



中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY

飞秒激光在柔性材料内部直写加工

中山大学物理学院



组员：路尚润、邓逸枫、赵宁

2024年11月4日

目录

CONTENTS

01

课题理论

02

实验基础

03

研究成果

04

前景展望

05

总结

· 激光直写加工方法

激光直写加工方法是超短脉冲激光应用的重要领域之一，它主要包括**加性方法**、**减性方法**和**改性方法**。

· 加性方法

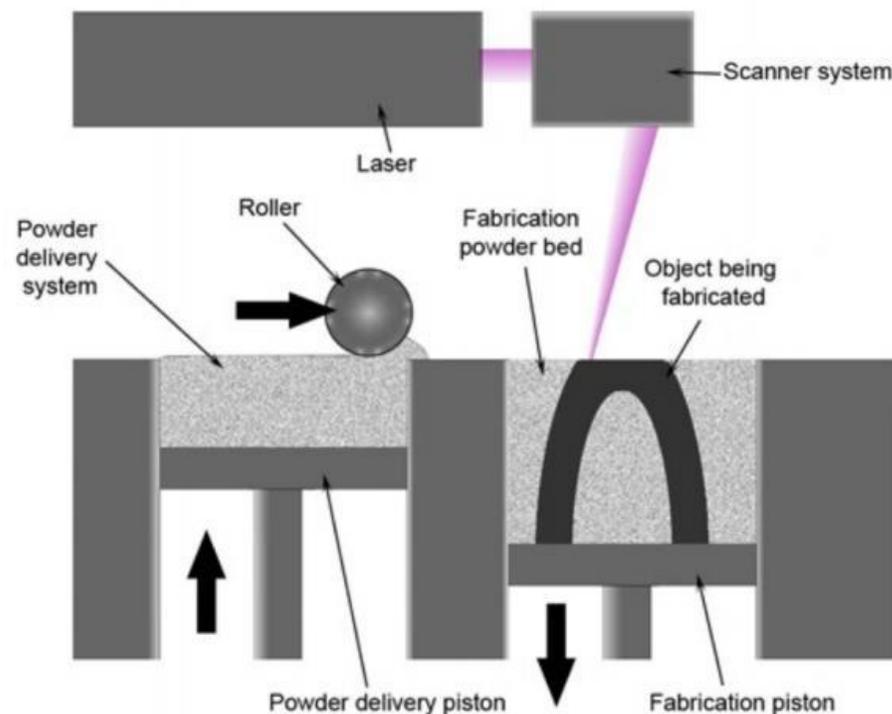
加性方法通过激光的作用，使材料发生**聚合**、**烧结**或**还原**等反应，从而在材料表面或内部形成新的结构或图案。

(1) 激光烧结

粉末均匀铺洒在零件上表面并刮平

CO₂激光器扫描

粉末烧结，形成截面，与下方牢固粘接



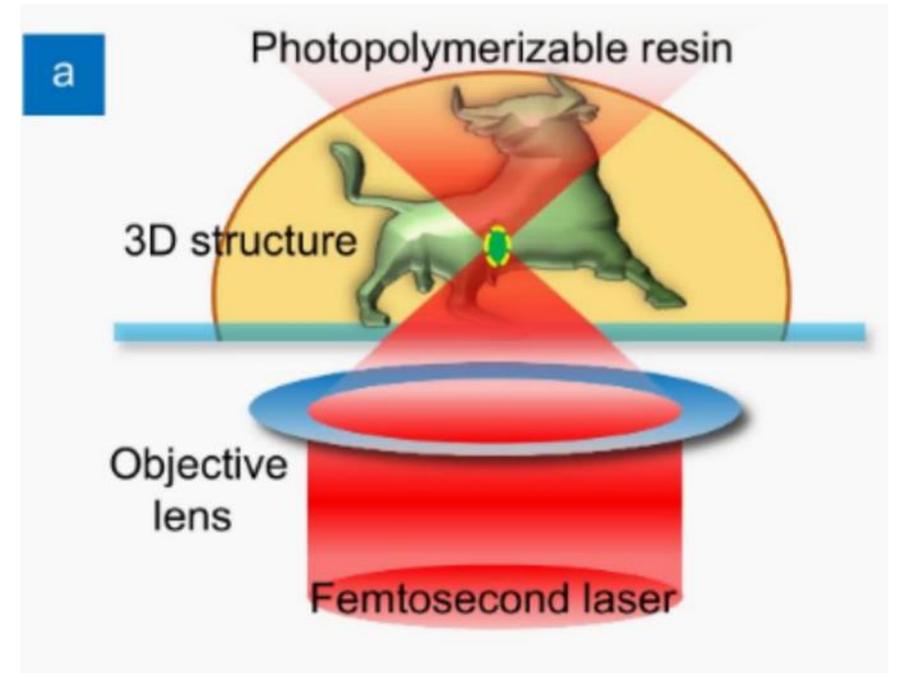
选择性激光烧结(Selective laser sintering)^[1]

· 加性方法

(2) 光聚合技术

光聚合指单体分子借光的引发（或用光敏剂）活化成自由基而进行的连锁聚合。多种单体在紫外光照射下能迅速聚合。这种方法主要依赖于特定波长的光源，如激光，来激发光敏物质，从而引发聚合反应，使**单体分子连接成高分子链，形成固态材料。**

飞秒激光双光子聚合三维微纳结构加工技术**采用可见光到近红外波段的超快激光作为光刻光源**，利用激光与物质相互作用的**非线性光学效应**，突破光学衍射极限。飞秒脉冲激光经过显微镜在空间中被紧聚焦之后，焦点中心位置的光子数密度极高，可诱发材料发生双光子吸收效应，进而引发光聚合反应使得材料固化。



