

DOI: 10.3901/JME.2023.21.052

单晶硅的激光抛光表面形貌演化*

李 涛^{1,2} 黄惟琦^{1,2} 龙 归^{1,2} 杨思铄^{1,2} 张建国^{1,2}
肖峻峰^{1,2} 许剑锋^{1,2}

(1. 华中科技大学机械科学与工程学院 武汉 430074;
2. 华中科技大学智能制造装备与技术全国重点实验室 武汉 430074)

摘要: 激光抛光是一种非接触式等材超精密抛光方法,在单晶硅的激光抛光实验中观测到的“山”字形表面形貌演化规律无法用传统的表面张力和马兰戈尼效应主导的熔池流动理论解释,研究发现塑性变形在单晶硅表面形貌演化中扮演关键角色。通过对残余应力的测量以及截面 TEM 的观测,发现塑性变形出现在材料熔化之前。综合考虑熔化前的塑性变形及熔化后的表面张力和马兰戈尼效应,对单点激光抛光后中心凸起及边缘堆积的“山”字形表面形貌的演化进行了探究。以此为前提,对不同激光光斑扫描间距下受塑性变形影响的表面形貌的演变进行了分析。当扫描间距小于 2.5 μm 时,塑性变形产生的中心凸起可以被后续激光脉冲所抛光,单晶硅表面粗糙度从 4.04 nm 降低至 0.34 nm。经过研究,总结出激光抛光中塑性变形与毛细流动共同作用下的表面形貌演化规律与机理,为激光抛光的参数选择提供理论指导。

关键词: 激光抛光; 塑性变形; 形貌演变; 超精密加工

中图分类号: TG156

Surface Topography Evolution of Single Crystal Silicon in Laser Polishing

LI Tao^{1,2} HUANG Weiqi^{1,2} LONG Gui^{1,2} YANG Sishuo^{1,2} ZHANG Jianguo^{1,2}
XIAO Junfeng^{1,2} XU Jianfeng^{1,2}

(1. School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and
Technology, Wuhan 430074;

2. State Key Laboratory of Intelligent Manufacturing Equipment and Technology, Huazhong University
of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract: Laser polishing is a non-contact ultra-precision polishing method for equal materials. The evolution of the “trident” surface morphology observed in experiments cannot be explained by the traditional theory of surface tension and Marangoni effect dominant molten pool flow. It is found that the plastic deformation plays a critical role in surface topography evolution. The residual stress is measured by XRD and the section is observed by TEM, which shows that the plastic deformation occurs before the material melts in laser polishing. Considering plastic deformation before melting, and surface tension, Marangoni effect after melting, the “trident” surface topography of the center bulge and the edge piling up after single point laser polishing is investigated. Based on this premise, the surface morphologies affected by plastic deformation are analyzed at different scanning intervals. When the scanning intervals are less than 2.5 μm , the central bulge caused by plastic deformation can be polished by subsequent laser pulses, and the surface roughness of monocrystal silicon decreases from 4.04 nm to 0.34 nm. The evolution law and mechanism of surface topography under the plastic deformation and capillary flow in laser polishing are summarized, which provides theoretical guidance for parameter selection of laser polishing.

Key words: laser polishing; plastic deformation; topography evolution; ultra-precision machining

* 国家自然科学基金(51705172, 51905194, 52225506, 52188102)和中央高校基本科研业务费专项资金(2020kfyXJJS085)资助项目。20230120 收到初稿, 20230629 收到修改稿

0 前言

随着航天科技在星空探测和国防安全等方面需求的发展,对光学系统的探测距离、弱光电特征探测能力、复杂环境适应能力和抗干扰能力提出了更高的要求,越来越多的单晶硅等光学元件需要满足其超高精度和极低损伤的超精密制造要求,以保障上述精密光电系统在深空探测精确定位、导弹在轨姿态稳定控制、探测系统较高灵敏度等使役性能需求^[1-3]。单晶硅是典型的硬脆难加工材料,通常使用超精密磨削加工出光学元件的面形^[3-8],再通过抛光进一步降低表面粗糙度。近年来发展的场辅助超精密加工工艺如激光辅助加工与超声振动加工虽然可以实现低损伤的超精密成形^[6-11],但是仍需进一步抛光以保证表面粗糙度。传统的抛光方法如离子束抛光、射流抛光、磁流变抛光和气囊抛光等^[12-17]方法,可以将表面抛光至亚纳米级粗糙度。但存在加工效率低,设备复杂等缺点,还可能会引入新的亚表面损伤。激光抛光利用激光熔化材料表面,在表面张力的作用下,材料变得更加平坦,能够实现高效率,无材料去除的非接触式加工^[18]。此外,激光抛光加工过程中的熔化和再结晶过程,能够修复前道工序造成的亚表面损伤,并且不会引入新的亚表面损伤^[19-20]。与传统抛光方法相比,激光抛光对亚表面损伤的修复功能是其独有的优势。

近年来,国内外学者对激光抛光进行了大量的理论和试验研究。ZHANG 等^[21]通过数值模拟发现激光抛光 Ti6Al4V 时,在熔池的初始阶段以表面张力为主,随着时间的推移,马兰戈尼效应逐渐占据主导地位。HE 等^[22]通过数值模型分别对表面张力,马兰戈尼效应,光压和重力在激光抛光熔石英过程中的作用进行了研究,发现抛光过程以表面张力为主导,光压和重力单独作用时,无法实现对表面的抛光。由于熔石英材料表面张力系数对温度的导数为负,在马兰戈尼效应的驱动下,材料从熔池中心向边缘流动,中心区域的凸起可以被消除,但熔池边缘的凸起会变得更高度。YAN 等^[19-20, 23-24]通过试验发现当激光能量密度为 1.58 J/cm^2 时,激光抛光后的表面粗糙度可达 1.6 nm ,与化学机械抛光后的表面质量相近。熔化后的材料能够在无损伤的单晶硅基体上重结晶,修复磨削造成的亚表面损伤。JIA 等^[25]研究了单晶硅晶圆在毫秒激光辐照时的热应力损伤,发现当激光辐照材料时,出现由塑性变形导致的第一次应力损伤;在激光停止照射单晶硅后,

激光烧蚀形成的孔洞中,熔融态的硅造成第二次应力损伤,而且造成第一次应力损伤的塑性变形出现的时间要早于材料熔化的时间。目前对激光抛光的研究主要集中于金属与二氧化硅,但是面向单晶硅激光抛光的研究尚不完善。

大多数学者在研究时,仅对熔化阶段表面形貌的演变进行了研究,假定材料熔化时的表面形貌与初始表面形貌相同。而本文研究发现,由热应力引起的塑性变形导致材料表面形貌在熔化前已经发生了改变,与初始表面形貌有所区别。而且塑性变形在单晶硅表面形貌演化中扮演关键角色,综合考虑熔化前的塑性变形及熔化后的表面张力和马兰戈尼效应,阐明了单点激光抛光后中心凸起及边缘堆积的“山”字形表面形貌的演化机理。着重分析了在塑性变形的影响下,抛光后表面形貌在不同激光光斑扫描间距下的演变规律。

1 试验原理及方案

试验采用波长为 532 nm 的纳秒激光器(Cypress2-532-25A),光斑直径为 $20 \mu\text{m}$,重复频率为 200 kHz ,脉宽为 30.4 ns 。

初始表面的光滑程度会直接影响激光抛光时表面张力的大小,当表面为理想光滑平面时,表面张力为 0,当激光抛光相对粗糙表面时,塑性变形和马兰戈尼效应产生的特有结构不易观察。因此采用两个不同表面粗糙度的样品进行试验,样品信息如表 1 所示。

表 1 试验样品信息表

样品序号	1	2
材料	单晶硅	单晶硅
晶向	(1 0 0)	(1 0 0)
加工方法	单点金刚石车削	化学机械抛光
表面粗糙度/nm	< 5	< 0.5

根据前期探索性试验发现,当输入激光能量较低时,材料尚未熔化,但在热应力作用下已经导致材料出现塑性变形。故本次激光抛光实验参数设定为:激光功率 3.56 W ,扫描速度 500 mm/s ,离焦量 1.6 mm 。试验结果表明,在光滑的样品 2 表面,几乎观察不到加工痕迹,因此采用表面相对粗糙的样品 1 进行试验。塑性变形之后,材料表面会有残余应力。此外,单晶硅塑性变形的主要形式是滑移,在激光加工后的截面上,会有位错产生^[26]。在实验之后,使用 X 射线衍射仪(X-ray Diffraction, Philips X'Pert MRD)对残余应力进行测量;使用透射电子显

显微镜(Talos F200E)对截面进行观察;使用白光干涉仪(Zygo Newview9000)对表面形貌进行检测。

为了避免初始表面形貌对塑性变形和马兰戈尼效应产生的特有结构的干扰,采用表面相对光滑的样品 2 来研究激光抛光过程中的表面形貌演化,同时也采用样品 1 进行对比试验。在激光重复频率为 200 kHz,功率为 9.41 W,离焦量为 1.35 mm 的参数下进行试验。

