

准分子激光应用于铝合金和不锈钢微抛光的试验研究*

陈涛, 刘勋, 左铁钊

国家产学研激光技术中心, 北京工业大学激光工程研究院, 北京: 100022

摘要: 本论文对深紫外波段的 248nm KrF 准分子激光应用于铝合金 (7075) 和不锈钢 (304) 的微抛光进行了研究, 简要分析了激光微抛光的机理, 并且对合金材料进行试验研究, 探讨微抛光效果和激光参数之间的关系。试验中改变激光工作电压, 激光脉冲频率和激光脉冲数三个实验参数, 对抛光后的样品测量表面粗糙度。通过试验研究, 得到应用准分子激光对两种合金材料进行抛光时可达到的最小粗糙度。

关键词: 准分子激光, 激光抛光, 铝合金, 不锈钢

Research of Micro Polishing on Aluminum alloy and Stainless steel by Excimer laser

CHEN Tao, LIU Xun, ZUO Tiechuan

National Center of Laser Technology, Beijing University of Technology, College of Laser Engineering, Beijing: 100022

Abstract: Micro polishing of alloys by excimer laser was researched in this paper. The mechanics of laser micro polishing was analyzed and experiment on alloys was made for studying the relationship between polish's effects and laser's parameters. The laser source is 248nm KrF excimer laser. The alloys were Aluminum alloy 7075 and Stainless steel 304. Test materials were polished, with changing the laser working voltage, pulse frequency and pulse count, and their surface roughness were measured by profile meter. Through experiment, the maximal surface roughness could be obtained as for alloys in use.

Keywords: Excimer laser, Laser polishing, Aluminum alloy, Stainless steel

引言

抛光在近代加工技术发展是十分重要的工艺环节。随着工业化程度的提高和广义经济活动的加剧, 抛光工艺不断产生和丰富, 形成了针对不同材料和加工要求的多种方式。研磨抛光 (机械)、化学抛光、电解抛光、火焰抛光等等。已有的抛光方法中, 抛光液、磨料、磨具和加工工件都有接触, 这种接触一方面可能对材料产生机械变形和其他作用, 另一方面表面导致的污染物容易产生表面锈蚀、着色等化学影响, 需要进行镀膜等后续表面处理工艺。

激光抛光是随着激光技术的发展而出现的一种新型材料表面处理技术, 它是用一定能量密度和波长的激光束辐照特定材料, 使其表面薄层物质熔化或蒸发而获得光滑表面。激光抛光可以抛光传统方法很难或根本不可能抛光的、具有非常复杂形貌的表面, 是一种很有前途的新型材料加工技术。

激光微抛光技术的研究以激光对玻璃微抛光的研究作为开始。Y. M. Xiao and Michael Bass, 采用 300 CW CO₂ 激光对熔融石英和 Pyrex 玻璃进行抛光, 是激光抛光研究的较早报道^[1]。他们有意地用 600 号砂纸打磨 Pyrex 玻璃, 然后用光束直径是 11mm 的 CO₂ 激光进行照射。实验结果表明激光抛光可以对砂粒磨痕进行有效消除。西班牙学者 F. Laguarda 课题组同样采用 CO₂ 激光为抛光工具, 抛光光学材料 (TRC-33) 表面, RMS 方均根值从初始约 500nm 到最后低于 10nm^[2-4]。日本东海大学电子工程系 Masataka Murahara 等人采用了光化学辅助反应的抛光机理^[5], 采用 ArF 准分子激光通过石英片辐照在碳氟化合物基盘上。在他们报道中, 该方法获得的研磨粗糙度达到 1nm。土耳其安卡拉中东技术大学物理系 M. Udrer 等, 采用 10W CO₂ 激光对石英光纤的端面进行了抛光试验研究^[6]。在 140 W/cm² 参数下, 获得最佳辐照时间为 6 秒。最后获得了 300nm~1μm 的粗糙度。其采用原子力显微镜获得的照片结构表面熔化机理在抛光过程中是非常明显的。英国赫瑞特瓦特大学工程和理学院 Krzysztof M. Nowak 等, 也报道了采用 CO₂ 激光抛光石英光学元件的研究^[7]。我国华中科技大学和华南理工大学的科研人员, 也开展了激光抛光技术的相关研究^[8-9]。