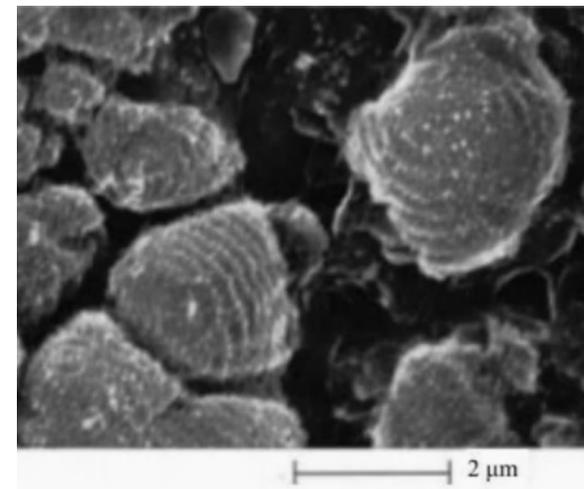
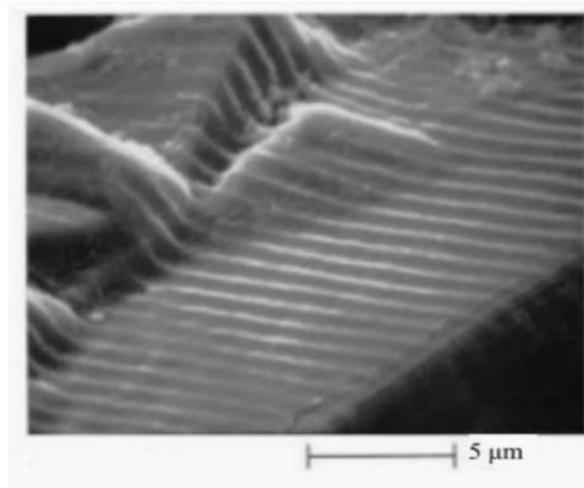
双光子聚合加工示意图^[2]

· 减性方法

激光烧蚀在现代材料加工中有广泛的应用，其利用强激光束与物质相互作用的热效应或其他物理效应从固体中去除物质原子，来改变材料的形貌和性质。

激光类型	连续激光	脉冲激光
特点	无间歇的激光输出	周期性的激光输出
烧蚀原理	热熔性效应	非热熔性
加工效果	较差	较好

进入 21 世纪以来，飞秒激光与固态材料相互作用在材料表面会诱导纳米结构，诱导表面周期性结构表现出入射激光波长大小的凹槽结构，并垂直于入射激光的极化方向。



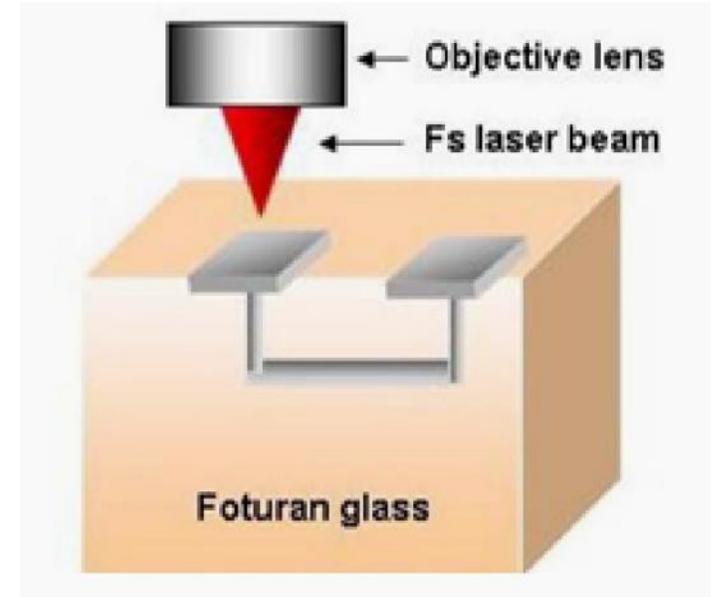
飞秒激光在单晶体（上）和多晶体（下）表面诱导的三维周期性波纹示意图^[3]

· 改性方法

激光改性的原理主要是利用激光高能束对材料表面进行处理，进而改变材料表面的化学成分、组织结构、物理性能和应力状态等，以达到改善材料表面性能（如耐磨、耐腐蚀、抗氧化和抗疲劳性等）的目的。

· 飞秒激光在柔性材料内部直写加工

具有足够高脉冲峰值强度的飞秒激光在透明材料内部实现三维加工的过程中，激光通过物镜聚焦在材料表面或内部的焦点位置，此时光能被转移到材料中，并诱导材料发生多光子吸收，使得大量的电子电离。由于电离效应，材料可以发生相位或结构的改变，产生局部的永久的折射率变化，或者产生一个中空区域，最终在焦点位置形成直写痕迹或通道。

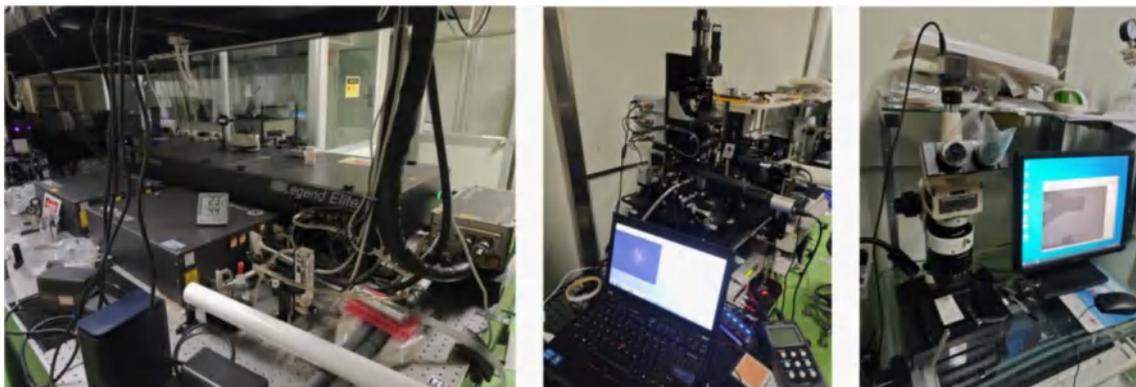


飞秒激光辐照到玻璃上^[4]

· 实验装置

我们使用的是实验室已经搭建好的超短脉冲激光直写加工系统，该系统由两条光路组成，第一条光路从飞秒激光器发射具有可调脉冲宽度（60-150fs）、1KHz频率的800nm脉冲序列，依次经过可变光阑、缩束系统等光学元件，且最终通过物镜聚焦在TPU样品的表面上。第二条光路从CCD出发，经过半透半反镜，再通过物镜聚焦在样品表面，样品表面的反射光返回后又被CCD接受，反向传输到计算机系统中，在计算机窗口上可以实时观察样品图像，检测加工区域形貌。

