

文章编号: 1001-3806(2009)02-0141-04

Nd:YAG 连续激光辐照铝合金旋转抛物面的温度效应

程建中¹, 胡云¹, 张权², 张增明^{2*}, 丁泽军¹

(1. 中国科学技术大学 物理系, 合肥 230026; 2. 中国科学技术大学 天文与应用物理系, 合肥 230026)

摘要: 为了研究激光推进中激光作用反射面后的温度效应, 采用自行设计的温度测量系统对不同激光功率辐照下的旋转抛物面铝合金靶的表面温度进行了测试, 得到了不同条件下温度-时间关系曲线。结果表明, 激光吸收率随激光入射角的增大而增大; 靶面上的表面温度与位置相关, 自辐照点至径向各点上的温度符合高斯分布, 激光辐照点与其它各点呈现明显不同的升温 and 降温特点; 激光辐照停止约数秒后, 旋转抛物面表面上各点的温度趋于一致, 之后按同一种热扩散方式和降温曲线变温。

关键词: 激光技术; 激光推进; 温度; 抛物反射面

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A

Temperature effect of aluminum alloy paraboloid under the irradiation of continuous Nd:YAG lasers

CHENG Jian-zhong¹, HU Yun¹, ZHANG Quan², ZHANG Zeng-ming², DING Ze-jun¹

(1. Department of Physics, University of Science & Technology of China, Hefei 230026, China; 2. Department of Astronomy and Applied Physics, University of Science & Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: In order to study the effect of the surface temperature of reflector under the laser irradiation during laser propulsion, a self-designed temperature measurement system was adopted to measure the surface temperature of the rotating parabolic aluminum target under the irradiation of different laser power, the temperature vs. time curves in different conditions was obtained. The results show that the laser absorptivity increases with the incidence angle; the surface temperature depends on the radial distance from irradiating position according to the Gaussian distribution function. The irradiation position has different rising and lowering temperature features compared with other positions. The temperatures on the surface tend to be the same and follow the same thermal diffusion and temperature lowering curve since several seconds after switching off the laser irradiation.

Key words: laser technique; laser propulsion; temperature; parabolic reflector

引言

由于受到有效荷载比低、发射成本高等诸多限制, 传统火箭推进模式发射卫星很难有更大的拓展空间。如何用更低廉、更高效的方式发射卫星成为研究人员竞相追寻的目标。激光推进技术实现了工质和能量的分离, 对于提高火箭发射效率、安全性等方面较传统火药推进方式均有所突破。推进飞船的能量来自于激光, 要使激光推进进入实用阶段, 必须提高激光器的各种参量, 比如激光强度、功率、单脉冲能量等。高性能激光对推进器反射面的影响很大, 反射面温度的升高

会直接影响其反射率^[1], 反射率的大小又会影 响作用在工质上的激光的有效能量, 进而影响激光推进的各种性能参量; 另外, 过高的反射面温度也会引起镜面的形变、裂纹, 甚至导致其融化^[2-3]。所以, 对激光作用反射面所引起的温度效应的研究显得尤为重要。

激光加载条件、物体形状和初始边界条件以及物体的热物理性质决定了物体温度场的时空分布。早在上世纪 80 年代前国外关于激光作用金属物体温度测试理论和实验研究进行了大量工作。BRUGGER^[4]给出了高斯分布脉冲激光照射圆板和方板产生的温度场; WARREN 等人^[5]进行了均匀、连续激光辐照下材料的加热、融化等问题的解析研究。近年来, YUAN 等人^[6]也对不同激光器作用金属靶的温度效应进行了研究; DENG 等人^[7]从双温模型出发, 用有限元差分法对飞秒、皮秒和纳秒脉冲烧蚀金属表面的温度场进行了数值求解; CAI 等人^[8]利用热像仪对高功率脉冲激光器作用旋转抛物面推力器的后续温度效应进行测

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10574121; 90406024); 教育部博士点基金和中国科学院基金资助项目

作者简介: 程建中(1977-), 男, 硕士研究生, 从事激光推进的相关研究。

* 通讯联系人。E-mail: zzm@ustc.edu.cn

收稿日期: 2008-01-28; 收到修改稿日期: 2008-04-16

量。实验中对温度的测量一般采用热电偶和热像仪。热像仪操作简单、直观,但有温度分辨率偏低的缺点;采用热电偶虽然操作、设计相对复杂,但测量精度相对较高,如果热电偶的两金属焊头足够小,完全可以克服由于热响应引起的测量延迟的不足。作者利用自行设计的以热电偶为主体的温度测量装置,对不同强度、不同辐照时间的连续激光对铝合金材料旋转抛物面表面辐照时的温度效应进行了系统研究。