激光抛光过程中,材料在单个脉冲内完成了熔化和再结晶。如图 1 所示,下一个激光脉冲抛光时,上一个脉冲形成的表面形貌,会有部分熔化,因此激光抛光后表面形貌是多脉冲共同作用的结果。通过改变激光扫描速度,使多个脉冲以一定的扫描间距相互叠加。随着扫描间距的减小,塑性变形产生的中心凸起逐渐被多脉冲光斑抛光,但是受多脉冲残余热量积累的影响,马兰戈尼效应导致的边缘凸起逐渐增高。为了探究塑性变形对多脉冲作用下表面形貌的影响,试验过程中,激光的扫描速度设定为 10 000 mm/s, 5 000 mm/s, 4 000 mm/s, 3 000 mm/s, 2 000 mm/s, 1 000 mm/s, 500 mm/s 和 400 mm/s,即扫描间距分别为 50 μm , 25 μm , 20 μm , 15 μm , 10 μm , 5 μm , 2.5 μm 和 2 μm 。

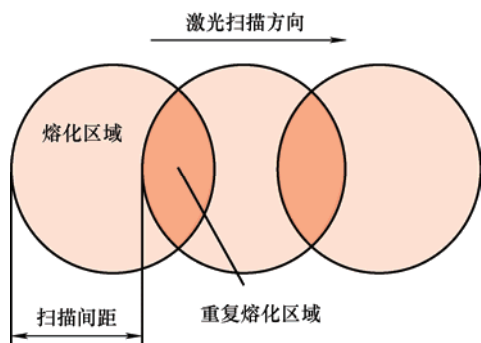


图 1 多脉冲示意图

2 结果与讨论

根据文献,在毫秒激光辐照单晶硅 0.7 ms 后,中心区域的热应力可达 650 MPa^[25],相比而言,本文中纳秒激光的作用时间大幅缩短,材料局部温度被加热至单晶硅熔点(1 683 K),仅需要几十纳秒,必然会产生更大的热应力。而且随着温度的升高,单晶硅的屈服极限迅速下降^[27],当温度从 300 K 升高到 890 K 时,单晶硅的屈服强度从 124 GPa 下降至 554 MPa,材料不可避免地会出现塑性变形。激光抛光如图 2a 所示的表面时,激光中心区域的温度最高,热影响区边缘温度接近室温,发生塑性变形时,中心的材料被向上挤出,形成了凸起结构,如图 2b 所示,此时的温度仍低于单晶硅熔点。而大多数学者在研究时,忽略了塑性变形的影响,假定图 2d 所示熔化前的表面形貌与初始表面形貌相同,这会在一定程度上影响试验的结果。

随着温度的升高,材料发生熔化,表面张力和马兰戈尼效应开始影响表面形貌,在表面张力的作用下,塑性变形产生的凸起在一定程度上被抛光,凸起的高度有所降低;马兰戈尼效应使材料从中心向熔池的边缘流动^[22, 28],同时降低中心凸起的高度,但是材料会在熔池的边缘产生堆积;而在熔池中心,塑性变形导致的中心凸起并未被完全抛光,因此形成了如图 2c 所示的表面形貌。如果忽略塑性变形的影响,只有表面张力和马兰戈尼效应影响表面形貌演变,对于图 2d 所示的光滑平面,材料熔化后表面张力很小,马兰戈尼效应使材料从熔池中心向熔池边缘流动,形成与图 2c 相同的边缘堆积;在熔池的中心区域,则会出现材料流失导致的凹坑,如图 2e 所示。

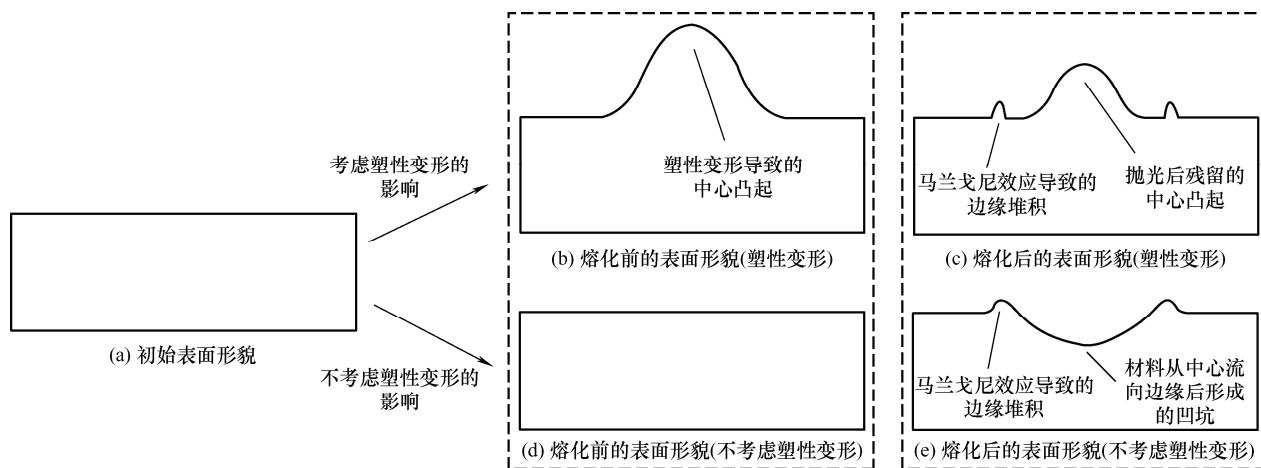


图 2 塑性变形对于表面形貌的影响示意图

2.1 塑性变形成因

为了便于观察加工痕迹以及根据表面车刀纹判断材料是否熔化, 使用样品 1 进行试验。XRD 检测的样品表面形貌如图 3 所示, 图 3a 为光学显微镜拍摄的激光扫描后的加工痕迹, 图 3b 为白光干涉仪测量的表面形貌。低功率的激光并不足以使单晶硅发生熔化, 因此激光扫描之后, 硅片表面仍有清晰的车刀纹。如图 3b 中截面轮廓和三维形貌所示, 扫描区域相对于未扫描区域出现了凸起。在未扫描区域和扫描区域各选择一个点, 使用 XRD 测量表面的残余应力, 应力分量如表 2 所示。

在超精密车削过程中, 刀具挤压摩擦材料, 单晶硅表层发生塑性变形, 切削完成后, 残留下压应力^[29], 因此点 1 处测量得到的应力为压应力。激光扫描后的区域(点 2), 应力状态与初始应力相比, 压应力显著减小。当高斯分布的激光加热表面时, 从激光中心到光斑边缘, 温度逐渐降低。温度越高, 材料膨胀越多, 位于激光中心的材料膨胀过程受到边缘材料的约束, 产生压应力。随着温度的升高, 单晶硅的屈服强度也逐渐降低, 当热应力超过屈服强度时, 中心区域的单晶硅在边缘材料的挤压下产生了向上凸起的塑性变形。

表 2 残余应力测量结果

应力分量	点 1	点 2
σ_{11}/MPa	-270	-116
σ_{12}/MPa	-215	24
σ_{22}/MPa	-128	-77

当激光停止加热后, 材料温度逐渐降低, 材料膨胀减小, 压应力逐渐消失。但是塑性变形无法恢复, 中心区域开始受到边缘材料的拉伸, 在表面会残留拉应力^[30]。超精密车削后的样品 1 初始表面有较大的残余压应力, 塑性变形产生的残余拉应力只能抵消一部分残余压应力, 如点 2 的应力状态所示。

图 3 中, 点 1 和点 2 处的截面如图 4 和图 5 所示。图 4a 为激光未扫描区域(点 1)的截面, 图 4b 为经过傅里叶变换, 选取两个衍射斑点后, 经过反傅里叶变换得到的截面图, 图中蓝色区域存在畸变和位错, 主要为刃形位错, 如图 4c 所示。图 5a 为激光扫描后(点 2)的截面, 图 5b 为经过傅里叶变换, 选取两个衍射斑点进行反傅里叶变换得到截面图。激光扫描后刃形位错和畸变有所减少, 但会出现失配位错, 如图 5c 所示, 这与 WANG 等^[26]对单晶硅塑性变形过程的研究结果是一致的。