在激光加工完成后，对加工区域进行表征时，我们使用了光学显微镜来观测材料内部的图像，结合 CCD 可以灵活拍摄下我们需要的表征结果用于实验分析。



实验装置 (左) 飞秒激光系统 (中) 加工系统 (右) 显微成像系统

· 聚氯乙烯(PVC)-加工条件探究

PVC即聚氯乙烯，是最常见的柔性塑料之一，其具有良好的柔性和较低的熔点，非常适合内部激光直写。我们主要对其加工深度和内部烧蚀特性进行了探究，并且利用其烧蚀特性制作了不同周期的布拉格光栅。实验中我们使用20放大倍数0.4数值孔径的物镜，并利用波长800nm的激光进行刻蚀。

一般而言激光光强越大，直写速度越慢，越容易刻蚀出单槽。故对于PVC材料我们主要希望探究加工深度与激光光强的关系。

实验中我们控制直写速度为 $10\mu\text{m}/\text{s}$ ，入射激光功率为 $300\mu\text{W}$ 。实验结果如右图所示

可以看出在深度为0.97mm时刻蚀单槽十分明显，而在0.98mm处几乎刻蚀不出单槽，这是由于PVC材料对激光的吸收随着深度增加而增强导致。

密度	$1.38\text{g}/\text{cm}^3$
熔点	212°C
软化温度	85°C
杨氏弹性模量	2900-3400MPa

PVC特性参数



深度0.97mm刻蚀单槽



深度0.98mm刻蚀单槽

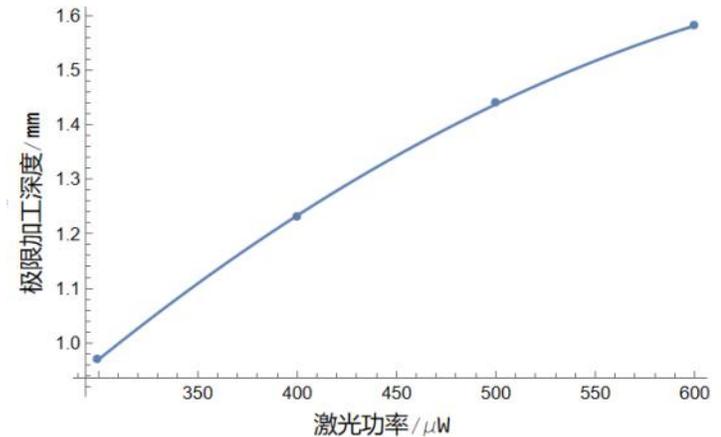
· 加工条件探究-加工深度与激光光强的关系

使用同样方法得到不同功率下极限加工深度，得到极限加工深度与激光功率关系曲线。

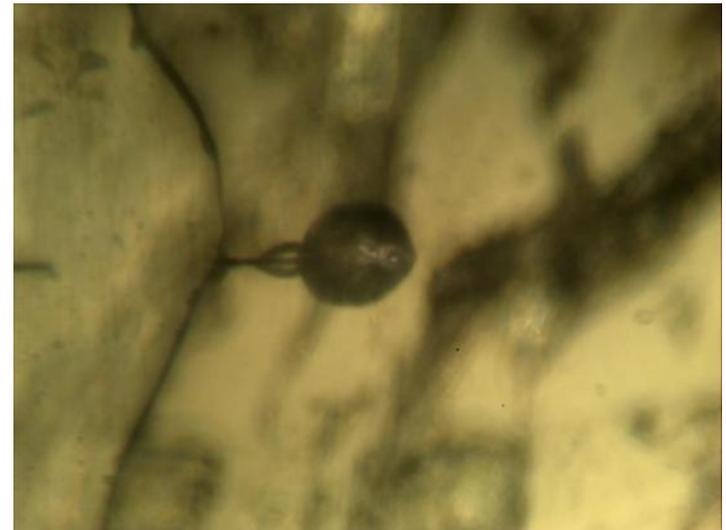
图中利用二次函数对数据进行了拟合，可见加工深度与激光功率关系并非线性，而是随着激光功率的提升，加工深度不断增加，但增加速度有所放缓。

在 $600\mu\text{W}$ 功率时，我们发现加工过程中不再刻蚀出单槽，而是烧蚀出从激光中心点向四周膨胀的球状图案。

对于该现象出现原因，推测是由于激光加工深度过深，导致激光在PVC内部传输过程中被材料大量吸收，热效应的积累引起PVC材料局部折射率特性的改变，故在透镜聚焦范围外出现该球状图案。由此可见对于PVC材料，在直写速度为 $10\mu\text{m}/\text{s}$ 时，其极限加工深度大约在 1.59mm 附近，超过该加工深度容易出现球状图案的折射率改变，对于器件的刻蚀较为不利。



极限加工深度与激光功率关系曲线



深度为 1.59mm 处烧蚀出球状图案

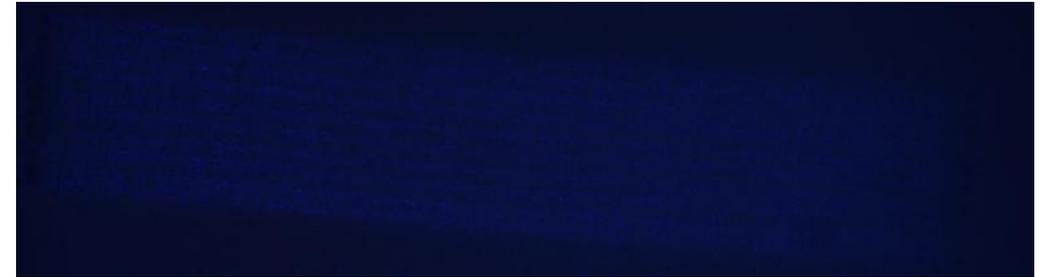
· 刻蚀体布拉格光栅-加工刻写

实验中我们使用 $700\mu\text{W}$ 功率激光，以 $20\mu\text{m}/\text{s}$ 的直写速度在深度为 0.3mm 处刻蚀出体布拉格光栅，实验中所刻光栅条纹长度为 0.5mm ，水平方向间距为 $10\mu\text{m}$ ，垂直方向间距为 $20\mu\text{m}$ ，水平条纹数为10，垂直条纹数为3。

