

文章编号 1674-2915(2011)01-0077-05

# 切向气流作用下激光对典型金属靶的辐照效应

焦路光, 赵国民, 江厚满

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**总结了亚音速切向气流在激光辐照典型金属靶过程中所起的作用, 提出气流效应主要包括增大靶与外界环境的对流换热强度; 移除靶表面的熔化层, 加快烧蚀速率; 促进靶的氧化反应, 有利于靶的烧蚀; 空气动力学效应导致靶在熔化之前就可发生破裂等几个方面。对上述气流效应进行了详尽的分析, 同时指出应对氧化反应及热力联合效应进行更广泛的实验研究, 获得更明确的规律性认识, 以便建立统一的物理数学模型, 从而为实际的工程应用提供参考。

**关键词:**激光与物质相互作用; 金属靶; 切向气流; 烧蚀; 氧化反应; 热力效应

中图分类号: TN249 文献标识码: A

## Irradiation effects of laser on typical metal targets under tangential airflow

JIAO Lu-guang, ZHAO Guo-min, JIANG Hou-man

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

**Abstract:** The effects of some metal targets subjected to the laser irradiation and tangential airflow are overviewed. It points out that the airflow usually affects the metal targets in such ways: cooling the targets, removing the melt layer, supporting the combustion reaction and breaking the target prior to melt-through. After analyzing on the airflow effects in details, it suggests that extensive experimental research should be performed for the combustion reaction and thermal-mechanical effect during laser irradiation. By this way the clearer laws can be understood and the unified physical model can be developed for engineering applications.

**Key words:** laser interaction with matter; metal target; tangential airflow; ablation; combustion reaction; thermal-mechanical effect

## 1 引言

研究强激光对金属靶的辐照效应不仅在工程上具有重要意义, 在理论上也具有极大价值。目

前, 激光对金属靶的加热效应已有广泛的研究<sup>[1~5]</sup>, 其物理本质均为求解各种初边值条件下的傅里叶热传导方程。当激光强度较小时, 靶不会发生熔化, 激光对目标主要起加热作用, 此时只要给定激光加载条件、目标靶的几何形状以及靶

收稿日期: 2010-08-12; 修订日期: 2010-10-23

基金项目: 粤港关键领域重点突破项目(No. 2004A10403021); 广东省攻关项目(No. 2006A10401006)

对激光的吸收特性、靶的热物理性质等,即可求得靶目标温度场的时空变化。当激光强度较大时,靶表面可能发生熔化,由于实际环境中靶表面存在切向气流,在气流作用下熔化产物被移除,靶的质量发生损失,此时必须考虑烧蚀效应才能正确描述激光对金属靶的辐照效应<sup>[6,7]</sup>。因此,开展切向气流作用下激光辐照金属靶的机理研究具有重要意义,此项研究国内尚未见有相关报道。

本文阐述了最近几年国外公开发表的一些研究成果以及其中尚未解决的理论问题,揭示了亚音速切向气流在激光辐照金属靶过程中所起的作用,希望能为国内相关研究工作的开展提供参考。

## 2 切向气流作用下激光对典型金属靶的辐照效应

近几年来,美国劳伦斯-利弗莫尔国家实验室(LLNL)利用其研制的高功率脉冲固体热容激光器对金属靶的破坏机理做了大量的实验研究,并开展了数值模拟工作<sup>[8-15]</sup>。其实验结果表明,亚音速切向气流产生的效应主要包括以下几个方面:降低靶面温度;移除靶表面大部分熔化层;为金属靶的氧化反应提供充足的氧气;空气动力学效应导致厚度较薄的目标靶在熔化温度之前发生破裂。下面通过介绍 LLNL 的实验对这些效应进行详细阐述。

