

## 激光精密加工, 点亮智能制造

李欣欣<sup>1</sup>, 李兴<sup>1</sup>, 王翼猛<sup>1</sup>, 管迎春<sup>1,2,3\*</sup>, 王华明<sup>2</sup><sup>1</sup>北京航空航天大学机械工程与自动化学院, 北京 100083;<sup>2</sup>北京航空航天大学大型金属构件增材制造国家工程实验室, 北京 100083;<sup>3</sup>北京航空航天大学国际交叉科学研究院, 北京 100083

**摘要** 激光精密加工技术在航空航天、集成电路、医疗器械等战略新兴产业领域展现出了巨大优势。本文重点介绍了北京航空航天大学激光团队近年来在激光精密抛光、金属-复合材料高强连接、一站式功能表面制备、超快激光刀钻骨、超快激光助力硅晶圆制造等方面的研究进展, 对相关结果进行分析与总结, 并展望了激光精密加工技术的未来发展方向和应用前景。

**关键词** 激光技术; 激光精密加工; 激光抛光; 异质材料连接; 功能微纳结构; 骨钻孔; 智能制造

**中图分类号** V261.8

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL202249.1902001

## 1 引言

激光精密加工技术具有加工精度高、应用材料范围广、热损伤小等优点, 是通过材料吸收高能光场后发生蚀除、蒸发或汽化等, 从而实现精密去除或表面改性等目的的过程, 其加工精度范围通常在微米到数十微米内。1986 年, Mourou 博士和 Strickland 博士借鉴雷达中的微波放大技术, 首次实现了激光啁啾脉冲的放大与压缩, 突破了传统调 Q 和锁模等方法, 有力推动了激光精密加工技术的发展<sup>[1]</sup>。美国 Garrett 公司和 JKS 公司在 20 世纪末便将激光精密加工技术应用于航空领域, 并实现了微米级孔阵列的快速制备<sup>[2]</sup>。经过 20 余年的发展, 欧美主要国家在航空航天、汽车、消费电子等重点行业, 已基本完成了传统工艺的更新换代, 正式跨入“光加工时代”。为了促进激光精密加工技术的快速有序发展, 欧盟“Horizon 2020”计划于 2017 年启动 ModuLase 项目, 即, 英、德、意等 7 国联合开发智能化激光精密加工系统; 美国制造业前瞻联盟 MForesight 于 2018 年印发的《促进美国国家财富和安全的宏伟战略》中提出保证激光精密加工等先进制造业的领导地位; 日本于 2019 年在“Photonic and Quantum Technology for Society 5.0”规划下启动了新的激光研究五年计划。根据相关数据初步统计, 2021 年, 世界激光精密加工市场规模已达到 146 亿美元。

我国于 2006 年发布了《国家中长期科学和技术发

展规划纲要(2006—2020 年)》, 首次将激光技术列为重点发展前沿技术。2021 年, 我国国内激光加工市场规模已逾 700 亿元。随着我国制造业转型升级, 高附加值、高技术壁垒的微米及亚微米级激光精密加工技术迅速发展, 预计 2025 年精密加工市场规模可达 500 多亿元。近年来, 我国在极端条件下超精细加工等激光精密制造领域取得了一系列突破, 例如, 中国科学院西安光学精密机械研究所实现了航空发动机涡轮叶片气膜孔“冷加工”<sup>[3]</sup>, 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所与国家纳米中心合作开发了新型 5 nm 超高精度激光光刻加工方法<sup>[4]</sup>, 中国电子科技集团第二研究所实现了小尺寸碳化硅(SiC)单晶片激光剥离等<sup>[5]</sup>。随着高功率、长寿命激光器成本的持续降低, 以激光切割、焊接、熔覆为代表的传统激光加工技术在工业中的应用日趋成熟与广泛, 激光精密加工技术逐渐成为先进制造领域的重点发展方向, 如图 1 所示。激光精密加工技术在促进制造业创新升级的同时, 也推动了光学、物理、化学、材料、生命科学等前沿交叉学科的发展。本文聚焦近年来北京航空航天大学激光团队在空天、医疗、半导体晶圆制造等领域的研究现状, 总结现有成果并展望了其未来的发展趋势与方向。

## 2 空天激光精密制造

## 2.1 金属增材构件的激光精密抛光

复杂金属增材构件由于制造过程中粉末黏结、熔池飞溅、分层切片等原因, 表面质量通常不尽如人

收稿日期: 2022-05-23; 修回日期: 2022-06-26; 录用日期: 2022-07-12

基金项目: 北京市自然科学基金-海淀原始创新联合基金(L202006)

通信作者: \*guanyingchun@buaa.edu.cn

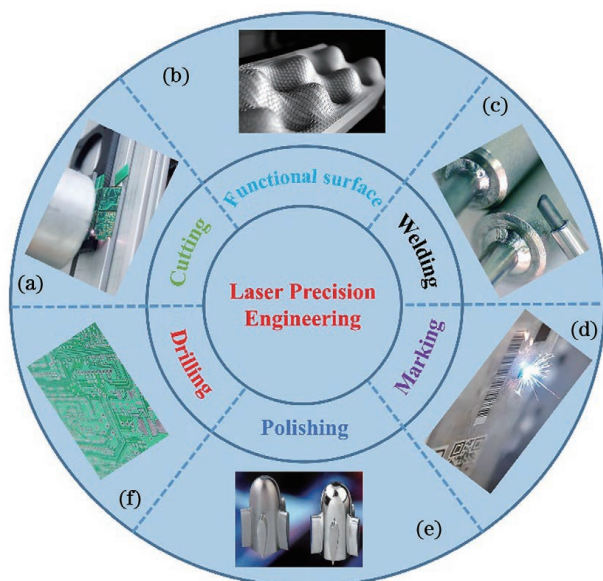


图1 激光精密加工技术的主要应用领域。(a)激光精密切割;(b)激光制备功能表面;(c)激光精密焊接;(d)激光打标;(e)激光抛光;(f)激光钻孔

Fig. 1 Application fields of laser precision machining. (a) Laser precision cutting; (b) laser fabricating function surface; (c) laser precision welding; (d) laser marking; (e) laser polishing; (f) laser drilling

意<sup>[6-7]</sup>,在很大程度上限制了其在航空航天、能源动力、生物医疗等领域的实际应用<sup>[8-9]</sup>。随着金属增材构件结构的日趋复杂<sup>[10]</sup>,传统的机械或化学等后处理方法难以满足加工要求<sup>[11-13]</sup>。激光抛光以其非接触、高柔性、无耗材、绿色、高效、多自由度等优点,为实现金属增材构件表面光整提供了新思路<sup>[14]</sup>。

目前,国内外关于激光抛光的研究主要集中在参数优化、加工性能提升和组织性能控制等方面。法国南特通信与控制研究所的 Rosa 团队<sup>[15]</sup>对增材制造 316L 不锈钢和 TC4 钛合金复杂薄壁结构零件进行了激光抛光处理,使其表面粗糙度降低了 60%;英国伯明翰大学的 Bhaduri 团队<sup>[16]</sup>研究了核心工艺参数和工艺环境对激光选区增材制造 316L 不锈钢零件表面完整性的影响;德国阿伦大学激光应用中心的 Hofele 团队<sup>[17]</sup>提出了千赫兹周期调制功率激光抛光新方法,该方法可使增材制造铝合金的表面粗糙度( $R_a$ )从 8.0~19.2  $\mu\text{m}$  降低到 0.13~0.26  $\mu\text{m}$ ;香港理工大学的 Wang 团队<sup>[18]</sup>发现激光抛光功率会影响激光选区增材制造 CoCr 合金的耐蚀性;江苏大学任旭东团队<sup>[7]</sup>的研究表明激光抛光可以有效消除 316L 激光增材构件的粉末黏结,同时提高了材料的抗拉强度和塑性;浙江工业大学姚建华团队<sup>[19]</sup>研究了脉冲激光工艺参数对 316L 不锈钢线切割高粗糙度表面激光抛光质量的影响;上海交通大学沈洪团队<sup>[20]</sup>的研究显示激光抛光提高了钛合金增材构件的自腐蚀电位和自腐蚀电流密度。

目前,国内外相关研究多集中于水平及倾斜表面的抛光,而且抛光表面存在孔隙、微裂纹、抛光表面质量不均一、疲劳性能下降等问题<sup>[21-25]</sup>。针对这些问题,本团队基于多年的激光熔凝金属技术积累,发明了解决难加工金属激光选区增材构件表面完整性问题的新方法,基于自主研制的光机电一体化协同控制系统以及在线监测及智能诊断等技术,重点突破了复杂金属增材构件表面大拐点、高深径比等光整瓶颈,将增材钛合金、镍合金等构件的表面粗糙度降低了 98% 以上( $R_a < 0.1 \mu\text{m}$ ),将增材构件表面的孔隙率降低了 60% 以上,同时将构件的力学性能提高了 40% 以上<sup>[26]</sup>。与此同时,本团队还探索了磁场等外场辅助激光抛光技术,该技术可以有效提高熔池的稳定性并抑制元素偏析,有助于激光抛光构件表面质量和性能的进一步提升<sup>[27]</sup>。本团队通过图 2(a-1)~图 2(a-3)所示的多物理场耦合模拟,分析了激光抛光钛合金、镍合金、不锈钢等金属增材构件表面的微熔池在重力、张力及蒸汽反冲压力作用下的熔化、流动及凝固过程,揭示了金属增材构件的激光抛光机理。此外,本团队结合激光抛光状态在线监测、工艺参数神经网络训练等新手段[如图 2(b-1)~图 2(b-2)所示],将金属增材构件的表面粗糙度( $R_a$ )由 15.0  $\mu\text{m}$  以上降低至 0.05~0.2  $\mu\text{m}$ ,如图 2(c-1)~图 2(c-3)所示,表面粗糙度降低了 98% 以上。本团队还采用精密抛光技术将增材构件的孔隙率降低了 60% 以上,如图 2(c-4)和图 2(c-5)所示,同时使抛光表面产生了 100~300 MPa 的残余压应力,将增材构件的疲劳寿命提高了 20% 以上。由于激光抛光过程中熔池快速凝固(凝固速率约为  $10^6 \text{ K/s}$ ),抛光层组织由表层的等轴晶和底层的柱状晶构成,如图 2(d-1)所示,且晶粒尺寸显著细化(Inconel 718 合金激光抛光层中 Laves 相的平均析出尺寸从 0.89  $\mu\text{m}$  降低至 0.42  $\mu\text{m}$ ),抛光层的显微硬度从 345 HV 提高至 440 HV,摩擦因数显著降低;钛合金增材构件抛光层的组织由初始的  $\alpha + \beta$  相转变为超细的  $\alpha'$  板条马氏体以及纳米尺度的  $\beta$  相粒子,表层耐磨性能提升 40% 以上,抗拉强度提升 30%,压缩屈服强度提高了近 15%,如图 2(d-3)所示。

在此基础上,本团队进一步提出了增材构件的磁场辅助激光抛光工艺<sup>[27]</sup>,利用洛伦兹力抑制 Marangoni 对流,提高了熔池的稳定性,有效改善了增材构件抛光表面的均匀性,元素偏析得到显著抑制[如图 2(a-4)所示],显微硬度提升 58%,表面摩擦因数进一步降低,并且塑性得到提升。磁场辅助激光抛光增材构件的自腐蚀电位升高至 -0.16 V,自腐蚀电流密度降低两个数量级( $4 \times 10^{-11} \text{ A/cm}^2$ ),抛光层的耐蚀性明显提高。目前,本团队已开发了多台金属构件激光精密抛光原理样机,解决了金属增材构件表面完整性的难题,并实现了相关应用,如图 2(b-3)和图 2(b-4)所示。

