

激光与光电子学进展

硬脆材料的激光表面抛光研究进展

徐一帆^{1,2}, 邵景珍^{1**}, 林颖¹, 施阳杰^{1,2}, 梁勋^{1*}

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 合肥 230031;

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

摘要 激光抛光技术具有非接触式加工、不产生机械应力、抛光精度高等优点, 特别适用于脆硬材料的表面加工。本文阐述了激光抛光工艺的特点和作用机理, 介绍了激光抛光工艺中各参数对加工质量的影响, 综述了各国对于硬脆材料的激光抛光技术的研究成果和现状。着重介绍了激光热抛光和激光冷抛光的区别和特点, 以及抛光原理和研究进展。

关键词 材料; 热效应; 光化学效应; 激光抛光; 硬脆材料

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1300003

Research Progress in Laser Surface Polishing of Hard and Brittle Materials

Xu Yifan^{1,2}, Shao Jingzhen^{1**}, Lin Ying¹, Shi Yangjie^{1,2}, Liang Xu^{1*}

¹Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China;

²University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China

Abstract Laser polishing technology has the advantages of non-contact processing, no mechanical stress, high polishing accuracy, etc. It is especially suitable for surface processing of brittle and hard materials. This article describes the characteristics and mechanism of laser polishing process, introduces the influence of various parameters in laser polishing process on processing quality, and reviews the research results and current status of laser polishing technology for hard and brittle materials in various countries. The difference and characteristics of laser hot polishing and laser cold polishing, as well as the polishing principle and research progress are emphatically introduced.

Key words materials; thermal effect; photochemical effect; laser polishing; hard and brittle materials

1 引言

传统的硬脆材料包括光学玻璃、硅晶体、陶瓷、蓝宝石晶体等, 由于具备耐磨损、硬度高、耐高温等特点, 往往被用于制作仪器系统的关键部件, 激光晶体、半导体材料是其中的典型代表。而微电子领域和光学领域发展快速, 尤其是近几年光伏产业的兴起, 都对材料表面粗糙度提出了更高的要求。以光学系统为例, 其对透镜、激光晶体等光学元件的表面粗糙度要求极为苛刻, 因为这会直接影响整个系统的能量效率、成像质量等关键技术指标。目前工业生产经常使用的传统加工方式为机械抛光, 而此种加工方式容易造成硬脆材料表面、次表面损伤或边缘碎裂的情况。由此, 科研人员提出了各种新式的抛光技术, 其中包括化学机

械抛光、热化学抛光、水合抛光、等离子体抛光、激光抛光等各具特色的加工技术。

其中, 激光抛光技术是一种以一定波长和能量密度的激光照射工件表面, 使材料在很薄的范围内熔融、气化、剥离, 从而获得平滑表面的技术。它以非接触式加工、不产生机械应力、多参数全面可控、抛光精度高、单次作用面积小的特点^[1-2]从众多加工技术中脱颖而出, 得到了广泛的关注。19世纪60年代以来, 中、美、俄、德、日等国纷纷开展了激光抛光技术研究, 经过几十年的努力, 对于金刚石、半导体、金属、玻璃等常见材料的激光加工工艺和抛光机理研究成果众多。甚至在激光抛光研究的发展过程中, 短脉宽、短波长激光所引起的材料表面乃至材料整体改性的光电离和光化学现象也受到了一定关注^[3-4]。但由于激光对于材料的作

收稿日期: 2021-07-08; 修回日期: 2021-08-06; 录用日期: 2021-08-23

基金项目: 中国科学院青促会资助项目(2018481)、基础加强计划重点基础研究项目(2021-JCJQ-ZD-051-00-05)

通信作者: *liangxu@aiofm.ac.cn; **jzshao@aiofm.ac.cn

用因激光波长、材料性质而异,故而在该领域仍需要进行大量的有针对性的研究工作。

2 激光抛光脆硬材料的优势

2.1 脆硬材料概述

硬脆材料,顾名思义其特点为:硬度高、断裂韧性低、脆性大,弹性极限和强度非常接近,因此,在外力作用下不易变形,但施加过大的能量会造成材料断裂。高硬脆材料主要包括蓝宝石、光学玻璃、晶体硅、硬质合金、磁性材料、陶瓷等。它们广泛应用于包括半导体芯片、光电显示、消费电子、精密零件、高端机械、军工科技等诸多领域。目前工业生产过程中经常使用的表面加工方式为机械抛光,其主要环节包括物料切割、粗研磨、精研磨、粗抛光、精密抛光、质量检测等。而此种加工方式在加工硬脆材料时会不可避免地会在材料表面产生深浅不一的划痕,极易使材料出现次表面裂纹或边缘碎裂的情况^[5],加工质量也受制于磨料、磨盘所产生的机械损伤,这种方式对加工材料自身的机械强度有着较高的要求^[6]。

2.2 脆硬材料的激光抛光优势

相较于传统的研磨加工方式,激光作为一种不产生机械应力的非接触式加工手段,在硬脆材料表面的处理上有着如下优势:

- 1) 加工精度高,激光加工后的表面粗糙度普遍低于传统抛光方式,可以达到纳米量级。
- 2) 激光的各个参数(脉冲频率、能量密度等)可调控,可以更加精细地控制整个处理过程,也更容易整合为一个自动化平台,为不同的材料处理提供一站式解决方案。
- 3) 激光单次作用的区域很小,可以对一部分材料表面进行选区处理。
- 4) 非接触式的加工方法可以处理各种复杂形状