### 2.1 烧蚀效应

图1为Boley等人使用固体热容激光器辐照1020钢靶时,在不同气流条件下测量得到的靶后表面中心温升曲线<sup>[10,13]</sup>,实验参数为:激光波长 $\lambda = 1\ 053\ \text{nm}$ ,单脉冲能量125 J,重频率200 Hz,脉宽约0.5 ms,靶面上光斑尺寸3 cm × 3 cm,能量均匀分布,靶尺寸5 cm × 7.5 cm × 1 cm,气流速度约100 m/s。实验结果表明,当靶表面切向气流为空气时,钢靶被熔穿,辐照后靶的形貌如图2(b)所示;切向气流为氮气时,靶后表面中心在激光辐照结束时刻温度约为1 000 °C,靶并不会被熔穿。这种区别主要是由氧化作用造成的,当气流为空气时,随着熔化产物的移除,来流提供了充足的氧气供钢靶发生氧化反应,反应生热加速了靶的温升。此时,切向气流的作用主要体现在移

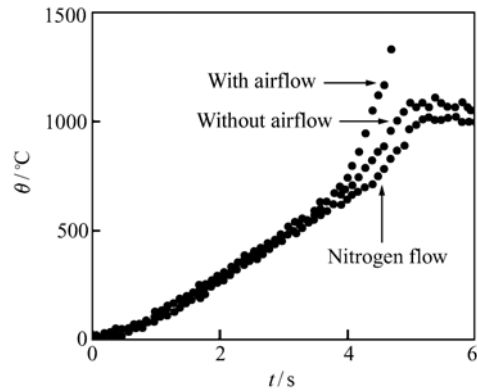


图1 1020钢靶表面无强迫气流及表面存在强迫气流时靶后表面中心温升曲线

Fig.1 Thermocouple readings for 1020 steel targets

除熔化产物及提供氧化反应所需的氧气。而当来流为氮气时,靶不会发生氧化反应,因此引起其温升的能量仅来源于激光,温升程度较小,靶不会被熔穿,此时切向气流的作用主要为移除表面的熔化产物。当靶表面不存在切向气流时,温升历史与切向气流为氮气时的情形相近,但其温升程度要稍大,这主要是由于切向强迫气流作用下,靶表面对流换热强度较大,即气流还起到降温的作用。图2(a)为无切向气流作用时,激光辐照后钢靶表面形貌图,可见靶并没有被熔穿,由于重力场作用,熔化产物发生定向流动,这同图2(b)的形貌截然不同。

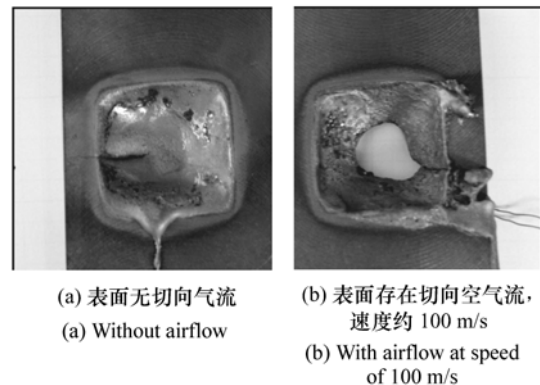


图2 激光辐照后钢靶表面形貌图

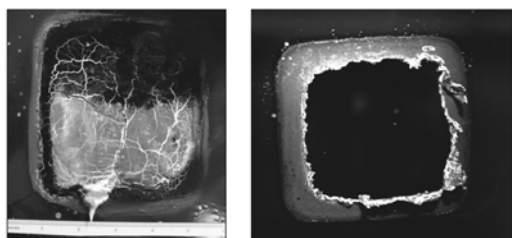
Fig.2 Steel targets after irradiation experiments