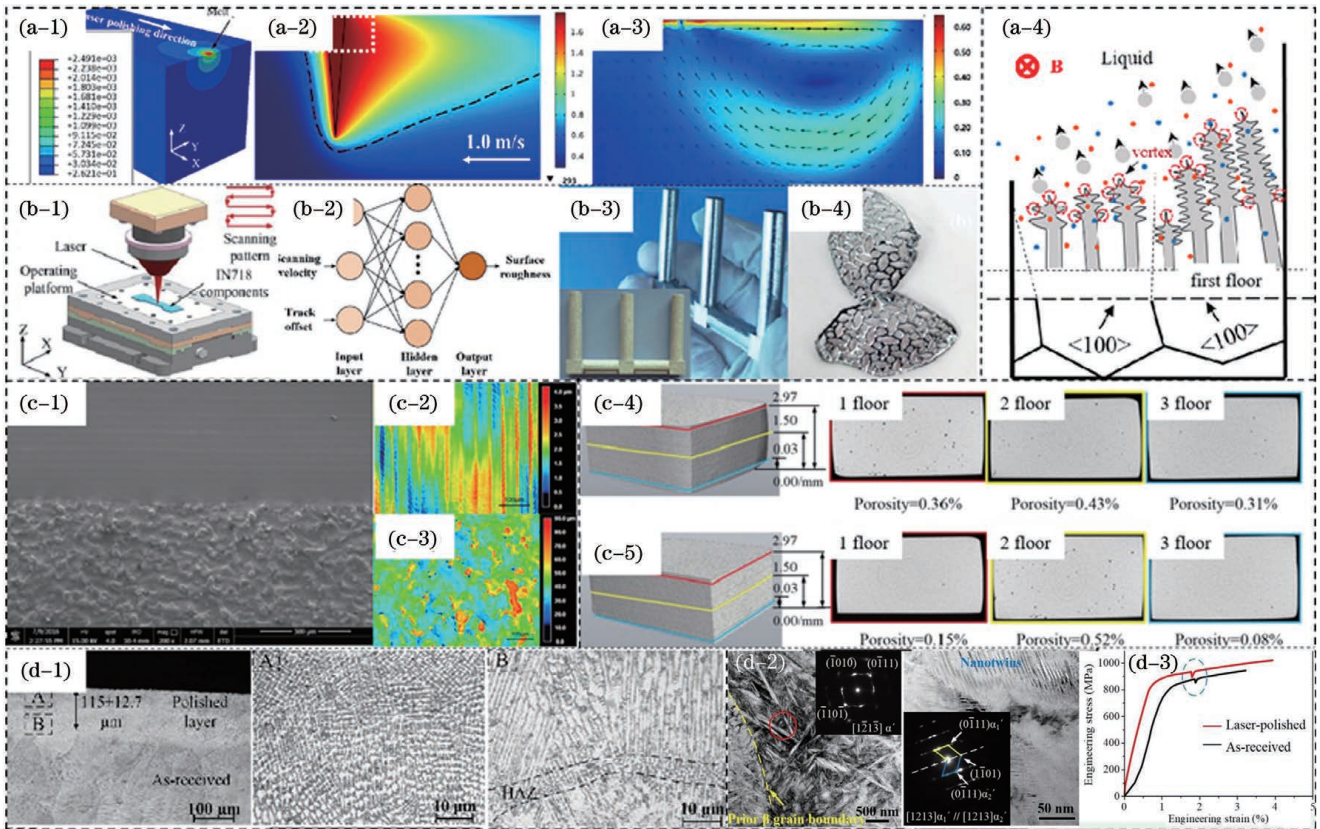


图2 激光精密抛光新技术<sup>[26-27]</sup>。(a)抛光机理模拟分析:(a-1)构件的温度场分布,(a-2)熔池温度,(a-3)熔池流动,(a-4)元素偏析抑制机理;(b)抛光工艺实施:(b-1)抛光策略规划,(b-2)人工神经网络训练模型,(b-3)增材曲面工件抛光,(b-4)增材牙科植入物抛光;(c)激光抛光表面质量:(c-1)激光抛光表面与原始表面的扫描电子显微镜(SEM)图像,(c-2)激光抛光表面的激光扫描共聚焦(CLSM)图像,(c-3)原始增材件表面的CLSM图像,(c-4)原始增材件横截面孔隙率的计算机断层扫描(CT)图像,(c-5)抛光件横截面孔隙率的CT图像;(d)抛光层的组织和性能:(d-1)抛光层截面,(d-2)抛光层组织的透射电子显微镜(TEM)图像,(d-3)抛光构件的压缩屈服强度

Fig. 2 New technology of laser precision polishing<sup>[26-27]</sup>. (a) Simulation analysis of polishing mechanism: (a-1) temperature field distribution of workpiece, (a-2) molten pool temperature, (a-3) molten pool flow, (a-4) element segregation inhibition mechanism; (b) polishing process implementation: (b-1) polishing strategy planning, (b-2) artificial neural network training model, (b-3) additive curved workpiece polishing, (b-4) additive dental implant polishing; (c) laser polished surface quality: (c-1) SEM image of laser polished and as-received surfaces, (c-2) CLSM image of laser polished surface, (c-3) CLSM image of as-received additive surface, (c-4) CT scan image of as-received additive part cross-section porosity, (c-5) CT scan image of polished part cross-section porosity; (d) microstructure and properties of polished layer: (d-1) polished layer cross-section, (d-2) TEM image of polished layer microstructure, (d-3) compressive yield strength of polished part

## 2.2 金属-复合材料的激光高强连接

航空工程师名言“为减轻每一克重量而奋斗,一克重量比金贵”,彰显了减重对于航空航天飞行器的重要意义。随着轻质复合材料在空天飞行器制造中的应用占比显著增加,实现金属与复合材料之间的高性能连接成为关键技术问题。相比于传统的机械连接、胶接等方法,激光连接技术具有无接触、高精度等加工特点以及易于实现自动化控制等技术优势,避免了机械连接中使用螺栓等连接部件导致机体增重以及胶接接头强度低等问题。

在金属与复合材料连接界面构造微互锁结构是目前制备高性能异质接头的重要方法。中国科学院宁波材料技术与工程研究所张文武团队<sup>[28]</sup>利用激光连接

技术,以铝合金与碳纤维增强聚酰胺树脂为连接材料,通过在金属表面制备微结构以及在金属与复合材料之间引入聚酰胺(PA)树脂层,使连接界面形成了良好的互锁结构,将接头的连接强度提高至 37.5 MPa。清华大学单际国团队<sup>[29-30]</sup>研究了激光连接过程中连接界面附近气泡缺陷的形成机理,认为复合材料高温分解和熔融复合材料凝固收缩是导致气泡缺陷形成的主要原因,因此他们在钢表面加工出微凸起结构,以改变激光连接过程中的热传导路径,通过抑制连接界面的热量积累与熔融复合材料凝固收缩导致的缩松结构,将连接界面的孔隙率由 7.13% 降低至 1.26%。在激光连接制备的异质接头中,连接界面附近和复合材料内部产生的气泡缺陷是抑制接头连接强度进一步提升的

重要原因,但是,通过优化热传导路径来抑制气泡缺陷形成的方法,在不同材料之间的连接中并不具备普适性。

针对上述难题,本团队提出了一种新的激光连接工艺<sup>[31]</sup>,如图3(a)所示,即:在激光连接过程中对连接区域持续施加压紧力,将熔融树脂因高温分解产生的气泡从连接界面有效排出,消除了熔融树脂在凝固收缩过程中因缺少材料补缩而造成的缩松缺陷,从而在

钛合金与玻璃纤维增强聚酰胺树脂(PA66/GF30)连接界面形成了微互锁结构<sup>[31]</sup>,如图3(b)所示。通过抑制气泡缺陷形成,同时利用连接界面微互锁结构的锚定作用,该技术将激光连接钛合金 Ti6Al4V-PA66/GF30 接头的连接强度由 13.8 MPa 提高至 41.5 MPa,如图3(c)所示,接头断裂位置由气泡缺陷集中区域转变为连接界面处的平滑剪切断裂区域,如图3(d)所示。

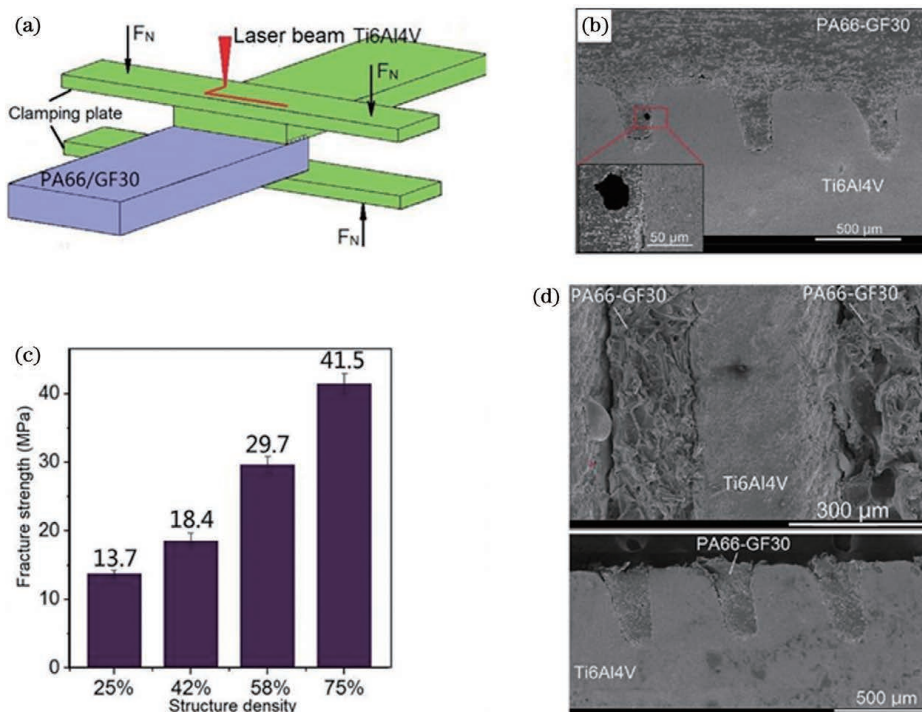


图3 激光连接 Ti6Al4V-PA66/GF30 的性能分析<sup>[31]</sup>。(a)激光连接工艺示意图;(b)Ti6Al4V-PA66/GF30 连接界面的截面微观形貌;(c)Ti6Al4V-PA66/GF30 接头的拉伸断裂强度与 Ti6Al4V 表面微结构密度之间的关系;(d)拉伸断裂后连接区域的表面(上)与截面(下)形貌

Fig. 3 Performance analysis of laser joining produced Ti6Al4V-PA66/GF30 joints<sup>[31]</sup>. (a) Schematic of laser joining process; (b) cross-sectional morphology at joining interface of Ti6Al4V-PA66/GF30 joint; (c) relationship between tensile fracture strength of Ti6Al4V-PA66/GF30 joints and structure density of Ti6Al4V surface; (d) surface (top) and cross-sectional (bottom) morphologies of fractured joints

基于以上研究方法,本团队进一步对钛合金 Ti6Al4V 与碳纤维增强聚醚醚酮树脂(PEEK/CF30)进行了激光连接实验,并对连接性能进行了研究<sup>[32]</sup>。如图4(a)所示,Ti6Al4V-PEEK/CF30 接头连接界面处形成了牢固的互锁结构,有效抑制了熔融树脂高温分解或凝固收缩引起的气泡缺陷,减小了熔融 PEEK 树脂高黏度和流动性较差等缺点对接头连接性能的影响。通过在金属连接表面预制微结构,接头的最大连接强度能达到 60 MPa 以上,如图4(b)所示,显著高于目前文献已公开的实验结果。为研究温度对异质接头连接性能的影响,本团队还利用冷热交替循环处理对激光连接 Ti6Al4V-PEEK/CF30 接头的力学性能进行了分析。分析结果表明,冷热交替循环处理前后,激光连接 Ti6Al4V-PEEK/CF30 接头断裂强度的最高值均可达到 60 MPa 以上,如图4(c)所示。这表明冷

热交替循环处理对 Ti6Al4V-PEEK/CF30 接头连接性能未造成明显影响,也表明 Ti6Al4V-PEEK/CF30 接头具有良好的耐候性。

### 2.3 超快激光一站式制备功能表面

空天领域飞行器的高速发展对飞机发动机叶片等结构部件的性能提出了越来越高的要求,以满足复杂(高空、高速、急剧变化)、严酷(高温、高湿、大载荷、严寒)的服役环境要求,同时对空天飞行器零部件表面提出了如增升、减阻、吸波、隐身、防冰、自清洁等新的功能要求。表面微纳功能结构的出现,为解决上述问题提供了有效途径。比如:在空天飞行器表面加工出减阻微结构,可以有效降低飞行器的风阻,减小摩擦阻力;在空天飞行器表面加工出抗结冰微结构,可以避免飞行器表面形成结冰层,提高其空气动力学和热力学功能,从而达到增速、增程、降噪等目的;在空天飞行器

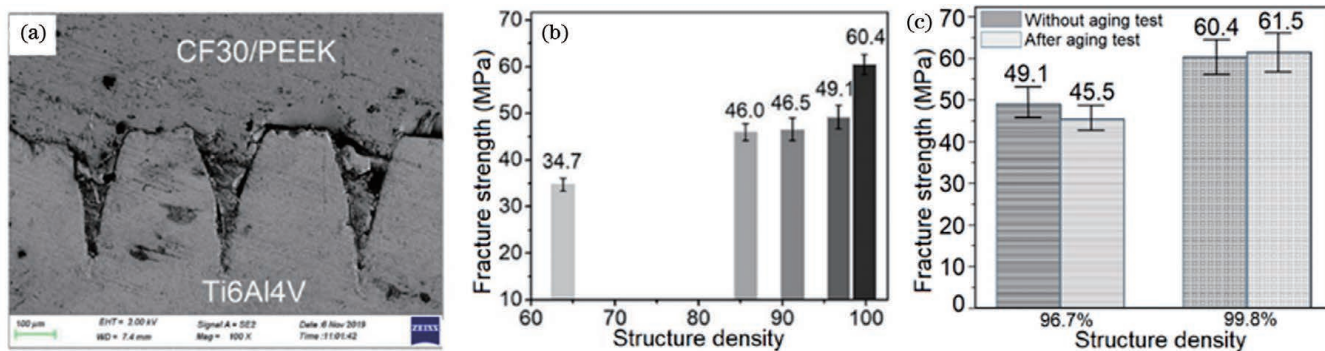


图4 激光连接 Ti6Al4V-PEEK/CF30 的性能分析<sup>[32]</sup>。(a) Ti6Al4V-PEEK/CF30 连接界面的横截面微观形貌；(b) Ti6Al4V-PEEK/CF30 接头拉伸断裂强度与 Ti6Al4V 表面微结构密度之间的关系；(c) 冷热交替循环处理对接头断裂强度的影响  
Fig. 4 Performance analysis of laser joining produced Ti6Al4V-PEEK/CF30 joint<sup>[32]</sup>. (a) Cross-sectional morphology of Ti6Al4V-PEEK/CF30 joints at joining interface; (b) relationship between tensile fracture strength of Ti6Al4V-PEEK/CF30 joints and structure density of Ti6Al4V surface; (c) influence of high-low temperature alternating aging test on fracture strength of Ti6Al4V-PEEK/CF30 joint