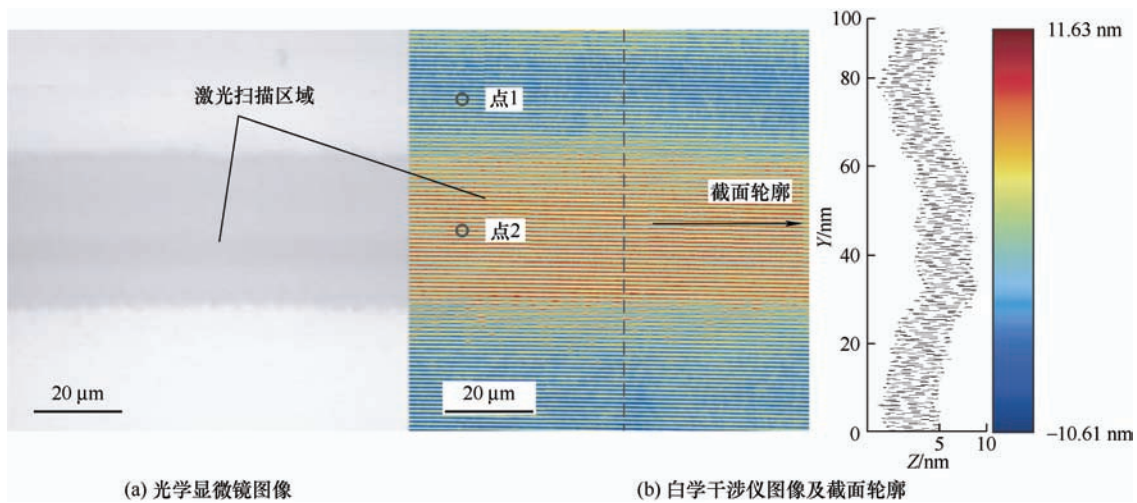


图 3 XRD 和 TEM 检测样品的表面形貌

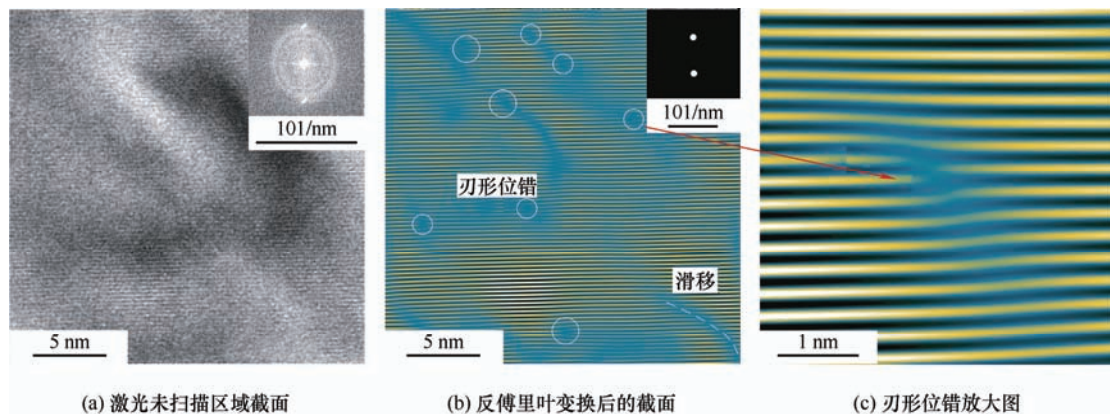


图 4 激光未扫描区域截面 TEM

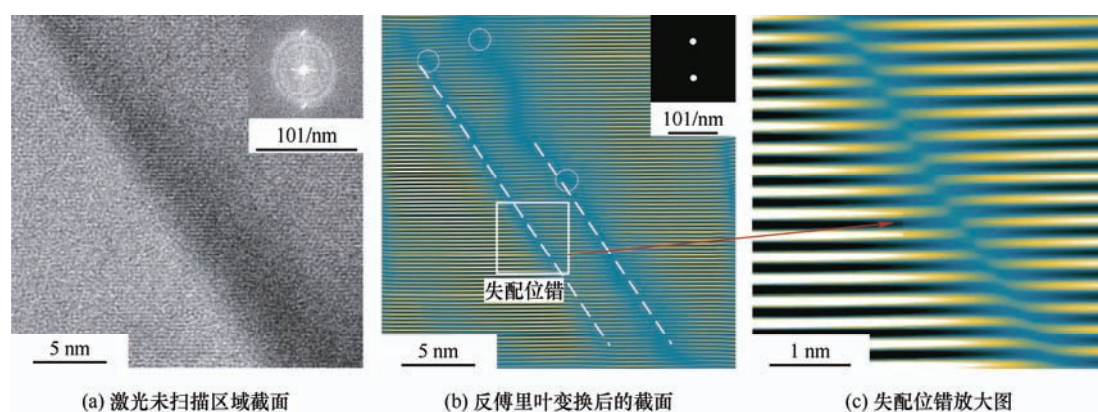


图 5 激光扫描区域截面 TEM

2.2 塑性变形影响下多脉冲表面形貌的演变

2.2.1 单脉冲表面形貌

为了避免初始表面形貌对塑性变形和马兰戈尼效应产生的特有表面结构的干扰,采用表面相对光滑的样品 2 进行抛光试验,同时采用表面相对粗糙的样品 1 进行对比试验。单脉冲激光抛光单晶硅后的表面形貌如图 6 所示,其中图 6a、6b 为样品 2 单脉冲抛光后的表面形貌,图 6c 为样品 1 单脉冲抛光后的表面形貌。图 6a 中, X 方向熔池的大小为 $30.3\ \mu\text{m}$, Y 方向熔池大小为 $41.5\ \mu\text{m}$ 。而样品 1 在

相同的试验参数下, X 方向车刀纹被完全抛光的宽度为 $20.8\ \mu\text{m}$, Y 方向宽度为 $27.2\ \mu\text{m}$, 两个尺寸均小于样品 1 相应方向熔池的尺寸。因为熔池边缘的温度较低,只是略高于熔点,熔池深度较浅,材料的流动不充分,几乎无法去除车刀纹。沿 X 方向,单点激光抛光后的截面形貌示意图如图 6d 所示,为了便于后续的分析,对表面轮廓的尺寸进行了取整。线条 1 表示材料流动充分的区域,对应硅片上车刀纹被抛光的区域;而线条 2 表示材料流动不充分的区域,对应图 6c 中熔池边缘单晶硅发生熔化,

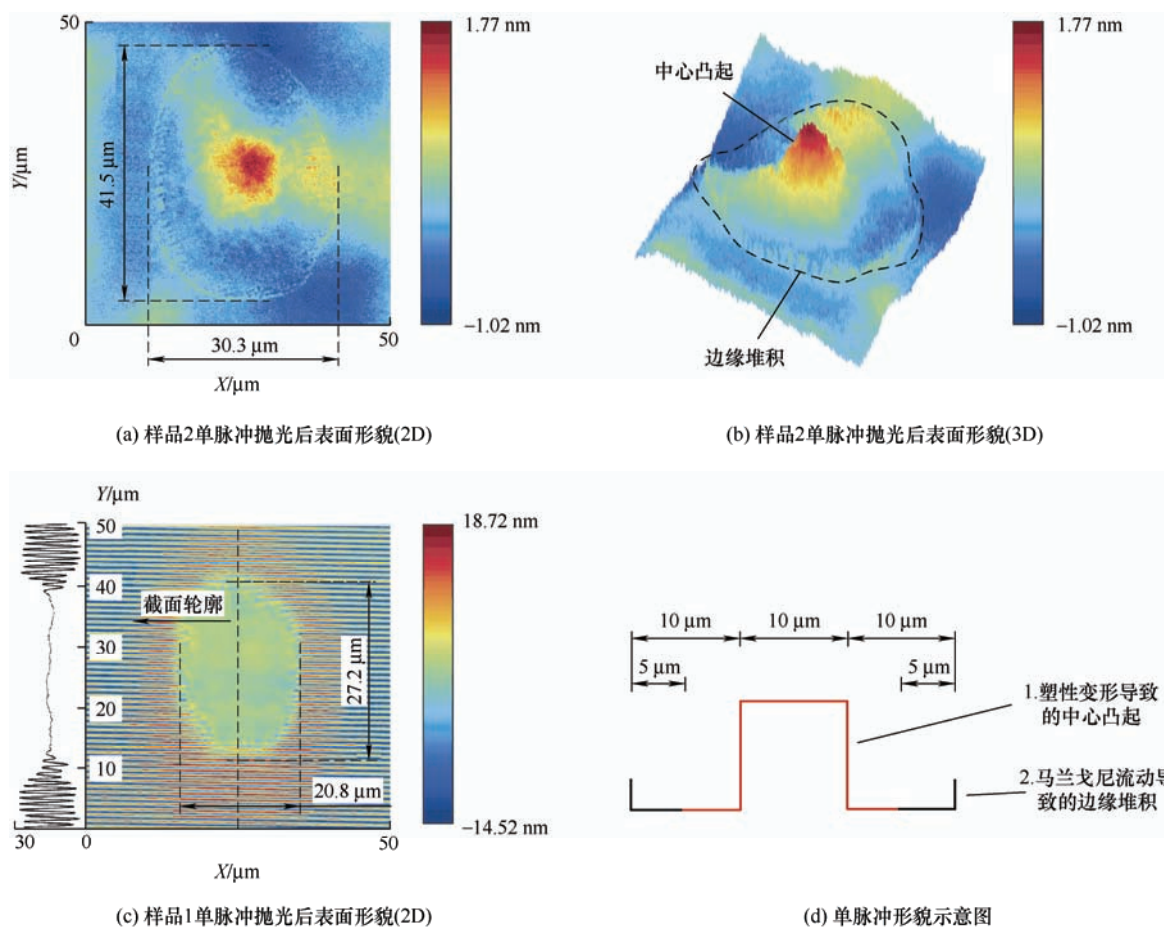


图 6 单脉冲抛光后的表面形貌

但车刀纹仍然存在的区域。在塑性变形、马兰戈尼效应的共同作用下, 形成了单脉冲激光抛光的独特形貌。而充分流动区域和不充分流动区域的存在, 对不同扫描间距下的多脉冲抛光形貌演变具有十分重要的影响。