在以上基础上, 我们使用准分子激光, 对铝合金 (7075) 和不锈钢 (304) 两种合金材料进行微抛光试验, 探讨微抛光效果和激光参数之间的关系。

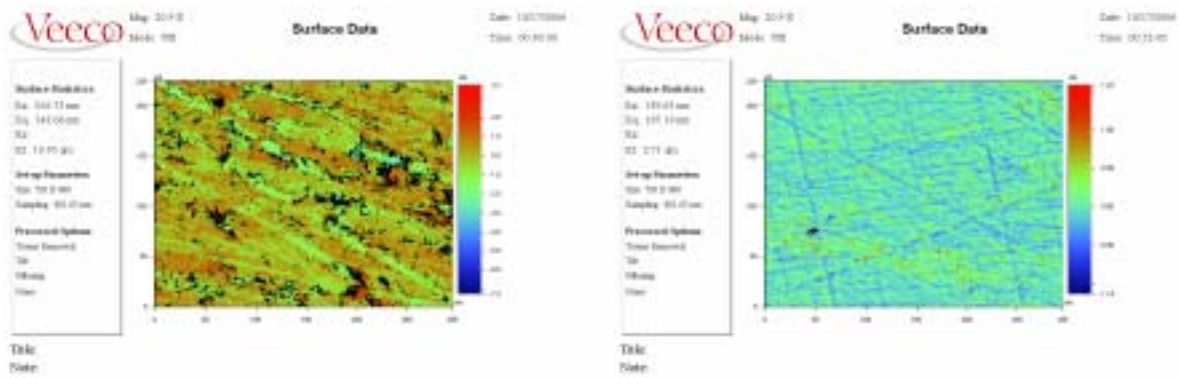
1. 抛光试验

对铝合金 (7075) 和不锈钢 (304) 在一组激光参数下的进行实验, 对比抛光效果, 所使用的激光源为德国 Lambda-Physik 公司 LPX305iF 准分子激光, 使用 WKYO NT1100 对样品的表面粗糙度进行测量。

我们首先对试验材料铝合金 (Aluminum alloy 7075) 和不锈钢 (Stainless steel 304) 的母材进行表面粗

* 国家自然科学基金重点资助项目 (50335050), 北京市属市管高等学校人才强教计划资助项目

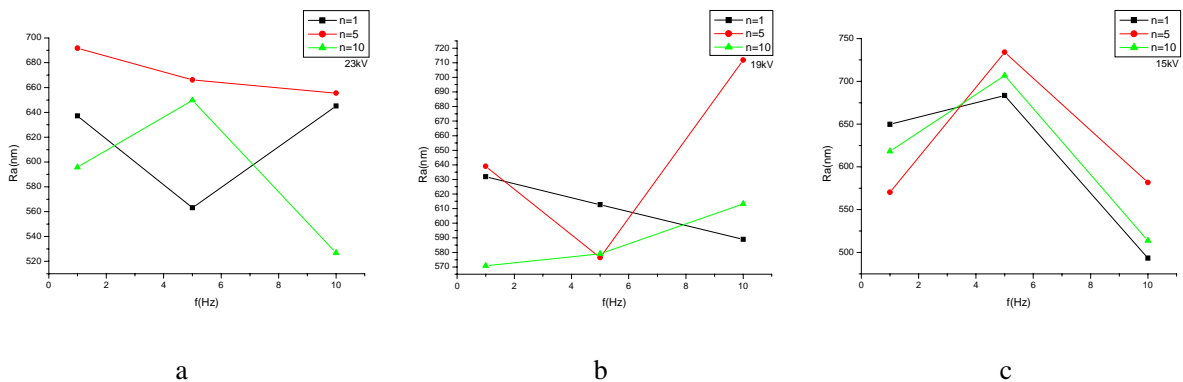
糙度的测量,观察表面情况,测量结果见图1。由测量结果得到母材的表面粗糙度分别为铝合金 556.73nm, 不锈钢 139.63nm。



a b
图1.母材的形貌图 (a.铝合金 7075, b.不锈钢 304)

