

文章编号: 1001-3806(2002)06-0421-04

激光抛光技术的发展与展望*

江超 王又青 胡少六

(华中科技大学激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074)

摘要: 介绍激光抛光技术的发展历史, 阐明激光抛光的应用现状及未来的发展前景, 论述了激光抛光的工艺特点和作用机理, 将激光抛光技术与其它抛光技术进行了全面的对比, 指出激光抛光的优势及其存在的问题。

关键词: 激光抛光; 热抛光; 冷抛光; 消融

中图分类号: TN249; TG356.28 **文献标识码:** A

Development and expectation of laser polishing technology

Jiang Chao, Wang Youqing, Hu Shaoliu

(National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: The developing procedure of laser polishing technology is presented in this paper. The current situation of laser polishing and future perspective is also clarified. The emphasis is focused on the characteristics of laser polishing process and its interacting mechanism. The comparisons of laser polishing with other polishing techniques are performed roundly and deeply. The advantages of laser polishing are summed up and its problems are put forward.

Key words: laser polishing; thermal polishing; cooling polishing; ablation

引言

随着材料表面技术的发展, 表面抛光技术成为了一个越来越重要的技术。抛光技术: 又称镜面加工技术, 是制造平坦而且加工变形层很小, 没有擦痕的面加工工艺。在工业应用中, 对材料表面粗糙度的要求越来越高, 已经从微米级 亚微米级 纳米级 亚纳米级。为了满足应用的需要, 已经有多种抛光技术被应用在工业生产中。抛光技术有: 机械抛光、超声波抛光、化学抛光、离子束抛光、电解抛光、流体抛光、磁研磨抛光等^[1,2]。这些抛光技术在电子设备、精密机械、仪器仪表、光学元件、医疗器械等领域得到广泛的应用。在这里介绍一种最近几年出现的新型抛光技术——激光抛光技术, 激光抛光技术是 21 世纪最有发展前景和最有效的抛光技术之一。在综合归纳的基础上, 对激光抛光技术的发展历史、作用机理和工艺技术、应用现状、发展前景、优缺点及有待于解决的问题进行了全面系统的论述。

1 激光抛光技术的发展

自 1964 年 ~ 1965 年相继发明了 CO₂ 激光器、YAG 激光器后, 激光器在工业上的应用变成了可能。随着激光这种新能源的获得, 材料加工的领域被大大拓宽, 其中材料表面的激光处理就是激光应用的重要方面之一。材料表面的激光处理主要集中在: 材料表面激光相变硬化、激光合金化与涂覆、激光表面非晶化和微晶化、冲击硬化及激光对材料的表面改性等。近年来, 随着材料科学, 特别是材料表面科学的发展, 激光器在材料科学中的应用得到进一步的拓宽, 更由于工业应用中对材料表面的光洁度的要求越来越高, 人们不断探索新的抛光技术, 由于激光独特的性质, 激光抛光技术出现了。刚开始, 人们利用 CO₂ 激光器、YAG 激光器等连续激光器, 对一些材料进行了表面抛光的研究, 得到了比较好的符合要求的光滑面, 但容易在表面产生少量的裂纹。现在研究人员把重点放在短波长准分子激光器和短脉冲的飞秒脉冲激光器上, 利用它们抛光不易产生裂纹, 抛光的效果更好。从 90 年代中期以来, 在美国、俄罗斯、德国和日本等国家, 广泛开展了金刚石薄膜的激光抛光^[3~6]研究, 已经得到了纳米级的表面粗糙度; 近年来, 日本大阪大学激光研究院的

* 教育部高等学校骨干教师资助项目。

作者简介: 江超, 男, 1961 年 1 月出生。硕士研究生, 讲师。现从事激光加工与应用方面的研究。

收稿日期: 2002-01-08; 收到修改稿日期: 2002-03-12

研究人员选用 193nm 烧蚀波长和 PMMA (光学材料) 组配获得高的表面光滑度,使其表面误差下降到只有 0.17。现在激光抛光已经在金刚石薄膜、高分子聚合物、陶瓷、半导体、光学元件、金属、绝缘体等得到广泛的研究^[7]。