2.2.2 多脉冲表面形貌

单脉冲激光只能抛光几十微米的区域, 想要抛光整个表面, 必须通过多脉冲的叠加覆盖整个

待抛光区域。而且单脉冲抛光后的中心凸起, 可以被后续脉冲抛光。在塑性变形的影响下, 多个脉冲间隔一定的扫描间距互相叠加后的表面形貌如图 7 所示。两个脉冲之间的间隔从 $25\ \mu\text{m}$ 逐渐降低到 $2\ \mu\text{m}$ 。随着两个脉冲间隔距离的减小, 塑性变形导致的中心凸起逐渐被后续的激光脉冲所抛光。下面对不同间隔下的表面形貌演变进行单独分析。

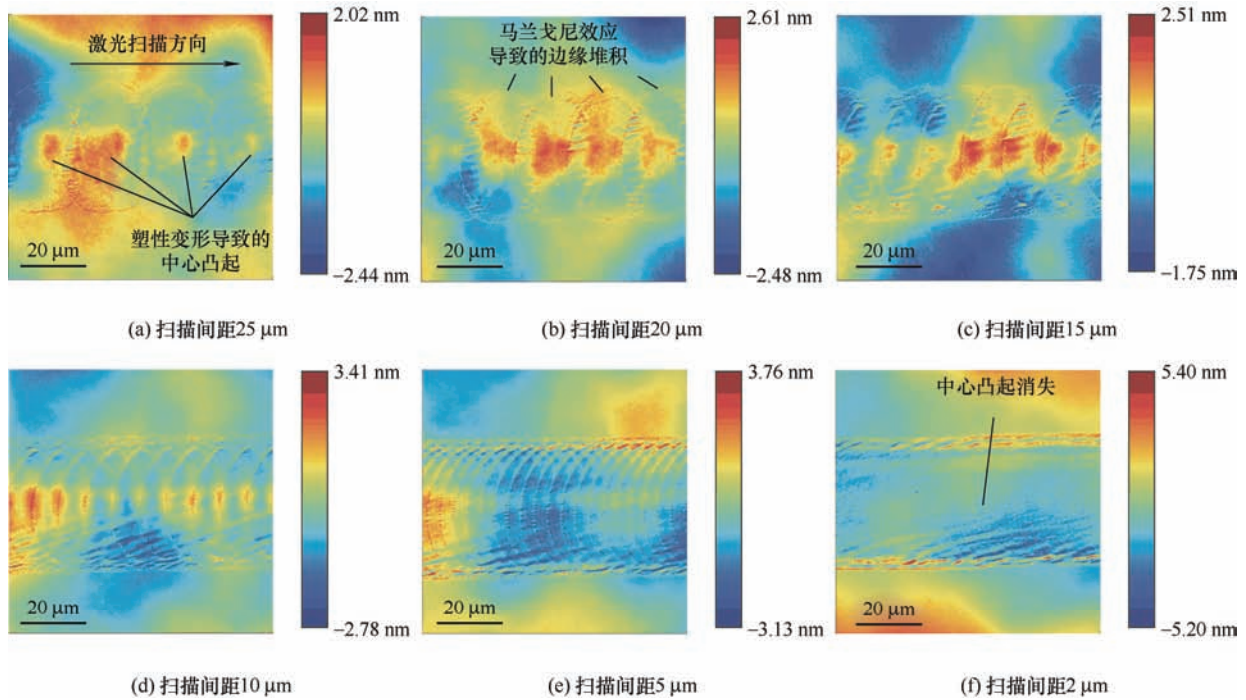
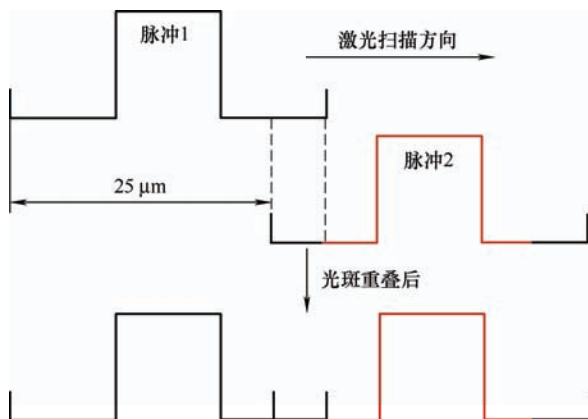


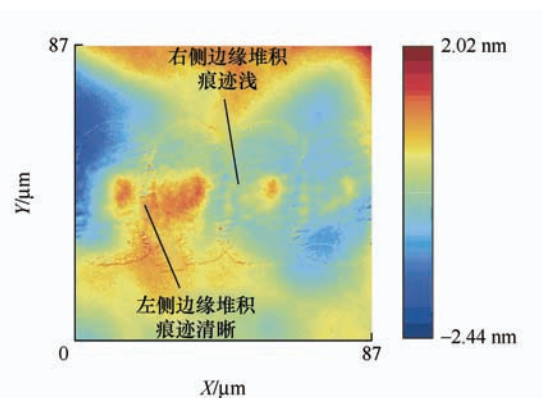
图 7 不同扫描间距下多脉冲叠加后的表面形貌

当扫描速度为 $5\ 000\ \text{mm/s}$, 扫描间距为 $25\ \mu\text{m}$ 时, 相邻脉冲抛光后的形貌叠加示意图如图 8a 所示。相邻光斑只在流动不充分的区域发生重叠, 即图 8a 的虚线区域, 脉冲 2 产生的边缘堆积叠加在脉冲 1 的形貌上, 而脉冲 1 的边缘堆积处于充分流动和不充分流动的分界线, 因此边缘堆积的痕迹相对较浅。样品 2 激光抛光后的表面形貌如图 8b、8c

所示, 塑性变形引起的中心凸起并未受到脉冲 2 的影响。图 8d 为样品 1 激光抛光后的表面形貌, 车削后的表面相对粗糙, 表面张力较大, 因此抛光后受塑性变形和马兰戈尼效应影响的形貌并不明显。抛光样品 2 时熔池已经发生了重叠, 而在抛光样品 1 时, 由于不充分流动区域的存在, 车刀纹被抛光的区域是不连续, 这与单点抛光的结果是一致的。



(a) 形貌叠加示意图



(b) 样品2激光抛光后表面形貌(2D)

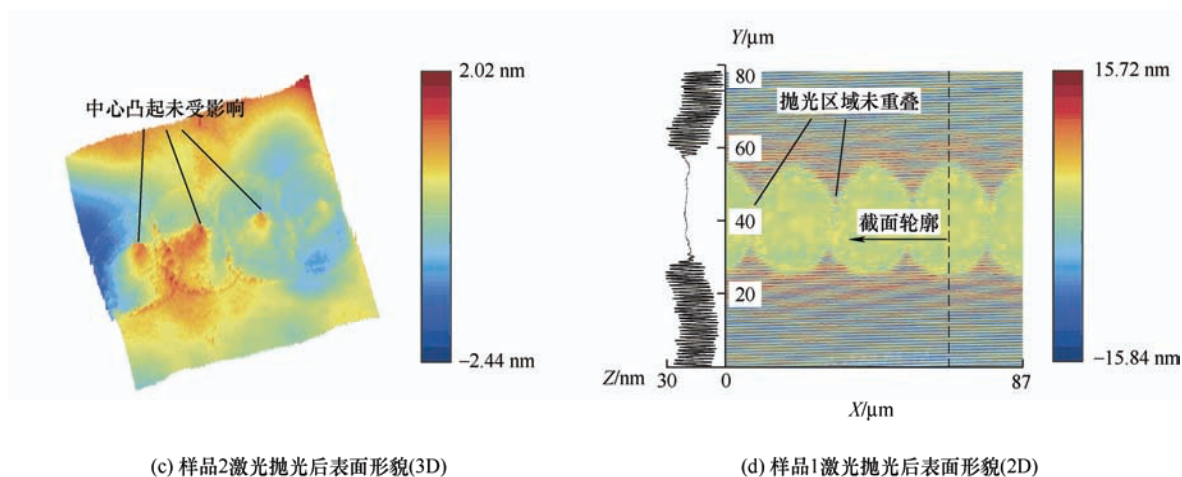


图 8 扫描间距为 $25\ \mu\text{m}$ 时, 多脉冲叠加后的表面形貌

当激光扫描速度为 $4\ 000\ \text{mm/s}$, 扫描间距为 $20\ \mu\text{m}$ 时, 相邻激光脉冲抛光后的形貌叠加示意图如图 9a 所示, 由于相邻脉冲重叠区域的增加, 脉冲 1 右侧的边缘堆积, 处于脉冲 2 的完全流动区域, 因此边缘堆积可以被完全消除。脉冲 1 因塑性变形产生的中心凸起与脉冲 2 并不重合, 因此中心凸起