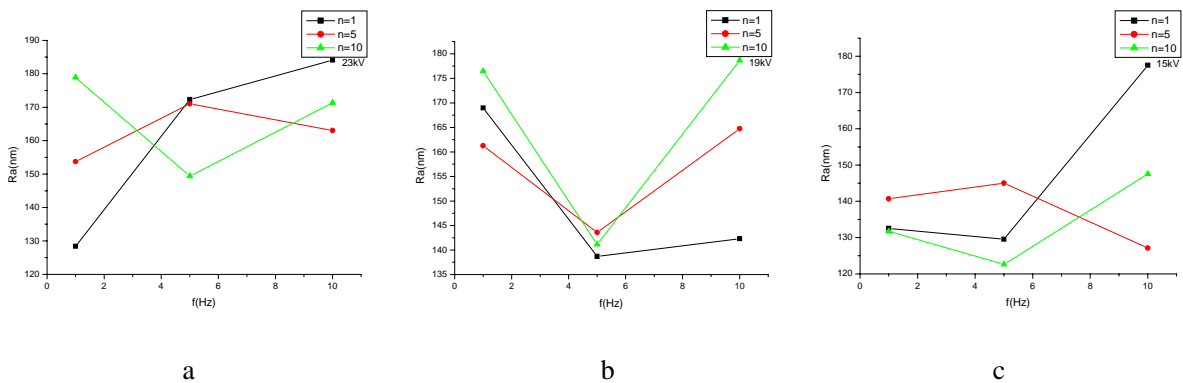
Fig1. Pattern of base metal (a. Aluminium alloy 7075, b. Stainless steel 304)

实验参数为准分子激光工作电压 (与激光脉冲能量成正比), 激光脉冲频率和激光脉冲数。每个参数选用 3 个值, 即电压为 23kV、19kV 和 15kV; 频率为 1Hz、5Hz 和 10Hz; 作用脉冲数为 1、5 和 10。全部参数组合为实验参数, 因此每种材料的抛光实验次数有 27 次。掩模大小为 5mm×5mm, 对抛光面积的粗糙度进行测量, 得到铝合金和不锈钢在不同的试验条件下的粗糙度情况, 分别见图 2 和图 3, 其中 f 表示激光频率, Ra 表示表面粗糙度, n 表示激光脉冲数量。



a b c
图 2. 铝合金抛光后的表面粗糙度 (工作电压分别为: a.23kV, b.19kV, c.15kV)

Fig2. Surface roughness of polished Aluminum alloy 7075 (Working voltage: a.23kV, b.19kV, c.15kV)



a b c
图 3. 不锈钢抛光后的表面粗糙度 (工作电压分别为: a.23kV, b.19kV, c.15kV)

Fig3. Surface roughness of polished Stainless steel 304 (Working voltage: a.23kV, b.19kV, c.15kV)

由图 2 和图 3 可以看到, 对于同一种合金材料, 当激光参数发生变化时, 抛光后得到的表面粗糙度差别很大。部分试验条件下测得的抛光后的表面粗糙度比母材的表面粗糙度更大, 效果降低, 没有起到抛光

作用。这说明，对于同一种合金材料，并不是所有的激光参数都会起到微抛光的作用和效果，只有几组试验参数可以实现对材料的抛光。

在本试验中，对于铝合金 7075，最佳的试验参数为激光工作电压 15kV，激光频率 10Hz，脉冲个数 1，得到的表面粗糙度为 493.41nm；对于不锈钢 304，最佳的试验参数为工作电压 15kV，激光频率 5Hz，脉冲个数 10，得到的表面粗糙度为 122.61nm。这两个试验结果的照片和表面粗糙度测量结果见图 4 和图 5。通过对实验结果的分析，我们可以看到，对于铝合金 7075 和不锈钢 304 这两种材料，微抛光后的样品粗糙度可以达到 100nm 量级，超过了普通机械加工达到的粗糙度。