表面,甚至是柔性材料表面,不会因为机械应力而导致工件破裂。

5) 材料表面不会被研磨液、磨盘上的材料污染,是一种绿色的加工方式。

6) 短波长激光产生的光化学作用可以使处理过程中产生的碎屑变性,更容易剥离材料的原表面。

7) 激光诱导的光化学作用可以根据加工材料的不同,搭配不同的气体或抛光液进行间接刻蚀或抛光,为不同的材料灵活制定合适的处理方案。

这些特点使得激光抛光成为了硬脆类材料高精度抛光的候选技术之一。

3 激光对硬脆材料的抛光研究及应用

20世纪90年代中期,激光抛光技术开始在全球范围内兴起,根据激光光源、作用材料等的不同,激光抛光的作用过程大致可以分为热抛光和冷抛光两类:热抛光一般用连续激光,主要使用长波长(例如 $1.06\ \mu\text{m}$ 和 $10.6\ \mu\text{m}$)的激光器,作用的机理是基于材料吸收激光后的热效应,通过熔化、蒸发等过程来去除材料表面的成分。但是,这些红外波段的激光在材料表面抛光过程中,热效应显著,导致温度梯度较大,造成热应力大,容易产生裂纹,抛光效果不是很好,难以满足大尺寸晶体抛光要求。冷抛光一般用短脉冲(fs、ps)激光或准分子激光,这些激光的特点是脉冲宽度很窄,材料吸收强烈。材料吸收光子后,其化学键被打断或者晶格结构被破坏,材料中成分被剥离,产生的热影响区很小,抛光表面几乎不产生裂纹,抛光区域深层或周围材料的物理性质变化可以忽略不计,材料去除量易于控制。长脉冲的光热抛光与超短脉冲光冷抛光的特点如图1^[7]所示。冷抛光可完成热抛光不能完成的一些工作,因此激光冷抛光在硬脆性晶体元件精密抛光等方面具有无可比拟的优越性。

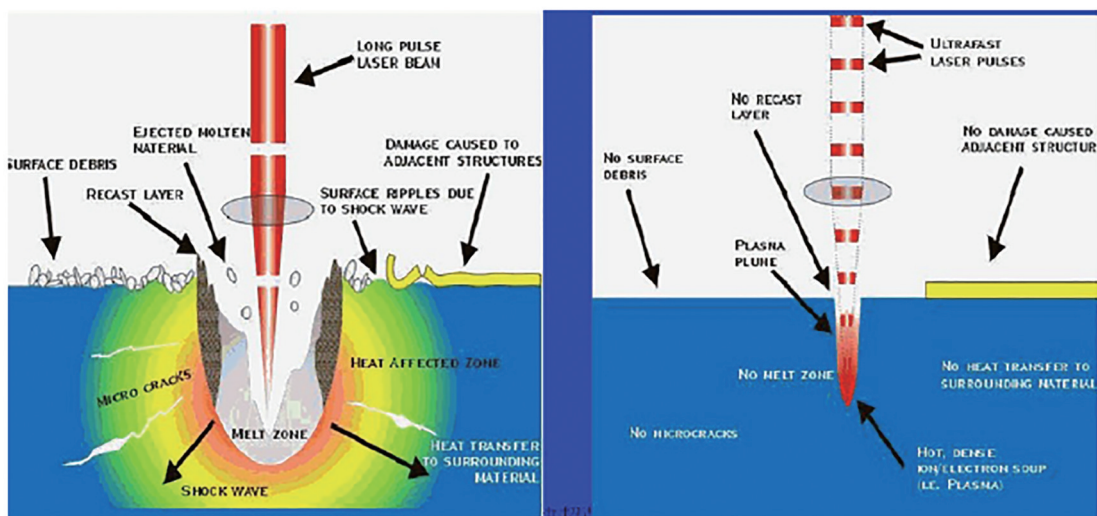


图1 长脉冲激光与超快脉冲激光处理材料对比^[7]

Fig. 1 Comparison of long-pulse laser and ultra-fast pulse laser processing materials^[7]

3.1 激光热抛光

3.1.1 激光热抛光机理研究进展

光热作用是指,激光照射物质表面,被吸收后导致材料升温,产生一个随时间变化、随空间分布的温度场,在物质温度达到其熔点或沸点后产生相变的过程。被激光熔化的部分会向凹陷、裂纹处进行流动和填补,冷却后重新凝固成新的表面,起到“熔峰填谷”的作用^[8];而被气化的部分材料则直接去除。

早期的激光热抛光原理研究从金属模型开始,2002年 Ramos 等^[9]利用 CO₂和 Nd:YAG 激光器对 420 不锈钢浸渍青铜制成的间接 SLS 零件进行激光抛光,首先提出了两种降低表面粗糙度的机制——浅表面熔解(SMM)和表面过熔解(SOM)。SMM 过程中,在毛细管压力和液体曲率的驱动下,熔融表面的回流使峰谷高度最小化。SOM 过程中,在表面张力梯度的驱动下,熔融深度使整个表面变为液态,表面周期结构的形成占主导地位,如图 2 所示。