表面加工出减反微纳结构可以实现隐身功能,增强飞行器的突防能力等<sup>[33]</sup>。

表面功能微结构的制备方法主要有光刻、蚀刻、LIGA、离子束加工、电子束加工以及微超声加工、热压成型、模压成型、注射成型、超精密金刚石车削、铣削、飞刀切削、金刚石砂轮磨削等<sup>[34]</sup>。这些方法面临的主要挑战如下:电子束、离子束加工需要的真空设备价格昂贵;LIGA 及超精密机械加工技术是接触式加工,无法对硬脆材料进行加工;光刻技术只能加工二维微结构等<sup>[35]</sup>,难以满足高加工分辨率、适用多种材料、三维加工能力等新型功能表面的制备要求。

作为一种先进的微纳加工方法,超快激光加工技术利用超快激光的超高瞬时功率,将激光能量聚焦在微米甚至纳米尺度,对材料实现微纳加工。该技术以加工精度高、材料适应范围广等优点,在超疏水抗结冰、减阻、减反等功能表面制备上的应用获得了国内外研究人员的广泛关注<sup>[36-38]</sup>。

### 2.3.1 超疏水抗结冰表面

空天飞行器表面结冰会给飞行安全造成巨大威胁<sup>[39]</sup>,是国内外迫切需要解决的重大问题。传统的防除冰方法主要有机械振动除冰、电脉冲除冰和电热除冰等<sup>[40]</sup>,但这些方法都存在耗能高、效率低的问题。研究发现,制备超疏水表面被认为是最合适的被动抗结冰技术之一<sup>[41]</sup>,国内外众多学者对其进行了大量研究。

德国佛劳恩霍夫研究所的 Alamri 团队<sup>[42]</sup>通过红外皮秒激光直写技术在钛合金机翼表面制备了分级微纳结构,获得了接触角为 163°的超疏水表面,该表面在-10℃和-20℃下的结冰数量(相同面积内结冰体积的大小)明显少于未处理表面。德国德累斯顿工业大学的 Milles 团队<sup>[43]</sup>利用纳秒激光在 2024 铝合金表面直接制备出了接触角为 159°的超疏水微纳结构,该结构在-20℃下的延迟结冰时间为 22.3 s。英国伯明翰大学的 Gaddam 团队<sup>[44]</sup>利用飞秒激光在 430

不锈钢表面制备了微米凸起与激光诱导周期表面结构(LIPSS)复合的微纳结构,该结构的接触角为 149°,在-10℃下的延迟结冰时间为 303 s。

清华大学的钟敏霖团队<sup>[45-46]</sup>开发了超快激光-化学试剂浸泡/热氧化等复合工艺,并采用该工艺在铜、铝合金等金属材料表面制备了微米柱、微米柱-纳米颗粒、微米锥-纳米草-微米花等多级微纳结构超疏水表面,其中微米锥-纳米草-微米花三级微纳结构超疏水表面的接触角可达 160°,延迟异质形核时间为 52 min 39 s,冰黏附强度最低为 1.7 kPa,即使经过 10 次结冰-除冰循环后,超疏水表面的冰黏附强度仍低于 10 kPa。西安交通大学的陈烽团队<sup>[47]</sup>先利用飞秒激光贝塞尔光束在不锈钢表面直接诱导微孔阵列结构,然后对该结构进行氟硅烷改性及润滑剂填充,获得了接触角为 153.25°的光滑注液多微孔表面,该表面在-30℃下的延迟结冰时间为 247 s,经过 15 次结冰-除冰循环后,冰黏附强度低于 15 kPa,同时,该功能表面在盐雾、液压、高低温循环等工况下具有良好的持久性。中国科学院大学的郭春雷团队<sup>[48]</sup>利用飞秒激光在聚四氟乙烯衬底上制备微纳结构,获得了接触角为 157°的超疏水表面,该表面在-10℃下的水滴延迟结冰时间为 338 s。吉林大学的刘燕团队<sup>[49]</sup>利用纳秒激光在 7075 铝合金表面制备了微纳结构,并利用硬脂酸溶液对其表面进行改性,获得了接触角超 160°的超疏水表面,该表面在-15℃下的水滴延迟结冰时间为 1938 s。三峡大学的赵新泽团队<sup>[50]</sup>通过在硅橡胶表面制备超疏水结构实现了硅橡胶表面的抗结冰性能,该表面在-10℃下的水滴延迟结冰时间为 72 s。

目前,国内外研究人员主要采用激光精密加工和化学后处理技术在金属和高分子材料表面制备超疏水抗结冰功能微纳结构,这种方法的缺点是工艺比较复杂,且功能表面的持久性较差。针对这一问题,本团队基于超快激光精密加工技术,在不锈钢材料表面一站式制备了超疏水抗结冰功能微纳结构<sup>[51]</sup>。如图5(a)、

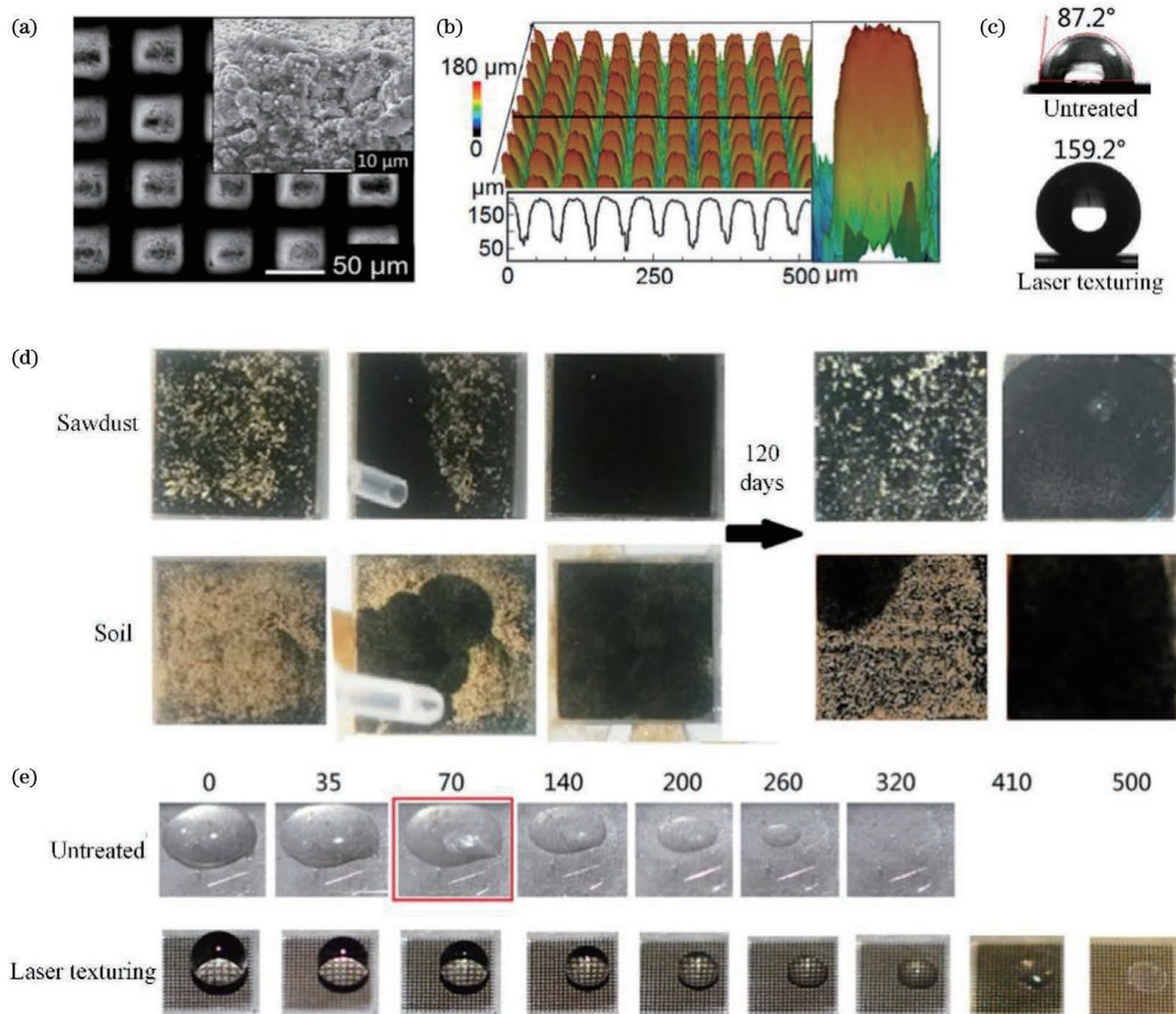


图5 超快激光制备功能表面及该表面的性能分析<sup>[51]</sup>。(a)超快激光制备的规则微柱结构;(b)微柱结构层次化的表面形态;(c)微柱结构的超疏水性能;(d)不锈钢超疏水表面的自清洁性能;(e)不锈钢超疏水表面的抗结冰性能(在 $-8.5\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的自然环境下)

Fig. 5 Ultra-fast laser preparation of functional surface and performance analysis of the surface<sup>[51]</sup>. (a) Ultra-fast laser fabricated regular micropillar structure; (b) hierarchical surface morphology of micropillar structure; (c) superhydrophobicity of micropillar structure; (d) self-clearing performance of fabricated superhydrophobic surfaces on stainless steel; (e) anti-icing performance of fabricated superhydrophobic surfaces on stainless steel in natural environment at  $-8.5\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$

(b)所示,该微纳结构主要由表面被纳米颗粒覆盖的微柱组成,微柱阵列的周期约为 $20\text{ }\mu\text{m}$ ,高度约为 $100\text{ }\mu\text{m}$ ,纳米颗粒的直径约为 $500\text{ nm}$ ;该结构具有优异的超疏水性能,接触角可达到 $159.2^{\circ}$ ,如图5(c)所示。此外,本团队进一步研究了该超疏水表面的自清洁性能及抗结冰性能,结果如图5(d)、(e)所示,当下落水滴接触到超疏水表面后,表面上的粉末污渍(木屑或土壤)被水滴吸附,随后从超疏水结构表面滚落,表面得以清洁。将该样件置于室温空气环境中4个月以上,其超疏水结构表面依然维持着良好的自清洁性能。更重要的是,该超疏水表面展现出了优异的抗结冰特性,在温度为 $-8.5\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度约为30%的冬季户外环境下,该表面可使结冰时间延迟8 h以上。

### 2.3.2 减反减阻功能表面

极端服役环境对空天飞行器目标识别精度、探测增程能力的要求愈发苛刻,对其抗反射指标的要求也越来越高。金属与外界空间的光学阻抗严重不匹配,因此,金属材料往往难以实现较为理想的抗反射性能。目前,国内普遍采用喷涂黑漆、电镀、喷砂等方法增强金属表面的抗反射性能,但由于界面结合等问题,采用这些方法加工的表面普遍存在寿命短、高低温脱落、一致性差等缺陷。与上述方法加工的表面相比,在金属表面制备的具有抗反射功能的微纳结构具有宽光谱、长寿命、无污染等优点,成为最具工程应用潜力的减反功能表面<sup>[52]</sup>。

美国罗彻斯特大学的Guo团队<sup>[53]</sup>利用飞秒激光在金属铂、钛、铜表面制备了分层微纳复合结构,该微

纳结构表面在红外波段内的反射率明显降低。美国艾奥瓦大学的 Ding 团队<sup>[54]</sup>首先采用纳秒激光在 AA6061 和 Ti6Al4V 表面制备微纳结构,然后将制备好的微纳结构放置在 3-氰丙基三氟硅烷试剂中浸泡 3 h,结果发现,该微纳结构在红外-A、红外-B 和可见光谱下的表面发射率相较于未处理样件大幅降低。德国弗劳恩霍夫海因里希赫兹研究所的 Hübner 团队<sup>[55]</sup>采用皮秒激光并以活性卤素(碘、溴、氯)和卤代烃作为气体添加剂在钛合金表面制备抗反射结构,结果显示,在溴/空气中制备的抗反射结构表面在 600 nm 波段处的反射率降至 3%。

西安交通大学的梅雪松团队<sup>[56]</sup>采用皮秒脉冲激光在钛合金表面制备微纳米复合结构,并用氟烷基硅烷溶液对其进行氟化处理,结果发现,经氟化处理的结构表面在 200~2600 nm 宽波段范围内的平均反射率为 4.12%。清华大学的钟敏霖团队<sup>[57-59]</sup>利用飞秒激光直写、激光-热氧化复合等制备技术在铜、钛、钨等纯金属表面制备微米圆锥+纳米颗粒、微米圆锥+纳米线等多级微纳复合结构,这些复合结构在紫外-近红外宽波段谱范围内具有优异的抗反射

性能,最小反射率可达到 0.29%。南开大学的杨建军团队<sup>[60]</sup>在 1000 级洁净室内环境下利用飞秒激光在 Ni-Ti 合金表面刻蚀出珊瑚状结构,该结构在 200 nm~25 μm 宽带波长区域的吸收率约为 90%。