以上分析表明,在实际环境中,气流所起的作用主要包含以下两个方面:首先,气流移除熔化产物,从而增大烧蚀速率;其次,气流提供了充足的

氧气供靶发生氧化反应,反应生热有利于靶的升温,从而可增大烧蚀速率。

## 2.2 热力联合效应

图3为Boley等人使用固体热容激光器辐照6061铝合金靶时,激光辐照结束后靶的形貌图<sup>[14,15]</sup>。实验参数为:激光波长 $\lambda = 1\ 053\ \text{nm}$ ,单脉冲能量125 J,重频率200 Hz,脉宽0.5 ms,光斑能量均匀分布。图3(a)中光斑尺寸为12 cm $\times$ 12 cm,激光辐照时间为4 s,表面无切向气流。图3(b)中光斑尺寸为13 cm $\times$ 13 cm,激光辐照时间为4 s,表面存在切向气流,气流速度约为100 m/s,两种情形下靶的厚度均为0.18 cm。由图3(a)可以看出,在激光作用后,靶表面出现热导致的裂纹及熔化痕迹,但靶并没有被熔穿。当光斑扩大到13 cm $\times$ 13 cm时,靶面上的平均功率密度从0.174 kW/cm<sup>2</sup>降低至0.148 kW/cm<sup>2</sup>,在光斑辐照区域,靶发生了大面积的穿孔。与图3(a)相比,图3(b)中的激光功率密度更低,且靶表面存在切向气流。气流会起降温作用,如果仅考虑热效应,那么势必得到一个推论,与图3(a)相比,图3(b)中靶表面的熔化及裂纹效应将得到削弱,但事实并非如此。因此应该考虑两者之间较大的区别在于气流环境不同(图3(a)中靶表面不存在切向气流,而图3(b)靶表面存在切向气流),因此造成图3(b)中现象的来源必然是切向气流与激光共同作用于靶时产生的热力效应。



(a) 光斑大小为12 cm $\times$ 12 cm, 表面无切向气流  
(a) 12 cm $\times$ 12 cm spot, without airflow  
(b) 光斑大小为13 cm $\times$ 13 cm, 表面有切向气流  
(b) 13 cm $\times$ 13 cm spot, with airflow

图3 激光辐照4 s后铝合金靶形貌图

Fig. 3 Two targets irradiated for 4 s

图4为激光辐照过程中铝合金靶的破裂过程(对应于图3(b)情形)。第1帧为激光辐照

1.67 s时靶的形貌,光斑辐照区域靶发生了大面积的凸起。在此之前,靶的温度逐渐升高,其力学性能不断下降,而切向气流会降低靶面处的压力,从而在靶的前后产生压差,使靶产生较大面积的变形,当形变增大到一定程度后,靶表面的凸起即会改变切向气流的状态。这从第1帧图像的穿孔位置即可看出,穿孔并没有发生在光斑中心,而是在气流的下游位置,这可能是由于靶的形变导致气流在该处形成旋涡,增大了局部压力,从而形成较大的剪切作用,导致穿孔的出现。随着激光的继续辐照,靶的形变将会继续增大,在剪切力的作用下,靶表面形成了两个较大的穿孔(第2帧及第3帧图像),最终合并为一个更大的穿孔(第4帧及第5帧图像)。由后面3帧图像可以看出,气流移除的靶材均为宏观的碎片,靶并没有发生熔化现象。因此,当铝合金靶较薄时,切向气流导致的力学效应可以造成靶的整体破裂,而并不需要将靶熔化,这相当于降低了对靶面处激光功率的要求。

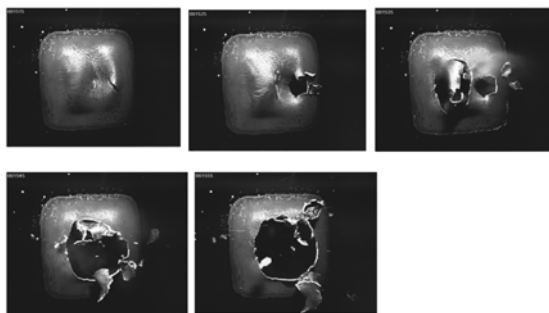


图4 铝合金靶破裂过程

气流方向从左至右,第1帧图像对应激光辐照过程中1.67 s时刻情形,相邻两帧之间的时间间隔为160 ms

Fig. 4 Successive stages in burn-through of an aluminum target

The wind is from the left. The time of the first frame is 1.67 s after the beam was turned on. The time between the two frames is about 160 ms

