

基于光压原理的微堆积制造技术

陈立峰 张人佶[†]

(清华大学机械工程系 北京 100084)

摘要 使用光力和光压来引导微粒进行输运并在确定空间位置进行排列和堆积,可以构造二维或者三维的微结构,成为一种新的制造技术,其中也包括了激光引导直写技术.这是将直写技术和快速原型制造技术相结合而取得的最新进展.文章介绍了利用光压来引导材料进行微制造的基本原理和研究进展,阐述了其中的关键技术和应用前景.

关键词 光压,光力,直写,堆积,微制造

Micro-accumulative manufacturing technology based on optical pressure

CHEN Li-Feng ZHANG Ren-Ji[†]

(Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Optical forces and optical pressure could be used to guide and transport different kinds of micron-sized particles, and array or accumulate them to build 2D/3D microstructures, which represents a new approach of micro-manufacturing. The so called laser-guided direct writing technology is also included. This combines the enabling technologies and rapid prototyping manufacturing technologies, and has been explored widely. The principle of this technology, recent research, the key points and application prospects are reviewed.

Key words optical pressure, optical force, direct writing, accumulate, micro manufacturing

1 引言

我国两院院士评出的2002年世界十大科技新闻中,有一项是德国科学家使用高频激光打开“细胞之门”^[1],这是激光技术应用于生物学研究领域的新进展.激光具有亮度高、单色性好的特点,目前激光的应用以利用激光的热效应和化学效应为主,德国科学家的这个进展就是利用了飞秒激光的瞬间热效应对细胞进行打孔的微操作.同样,在制造领域,激光加工也主要利用的是这两种效应.

20世纪70年代,贝尔实验室的Ashkin提出了光力的概念,并将其用于微米尺寸粒子的捕获和操纵^[2].由于光力具有非接触的特点,可用来操作活的生物粒子,如细胞、病毒、蛋白质片断等,具有特殊的意义,从而激光的又一个重要的效应——力效应(或称机械效应)被广泛研究并以光镊的形式实现

了商品化.光镊技术的重要目标之一是单个微粒的操纵.近年来有人提出可以使用光力和光压来引导微粒进行输运并在确定空间位置进行定位、排列或堆积,进而构造二维或者三维的微结构,这样就有可能利用光力进行微制造,成为激光在制造领域应用的新方向.

2 光压与微制造

光压作为光力之一,其理论根源是麦克斯韦电磁理论.1970年,Ashkin指出微粒在光场中受到光场梯度力和辐射压力(光压)两种力,进行了水中悬浮的乳胶微球在高斯激光束中运动的实验^[2].光具有粒子性,光束在物体表面反射的过程可看作光子

* 国家自然科学基金青年基金(批准号 50105008)资助项目
2003-04-08 收到初稿 2003-06-17 修回

[†] 通讯联系人. E-mail zhangrj@mail.tsinghua.edu.cn

与物体表面发生碰撞,这样物体必然受到一个入射光束方向的冲量,这就是光压的来源.简单推导得到光压压力的大小为 $F = \frac{2qP}{c}$,其中 P 为照射光的功率, q 为物体表面对光的有效反射系数, c 为光速.据估算,功率 $P = 1\text{W}$ 、波长 $\lambda = 0.5145\mu\text{m}$ 的连续氩激光,入射到半径约等于激光波长、密度等于水的电介质微粒时,若有效反射率为 10%,则光压大约为 660pN .小球受力的加速度为 $1.2 \times 10^6\text{m/s}^2$,大约是重力加速度的 10 万倍,相应的实验测得水中悬浮的小球速度为 $26 \pm 5\mu\text{m/s}$,对于微米或亚微米尺度的粒子,这个数量级的作用力和运动速度具有重要的意义.

研究人员利用激光的光场梯度力和光压构造了三维光阱,发展出对活生物粒子进行捕获和操纵的光镊技术^[3,4],光镊与光刀结合在一起成为生物学基础研究的一种重要手段并取得商品化.光镊技术的相关研究在许多文献中已有广泛的总结^[5-7].

可以设想,利用光压对微粒材料的操纵能力,可以用装配的方法来制造具有精细复杂结构的实体.这方面的研究报道近年来已经逐渐增多,出现了一些激动人心的成果.实现这种装配的技术大致包括三种.首先是直接借助商品化光镊的光压和光力控制单个材料质点,从而进行组装制造;其次是在光镊基础上发展出来的激光引导直写(laser-guided direct writing, LGDW)技术;第三种方法则利用脉冲激光的光压将附着在“色带”上的材料质点“打印”到基底上实现微结构的制造,称为基材辅助脉冲激光蒸发直写(matrix-assisted pulsed laser evaporation direct writing, MAPLE DW).

