

切向气流作用下激光对薄铝板辐照效应的初步研究

李君神,赵国民,焦路光,袁 春,陈敏孙

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

摘 要: 采用实验测量与数值模拟相结合的方法研究了切向表面气流环境中激光对薄铝板的辐照效应。实验结果表明:相同速度的氮气流和空气流中,铝板温度曲线相似,说明对于铝这种材料而言,空气流的氧化烧蚀几乎不能进行。无切向气流时,辐照过程中相同时刻铝板的温升及铝板达到的最高温度都高于氮气流和空气流情形。三种环境中,铝板中心位移的变化趋势同温度的变化趋势相同,说明激光加热产生的热应力是铝板形变的主要原因,切向气流不起主导作用。利用有限元分析软件 ANSYS 数值模拟了铝板温度场及形变的演化过程,分析了激光功率分布和对流换热对结果的影响,数值模拟结果同实验符合地较好。研究表明:在较低激光功率密度条件下,切向气流主要通过对流换热对铝板起冷却作用,尤其在激光辐照停止后的降温阶段,其作用更加明显。

关键词: 激光与物质相互作用; 切向气流; 冷却效应; 热变形

中图分类号: TN24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)11-2962-05

Preliminary study on effects of laser irradiation on thin aluminum alloy sheet in tangential flow

Li Junshen, Zhao Guomin, Jiao Luguang, Yuan Chun, Chen Minsun

(College of Photoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Experiments and simulations were performed to study the laser irradiation effects on thin aluminum alloy sheet in different tangential flow. The temperature traces of the aluminum alloy sheet in the nitrogen flow and air flow were consistent, which indicated that the combustion effect could hardly progress. The temperature of aluminum alloy sheet without flow was higher than those in the nitrogen flow and air flow at the same time. The center displacements traces of the aluminum alloy sheet in three different gas flows kept same shape with corresponding temperature traces, which implied that the tangential flow did not play a dominant role compared with the heat distortion induced by laser heating. Moreover, a numerical model was developed, with finite element analysis software ANSYS, to simulate the process of temperature and displacement of the aluminum alloy sheet in different gas flow and analysis how the power distribution and convection heat transfer impact the results was performed. The computed results present good agreements with experiment data. The results show that the tangential flow mainly take on cooling effect when the power density of laser is not high, especially in the cooling period when the laser irradiation ends.

Key words: laser-mater interaction; tangential flow; cooling effect; heat distortion

收稿日期:2013-03-21; 修订日期:2013-04-03

作者简介:李君神(1987-),男,硕士,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。Email: saibeilang_s@163.com

0 引言

激光辐照金属材料引起的升温、熔化、气化等问题是激光加工、热处理等应用技术的基础。目前,自然对流环境下激光对金属靶的辐照效应已有较多研究成果,而实际应用中靶表面常存在切向强迫气流,此时激光对金属靶的辐照效应与自然对流环境下可能有显著不同。已有的研究成果^[1-7]认为切向气流在辐照过程中主要起两个作用:一是能够及时将靶表面的熔融物吹走,提升激光对金属的烧蚀速率;二是剥离金属表面的氧化层,并使金属同气流中的氧气充分接触,而金属氧化放热对靶的升温有促进作用,从而将增强表面烧蚀效应。近年来,美国劳伦斯-利弗摩尔国家实验室的 C.D.Boley 等人认为^[8]:对于薄铝板而言,在较低激光功率密度和大光斑条件下,切向气流在铝板前后表面产生的压差作用将导致铝板在熔化之前就会发生破裂。如果这一破坏机理确实存在,就能够显著降低激光对金属薄板的损伤阈值,这对于激光破坏效应研究来说无疑是一个好消息。文中即利用现有的实验条件,从实验和数值模拟两个方面探索切向气流在激光辐照薄铝板过程的中所起的作用。

1 实验

如图 1 所示,DF 激光器通过透射率为 74%的分光镜,反射光直接辐照到铝板表面;透射光则被高反镜再次分为两路,分别用于激光能量测量和光斑监测。光斑测量方法为:使用中波红外相机对漫反射屏摄像,记录辐照过程中激光功率密度随空间和时间的变化情况。光电探测器监测铝板表面的散射光变