2 激光抛光的机理、工艺技术及特点的概述

2.1 激光抛光的机理

激光抛光本质上就是激光与材料表面相互作用,它遵从激光与材料作用的普遍规律。激光与材料的相互作用主要有两种效果:热作用和光化学作用。根据激光与材料的作用机理,可把激光抛光简单分为两类:一类为热抛光,另一类为冷抛光。热抛光一般用连续长波长激光,抛光时主要用波长为 1.06 μm 的 YAG 激光器和波长 10.6 μm 的 CO₂ 激光器,作用的机理是激光与材料相互作用的热效应,通过熔化、蒸发等过程来去除材料表面的成分,因此,只要材料的热物理性质好,都可用它来进行抛光。Udrea 等人^[7]利用一台 10W、功率密度为 140W/cm² 的单模纵流连续 CO₂ 激光器,对光纤的端表面进行了抛光,使表面粗糙度从 3 μm 减少到 100nm。但是,这些红外波段的激光在材料表面抛光过程中,由于热效应,温度梯度大产生的热应力大,容易产生裂纹,效果不是很好,抛光达到的级别不是很高。冷抛光一般用短脉冲短波长激光,抛光时主要用紫外准分子激光器或飞秒脉冲激光器。飞秒激光器有很窄的脉冲宽度,它和材料作用时几乎不产生热效应^[8]。准分子激光波长短,属于紫外和深紫外光谱段,有强的脉冲能量和光子能量、高的重复频率、窄的脉冲宽度。大多数的金属和非金属材料对紫外光有强烈的吸收系数。冷抛光主要是通过“消融”作用,即光化学分解作用。作用的机理是“单光子吸收”或“多光子吸收”,材料吸收光子后,材料中的化学键被打断或者晶格结构被破坏,材料中成分被剥离^[9,10]。在抛光过程中,热效应可以忽略,热应力很小,不产生裂纹,不影响周围材料,材料去除量易控制,所以,特别适合精密抛光,尤其适合硬脆材料。冷抛光能完成激光热抛光不能完成的一些工作,因此,在微细抛光、硬脆性材料和高分子材料抛光等方面具有无法比拟的优越性。Folwaczny 等人^[11]利用 308nm 的 XeCl 准分子激光对瓷器表面进行了抛光的研究,使表面粗糙度从 4.14 μm 减少到了 1.13 μm 。Gloor 等人^[4]利用 193nm 的 ArF 准分子激光对金刚石薄膜进行了抛光,使表面粗糙度从

3.6 μm 减少到了 1 μm 左右。

2.2 激光抛光的工艺技术概述

2.2.1 激光抛光系统的主要构成 激光在对不同的材料进行抛光时,系统是有些差别的,但是系统的主要构成有:激光器、光束均匀器、面形检测反馈系统、三维工作台、计算机控制系统。激光抛光通常采用两种方法:一种是激光光束固定不动,工作台带动工件运动;另一种是工作台和工件不动,光束根据要求运动。用连续激光抛光时,激光作用在材料表面检测设备跟踪检测,实时反馈控制决定每个微小部分作用时间(或扫描速度)或控制变焦聚焦系统来改变激光功率密度。用脉冲激光抛光时,激光作用在材料表面检测设备跟踪检测,实时反馈控制决定每个微小部分作用的脉冲个数或者控制变焦聚焦系统来改变激光的能量密度。在激光抛光过程中,检测技术和实时反馈控制技术是关键,在很大程度上决定了抛光的等级。

