

# 气流环境下激光辐照金属能量耦合特性

金云声, 张 黎, 张永强, 贺 佳, 谭福利, 赵剑衡\*, 孙承纬

中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900

**摘要** 在马赫数为 0.5 气流条件下, 进行了激光辐照 30CrMnSiA 钢材料的温度测量实验。实验结果显示, 材料的温升速率和上升最高温度在有气流环境下比无气流环境下明显下降。利用数值反演方法获得了气流条件下激光加载面样品材料实际吸收热流密度变化以及温度变化。与无气流条件下的数据对比可发现, 相同温度对应的实际吸收热流密度在气流环境下大于无气流环境, 该结果是由气流条件加速样品材料的氧化影响激光金属反射率所致。

**关键词** 激光器; 激光-固体相互作用; 反射率; 气流; 数值反演

**中图分类号** O436.2

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201744.0601003

## Energy Coupling Properties Between Laser and Metal in Airflow

Jin Yunsheng, Zhang Li, Zhang Yongqiang, He Jia, Tan Fuli, Zhao Jianheng, Sun Chengwei

*Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China*

**Abstract** Temperature measurement experiment of laser irradiated 30CrMnSiA steel with mach number of 0.5 airflow is performed, experimental results show that the temperature rising rate and maximum rising temperature are declined in airflow comparing with static condition. And the absorbed heat flux density and temperature history on laser irradiated surface with airflow are achieved by numerical inverse method. Comparing with the result on static condition, the absorbed and conducting heat flux with airflow is more than the one on static condition at the same temperature. It is analyzed that this result is due to accelerating oxidation reaction by airflow and influencing the reflectivity on laser irradiated surface of metal.

**Key words** lasers; laser-solid interaction; reflectivity; airflow; numerical inverse

**OCIS codes** 140.3580; 120.5700; 010.1290; 000.3860

## 1 引 言

气流条件下激光与材料能量耦合规律研究具有多种民用和军事应用意义<sup>[1]</sup>。2007~2009 年美国利弗莫尔(LLNL)实验室的 Yamamoto 等<sup>[2]</sup>和 Boley 等<sup>[3]</sup>, 在切向气流环境下, 对金属薄板进行了强激光近场辐照实验, 分别研究了金属薄板在气流环境下产生的熔融剥蚀和热应力破坏效应。1996 年, 中国工程物理研究院流体物理研究所的王伟平等<sup>[4]</sup>在重复频率 YAG 激光加载下, 研究了 30CrMnSiA 钢片处于空气自然对流和切向强迫气流环境中不同的温度效应。随后, 国内很多研究人员对不同材料(如 TA15 钛合金、LY12 铝、45# 钢等金属和各种复合材料)开展了气流环境下的实验和数值模拟的研究<sup>[5-9]</sup>, 这些研究主要关注气流环境下的熔融剥蚀、温度以及热应力等效应。

激光作用下, 金属表面在产生熔融状态前, 对于切向气流相对静态环境会产生较低的温度效应, 但其仍缺少合理的物理解释, 大部分归结于辐照表面气流条件下的对流热损耗。该研究受限于能量耦合系数的测

**收稿日期:** 2016-12-07; **收到修改稿日期:** 2017-02-14

**作者简介:** 金云声(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事斜波压缩、激光与物质相互作用等方面的研究。

E-mail: yunsheng@mail.ustc.edu.cn

**导师简介:** 孙承纬(1939—), 男, 中国工程院院士, 主要从事高能量密度物理方面的研究。E-mail: sunchengwei@hotmail.com

\* **通信联系人.** E-mail: jianh\_zhao@caep.ac.cn

量技术,其原因在于气流环境下较难收集全部的反射光,使得常规的类似积分球等以收集光为原理的反射率测量方法无法正常使用。

本文采用数值反演方法<sup>[10]</sup>(一维热传导方程在常温均匀分布的初始条件下,进行数值离散,后将离散方程进行求逆,获得反演计算的离散方程,实现数值反演过程)获取激光加载面样品实际吸收热流密度历史、温度历史等数据,并分析气流条件下激光金属能量耦合规律。

