doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20210702001

材料表面激光抛光技术研究进展*

陈博文[1,2] 孙树峰[1,2] 王 茜[1,2] 张丰云[1,2] 邵 勇[1,2] 张丽丽[1,2]
赵大利[1,2] 王萍萍[1,2,4] 陈希章[3] 刘纪新[4] 曹爱霞[4] 孙维丽[4]
(1. 青岛理工大学山东省激光绿色智能制造技术与装备协同创新中心 青岛 266520;
2. 青岛理工大学山东省高校激光绿色智能制造技术重点实验室 青岛 266520;
3. 温州大学机电工程学院 温州 325035;
4. 青岛黄海学院智能制造学院 青岛 266427)

摘要: 抛光技术是现代制造产业的关键技术之一,现代制造工艺的发展对材料抛光精度的要求已经达到了微纳级。与传统抛光技术相比,激光抛光技术更容易满足工业要求,并且适用于金属、陶瓷、玻璃等多种材料,在抛光加工领域受到了国内外学者的广泛关注。综述了近年来不同材料激光抛光技术的研究进展;针对激光抛光过程中产生的热应力,分析了工艺参数以及温度变化对激光抛光效果的影响,探讨了新型的激光抛光技术,梳理了将激光抛光与其他抛光技术进行有效复合的方法与观点。按照不同的材料,归纳了激光抛光技术的作用机理,并阐述了激光抛光技术的优缺点,最后对激光抛光技术的未来发展进行展望。对于目前激光抛光研究中尚未解决的问题以及未来不同材料的激光抛光技术的研究方向具有指导意义。

关键词: 激光抛光; 作用机理; 抛光质量; 表面粗糙度
中图分类号: V261;TG580

Research Progress of Laser Polishing Technology for Material Surface

CHEN Bowen[1,2] SUN Shufeng[1,2] WANG Xi[1,2] ZHANG Fengyun[1,2] SHAO Yong[1,2]
ZHANG Lili[1,2] ZHAO Dali[1,2] WANG Pingping[1,2,4] CHEN Xizhang[3] LIU Jixin[4]
CAO Aixia[4] SUN Weili[4]
(1. Shandong Collaborative Innovation Center of Laser Green Intelligent Manufacturing Technology and Equipment, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China;
2. Shandong Research Center of Laser Green Efficient Intelligent Manufacturing Engineering and Technology, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China;
3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China;
4. College of Intelligent Manufacturing, Qingdao Huanghai University, Qingdao 266427, China)

Abstract: Polishing technology is one of the key technologies in modern manufacturing industry. With the development of modern manufacturing technology, the requirements for material polishing accuracy have reached micro and nano level. Compared with traditional polishing technology, laser polishing technology is easier to meet these industrial requirements, and is suitable for a variety of materials such as metal, ceramics and glass. It has attracted extensive attention of scholars at home and abroad in the field of polishing processing. The research progress of laser polishing technology for different materials in recent years is reviewed. Aiming at the thermal stress generated in the process of laser polishing, the effects of process parameters and temperature changes on the effect of laser polishing are analyzed, new laser polishing technology is discussed, and the methods and viewpoints of effectively combining laser

* 高等学校学科创新引智计划(D21017)、国家自然科学基金(51775289)、山东省重点研发计划(2019GGX104097, 2019JZZY010402)和青岛西海岸新区 2020 年度科技源头创新专项(2020-103)资助项目。
Fund: Supported by the 111 Project (D21017), National Natural Science Foundation of China (51775289), Shandong Key R&D Program (2019GGX104097, 2019JZZY010402), and Original Innovation Project of Qingdao West Coast New Area (2020-103).
20210702 收到初稿,20210918 收到修改稿

polishing with other polishing technologies are combed. According to different materials, the action mechanism of laser polishing technology is summarized, and the advantages and disadvantages of laser polishing technology are described. Finally, the future development of laser polishing technology is prospected. It has guiding significance for the unsolved problems in the research of laser polishing and the research direction of laser polishing technology of different materials in the future.

Keywords: laser polishing; mechanism of action; polishing quality; surface roughness

0　前言

抛光技术又称镜面加工技术,作为材料表面处理中重要的一环,抛光的目的是为了提高加工工件的尺寸精度和几何形状精度,主要作用是降低材料的表面粗糙度,以获得光亮、平整的工件表面,使材料表面更加美观,还能有效提升材料表面的耐腐蚀性和耐磨性,并帮助其获得特殊性能。抛光技术在电子设备、工业设备、医疗器械、仪器仪表、光学元件等各个领域得到了广泛的应用。

常用的抛光技术有机械抛光法、化学抛光法、化学机械抛光法、离子束抛光法等。机械抛光法是靠切削、材料表面的塑性变形,以此去掉材料表面的凸起部分,从而得到平滑面的抛光方法,这种方法抛光效率低,工作过程中抛光的时间和力度很难掌握[1];化学抛光法是通过利用化学溶液对材料表面凸起部分进行优先溶解达到抛光材料表面的目的,虽然化学抛光法能够处理形状比较复杂的零件,但化学抛光后的材料表面质量不佳,并且在抛光过程中,极易产生化学污染,破坏环境[2];化学机械抛光法是一种化学抛光和机械抛光平衡的过程,避免了单一的机械抛光和化学抛光导致的缺点,但仍然会在冲击和振动中致使材料表面受损,且加工温度很高[3];离子束抛光是用一定能量密度的离子束投射在工件表面,使材料变形、破坏、分离以获取光滑表面的抛光技术,这种抛光方法设备造价成本高且加工工艺复杂,主要用于对曲面的抛光[4]。激光抛光技术与其他常用抛光技术的对比如表 1 所示。

表 1　激光抛光技术与其他常用抛光技术对比情况

Table 1　Comparison between laser polishing technology and other common polishing technologies

Process/content	Mechanical polishing	Chemical polishing	Chemical mechanical polishing	Ion beam polishing	Laser polishing
Principle	Mechanical wear	Chemical reaction	Chemical reaction and mechanical wear	Ion beam sputtering removal process	Photothermal action and photochemical action
Processing cost	Low	Low	Low	High	Medium
Processing accuracy	High	Low	High	High	High
Processing efficiency	Low	Low	relatively high	Low	High
Environmental protection	Relatively good	Poor	Medium	Good	Good
Application fields	Mechanical parts with simple structure and regular shape	Polishing of complex porous metal structures	Surface processing of precision components such as integrated circuits, hard disks and optical lenses	Processing and optical fields of semiconductor components, integrated circuits and precision mechanical parts	Precision polishing of various material surfaces, especially for super soft/super hard materials and brittle materials

随着时代的发展,工业制造对材料表面粗糙度的要求越来越高。激光抛光技术作为一种新型的抛光技术,具有抛光精度高、加工速度快的特点[5-6]。使用高聚焦激光束对不同的材料表面进行抛光,更容易满足现代制造工艺中降低粗糙度的要求。激光抛光技术是一种非接触抛光技术,从工业应用角度来看,激光抛光技术非常具有吸引力,因为它可以实现抛光过程自动化,还可以提高材料表面的加工效率,此外,它无需机械磨料或表面抛光工具。这种抛光技术不仅能够获得非球形和非旋转光学抛光表面,而且可以抛光具有复杂形貌的表面[7],这对于传统的抛光方法是非常困难的。

激光抛光技术凭借其对于不同材料表面的抛光效率更高、速度更快等一系列优点备受研究者的青睐,因此,激光抛光技术也越来越多地应用于不同的材料表面。本文总结了近些年来面向金属材料和玻璃、陶瓷等非金属材料表面的激光抛光技术研究,可以为激光抛光技术的进一步发展提供参考。

1 激光抛光技术的作用机理

激光抛光技术本质上是激光与材料之间的相互作用,这种相互作用主要分为热作用和光化学作用,其中热作用包括熔化、气化等过程。不同的材料表面会有不同的作用机理,按照作用机理不同将激光抛光分为热抛光和冷抛光,如对于塑性材料以热作用为主,而对于脆性材料则以光化学作用为主[8]。

1.1 激光热抛光作用机理

激光热抛光是利用激光束将热量输入到材料表面,很短时间内在材料近表面区域积累大量的热,使得材料表面温度迅速升高,通过熔化、气化等过程去除表面材料,实现材料的表面抛光[9]。在整个抛光过程中,基体的温度基本保持在室温。为了达到这种迅速升温的效果,热抛光一般采用连续激光和长脉冲激光(主要激光源为 CO_2 激光器和 Nd:YAG 激光器)。

当热抛光过程主要为熔化时,根据熔化层的厚度,分为两种不同的工艺:当熔融层厚度低于地形上的峰谷高度时,称为表面浅熔;当熔融层厚度较大时,称为表面过熔[10-11]。表面浅熔的工作过程是表面材料经熔化形成的液态熔体在表面张力和重力作用下流入到表面的凹洼处,使各处的曲率趋于一致,表面趋于同一平面,同时,液态熔体快速凝固成型。经过激光对材料表面的抛光,材料原始表面与激光抛光表面的对比图如图 1 所示[12]。

如果液态熔体流动的平均时间短于熔体的平均凝固时间,那么表面浅熔机制可以有效地降低材料表面粗糙度。液态熔体向材料表面凹洼处随时间推移的流动示意图如图 2 所示[13]。

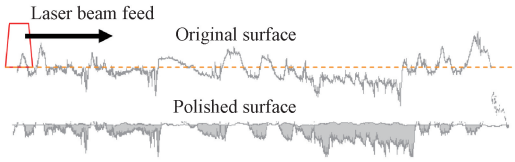


图 1 原始表面与激光抛光表面[12]

Fig. 1 Original surface and laser polished surface[12]