可以看出光栅条纹在显微镜下清晰可见，条纹刻蚀均匀，有良好的区分度，证明PVC非常适合内部烧蚀加工。



布拉格光栅示意图



注入激光得到的光栅形状

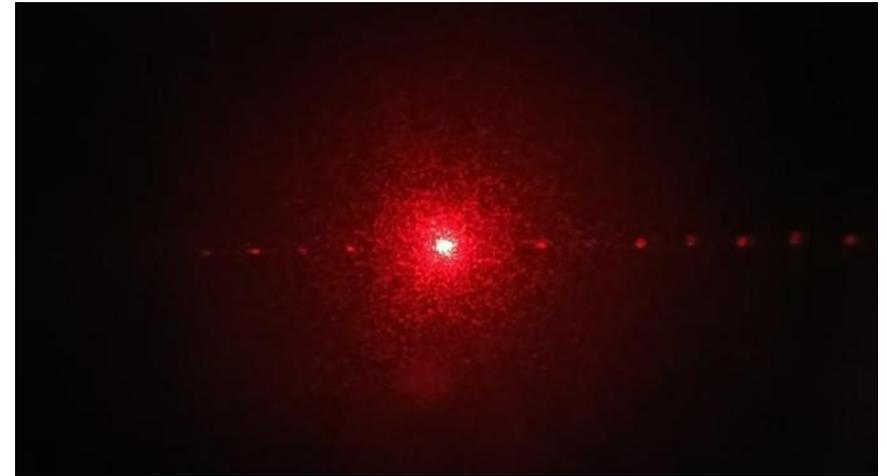
· 刻蚀体布拉格光栅-光学表征

通过He-Ne激光器我们可以对光栅的衍射效应进行更进一步的探究

从右图可见衍射效应十分明显，光强集中在中心，且可以看到较高级次的衍射光斑。但光斑光强分布明显不均，推测是刻蚀条纹与PVC材料表面并不完全平行使得两侧吸收光强不均所致。

更进一步我们探究了光栅常数对衍射光斑的影响，实验中我们再次以同样的条件刻蚀了光栅，其光栅常数除了水平间距增加一倍外不变。

从右图之间的对比可见：水平方向间距为 $20\mu m$ 时其次级光斑强度明显变亮，且间距明显变小。



衍射光斑



衍射光斑（光栅水平间距增加一倍）

· 刻蚀体布拉格光栅-数据处理与分析

更进一步，我们通过各次级光斑与中心光斑距离

以及衍射成像面与样品距离计算得到的其各级衍射角

如表中所示，并得到了发散角与光斑级次关系曲线。

可见发散角大致与光斑级次成线性关系，且随着

光栅水平间距增加，衍射光斑各级发散角明显减小，

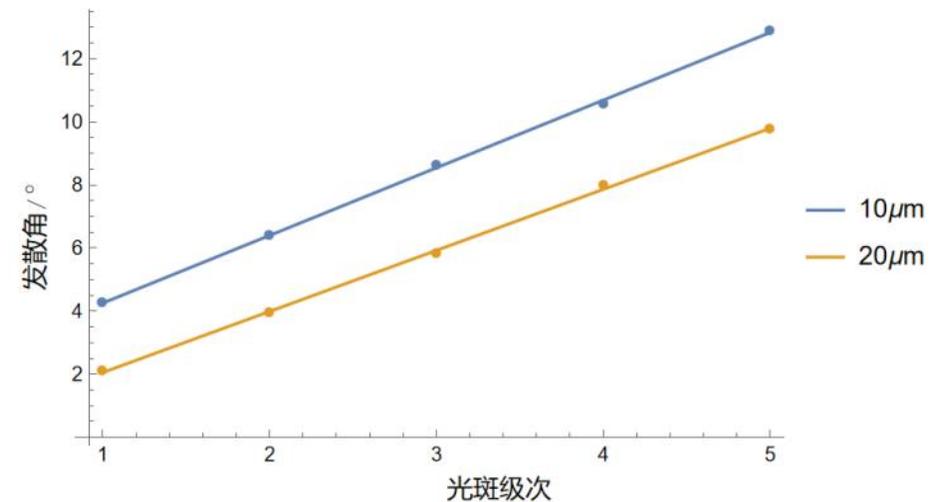
其各级间距也有所减小。

水平间距 $10\mu\text{m}$ 光栅所成光斑发散角

光斑级次	1	2	3	4	5
发散角/ $^{\circ}$	4.25	6.39	8.62	10.57	12.88

水平间距 $20\mu\text{m}$ 光栅所成光斑发散角

光斑级次	1	2	3	4	5
发散角/ $^{\circ}$	2.11	3.95	5.81	7.98	9.77



发散角与光斑级次关系曲线

· 热塑性聚氨酯(TPU)-初步加工

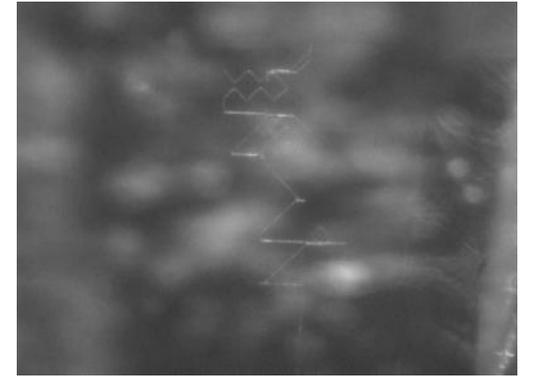
热塑性聚氨酯弹性体（TPU）是一类加热可以塑化、溶剂可以溶解的弹性体，具有高强度、高韧性、耐磨、耐油等优异的综合性能，加工性能好，广泛应用于国防、医疗、食品等行业^[5]。

在 TPU 的加工中，我们使用的是 10 倍放大、0.25 数值孔径的物镜，激光波长为 800nm。在 10 μ m/s 加工速度下对 TPU 材料进行了初步加工，包括随意刻写和光栅直写。

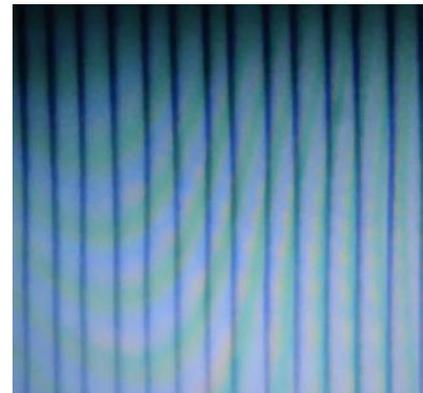
对于光栅直写，此时仅进行了一层的刻写，因此难以保证其效果的优良程度，在此仅进行了初步表征，虽然可以观测到衍射效果，但效果较弱。