2.2.2 激光抛光的主要工艺参数 主要有激光功率密度(或者能量密度)阈值、光束质量、波长、脉冲宽度、初始条件、光束的入射方向等。抛光时,激光功率密度阈值与激光和材料的性质有关,对于激光“热抛光”,材料的热吸收系数严重影响抛光的功率密度阈值和抛光效率;对于激光“冷抛光”,材料的能级结构与激光光子能量大小严重影响抛光的功率密度阈值和抛光效率。激光光束质量对抛光的质量影响很大,在抛光时,一般采用基模激光抛光,很少用高阶模。即使是基模光束还要进行整形,使作用在材料表面的激光能量分布为均匀分布,抛光的效果就更好。对于基模高斯光束或者矩形分布光束的整形,用一种特制的玻导管可以得到比较好的均匀分布的光束。理论上各种波长激光都能够用于抛光,但是在实际应用中,为了达到高的抛光级别,一般波长越短越好。如果是采用脉冲激光,那么一般是脉宽越窄越好,现在,研究人员已经在用飞秒脉冲激光进行抛光研究。对于晶体的抛光还要考虑激光光束入射方向,应该沿着晶体的某一个生长方向,这样抛光的效果会更好。应该注意到抛光的质量还与材料初始条件有很大的关系,对于粗抛光和精抛光,它们在工艺上的要求是有差别的,光束的扫描速度是不同的。激光抛光的效率针对不同的方式有差异,对于激光热抛光,由于是热作用,效率比较高;对于激光冷抛光,由于是光化学分解作用,效率相对要低些。根据具体的情况,在抛光时,增加一些外部条件(如:辅助气体、加温、加压等),抛光效果将会更好。

2.3 激光抛光的特点

激光有 4 大特性:单色性、相干性、方向性和高能量密度。这些性质使激光在加工方面具有独特的优势,激光可经聚焦产生巨大的功率密度(或能量密度),这使激光抛光成为了可能。激光抛光有以下特点:(1)它是非接触式抛光,接触式抛光在样品上施加了外力,样品在外力下容易破裂;而非接触式激光抛光则不会对样品施加任何压力;(2)激光抛光有很高的灵活性,它不仅能对平面进行抛光,还由于激光抛光是非接触式加工,故运用计算机三维控制能够

对各种曲面进行抛光,如是对称曲面效果则更好,激光能够抛光的面形有:平面、球面、椭球面、抛物面等;(3)抛光样品时,不需要其它的辅助药剂,故对环境的污染很小;(4)可以实现精密的抛光;材料表面经激光抛光后可以达到纳米级,甚至亚纳米级;(5)特别适合超硬材料和脆性材料粗抛光后的精抛光;(6)可实现微细抛光,对选定的微小区域进行局部抛光;(7)抛光需要的工作环境比较简单,一般在室温下进行,不需要特殊的工作环境。表 1 给出了激光抛光与其它抛光技术的比较。

表 1 激光抛光与其它主要抛光技术的对比情况^[13-15]

名称	机理	能够抛光的面形	温度	特殊环境要求	环境污染	设备成本	样品尺寸要求	抛光时间	最高粗糙度等级	抛光费用	表面污染
激光抛光	烧蚀	平面、曲面	室温	无	没有	高	无	较短	纳米级	中等	有
机械抛光	磨蚀	平面	室温	无	有	低	无	长	纳米级	低	有
超声波抛光	磨削	平面	室温	有	有	低	有	长	纳米级	低	有
离子束抛光	溅射刻蚀	平面、曲面	室温	有	没有	高	有	长	亚纳米级	高	有
化学抛光	氧化	平面	高温	无	有	低	有	短	纳米级	低	有

3 激光抛光技术的应用前景

近年来,日本、德国、美国、俄罗斯、韩国等许多国家都在积极开展激光抛光技术的研究。他们采用新的技术,对多种材料进行研究,不断有新的研究成果报道。因此,激光抛光的研究是很有意义也是很有必要的。特别是在下面几个方面的应用前景诱人。首先,在强激光武器系统中晶体输出窗口(透过率要求达 99% 以上)和全反镜(反射率要求达 99% 以上)的抛光。激光输出窗口是石英、金刚石或类金刚石材料、白宝石材料等;全反镜通常采用硅反射镜, SiC, CN, Al₂O₃ 或 AlN 等材料也被认为是很好的全反镜材料。这些材料共同点是硬度较高,镜面加工比较困难。传统的机械抛光加工过程是抛光拆卸清洗面形测量装夹再抛光……循环往复,直至光洁度达到要求为止。这一过程非常费时,如一块白宝石窗口所需加工时间就长达数月,探索新的抛光技术非常必要。1999 年, Gloor 等人^[4]利用 193nm 的 ArF 准分子激光对红外窗口的金刚石薄膜进行了抛光^[3],使表面粗糙度从 3.6 μ m 减少到了 1 μ m 左右,达到了使用的要求,研究结果如图 1 所示。最近,韩国三星综合技术研究院的科学家采用一项保密技术将平均粗糙度大于 1 μ m 的 MR-CVD 金刚石薄膜以 5 μ m/h 的速度抛光至 50nm。Pimenov^[6]等人则运用激光对金刚石片进行了抛光,