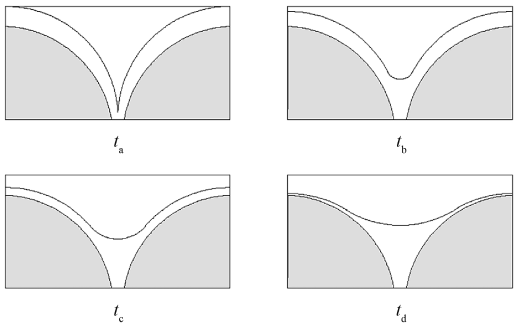


图 2 随时间推移的液态熔体流动示意图,$t_d>t_c>t_b>t_a$[13]

Fig. 2 Schematic diagram of liquid melt flow over time, $t_d>t_c>t_b>t_a$[13]

在表面浅熔的过程中,如果激光进给速度降低或者光束功率增加导致材料处于熔融状态的时间过长,熔化深度可能比峰谷高度更深,此时就会形成表面过熔。RAMOS 等[13-14] 对这两种机制进行了研究,提出在固定的激光功率作用下,随着扫描速度降低到极限值,表面浅熔显示粗糙度降低到初始值以下。扫描速度的进一步降低就会导致表面过熔机制的开始,如图 3 所示,激光束的运动导致液态熔体下方的熔融材料被拉向凝固前沿,从而形成一种周期性的波纹,使得材料表面粗糙度随着速度的降低而增加[14]。

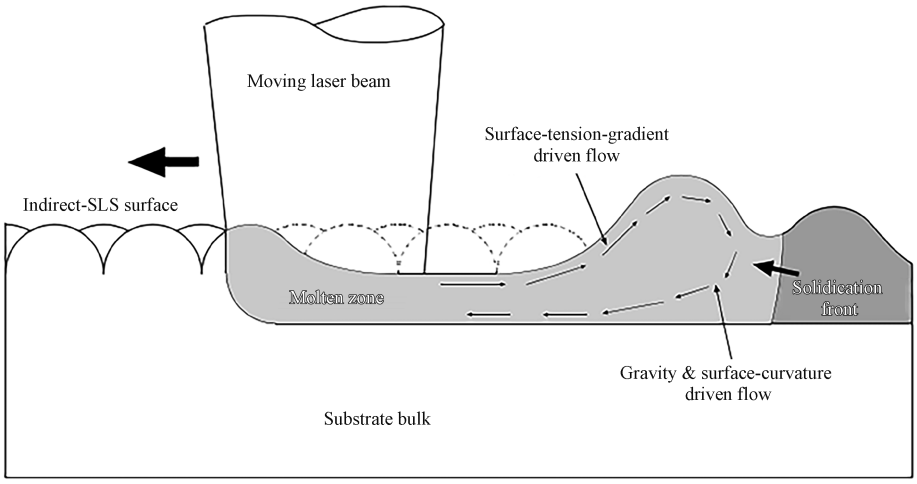


图 3 表面过熔机制中表面周期性结构形成示意图[14]

Fig. 3 Schematic diagram of surface periodic structure formation in surface overmelting mechanism[14]

然而，材料表面粗糙的的降低将会导致材料表面力学性能的降低，因此须要调整合适的工艺参数如激光进给速度、激光功率等达到表面浅熔的抛光条件，使得激光束和材料之间的相互作用产生一个高温度梯度，以此实现材料的快速加热和冷却，降低材料的表面粗糙度。

当热抛光过程主要为气化时，这种过程的本质就是去除掉材料表面的薄层物质。抛光过程中，激光束产生的能量足以击穿铜、铝或其他任何材料的禁带，从而使它们气化，去除材料的速度取决于材料的性质和所用的激光功率。它们之间的关系式可以用式(1)[15]来表示：

$$V = [I(1 - R)]/[(c_p\Delta T + L_f + L_v)]\rho] \quad (1)$$

式中，I 为激光功率密度，R 为材料的反射率，c_p 为材料的比热容，ΔT 为材料的沸点与初始温度之差，L_f 为材料的熔融潜热，L_v 为材料表面的气化潜热，ρ 为材料的密度。去除一定量材料所需要的时间等于要去除的材料厚度与材料蒸发速度的商[16]。

但是，当激光功率过高或者激光扫描速度过低时，材料表面温度过高，导致材料表面过度气化，气化的材料与空气在激光的进一步作用下，产生等离子体，在等离子体的膨胀压力和高温高压气体的综合作用下，熔融材料会向四周喷溅，材料表面出现凹坑，影响表面质量[17]。

因此，优化激光抛光参数，选取合适的激光抛光条件和时间，对达到良好的材料表面的抛光效果具有十分重要的意义。

1.2　激光冷抛光作用机理

由于热抛光会在材料表面形成热量累积，温度梯度大，产生的热应力也随之增大，因此热抛光后的材料表面容易出现微裂纹，抛光达到的表面粗糙度不是很低。但不可否认的是，热抛光的抛光效率高，所以比较适用于物理性能较好的塑性材料的粗抛光。而对于不适合热抛光的硬脆性材料的激光抛光，大多还是以冷抛光为主。

冷抛光一般采用的是短脉冲和短波长激光(主要为紫外准分子激光器或者飞秒脉冲激光器)。冷抛光的作用机理主要是光化学分解作用，即“单光子吸收”和“多光子吸收”，材料吸收光子之后，使工件表层材料的化学键和晶格结构断裂，以此实现材料离开基体来达到抛光目的[18]。

冷抛光过程中，热效应可以忽略，热应力很小，材料表面几乎不产生微裂纹，对材料本身也几乎不会产生性能的影响，抛光厚度比较容易控制。这些特点使得激光冷抛光在微细抛光、超硬材料、脆性材料和高分子材料抛光等方面具有无法比拟的优越性。

2　面向金属材料的激光抛光研究

2.1　抛光机理研究

激光抛光应用于金属材料表面具有非常显著的优势，作为一种高效、无接触和全自动的后处理技术，在降低金属部件的表面粗糙度方面取得了令人鼓舞的结果。激光抛光金属材料的作用机理以热效应为主，当金属被激光辐射照射时，表面的峰被熔化成非常薄的层，并通过表面张力和重力重新分布到谷中[19]。

将激光抛光技术较早的运用于金属材料的是 TUCKERMAN 和 WEISBERG[20]，他们于 1986 年展示了一种通过快速激光熔化来平坦化集成电路上的金和铝膜的新技术。在不损坏下层互连的情况下，实现了极好的台阶覆盖和通孔填充。

爱尔兰的 OBEIDI 等[21]使用 CO_2 激光器对 316L 不锈钢进行了抛光研究，发现材料平均表面粗糙度最大从 10.4 μm 降低至 2.7 μm，与导致工具磨损的传统抛光技术相比，激光抛光技术对抛光质量有着显著的提升。法国的 ROSA 等[22]对钛表面激光金属沉积的激光抛光进行了研究，试验中使用由铣削和激光金属沉积工艺组成的五轴机器进行加工，该机器还在同一架构上集成了激光抛光工艺。最终试验结果表明，激光抛光工艺将材料表面粗糙度降低了 78%，从最初的 27.6 μm 降低到 6.01 μm。

BRINKSMEIER 等[23]最早提出将激光抛光应用在 X40Cr13 模具钢表面，并通过试验得到平整光滑的抛光表面。他们分别采用研磨抛光、激光抛光和磨料流加工对结构钢和化学镀镍钢模具进行精加工，其中激光抛光使用的是钕钇铝石榴石激光器(波长为 1 064 nm)，并通过磨削和金刚石铣削进行预加工，最后经试验表明在激光抛光中使用更低的激光功率可能会得到更好的抛光效果。

综上，激光抛光金属时主要通过热作用将金属材料表面凸出的地方熔化成熔融液体，熔融液体在表面张力和重力的作用下重新分布到材料表面凹陷的地方，继而降低材料的表面粗糙度。并且，激光抛光金属材料相比传统的抛光方法在抛光速度、抛光效率、抛光质量等方面有了很大程度的提升，使得激光抛光成为金属材料表面抛光的一种重要手段。

2.2　工艺参数对抛光效果的影响

在激光抛光金属的过程中，有许多工艺参数需要设定，其中包括但不限于材料表面的初始参数、激

光器的相关参数、外部条件的相关参数等。任何一项工艺参数的改变会或多或少对抛光效果造成影响,很多研究者对这方面进行了深入的研究。

ZHOU 等[24]为了研究激光抛光对 S136D 模具钢表面形貌的影响,设计了正交试验描述表面粗糙度随能量密度的变化趋势。将数值模拟与试验相结合,建立了激光抛光的二维瞬态模型,模拟了激光抛光过程中材料表面形貌的演变过程。试验结果表明,当能量密度为 18 J/mm^2 时,抛光效果最好,最小表面粗糙度可降至 0.764 μm。当能量密度小于 15 J/mm^2 或大于 25 J/mm^2 时,会导致抛光效果不佳。该试验中使用的激光器是连续光纤激光器。SHAO 等[25]建立了金属表面激光抛光的简化模型。此模型主要用来初步预测激光抛光金属合适的工艺参数,其中金属具有由微凹凸体和材料特性组成的已知几何表面。经过对抛光金属材料铁、铝、钛和 304 不锈钢的预测表明:①材料微观表面粗糙度的原始形貌对金属的激光表面抛光有重要影响。②对于大多数金属的脉冲激光抛光,需要脉冲持续时间通常在毫微秒或更短的激光。随后使用脉宽为 30 ns、波长为 248 nm 的 KF 准分子激光器进行钢的激光抛光。结果表明,激光抛光后,样品表面粗糙度从 0.14 μm 降至 99.5 nm,表面粗糙度得到了明显的改善。

对于材料原始表面粗糙度这一工艺参数,德国 HOFELE 等[26]对此做了详尽的研究,他们为了研究表面行为和初始表面粗糙度对激光抛光可获得的表面质量的影响,使用 TruDisk4002 型碟片式固体激光器,采用了脉冲和连续两种激光模式,如图 4 所示。研究了不同初始表面粗糙度下激光粉末床熔化 AlSi10 Mg 零件激光抛光的表面粗糙度降低能力和残余表面结构。结果表明在两种激光操作模式下,激光抛光后可达到的最终粗糙度直接取决于初始表面质量。对残余粗糙度结构的分析表明,主要的表面粗糙度差异出现在中长结构波长区域,而这直接取决于材料初始的表面粗糙度。