TPU材料



随意刻写



光栅直写



衍射观察

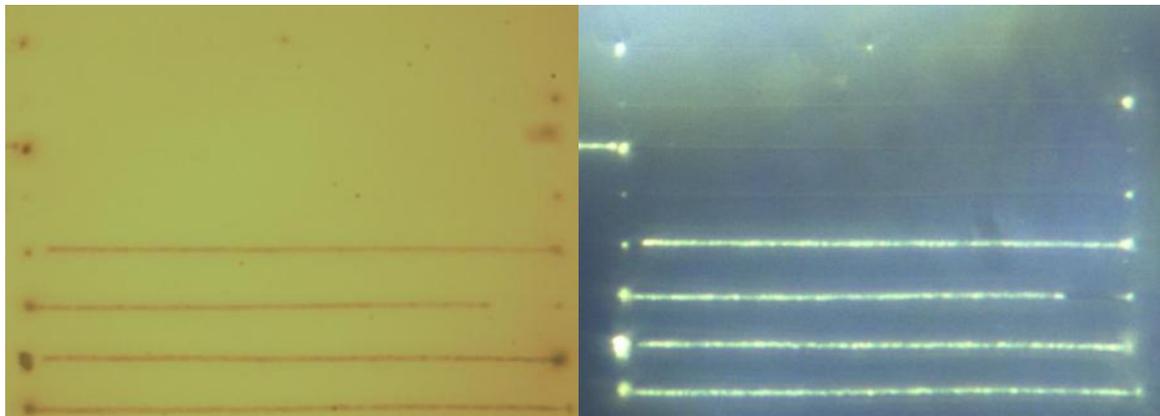
· 诱导折射率转变-光强调控

根据初步加工，飞秒激光已经能对 TPU 实现较好的内部直写功能，并且具有良好的调控性质。实际上，光强较弱时，此时虽然无法进行直接刻写，但可以诱导折射率的变化，可以用于构造折射率光学器件。

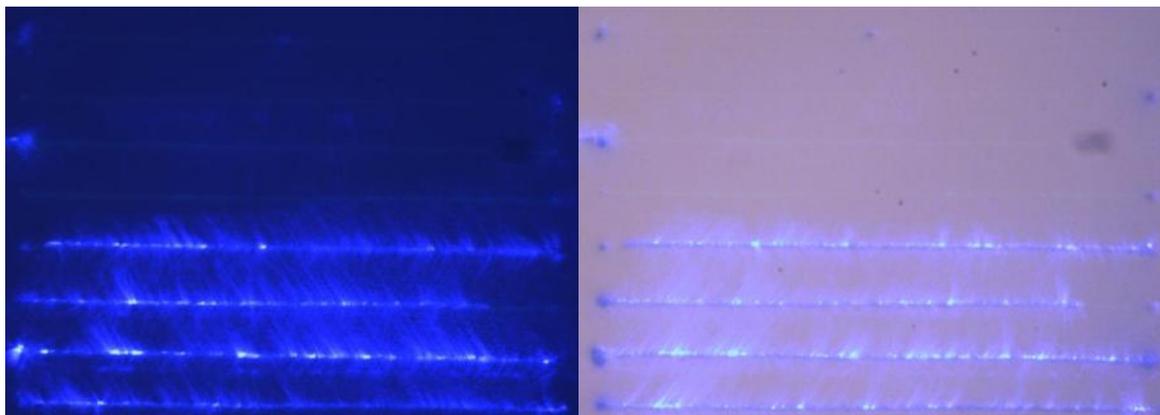
固定刻写速度为 $10\mu\text{m/s}$ ，调控光强进行加工，共有8条线。分别利用白光/自然光照射观测和激光照射观测，记录观测结果。

在卤钨灯/白光下，折射率诱导的变化几乎不可见，纹理若隐若现。而在激光照射下，由于其良好的单色性，此时出现了一定的衍射现象。不仅能够良好地观测到折射率变化纹理，还能观测到中空结构的加工效果。可以看出中空结构的毛刺纹理较多，而折射率纹理变化十分均匀，这对光学器件的加工精度控制是十分有利的。