目前,国内外学者主要利用激光精密加工技术和化学处理复合工艺在金属表面制备减反功能表面,复杂的工艺过程限制了该功能表面的推广应用。针对该问题,本团队基于超快激光精密加工技术,分别在 WC-Co 合金、钛合金等金属材料表面一站式制备了减反、减阻等多功能微纳结构<sup>[61]</sup>,如图 6(a)所示。本团队采用激光精密加工技术制备了 970 nm±10 nm 周期性微纳结构,但由于激光辐照时存在能量沉积不均匀以及熔融材料流动不稳定等问题,在周期性结构之间产生了纳米尺度的锥状凸起结构,如图 6(b)所示。由于微尺度的空穴和凸起对光的强烈捕获效应,激光精密加工减反功能表面在绿光到近红外宽波段范围内的反射率降至 10%以下,如图 6(c)、(d)所示,这使得该功能表面在太阳能、隐身等新能源、航空航天相关领域的应用前景十分广阔。

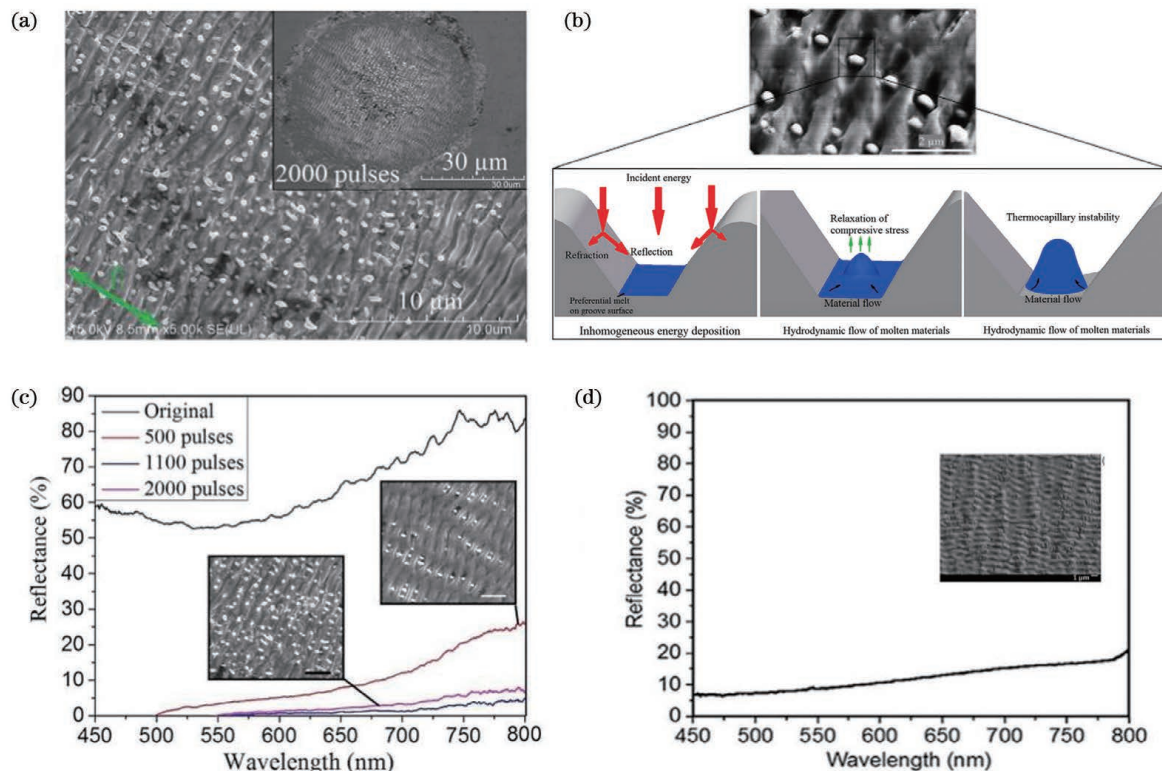


图 6 超快激光制备功能表面及该表面的减反性能<sup>[61]</sup>。(a)WC-Co 合金表面激光加工区域中心的 SEM 图像;(b)沟槽表面纳米波纹之间纳米凸起的形成示意图;(c)微/纳米结构化 WC-Co 合金表面反射率控制;(d)大面积纳米结构的表面反射率

Fig. 6 Ultra-fast laser preparation of functional surface and its anti-reflection performance<sup>[61]</sup>. (a) SEM images of the center of irradiated spots on WC-Co alloy surface; (b) formation diagrams of nano-protrusions between nano-ripples at groove surface; (c) controlling surface reflectance of micro/nano-structured WC-Co alloy surface; (d) surface reflectance of large area nanostructure

此外,针对空天领域飞行器对减阻的需求,基于微结构减阻机理<sup>[62]</sup>,本团队开展了压气机叶片减阻功能表面的研究。结果表明,利用超快激光加工技术可在

NACA0015 型翼型上成功制备出深宽均为 50 μm、间距为 100 μm 的 V 型微沟槽结构,风洞测试结果显示该结构可实现减阻率达 11.73% 的减阻效果。

### 3 超快激光刀钻骨

人口老龄化、社会生活方式转变等因素导致骨科疾病发病率逐年上升,我国每年骨科创伤病例高达2000万例。骨科临床手术需要进行骨组织钻孔,传统的机械钻骨易造成骨孔壁粗糙、微裂纹等缺陷,术后愈合效果不佳;而且钻削过程中热量急剧累积,易导致组织活性下降或丧失。目前的超声、水射流等钻骨方法,由于骨组织去除机理尚不明确,存在临床适用性与安全性欠缺等问题。

激光骨钻孔技术以其无机械振动、无接触力、易于自动化、人为因素影响小、具有止血等优势,受到医护及研究人员的广泛关注。然而,激光骨钻孔技术具有较大难度。

加拿大麦克马斯特大学 Aljekhedab 团队<sup>[63]</sup>利用激光在体外牛骨上制备了亚毫米级“火山坑”,制备过程中出现了骨屑堆积现象。加拿大麦克马斯特大学的 An 团队<sup>[64]</sup>利用两种激光在体外猪骨上加工毫米级微孔,加工效率仅为  $0.01 \text{ mm}^3/\text{s}$ 。英国曼彻斯特大学的 Charlton 团队<sup>[65]</sup>采用三种红外激光(Er:YAG、Ho-YAG、CO<sub>2</sub>)进行骨切割实验研究,结果发现三种红外激光均会对骨组织造成不同程度的热损伤。为了减少或消除热损伤,美国得克萨斯大学奥斯汀分校的 Kang 团队<sup>[66]</sup>采用长脉冲 Er,Cr:YSGG 激光分别在干燥、水雾、液体环境下对牛胫骨进行消融研究,结果显示:液体与干燥环境下的骨消融速率相当,且没有碳化迹象;水雾可以通过对流运动有效降低组织的温度,生成狭窄切口,促进骨消融。

清华大学的张学学团队<sup>[67]</sup>研究了影响激光消融生物组织的因素,得到了生物组织红外激光烧蚀时间的演化规律。福建师范大学的谢树森团队<sup>[68]</sup>研究了 CO<sub>2</sub> 激光扫描速度对牛小腿骨组织消融质量的影响,得出扫描速度与骨烧蚀体积、热损伤区域面积成反比的结论。为了减少热损伤,该团队<sup>[69]</sup>又研究了水层厚度对 CO<sub>2</sub> 激光消融牛小腿骨质量的影响,结果显示,在骨组织表面增加一层水层,可使切口形状更加规则、干净,同时可以降低热损伤。虽然水流等辅助骨钻孔可以有效降低激光骨钻孔的热损伤,但因长脉冲激光与骨组织相互作用过程中会有大量的热产生,所以利用长脉冲激光进行骨钻孔仍然会存在热损伤。为了进一步降低激光热效应对骨钻孔产生的热损伤,研究人员将目光转移到短脉冲激光上,以期获得更高的骨钻孔质量。

飞秒激光具有脉宽短、脉冲能量高、热损伤低等特点,可以降低骨钻孔过程中的骨消融阈值,避免骨组织碳化和热机械开裂<sup>[70]</sup>。此外,飞秒激光在与骨组织相互作用过程中,通常会激发出与加工参数状态、骨孔形状位置及组织成分等相关的等离子体特征光谱信号<sup>[71]</sup>,充分利用这些信号有助于

实现基于等离子体特征光谱响应的骨加工在线监测。

目前,激光骨钻孔技术主要存在加工效率低、孔径小等问题,这些问题限制了其在临床中的应用。此外,针对如何在保证飞秒激光骨钻孔效率的情况下,避免骨下软组织被烧蚀的问题,本团队提出了适用于超快激光精密加工骨孔过程的气/水辅助冷却工艺,并搭建了基于等离子体特征光谱进行实时在线监测的超快激光精密骨钻孔平台,实现了大尺寸骨孔的高精度、高效率加工。

#### 3.1 激光钻骨热损伤抑制

常规的激光去除骨组织技术利用骨组织中的水和羟基磷灰石等成分对中远红外波长激光的强烈吸收产生的热机械作用实现骨组织的快速去除,虽然避免了直接接触带来的机械损伤,但却带来了较大的热损伤。当骨温度维持  $47 \text{ }^\circ\text{C}$  以上 1 min,便会导致组织坏死。热损伤极大地限制了激光钻骨技术的临床应用。本团队采用超快激光精密加工技术<sup>[72]</sup>引导高能量密度激光束辐照骨组织表面,诱发骨组织表面形成光致压应力,光致压应力与材料表面相互作用,在材料内部产生拉应力波,使材料出现孔洞。当激光入射能量超过光机械散裂阈值时,拉应力就会使骨表面产生孔隙,导致一层或多层材料分离和喷溅,从而达到组织去除效果。组织去除过程中的电子-声子弛豫时间超过了超快激光的脉宽,组织的热累积程度较低,避免了常规激光钻骨技术带来的组织碳化问题。

考虑到人体骨骼的热导率相对较低,为保证骨骼中的碱性磷酸酶等不丧失原有的生物活性,本团队在超快激光精密加工骨孔过程中采用了气/水辅助冷却工艺<sup>[72]</sup>。即:在超快激光骨钻孔过程中,在激光与骨组织作用部位通入空气或水,流体的流动能够带走激光与骨组织作用产生的热量,起到降低骨孔周围温度的作用。图 7(a)、(b)所示的实时温度显示,在同样时长的钻孔过程中,空气和水辅助冷却的激光骨钻孔有效降低了钻孔过程中骨组织的温度,消除或减少了热效应对骨钻孔质量的影响。图 7(c)所示的傅里叶变换红外光谱显示:在无冷却条件下进行激光钻孔后,光谱  $3320 \text{ cm}^{-1}$  处的水峰以及  $1300 \sim 1600 \text{ cm}^{-1}$  处 C—O/C—H 峰的有机成分消失,说明骨组织已完全脱水<sup>[73]</sup>;而吹气和喷水可以有效阻止飞秒激光骨钻孔过程中的水分流失。图 7(d)展示了三种条件下激光钻孔前后骨表面的拉曼光谱,分析后发现: $851 \text{ cm}^{-1}$  处的脯氨酸峰和  $873 \text{ cm}^{-1}$  处的羟脯氨酸峰的强度均显著降低,说明激光加工过程中不可避免地发生了蛋白胶原降解;在无辅助冷却条件下, $1350 \text{ cm}^{-1}$  和  $1600 \text{ cm}^{-1}$  处出现了两个非晶态碳峰,说明激光加工过程中发生了有机碳化<sup>[74]</sup>;在吹气和喷水条件下,没有观察到无定形碳峰,说明吹气和喷水对骨再生非常有利。



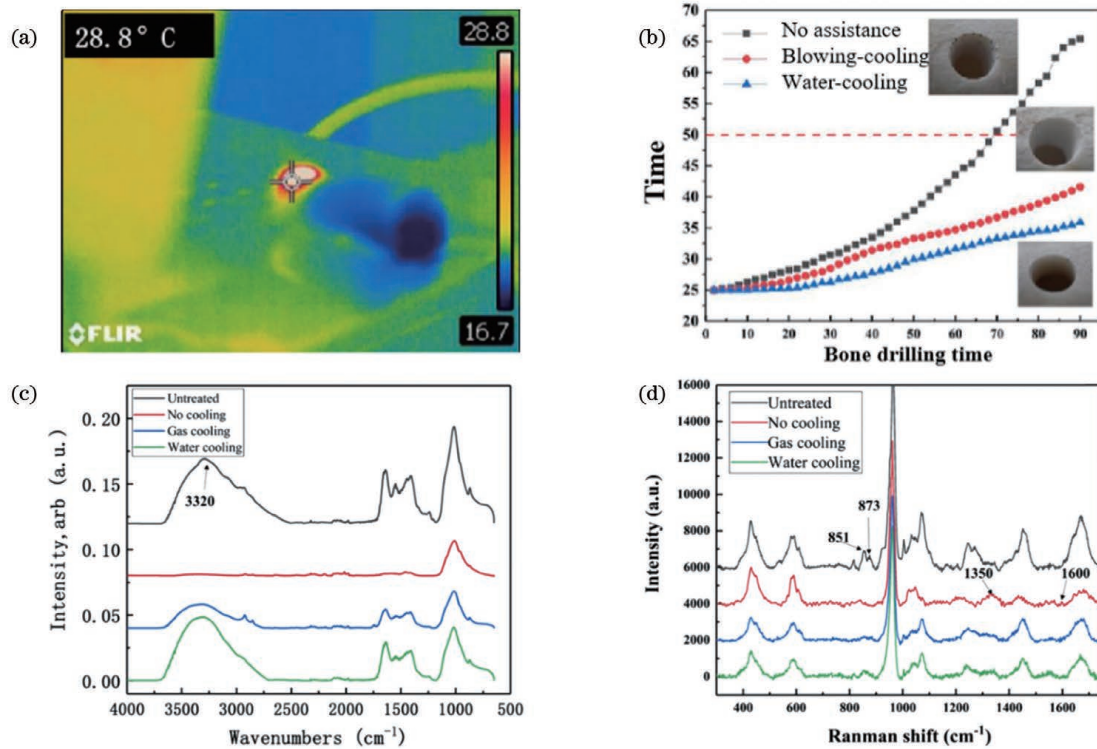


图7 超快激光钻骨温度及化学成分变化<sup>[72]</sup>。(a)实时温度;(b)三种条件下的温度变化;(c)三种条件下的傅里叶变换红外光谱;(d)三种条件下的拉曼光谱