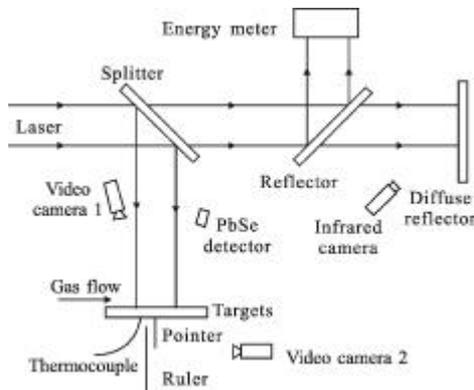


图 1 实验总体布局

Fig.1 Diagram of experimental setup

化,为整个实验系统提供时间同步信号。1# 摄像机记录激光辐照过程中铝板前表面形貌变化。使用 K 型热电偶测量铝板表面若干测点的温度变化过程。在铝板背表面中央用高温胶粘接一个轻质探针,光轴垂直于该探针的 2# 摄像机可以通过记录探针的位置变化来测量铝板中央的位移变化情况。

稳压控制装置连接高压气瓶和气流喷嘴组成表面气流模拟装置。喷嘴与铝板保持平行,整体呈楔形,可以稳定出射气流,如图 2 所示,喷嘴端口截面呈条状,中央基线同铝板中心平齐,从而可以在铝板表面激光辐照区域产生较为稳定的切向气流环境。

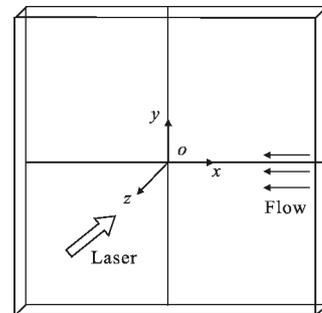


图 2 铝板模型

Fig.2 Model of Al sheet

实验所用铝板大小为 150 mm×150 mm,厚度为 1.84 mm。为提高铝板对激光的能量耦合效率,在其表面涂覆了一层黄漆,从而将铝板的能量耦合率提升到 80%附近。如图 3 所示,以铝板后表面中心为原点,z轴



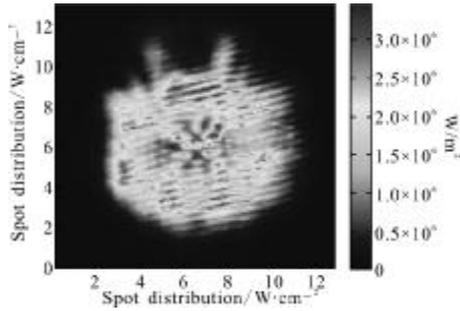
图 3 气流装置实物图

Fig.3 Photo of blower assembly

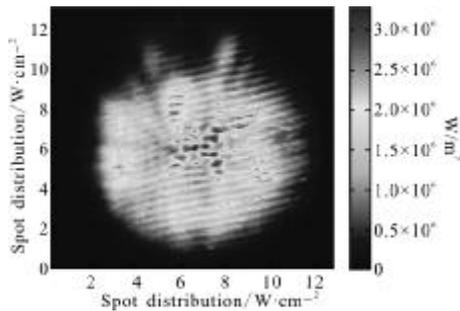
同激光方向相反建立直角坐标系,坐标单位为 mm。实验中探针位置为 O(0,0,0),氮气流和无气流情况下三条热电偶的位置分别为 A(25,30,0)、B(25,0,0)和 C(25,-30,0),表面气流为空气时热电偶位置稍有差异,更靠近光斑中心,分别为 A'(20,30,0)、B'(20,0,0)和 C'(20,-30,0)。

2 典型实验结果分析

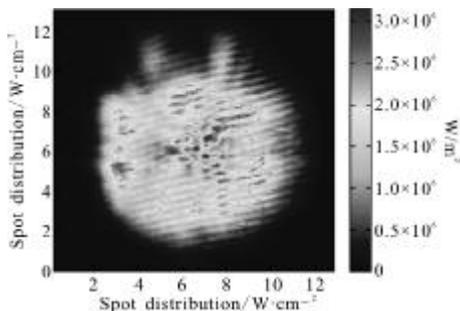
选取实验参数相近，铝板表面切向气流环境分别为 100 m/s 氮气流、100 m/s 空气流和无表面气流的三发实验进行对比分析。激光光斑直径约 7.5 cm，点峰值功率约为 $3.5 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ ，红外热像仪测定的光斑功率密度分布情况如图 4 所示。