LAMIKIZ 等[12]采用 2.500 W 的 CO_2 平板激光器对经过电火花加工处理的德国工业标准 C45 钢、X40CrMoV51 工具钢进行了抛光研究。他们发现激光抛光后表面粗糙度由 7.51 μm 降至 1.49 μm。根据加工过程中的工艺参数,其中存在一个获得最佳效果的功率和焦距。随着功率的增加或焦距的减小,在被处理的区域中会获得更差的表面粗糙度结果。这符合前文提到表面浅熔向表面过熔过渡的情况。该团队又对两种不同材料的不同表面进行了几项测试:52 HRC 硬度的 DIN1.234 4 工具钢和一种激光烧结合金 ST100[27]。测试表面呈现不同的初始表面粗糙度。但在激光抛光试验后,所有情况下都实现了高表面粗糙度的降低,表面粗糙度降低率范围为 52.9%~76.45%。

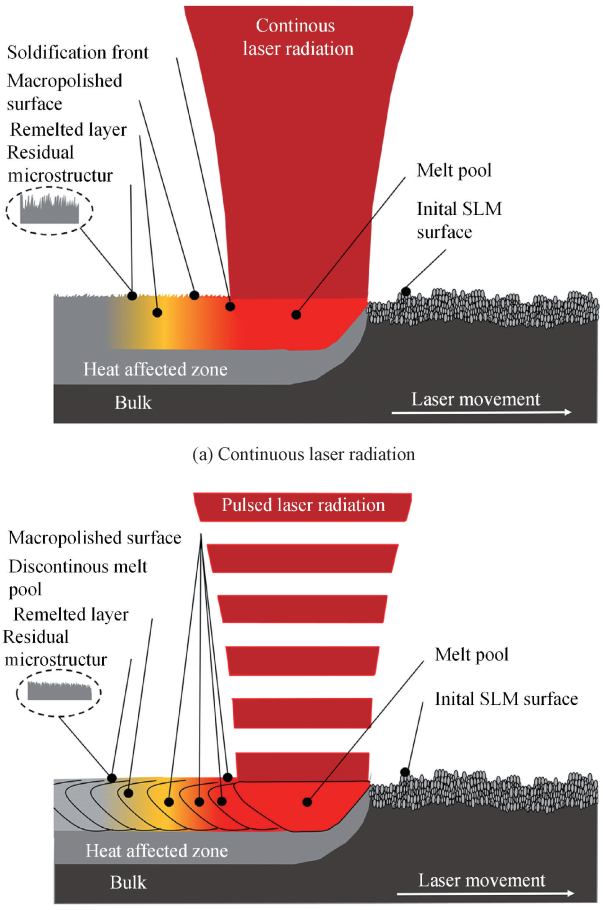


图 4 激光重熔的简化方案[26]

Fig. 4 A simplified scheme of laser remelting[26]

杨奇彪等[28]运用两种激光器进行钛合金 Ti_6Al_4V 抛光试验,分别为 SPI 公司的纳秒脉冲光纤激光器(波长为 1 059~1 065 nm,脉宽为 10~200 ns,输出高斯光束)和 IPG 公司的纳秒脉冲光纤激光器(波长为 1 062~1 066 nm,脉宽为 30 ns、60 ns、120 ns 和 200 ns,输出平顶光束)。经试验分析,得出结论,平顶光束能够达到的表面粗糙度更小。在一定范围内增加能量密度,能减小材料的表面粗糙度。光斑重叠率在 75%~78%,表面粗糙度相对较小。增加脉冲宽度可以有效减小材料的表面粗糙度,脉冲宽度是影响材料抛光的一个重要因素。ZHANG 等[29]使用钇铝石榴石脉冲激光器在 3Cr2W8V 钢表面制作了仿生单元,并基于正交试验设计,对这些单元的穿透深度和表面粗糙度进行了研究。他们采用范围分析和随后的总体平衡方法选

择了激光加工参数的最佳组合，发现影响表面粗糙度的主要因素是激光器功率和扫描速度，并表明功率升高和扫描速度降低都会降低材料的表面粗糙度。

美国 PFEFFERKORN 等[30]研究了光束直径对 S7 工具钢脉冲激光抛光的影响，其中使用的激光器是 1 070 nm、200 W 的连续波光纤激光器。研究表明熔池直径（激光光束直径）在决定脉冲激光抛光后残余特征的频率和振幅以及表面粗糙度方面起着重要作用。较大直径的熔池已被证明能有效地帮助消除表面粗糙度特征，并有效地在磨削方向和交叉磨削方向之间更均匀地分布磨削的表面粗糙度。

激光抛光在降低金属表面粗糙度的同时，也会在抛光表面引入新的凸起结构，影响激光抛光的效果。对此，XU 等[31]使用连续光纤激光器（波长为 1 070～1 080 nm）对 304 不锈钢进行一系列激光抛光试验，分析了激光抛光工艺参数（激光功率、扫描速度、焦点偏移）对工件表面凸起尺寸参数（高度、深度、宽度）的影响。结果表明凸起的高度和深度会随着激光功率、扫描速度和焦距偏移量的增加而增加。然而，过小的焦点偏移将导致凸起的高度和深度减小。凸起的宽度随着激光功率的增大、扫描速度的降低、焦距偏移量的增大而增大，但是焦距偏移量过大会导致凸起的宽度变窄。他们还建立了数值模型，并表明该模型能够指导激光抛光工艺参数的优化。提前建立数值模型，非常有利于对激光抛光工艺参数进行指导优化[32-33]。

综上，激光抛光金属时，影响最后抛光效果的工艺参数有很多，其中影响较大的有激光功率、激光扫描速度、激光光束直径、激光焦距、材料初始表面粗糙度等工艺参数。这些工艺参数具有一个最佳数值，低于或者高于这个值都会对抛光效果造成负面影响。因此需要调控合适的工艺参数以达到最好的抛光效果。建立对应的数值模拟模型能够提前预测最佳工艺参数，这是激光抛光研究中优化工艺参数的一个行之有效的方法。

2.3　抛光后对材料表面性能的影响

对于金属材料，激光抛光不仅能够有效降低金属的表面粗糙度，还能在金属表面生成一层极薄的硬化层，提高金属材料的表面硬度，提升金属表面的耐磨性、耐腐蚀性，改善材料本身的力学性能[34]。研究发现，利用 1 060 nm 连续光纤激光对 TiAl 合金抛光后，在 TiAl 合金表面生成厚度约 600 μm 的硬化层，显微硬度比初始 TiAl 合金提高了 8%左右，耐磨性和耐腐蚀性也比原始表面有所提高[35]。

CHEN 等[36]研究了 1 070 nm 光纤激光对激光粉末床熔制的 316 L 不锈钢的表面形貌和显微结构的影响，发现材料表面经过激光抛光后，表面粗糙度由 4.84 μm 降至 0.65 μm，同时材料最大亚表面硬度达到 262 HV，改善了材料的拉伸性能。ZHOU 等[37]对激光粉末床熔制的 AlSi10 Mg 样品进行了抛光研究，其中使用的激光器是连续光纤激光器（波长为 1 060 nm）。他们在不同的激光阴影空间、通道和方向进行了抛光，观察其表面粗糙度和显微硬度的变化。经试验表明，激光抛光后，材料表面粗糙度从 12.5 μm 降至 3.7 μm，材料表面显微硬度从 112.3 HV 升至 176.9 HV。通过减小阴影空间、增加抛光次数或选择合适的激光方向能获得更好的表面质量。由此可见，合适的工艺参数有助于获得更低的表面粗糙度和更高的力学性能。

ZHOU 等[38]基于有限元模型的热循环分析研究激光抛光 Ti_6Al_4V 的表面及性能表征，试验中使用的激光器是连续光纤激光器（波长为 1 070 nm），发现材料显微硬度比基体提高了约 25%，且抛光后的表面具有较高的耐腐蚀性。

LEE 等[39]研究了激光抛光对 Ti_6Al_4V 零件疲劳性能的影响，采用 1 064 nm 连续光纤激光器，结果发现由于表面粗糙度降低，激光抛光零件的高周疲劳寿命比未抛光的零件稍长，通过二次减压过程可以消除抛光引起的残余应力，激光抛光后和二次应力消除的零件的疲劳强度在所有寿命周期内均得到了改善。

2.4　金属材料的新型激光抛光技术

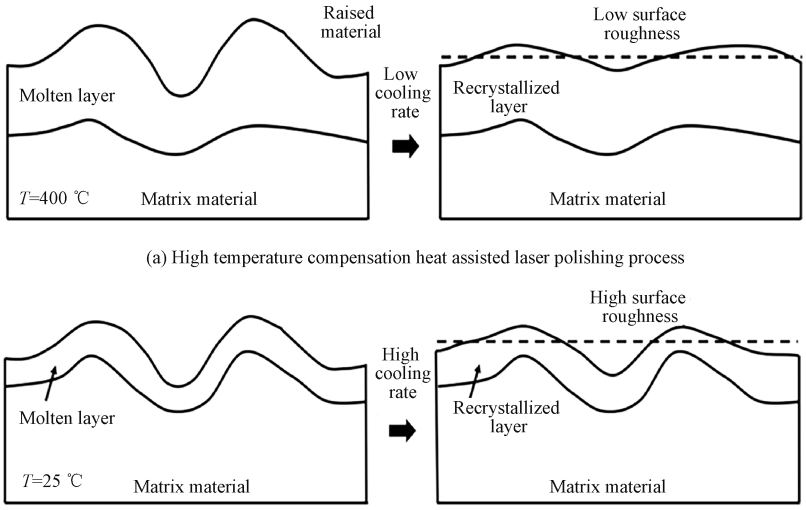
在金属材料的激光抛光过程中，为了获得材料表面更好的抛光效果，除了调设合适的工艺参数以外，研究者们也开始探究新型激光抛光技术，能够有效提高激光抛光的效果和效率。通过预热、热辅助、减少材料热耗散等措施能够有效提高熔融材料的重新分布时间。由于激光抛光金属材料时将极高的热量在极短的时间内作用于材料表面，在抛光过程中如果能合理地分配能量，使其均匀地作用在材料表面，并缩短材料表面的温度梯度，就能够获得更光滑平坦的金属表面。