高度保持不变, 而脉冲 2 左侧的边缘堆积则是叠加在脉冲 1 的中心凸起上, 在样品 2 表面形成了图 9b、9c 所示的表面形貌。图 9d 为相同试验参数下, 样品 1 激光抛光后的表面形貌, 此加工参数下, 充分流动区域可以相互叠加, 在样品 1 的表面, 形成了连续的抛光痕迹。

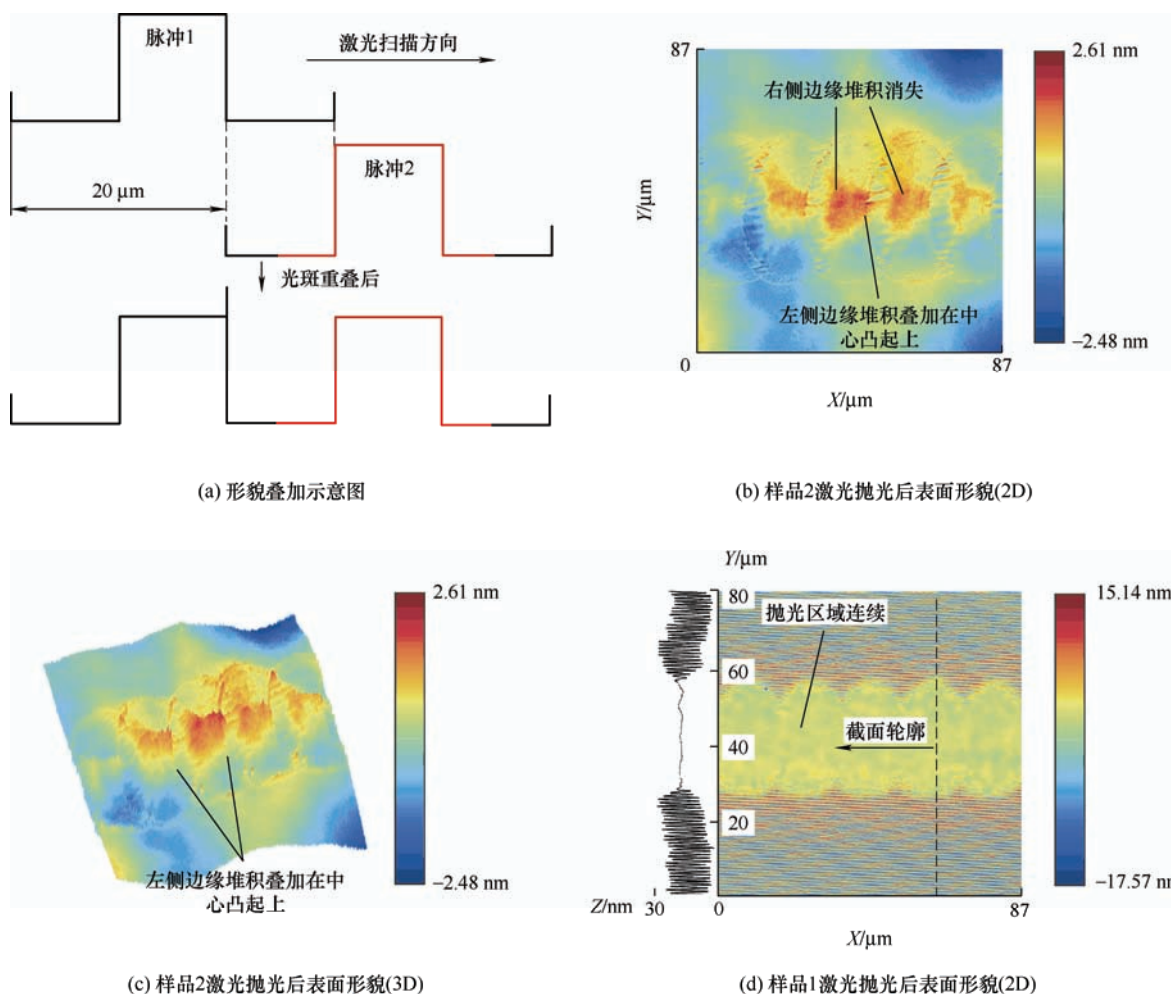


图 9 扫描间距为 $20\ \mu\text{m}$ 时, 多脉冲叠加后的表面形貌

当扫描速度为 3 000 mm/s, 扫描间距为 15 μm 时, 相邻激光脉冲抛光后的形貌叠加示意图如图 10a 所示。相邻脉冲重叠区域继续增加, 但是脉冲 1 产生的中心凸起, 仍处于脉冲 2 的不充分流动区域, 因此塑性变形产生的中心凸起无法消除, 中心凸起高度保持不变。而脉冲 1 右侧的边缘堆积, 处于脉冲 2 的充分流动区域, 可以被完全抛光。因此, 样品 2 表面形成了如图 10b、

10c 所示的形貌, 在中心凸起上叠加了下一个脉冲的边缘堆积。图 10c 中, 边缘堆积位于中心凸起偏左的位置, 因为重叠区域的增加, 温度积累对下一个脉冲产生影响, 使得熔池尺寸略有增加, 由马兰戈尼效应导致的边缘堆积也随熔池的扩大向外扩散。样品 1 激光抛光后的表面形貌如图 10d 所示, 中心区域相较于其他边缘区域, 有微弱的升高。

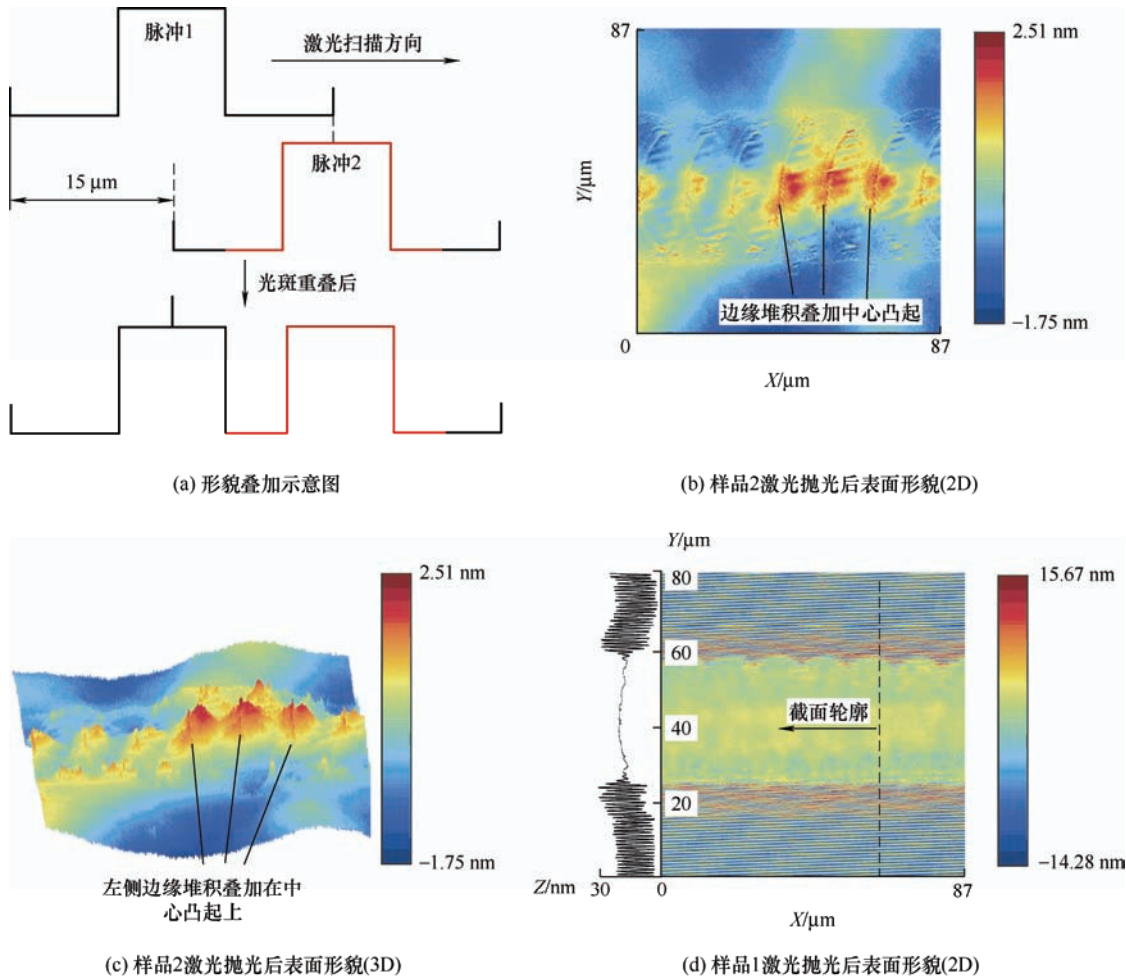


图 10 扫描间距为 15 μm 时, 多脉冲叠加后的表面形貌

当扫描速度降低到 2 000 mm/s, 两个脉冲扫描间距为 10 μm 时, 脉冲 1 和 2 抛光后的形貌叠加示意图如图 11a 所示。脉冲 1 产生的中心凸起, 与脉冲 2 的充分流动区域有所重叠, 重叠宽度为 5 μm , 脉冲 1 仍有部分中心凸起没有被抛光, 约占中心凸起的 50%, 因此样品 2 表面形成了图 11b、11c 所示的表面形貌。部分中心凸起已经被抛光, 残留的中心凸起主要分布在边缘堆积附近, 而且处于激光抛光轨迹的中心, 即初始中心凸起所在的位置。样品 1 激光抛光后的表面形貌如图 11d 所示, 中心区域相较于其他边缘区域, 有微弱的升高。