(a) 氮气流
(a) N₂ flow



(b) 无气流
(b) No flow

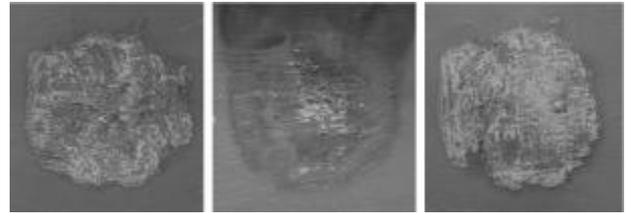


(c) 空气流
(c) Air flow

图 4 光斑功率分布
Fig.4 Spot distribution

辐照后铝板表面形貌如图 5 所示，三种环境中铝板均没有发生熔化或破裂现象。当切向气流为氮气时，漆层无明显燃烧现象，漆层被激光焦化后仍附

着在铝板表面；无切向气流时，漆层燃起火焰，燃烧后的黑色烟尘覆盖了辐照区域及其上方的铝板。当切向气流为空气时，漆层燃烧充分，很快烧蚀殆尽，燃烧分解物被气流剥离。



(a) 氮气流 (b) 无气流 (c) 空气流
(a) N₂ flow (b) No flow (c) Air flow

图 5 辐照后样品表面形貌
Fig.5 Samples irradiated for 2 s

2.1 铝板后表面温度变化过程分析

由于 A 和 C 位置对称，取 B 和 C 位置的温度随时间变化情况进行对比分析，温度变化曲线如图 6 所示。表面气流为氮气和空气两种情况下，B 和 C 位置铝板的温升历史基本一致，且辐照过程中铝板没有发生熔化，说明氧气在激光辐照薄铝板的过程中没有特殊作用。原因在于：铝板表面本身就有一层氧化膜，它的存在阻止了氧气同铝的接触，加之该激光功率密度不能使铝板熔化，所以铝的氧化反应不能发生。

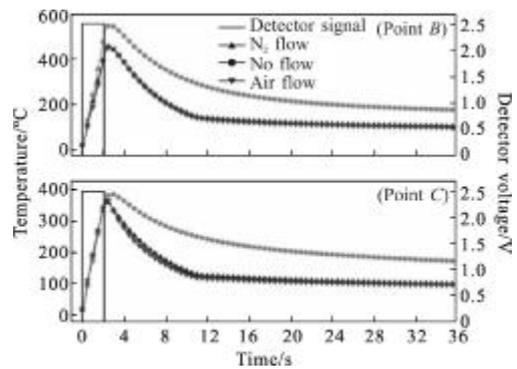


图 6 不同气流环境中测得的 B 和 C 位置温度-时间曲线
Fig.6 Temperature traces of thermocouples on point B and C in different flow circumstances

从图 6 可以看出：(1) 激光辐照过程中，无气流时 B 位置铝板的升温率比存在切向气流情形时大；温度最大时升至约 550 °C，高出有气流情况(450 °C)约 100 °C；(2) 辐照停止后，无切向气流情况下铝板降温速率明显低于有气流情形；切向气流停止时(约 12 s)，有气流情形的温升曲线有明显拐点，降温速率

在该时刻后显著下降;(3) 无论 B 还是 C 位置,无气流情况的平衡温度(激光结束后 1 min)都比存在气流时高出约 60℃。上述结果表明:切向气流在激光辐照过程中的降温作用很强。

需要说明的是:由于激光器稳定性的原因,上述实验结果中一些温差可能是由各发次之间激光功率密度空间分布差异造成的,需要在数值模拟中控制参数进一步验证,但重复实验表明实验结果的总体趋势是可信的。

2.2 铝板中心位移分析

从 2# 摄像机拍摄的视频中提取探针的位置信息,通过比例换算,可以得到铝板中央位移随时间的变化曲线。如图 7 所示,无气流情况下探针在激光辐照尚未结束时脱落,脱落前记录的位移为 9.63 mm,大于氮气流时的最大位移 8.87 mm 和空气流时的 7.54 mm。当铝板表面存在切向气流时,铝板中心的位移并没有出现 C.D.Boley 等人报道的因气动力学机理而增大的情况,反而低于无气流时的中心位移。这表明在文中的实验条件下,切向气流的气动力学效应并不能体现,铝板的形变主要以热变形为主。无气流时铝板中心的升温率大,热变形亦较大。同样需要说明的是由于固支的原因,实验测得的铝板中心形变有可能被铝板的挠曲增强或减弱,需要在数值模拟中进一步验证。