德国 NÜSSER 等[40]用附加激光束对表面进行预热的激光微抛光办法研究了预热激光功率、扫描速度、两束激光的光束偏移和预热激光束的强度分布等工艺参数对表面粗糙度的影响。试验中使用连续波模式的光纤耦合圆盘激光器进行预热，使用光纤耦合棒状激光器进行表面抛光。而他们试验的两

种材料(马氏体工具钢和 Ti_6Al_4V)表现出不同的行为:由于马氏体形成的增加,双光束技术使得马氏体工具钢的表面比常规激光微抛光的表面粗糙度增加。与传统的激光微抛光相比,Ti_6Al_4V 的细观表面粗糙度由于更长的熔化持续时间而降低,因此获得了更光滑的表面。在抛光过程当中预热激光功率尽可能高(不熔化表面)、扫描速度低、预热光束和抛光光束不重叠均会对表面粗糙度的降低更有利。

YUNGA 等[41]介绍了激光抛光在复杂表面几何形状钴铬合金上的应用,并开发了一种激光抛光技术(称为分层抛光方法)。分层抛光方法的过程是将整个样品沿激光加工方向分成若干层,并按顺序抛光。每层厚度与激光焦深一致,即每层厚度至少不能大于激光焦深。在加工过程中,根据待抛光的每一层的高度不断调整激光的散焦距离,从而避免能量不稳定的问题。经试验表明,采用这种方法进行抛光后,材料表面粗糙度降低高达 93%,表面硬度提高了 8%。由此可见,这种方法能够发展成为适用于任意自由曲面激光抛光的通用方法。该研究中使用的激光器是一种脉冲模式光纤激光器(波长为 1 064 nm)。

姜长城等[42]为提升纳秒脉冲激光抛光的质量及效率,对基于热辅助的纳秒脉冲激光抛光开展了研究,图 5 为该研究激光抛光工艺示意图。研究中使用的激光器是 IPG 公司的纳秒光纤激光器。研究发现,在热辅助激光表面抛光过程中,激光照射区域表面会出现一个温度较高、持续时间较长的温度场,由此给予了熔融材料更长的重新分布时间,从而形成更光滑平坦的材料表面。在热辅助激光抛光后,材料表面硬度得到了提升,并且补偿温度越高的热辅助激光抛光效率显著提高,这对于大规模的工业应用有很大益处。



(a) High temperature compensation heat assisted laser polishing process

(b) Low temperature compensation heat assisted laser polishing process

图 5 高/低温补偿热辅助激光抛光工艺示意图[42]

Fig. 5 Schematic diagram of high/low temperature compensation thermal assisted laser polishing process[42]

英国 BHADURI 等[43]研究了选择性激光熔化 AlSi10 Mg 合金零件的纳秒脉冲激光抛光。提出了一种新型抛光技术来改善材料的再熔化行为,即在试样下采用绝热氧化铝陶瓷基板。经试验证明,该技术能够有助于材料表面粗糙度降低 80%~88%,并且实现零件的亚微米级表面粗糙度(记录的最小表面粗糙度 0.64 μm)。还应注意的是,表面粗糙度百分比降低的程度取决于零件的初始粗糙度,符合前文所提到的初始表面粗糙度对抛光效果具有一定影响。这一技术意味着,为了获得高导热材料的更高的激光抛光效率,需要最大限度减少主体传导热的耗散。该研究中使用的是基于 MOPA 的掺镱光纤纳秒激光器(波长为 1 064 nm)。

东北大学 KANG 等[44]设计了一种以透镜为振动元件的超声振动辅助激光抛光装置。试验研究了振幅、扫描速度、激光功率和聚焦偏移量对 304 不锈钢紫外激光加工的影响。超声振动辅助激光抛光能够减少表面的热量积累。在激光功率范围为 600~700 W,扫描速度范围为 15~25 mm/s,焦点偏移范围为 7~8 mm,超声振动辅助激光抛光的加工效果优于传统的激光抛光。其中,其他工艺参数不变的情况下,振幅为 20 μm 的超声振动辅助激光抛光能将 304 不锈钢的表面粗糙度从 2.777 μm 降至 0.551 μm,与传统激光抛光相比降低了 21.62%。

并且，间歇抛光过程可以通过透镜超声振动来实现，这使得抛光表面更加均匀。该试验中用到的激光器是 YLP—1000 激光器（波长为 1 070～1 080 nm）。

综上，有关金属材料的新型激光抛光技术，大部分通过减小作用过程中的温度梯度来实现更好的抛光效果，这不仅能防止出现过大的热应力，而且保证了熔融液体不会在极短时间内突然冷却。另一部分则将超声复合进了激光抛光中，除了超声振动透镜外，使用超声振动工件也是一个很好的办法，它能够在激光抛光过程中通过超声振动的特性使得熔融液体分布的更加均匀平整。需要注意的是，采用新型的激光抛光技术，会相应地产生新的工艺参数，而这些工艺参数往往对最后的抛光效果有着直接影响，应当对它们进行细致的分析优化。

3　面向非金属材料的激光抛光研究

3.1　陶瓷材料的激光抛光研究

陶瓷属于硬脆质材料，具有高耐热性、高硬度和化学稳定性，这使得陶瓷与金属、聚合物相比更适合在一些应用中的使用；但是陶瓷的易碎性和高硬度使得它们难以使用传统技术进行抛光，并且在抛光时会对表面造成损伤，从而影响部件的加工效率[45]。然而，激光抛光技术则特别适用于陶瓷这类超硬的脆质材料，尤其是短波长激光。

对于陶瓷材料这种脆质材料，激光抛光的作用机理主要是光化学作用，也伴随着一定的热作用，为了避免热作用对陶瓷材料造成热损伤，经常采用短波长激光对陶瓷材料进行抛光，因为短波长激光更容易通过光化学作用去除材料。

早在 1998 年，德国的 FOLWACZNY 等[46]就建议使用 XeCl 准分子激光对陶瓷表面进行抛光和涂覆，以改善牙科陶瓷的物理性能。该研究团队使用波长为 308 nm 的 XeCl 准分子激光辐射在三种不同的能量密度下照射四种不同牙科陶瓷材料的样品，经试验表明，四种陶瓷材料在不同能量密度的辐射下，表面粗糙度得到不同程度的降低，其最低表面粗糙度平均值分别达到 1.30、1.92、2.04、2.72 μm。

3.1.1　工艺参数对抛光效果的影响

对于陶瓷材料而言，在激光抛光的过程中，改变其中的工艺参数，同样会对材料表面产生不同的抛光效果，为了达到最佳的抛光效果，研究者们对工艺参数的优化和选择进行了深入的研究，比较了激光能量密度、激光扫描速率、激光扫描间隔等参数对抛光效果的影响。

周敏等[47]用 355 nm 紫外激光来抛光 Al_2O_3 陶瓷，并对抛光过程中的工艺参数（激光能量密度、扫描速率、扫描间隔）对 Al_2O_3 陶瓷抛光表面粗糙度的影响规律进行了测试研究。试验结果表明，随着激光能量密度、激光扫描速率、扫描间隔的增加，材料表面粗糙度均先降低然后再增大，其中，当激光能量密度为 6 J/cm^2、扫描间隔为 2 μm、扫描速率为 60 mm/s 时，材料表面达到了最佳抛光效果。孔令瑞[48]为了进一步降低石英陶瓷刻蚀表面粗糙度，用 CO_2 激光器（波长为 10.6 μm）对石英陶瓷刻蚀表面进行抛光，也发现激光抛光参数（速度、离焦量等）对抛光效果有较大影响，试验结果表明采用合适的 CO_2 激光抛光参数，可将激光刻蚀面的表面粗糙度降低到 1 μm 左右。ZHANG 等[49]使用皮秒激光以重叠平行线扫描方式（如图 6 所示）实现了氧化铝陶瓷的高效、大面积、无损、高精度抛光。该研究中使用的激光器是皮秒激光器（波长为 1 064 nm，脉宽为 10 ps）。发现抛光时的最优工艺参数是当激光能量密度为 5.09 J/cm^2、扫描速率为 800 mm/s、扫描路径间隙为 10 μm 时。经激光抛光后，材料表面粗糙度从 1.8 μm 降至 0.32 μm，材料的断裂强度提高了约 25%。而且对皮秒激光抛光氧化铝陶瓷的机理作出了解释：抛光过程中不是直接去除表面材料，而是由超快激光激发的纳米颗粒的再结晶引起的。被激发的纳米粒子熔化再结晶，在陶瓷表面形成一层致密的细晶结构，导致表面粗糙度降低。

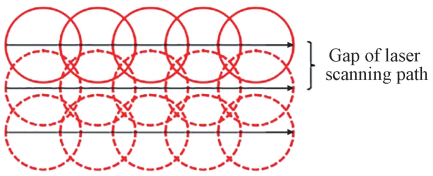


图 6　重叠平行线激光扫描模式示意图[49]

Fig. 6　Schematic diagram of overlapping parallel line laser scanning mode[49]

3.1.2　陶瓷材料的新型激光抛光技术

虽然激光抛光非常适用于陶瓷表面，但是单纯地使用激光抛光往往不能达到最佳的表面抛光效果。近年来，为了进一步降低陶瓷材料表面粗糙度，并使陶瓷材料表面在激光抛光过程中减少微裂纹的产生，研究者们提出了一些新型的激光抛光方法。结合其他抛光技术，或者在特定的环境下（水下、超声、磁场）进行激光抛光，能有效防止微裂纹、残留碎片等表面缺陷的出现，从而进一步降低表面粗糙度，提高去除率。