线序号	1	2	3	4	5	6	7	8
光强/ μW	500.5	480.8	460.9	440.9	419.7	400.2	380.5	360.3



卤钨灯/白光照射观测结果



激光照射观测结果

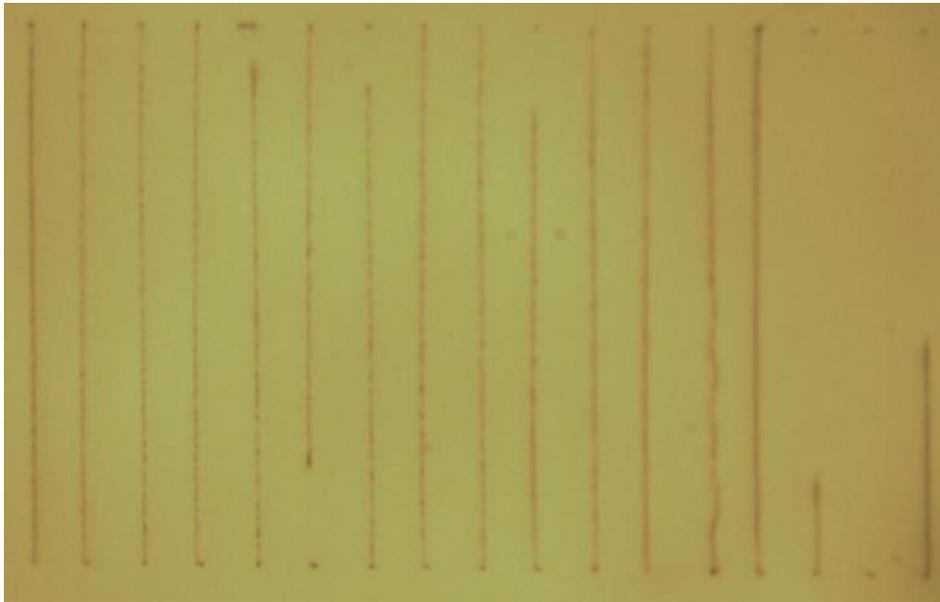
↑ 加工光强降低

· 诱导折射率转变-速度调控

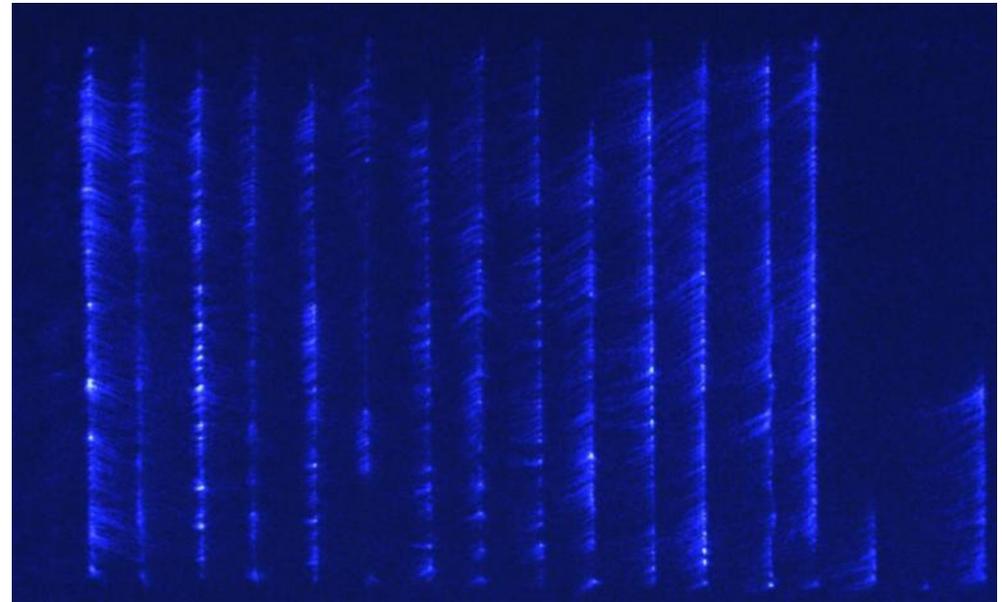
除了光强之外，加工速度也是影响激光直写加工效果的关键参数。为了深入理解加工速度对加工质量的具体影响，我们在实验中固定了激光的加工功率为 501.6 微瓦，并系统地调整了加工速度。

起始点是 $10\mu\text{m/s}$ 的加工速度，并且每次增加 $10\mu\text{m/s}$ 。随着加工速度的提高，我们注意到一些中空结构意外地变得**更加粗糙**，而在本应形成纹理的加工区域，折射率的改变也并未如预期那样发生。

加工速度提升



卤钨灯照射观测结果

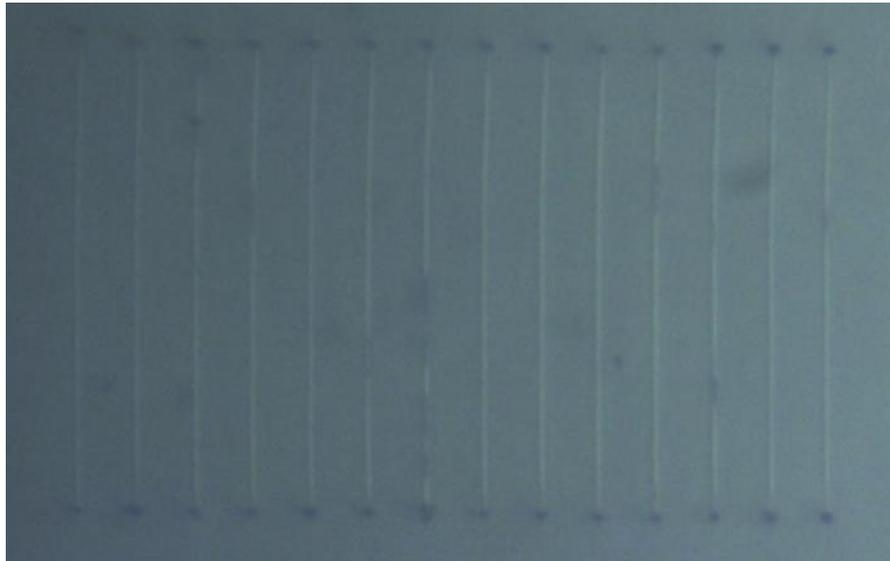


激光照射观测结果

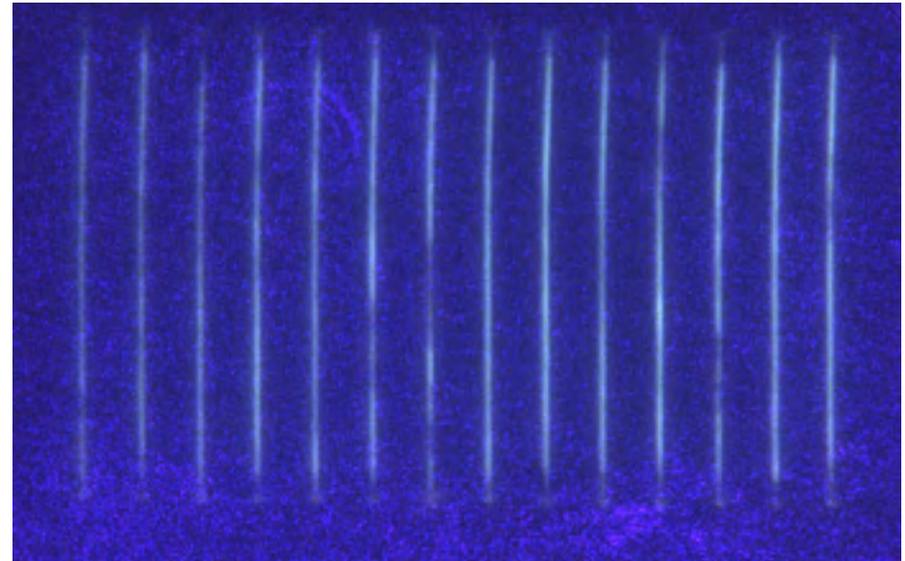
· 折射率光栅-加工刻写

在完成了对折射率加工临界条件的深入研究之后，我们进一步探索了利用折射率变化进行光栅加工的可能性，而不是采用传统的内部纹理刻写方法。设定光强为 $280.5 \mu\text{W}$ ，加工速度为 $10 \mu\text{m/s}$ ，加工深度为 0.37 mm 。

对于光栅的设计参数，我们设定了光栅的长度为 0.2 mm ，间距为 0.02 mm ，厚度为 0.02 mm ，即在 0.02 mm 的厚度内刻写了三层光栅。可以看出，三层的加工效果极好，相比于单层的基本必须借助激光进行观察，三层结果已经可以通过白光进行观察，在激光衍射下加工纹理也十分均匀，应当可以产生明显的衍射效果。