当扫描速度为 1 000 mm/s, 相邻脉冲间距为 5 μm 时, 4 个脉冲抛光后的形貌叠加示意图如图 12a 所示。此时脉冲 1 右侧的边缘堆积, 处于脉冲 2 充分流动区域和不充分流动区域的分界线上, 或许无法被脉冲 2 抛光, 但右侧的边缘堆积可以被脉冲 3 抛光。脉冲 1 的中心凸起处于脉冲 2 的充分流动区域, 可以完全被抛光。在抛光的过程中, 脉冲 1 的形貌会受到脉冲 2 的影响, 发生塑性变形(脉冲 2 产生中心凸起)并且发生熔化。塑性变形会使区域内的材料凸起, 熔化后的表面张力会使凸起结构变得平坦。在塑性变形和表面

张力的共同作用下,脉冲1的中心凸起区域被抛光,但会残留下一定的凸起。而残留的凸起,处于脉冲3的不充分流动区域,无法被脉冲3抛光,并且脉冲3也会残留相同的凸起,如图12b所示。当脉冲4抛光时,脉冲4的边缘堆积会叠加在残留的凸起上,形成图12c所示的形貌。样品2激

光抛光后的表面形貌如图12d、12e所示,塑性变形导致的中心凸起已经基本消失,但在扫描轨迹中心,残留的凸起彼此连接,形成一条直线,并且有边缘堆积的叠加,这与图12c中的形貌是一致的。样品1激光抛光后的表面形貌如图12f所示,已经观察不到明显的中心凸起。

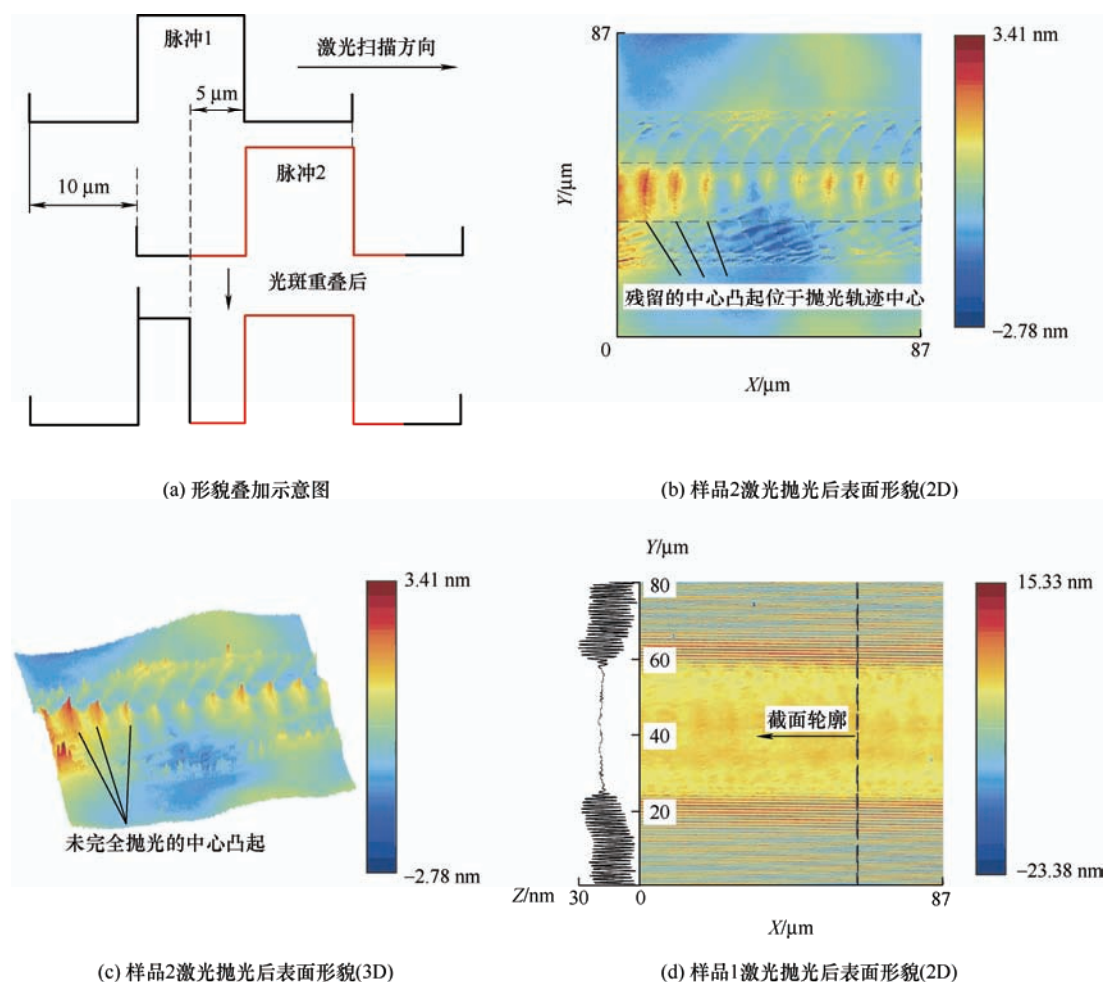
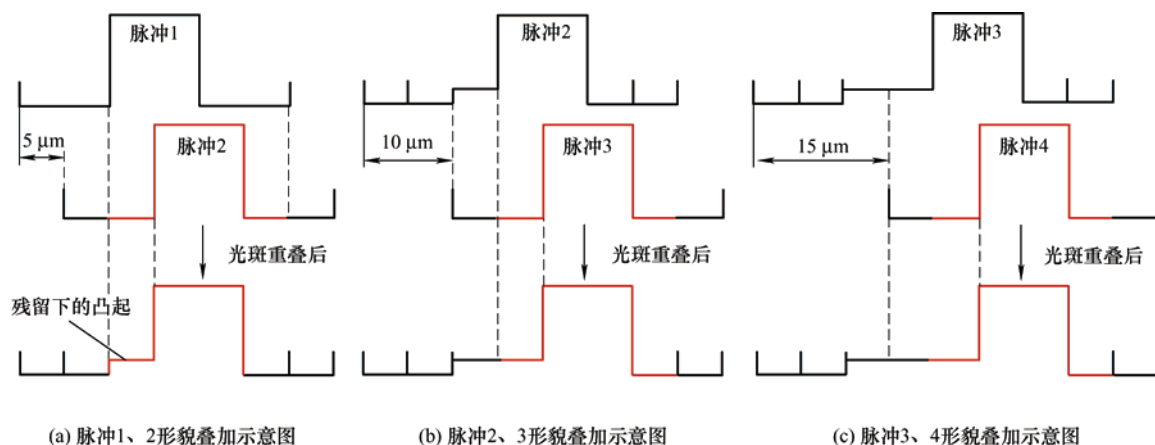
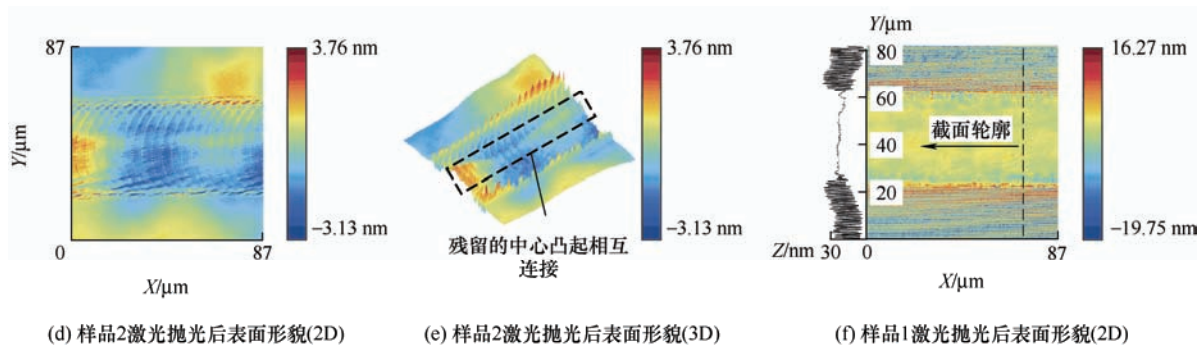