也得到了极高的光洁度。Folwaczny 等人^[11]利用 308nm 的 XeCl 准分子激光对瓷器表面进行了抛光的研究,使表面粗糙度从 4.14 μ m 减少到了 1.13 μ m,瓷器表面更加光滑漂亮。笔者也对纯度为 85% 的 Al₂O₃ 陶瓷片进行了抛光的研究,发现如果参数控制得恰当,能够使它的表面粗糙度变得更小。

因此,对这些硬脆材料的激光抛光研究,将会极大地推动强激光武器的发展。

另外,在激光核聚变中大量使用大尺寸高精度的光学镜片元件。这些大尺寸的光学元件,都

要求以 $\lambda/6$ 以下的波前像差制作,供装置使用。这些光学玻璃几乎都采用机械研磨工艺制作,而研磨工艺及波前检查、校正都很花费时间并要求熟练的操作,需要长制作周期和高成本^[16]。1999 年,日本 OSAKA 大学用准分子激光对 PMMA(光学材料)薄膜表面进行抛光处理^[17],不仅将平面镜波前像差从 3.0 降低到 0.17(峰谷值),将球面镜波前像差从 2.5 降低到 0.2(峰谷值),而且将表面面形修复

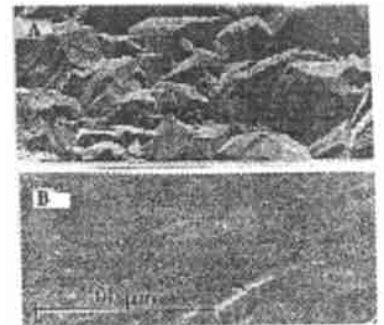


图 1 样品在 45 角度下的 SEM 图片
a - 表面生长的金刚石薄膜图片 b - 在空气中经过激光抛光和退火后表面图片

到近乎理想的形貌,他们还打算将该法用于二极管激光中微透镜的制造等。葡萄牙的 Liu^[18]等人运用 248nm 的 KrF 准分子激光器也对 PAMM 等光学材料的加工和抛光进行了研究,得到了很好的效果。因此,光学元件的激光抛光技术的发展将会很大程度地推动激光核聚变的发展。在光纤通信中,光纤连接及半导体激光器准直用的微透镜的抛光则是微细抛光。当这些光学元件的尺寸小于 1cm 时,加工、校正作业将很困难,用传统的抛光方法来完成有很大的难度^[16]。2000 年,Udrea 等人^[7]利用一台 10W 的单模纵流连续 CO₂ 激光器,功率密度为 140W/cm²,对光纤的连接端表面进行了抛光,使表面粗糙度从 3μm 减少到 100nm。如果激光抛光技术得到发展,就能够加工出更好的微光学元件,将会促进光纤通信的发展,从而产生巨大的经济效益。

总之,基于激光烧蚀的非接触式高精度激光抛光技术在这些方面有很大的应用前景。在激光抛光过程中,采用精密检测和反馈控制技术,原理上可以将抛光精度提高到测量界限。激光抛光在其它方面也有很好的应用前景,这里就不再赘述了。

4 结束语

激光抛光技术作为一项新技术,目前还处于发展阶段,在该领域还有许多工作要做。虽然激光抛光技术具有很多优点,但也存在一些问题。首先,设备的成本高、抛光的费用比较贵,这在一定程度上限制了该技术的发展。但随着激光器成本的降低,抛光工艺的进一步改进,这些问题会得到解决。其次,抛光过程中的检测技术和精密控制技术要求相当