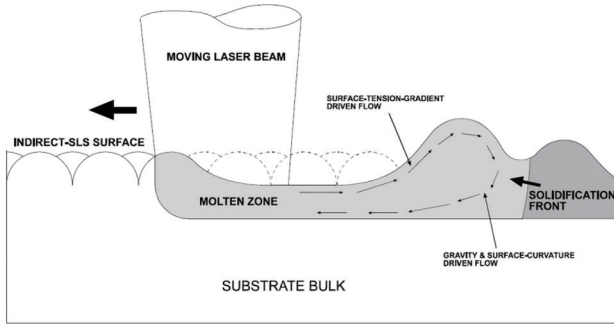


图 2 在 SOM 机制中形成的表面周期结构示意图^[9]

Fig. 2 Schematic diagram of surface periodic structure formed in the SOM mechanism^[9]

而 Shao 等^[10]建立了激光热抛光的简单模型,假设粗糙的金属表面由很多规则分布的相互独立的波峰和波谷组成,在这个条件下获得了激光抛光所需的能量阈值,表示为

$$E_i = \frac{T_0(t)(1 + \sqrt{\frac{\pi\alpha t}{4}} \frac{A_0}{V_0}) + \frac{L_i + L_v}{c}}{\frac{Ak_1}{\rho c} \frac{A_0}{V_0}} = \frac{T_0(t)\rho c}{\frac{A_0}{V_0} Ak_1} + \frac{T_0(t)\rho c}{Ak_1} \sqrt{\frac{\pi\alpha t}{4}} + \frac{(L_i + L_v)\rho}{Ak_1 \frac{A_0}{V_0}}, \quad (1)$$

式中: $T_0(t)$ 为材料被激光作用前后的温度差值; t 为激光脉冲宽度决定的激光作用时间; k_1 为材料表面各个波峰波谷间的反射因子; c 为材料比热; α 为材料热导率; A 为该材料对激光的吸收率; $\frac{A_0}{V_0}$ 是由波峰形状决定的波峰等效高度; L_i 为材料熔化热; L_v 为材料气化热; ρ 为材料比重。

经过多年发展,对于激光热抛光的原理与相应的

模型研究也扩展至熔石英等硬脆材料领域。2015年, Taylor 等^[11]研究了超快激光抛光过程中的热效应,对热积累机制进行模拟,来确定处理各种材料所需的最佳扫描速度和脉冲能量。同时作者认为沿烧蚀轨迹存在材料堆积是由不适当的激光加工参数导致材料过热造成的。

2019年, Zhao 等^[12]基于 CO₂激光处理熔融石英光学器件的多物理场过程(图 3),首次提出一种多光束耦合抛光数值模型。从理论上揭示了熔融石英表面抛光机理。该数值模型可以计算出激光抛光的抛光深度、表面形貌和表面粗糙度。并试验验证了 CO₂激光抛光可以去除石英玻璃表面的裂纹缺陷,使表面更加光滑。

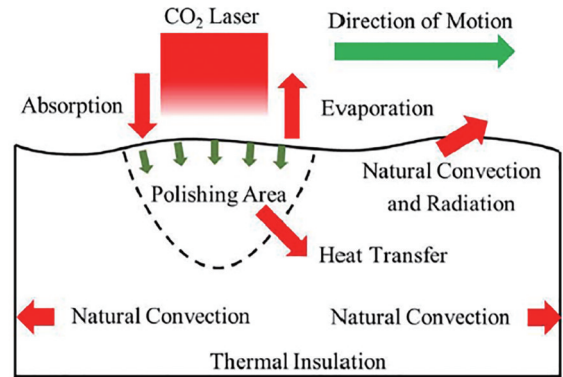


图 3 CO₂激光处理熔融石英光学器件的多物理场过程^[12]

Fig. 3 Multiphysics process of CO₂ laser processing of fused silica optics^[12]

2020年,贺婷等^[13]对石英进行了局部高精度激光烧蚀试验,并基于有限元法建立了 CO₂脉冲激光扫描的三维热传导数值模型,分析了激光重复频率和光斑重叠率对石英玻璃表面温度分布的影响。

2021年,吕可鑫等^[14]根据电介质材料多脉冲烧蚀阈值变化规律,使用 MATLAB 软件建立了超快激光抛光硬脆光学材料的抛光结果计算模型,并利用该模型计算不同入射角、不同前进步长下超快激光对材料的抛光结果,可以直观地解释超快激光对光学材料的抛光结果。

3.1.2 脆硬材料的激光热抛光工艺研究进展

2011年, Luo^[15]研究了 532 nm 纳秒激光作用下,蓝宝石晶体的激光加工工艺和作用机理。试验证明,在激光能量为 20 mJ 和 40 mJ,光斑直径为 100 μm 的情况下,主要的材料去除机理是断裂,同时存在光熔融机理。

2014年,周敏^[16]对短脉冲紫外激光(355 nm, 55 ns)抛光 Al₂O₃陶瓷的作用机理进行了研究。通过理论与试验分析了短脉冲紫外激光抛光 Al₂O₃陶瓷过程中存在的热作用、热应力作用、光化学作用。他们认为, 355 nm 激光加工 Al₂O₃陶瓷时主要作用形式为激光的

热作用而不存在光化学作用。通过单因素工艺试验得到:随能量密度和激光扫描速度的增加,材料表面粗糙度先降后升,最佳工艺参数为扫描速度 60 mm/s,扫描

间隔 2 μm ,激光正离焦量 0.1 mm。在材料去除量一定的情况下,使激光分别沿不同方向进行多次抛光,效果优于沿单一方向进行的抛光加工(图 4)