1 实验装置

实验装置如图1所示,实验中采用CW Nd:YAG

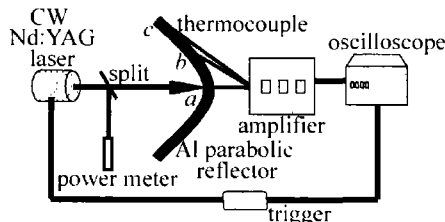


Fig. 1 Experimental setup

激光器,波长1064nm,光斑直径约1.0mm,激光输出功率连续可调,最大功率为25W。分束镜的反射率约8%,用功率计监测输出激光功率。旋转抛物面用LY-12铝合金经数控机床加工而成,内表面抛光,内壁反射率大于90%,张口半径32mm,半张角89°,厚1.5mm,焦距15mm^[8]。温度测量采用铜-康铜T型热电偶丝,热电偶丝直径小于100 μm 。对罩内表面顶点、中部、外沿3点(分别对应图1中a,b,c3点)进行测量。热电偶信号经过放大电路放大,采用Keithley-2000万用电表对放大倍数进行校准,放大后的电压信号传至Agilent 54622A示波器。为保证同步,采用两台同样的示波器多通道同时测量,在示波器与激光器之间加入外部同步触发装置,本实验在室温为14 $^{\circ}\text{C}$ 的大气环境下进行。

实验时,首先按照图1调整好光路,在激光器前面放一挡板,打开激光器,直到有稳定的输出,用功率计记录输出光的功率。在移开挡板的同时触发示波器,由此记录热电偶丝由于温度的不同导致的电压随时间变化曲线。

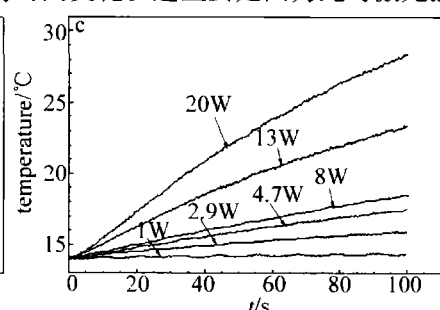
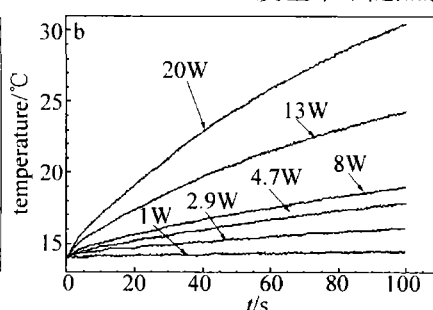
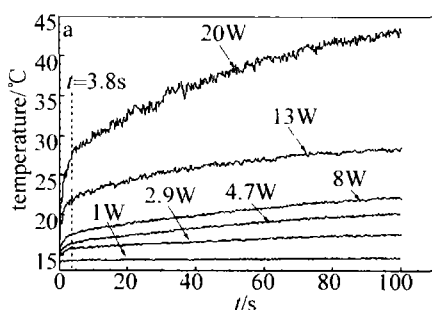


Fig. 3 The temperature vs. time curve for different laser powers

a—top b—middle c—edge

2 实验结果及讨论

2.1 不同入射角对温度的影响

采用旋转抛物面型反射面,虽然沿轴线平行的入射光都可以汇聚于焦点,但是不同的入射点与旋转抛物面的夹角不同,即使同一束光,由于光斑有一定大小,切面上各点与旋转抛物面的夹角在严格意义上也不一定相等。因此,在利用上述旋转抛物面进行实验之前,采用与旋转抛物面相同材料、厚度的薄圆片对不同角度入射激光的温升情况先进行了测试。所选材料为LY-12铝合金,直径50mm,厚度1.5mm,热电偶丝用银胶粘贴于部件的背面,激光功率为13W,激光与圆片中心法线的夹角定义为入射角(见图2a)。测量所得的背面温度随时间变化的曲线如图2b所示。可