直接用光镊来组装细胞“盖房子”的方法(如 2000 年哈佛大学直接使用光镊搬运单个细胞,将活细胞“装”成简单的三维形状体^[8])目前尚停留在生物学基础研究领域的实验水平.而 LGDW 和 MAPLE DW 两种方法由于采用了“材料直写”的思路从而能对材料微粒进行大吞吐量的操作,真正体现了制造的观点.下面分别介绍这两种技术的原理和研究进展.

3 激光引导直写(LGDW)

激光引导直写方法由密歇根理工大学的 Renn 等人首先提出^[9].他注意到在光镊技术中,为了捕获粒子,一般使用大数值孔径的透镜来造成很大的光强梯度,以此产生足够大的梯度力来抵消粒子所

受的辐射压力、重力及其他因素造成的力,比如流体的浮力、扰动等等,这样实际操作区域仅限于聚焦光束的焦点附近的很小范围,输运和直写粒子的过程将会极其冗长低效.为了实现多个粒子的连续输运,他提出改用低 NA(数值孔径)数值的透镜来聚焦,一方面光强梯度把粒子捕获在光束轴心,另一方面光压把粒子在光轴上向前推进.图 1 显示了激光引导直写的原理.数百毫瓦功率的激光束被透镜聚焦(数值孔径一般小于 0.1)后耦合进入空心光纤,悬浮于粒子源腔内的微粒在聚焦光场内同时受到指向光轴轴心的光场梯度力和沿光束传播方向的光压力,它们被捕获在光轴上,在光束的引导下通过空心光纤输运到底板上沉积,当底板受控运动时即可得到需要的图形.对于大部分粒子,在输运的同时因光束加热发生熔化,在底板上沉积的时候发生粘接,从而堆积形成结构.空心光纤不但帮助粒子流抵抗流体的对流和扰动,而且还降低激光在媒质中的衰减,增大输运距离.

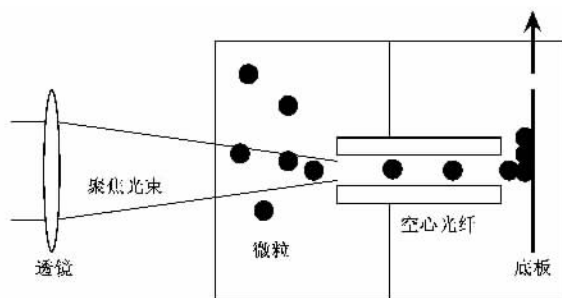


图 1 激光引导直写原理

实验表明,不同介质环境中的多种材料的粒子均可被用于这种方法,如液体中悬浮直写的有 SiO_2 、聚苯乙烯、Ge、Si、Au、Al/ AlO_2 ,气体中的有 NaCl、KI、 SiO_2 、CdS、Au 等材料,所使用的基底材料包括玻璃、塑料和半导体等等.图 2 分别是 Renn 完成的氯化钠粒子在水中和硝酸银粒子在大气中的沉积实验结果^[9],其中两种粒子的直径均为 $1\mu\text{m}$,图 2(b)图硝酸银梯子的线宽为 $10\mu\text{m}$,可见这种直写方法具有很强的构造微米尺度特征的加工能力.另外,对比这两个实验还能看出,环境介质的不同对沉积速度的影响很大,氯化钠在水中的沉积速率是每秒一百个左右,而大气环境中的硝酸银则超过一万个,大致可以认为介质的折射率和粘度两个性质是最主要的影响因素.

除此以外,如果采用合适的激光波长和功率,激光引导直写技术还可以对一些活的生物粒子进行操

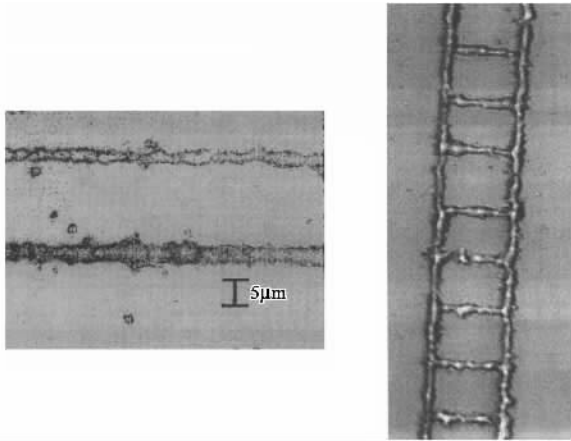


图2 激光引导直写结果实例^[9]

作,比如活细胞、病毒、蛋白质片段等等。明尼苏达大学的 Odde 首先进行了这种实验^[10],使用 800nm/450mW 的单横模激光将直径 9μm 的活的小鸡胚胎脊髓神经细胞通过 7mm 的空心光纤沉积到玻璃基底上。沉积的细胞成活并长出突触。