白光照射观测结果



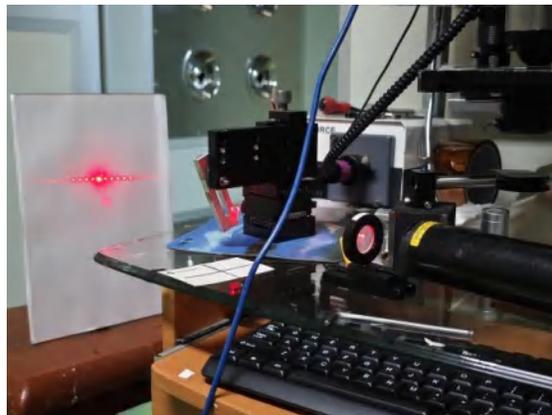
激光照射观测结果

· 折射率光栅-光学表征

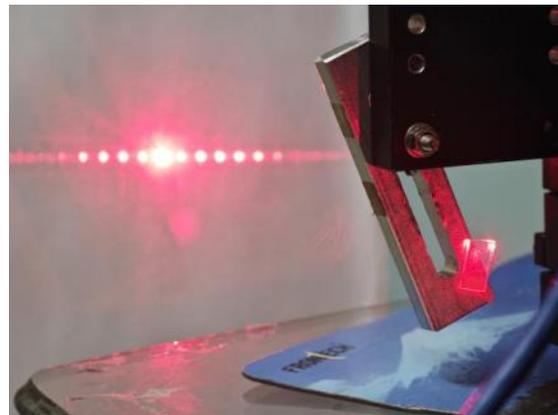
为评估折射率光栅的效果，我们利用 He-Ne 激光器聚焦后进行照射，保证入射光集中到光栅区域。调整相机的曝光时间，获取背景光较暗的主要衍射图案以及背景光较亮的细节衍射图案。

可以看出，此时衍射结果十分明显，衍射高级次的结果也可以观测到，并且光强都较高，毛刺较少，证明了诱导折射率变化能够很好地制造光学器件。

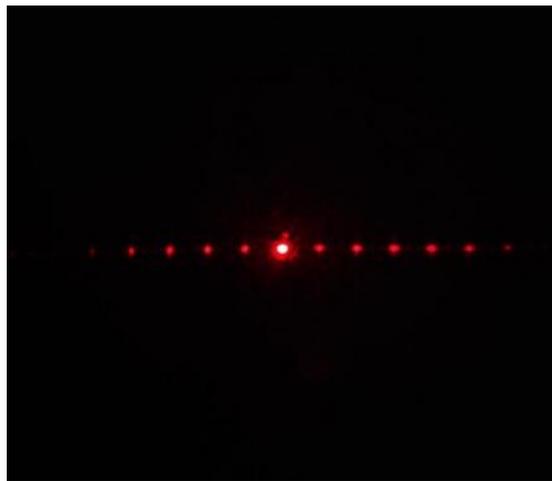
除了横向的衍射级次，在提高光强后我们也能观测到竖向的一个较小周期的衍射级次，经过推测，这可能是由于光栅两侧均匀的斑点（此斑点是为人为刻写，为找到光栅位置）所连成的线产生的。



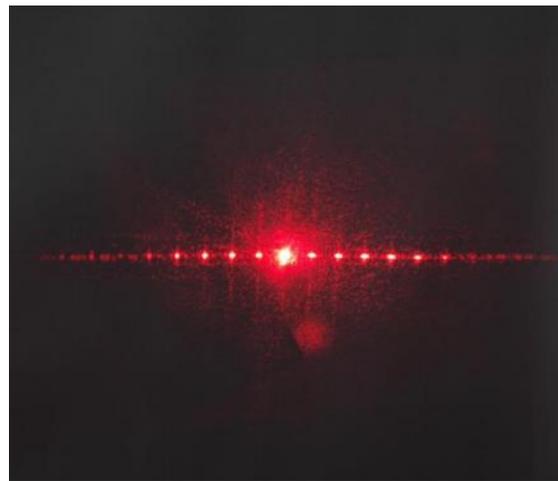
实验全局演示



实验局部演示



衍射结果(暗)

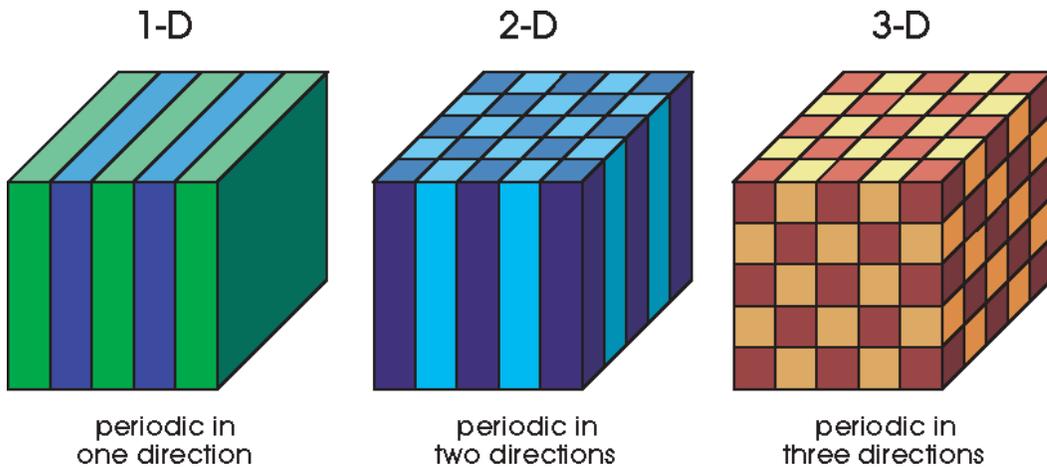


衍射结果(亮)

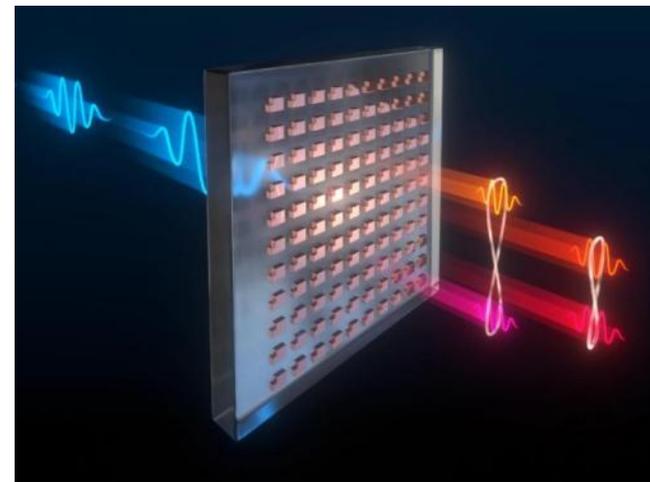
· 项目前景展望

综上所述，飞秒激光在柔性材料内部直写加工具有**高精度**和**极小热损伤**的特点，我们可以在未来研究更多不同的材料的特性，同时进一步优化激光参数，如**激光功率**、**扫描速度**、**聚焦深度**等，实现更高的加工质量。