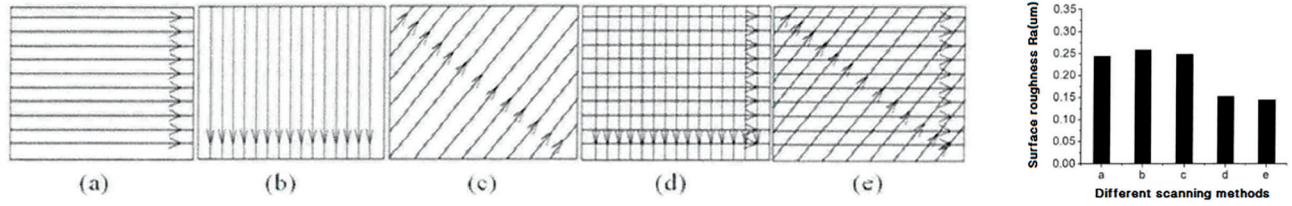


图 4 不同的抛光方式对材料表面粗糙度的影响^[16]

Fig. 4 Influence of different polishing methods on surface roughness of materials^[16]

2014年,孔令瑞^[17]对石英陶瓷材料的激光加工进行了研究,在CO₂激光功率为5 W时通过试验确定了最佳的扫描速度,将其表面粗糙度降低至1 μm 左右,其获得的形貌图如图 5所示。作者认为在抛光过程中,石英陶瓷对于二氧化碳激光吸收率较高且属于面吸收机制,石英陶瓷刻蚀面吸收二氧化碳激光能量之后温度

迅速升高并发生熔化现象,粗糙度较大的部分经过熔化之后趋于平坦,在重新冷却、凝固之后形成较为光滑的表面。在此过程中需严格控制激光的能量大小,如果激光能量过小,达不到石英陶瓷熔化的阈值,则基本不会发生变化。而当激光能量过大时,产生局部过热膨胀使表面出现炸裂现象,严重影响抛光效果。

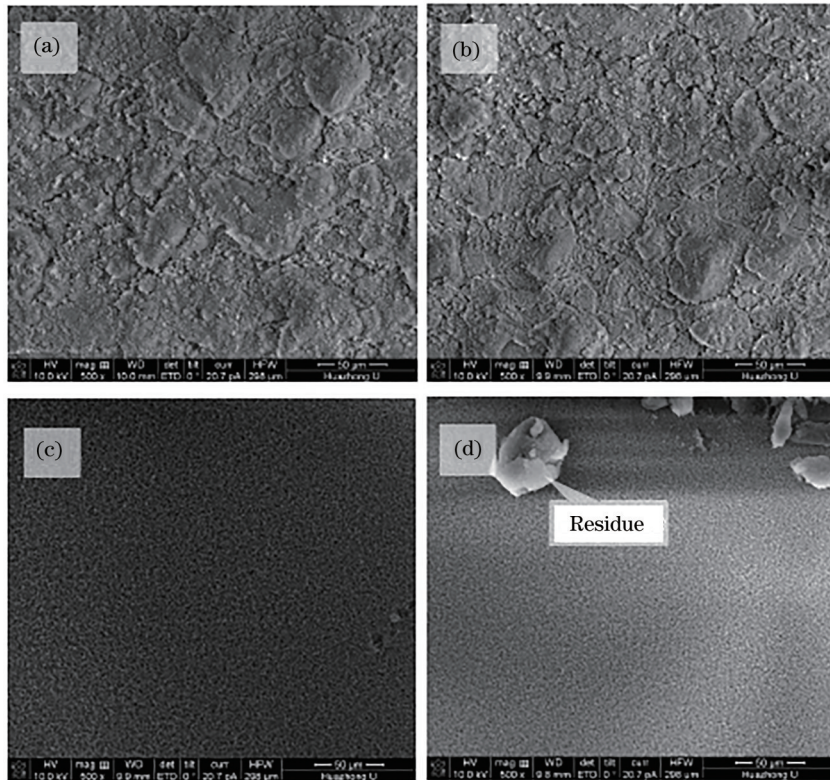


图 5 不同激光扫描速度抛光结果^[17]。(a)未抛光;(b)90 mm/s;(c)45 mm/s;(d)20 mm/s

Fig. 5 Polishing results at different laser scanning speeds^[17]. (a) Not polished; (b) 90 mm/s; (c) 45 mm/s; (d) 20 mm/s

2017年,李润强^[18]对石英玻璃表面的磨削裂纹和亚表面微裂纹面进行了CO₂激光修复试验,最终将粗糙度从0.071 μm 降低至18 nm的水平。有限元分析指出,激光热效应导致表面软化后的表面张力是裂纹愈合的主要作用因素。低温加热去应力过程中,800 $^{\circ}\text{C}$ 下保温12 h后以10 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 速率降温至740 $^{\circ}\text{C}$ 可以使材料达到国标应力双折射1级要求。

2017年,Weingarten等^[19]使用CO₂激光对融石英、BK7和S-TIH6玻璃材料进行抛光,发现材料表面粗糙度受玻璃热性能的影响强烈,激光的热效应会使材料表面熔化并产生波纹。两次CO₂激光加工后形状误差和残留波纹度减小,粗糙度可达5 nm。