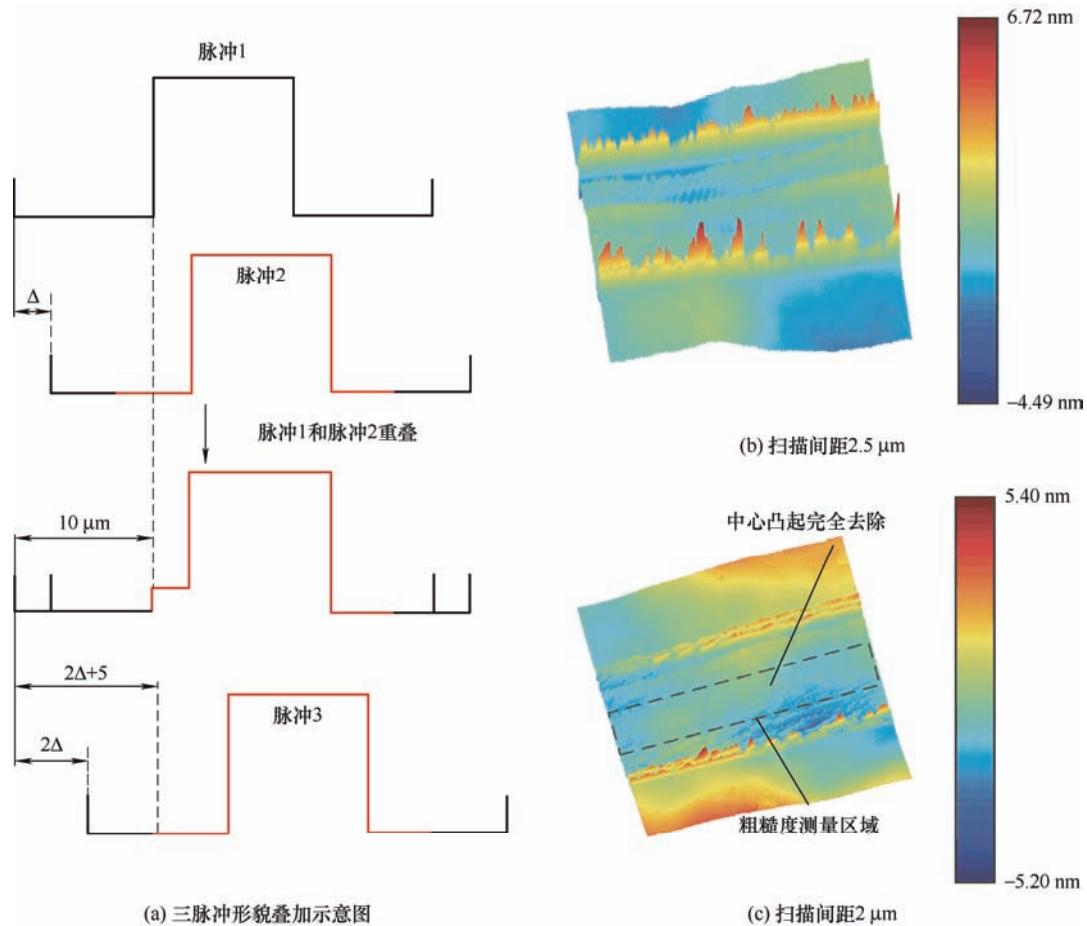
图11 扫描间距为10 μm时,多脉冲叠加后的表面形貌



图 12 扫描间距为 $5\ \mu\text{m}$ 时, 多脉冲叠加后的表面形貌

随着扫描间距的继续减小, 当第一个脉冲的残留凸起处于第三个脉冲的充分流动区域时, 图 12a 中的残留凸起可以被消除。三个脉冲抛光后的形貌叠加示意图如图 13a 所示。不妨设相邻脉冲扫描间距为 Δ , 当满足 $2\Delta+5<10$, 即相邻脉冲间距小于 $2.5\ \mu\text{m}$, 扫描速度小于 $500\ \text{mm/s}$ 时, 第一个脉冲的残留凸起完全处于第三个脉冲的充分流动区域, 塑性变形产生的中心凸起可以完全被抛光。图 13b 展

示了扫描速度为 $500\ \text{mm/s}$ 时, 样品 2 激光抛光后的表面形貌, 塑性变形导致的中心凸起仍然存在, 此时的扫描速度为临界值, 抛光效果可能并不是最优。当扫描速度减小到 $400\ \text{mm/s}$ 时, 如图 13c 所示, 已经没有了明显的中心凸起。但是, 由于扫描速度的降低, 温度积累的影响越来越大, 熔池尺寸和熔池的持续时间都有所增加, 导致在扫描轨迹两侧, 产生了较大的边缘堆积。

图 13 三脉冲形貌叠加示意图及扫描间距为 $2.5\ \mu\text{m}$ 和 $2\ \mu\text{m}$ 时, 多脉冲叠加后的表面形貌

随着扫描间距的变化, 样品 1 和样品 2 在抛光后表面的粗糙度变化如图 14 所示, 仅测量扫描轨迹中心长 $85\ \mu\text{m}$ 宽 $15\ \mu\text{m}$ 的区域, 如图 13c 中黑色方

框区域所示, 每组实验粗糙度测量 5 次取平均值。虽然扫描轨迹边缘凸起较高, 粗糙度较大, 但是扫描轨迹边缘的凸起可以被下一行激光所抛光, 不会

对最终的大面积抛光结果产生影响。样品 1 和样品 2 未抛光的初始粗糙度分别为 4.04 nm 和 0.15 nm。为了使曲线的变化趋势更准确,在上述扫描间距中又插入了几组试验。当扫描间距为 12.5 μm 时,样品 1 和 2 抛光后的表面粗糙度最大,分别为 0.67 nm 和 0.44 nm。

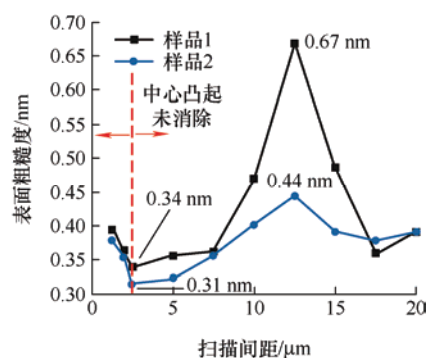
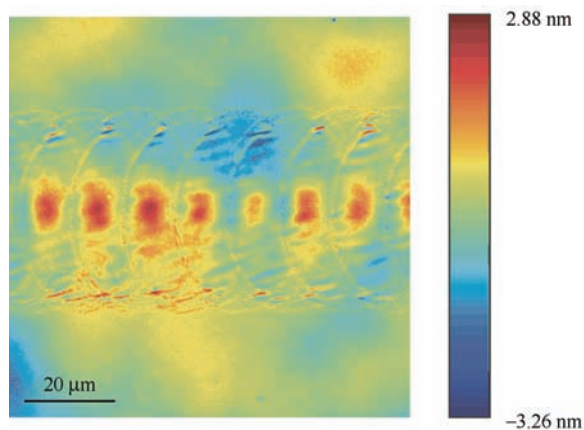
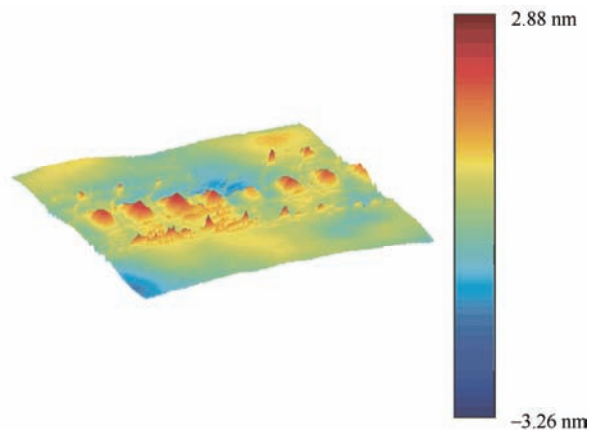


图 14 表面粗糙度与扫描间距曲线

此抛光参数下,样品 2 在激光抛光后的表面形貌如图 15 所示。此时相邻激光脉冲形成的中心凸起



(a) 样品 2 激光抛光后表面形貌(2D)



(b) 样品 2 激光抛光后表面形貌(3D)

图 15 扫描间距为 12.5 μm 时多脉冲叠加后的表面形貌

3 结论

(1) 激光抛光过程中,加热范围小,表面存在较大的温度梯度,温度梯度导致的热应力使单晶硅在熔化前发生塑性变形,产生凸起的结构。并通过 XRD 残余应力和 TEM 检测,验证了塑性变形的产生。塑性变形导致的残余拉应力抵消了部分车削后的残余压应力。激光扫描后残余应力从超精密车削的 -270 MPa 降低至 -116 MPa;激光扫描后的区域出现失配位错,刃形位错和畸变有所减少。

(2) 单脉冲抛光时,在塑性变形,表面张力和

相互积累,无法消除,因此粗糙度最大。中心凸起对粗糙度的影响要强于边缘堆积对粗糙度的影响,随着扫描间距的减小,激光抛光过程中塑性变形产生的中心凸起逐渐被后续脉冲抛光,粗糙度逐渐下降。