## 3 尚未解决的问题

上节通过介绍最近几年来 LLNL 所做的工

作,论述了亚音速切向气流在激光辐照金属靶中可能产生的效应。同时,建立相关的物理模型描述实验效应,并能将理论模型应用于预测实际工程问题,也是至关重要的课题。目前,描述激光对金属靶辐照效应的物理数学模型已有很多,很大一部分来源于激光加工的实际需求<sup>[16-22]</sup>。当靶表面存在切向气流时,在物理模型中就需要考虑气流效应。在目标靶较厚情形下,气流效应主要包括移除熔化产物及促进氧化反应,其中较为复杂的是如何考虑氧化反应。对于不同的金属,氧化反应规律相差较大,在建立相应的数学模型时,必须考虑氧化反应产生的效应。因此,首先需要针对不同的金属材料,定量描述氧化反应速率,氧化层的厚度及氧化反应放热的强度与激光参数、气流参数之间的关系。进行这类研究必须依靠精密的实验手段,而目前还未发现对此有系统的研究报告。LLNL在其理论模型中只是在激光加载边界上人为地增加热流密度值,以此模拟氧化反应所产生的热量,并没有揭示其物理实质,因此有必要对此进行细致的研究。

针对切向气流与激光联合作用下热力效应导致的靶的破坏,在LLNL实验之前还未有相关研究报告,据此LLNL认为这种效应是一种新的破坏效应<sup>[15]</sup>。但目前LLNL对其机理研究还不够深入,缺乏统一的数理模型,而且其相关报道仅仅描述了特定条件下靶的破坏过程,对光斑大小、靶厚度、靶材料发生变化及气流速度发生变化时的实验现象如何并不清楚。要揭示其内在规律,还须进行系统的实验研究,确定热力破坏效应与光斑尺寸、靶厚度、气流速度等各种参数之间的定量

关系,确定何种条件下力学效应占主导作用,何种条件下力学效应可以忽略等基本规律,以此为基础才能进行更为一般的理论研究。进行理论研究的关键是要建立统一的数理模型描述激光、靶目标、流场三者的相互关联。由上文分析可知,流场在目标靶的热力破坏效应中起着关键作用。以往的研究成果已对热力效应导致结构的破坏进行过大量研究,其物理本质为求解热弹塑性动力学问题。而当靶表面存在切向气流时,靶前后存在压力差,靶面变形后气流状态将发生变化,变化后的气流对靶的作用也随之改变。因此,在数值模拟中还须考虑流场与靶目标的耦合。综合而言,在理论模型中需要同时考虑热弹塑性动力学效应及流固耦合效应,如何将这两个高度非线性的问题进行耦合求解,目前尚未发现研究报告,研究思路还不清晰。

## 4 结 论

本文通过介绍最近几年LLNL公开发表的一些研究成果,重点阐述了亚音速切向气流在激光破坏典型金属靶中所起的作用,分析了目前研究中存在的不足以及尚未解决的基础理论问题。文章指出在今后的研究过程中,还需要针对不同的气流速度、不同类型的金属开展激光辐照效应的实验研究,以便在足够多的实验数据基础上形成更为清晰的规律性认识并建立相应的数学模型描述物理现象,以此预测不同环境下各种目标靶被破坏所需的激光阈值。

### 参考文献:

- [1] BRUGGER K. Exact solutions for the temperature rise in a laser-heated slab[J]. *J. Appl. Phys.*, 1972, 43(2): 577-583.
- [2] SPARKS M. Theory of laser heating of solid metals[J]. *J. Appl. Phys.*, 1976, 47(3): 837-849.
- [3] WARREN R E, SPARKS M. Laser heating of a slab having temperature-dependent surface absorptance[J]. *J. Appl. Phys.*, 1979, 50(12): 7952-7957.
- [4] LOZE M K, WRIGHT C D. Temperature distributions in semi-infinite and finite-thickness media as a result of absorption of laser light[J]. *Appl. Opt.*, 1997, 36(2): 494-507.
- [5] LOZE M K, WRIGHT C D. Temperature distributions in laser-heated semi-infinite and finite-thickness media with convective surface losses[J]. *Appl. Opt.*, 1998, 37(28): 6822-6832.
- [6] CRANE K C A, GARNSWORTHY R K, MATHIAS L E S. Ablation of materials subjected to laser radiation and high-speed gas flows[J]. *J. Appl. Phys.*, 1980, 51(11): 5954-5961.