Fig. 7 Changes of temperature and chemical composition of ultrafast laser drilling bone<sup>[72]</sup>. (a) Real time temperature; (b) temperature change under three conditions; (c) Fourier transform infrared spectra under three conditions; (d) Raman spectra under three conditions

### 3.2 高效率、高质量激光钻骨

对于大结构尺寸骨科手术,由于超快激光加工区域通常只限制在直径几十微米的狭小光斑范围内,因此激光骨去除效率较低,仅约为 $0.01 \text{ mm}^3/\text{s}$ <sup>[64]</sup>,远低于机械去除骨效率( $5 \text{ mm}^3/\text{s}$ )<sup>[75]</sup>,成为限制超快激光钻骨广泛推广的主要因素。本团队将精密运动平台与扫描振镜配合,自主搭建了超快激光精密

钻骨平台,并采用该平台成功实现了直径为 $2.5 \sim 6 \text{ mm}$ 、深度为 $5 \text{ mm}$ 的骨孔加工,激光骨去除率提升至 $0.99 \text{ mm}^3/\text{s}$ ,且孔壁表面质量良好,如图8(a-1)~(a-3)所示。同时,本团队进一步系统研究了激光骨去除率与激光加工参数之间的关系。在优化的设备参数下,理论的飞秒激光骨钻孔最大骨去除率可达 $8.23 \text{ mm}^3/\text{s}$ <sup>[72]</sup>。

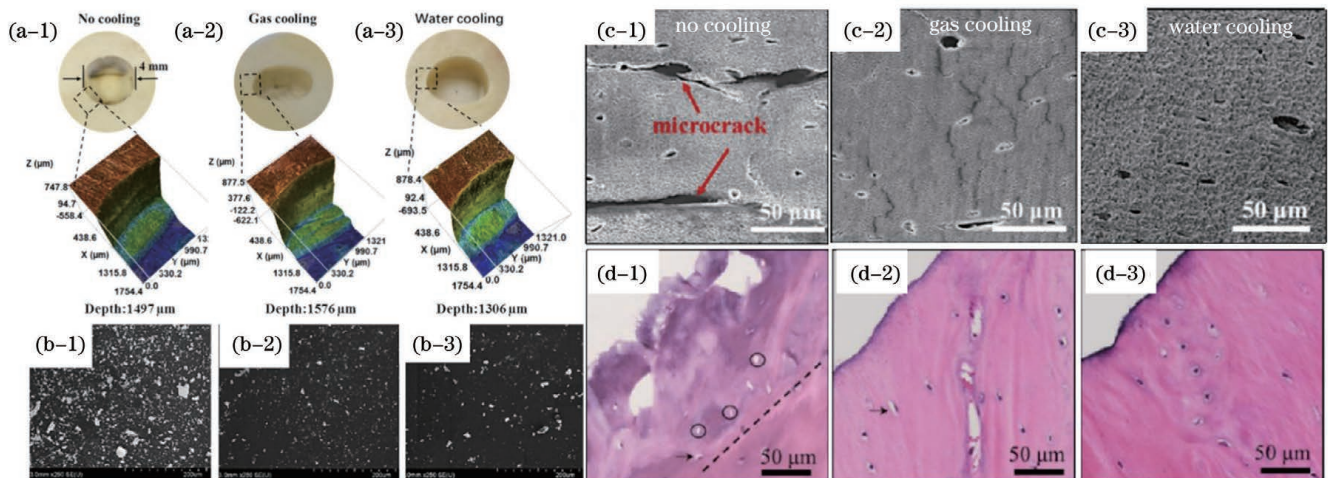


图8 高效率超快激光加工骨孔的质量分析<sup>[72]</sup>。(a-1)~(a-3)骨孔的三维形貌;(b-1)~(b-3)骨屑;(c-1)~(c-3)骨孔的SEM图像;(d-1)~(d-3)骨孔的组织学图像

Fig. 8 Quality analysis of high efficiency ultrafast laser processed bone holes<sup>[72]</sup>. (a-1)~(a-3) Three-dimensional morphologies of bone holes; (b-1)~(b-3) bone debris; (c-1)~(c-3) SEM images of bone holes; (d-1)~(d-3) histological images of bone holes

如图 8(b-1)~(b-3)所示,在无辅助冷却条件下飞秒激光产生的骨碎片多呈棱角状,而在吹气和喷水辅助条件下激光骨钻孔残留的碎片数量明显减少 64% 和 76%。在无辅助冷却条件下,骨碎片长度的分布范围为 2~12 μm;在吹气辅助下,骨碎片长度的分布范围为 2~5 μm;在喷水辅助下,骨碎片长度的分布范围为 3~7 μm。已有研究表明,长度在 5 μm 以上的骨碎片不易被巨噬细胞吞噬,术中骨残留易导致炎症发生<sup>[76]</sup>。流体流动能更好地清除骨碎片,有助于提高骨钻孔的质量。图 8(d-1)~(d-3)中的箭头指向有活骨细胞的骨陷窝,圆圈区域表示空的骨陷窝,虚线是活骨细胞与空骨陷窝之间的边界。在无辅助冷却条件下,骨结构边缘被严重破坏,产生空骨陷窝,热损伤深度约为 200 μm;在吹气和喷水条件下,基本没有空骨陷窝,组织病理学结果与骨温度测试结果一致。

### 3.3 激光精准定位钻骨的在线监测

超快激光高聚焦的能量密度保证了其加工效率,但软组织及血管等的存在增加了激光加工的复杂性,加工过程如果不能实现精细反馈控制,几秒的激光过

度辐照就可能导致钻孔位置处的骨下软组织发生损伤。如何在保证飞秒激光骨消融速率的情况下,精确控制热聚焦位置,减少热影响,提高激光在骨钻削中的安全性成为另一个亟待解决的问题。

本课题组在研究飞秒激光与材料相互作用机理的基础上,将飞秒激光在钻骨过程中产生的等离子体作为加工过程中区分不同组织的特征光信号,实现了基于光谱响应的骨加工实时在线监测<sup>[77]</sup>。如图 9(c)所示,骨光谱的 553、559、589 nm 处分别出现了 Mg、Ca、Na 元素的清晰信号,而骨髓光谱中没有这些信号<sup>[78]</sup>。可以将骨组织和软组织光谱中 Mg、Ca、Na 元素特征谱线的相对强度变化作为反馈控制信号,进行骨组织与脊髓的区分。此外,本课题组根据图 9(b)所示的飞秒激光与骨组织相互作用过程中产生的二次谐波信号的实时变化,研究了激光穿透骨深度与输入能量之间的关系,实现了激光聚焦位置的控制。综上,基于光谱响应的反馈控制有望实现飞秒激光骨钻孔手术过程中骨髓腔的保护以及激光骨钻孔深度的有效监测和精确控制。

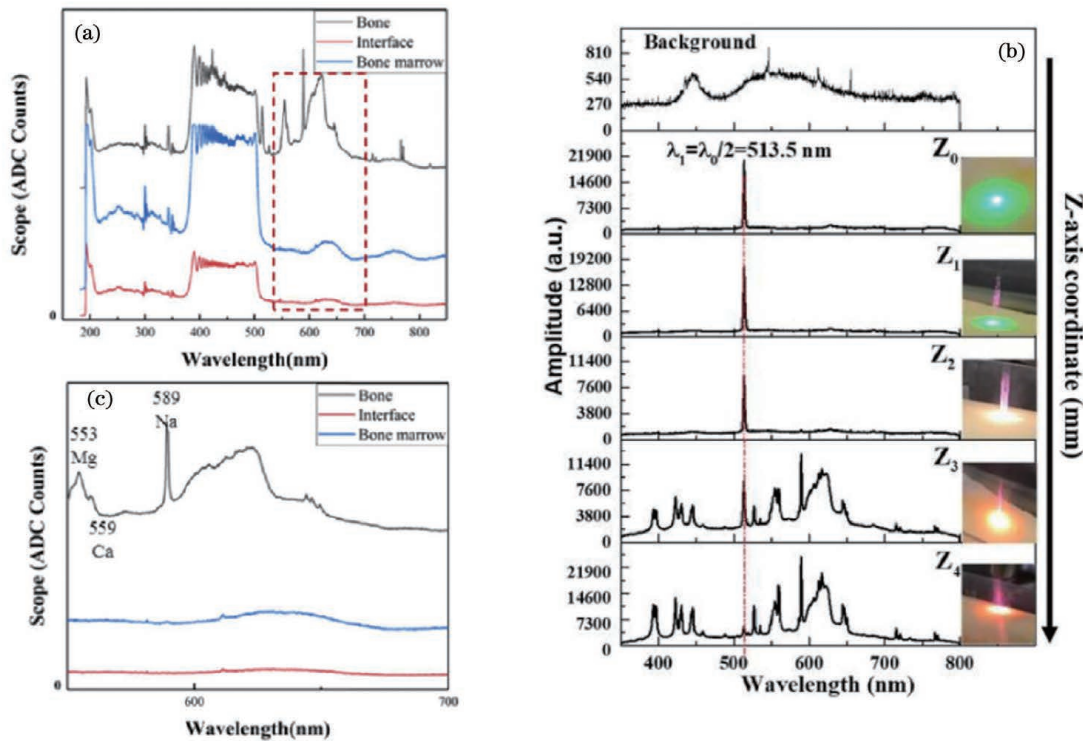


图 9 激光骨钻孔过程中的光谱在线监测<sup>[72,77]</sup>。(a)等离子体光谱;(b)二次谐波光谱;(c)等离子体光谱中 540~700 nm 波段的放大图像

Fig. 9 On line spectral monitoring of laser drilling process<sup>[72,77]</sup>. (a) Plasma spectra; (b) second harmonic spectra; (c) amplified image of plasma spectra during 540-700 nm

## 4 超快激光助力新型晶圆制造

晶圆是集成电路行业最基本的衬底材料,其制造过程通常涉及晶棒制造、切片、研磨、刻蚀、抛光等多个工序,其中研磨、抛光是直接决定晶圆应用的关键工序。随着大规模集成电路集成化程度的不断提高,大

尺寸晶圆需求量急剧增加,对晶圆研抛设备提出了更高要求。目前,国内外均采用具有化学-机械抛光系统的抛光机实现晶圆的研磨和抛光,而且国内化学机械抛光机及抛光用抛光垫和抛光膏等耗材完全依赖进口,是“卡脖子”清单关键组成部分,制约着我国集成电路产业的进一步发展,危及国家及人民的信

息安全。

近年来,激光精密加工技术在硅晶圆制造领域获得了一定的发展和应用:美国俄克拉何马州立大学的 Komanduri 团队<sup>[79]</sup>发现单晶硅的烧蚀深度随着激光能量密度的增加呈非线性急速增大;西班牙维戈大学的 Conde 团队<sup>[80]</sup>解释了硅在准分子激光烧蚀过程中微观组织变化的物理机理;瑞士应用物理研究所的 Gloor 团队<sup>[81]</sup>采用深紫外准分子激光对金刚石半导体材料进行抛光,抛光后样片表面的不规则形貌显著减少,但深度在 500  $\mu\text{m}$  以上的波纹仍然存在;日本东北大学的 Yan 团队<sup>[82-84]</sup>通过激光辐照将多晶硅层转化为单晶硅,并且硅层表面粗糙度的均方根(RMS)由 12 nm 降至 8 nm;日本庆应大学的 Niitsu 团队<sup>[85]</sup>通过激光辐照获得了表面粗糙度( $S_a$ )约为 1.1 nm 的硼掺杂单晶硅平坦表面;中国科学院大学的张志宇团队<sup>[86]</sup>提出了双步激光辐射抛光单晶硅的方法,得到了粗糙度为 26 nm 的无缺陷光滑表面。

本团队基于激光精密制造在难加工材料领域的应用特点以及激光精密抛光技术的多年累积,提出了激光定量减薄多晶硅和激光研抛改性单晶硅两种新方法,为我国的自主可控晶圆制造提供了参考。