国际上从事这项研究的还有日本大阪大学^[11]、美国克莱姆森大学和英国巴斯大学,国内清华大学也将此技术与堆积成形原理相结合^[12],已取得初步实验结果。

4 MAPLE DW 技术

MAPLE DW 技术由美国海军研究实验室(Naval Research Laboratory)的 Chrisey 提出^[13],结合了激光诱导传输(laser-induced forward transfer, LIFT)与基材辅助脉冲激光蒸发(matrix-assisted pulsed laser evaporation, MAPLE)两种技术。LIFT 是表面工程领域的一种新技术,利用激光的光压将透明支持物上面附着材料运输到距离很近的物体表面;MAPLE 则利用脉冲准分子激光来照射低温下、固态的、溶有有机分子材料的挥发性溶剂使其挥发,溶剂中的有机溶质沉积在基底上。工作原理如图 3 所示。

需要沉积的材料与添加剂溶解在挥发性溶剂中,溶液在低温下固化并涂敷在透明带状材料上面制成连续的料带置于沉积基底的上面,脉冲激光经过聚焦照射到料带上,溶剂挥发,有机溶质释放出来(MAPLE 工作机制),有机溶质在激光光压的作用下沉积到基底表面(LIFT 工作机制)。料带不断送进,基底受控运动时即可获得任意的二维或准三维微结构,整个工作工程与针式打印机以金属针头机械打击色带在纸上打印图案非常类似。这种工艺可

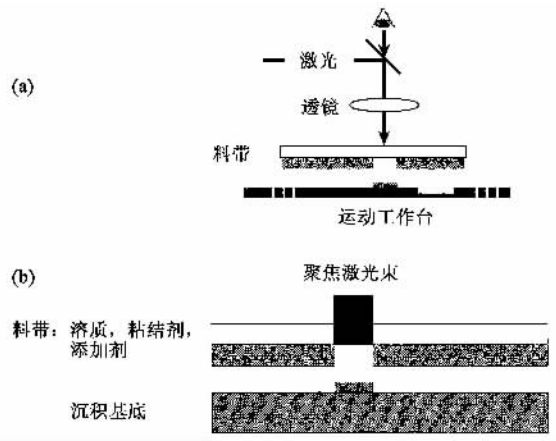


图3 MAPLE DW 原理

在室温空气环境下进行,最直接的应用是在平面或非平面基底上制作有源或无源的电路元件原型,加工精度可达到 10μm 或甚至更高。图 4(a)(b)(c)是这种方法制作的一些电路元件样品。

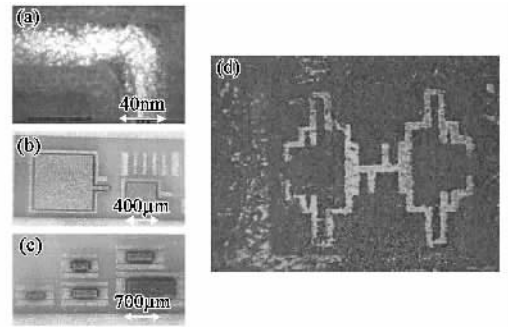


图4 MAPLE DW 样品^[13,14]

(a)金导线 (b)BaTiO₃ 电容 (c)镍铬铁合金电阻 (d)工蜂腹部的电磁天线

这种直写沉积过程不需要苛刻的环境条件,可以方便的用于多种材料的基底上。值得一提的是可以直接在生物活体上面进行材料的沉积。图 4(c)显示的是采用这种技术在工蜂腹部上制作的一个电磁天线,为利用昆虫来进行危险地区的毒气检测等工作开辟了新的道路^[14]。

MAPLE DW 方法巧妙地将最新的直写技术与快速原型(rapid prototyping, RP)开发方法相结合,体现了当前光压应用于微制造领域的最高水平。加州大学伯克利分校的研究人员也在进行用超短脉冲准分子激光沉积金属和氧化物制作微结构的相关研究^[15],国内尚无这方面的工作报道。

5 发展与应用前景

光压的应用提供了一种新的非接触式材料直写方法. 直写是指通过运输微观尺度的材料单元到达平面上指定的点进行有序排列, 从而形成二维图案的一类技术, 大多使用微机械操作方法或者采用高能束, 利用微尺度物质运输和相互作用过程中的一些特殊性, 在计算机的控制下对多种材料进行组织和沉积, 形成平面物理图形或图像. 对比传统的平面光刻加工方法, 直写是一个材料受控有序添加的过程, 而不是去除方法, 这恰恰也是离散/堆积制造的基本思路, 因此两者结合形成的新的制造工艺, 能对多种材料和特殊材料进行操作. 构造器件的材料梯度与内部细微结构, 还可以应用于生物医学领域等对生物活性材料及细胞(簇)的加工, 具有高度的个性化成形特点和工艺柔性^[12]. 可期望的应用前景包括:

(1) 微电子电路、电子元器件的快速原型制造. 各种有源或无源的电子元器件都可能通过这类制造方法来制作快速原型, 提供开发和测试的物理条件.

