–16, 46.
ZE Yan. Laser Infrared(in Chinese), 1978(S3): 8–16, 46.
- [9] 任国光. 高能激光武器的现状与发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2008(9): 62–69.
REN Guoguang. Laser Opt Progr(in Chinese), 2008(9): 62–69.
- [10] 谢瑞清, 廖德锋, 王晓博, 等. 板条Nd:YAG晶体的合成盘抛光技术[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(1): 140–143.
XIE Ruiqing, LIAO Defeng, WANG Xiaobo, et al. High Power Laser Part Beams(in Chinese), 2014, 26(1): 140–143.
- [11] 明舜, 李军, 张羽驰, 等. 磨粒尺寸和基体硬度对固结磨料抛光YAG晶体的影响[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2020, 40(3): 86–90.
MING Shun, LI Jun, ZHANG Yuchi, et al. Diamond Abras Eng(in Chinese), 2020, 40(3): 86–90.
- [12] 王卓, 吴宇列, 戴一帆, 等. 光学材料研磨亚表面损伤的快速检测及其影响规律[J]. 光学精密工程, 2008(1): 16–21.
WANG Zhuo, WU Lieyu, DAI Yifan, et al. Opt Prec Eng(in Chinese), 2008(1): 16–21.
- [13] 王建彬, 马睿, 江本赤, 等. 固结磨料研磨单晶蓝宝石亚表面损伤的预测[J]. 表面技术, 2020, 49(6): 345–351.
WANG Jianbin, MA Rui, JIANG Benchu, et al. Surf Technol(in Chinese), 2020, 49(6): 345–351.
- [14] 谢春, 汪家林, 唐慧丽. 碳化硼研磨后蓝宝石晶体的亚表面损伤[J]. 光学精密工程, 2017, 25(12): 3070–3078.
XIE Chun, WANG Jialin, TANG Huili. Opt Prec Eng(in Chinese), 2017, 25(12): 3070–3078.
- [15] 张瑜. 蓝宝石高效低损伤加工工艺研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
ZHANG Yu. Research on High-efficiency and Low-damage processing of Sapphire(in Chinese, dissertation). Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [16] 李军, 朱永伟, 左敦稳, 等. Nd:Y₃Al₅O₁₂透明陶瓷的超精密加工[J]. 硅酸盐学报, 2008(8): 1178–1182.
LI Jun, ZHU Yongwei, ZUO Dunwen, et al. J Chin Ceram Soc, 2008(8): 1178–1182.
- [17] 安润莉. YAG晶体的固结磨料研磨与化学机械抛光工艺研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
AN Runli. Study on Fixed-abrasive Lapping and Chemically Mechanical Polishing of Yttrium Aluminum Garnet Crystal(in Chinese, dissertation). Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [18] 戴鹏. 蓝宝石超精密研磨加工工艺实验研究[D]. 湖南科技大学, 2018.
DAI Peng. Experimental study on ultraprecision lapping process of sapphire(in Chinese, dissertation). Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2018.
- [19] 吴东江, 曹先锁, 王强国, 等. KDP晶体加工表面的亚表面损伤检测与分析[J]. 光学精密工程, 2007(11): 1721–1726.
WU Dongjiang, CAO Xiansuo, WANG Qiangguo, et al. Opt Prec Eng(in Chinese), 2007(11): 1721–1726.
- [20] 王华东, 张泰华. 光学材料亚表面损伤的表征与检测技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(10): 31–42.
WANG Huadong, ZHANG Taihua. Laser Opt Progr(in Chinese), 2017, 54(10): 31–42.
- [21] 慕卿. YAG晶体研抛加工中的材料去除过程研究[D]. 大连理工大学, 2020.
MU Qing. Research on Material Removal of YAG Crystal During Lapping and Polishing (in Chinese, dissertation). Dalian: Dalian University of Technology, 2020.