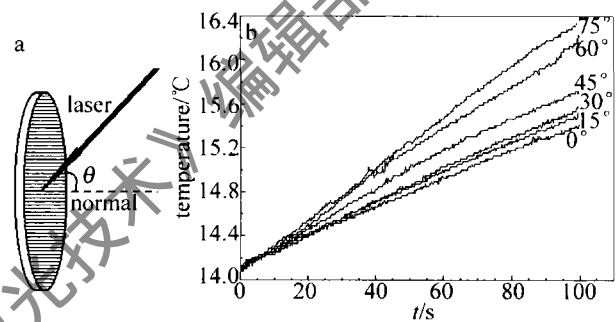


Fig. 2 a—schematic diagram for laser irradiating a slice at different incident angles b—temperature vs. time curve

以看出,在相同的激光功率下,激光辐照后相同的时刻,温度随着激光入射角的增加而升高,这与以前的文献报道^[9]基本符合。这是因为随着入射角的增大,激光作用于罩面的面积也随之增大,因而吸收面增加,致使吸收的激光功率增加。在辐照时间为100s时,75 $^{\circ}$ 角比0 $^{\circ}$ 角温度高出近1 $^{\circ}\text{C}$ 。

2.2 不同激光辐照功率下各点的温度-时间曲线

采用1064nm Nd:YAG连续激光沿旋转抛物面的轴线入射到内壁顶点,在不同的激光功率下测量照射旋转抛物面内壁顶点、中点以及边缘的温度随时间的变化曲线,所得结果如图3所示。可以看出,当激光功率小于1W时,激光不能引起罩面温度的升高,各点温度基本不随照射时间变化。这主要是因为此时激光强

度过低,激光提供的能量与罩面对环境的热扩散相当。而当激光功率大于 1W 时,各点温度均随照射时间以及激光器功率的增加而升高。图 3a 中的曲线变化形态与图 3b、图 3c 有很明显的不同,可以把图 3a 激光辐照点的温度-时间曲线分成两个阶段:第 1 阶段为自激光辐照时刻开始至约 3.8s,温度在此时间段内迅速升高;第 2 阶段为 3.8s 之后,温度随时间升高较缓慢且平稳。而在图 3b、图 3c 中,并未观察到此现象。其原因为:在激光的辐照点,激光瞬间在材料内建立一个次热源^[1],由于材料导热有一定的热响应时间^[10],热量在短的时间内来不及扩散,所以积累的热量致使温度在数秒内会突然升高,当温度的升高到与热源温度可相比拟时,进入第 2 个阶段,此时热扩散以及热传导也进一步增大,由激光提供的能量来供给热损耗以及旋转抛物面材料对热量的吸收,使温度缓慢升高。而在远离激光入射点的地方,其温度的升高主要来自于邻近区域的热传导,而热传导受热响应时间的限制,并且在热响应时间内热损耗也进一步增大,所以没有突变现象。3 幅图中,温度随时间的变化曲线斜率均随时间减小。可以预见,在有限的时间内,热损耗与激光供给能量会达到平衡,温度也最终会趋于稳定。

2.3 旋转抛物面内表面温度与辐照激光功率间的关系

在激光推进实验中,提高激光功率是提升荷载所获动量的最有效的方法之一,但不同激光功率对旋转抛物面温度的影响也会很不同。采用不同激光功率,在不同时刻对罩面上 3 点的温度进行了测试。图 4a 为激光辐照 3.8s 时,各点温度随入射激光功率变化的曲线;此时刚好是第 1 个阶段结束,温度处于相对平稳

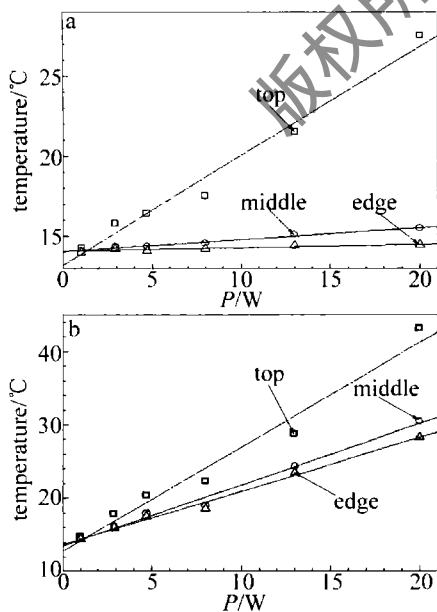


Fig. 4 The measured data (symbols) and linear fits (lines) for the temperature vs. laser incident power relationship at different times
a—3.8s b—100s