韩国 KIM 等[50]提出一种新型的混合抛光工

艺—激光辅助抛光工艺,以此提高碳化硅抛光的材料去除率,通过将 CO_2 激光源和机械抛光相结合,首次尝试在浆料环境中进行激光抛光,与在正常样品中使用机械抛光相比,在开裂和氧化的碳化硅样品中使用激光抛光,其材料去除率增加了 79.0%,还发现激光诱导裂纹是激光辅助抛光过程中材料去除率生长的主要机制。预计该研究可能有助于扩展混合加工领域,更好地实现集成电路的工业应用。ZHENG 等[51]提出一种水下飞秒激光抛光碳化硅陶瓷的新方法,研究了水下激光加工过程中激光频率和脉冲能量对抛光碳化硅陶瓷表面形貌、三维形貌、深度和表面粗糙度的影响。图 7 为水下飞秒激光抛光的示意图。该研究使用的激光器是 Yb:KGW 飞秒激光器(波长为 1 030 nm,脉宽为 240 fs)。试验结果表明,低、高激光频率均可减小去除深度,适当选择激光频率有利于降低表面粗糙度,获得光滑的抛光表面。通过激光参数优化,在激光频率为 40 kHz、脉冲能量为 40 J 的条件下,在材料表面达到了 32.19 μm 的平均去除深度和 0.72 μm 的平均表面粗糙度,获得了高质量的抛光表面。

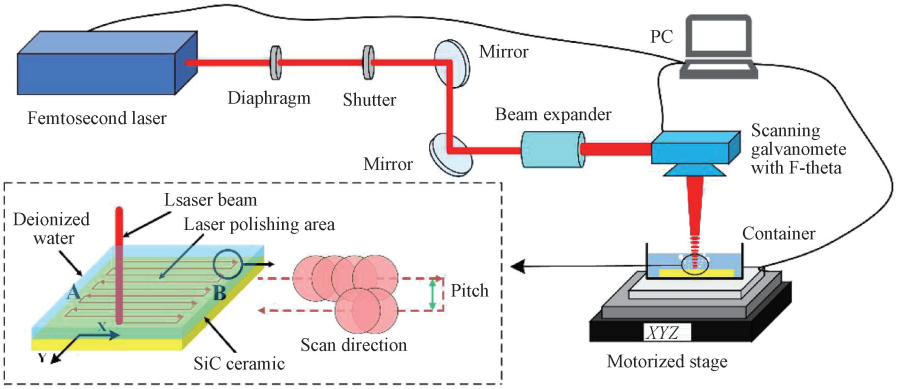


图 7 水下飞秒激光抛光加工示意图[51]

Fig. 7 Schematic diagram of underwater femtosecond laser polishing[51]

3.2 玻璃材料的激光抛光研究

玻璃抛光的历史悠久,我国乾隆时期玻璃的抛光质量已经很高[52]。但随着时代的快速发展,一些精密仪器和电子产品中具有大量基于玻璃的材料,这些光学电子产品所需性能的实现将强烈依赖于玻璃材料的表面粗糙度[53]。而与传统抛光加工相比,激光抛光能够更好地消除玻璃的亚表面损伤,平滑微粗糙度,并且激光抛光玻璃效率更高。

3.2.1 抛光机理研究

和传统机械抛光方法相比,激光抛光技术能有效获得光滑、无缺陷的表面,可以提高熔融石英光学器件的表面质量。由于玻璃对远红外波段激光有很好的吸收性,通常使用 CO_2 激光进行抛光。早在 1983 年,XIAO 等[54]采用 300 W 的连续 CO_2 激光对熔融石英和耐热玻璃进行抛光,用 600 号砂纸来打磨耐热玻璃,然后照射光束直径为 11 mm 的 CO_2 激光束,证明了激光对熔融石英和耐热玻璃抛光的有效性,并成功消除了玻璃上的砂粒磨痕。熔融石英的激光抛光涉及多个物理场,如图 8 所示[55],熔融石英材料吸收激光能量,表面温度迅速上升,并向材料内部进行热传导,同时通过材料界面的自然对流和辐射向外散热。

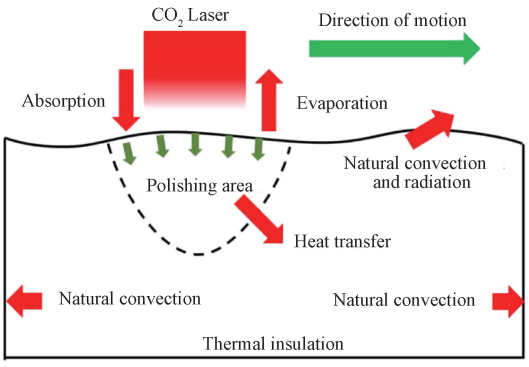
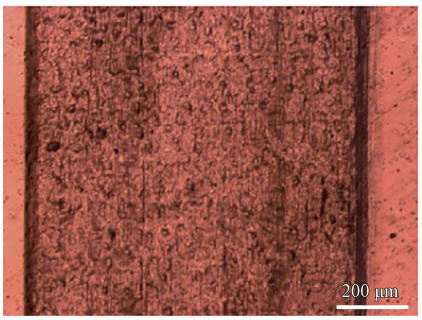


图 8 熔融石英 CO_2 激光抛光的多物理过程[55]

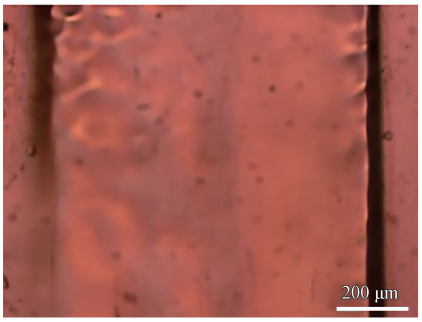
Fig. 8 Multiphysical process of CO_2 laser polishing fused silica[55]

玻璃表面吸收激光能量后迅速升温、熔化,使得玻璃表面一些细小的凸起在表面张力的作用下逐渐展平,在冷却凝固后形成了比较光滑的平面,从而降低表面粗糙度。王汕[56]采用 CO_2 激光器(波长为 10.6 μm)进行抛光石英玻璃刻蚀面的试验研究,结果表明,CO_2 激光能够对刻蚀面进行良好的抛光处理,并分析抛光机理为刻蚀面吸收 CO_2 激光,材料表面重熔后在表面张力的作用下逐渐展平,最终深度为 16 μm 的刻蚀槽体经激光抛光后底面表面粗

糙度达到 85 nm。图 9 为石英玻璃刻蚀面激光抛光前后显微对比图。除石英玻璃以外，德国的 WEINGARTEN 等[57-58]通过试验表明激光抛光还可以显著降低硼硅酸盐玻璃（BK7）和燧石玻璃（S-TIH6）的表面粗糙度，为了避免裂纹产生，将玻璃预热到 600 ℃，但是经过激光抛光后获得的形状精度还不足以用于成像光学。因此，必须使用高精度激光进行烧蚀，以减少激光抛光工艺产生的波纹，并校正光学形式。



(a) Before laser polishing



(b) After laser polishing

图 9　石英玻璃刻蚀面激光抛光前后显微对比图[56]

Fig. 9　Microscopic comparison of etched surface of quartz glass before and after laser polishing[56]

3.2.2　基底预热和工艺参数对抛光效果的影响

在激光抛光玻璃过程中，激光抛光时间非常短促，仅有几秒到十秒，材料表面加热和冷却速度极快，这使得玻璃表面在抛光过程中急热急冷而易开裂，同时易使表面轻微变形。为了防止激光抛光玻璃时温度梯度过大，导致玻璃开裂，需要预热系统来提高光学玻璃的表面完整性，也可以采用微波辅助加热等措施，有助于避免玻璃表面冷却过快产生永久应力[59-60]，最大程度保证抛光后玻璃的表面质量。西班牙 VEGA 等[61]提出用 CO_2 激光束对光学工业使用的常规玻璃进行抛光，以得到大面积光学表面，发现由于表面张力的作用，玻璃材料表面的粗糙度被非常有效地降低，经激光抛光后，试样表面粗糙度从 500 nm 降至 1 nm[62]。俄罗斯 BOL'SHEPAEV 等[63]也提出使用 CO_2 激光束来抛光玻璃制品，以降低表面粗糙度，为了避免温度梯度导致玻璃表面开裂，减轻材料中应力分布，在激光抛光之前，工件应加热到接近给定类型玻璃退火温度的温度，并在整个激光抛光操作过程中保持在该温度。我国 GUI[64]也表明在激光抛光玻璃时，产生的热机械张力会导致玻璃表面损坏。为了降低这些张力，有必要提前对玻璃进行预热，使玻璃表面受热均匀，并达到略低于玻璃化转变温度的温度。

在激光抛光玻璃的过程中，为了得到更好的抛光效果，除了进行预热以外，工艺参数的选择同样是非常重要的，通过数值模拟对温度和工艺参数进行预测优化，对 CO_2 激光抛光玻璃有着事半功倍的作用。德国 HILDEBRAND 等[65-66]通过温度模拟和大量抛光试验发现玻璃抛光的最终质量取决于起始表面粗糙度和起始波纹度，同时还取决于激光功率、进给速率以及光束导向、样品几何形状和环境条件，并表明数值模拟有助于减少试验量，了解和优化温度是控制抛光过程及其结果的一半。

综上，CO_2 激光适用于抛光玻璃材料，不同品种的玻璃材料，能够使用 CO_2 激光进行抛光，这是激光抛光玻璃较为经济性的选择。在激光抛光前，应当提前对玻璃进行预热，该操作是激光抛光玻璃中尤为重要的一步，能够避免玻璃材料遭受过大的热损伤。