2019年,刘朋朋^[20]对CO₂激光抛光石英元件过程中的温度场进行了仿真,得到了各加工参数共同作用

下的温度场分布规律,并建立了传热与流体力学耦合的多物理场模型,模拟了石英表面在激光照射下发生相变、产生流动的行为过程。其使用CO₂激光对石英材料进行抛光试验,在光斑为短轴2 mm、长轴3 mm的椭圆的条件下使表面粗糙度由150 nm降低至1.5 nm。

2018年,Vogt等^[21]提出了一种称为CLasso(激光表面优化控制)的新型参数控制方法,应用于熔石英材料的CO₂激光抛光工艺中。通过对抛光激光束的反射光强的检测,来确定和控制激光在进一步移动之前需要停留在某个点的最佳时间,从而在节约成本的同时使得抛光质量更加稳定。

Wang等^[22]研究了光强为平顶和高斯分布的CO₂激光对熔融石英表面的平滑效果。发现两种光强分布的激光均可以将表面微粗糙度为500 nm的平面抛光至小于0.5 nm,而且较低的功率密度与较慢的扫描速度相结合有利于提高表面质量。其建立的数值模型仿真则表明抛光过程中随温度升高,熔融石英的黏度不断降低,进而改善表面质量。

3.2 激光冷抛光

激光的冷抛光可以按作用原理分为光化学作用和光电离作用两大类型,它们都仅针对激光照射的部分进行材料去除,却几乎不会对照射区域外的部分产生附带的热作用与热应力,很适合各种材料的超精密加工。

3.2.1 光化学抛光

光化学作用是在材料表面吸收了单个或多个光子后,材料吸收的光子能量大于化学键能时,会造成材料晶格结构破坏,导致其部分表面发生改性、剥离原表面的效果。值得一提的是,准分子激光作为一种短波长激光,其单光子能量高,在加工某些材料时会存在单、多光子吸收导致的光化学作用。其次,大多数金属和非金属材料都对紫外光有着强烈的吸收,因此,准分子激光极其适合该类型抛光任务,很多研究者对此进行了大量研究。

光化学作用模型最先由美国的Srinivasan等^[23]在1982年提出,他们在研究准分子激光加工聚乙烯时得到了准分子激光与聚乙烯的作用过程以及材料去除机理,并提出了光化学剥离的概念。Brannon等^[24]最早提出了激光与物质作用时的光化学作用模型,得到Beer定律,即激光能量密度在材料破坏阈值能量密度以上的微小范围内,激光对材料的光化学作用刻蚀深度服从Beer定律,其模型表示为

$$\Phi_x = \Phi_{\text{inc}} \exp(-\alpha X), \quad (2)$$

式中: Φ_x 是材料深度 x 处的衰减能量注量; Φ_{inc} 是入射脉冲能量密度; α 是给定波长下的吸收系数。

随着研究的深入,激光光化学研究对象也应用在了脆硬材料的抛光上。

1997年,Ozkan等^[25]首先采用波长为532 nm的Nd:YAG激光对金刚石薄膜进行粗抛,再使用波长为193 nm,能量密度为16.5 J/cm²的ArF准分子激光进行精抛,将金刚石薄膜的表面粗糙度从25 μm降至1 μm左右。

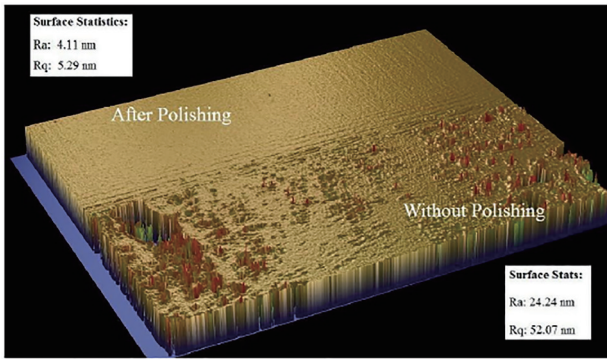
2002年,Murahara^[26]将粗磨后的SiC样品固定于氟碳抛光垫上,将15%的HF和H₂O₂混合溶液渗入样品和氟碳化合物之间的细缝中,并从SiC样品的背面照射KrF激光,过氧化氢在KrF激光辐照下产生的活性氧与光激发SiC反应生成CO₂和SiO₂,CO₂气体直接逸出,而附着在样品表面的SiO₂则会被氢氟酸溶解。在使用KrF激光进行60 min抛光后,最终获得了80 nm粗糙度的表面。

2007年,谢昕^[27]分析了不同波长激光作用于蓝宝石晶体的机制,试验结果表明,532 nm绿光激光与蓝宝石作用以热效应为主,而紫外激光则以多光子吸收的光化学作用为主。同时得到了激光能量对材料抛光效果和表面形貌的影响:低能量时材料表面以断裂破碎为主,同时存在轻微熔化,而高能量时则以解理断裂和沿晶断裂为主。

2009年,Wei等^[28]使用25 ps、355 nm的脉冲紫外激光对蓝宝石的抛光特性进行了研究,分析表面粗糙度与加工参数的相关性,例如激光能量密度、入射角、扫描速度和扫描方式对粗糙度的影响。研究结果显示,蓝宝石晶片抛光后的表面粗糙度随着激光能量密度的增加得到明显改善,当能量密度为19.1 J/cm²时,获得最佳表面粗糙度0.104 μm。此外研究结果还表明,材料表面粗糙度随激光入射角或扫描时间的增加而减小,随激光扫描速度的增加而增加,随着扫描次数的增加而降低。