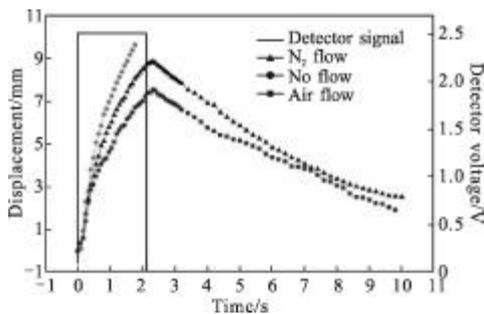


图 7 不同气流环境中铝板中心位移-时间曲线

Fig.7 Displacement traces of the rear center in different flow circumstances

3 数值模拟

对气流环境下激光辐照薄铝板的响应进行数值模拟,涉及到温度场与结构场的耦合分析,文中利用 Ansys 软件提供的载荷传递方法求解该问题。即先将激光作为热源加载到铝板上进行瞬态温度场分析,

得到铝板温度随时间和空间的分布;然后将各节点的温度作为载荷施加到后续的静态结构分析中得到铝板应力、位移等信息。

3.1 温度场模拟结果

实验用铝板为 LY12 铝合金板,其物性参数如表 1 所示。计算模型中,将激光作为面热流加载到铝板前表面,而将切向气流作为强迫对流加载在铝板背表面,这是由于铝的热导率很高,铝板又较薄,其温度在厚度方向上能够很快达到平衡,因此可以忽略前后表面之间的差异,将强迫对流换热加载至后表面是合理的,取对流换热系数为 380 W/(m·K),环境温度为 20℃。

表 1 温度场计算中 LY12 铝板的物性参数

Tab.1 Thermal parameters of LY12 aluminum

t/℃	20	100	200	300	350	450	550
c/J·K ⁻¹ ·kg	900	921	1 047	1 130	1 172	1 493	1 645
ρ/kg·m ⁻³	2.8×10 ³						
k/W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	200	200	200	200	200	200	200

如图 8 所示,B(仅指氮气流和无气流情况,空气时为 B')位置模拟与试验温度曲线在上升阶段重合,下降阶段速率相同,说明计算参数选取基本合理。计算模型中按照光电探测器的电信号设置激光加载时间为 2.15 s,因此三种情况下各位置温度最高点都出现在 2.20 s;而实验中无气流时最高温度出现时间为 2.626 s,氮气和空气情况时分别出现在 2.555 s 和 2.527 s,这是由于铝板表面漆层在激光停止后继续燃烧造成的。笔者亦进行了铝板表面无漆层的实验,结果表明激光停止后,板的温度立即下降,这也表明漆层的燃烧放热对铝板的升温有一定作用。激光停止后,模拟降温速率同实验测量基本一致。

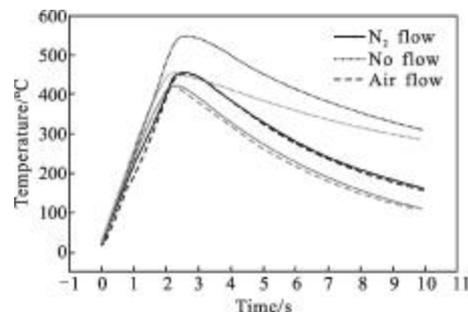


图 8 不同气流环境中 B 位置实验和模拟温度-时间曲线

Fig.8 Experimental and simulated temperature traces of point B in different flow circumstances

为了进一步证实切向气流对铝板温度的影响,

在相同参数下,在计算模型中分别设置存在对流换热和无对流换热两种情况进行数值模拟,得到的温度曲线如图 9 所示。温度上升阶段,两种情形下的温升速率基本一致;无气流情形下时 A 与 C 位置达到的最高温度比存在强迫对流时高出约 19 °C,而 B 位置高出约 22 °C。激光辐照结束后,两种情况下的降温速率差异很大,10 s 时无气流情形下 A 与 C 位置的温度高于有气流时约 150 °C, B 位置高约 180 °C。上述结果说明在激光辐照过程中,气流的对流换热的降温效应相比激光加热效应,几乎可以忽略;而在激光停止辐照后,气流的冷却作用十分明显。