- [7] JOHNSON R L, O'KEEFE J D. Laser burn-through time reduction due to tangential airflow-an interpolation formula[J]. *AIAA J.*, 1973, 12(8):1106-1109.
- [8] BOLEY C D, RUBENCHIK A M. Modeling of material removal by solid state heat capacity lasers[R]. UCRL-JC-146480, April 2002.
- [9] BOLEY C D, RUBENCHIK A M. Modeling of high-energy pulsed laser interactions with coupons[R]. UCRL-ID-151857, February 2003.
- [10] BOLEY C D, FOCHS S N, RUBENCHIK A M. Lethality effects of a high-power solid-state laser[R]. UCRL-CONF-229010, March 2007.
- [11] YAMAMOTO R, PARKER J, BOLEY C, *et al.*. Laser-material interaction studies utilizing the solid-state heat capacity laser[R]. UCRL-CONF-230816, May 2007.
- [12] BOLEY C D, RUBENCHIK A M. Modeling of laser-induced metal combustion[R]. UCRL-CONF-401854, February 2008.
- [13] BOLEY C D, FOCHS S N, RUBENCHIK A M. Large-spot material interactions with a high-power solid-state laser beam [R]. UCRL-JRNL-406723, August 2008.
- [14] BOLEY C D, CUTTER K P, FOCHS S N, *et al.*. Study of laser interaction with thin targets[R]. LLNL-PROC-411215, March 2009.
- [15] BOLEY C D, CUTTER K P, FOCHS S N, *et al.*. Interaction of a high-power laser beam with metal sheets[J]. *J. Appl. Phys.*, 2010, 107:0431061-0431065.
- [16] CHAN C L, MAZUMDER J. One-dimensional steady-state model for damage by vaporization and liquid expulsion due to laser-material interaction[J]. *J. Appl. Phys.*, 1987, 62(11):4579-4586.
- [17] CHAN C L, MAZUMDER J, CHEN M M. Effect of surface tension gradient driven convection in a laser melt pool; three-dimensional perturbation model[J]. *J. Appl. Phys.*, 1988, 64(11):6166-6174.
- [18] FAROOQ K, KAR A. Removal of laser-melted material with an assist gas[J]. *J. Appl. Phys.*, 1998, 83(12):7467-7473.
- [19] TOKAREV V N, KAPLAN A F H. An analytical modeling of time dependent pulsed laser melting[J]. *J. Appl. Phys.*, 1999, 86(5):2836-2846.
- [20] TOSTO S. Modeling and computer simulation of pulsed-laser-induced ablation[J]. *Appl. Phys. A*, 1999, 68:439-443.
- [21] SOLANA P, KAPADIA P, DOWDEN J, *et al.*. Time dependent ablation and liquid ejection processes during the laser drilling of metals[J]. *Opt. Communications*, 2001, 191:97-112.
- [22] ABDERRAZAK K, KRIAA W, SALEM W B, *et al.*. Numerical and experimental studies of molten pool formation during an interaction of a pulse laser(Nd:YAG) with a magnesium alloy[J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2009, 41:470-480.

作者简介:焦路光(1984—),男,山西晋城人,博士研究生,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。

E-mail:jiaoluguang001@163.com

赵国民(1963—),男,河南长垣人,教授,博士生导师,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。

E-mail:gmzhao@nudt.edu.cn

江厚满(1970—),男,安徽怀宁人,副教授,硕士生导师,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。

E-mail:jhm3395@sina.com