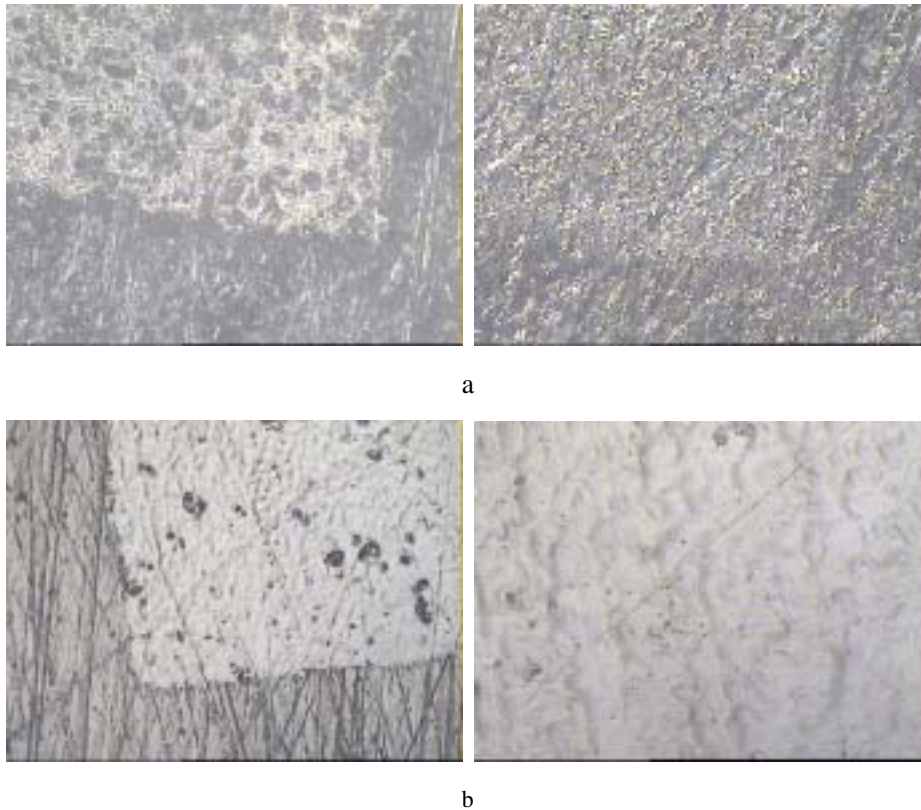


图 4.试验照片 (a.铝合金, b.不锈钢)

Fig4. Photographic of experimental samples (a.Aluminium alloy 7075, b.Stainless steel 304)

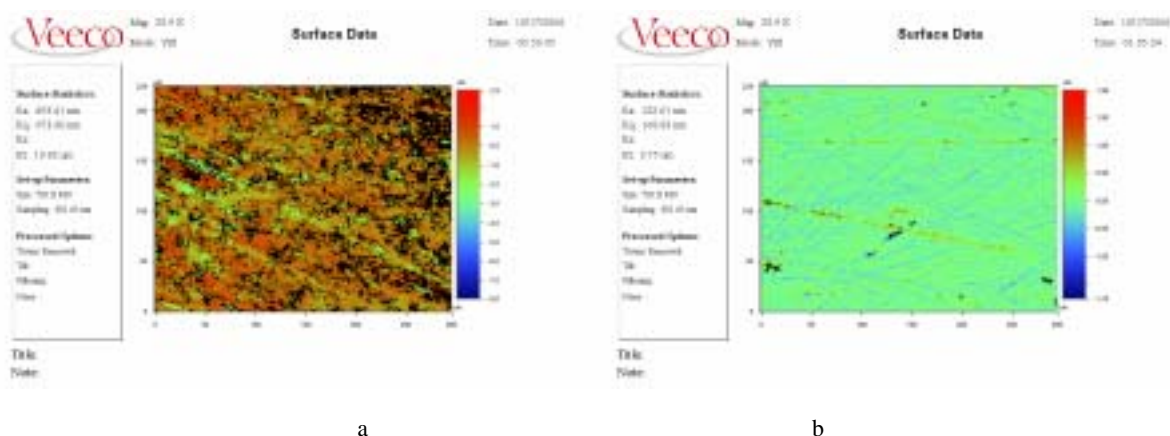


图 5.表面粗糙度测量结果 (a.铝合金, b.不锈钢)

Fig5. Measured value of surface roughness (a.Aluminium alloy 7075, b.Stainless steel 304)

2. 抛光机理初步分析

通过前面的实验，我们对准分子激光的微抛光机理进行初步分析，并提出可能的机理模型。

对于激光抛光机理而言，去除作用、变形作用和二者的复合作用，都可作为激光抛光的机理。另外，高强激光对材料表面烧蚀产生的反冲压作用，也促进抛光和表面性能强化的效果。

当准分子激光束聚焦于材料表面时，会在很短的时间内在近表面区域积累大量的热，使材料表面温度迅速升高，当温度达到材料的熔点时，表层物质开始熔化，当温度进而达到材料的沸点时，表层物质开始蒸发，而基体的温度基本保持在室温。当上述物理变化过程主要为熔化时，材料表面熔化部分各处曲率半径的不同使熔融的材料向曲率低的地方流动，各处的曲率趋于一致。同时，固液界面处以每秒数米的速度凝固，最终获得光滑平整的表面。当上述物理变化过程主要为蒸发时，激光抛光的实质就是去除材料表面的薄层物质^[10]。