3.3　其他非金属材料的激光抛光研究

3.3.1　金刚石的激光抛光研究

金刚石薄膜被广泛应用于耐磨部件、涂层工具、光学窗口等领域，直接制备的金刚石薄膜表面凹凸不平，表面粗糙度较大，无法满足应用要求，不能直接使用[67]。同时，金刚石是自然界最硬的材料，传统的抛光方法不仅费力，而且费时。因此，如何实现金刚石材料的表面抛光成为国内外学者长期以来探索的难题之一。

激光抛光具有高效率，且能够进行微小区域或者大面积的工作等优点，因此非常适用于抛光金刚石薄膜[68]。激光抛光金刚石的作用机理，是由光热作用和光化学作用共同进行的。热作用引起金刚石膜表面温度瞬间升高，使得金刚石表面的材料发生气化和石墨化，从而达到材料的去除；光化学作用则通过金刚石材料吸收光子，使高能量的光子破坏了 C-C 之间的化学键，直接去除材料。

早在 20 世纪 80 年代，ROTHSCHILD 等[69-70]就指出 193 nm 波长激光特别适合金刚石薄膜抛光。20 世纪 90 年代，美国 OZKAN 等[71]提出了先用 Nd-

YAG 激光(波长为 532 nm,脉宽为 15 ns)照射金刚石衬底,去除粗糙材料,再用 ArF 准分子激光(波长为 193 nm)进行精细表面加工的金刚石衬底抛光工艺。在优化条件下,Nd-YAG 激光将材料平均表面粗糙度从 25 μm 降至 5 μm,准分子激光进一步将粗糙度降至 1 μm 左右。瑞士 GLOOR 等[72]利用波长为 193 nm 的 ArF 准分子激光对红外窗口的金刚石薄膜进行了抛光,使表面粗糙度从 3.6 μm 降至 1 μm 左右,满足使用要求。德国 PRIESKE 等[73]使用波长为 515 nm 的皮秒激光器对金刚石薄膜进行抛光,抛光后表面粗糙度从 1.85 μm 降到 0.51 μm,并证实当脉宽小于 10 ps 时,皮秒激光抛光金刚石的过程中不会形成石墨。

国内研究者对激光抛光金刚石薄膜这一领域也做了不少的试验探究。苏青峰等[74]提出了一种激光抛光与热化学抛光相结合的复合抛光技术,先采用 Nd-YAG 激光器(波长为 1.06 μm,脉宽为 400 ns)对金刚石薄膜表面进行抛光,再采用金属铁板作为热化学抛光板,热金属板温度维持在 750~950 ℃的范围内,分别在真空和氢气中进行。复合抛光后金刚石薄膜的表面粗糙度从 119 nm 降至 100 nm 左右,并且能够有效提高抛光效率和抛光质量。XU 等[75]建立了 Nd-YAG 激光抛光金刚石膜的理论模型,发现高功率密度激光使金刚石表面石墨化后迅速加热、蒸发和升华,大入射角、中等激光脉冲能量、大重复频率和中等激光脉冲宽度的组合可以获得良好的金刚石厚膜抛光质量。马玉平等[76-77]研究了飞秒激光抛光金刚石涂层时激光功率、重复频率和扫描速度对表面粗糙度的影响。结果表明,表面粗糙度随着功率的降低而减小,当功率降至 100 mW 以下时抛光后的表面粗糙度会随着功率的降低而略微的提高;重复频率对抛光后的表面粗糙度无显著影响;表面粗糙度随扫描速度的增大而减小,当扫描速度增加到 1.6 mm/s 之后,表面粗糙度会出现略微的升高。在功率 100 mW,重复频率 1 kHz,扫描速度 1.6 mm/s 的条件下,得到的表面粗糙度最低,约为 0.14 μm,基本上满足金刚石涂层低摩擦表面的要求,该研究中飞秒激光为掺钛蓝宝石飞秒激光系统(波长为 800 nm,脉宽为 104 fs)。

综上,短波长和超快激光[78]对金刚石薄膜的抛光非常有效。其中,工艺参数的设定对抛光效率和抛光质量起着重要作用,提前建立理论模型研究工艺参数的影响,由此调控合适的工艺参数将会使得抛光流程事半功倍。此外,将激光抛光与其他抛光技术进行有效结合能够进一步提高抛光效果。

3.3.2 蓝宝石的激光抛光研究

蓝宝石晶体是制造 GaN、发光二极管 LED 的衬底材料,在一些高新技术领域充当零件使用。由于蓝宝石硬度高且脆性大,传统的抛光方法容易导致表面划痕、抛光效率低、返工率高等问题[79-80],而激光抛光技术则有效地解决了这些问题。

关于激光抛光蓝宝石晶体的作用机理,谢昕等[81]研究了波长 532 nm 皮秒激光和波长 355 nm 皮秒激光抛光蓝宝石的作用机理,经理论推导得出 532 nm 激光以热作用为主,355 nm 激光以光化学作用为主[82]。试验发现,532 nm 激光抛光蓝宝石过程热作用占主要地位,产生破碎去除和熔化、气化等过程;355 nm 激光抛光蓝宝石则以光化学作用为主,产生微破碎和组织细化,与理论分析结果较为一致。

在激光抛光蓝宝石的过程中,激光能量密度、激光重复频率、扫描速度、激光入射角、扫描方式等工艺参数的变化对抛光效果有着重要的影响。魏昕等[83]采用钕钇铝石榴石激光器发射紫外激光(脉宽为 25 ps,波长为 355 nm)抛光蓝宝石,结果表明,随着激光入射角或扫描次数的增加,蓝宝石表面粗糙度降低。表面粗糙度随着激光扫描速度的增加而增加。该团队[84]又运用脉冲宽度为 20 ns 的 355 nm 紫外激光抛光蓝宝石来进行工艺参数的影响研究,当激光能量低于 0.056 mJ 时,随着激光能量的增加,激光辐射的光化学作用增加,其中也伴随着热作用,抛光后蓝宝石的表面粗糙度显著降低。当脉冲能量高于 0.056 mJ 时,激光辐射的热作用变强并主导抛光过程中的材料去除,从而导致大量微裂纹和表面粗糙度变差。除此以外,还表明单扫描模式优于多扫描模式和交叉扫描模式,交角越小,激光抛光后获得的表面粗糙度越低;样品初始表面粗糙度越小,紫外激光抛光后表面粗糙度降低的百分比越大,说明紫外激光抛光更适合精密抛光。

综上,对蓝宝石运用短波长的紫外激光抛光能够获得良好的抛光效果,在抛光过程中,作用机理主要是光化学作用,大幅减少了因为热作用而产生的微裂纹等表面缺陷。为了兼顾抛光效率和抛光质量,可以先进行大能量激光慢扫描速度粗抛,再进行小能量快扫描速度精抛。同时在抛光过程中采用合理的工艺参数进一步提高抛光质量。

4　结论与展望

4.1　结论

激光抛光技术作为一种新型的加工技术,已经被越来越多的研究者们所关注。

(1) 优越性

激光抛光技术对抛光不同材料都展现了其独特的的优越性。

首先激光抛光作为一种非接触式的抛光技术,在抛光过程中不会对样品施加任何压力,能够实现精密度极高的抛光,抛光后的表面粗糙度可达纳米级甚至亚纳米级。

激光抛光的灵活性极高,抛光平面不仅适用于平面,也能够抛光各种曲面,既能够进行全面抛光,也能对局部的微小区域进行抛光。

激光抛光的应用范围很广,不仅能够对金属材料进行高效抛光,还能够有效抛光陶瓷、玻璃、蓝宝石和金刚石这一类超硬的脆质材料;抛光的工作环境较为简单,室温下即可进行操作,能够实现大规模的工业自动化加工。

(2) 工艺参数

这些优越性在不同材料的激光抛光上均有体现,但如果要达到更加良好的抛光效果,设定合适的工艺参数在抛光过程中是至关重要的。

在激光抛光过程中,主要有三类参数起着关键作用:工件的相关参数、激光器相关参数、与运动相关的工艺参数。针对不同的材料表面,设定相应合适的工艺参数能够最大化地降低材料表面粗糙度。对于金属材料,还能够提高其表面的力学性能。其中,建立数值模拟模型进行研究,能够更高效方便地优化工艺参数。

(3) 作用机理

激光在抛光材料表面时,热作用与光化学作用共同进行。

在如今的工业生产中,绝大部分激光抛光是热作用起主导作用,具有极高温度的激光束作用在材料表面,使材料表面发生熔化、气化等过程,从而降低材料表面粗糙度。虽然热作用主导的激光抛光加工效率高,但在抛光过程中产生的热应力会导致材料表面出现微裂纹。

在使用短波长或者超快激光对超硬的脆质材料进行抛光时,光化学作用则起主导作用。光化学作用过程中,材料表面吸收激光光子,破坏了材料分子的化学键和晶格结构,从而实现材料表面的去除。光化学作用能有效减少材料表面因热应力导致的微裂纹。

4.2　展望

激光抛光技术并非完美无瑕,不但在抛光过程中会产生热应力,还存在设备价格和加工成本高,加工过程中的精度控制技术要求高等缺点,这些缺点在一定程度上限制了激光抛光技术的发展。可考虑从以下几个方面改善这些缺点:

(1) 面对不同的材料时,需要采用合适的激光器以及合适的工艺参数进行抛光,不同的激光器具有不同的波长、脉宽等多种参数,工艺参数以及激光器的优良选择能够最大幅度避免抛光过程中热应力的损伤。

(2) 为了降低热应力对激光抛光效果的负影响,应该在激光抛光过程中去控制温度的变化,通过提前预热或者在液体下进行抛光等方式来防止产生过大的热应力。除此以外,建立数值模拟模型对温度变化以及工艺参数进行合理的预测与把控。

(3) 将其他抛光技术与激光抛光进行有效复合,结合其他抛光技术的优点,补足激光抛光技术的缺点,比如激光化学复合抛光技术,也可将超声、磁场等作用复合进激光抛光技术中,进一步提高材料表面的抛光效果。