的第 2 阶段的开始。图 4b 为激光辐照 100s 时刻的温度-功率曲线。两图均显示:在相同的时刻,内表面各点的温度均与辐照激光功率成正比,远离辐照点的 b, c 两点更加明显。图上的数据点虽然稍有波动,但是基本上符合线性关系。激光器的能量一部分维持旋转抛物面的温升,另一方面通过热辐射、热传导等方式向外损耗热量。由图可以推断出,在温度不是太高的情况下,激光损失能量占激光器总的输出能量的比率在此温度范围内是相等的。而离激光辐照点愈远,直线斜率愈小,这也说明这些地方热损耗占总的激光能量的比率越大。

2.4 罩面上各点的降温规律

为了研究罩面上各点在停止激光辐照后的降温规律,将功率为 20W 的激光沿旋转抛物面轴线入射到内壁顶点,照射约 104s 后停止照射。此情形下旋转抛物面内表面不同点的温度随时间变化曲线如图 5 所示。

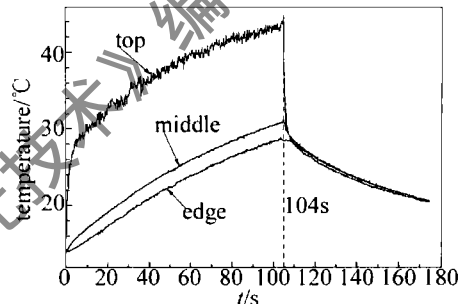


Fig. 5 The temperature vs. time curve of a parabolic reflector at different locations when switching off laser on 104s

与图 3 类似,在激光照射期间的第 2 阶段,罩面温度为随时间缓慢增长的相对稳定阶段,各点间的温差也比较稳定。各点温度上升速率大致相等,表明此时旋转抛物面各点之间以及与环境之间已经建立了相对稳定的热增长平衡关系。

在激光照射 104s 后停止辐照,降温曲线则如图 5 中的后半部所示。此过程正好与升温过程相反:在激光辐照点,停止辐照后约 4s 内温度有个骤降过程。这是因为:激光辐照使得材料内部形成一个次热源,辐照突然停止相当于热源突然消失,从而引起辐照点温度突降。而远离辐照点的其它地方,温度下降幅度远没有辐照点那样迅速。因此,在激光停止辐照约 4s 后,3 点温度基本上趋于一致,之后按照同一种热扩散方式和降温曲线变温。

图 6 为各点降温的细节。此时提高示波器的分辨率为 2s/div,实验中所选激光功率为 13W,辐照 60s 后停止激光照射,测得其后 20s 的温度-时间曲线。在入射点,当停止照射后,温度立刻降低;而在远离入射点的中点和边沿位置,可以很明显地看到,温度有一个先升后降的现象,中点大约比激光辐照点延迟若 1.7s,

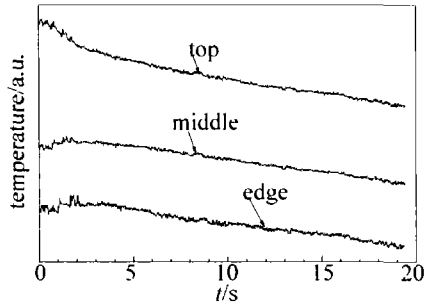


Fig. 6 The temperature lowering feature at different locations

因为这时虽然停止了激光照射,但是由于在短的时间内,靠近入射点的热量没有来得及扩散,温度比远离入射点的温度高,由于热传导作用,温度有一个先升后降的过程。图中显示罩面边沿与中间之间延迟并不是太明显,其原因是因为中点与边沿之间温差太小,热电偶响应时间慢,以至并未观察到明显的滞后现象。

2.5 罩内表面温度分布

由图5可知,在激光辐照后第2阶段,各点间的温差随时间的变化很小,这为研究同一时刻罩面内的温度分布提供了方便。以激光辐照的旋转抛物面顶点为原点,罩面内其它点到原点的弧线长为 l ,分别测量了不同 l 长处的各点温度。图7显示,当激光辐照功率为20W、辐照时间为100s时,各点的温度与各点到顶点距离的曲线。