当扫描间距小于 2.5 μm 时,塑性变形产生的中心凸起能够完全被后续脉冲抛光时,其已经无法影响粗糙度,仅有边缘堆积能够对粗糙度产生影响。扫描间距的减小,会使边缘堆积叠加更加密集,粗糙度相应增加。虽然图 13b 中扫描速度为 500 mm/s,扫描间距为 2.5 μm 时扫描后的残留凸起仍然存在,但扫描间距的减小,使边缘堆积升高,同样对粗糙度起负面作用。综合影响下,扫描间距为 2.5 μm 时表面粗糙度达到最小值,样品 1 和样品 2 的表面粗糙度分别为 0.34 nm 和 0.31 nm。此外扫描间距过小会产生较大的温度积累,使得激光抛光过程温度逐渐升高,熔池持续时间增加,单晶硅可能会过流动。较大的温度积累甚至可能使表面最高温度超过单晶硅的沸点,产生轻微的烧蚀,表面质量变差。

马兰戈尼效应的共同作用下,产生了中心凸起和边缘堆积的“山”字形表面形貌。熔池的中心为充分流动区域,宽度为 20.8 μm ,可以完全消除样品 1 表面的车刀纹,而熔池的边缘约 5 μm 的范围为不充分流动区域,无法消除样品 1 表面的车刀纹。

(3) 随着扫描间距的减小,塑性变形引起的中心凸起逐渐被消除。当扫描间距小于 2.5 μm 时,塑性变形产生的中心凸起可以完全被后续脉冲抛光,样品 1 表面粗糙度从 4.04 nm 降低至 0.34 nm,继续减小扫描间距,同样可以完全消除中心凸起,但是受到温度积累的影响,表面质量变差,粗糙度略有增加,从 0.34 nm 增加至 0.40 nm。

参 考 文 献

- [1] XIAO Junfeng, HUANG Weiqi, TAO Li, et al. Laser assisted surface conditioning of a residual pattern on single crystal silicon induced by ultra-precision cutting[J]. Optical Materials Express, 2022, 12(4): 1303-1313.
- [2] XU Jiahui, KANG Renke, DONG Zhigang, et al. Review on chemical mechanical polishing of silicon wafers[J]. Diamond and Abrasives Engineering, 2020, 40(4): 24-33.
- [3] 王振忠, 施晨淳, 张鹏飞, 等. 先进光学制造技术最新进展[J]. 机械工程学报, 2021, 57(8): 23-56.
- WANG Zhenzhong, SHI Chenchun, ZHANG Pengfei, et al. Recent progress of advanced optical manufacturing technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(8): 23-56.
- [4] WANG Sheng, ZHANG Qiang, ZHAO Qingliang, et al. Surface generation and materials removal mechanism in ultra-precision grinding of biconical optics based on slow tool servo with diamond grinding wheels[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 72: 1-14.
- [5] WANG Sheng, ZHAO Qingliang, GUO Bing, et al. Ultra-precision raster grinding of monocrystalline silicon biconical free-form optics using arc-shaped diamond grinding wheels[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 58: 1064-74.
- [6] CHEN Xiao, XIAO Junfeng, ZHU Yan, et al. Micro-machinability of bulk metallic glass in ultra-precision cutting[J]. Materials and Design, 2017, 136: 1-12.
- [7] REN Guoqi, SONG Huawei, DAN Jinqi, et al. Thermal analysis and machinability for laser-assisted machining of fused silica[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 148: 119078.
- [8] SONG Huawei, DAN Jinqi, CHEN Xiao, et al. Experimental investigation of machinability in laser-assisted machining of fused silica[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(1-4): 267-78.
- [9] CHEN Xiao, LIU Changlin, KE Jinyang, et al. Subsurface damage and phase transformation in laser-assisted nanometric cutting of single crystal silicon[J]. Materials and Design, 2020, 190: 108524.
- [10] LIU Changlin, HE Wenbin, CHU Jianning, et al. Molecular dynamics simulation on cutting mechanism in the hybrid machining process of single-crystal silicon[J]. Nanoscale Research Letters, 2021, 16(1): 1-15.
- [11] LIU Changlin, ZHANG Jianguo, ZHANG Junjie, et al. Numerical investigation on material removal mechanism in elliptical vibration cutting of single-crystal silicon[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2021, 134: 106019.
- [12] ZHANG Shaojian, TO S. A theoretical and experimental investigation into multimode tool vibration with surface generation in ultra-precision diamond turning[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2013, 72: 32-6.
- [13] HATEFI S, ABOU-EL-HOSSEIN K. Review of single-point diamond turning process in terms of ultra-precision optical surface roughness[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(5-6): 2167-87.
- [14] NAMBA Y, SHIMOMURA T, FUSHIKI A, et al. Ultra-precision polishing of electroless nickel molding dies for shorter wavelength applications[J]. CIRP Annals Manufacturing Technology, 2008, 57(1): 337-40.
- [15] BEAUCAMP A, NAMBA Y. Super-smooth finishing of diamond turned hard X-ray molding dies by combined fluid jet and bonnet polishing[J]. CIRP Annals Manufacturing Technology, 2013, 62(1): 315-8.
- [16] LI Zhaoze, WANG Jianmin, PENG Xiaoqiang, et al. Removal of single point diamond-turning marks by abrasive jet polishing[J]. Applied Optics, 2011, 50(16): 2458-63.
- [17] HUANG Yuetian, FAN Bin, WAN Yongjian, et al. Improving the performance of single point diamond turning surface with ion beam figuring[J]. Optik, 2018, 172: 540-544.
- [18] KRISHNAN A, FANG Fengzhou. Review on mechanism and process of surface polishing using lasers[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2019, 14(3): 299-319.
- [19] YAN Jiwang, KOBAYASHI F. Laser recovery of machining damage under curved silicon surface[J]. CIRP Annals Manufacturing Technology, 2013, 62(1): 199-202.
- [20] NIITSU K, TAYAMA Y, KATO T, et al. Laser recovery of grinding-induced subsurface damage in the edge and notch of a single-crystal silicon wafer[J]. Surface Topography: Metrology and Properties, 2019, 7(1): 015013.
- [21] ZHANG Chi, ZHOU Jing, SHEN Hong. Role of capillary and thermocapillary forces in laser polishing of metals[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, 2017, 139(4): 041019.

- [22] HE Ting, WEI Chaoyang, JIANG Zhigang, et al. Super-smooth surface demonstration and the physical mechanism of CO₂ laser polishing of fused silica[J]. Optics Letters, 2018, 43(23): 5777-80.
- [23] NIITSU K, TAYAMA Y, KATO T, et al. Characterization of recrystallized depth and dopant distribution in laser recovery of grinding damage in single-crystal silicon[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2018, 82: 54-61.
- [24] NIITSU K, YAN Jiwang. Effects of deep subsurface damages on surface nanostructure formation in laser recovery of grinded single-crystal silicon wafers[J]. Precision Engineering, 2020, 62: 213-22.
- [25] JIA Zhichao, ZHANG Tingzhong, ZHU Huazhong, et al. Stress damage process of silicon wafer under millisecond laser irradiation[J]. Chinese Optics Letters, 2018, 16(1): 011404.
- [26] WANG Yuecun, ZHANG Wei, WANG Liyuan, et al. In situ tem study of deformation-induced crystalline-to-amorphous transition in silicon[J]. NPG Asia Materials, 2016, 8(7): e291.
- [27] XU Weixing, ZHANG Liangchi, WANG Xuyue. Laser bending of silicon sheet: Absorption factor and mechanisms[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2013, 135(6): 061005.
- [28] XIAO Junfeng, LUO Youming, NIU Muyuan, et al. Study of imbibition in various geometries using phase field method[J]. Capillarity, 2019, 2(4): 57-65.
- [29] 王一卓, 谢启明, 张若寅, 等. 单点金刚石切削 7050 铝合金残余应力分析[J]. 工具技术, 2021, 55(10): 74-78.
- WANG Yizhuo, XIE Qiming, ZHANG Ruoyin, et al. Analysis of residual stress in single-point diamond cutting 7050 aluminum alloy[J]. Tool Technology, 2021, 55(10): 74-78.
- [30] 李道齐, 王涛, 杨紫璠, 等. 304 不锈钢激光抛光的参数优化及抛光层性能分析[J]. 中国激光, 2023, 50(4): 219-228.
- LI Daoqi, WANG Tao, YANG Zipan, et al. Parameter optimization and property analysis of 304 stainless steel laser polishing layer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(4): 219-228.

作者简介: 李涛, 男, 1998 年出生。主要研究方向为激光抛光。

E-mail: ltxycjr@hust.edu.cn

肖峻峰(通信作者), 男, 1985 年出生, 博士, 副教授, 博士研究生导师。主要研究方向为毛细流动及其在精密制造中的应用, 多物理场辅助超精密加工。

E-mail: xiaojf@hust.edu.cn