(4) 对于激光设备价格高、加工成本高、技术要求高等缺点,迄今为止在激光抛光过程中仍然是不可避免的。但随着激光器生产的不断改进和价格的降低,以及对激光抛光工艺的机理更深入的研究,这些缺点的负面影响也会逐渐减小,同时激光抛光技术带来的工业潜能会逐渐增大,对推动未来的工业发展起到十分重要的作用。

参　考　文　献

[1] 赵兴科, 王中, 郑玉峰, 等. 抛光技术的现状[J]. 表面技术, 2000, 29(2): 6-7.
ZHAO Xingke, WANG Zhong, ZHENG Yufeng, et al. Current situation of polishing technology[J]. Surface Technology, 2000, 29 (2): 6-7. (in Chinese)

[2] 翁慧燕, 李振华. 抛光的几种工艺对比[J]. 机械工程师, 2010(6): 28-29.
WENG Huiyan, LI Zhenhua. Comparison of several polishing processes[J]. Mechanical Engineer, 2010 (6): 28-29. (in Chinese)

[3] 何捍卫, 胡岳华, 周科朝, 等. 金属的化学-机械抛光技术研究进展[J]. 应用化学, 2003(5): 10-14.
HE Hanwei, HU Yuehua, ZHOU Kechao, et al. Research progress of metal chemical mechanical polishing technology[J]. Applied Chemistry, 2003 (5): 10-14. (in Chinese)

[4] 王喜社, 李新凯, 谭袁迅, 等. 离子束抛光研究进展[J]. 制造技术与机床, 2019(10): 28-31.
WANG Xishe, LI Xinkai, TAN Yuanxun, et al. Research progress of ion beam polishing[J]. Manufacturing Technology and Machine Tools, 2019 (10): 28-31. (in Chinese)

[5] 陈林, 杨永强. 激光抛光[J]. 激光与光电子学进展, 2003 (8): 57-59.
CHEN Lin, YANG Yongqiang. Laser polishing[J]. Progress in Laser and Optoelectronics, 2003(8): 57-59. (in Chinese)

[6] 江超, 王又青, 胡少六. 激光抛光技术的发展与展望[J]. 激光技术, 2002(6): 421-424.
JIANG Chao, WANG Youqing, HU shaoliu. Development and prospect of laser polishing technology[J]. Laser Technology, 2002 (6): 421-424. (in Chinese)

[7] VEGA F, LUPON N B, CEBRIAN J A, et al. Laser application for optical glass polishing[J]. Optical Engineering, 1998, 37 (1): 272-279.

[8] 华显刚, 魏昕, 周敏, 等. 355 nm 紫外激光抛光 Al_2O_3 陶瓷作用机理的实验研究[J]. 中国激光, 2014(12): 64-69.
HUA Xiangang, WEI Xin, ZHOU Min, et al. Experimental study on polishing mechanism of Al_2O_3 ceramics by 355 nm UV laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014 (12): 64-69. (in Chinese)

[9] 宋杨, 王海鹏, 王强, 等. 激光精细表面制造工艺研究及应用: 清洗与抛光[J]. 航空制造技术, 2018, 61(20): 78-86.
SONG Yang, WANG Haipeng, WANG Qiang, et al. Research and application of laser fine surface manufacturing technology: cleaning and polishing[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2018, 61 (20): 78-86. (in Chinese)

[10] UKAR E, LAMIKIZ A, LIÉBANA F, et al. An industrial approach of laser polishing with different laser sources[J]. Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik, 2015, 46 (7): 661-667.

[11] KRISHNAN A, FANG F. Review on mechanism and process of surface polishing using lasers[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2019, 14(3): 299-319.

[12] LAMIKIZ A, SÁNCHEZ J A, LÓPEZ DE LACALLE L N, et al. Surface roughness improvement using laser-polishing techniques[C]//Materials science forum. Trans Tech Publications Ltd, 2006, 526: 217-222.

[13] RAMOS-GREZ J A, BOURELL D L. Reducing surface roughness of metallic freeform-fabricated parts using non-tactile finishing methods[J]. International Journal of Materials & Product Technology, 2003, 21(4): 297-316.

[14] RAMOS J A, BOURELL D L, BEAMAN J J. Surface over-melt during laser polishing of indirect-SLS metal parts[J]. Mrs Proceedings, 2002, 758: LL1.9.1-LL1.9.9.

[15] 陈林, 杨永强. 激光抛光机理及应用[J]. 表面技术, 2003, 32(5): 49-52.
CHEN Lin, YANG Yongqiang. Mechanism and application of laser polishing[J]. Surface Technology, 2003, 32 (5): 49-52. (in Chinese)

[16] 李诚. 激光微烧结工件表面的激光微抛光研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
LI Cheng. Study on laser micro polishing of laser micro sintered workpiece surface[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)

[17] 张峰烈. 金属材料纳秒紫外脉冲激光微抛光理论与技术的研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.
ZHANG Fenglie. Study on theory and technology of nanosecond ultraviolet pulse laser micro polishing of metal materials[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011. (in Chinese)

[18] 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 Weibo. Study on the process of femtosecond laser polishing silicon carbide ceramics[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)

[19] BASHA S M, BHUYAN M, BASHA M M, et al. Laser polishing of 3D printed metallic components: A review on surface integrity[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 26: 2047-2054.

[20] TUCKERMAN D B, WEISBERG A H. Planarization of gold and aluminum thin films using a pulsed laser[J]. IEEE Electron Device Letters, 1986, 7(1): 1-4.

[21] OBEIDI M A, MCCARTHY E, AHAD I U, et al. Improving the surface finish and other properties of engineering metal parts[J]. Key Engineering Materials, 2019, 813: 197-202.

[22] ROSA B, MOGNOL P, HASCOËT J Y. Laser polishing of additive laser manufacturing surfaces[J]. Journal of Laser Applications, 2015, 27(S2): S29102.

[23] BRINKSMEIER E, RIEMER O, GESSENHARTER A, et al. Polishing of structured molds[J]. CIRP Annals, 2004, 53(1): 247-250.

[24] ZHOU H, ZHOU H, ZHAO Z, et al. Numerical simulation and verification of laser-polishing free surface of S136D die steel[J]. Metals-Open Access Metallurgy Journal, 2021, 11(3): 400.

[25] 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.

[26] HOFELE M, ROTH A, SCHANZ J, et al. Laser polishing of laser powder bed fusion AlSi10Mg parts—influence of initial surface roughness on achievable surface quality[J]. Materials Sciences and Applications, 2021, 12(1): 15-41.

[27] LAMIKIZ A, SANCHEZ J A, LACALLE L, et al. Laser polishing techniques for roughness improvement on metallic surfaces[J]. International Journal of Nanomanufacturing, 2007, 1(4): 2433-2435.

[28] 杨奇彪, 王昊君, 黄易, 等. 纳秒激光抛光钛合金 Ti_6Al_4V 作用机理的实验研究[J]. 光学技术, 2019, 45(2): 245-250.
YANG Qibiao, WANG Haojun, HUANG Yi, et al. Experimental study on the mechanism of nanosecond laser polishing titanium alloy Ti_6Al_4V [J]. Optical Technology, 2019, 45 (2): 245-250. (in Chinese)

[29] ZHANG Z, REN L, ZHOU T, et al. Optimization of laser processing parameters and their effect on penetration depth and surface roughness of biomimetic units on the surface of 3Cr2W8V

steel-ScienceDirect[J]. Journal of Bionic Engineering, 2010, 7(1): S67-S76.

[30] PFEFFERKORN F E, DUFFIE N A, MORROW J D, et al. Effect of beam diameter on pulsed laser polishing of S7 tool steel [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2014, 63(1): 237-240.

[31] XU J, ZOU P, KANG D, et al. Theoretical and experimental study of bulge formation in laser polishing of 304 stainless steel [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 66(2): 39-52.

[32] PURUSHOTHAMAN S, SANKAR M R. State of the art on atomistic modelling of laser polishing [J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 44: 689-695.

[33] XU J, ZOU P, WANG W, et al. Study on the mechanism of surface topography evolution in melting and transition regimes of laser polishing[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 139(6): 106947.

[34] ERMERGEN T, TAYLAN F. Review on surface quality improvement of additively manufactured metals by laser polishing [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2021: 1-17.

[35] XU Z, OUYANG W, LIU Y, et al. Effects of laser polishing on surface morphology and mechanical properties of additive manufactured TiAl components [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 65(9): 51-59.

[36] CHEN L, RICHTER B, ZHANG X, et al. Effect of laser polishing on the microstructure and mechanical properties of stainless steel 316L fabricated by laser powder bed fusion[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 802: 140579.

[37] ZHOU J, HAN X, LI H, et al. In-situ laser polishing additive manufactured AlSi10Mg: effect of laser polishing strategy on surface morphology, roughness and microhardness [J]. Materials, 2021, 14(2): 393.

[38] ZHOU J, LIAO C, SHEN H, et al. Surface and property characterization of laser polished Ti6Al4V [J]. Surface & Coatings Technology, 2019, 380(1): 125016.

[39] LEE S, AHMADI Z, PEGUES J W, et al. Laser polishing for improving fatigue performance of additive manufactured Ti-6Al-4V parts[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 134: 106639.

[40] NÜSSER C, SÄNDKER H, WILLENBORG E. Pulsed laser micro polishing of metals using dual-beam technology [J]. Physics Procedia, 2013, 41: 346-355.

[41] YUNGA K C, XIAOA T Y, CHOYA H S, et al. Laser polishing of additive manufactured CoCr alloy components with complex surface geometry [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 262: 53-64.