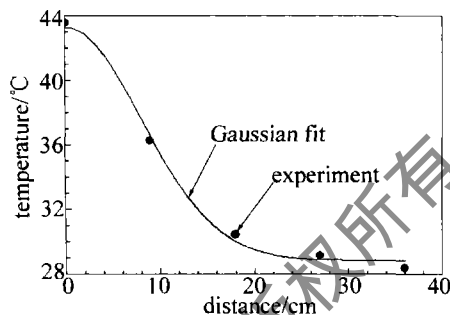


Fig. 7 The temperature distribution at different locations on a parabolic reflector surface depending on the distance from the top position at 100s of laser irradiation of 20W power

对于一个理想的3维体系,温度与时间以及距离间的关系是符合高斯分布的^[11]。本实验中激光功率不太高,温度上升也不高,热辐射很小,相对于热扩散可以忽略,可看作一个准2维体系,其温度-位置关系满足高斯分布。通过拟合实验数据(见图7),得到的高斯分布函数为: $T = 28.8 + 14.5 \exp(-l^2/128)$,式中, T 为旋转抛物面表面测量点的温度(°C), l 为顶点到测量点的弧线距离(cm)。

3 结论

基于自行设计的温度测量装置,对不同角度入射

以及不同激光功率下各点的温度变化情况进行了测试。结果表明:不同入射角对材料温升不同,随着入射角的增大,吸收反而增强;在对旋转抛物面进行激光辐照的实验中,发现了在激光辐照点与其他各点呈现明显不同的升温 and 降温行为;当温度上升进入相对稳定的第2阶段后,温度与激光辐照功率成正比;激光辐照停止后,在约4s后,旋转抛物面表面各点温度趋于平衡,而后按同一种热扩散方式降温;并且罩面温度随径向距离变化关系符合高斯分布。

在许多实验中,旋转抛物面不仅作为反射面,而且直接被当作推力器,此时罩面温度的上升不仅来源于激光直接照射时获得的部分能量,高温高压等离子体对罩面的作用也不容忽视,具体温升及其破坏作用有待进一步研究。

感谢中国科学技术大学激光推进实验室胡晓军老师和蔡建博士在实验期间提供的帮助及有益的讨论。

参考文献

- [1] ALLMEN M V, BLATTER A. Laser-beam interaction with materials: physical principles and applications [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1994, 6-17 (in Chinese).
- [2] MYRABO L N. Brief history of the light craft technology demonstrator (LTD) project [C]//Proceedings of the First International Symposium on Beamed Energy Propulsion. Huntsville, Alabama: American Institute of Physics Conference Series, 2003: 49-60.
- [3] LEE C S, KOUMVAKALIS N, BASS M. A theoretical model for multiple-pulse laser-induced damage to metal mirrors [J]. J A P, 1983, 54 (10): 5727-5731.
- [4] BRUGGER K. Exact solutions for the temperature rise in a laser-heated slab [J]. J A P, 1972, 43 (2): 577-583.
- [5] WARREN R E, SPARKS M. Laser heating of a slab having temperature-dependent surface absorptance [J]. J A P, 1979, 50 (12): 7952-7957.
- [6] YUAN Y H, LIU Ch L, WANG Ch Y, et al. Analysis on temperature rise and its rate of coated 45# steel irradiated by CW-YAG laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 1998, 10 (3): 379-382 (in Chinese).
- [7] DENG S H, TAO X Y, LIU M P, et al. Thermal analysis of metal ablation by means of femtosecond-to-nanosecond laser pulses [J]. Laser Technology, 2007, 31 (5): 459-461 (in Chinese).
- [8] CAI J, HU X J, TANG Zh P. Experimental investigation on ablation mode of laser propulsion [J]. Journal of Propulsion Technology, 2008, 29 (3): 371-376 (in Chinese).
- [9] HUANG Y L, YANG F H, LIANG G Y, et al. Using in-situ technique to determine laser absorptivity of Al-alloys [J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30 (5): 449-453 (in Chinese).
- [10] LUO H P, YANG G Ch, SONG Zh F, et al. Metal heat response duration to CW laser [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2005, 22 (3): 427-430 (in Chinese).
- [11] YAN Zh J. Equations of mathematical physics [M]. 2nd ed. Hefei: University Science & Technology China Press, 2002: 202-210 (in Chinese).