2011年,宋悠全^[29]使用355 nm紫外激光抛光蓝宝石,采用单因素试验和多因素正交试验方法,研究紫外激光抛光蓝宝石过程中各工艺参数对抛光表面粗糙度的影响规律及最优工艺参数组。研究结果表明,在激光能量密度为30.2~35 J/cm²时,光化学作用比率最高,激光抛光后蓝宝石表面粗糙度最低。当激光能量密度大于35 J/cm²时,热作用的影响较为明显,最佳工艺参数条件下蓝宝石抛光表面相对更平坦、整洁,热作用相对较弱,微观表面团絮状破碎较少,抛光表面较均匀。

2017年,李政达^[30]使用248 nm准分子激光对6H-SiC和YBCO进行了微区域抛光修复试验。在6H-SiC单晶损伤表面的抛光修复试验中,测定得到较为理想的工艺参数为激光能量密度0.314 J/cm²,重复频率4 Hz,焦点位于焦面上方2.6 mm,最终获得了粗糙度4.11 nm的表面(图6)。并通过对形貌的观察确定了抛光机理为重结晶现象,随后进行的拉曼光谱检测发现,加工过程中会有石墨烯生成。他们认为,准分子激光抛光6H-SiC单晶的过程是一个复杂的物理与光

图 6 激光抛光前后效果对比^[30]Fig. 6 Effect comparison before and after laser polishing^[30]

致化学反应过程的混合。

对原粗糙度为 110.71 nm 的 YBCO 薄膜进行抛光试验,在激光能量密度为 0.112 J/cm^2 ,扫描速度为 $20 \mu\text{m/s}$,重复频率为 3 Hz 时,得到的最佳抛光效果为 43.26 nm 粗糙度的表面,并发现激光作用会破坏金属与氧的键合作用并使其与其他氧分子再次键合,使 YBCO 的晶格有序度得到了加强。

3.2.2 光电离作用

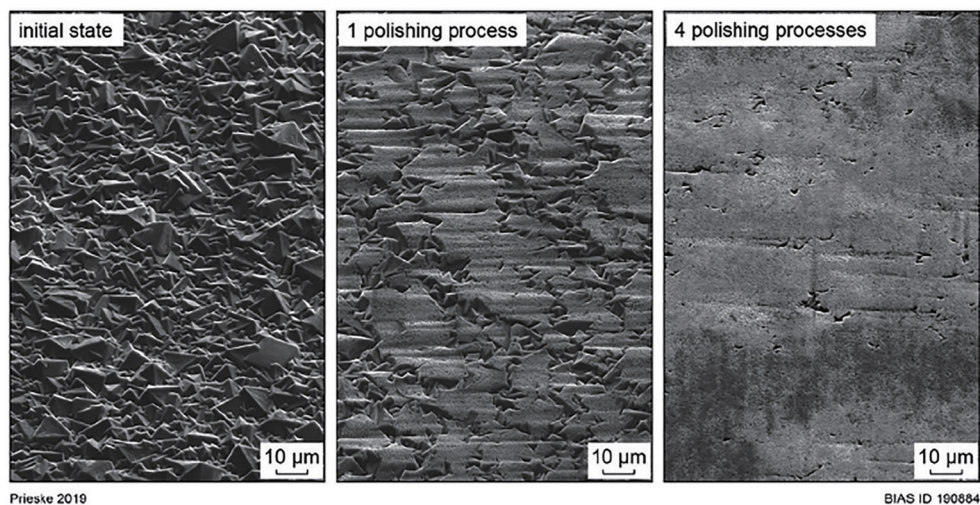
飞秒和皮秒等超短脉宽激光与材料相互作用时,由于超短脉冲宽度小于电子-声子相互作用的时间尺度,电子没有足够的时间将能量传递给晶格,因此表现出“冷”加工特性。同时,超快激光具有极高的峰值功率,在短时间内使材料发生双光子吸收、高阶多光子吸收、隧道电离或超势垒电离等非线性吸收过程,电子处

于受激发状态。最终形成高压、高温、高密度的等离子体,等离子体向外喷溅实现材料的光电离加工。

随着超短激光技术的发展,基于光电离效应、烧蚀效应的超短激光技术也被应用于碳化硅^[31]、融石英、单晶硅^[32-33]、KDP 晶体、金刚石涂层^[25]和氧化铝陶瓷^[34]等脆硬材料的抛光加工中。

2013 年,徐刚等^[35]假定激光束单次扫描的材料去除深度为固定值,在此前提下建立了 157 nm 超短脉冲激光抛光 GaN 材料的抛光模型,并结合试验解释了抛光后底面沟壑的产生,总结了激光脉冲频率、扫描速度与材料表面粗糙度的趋势关系。