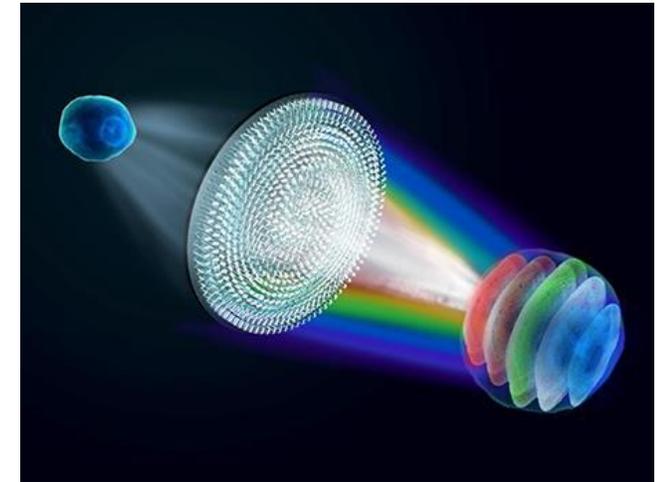
与此同时，我们在本次实验中只研究了最简单的体布拉格光栅的特性，并且借助诱导折射率改变的**优良加工特性**，在未来我们可以尝试实现更多三维结构，如高精度的**微透镜阵列**、**光子晶体**、**超表面**等创新器件。



光子晶体^[6]



超表面



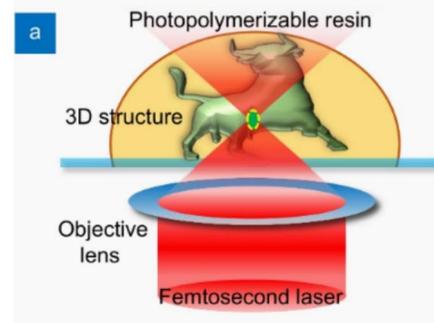
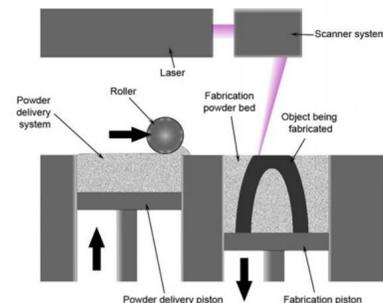
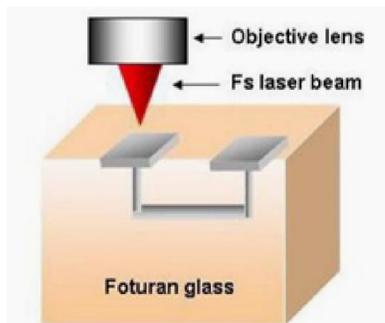
超透镜



· 总结

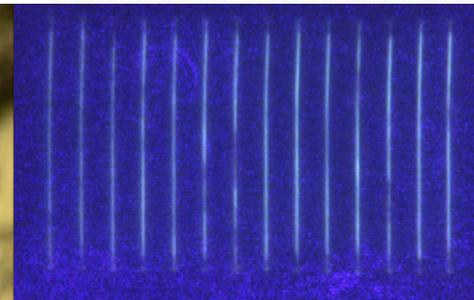
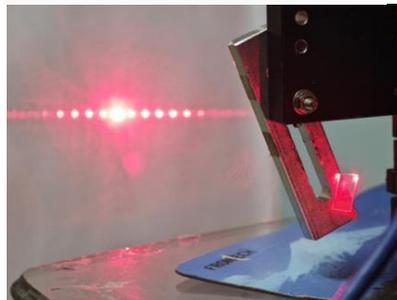
1

课题理论：加工理论清晰，课题方向前沿。



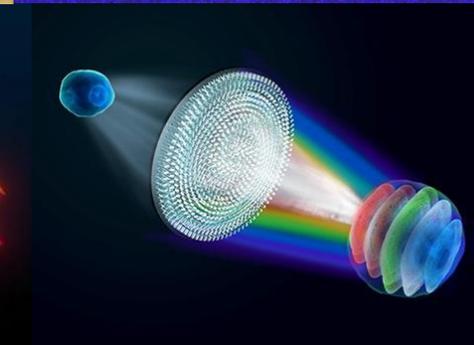
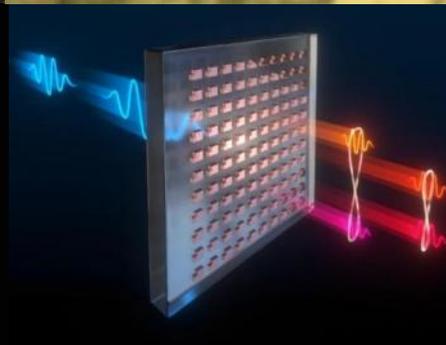
2

实验基础：实验设备完善，研究基础完备。



3

研究成果：成果丰富，实验效果十分明显。



4

前景展望：研究前景广泛，应用价值高。



中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY

谢谢老师

中山大学物理学院



组员：路尚润、邓逸枫、赵宁

2024年11月4日

• References

- [1] Shirazi S F S ,Gharehkhani S ,Mehrali M , et al.A review on powder-based additive manufacturing for tissue engineering: selective laser sintering and inkjet 3D printing[J].Science and Technology of Advanced Materials,2015,16(3):033502- 033502.
- [2]赵圆圆, 金峰, 董贤子, 等. 飞秒激光双光子聚合三维微纳结构加工技术 [J]. 光电工程, 2023, 50(3): 220048.
- [3] Minhua He,Li Guan, Duanming Zhang Advances in Condensed Matter Physics 凝聚态物理学进展, 2013, 2, 42-50
- [4] 燕超月, 孙盛芝, 刘小峰, 等. 飞秒激光减材法制备透明材料内部三维微纳连通结构研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(21):2100001.
- [5] 李凡. 聚酯型热塑性聚氨酯弹性体的制备及阻尼性能. 高分子材料科学与工程[J]. 2007(3).
- [6] Joannopoulos, John D. et al. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light - Second Edition[M].2008.