[42] 姜长城, 袁建东, 成海东, 等. 热辅助纳秒脉冲激光抛光试验研究[J]. 机电工程, 2021, 38(5): 617-622.
JIANG Changcheng, YUAN Jiandong, CHENG Haidong, et al. Experimental study on thermally assisted nanosecond pulse laser polishing[J]. Electromechanical Engineering, 2021, 38(5): 617-622. (in Chinese)

[43] BHADURI D, GHARA T, PENCHEV P, et al. Pulsed laser polishing of selective laser melted aluminium alloy parts [J]. Applied Surface Science, 2021, 558: 149887.

[44] KANG D, ZOU P, WU H, et al. Research on ultrasonic vibration-assisted laser polishing of the 304 stainless steel [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 62: 403-417.

[45] SAMANT A N, DAHOTRE N B. Laser machining of structural ceramics—A review [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2009, 29(6): 969-993.

[46] FOLWACZNY M, MEHL A, HAFFNER C, et al. Polishing and coating of dental ceramic materials with 308 nm XeCl excimer laser radiation. [J]. Dental Materials, 1998, 14(3): 186-193.

[47] 周敏, 魏昕, 谢小柱, 等. 355 nm 紫外激光抛光 Al_2O_3 陶瓷工艺的研究[J]. 激光技术, 2014(4): 556-560.
ZHOU Min, WEI Xin, XIE Xiaozhu, et al. Study on polishing Al_2O_3 ceramics by 355nm UV laser[J]. Laser Technology, 2014(4): 556-560. (in Chinese)

[48] 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 Lingrui. Research on laser micromachining technology of ceramic materials[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)

[49] ZHANG X, JI L, ZHANG L, et al. Polishing of alumina ceramic to submicrometer surface roughness by picosecond laser [J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 397: 125962.

[50] KIM M, BANG S, KIM D H, et al. Hybrid CO_2 laser-polishing process for improving material removal of silicon carbide [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(7): 3139-3151.

[51] ZHENG Qingzhen, CUI Jianlei, FAN Zhengjie, et al. Investigation on the underwater femtosecond laser polishing SiC ceramic[J]. Ferroelectrics, 2020, 564(1): 28-36.

[52] 王承遇, 陶瑛. 玻璃材料手册[M]. 北京:化学工业出版社, 2008.
WANG Chengyu, TAO Ying. Handbook of glass materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008. (in Chinese)

[53] SIDORENKO S P, FEDOSOVSKY M E, VEIKO V P, et al. Laser polishing of vidicon's glass substrates[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2009, 7201: 72011I-72011I-7.

[54] XIAO Y M, BASS M. Thermal stress limitations to laser fire polishing of glasses [J]. Applied Optics, 1983, 22(18): 2933-2936.

[55] ZHAO L, CHENG J, CHEN M, et al. Formation mechanism of a smooth, defect-free surface of fused-silica optics using rapid CO_2 laser polishing [J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2019, 1(3): 035001.

[56] 王汕. 激光刻蚀抛光石英玻璃工艺研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
WANG Shan. Study on laser etching and polishing of quartz glass [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)

[57] HEIDRICH S, WILLENBORG E, WEINGARTEN C, et al.

Polishing and form correction with laser radiation[C]//Optical Fabrication and Testing 2014 Kohala Coast, Hawaii United States 22-26 June 2014. Optical Society of America, 2014: OTu1B. 4.

[58] WEINGARTEN C, HEIDRICH S, WU Y, et al. Laser polishing of glass[C]//SPIE Optifab 2015, Rochester, New York, United States. International Society for Optics and Photonics, 2015, 9633: 963303.

[59] 王承遇, 李松基, 陶瑛, 等. 超光滑超精密玻璃抛光新技术[J]. 玻璃, 2009, 36(10): 33-37.
WANG Chengyu, LI Songji, TAO Ying, et al. New technology of ultra smooth and ultra precision glass polishing[J]. Glass, 2009, 36(10): 33-37. (in Chinese)

[60] OSTENDORF A, KULIK C J, WIECHELL P O, et al. Pyrometer measuringsystem during a laser based polishing process of glass th surface[C]//Proc. 20th Inter. Congr Glass, 2004, Kyoto, Japan, 2004, 3(4): 11.

[61] VEGA F, LUPON N B, CEBRIAN J A, et al. Laser application for optical glass polishing[J]. Optical Engineering, 1998, 37(1): 272-279.

[62] 金友. 激光在光学玻璃抛光中的应用[J]. 光机电信息, 2000, 17(2): 1-7.
JIN You. Application of laser in optical glass polishing[J]. Optoelectromechanical Information, 2000, 17(2): 1-7. (in Chinese)

[63] BOL'SHEPAEV O Y, KATOMIN N N. Laser polishing of glass articles[J]. Glass and Ceramics, 1997, 54(5): 141-142.

[64] GUI W K. Research on laser polishing of optical glass[J]. Advanced Materials Research, 2011, 154-155: 1209-1212.

[65] HILDEBRAND J, HECHT K, BLIEDTNER J, et al. Laser beam polishing of quartz glass surfaces[J]. Physics Procedia, 2011, 12(1): 452-461.

[66] HILDEBRAND J, HECHT K, BLIEDTNER J, et al. Advanced analysis of laser beam polishing of quartz glass surfaces[J]. Physics Procedia, 2012, 39(9): 277-285.

[67] 唐璧玉, 靳九成. 金刚石薄膜的抛光技术[J]. 机械设计与制造工程, 1998(4): 3-6.
TANG Biyu, JIN Jiucheng. Polishing technology of diamond film[J]. Mechanical Design and Manufacturing Engineering, 1998(4): 3-6. (in Chinese)

[68] 张峥, 霍晓. CVD 金刚石薄膜抛光技术的研究进展[J]. 真空科学与技术学报, 2000(4): 44-47,69.
ZHANG Zheng, HUO Xiao. Research progress of CVD diamond film polishing technology[J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 2000(4): 44-47,69. (in Chinese)

[69] ROTHSCHILD M, ARNONE C, EHRLICH D J. Excimer-laser etching of diamond and hard carbon films by direct writing and optical projection[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 1986, 4(1): 310-314.

[70] 万静, 苟立, 冉均国. 金钢石膜表面抛光与平整技术进展[J]. 现代技术陶瓷, 2003, 24(1): 31-34.
WAN Jing, GOU Li, RAN Junguo. Progress of diamond film surface polishing and leveling technology[J]. Modern Technical Ceramics, 2003, 24(1): 31-34. (in Chinese)

[71] OZKAN A M, MALSHE A P, BROWN W D. Sequential multiple-laser-assisted polishing of free-standing CVD diamond substrates[J]. Diamond & Related Materials, 1997, 6(12): 1789-1798.

[72] GLOOR S, LÜTHY W, WEBER H P, et al. UV laser polishing of thick diamond films for IR windows[J]. Applied Surface Science, 1999, 138: 135-139.

[73] PRIESKE M, VOLLERTSEN F. Picosecond-laser polishing of CVD-diamond coatings without graphite formation[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 40: 1-4.

[74] 苏青峰, 夏义本, 王林军, 等. 复合抛光对 CVD 金刚石薄膜表面光洁度的改进研究[J]. 无机材料学报, 2006(2): 499-502.
SU Qingfeng, XIA Yiben, WANG Linjun, et al. Improvement of surface finish of CVD diamond films by composite polishing[J]. Journal of Inorganic Materials, 2006(2): 499-502. (in Chinese)

[75] XU F, HU H, ZUO D, et al. Numerical analysis of Nd: YAG pulsed laser polishing CVD self-standing diamond film[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(1): 121-127.

[76] 马玉平, 张遥, 魏超, 等. 飞秒激光抛光 CVD 金刚石涂层表面简[J]. 光学精密工程, 2019(1): 164-171.
MA Yuping, ZHANG Yao, WEI Chao, et al. Femtosecond laser polishing of CVD diamond coating surface[J]. Optical Precision Engineering, 2019(1): 164-171. (in Chinese)

[77] 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 Yao. Research on CVD diamond coating polishing technology based on femtosecond laser[D]. Hefei: Anhui Architecture University, 2019. (in Chinese)

[78] 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): 336-342.
LÜ Kexin, HAN Xuesong. Numerical simulation of ultrafast laser polishing of hard and brittle optical materials[J]. Progress in Laser and Optoelectronics, 2021, 58(5): 336-342. (in Chinese)

[79] 黄加福, 林红梅. 355 nm 紫外激光抛光工艺参数对蓝宝石表面粗糙度的影响[J]. 漳州职业技术学院学报, 2013(1): 17-20.
HUANG Jiafu, LIN Hongmei. Effect of 355 nm UV laser polishing process parameters on sapphire surface roughness[J]. Journal of Zhangzhou Vocational and Technical College, 2013(1): 17-20. (in Chinese)

[80] 郭晓艳, 魏昕, 谢昕. 蓝宝石抛光技术的研究进展[J]. 机电工程技术, 2006, 35(9): 76-78, 94.
GUO Xiaoyan, WEI Xin, XIE Xin. Research progress of sapphire polishing technology[J]. Electromechanical Engineering Technology, 2006, 35(9): 76-78, 94. (in Chinese)

[81] 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 Xin. Study on the mechanism of short wavelength laser polishing sapphire crystal [D]. Guangzhou: Guangdong University of technology, 2007. (in Chinese)

[82] LUO Yongan. Study on mechanism of polishing sapphire crystal by laser[J]. Advanced Materials Research, 2011, 341-342: 133-137.

[83] WEI X, GUO X, XIE X. Influence of the condition parameters on UV pulsed laser polishing of sapphire wafer[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim. Optical Society of America, 2009, Shanghai, 2009: 1-4.

[84] WEI X, XIE X Z, HU W, et al. Polishing sapphire substrates by 355 nm ultraviolet laser[J]. International Journal of Optics, 2012, 2012: 238367.

作者简介: 陈博文,男,1998 年出生,硕士。主要研究方向为激光精密微纳加工。

孙树峰(通信作者),男,1968 年出生,博士,教授, 博士研究生导师。主要研究方向为激光精密微纳加工。

E-mail:shufeng2001@163.com