#### 4.1 激光定量减薄

超精密磨削加工是晶圆减薄的主要方法,然而,在减小晶圆厚度的同时会不可避免地会在减薄表面引入磨削损伤,因此需要在后续采用化学机械抛光或刻蚀等磨削后处理工艺来去除磨削损伤,这无疑增加了后续处理工艺的时间和成本。本团队利用激光精密加工技术定量减薄多晶硅<sup>[84]</sup>,将多晶硅厚度由原始的 199  $\mu\text{m}$  减小到 102  $\mu\text{m}$ ,并且激光减薄多晶硅过程中未引入裂纹等机械性损伤,激光加工引起的热影响区深度被控制在 1  $\mu\text{m}$  以内,如图 10(a)、(b)所示。激光减薄技术可以有效控制减薄过程中多晶硅缺陷的产生,改善多晶硅的力学性能,并且对多晶硅的电学性能几乎无影响。图 10(c)显示了不同减薄步骤后多晶硅表面的典型拉曼位移,结果显示,减薄后多晶硅表面的残余应力值较原始多晶硅有所减小。此外,本团队测试了多晶硅激光减薄前后的电阻值,测试获得的电流-电压( $I-V$ )曲线如图 10(d)所示。原始多晶硅材料的电阻率为 1.799  $\Omega \cdot \text{cm}$ ,减薄后的电阻率为 1.856  $\Omega \cdot \text{cm}$ ,这说明超快激光减薄工艺对多晶硅材料电阻率的影响较小。超快激光减薄工艺可以实现多晶硅的定量减薄,而且对多晶硅力学、电学性能的影响极小,为硅晶圆减薄提供了新的技术思路。

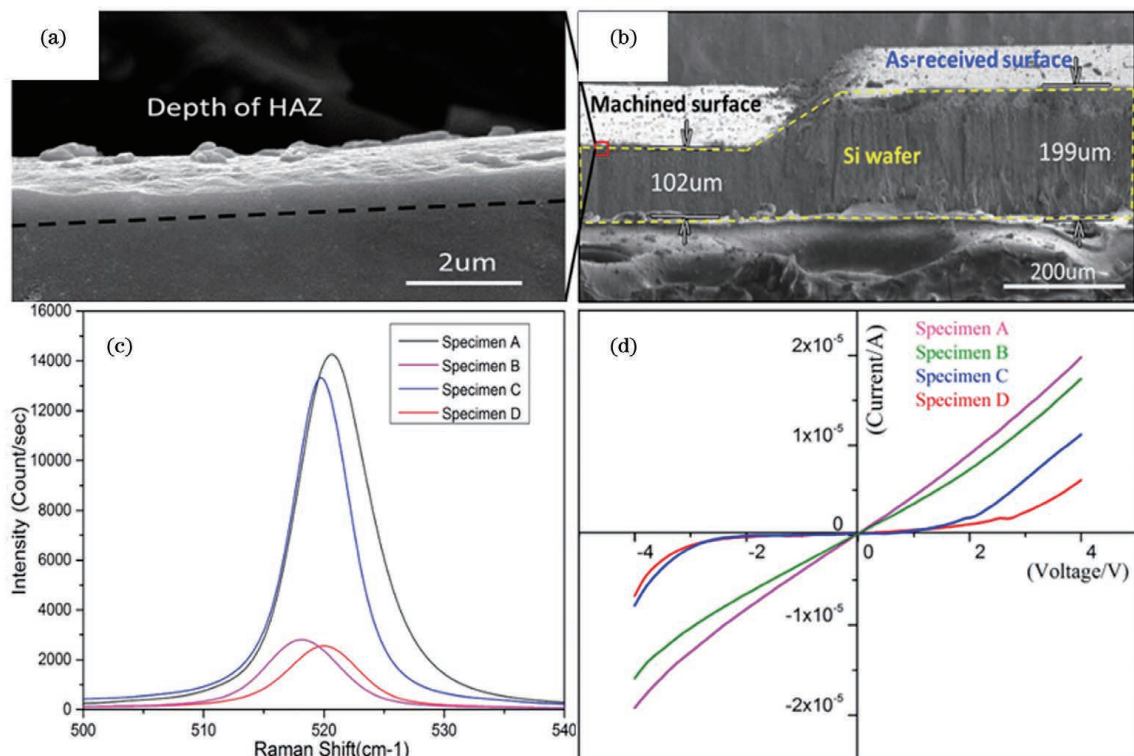


图 10 激光减薄多晶硅<sup>[87]</sup>。(a)减薄后多晶硅的热影响区;(b)减薄后多晶硅的截面形貌;(c)减薄前后多晶硅的表面拉曼光谱;(d)减薄前后多晶硅的电流-电压曲线

Fig. 10 Laser thinning polysilicon<sup>[87]</sup>. (a) Heat-affected zone of laser thinned polysilicon; (b) cross-section of laser thinned polysilicon; (c) Raman spectrums of as-received and laser thinned polysilicon surfaces; (d)  $I-V$  characteristic curves of as-received and laser-thinned polysilicon samples

#### 4.2 激光磨抛改性

晶圆研磨的目的是去除金刚石锯切在晶圆片上产

生的切割痕迹以及切割造成的表面损伤层;然而,研磨主要依靠的是磨料的滚轧作用和微切削作用,这会

晶圆片表面产生微小的去除和破坏。因此,研磨后晶圆片表面的应力层和机械损伤无法避免。

针对机械研磨后单晶硅晶圆存在表面缺陷这一问题,本团队基于激光-半导体材料相互作用的机理,利用激光精密加工技术对机械研磨后的单晶硅表面进行改性<sup>[88]</sup>。激光改性后,表面粗糙度( $R_a$ )由原始的 $0.4\ \mu\text{m}$ 降至 $0.075\ \mu\text{m}$ ,如图11(a)所示。单晶硅表面粗糙度降低主要是因为激光辐照表面形成了微熔池,微熔池的“融峰填谷”作用消除了原始表面存在的不规

则的凸起和凹坑,使得表面更加光滑,如图11(b-1)、(b-2)所示。激光抛光后,表面的物相发生了变化,如图11(c)~(e)所示。激光抛光有效减少了单晶硅表面的 $\text{SiO}_2$ 氧化层,并将表层原有的多晶硅转变成单晶硅,显著提高了单晶硅的表面质量。对激光抛光前后单晶硅的电阻率进行了测试,测得的电流-电压曲线如图11(f)所示。结果显示,激光抛光后,单晶硅电流-电压曲线的斜率相比原始单晶硅的略有降低。这表明激光抛光对单晶硅电学性能的影响较小。

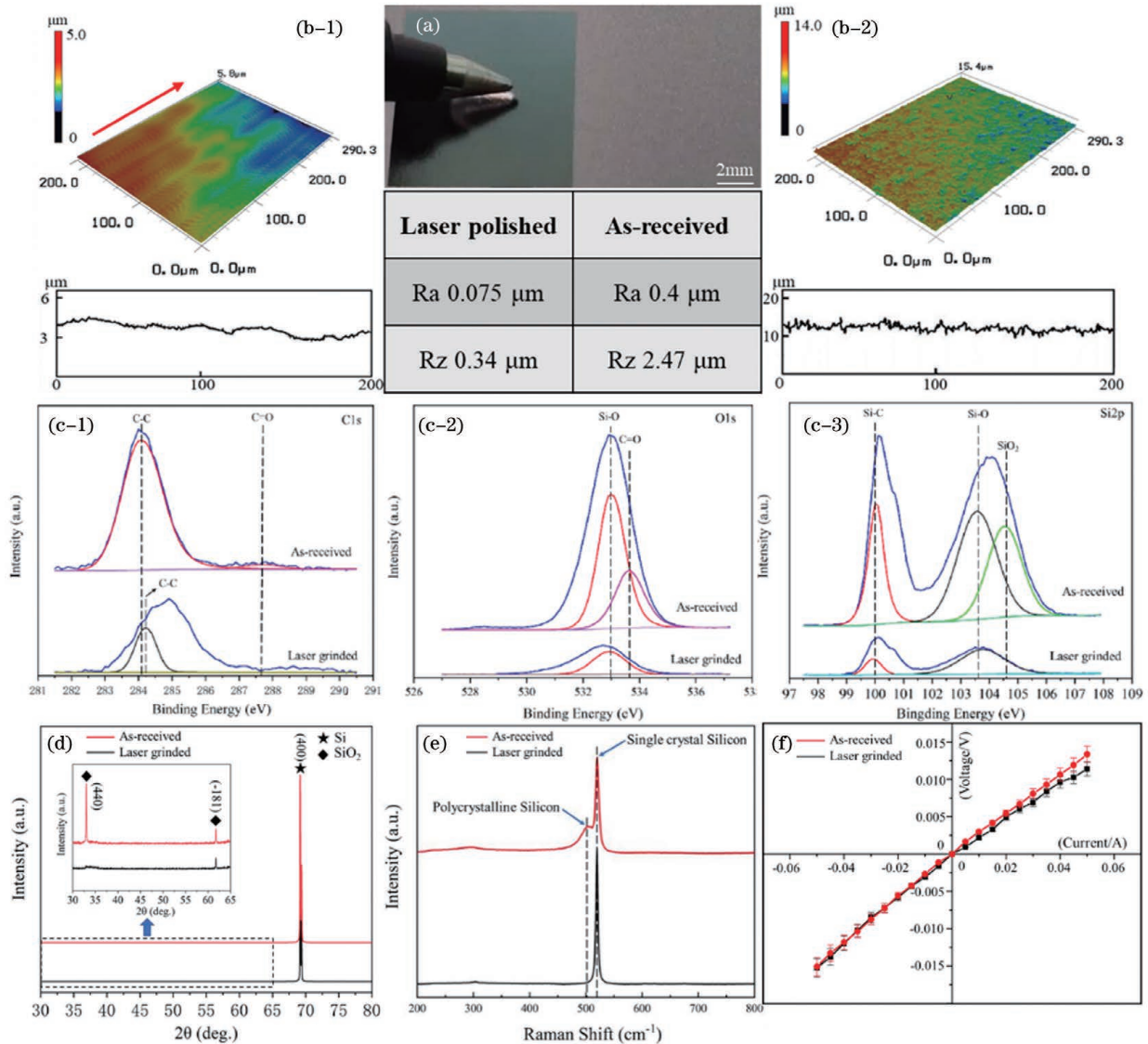


图11 激光抛光单晶硅<sup>[88]</sup>。(a)激光抛光前后单晶硅表面的宏观形貌及粗糙度;(b)激光抛光前后单晶硅表面的三维形貌图,其中(b-1)为激光抛光后的单晶硅表面,(b-2)为原始单晶硅表面;(c)激光抛光前后单晶硅表面的X射线光电子能谱图,其中(c-1)为C1s,(c-2)为O1s,(c-3)为Si2p;(d)激光抛光前后单晶硅表面的X射线衍射能谱图;(e)激光抛光前后单晶硅表面的拉曼能谱图;(f)激光抛光前后单晶硅的电流-电压曲线

Fig. 11 Laser polishing single crystal silicon<sup>[88]</sup>. (a) Macro-scale surface topography and surface roughness of as-received and laser polished single crystal silicon surfaces; (b) three-dimensional topographic images of as-received and laser polished single crystal silicon surfaces, where Fig. (b-1) is laser-polished surface and Fig. (b-2) is as-received surface; (c) X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) of as-received and laser polished single crystal silicon surfaces, where Fig. (c-1) is C1s, Fig. (c-2) is O1s, and Fig. (c-3) is Si2p; (d) X-ray diffraction (XRD) spectra of as-received and laser-polished single crystal silicon surfaces; (e) Raman spectra of as-received and laser-polished single crystal silicon surfaces; (f)  $I$ - $V$  characteristic curves of as-received and laser-polished single crystal silicon

针对晶圆切片后存在机械切割痕迹的问题,本团队提出了一种复合激光精密加工新方法<sup>[89]</sup>,该方法可以有效去除单晶硅表面的机械切割痕迹,将表面粗糙度( $R_a$ )由原始的 934 nm 降低到 251 nm,有效提高了晶圆的表面质量,如图 12(a)所示。由图 12(b)可以得

出,对比原始切割表面,激光研磨表面  $SiO_2$  层的厚度减小。由图 12(c)可以得出,激光研磨表面的残余应力由原始的拉应力转变为压应力,这有利于抑制单晶硅中裂纹的产生和扩展,提高了晶圆的制造质量,延长了其使用寿命。

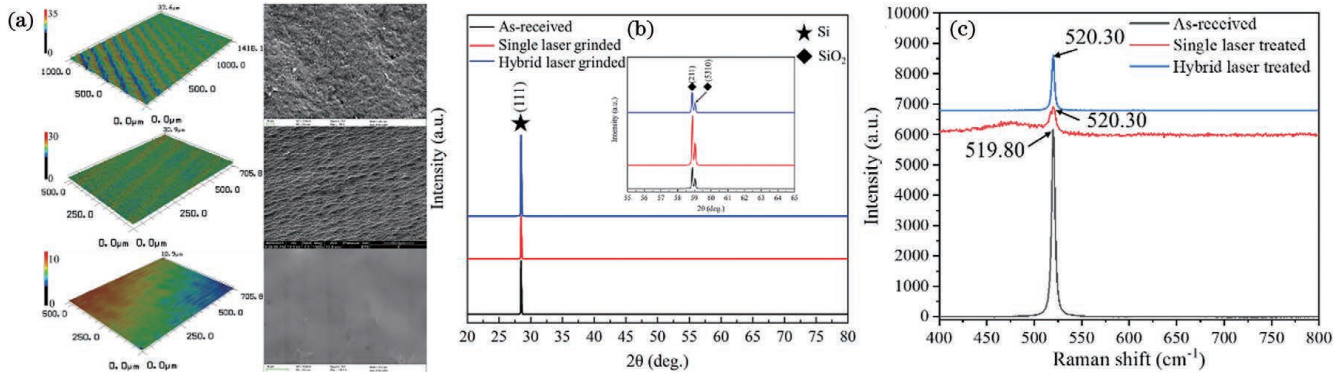


图 12 复合激光研磨单晶硅<sup>[89]</sup>。(a)激光研磨前后单晶硅的表面形貌;(b)激光研磨前后单晶硅表面的 X 射线衍射能谱图;(c)激光研磨前后单晶硅表面的拉曼光谱