高,且因相互之间的技术保密,为进一步发展增加了难度。再其次,如果利用激光对超硬材料表面进行抛光时,因为它比较适合材料粗抛光后的精抛光,所以如直接利用它对样品进行抛光,由于材料的剥离量小,效率就比较低,此时,一般是综合使用多种抛光方法。但是对其它的非超硬材料进行抛光时,则它既可以对材料进行粗抛光也可以进行精抛光。总之,激光抛光技术的发展会推动激光精密加工技术和激光微细加工技术的更快发展。

参考文献

- [1] 赵兴科,王中,郑玉峰 *et al.* 表面技术,2000,29(2):6~7.
- [2] 滕霖,任敬心. 航空精密制造技术,1996,32(3):5~8.
- [3] Mvan F. Diamond and Related Materials,2000,(9):925~928.
- [4] Goor S,Luthy W,Weber H P *et al.* Appl Surface Science,1999,138~139:135~139.
- [5] Cappelli E,Matei G,Orlando S *et al.* Diamond and Related Materials,1999,(8):257~261.
- [6] Pimenov S M,Kononenko V V,Ralccchenko V G *et al.* Appl Phys,1999,A69:81~88.
- [7] Udrea M,Orun H,Alaccakir A. Opt Engng,2001,40(9):2026.
- [8] 郑翠微,吉禾译. 激光与光电子进展,2001,423(3):10~15.
- [9] Stenzel E,Gogoll S,Sils J. Appl Surface Science,1997,109/110:162~167.
- [10] Pedraza A J. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B,1998,141:709~718.
- [11] Folwaczny,Mehl A,Haffner C *et al.* Dent Mater,1998,14:186.
- [12] Sun J,Zhang L C,Mai Y W *et al.* J Mater Processing Technol,2000,105:204~213.
- [13] 张恒大,刘敬明,宋建华 *et al.* 表面技术,2001,30(1):16.
- [14] 张峥,霍晓. 真空科学与技术,2000,20(4):270~274.
- [15] 郭钟宁,王成勇,张凤林 *et al.* 工具技术,1999,(11):3~7.
- [16] 马军山. 激光与光电子进展,2001,428(8):38~43.
- [17] Wallace J. Laser Focus World,1999(7):37~38.
- [18] Liu Z Q,Feng Y,Yi X S. Appl Surface Science,2000,165:303.

(上接第 410 页)

TEA CO₂ 激光器的温度特性进行了初步研究,在所涉及的温度范围内,激光器输出脉冲能量随环境温度的升高基本上呈线性下降的趋势。理论和实验均表明,TEA CO₂ 激光器输出脉冲能量随混合气体工作温度变化而变动非常明显。和室温(25℃)相比,当工作温度降到 0℃ 时,激光输出能量提高近 50%;而室温升高到 50℃ 时,激光输出能量下降近 50%。

在环境温度变化较大的场合,如野外,必须使激光器所处的小环境温度不随外界环境温度变化而发生变化,这时,就需要有恒温措施。

结果表明,降低激光工作气体的温度有利于提高输出脉冲能量,特别是在高功率 TEA CO₂ 激光器

的设计中,采用强制冷力的循环冷却液使激光混合气体在较低温度下运转更是值得采用的一项措施。

参考文献

- [1] Cohn D B,Hasselbeck M P,Affleck W H *et al.* SPIE,1989,1042:63~69.
- [2] 侯天晋,江东,郑从众 *et al.* 激光技术,1996,20(6):346~348.
- [3] Machetti R,Penco E,Salvetti G. Corona discharge preionizer for gas discharge. US Patent 4718072 Jan. 1988.
- [4] Sheng Y G,Wan Ch Y. Appl Laser,1999,19(4):151~153(in Chinese).
- [5] Smith K,Thomson R M. Computer modeling of gas laser. N Y: Plenum Press,1978.
- [6] Soukieh M,Ghani B A,Hammadi M. Opt & Laser Technol,1998,30:451~457.
- [7] Manes K R,Seguin H J. J A P,1972,32(12):5073~5078.