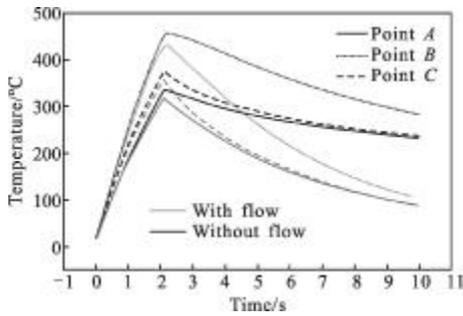


图 9 有/无对流换热 A、B、C 位置的模拟温度-时间曲线
Fig.9 Simulated temperature traces of point A, B and C in circumstances with or without flow

3.2 结构场模拟结果

由于文中采用间接法解决耦合问题,所以在进行结构分析时,首先将单元类型变换成支持结构分析的单元,之后同样以 0.05 s 为时间步长,将热分析中获得的温度场信息加载到各节点进行稳态结构分析。结构分析时 LY12 铝合金的物性参数见表 2。

表 2 结构场计算中 LY12 铝合金的物性参数

Tab.2 Structure parameters of LY12 aluminum

t/°C	20	100	200	300	400	500	550	600
E/GPa	68	64	54	42	27	-	1.96×10^{-2}	1×10^{-2}
ν	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	-	0.3	0.3
$\alpha_L \times 10^{-6} K^{-1}$	21.4	22.7	23.8	24.7	25.2	25.3	-	25

如图 10 所示,三种气流环境下铝板中心位移在上升阶段基本重合,无气流时最大位移为 9.9 mm,略大于空气流时的 9.8 mm 和氮气流时的 9.6 mm。温度场模拟结果表明,无气流时中心最高温度为 472 °C,略高于空气流时的 440 °C 和氮气流时的 424 °C。温度越高,位移也就越大,这表明激光辐照引起的铝板温度变化是影响铝板形变及形变量的主要因素。

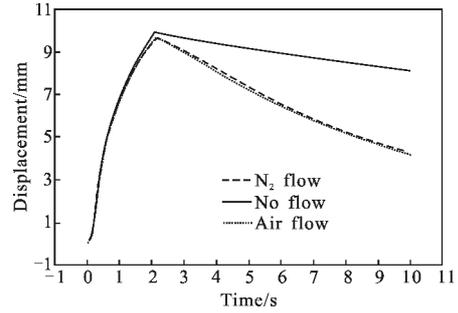


图 10 不同气流环境中铝板中心位移-时间曲线

Fig.10 Simulated displacement traces of rear center in different flow circumstances

4 结论

文中在实验的基础上建立了切向气流环境中激光辐照薄铝板效应的数值模型和模拟方法,利用该模型和方法得到的数值模拟结果能够同实验数据较好的吻合,能够解释相应的实验现象,并对即将开展的实验研究有很重要的指导意义。不足的是切向气流的力学效应的模拟方法仍在进一步探索中,实验方法也有待进一步改进。

参考文献:

- [1] Jiao Luguang, Zhao Guomin, Jiang Houman. Irradiation effects of laser on typical metal targets under tangential airflow[J]. Chinese Journal of Optics, 2011, 4(1):71-81. (in Chinese)
- [2] Zheng Yanli, Du Taijiao, Shu Qingbang, et al. Numerical simulation of thermal effect on metal irradiated by high-power laser beam in different airflow [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(11): 2531-3534. (in Chinese)
- [3] Boley C D, Fochs S N, Rubenchik A M. Large-spot material interactions with a high-power solid-state laser beam [J]. Journal of Directed Energy, 2008, 10(3):15-24.
- [4] Boley C D, Rubenchik A M. Modeling of laser-induced metal combustion[Z]. Monterey, CA, United States: 2008.
- [5] Yamamoto R, Parker J, Boley C, et al. Laser-material interaction studies utilizing the solid-state heat capacity Laser [Z]. Los Angeles, CA, United States: 2007.
- [6] Zhang Jian, Huang Chenguang. Numerical simulation of airflow effect on moving body under laser irradiation [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(11): 1817-1821. (in Chinese)
- [7] Wang Weiping, Liu Changlin, Wang Chunyan, et al. Tangential airflow influence on laser heating materials [J]. High Power Laser and Particle Beams, 1996, 8(3): 373-377. (in Chinese)
- [8] Boley C D, Cutter K P, Fochs S N, et al. Interaction of a high-power laser beam with metal sheets [J]. Journal of Applied Physics, 2010, 107(4):043106.