Fig. 12 Hybrid laser grinding single crystal silicon<sup>[86]</sup>. (a) Surface topography of as-received and laser grinded single crystal silicon samples; (b) XRD spectra of as-received and laser grinded single crystal silicon surfaces; (c) Raman spectra of as-received and laser grinded single crystal silicon surfaces

## 5 结束语

随着激光器成本逐渐降低以及技术参数指标和稳定性不断提高,激光制造逐渐成为制造行业提升精度与效率、增强自动化与智能化水平的重点方向。空天、医疗和半导体领域是世界各国竞先发展的重点领域,相关制造水平是国家制造业综合实力的重要体现。本文面向空天、医疗以及半导体等行业的应用需求,重点介绍了北京航空航天大学激光团队在金属增材构件激光抛光、金属-复合材料高强连接、功能表面一站式制备、超快激光刀钻骨以及晶圆激光定量减薄与磨抛改性等方向的研究进展。主要结论及未来展望如下:

1) 在空天制造领域,激光抛光技术有望解决增材构件复杂曲面和内表面的高精、高效抛光难题,基于金属-复合材料的激光高强连接方法有望部分代替传统的螺栓连接和胶接,提高金属-复合材料异质接头的连接强度。此外,通过超快激光制备关键构件表面的超疏水、减阻、减反等功能微纳结构对于降低空天飞行器运行过程的能耗以及增强其安全性都具有重要意义。航空航天领域对零部件加工后在极端复杂环境下长时服役的性能稳定性和一致性等均具有严苛要求,因此,对于采用新兴的激光精密加工方法加工的零部件的长期服役性能仍需进一步深入研究及验证。

2) 在医疗器械领域,超快激光刀是骨科手术中的理想加工工具。通过对等离子体光谱、温度等信号进行实时在线监测,本团队实现了骨科手术过程中各种类型及尺寸骨孔的精密无损加工,对于提升骨科手术的自动化、智能化水平具有重要意义。在大范围临床推广应用之前,超快激光刀的钻骨效率仍有待进一步

提升。目前针对超快激光刀钻孔的研究仍主要局限于体外动物骨实验研究,缺少类体液或血液等介质环境下的模拟研究。此外,超快激光刀钻孔的体内实际愈合效果也将是未来研究的重点方向。

3) 在晶圆制造领域,激光定量减薄技术的加工精度高,对基体的损伤小,有望部分替代传统的机械减薄技术,减小晶圆减薄的亚表面损伤;通过激光磨抛改性处理可以显著降低晶圆的表面粗糙度,去除晶圆亚表面的损伤,相关技术的应用有望减少晶圆磨抛工序,提高磨抛效率,增强晶圆的力学性能。然而,激光处理后硅晶圆表面残余应力的转变及相变机制尚不明确,激光减薄及磨抛加工表面质量与性能的精确调控方法还有待进一步研究。

## 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] 彭惠民. 航天零件的精密激光加工法 [J]. 激光与光电子学进展, 1986, 23(6): 44.  
Peng H M. Precision laser machining of aerospace parts [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 1986, 23(6): 44.
- [3] 李杰, 曾进锋, 杨小君, 等. 飞秒激光微加工技术在航空发动机高压单晶涡轮叶片的应用 [J]. 电加工与模具, 2018(S1): 54-58.  
Li J, Zi J F, Yang X J, et al. Application of femtosecond laser micro-machining technology in turbine blades of domestic aeroengine [J]. Electromachining & Mould, 2018(S1): 54-58.
- [4] Qin L, Huang Y Q, Xia F, et al. 5 nm nanogap electrodes and arrays by super-resolution laser lithography [J]. Nano Letters, 2020, 20(7): 4916-4923.
- [5] 李清波. 中电科二所在碳化硅激光剥离技术方面取得进展 [N/OL]. 中国科学报, 2022-02-28(1). [2021-02-15]. <https://news.sciencenet.cn/htmlnews/2022/2/474723.shtm>.

- Li Q B. The 2nd Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation (CETC) has made progress in silicon carbide laser stripping technology[N/OL]. China Science Daily, 2022-02-28(1). [2021-02-15]. <https://news.sciencenet.cn/htmlnews/2022/2/474723.shtm>.
- [6] Strano G, Hao L, Everson R M, et al. Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(4): 589-597.
- [7] Chen L, Richter B, Zhang X Z, et al. Modification of surface characteristics and electrochemical corrosion behavior of laser powder bed fused stainless-steel 316L after laser polishing[J]. Additive Manufacturing, 2020, 32: 101013.
- [8] Gora W S, Tian Y T, Cabo A P, et al. Enhancing surface finish of additively manufactured titanium and cobalt chrome elements using laser based finishing[J]. Physics Procedia, 2016, 83: 258-263.
- [9] Yasa E, Kruth J P. Microstructural investigation of selective laser melting 316L stainless steel parts exposed to laser re-melting[J]. Procedia Engineering, 2011, 19: 389-395.
- [10] Chen L Y, Liang S X, Liu Y J, et al. Additive manufacturing of metallic lattice structures: unconstrained design, accurate fabrication, fascinated performances, and challenges[J]. Materials Science and Engineering: Reports, 2021, 146: 100648.
- [11] Li Y G, Wu Y B, Zhou L B, et al. Vibration-assisted dry polishing of fused silica using a fixed-abrasive polisher[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, 77: 93-102.
- [12] Tong X, Wu X J, Zhang F Y, et al. Mechanism and parameter optimization in grinding and polishing of M300 steel by an elastic abrasive[J]. Materials, 2019, 12(3): 340.
- [13] Wu R B, Wang M, Xu J, et al. Long low-loss-litium niobate on insulator waveguides with sub-nanometer surface roughness[J]. Nanomaterials, 2018, 8(11): 910.
- [14] Temmler A, Liu D, Preußner J, et al. Influence of laser polishing on surface roughness and microstructural properties of the remelted surface boundary layer of tool steel H11[J]. Materials & Design, 2020, 192: 108689.
- [15] Rosa B, Mognol P, Hascoët J Y. Modelling and optimization of laser polishing of additive laser manufacturing surfaces[J]. Rapid Prototyping Journal, 2016, 22(6): 956-964.
- [16] Bhaduri D, Penchev P, Batal A, et al. Laser polishing of 3D printed mesoscale components[J]. Applied Surface Science, 2017, 405: 29-46.
- [17] Hofele M, Roth A, Schanz J, et al. Laser polishing of additive manufactured aluminium parts by modulated laser power[J]. Micromachines, 2021, 12(11): 1332.
- [18] Wang W J, Yung K C, Choy H S, et al. Effects of laser polishing on surface microstructure and corrosion resistance of additive manufactured CoCr alloys[J]. Applied Surface Science, 2018, 443: 167-175.
- [19] 姚建华, 黄锦榜, 王光浩, 等. 线切割高粗糙度表面的脉冲激光抛光机制研究[J]. 中国激光, 2021, 48(14): 1402003.
- Yao J H, Huang J B, Wang G H, et al. Pulsed laser polishing mechanism on high roughness surface cut by wire electrical discharge machining[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(14): 1402003.
- [20] 廖聪豪, 周静, 沈洪. 增材制造 TC4 钛合金在激光抛光前后的电化学腐蚀性能[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0102003.
- Liao C H, Zhou J, Shen H. Electrochemical corrosion behaviors before and after laser polishing of additive manufactured TC4 titanium alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0102003.
- [21] 高航, 彭灿, 王宣平. 航空增材制造复杂结构件表面光整加工技术研究及进展[J]. 航空制造技术, 2019, 62(9): 14-22.
- Gao H, Peng C, Wang X P. Research progress on surface finishing technology of aeronautical complex structural parts manufactured by additive manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(9): 14-22.
- [22] Chen X Y, Chen X X, Li Y, et al. Research on polishing process of aluminum alloy curved surface by nanosecond laser beam coupling[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11907: 1190720.
- [23] Xu Z F, Ouyang W T, Liu Y F, et al. Effects of laser polishing on surface morphology and mechanical properties of additive manufactured TiAl components[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 65: 51-59.
- [24] Li J J, Zuo D W. Laser polishing of additive manufactured Ti6Al4V alloy: a review[J]. Optical Engineering, 2021, 60(2): 020901.
- [25] Sarkar S, Kumar C S, Nath A K. Effects of different surface modifications on the fatigue life of selective laser melted 15-5 PH stainless steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 762: 138109.
- [26] Li Y H, Zhang Z, Guan Y C. Thermodynamics analysis and rapid solidification of laser polished Inconel 718 by selective laser melting[J]. Applied Surface Science, 2020, 511: 145423.
- [27] Li Y H, Cheng X, Guan Y C. Ultrafine microstructure development in laser polishing of selective laser melted Ti alloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 83: 1-6.
- [28] Jiao J K, Jia S H, Xu Z F, et al. Laser direct joining of CFRTP and aluminium alloy with a hybrid surface pre-treating method[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 173: 106911.
- [29] Tan X H, Zhang J, Shan J G, et al. Characteristics and formation mechanism of porosities in CFRP during laser joining of CFRP and steel[J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 70: 35-43.
- [30] Zhang Z, Tan X H, Zhang J, et al. Suppression of shrinkage porosity in laser-joining of CFRP and steel using a laser surface modification process "Surfi-Sculpt®"[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2018, 85: 184-192.
- [31] Wang H P, Chen Y, Guo Z Y, et al. Porosity elimination in modified direct laser joining of Ti6Al4V and thermoplastics composites[J]. Applied Sciences, 2019, 9(3): 411.
- [32] Wang H P, Yan P, Guan Y C. Robust heterojunctions of metallic alloy and carbon fiber-reinforced composite induced by laser processing[J]. Materials, 2021, 14(23): 7469.
- [33] 杨辉, 张彬, 张利鹏. 微结构功能表面的应用及制造[J]. 航空精密制造技术, 2015, 51(5): 1-6, 19.
- Yang H, Zhang B, Zhang L P. Application and manufacture of microstructure function surface[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2015, 51(5): 1-6, 19.
- [34] Qin Y. Micromanufacturing engineering and technology[M]. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2010.
- [35] 汪超炜. 多材料飞秒激光微加工技术及其应用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019: 20-28.
- Wang C W. Research on femtosecond laser microfabrication for various materials and their applications[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019: 20-28.
- [36] Zhang C J, Bai X, Zhang J Z, et al. Designing "supermetaphobic" surfaces that greatly repel liquid metal by femtosecond laser processing: does the surface chemistry or microstructure play a crucial role?[J]. Advanced Materials Interfaces, 2020, 7(6): 1901931.
- [37] Bai S, Serien D, Hu A M, et al. 3D microfluidic surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS) chips fabricated by all-femtosecond-laser-processing for real-time sensing of toxic substances[J]. Advanced Functional Materials, 2018, 28(23): 1706262.
- [38] 陈燕青, 高炳攀, 林炎章, 等. 飞秒激光微加工制备金属线栅太赫兹偏振片[J]. 中国激光, 2018, 45(8): 0802005.
- Chen Y Q, Gao B P, Lin Y Z, et al. Metal wire grid terahertz polarizer fabricated by femtosecond laser micro-machining[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(8): 0802005.