而韩小花^[36]主要研究了超快激光参数对材料抛光性能的影响,在皮秒激光波长为 355 nm、激光重复频率为 800 kHz、脉冲能量密度为 2.4 J/cm^2 、光斑搭接率为 60%、 45° 多方向交叉扫描以及加工次数为 10 次的条件下,将 KDP 晶体表面粗糙度降低至 76 nm 的水平;Zhang 等^[34]结合试验结果,通过理论分析确定了皮秒激光抛光氧化铝陶瓷的机制是超快激光激发的纳米粒子熔化和重结晶,在陶瓷表面形成一层致密的微晶结构,从而使粗糙度降低;张遥^[37]对 CVD 金刚石涂层进行了飞秒激光抛光研究,在飞秒激光功率 100 mW、扫描速度 1.6 mm/s 时获得了 $0.149 \mu\text{m}$ 粗糙度的表面;Prieske 等^[38]使用 515 nm 皮秒激光来抛光金刚石涂层。将激光作用时间控制在晶格碰撞的自由时间之内可以防止样品被加热并由此形成石墨。此方法加工金刚石涂层表面可以将粗糙度从 $1.85 \mu\text{m}$ 降低到 $0.51 \mu\text{m}$,其材料表面电镜图像如图 7 所示。

图 7 CVD 金刚石表面的扫描电子显微镜图像^[37]Fig. 7 Scanning electron microscope images of the CVD-diamond surfaces^[37]

而 Wang 等^[39]则结合了化学机械抛光技术与激光抛光技术,用飞秒激光作为化学机械抛光工艺(CMP)的新预处理方法。在飞秒激光照射后使用普通胶体二氧化硅浆料对 SiC 基板进行短时间抛光,相比未经激光照射的表面,表面粗糙度和材料去除率都有明显改

善。Zheng 等^[40]研究了水下飞秒激光抛光 SiC 陶瓷的情况,在 40 kHz 的重复频率和 $40 \mu\text{J}$ 的脉冲能量下获得无裂纹、凹坑和碎屑表面,平均表面粗糙度为 $0.72 \mu\text{m}$,平均去除深度为 $32.19 \mu\text{m}$ 。

4 结束语

对于硬脆材料的超精密加工一直是学术界的难题,相较于机械加工,激光抛光可以通过各个参数的调节来适应不同材料、不同粗糙度水平的加工。对硬脆材料的抛光研究中,国内的研究大部分集中在工艺参数上:一般情况下,激光波长越短、能量密度与材料损伤阈值越接近、入射角越大,激光对材料的去除量就越多,因而抛光精度也越高。激光抛光以其高效率、低成本、高精度的特点逐渐得到了国内外学者的关注,在研究过程中积累了大量基础数据和加工经验,同时也有不少将激光抛光和其他抛光技术(例如水合抛光、激光诱导光化学抛光等)相结合以获得更好的表面质量的相关研究。但从已有的研究材料来看,对于不同的材料,为达到最佳的抛光效果,其选用的最佳抛光参数也各不相同,因而此领域仍需要大量有针对性的工作。

从国内外工作内容上来看:国外的激光抛光研究工作大多集中在金属材料的热抛光领域,对硬脆材料较少涉及;国内则热衷于对各类硬脆材料的抛光工艺参数进行研究,对抛光原理与模型的研究则主要集中在石英材料的热抛光过程上。

而在激光抛光机理研究方面,对于各类材料的热效应研究较多。由于高光子能量激光在抛光过程中对材料的作用过程复杂,其往往是热效应、光化学作用、光电离作用相互叠加,因此相应的模型研究难度较大,此领域的工作也尚不充分。

参 考 文 献

- [1] Malinauskas M, Žukauskas A, Hasegawa S, et al. Ultrafast laser processing of materials: from science to industry[J]. *Light: Science & Applications*, 2016, 5(8): e16133.
- [2] 曹小文, 张雷, 于永森, 等. 飞秒激光制备微光学元件及其应用[J]. *中国激光*, 2017, 44(1): 0102004.
Cao X W, Zhang L, Yu Y S, et al. Application of micro-optical components fabricated with femtosecond laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 0102004.
- [3] Jiang C Y, Zhou G Q, Xu J, et al. Femtosecond laser irradiation on YAG and sapphire crystals[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2004, 260(1/2): 181-185.
- [4] Gong H, Sun Y, Li C F. Effects of excimer laser irradiation on the KDP crystal[J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3578: 516-518.
- [5] Choi J, Schwarz C. Advances in femtosecond laser processing of optical material for device applications[J]. *International Journal of Applied Glass Science*, 2020, 11(3): 480-490.
- [6] 姜峰, 李剑峰, 孙杰, 等. 硬脆材料塑性加工技术的研究现状[J]. *工具技术*, 2007, 41(8): 3-8.
Jiang F, Li J F, Sun J, et al. Research actualities of ductile machining for hard and brittle materials[J]. *Tool Engineering*, 2007, 41(8): 3-8.
- [7] Zhu P F, Han J, Xie H, et al. Study of ultrafast laser polishing technology[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9449: 944934.
- [8] Krishnan A, Fang F Z. Review on mechanism and process of surface polishing using lasers[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2019, 14(3): 299-319.
- [9] Ramos J A, Bourell D L, Beaman J J. Surface over-melt during laser polishing of indirect-SLS metal parts[J]. *MRS Online Proceedings Library*, 2002, 758: 19.
- [10] Shao T M, Hua M, Tam H Y, et al. An approach to modelling of laser polishing of metals[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2005, 197(1): 77-84.
- [11] Taylor L L, Qiao J, Qiao J. Femtosecond laser polishing of optical materials[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9633: 96330M.
- [12] Zhao L J, Cheng J, Chen M J, et al. Formation mechanism of a smooth, defect-free surface of fused silica optics using rapid CO₂ laser polishing[J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2019, 1(3): 035001.
- [13] 贺婷, 曹珍, 魏朝阳, 等. 脉冲 CO₂ 激光高精度烧蚀熔石英玻璃[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2020, 50(3): 115-123.
He T, Cao Z, Wei C Y, et al. High precision laser ablation of fused silica using pulsed CO₂ laser[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2020, 50(3): 115-123.
- [14] 吕可鑫, 韩雪松. 超快激光抛光硬脆光学材料工艺数值模拟研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(5): 0532001.
Lü K X, Han X S. Research on numerical simulation of ultrafast laser polishing brittle optical materials[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(5): 0532001.
- [15] Luo Y A. Study on mechanism of polishing sapphire crystal by laser[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 341/342: 133-137.
- [16] 周敏. 短脉冲紫外激光抛光工程陶瓷的机理及其工艺规律研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2014.
Zhou M. Study on mechanism and process of polishing engineering ceramic with ultraviolet laser[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2014.
- [17] 孔令瑞. 陶瓷材料的激光微加工技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
Kong L R. A study on laser micro-machining of ceramics material[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [18] 李润强. 石英玻璃表面的磨削裂纹激光修复和去应力工艺技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
Li R Q. Study on the technology of laser repairing for cracks and stress relieving for the ground surface of fused silica[D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [19] Weingarten C, Schmickler A, Willenborg E, et al. Laser polishing and laser shape correction of optical glass[J]. *Journal of Laser Applications*, 2017, 29(1): 011702.
- [20] 刘朋朋. 基于高能激光的光学元件抛光工艺的研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2019.
Liu P P. Research on polishing process of fused silica optical components based on laser[D]. Xi'an: Xi'an