通过以上分析，我们认为可以运用热软化应力再分布模型来解释准分子激光微抛光的机理。对于准分子激光抛光来说，要实现较好的抛光效果，尽可能改善材料的粗糙度，就应当在试验中努力满足下面三个条件——材料表面薄层软化、均匀光压和光压产生横向位移平移。准分子激光微抛光过程示意图参见图 6，其中 A 表示准分子激光的均匀光波面，B 代表被抛光材料，C 代表准分子激光与材料相互作用过程中所产生的热软化应力。

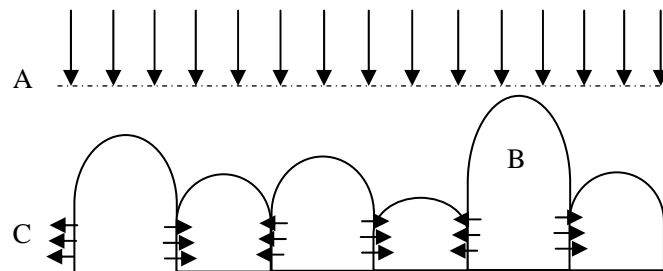


图 6.准分子激光微抛光过程示意图

Fig6. Process of excimer laser micropolishing

准分子激光经过均匀化处理后，辐照在被抛光的材料表面，这是材料处于激光束产生的光压作用之下。在激光与材料相互作用的过程中，由于热的作用，材料表面的薄层逐渐软化。同时在热软化应力的作用下产生应力位移的平整化，实现对材料的微抛光。

结论

通过试验研究，我们可以得到以下结论：1.综合铝合金 7075 和不锈钢 304 的激光微抛光实验，发现对于这两种材料，准分子激光微抛光可达到的最小粗糙度值为 100nm 量级，超过普通机械加工达到的粗糙度。2.为得到理想的抛光效果，必须选择恰当的试验参数。以激光能量为例，当材料表面的能量密度太大时，表面会变得更加粗糙；若太小，抛光的效果也不明显。

参考文献：

1. Y. M. Xiao and Michael Bass, Thermal stress limitations to laser fire polishing of glasses, APPLIED OPTICS, Vol. 22, No. 18,15 September 1983, 2933-2936.
2. F. Laguarda, N. Lupón, F. Vega and J. Armengol, Laser application for optical glass polishing, SPIE Vol. 2775, 603 ~ 610.
3. F. Laguarda, N. Lupon, and J. Armengol, Optical glass polishing by controlled laser surface-heat treatment, APPLIED OPTICS, Vol. 33, No. 27, 20 September 1994, 6508 - 6513
4. Fidel Vega, Jesus Armengol, Nüría Lupón, and Ferran Laguarda, Study of Surface Dynamics during Laser Polishing of Glass, SPIE Vol. 3822(1999):Part of the EUROPTO Conference on Computer-Controlled Microshaping, June 1999, 92-102.
5. Masataka Murahara, Photo-chemical Polishing of Fused Silica Optics by Using ArF Excimer Laser, SPIE Vol. 4347 (2001) : Laser-Induced Damage in Optical Materials: 2000, 547 - 552.
6. Hamdi Orun, Mircea Udrea*, Ali Alacakire, Polishing of optical fibers using a CO₂ laser, SPIE Vol. 4068 (2000): SIOEL '99: Sixth Symposium on Optoelectronics, 570-575.
7. Krzysztof M. Nowak, Howard J Baker, Denis R Hall, Pulsed laser machining and polishing of silica micro-optical components using a CO₂ laser and an acousto-optic modulator, SPIE Vol. 4941 (2003):Laser Micromachining for Optoelectronic Device Fabrication, 107-111.
8. 江超，王又青，胡少六，激光抛光技术的发展与展望[J]，激光技术，2002，26（6）：421 - 424。
9. 陈林，杨永强，激光抛光[J]，激光与光电子学进展，2003，40（8）：57 - 59。
10. 陈林，杨永强，激光抛光机理及应用[J]，表面技术，2003，32（5）：49-52。