(2) 多种材料耦合的微机械结构制造. 目前包括金属(如金)、半导体、聚合物、动物细胞、硅藻、细菌和微管等微观粒子都已经用 LGDW 技术实现了成功堆积, 用直写或者堆积的方法将生物活性粒子和电子材料集成到一个芯片上完全是可能的.

(3) 组织工程活细胞在支架上的定位. 细胞在培养时, 载体框架的三维结构具有很重要的影响, 实验证明该结构越接近人体组织的结构越好, 这种制造方式提供了细胞在三维结构上沉积活细胞的可能.

(4) 生物学研究中微小有生命活体的细胞(细胞簇)或者细胞/材料复合体的二维或准三维排列堆积, 为细胞生物学的基础研究提供了新的实验手段.

作为一种材料操作手段, 基于光压的直写技术和制造方法刚刚开始研究, 其发展还存在许多关键性的技术问题需要解决, 这些问题大致包括:

(1) 激光辐照效应的机理及控制. 材料在激光辐照下, 理化性质和生化性质都可能发生变化, 这些变化可能有利于工艺, 也可能破坏材料本身或影响堆积过程.

(2) 光压操作抗干扰保持稳定的能力和输运效率的提高. 离散单元的数量与其尺寸的三次方成反比, 当材料单元尺度降低到微米量级时, 加工效率会

大大降低, 提高其吞吐量是个重要问题, 而当吞吐量加大时, 过程的干扰因素往往增多, 进行流量控制和响应速度的控制难度会增加.

(3) 微粒之间形成连接的机理与实现. 材料在堆积耦合过程中一般伴随相变等物理、化学过程或生物反应等, 保持材料组分的功能性状、生物活性和保证材料单元的结合强度在许多情况下是一对矛盾. 这个问题除了材料本性之外, 跟结合的界面、结构的设计和加工工艺的参数都有关系. 在微尺度条件下, 热现象和流体的毛细现象会是重要影响因素, 需要对工艺机械进行热力学的分析.

(4) 质点通过累加形成结构的信息过程研究与相应数据模型的建立. 零件和结构由微尺度的材料点堆积而成, 几何上可视为由不同直径密排球体所构成形体的包络, 光压操纵粒子进行堆积的过程具有很大的随机性, 因此要求用统计方法来估测堆积形态, 并利用这种估测反馈给使能环节来控制直写过程.

基于光压的制造是一种激光物理、材料加工以及其他多学科交叉的高新技术, 随着更多不同学科背景的研究人员的加入, 有理由相信, 这种独特的技术将逐步完善, 成为一种新的科学研究基本手段和工程化的制造方法.

参 考 文 献

- [1] Uday K Tirlapur, Karsten Konig. *Nature*, 2002, 418: 290
- [2] Ashkin A. *Phys. Rev. Lett.*, 1970, 24: 156
- [3] Ashkin A, Dziedzic J M. *Science*, 1987, 235: 1517
- [4] Ashkin A, Dziedzic J M, Yamane T. *Nature*, 1987, 330: 769
- [5] Karel Sloboda. *Annual Review of Biophysics And Biomolecular Structure*, 1994, 23: 247
- [6] Ashkin A. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, 6: 841
- [7] 吉望西. *物理*, 1996, 25: 707 [Ji W X. *Physics*, 1996, 25: 707 (in Chinese)]
- [8] Holmlin R E, Schiavoni M, Chen C Y *et al.* *Angewandte Chemie International Edition*, 2000, 39: 3503
- [9] Renn M J, Pastel R. *Journal of Vacuum Science & Technology B.*, 1998, 16: 3859
- [10] Odde D J, Renn M J. *Biotechnology and Bioengineering*, 2000, 67: 312
- [11] Kawata S, Tani T. *Optics Letters*, 1996, 12: 1768
- [12] 陈立峰, 颜永年. *中国机械工程*, 2003, 14(1): 82 [Chen L F, Yan Y N. *Chinese Mechanical Engineering*, 14(1): 82 (in Chinese)]
- [13] Chrisey D B, Piqué A, Fitz - Gerald J *et al.* *Applied Surface Science*, 2000, 154 - 155: 593
- [14] Chrisey D, Piqué A, Fitz - Gerald J *et al.* *Laser Focus World*, 2000, September: 113
- [15] Zergioti I, Mailis S, Yainos N A *et al.* *Applied Physics A Materials Science & Processing*, 1998, 66: 579