- Technological University, 2019.
- [21] Vogt C, Rascher R, Föhnle O, et al. Closed-loop next generation laser polishing[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10829: 108290M.
- [22] Wang D, Fan F, Liu M C, et al. Top-hat and Gaussian laser beam smoothing of ground fused silica surface[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 127: 106141.
- [23] Srinivasan R, Leigh W J. Ablative photodecomposition: action of far-ultraviolet (193 nm) laser radiation on poly (ethylene terephthalate) films[J]. Journal of the American Chemical Society, 1982, 104(24): 6784-6785.
- [24] Brannon J H, Lankard J R, Baise A I, et al. Excimer laser etching of polyimide[J]. Journal of Applied Physics, 1985, 58(5): 2036-2043.
- [25] Ozkan A M, Malshe A P, Brown W D. Sequential multiple-laser-assisted polishing of free-standing CVD diamond substrates[J]. Diamond and Related Materials, 1997, 6(12): 1789-1798.
- [26] Murahara M M. Excimer-laser-induced photochemical polishing of SiC mirror[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4679: 69-74.
- [27] 谢昕. 短波长激光抛光蓝宝石晶体的机理研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2007.
Xie X. Study on mechanism of polishing sapphire with short-wavelength laser[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2007.
- [28] Wei X, Guo X Y, Xie X Z. Influence of the condition parameters on UV pulsed laser polishing of sapphire wafer [C]//2009 Conference on Lasers & Electro Optics & The Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, August 30-September 3, 2009, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2009: 10950489.
- [29] 宋悠全. 紫外激光抛光蓝宝石晶体过程研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2011.
Song Y Q. Study on process of polishing sapphire with ultraviolet laser[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2011.
- [30] 李政达. 6H-SiC 单晶与 YBCO 超导薄膜激光抛光机理与工艺研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2017.
Li Z D. Study on laser polishing mechanism and technology of 6H silicon carbide monocrystal and YBCO superconducting film[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017.
- [31] 李卫波. 飞秒激光抛光碳化硅陶瓷材料的工艺过程研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
Li W B. Research on femtosecond laser pulse polishing of silicon carbide ceramic material[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [32] 朱鹏飞. 超快激光抛光技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2014.
Zhu P F. Study of ultrafast laser polishing technology[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2014.
- [33] 李晓岗. 基于超快激光的超光滑光学表面制造技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2015.
Li X G. Research on ultrafast laser polishing monocrystalline-silicon[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2015.
- [34] Zhang X M, Ji L F, Zhang L T, et al. Polishing of alumina ceramic to submicrometer surface roughness by picosecond laser[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 397: 125962.
- [35] 徐刚, 戴玉堂, 肖翔. 超短激光抛光微加工的数学建模与试验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0603003.
Xu G, Dai Y T, Xiao X. Study on mathematical modeling and experiment of ultrashort laser polishing micro-processing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40 (6): 0603003.
- [36] 韩小花. 激光抛光 KDP 晶体的机理及工艺研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
Han X H. Laser polishing mechanism and process study on KDP crystals[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [37] 张遥. 基于飞秒激光的 CVD 金刚石涂层抛光技术研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2019.
Zhang Y. Research on polishing technology of CVD diamond coating based on femtosecond laser[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2019.
- [38] Prieske M, Vollertsen F. Picosecond-laser polishing of CVD-diamond coatings without graphite formation[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 40: 1-4.
- [39] Wang C W, Kurokawa S, Doi T, et al. The polishing effect of SiC substrates in femtosecond laser irradiation assisted chemical mechanical polishing (CMP)[J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2017, 6 (4): P105-P112.
- [40] Zheng Q Z, Cui J L, Fan Z J, et al. Investigation on the underwater femtosecond laser polishing SiC ceramic[J]. Ferroelectrics, 2020, 564(1): 28-36.