- [39] 沈一洲. Ti6Al4V超疏水表面的构建及其防/除冰机理研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.  
Shen Y Z. Preparation and anti/de-icing mechanism of the superhydrophobic surface on Ti6Al4V[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [40] Jin M M, Shen Y Z, Luo X Y, et al. A combination structure of microblock and nanohair fabricated by chemical etching for excellent water repellency and icephobicity[J]. Applied Surface Science, 2018, 455: 883-890.
- [41] 罗晓, 刘伟建, 张红军, 等. 超快激光制备金属表面可控微纳二级结构及其功能化[J]. 中国激光, 2021, 48(15): 1502002.  
Luo X, Liu W J, Zhang H J, et al. Ultrafast laser fabricating of controllable micro-nano dual-scale metallic surface structures and their functionalization[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(15): 1502002.
- [42] Alamri S, Vercillo V, Aguilar-Morales A I, et al. Self-limited ice formation and efficient de-icing on superhydrophobic microstructured airfoils through direct laser interference patterning[J]. Advanced Materials Interfaces, 2020, 7(22): 2001231.
- [43] Milles S, Soldera M, Voisiat B, et al. Fabrication of superhydrophobic and ice-repellent surfaces on pure aluminium using single and multiscaled periodic textures[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 13944.
- [44] Gaddam A, Sharma H, Karkantonis T, et al. Anti-icing properties of femtosecond laser-induced nano and multiscale topographies[J]. Applied Surface Science, 2021, 552: 149443.
- [45] Wang L Z, Tian Z, Jiang G C, et al. Spontaneous dewetting transitions of droplets during icing & melting cycle[J]. Nature Communications, 2022, 13: 378.
- [46] Pan R, Zhang H J, Zhong M L. Triple-scale superhydrophobic surface with excellent anti-icing and icephobic performance via ultrafast laser hybrid fabrication[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(1): 1743-1753.
- [47] Zhang J L, Qing Y, Cheng Y, et al. Slippery liquid infused porous surface on metal material with excellent ice resistance fabricated by femtosecond Bessel laser[J]. Advanced Engineering Materials, 2022: 2101738.
- [48] Ge C F, Yuan G, Guo C L, et al. Femtosecond laser fabrication of square pillars integrated Siberian-Cocklebur-like microstructures surface for anti-icing[J]. Materials & Design, 2021, 204: 109689.
- [49] Liu Y, Li X L, Jin J F, et al. Anti-icing property of bio-inspired micro-structure superhydrophobic surfaces and heat transfer model[J]. Applied Surface Science, 2017, 400: 498-505.
- [50] 赵美云, 杨帆, 张小龙, 等. 基于光刻法的复合织构硅橡胶表面的抗冰性能[J]. 中国激光, 2022, 49(10): 1002603.  
Zhao M Y, Yang F, Zhang X L, et al. Anti-icing performance of complex texture silicone rubber surface based on laser engraving[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(10): 1002603.
- [51] Wang H P, He M J, Liu H, et al. One-step fabrication of robust superhydrophobic steel surfaces with mechanical durability, thermal stability, and anti-icing function[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(28): 25586-25594.
- [52] 李珣. 微纳结构飞秒激光制备技术及其抗反射特性研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2021.  
Li X. Research on femtosecond laser fabrication of micro/nano structure and its anti-reflection properties[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [53] Vorobyev A Y, Guo C L. Multifunctional surfaces produced by femtosecond laser pulses[J]. Journal of Applied Physics, 2015, 117(3): 033103.
- [54] Samanta A, Wang Q H, Singh G, et al. Nanosecond pulsed laser processing turns engineering metal alloys antireflective and superwicking[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 54: 28-37.
- [55] Wöbbecking K, Li M J, Hübner E G, et al. Conical microstructuring of titanium by reactive gas assisted laser texturing[J]. RSC Advances, 2019, 9(64): 37598-37607.
- [56] Zheng B X, Wang W J, Jiang G D, et al. Fabrication of broadband antireflective black metal surfaces with ultra-light-trapping structures by picosecond laser texturing and chemical fluorination[J]. Applied Physics B, 2016, 122(6): 180.
- [57] Fan P X, Bai B F, Zhong M L, et al. General strategy toward dual-scale-controlled metallic micro-nano hybrid structures with ultralow reflectance[J]. ACS Nano, 2017, 11(7): 7401-7408.
- [58] Fan P X, Bai B F, Long J Y, et al. Broadband high-performance infrared antireflection nanowires facily grown on ultrafast laser structured Cu surface[J]. Nano Letters, 2015, 15(9): 5988-5994.
- [59] Fan P X, Wu H, Zhong M L, et al. Large-scale cauliflower-shaped hierarchical copper nanostructures for efficient photothermal conversion[J]. Nanoscale, 2016, 8(30): 14617-14624.
- [60] Yang Y, Yang J J, Liang C Y, et al. Ultra-broadband enhanced absorption of metal surfaces structured by femtosecond laser pulses[J]. Optics Express, 2008, 16(15): 11259-11265.
- [61] Wang H P, Guan Y C, Zheng H Y, et al. Controllable fabrication of metallic micro/nano hybrid structuring surface for antireflection by picosecond laser direct writing[J]. Applied Surface Science, 2019, 471: 347-354.
- [62] Denkena B, Kästner J, Wang B. Advanced microstructures and its production through cutting and grinding[J]. CIRP Annals, 2010, 59(1): 67-72.
- [63] Aljehedab F, Zhang W B, Haugen H K, et al. Influence of environmental conditions in bovine bone ablation by ultrafast laser[J]. Journal of Biophotonics, 2019, 12(6): e201800293.
- [64] An R, Khadar G W, Wilk E, et al. Ultrafast laser ablation and machining large-size structures on porcine bone[J]. Journal of Biomedical Optics, 2013, 18(7): 070504.
- [65] Charlton A, Dickinson M R, King T A, et al. Erbium-YAG and holmium-YAG laser ablation of bone[J]. Lasers in Medical Science, 1990, 5(4): 365-373.
- [66] Kang H W, Oh J, Welch A J. Investigations on laser hard tissue ablation under various environments[J]. Physics in Medicine and Biology, 2008, 53(12): 3381-3390.
- [67] 张纪庄, 张学学. 激光蚀除生物组织的影响因素[J]. 中国激光, 2007, 34(2): 300-304.  
Zhang J Z, Zhang X X. Effect factors of laser tissue ablation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(2): 300-304.
- [68] Zhang X Z, Xie S S, Ye Q, et al. Influence of scanning velocity on bovine shank bone ablation with pulsed CO<sub>2</sub> laser[J]. Chinese Optics Letters, 2009, 7(2): 138-141.
- [69] Zhang X Z, Zhan Z L, Liu H S, et al. Influence of water layer thickness on hard tissue ablation with pulsed CO<sub>2</sub> laser[J]. Journal of Biomedical Optics, 2012, 17(3): 038003.
- [70] Wieger V, Zoppel S, Wintner E. Ultrashort pulse laser osteotomy[J]. Laser Physics, 2007, 17(4): 438-442.
- [71] Abbasi H, Rauter G, Guzman R, et al. Laser-induced breakdown spectroscopy as a potential tool for autcarbonization detection in laserosteotomy[J]. Journal of Biomedical Optics, 2018, 23(7): 071206.
- [72] Zhang J R, Guan K, Zhang Z, et al. *In vitro* evaluation of ultrafast laser drilling large-size holes on sheepshank bone[J]. Optics Express, 2020, 28(17): 25528-25544.
- [73] Benetti C, Santos M O, Rabelo J S, et al. Detection of chemical changes in bone after irradiation with Er, Cr:YSGG laser[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7883: 78834P.
- [74] Halcrow S E, Rooney J, Beavan N, et al. Assessing Raman spectroscopy as a prescreening tool for the selection of archaeological bone for stable isotopic analysis[J]. PLoS One, 2014, 9(7): e98462.
- [75] Gok K, Buluc L, Muezzinoglu U S, et al. Development of a new driller system to prevent the osteonecrosis in orthopedic surgery applications[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical

- Sciences and Engineering, 2015, 37(2): 549-558.
- [76] Freeman S A, Grinstein S. Phagocytosis: how macrophages tune their non-professional counterparts [J]. *Current Biology*, 2016, 26(24): R1279-R1282.
- [77] Song Y, Hu G Q, Zhang Z, et al. Real-time spectral response guided smart femtosecond laser bone drilling [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 128: 106017.
- [78] Kim B M, Feit M D, Rubenchik A M, et al. Optical feedback signal for ultrashort laser pulse ablation of tissue [J]. *Applied Surface Science*, 1998, 127/128/129: 857-862.
- [79] Choo K L, Ogawa Y, Kanbargi G, et al. Micromachining of silicon by short-pulse laser ablation in air and under water [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, 372(1/2): 145-162.
- [80] Conde J C, González P, Lusquiños F, et al. Analysis of the formation and evolution of oriented microstructures on laser ablated silicon [J]. *Applied Physics A*, 2009, 95(2): 465-471.
- [81] Gloor S, Lüthy W, Weber H P, et al. UV laser polishing of thick diamond films for IR windows [J]. *Applied Surface Science*, 1999, 138/139: 135-139.
- [82] Yan J W, Asami T, Kuriyagawa T. Response of machining-damaged single-crystalline silicon wafers to nanosecond pulsed laser irradiation [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2007, 22(4): 392-395.
- [83] Yan J W, Muto S, Kuriyagawa T. Processing grinding-damaged silicon wafers by high-frequency nano-second laser irradiation [J]. *Advanced Materials Research*, 2009, 76/77/78: 451-456.
- [84] Yan J W, Sakai S, Isogai H, et al. Recovery of microstructure and surface topography of grinding-damaged silicon wafers by nanosecond-pulsed laser irradiation [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2009, 24(10): 105018.
- [85] Niitsu K, Yan J W. Effects of deep subsurface damages on surface nanostructure formation in laser recovery of grinded single-crystal silicon wafers [J]. *Precision Engineering*, 2020, 62: 213-222.
- [86] 任英明, 张志宇. 双步激光辐射提升纳秒激光抛光单晶硅的表面 [J]. *光学学报*, 2022, 42(7): 0714004.  
Ren Y M, Zhang Z Y. Surface of nanosecond laser polished single-crystal silicon improved by two-step laser irradiation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(7): 0714004.
- [87] Fang Z H, Chen L F, Guan Y C, et al. Picosecond laser micromachining of silicon wafer: characterizations and electrical properties [J]. *Surface Review and Letters*, 2019, 27(5): 1950142.
- [88] Li X X, Wang Y M, Guan Y C. Laser grinding of single-crystal silicon wafer for surface finishing and electrical properties [J]. *Micromachines*, 2021, 12(3): 262.
- [89] Li X X, Cui Z Q, Guan Y C. Surface modification of single-crystal silicon by hybrid laser treatment [J]. *Proceedings of SPIE*, 2022, 12154: 1215410.

## Laser Precision Processing Lightens Intelligent Manufacturing

Li Xinxin<sup>1</sup>, Li Xing<sup>1</sup>, Wang Yimeng<sup>1</sup>, Guan Yingchun<sup>1,2,3\*</sup>, Wang Huaming<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100083, China;

<sup>2</sup> National Engineering Laboratory of Additive Manufacturing for Large Metallic Components, Beihang University, Beijing 100083, China;

<sup>3</sup> International Research Institute for Multidisciplinary Science, Beihang University, Beijing 100083, China

### Abstract

**Significance** Laser precision processing exhibits an accuracy that ranges from microns to tens of microns and provides advantages such as high processing accuracy, application to a wide range of materials, and minor thermal damage. In 1986, Dr. Mourou and Strickland used microwave amplification technology to amplify and compress laser-chirped pulses and achieved results better than those of traditional methods such as *Q*-switching and mode-locking, leading to the rapid development of laser precision processing technology.

Because of the increasing demand for lightweight components and high-value-added products in critical industries such as aerospace, automobile, electronics, and medical devices, laser precision processing technology has become essential in precise machining, surface finishing, high-performance joining, and functional surfaces for drag reduction, stealth, and anti-icing.

In this paper, we summarize our current work on laser precision processing in recent years. The work includes laser precision polishing, metal-composite high-strength joining, one-stop fabrication of functional surfaces, ultrafast laser drilling on bones, and ultrafast laser-assisted silicon wafer manufacturing.

**Progress** The laser precision polishing technique offers an adaptable, accurate, and environmentally friendly solution for enhancing the surface quality of additive-manufactured metallic components. The technique can considerably reduce the surface roughness and average grain size of the original laser-additive-manufactured metallic alloys. Moreover, porosity can be reduced in the laser-polished layer. Laser precision polishing can substantially improve mechanical properties, such as microhardness, residual stress, tensile strength, and fatigue performance, and reduce corrosion resistance. Magnetic-field-assisted polishing methods are also proposed to improve the uniformity in surface quality and performance.

The high-strength laser-joining method is proposed to produce hybrid joints of titanium alloys and carbon-fiber-reinforced polymers (CFRPs). Before the laser-joining process is implemented, a surface-texturing treatment is employed on the metal surface to improve joint strength through the formation of interlock structures between the titanium alloy and



CFRP. This method effectively eliminates micropores in the joints, thereby increasing the fracture strength of the joints to up to 60 MPa.

The one-stop fabrication method for functional micro/nano surfaces is proposed to achieve excellent anti-icing properties on laser-fabricated hierarchical structures consisting of micropillars and nanoparticles, with water droplets retaining their liquid state for over 8 h at  $-8.5 \pm 0.5$  °C. Distinct micro/nano hybrid structures, including regular laser-induced periodic surface structures (LIPSSs), semi-continuous nano-bumps, and nanoscale-to-microscale protrusions, are induced on a tungsten-carbide-cobalt (WC-Co) alloy by applying the laser precision machining technology, thus significantly reducing the optical reflectance at the laser-treated surfaces in the visible wavelength range.

We demonstrate the feasibility of ultrafast laser drilling *in vitro* large-size holes in an animal bone with high efficiency and minimal collateral damage. The laser precision machining technology is utilized to drill millimeter-scale holes in the bone under different cooling conditions, including gas- and water-assisted processes. A 4 mm hole with a smooth and clean surface is successfully drilled, and the highest removal rate of  $0.99 \text{ mm}^3/\text{s}$  is achieved. The bone and bone marrow are distinguished by using a real-time monitoring system based on real-time spectral responses during laser drilling.

We employ laser precision processing for wafer thinning and grinding. The wafer thickness is reduced from 199 to  $102 \mu\text{m}$ , and compressive stress is achieved at the laser-machined surface with the depth of the heat-affected zone (HAZ) being less than  $1 \mu\text{m}$ . Laser grinding of silicon wafer effectively eliminates damages such as micro-cracks, micropores, and saw-marks on the surfaces and reduces surface roughness. Laser thinning and grinding technologies have limited influence on the electrical properties of the silicon wafer.

**Conclusions and Prospects** In this paper, we review the recent achievements in the research on laser precision technologies conducted by our group. We show that laser precision processing is a promising method for practical applications in the aerospace industry, medical devices, and integrated circuits, mainly because of its multiple functions, high flexibility, high precision, and applicability to various materials. Although industrial mass production may still be challenging, emerging technologies, including online monitoring systems, ultra-precision operation platforms, and high-power laser sources, have potential to improve the quality, efficiency, and reliability of laser precision processing.

**Key words** laser technique; laser precision processing; laser polishing; dissimilar materials joining; functional micro/nano microstructures; bone drilling; intelligent manufacturing