## 2 气流条件下激光辐照材料实验

将直径为 100 mm、厚度为 1 mm 的 30CrMnSiA 钢样品封装于风动实验段内,使样品一面有气流流过,另一面无气流。激光透过风动实验段,垂直辐照于样品有气流一面的中心,样品无气流一面连接有热电偶,实验示意如图 1 所示。

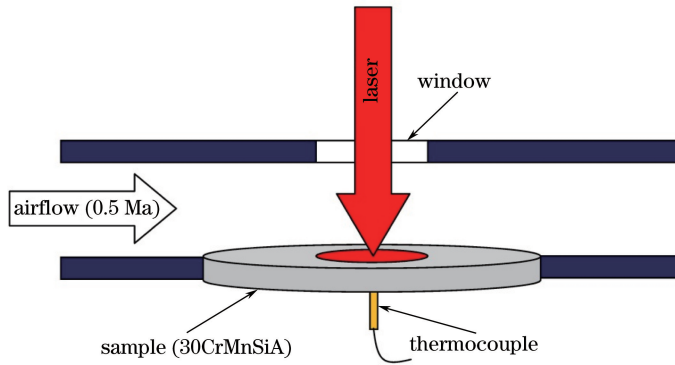


图 1 实验示意图

Fig. 1 Sketch map of experiment

在马赫数为 0.5(马赫数 Ma 为速度与当地音速之比)气流下,1000 W 功率、空间平顶分布且直径为 25 mm 光斑、1064 nm 波长的连续激光辐照 15 s,获得后表面温度变化情况,结果如图 2 所示。因激光透过光学透镜、分光镜以及窗口玻璃等器件后才到达样品靶表面,所以经测量实际到靶功率约为 760 W。

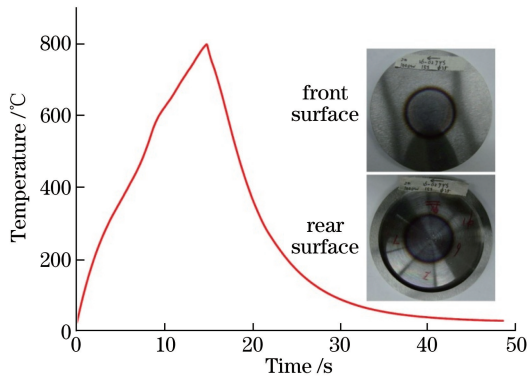


图 2 气流条件下激光加载后表面温度历史以及回收样品

Fig. 2 Temperature history of rear surface of sample irradiated by laser with airflow and photos of recycled sample  
为对比,在相同实验条件下,进行了无气流的静态实验,获得了相应的后表面温度历史数据。

## 3 实际吸收热流历史与加载面温度历史

实验中光斑半径与样品厚度的比值为 12.5,经数值模拟测试,样品靶中心厚度方向上,激光作用时间内,热传导过程可用一维热传导方程描述。

采用一维数值反演方法<sup>[10]</sup>对样品背面中心处温度历史数据进行处理,获得有、无气流两种条件下激光辐照表面实际吸收热流密度变化历史,以及激光辐照表面温度变化历史,并建立两者的对应关系,结果如图

3 所示,实验中样品前表面的激光功率密度为  $155 \text{ W/cm}^2$ 。

从图 3 可以看出,在低于  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  时,两种条件下实际吸收热流密度相差不大;但在相对高温段,有气流条件下实际吸收的热流密度更大,且结果中出现无规律的小幅震荡。

在有、无气流条件下,比对计算与实验测量的激光辐照表面和后表面温度历史,结果如图 4 所示。

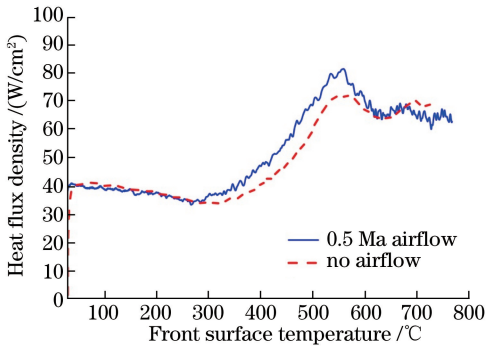


图 3 激光辐照面有无气流条件下实际吸收热流密度历史对比

Fig. 3 Comparison of actually absorbed heat flux density on laser irradiated surface under airflow and no airflow condition

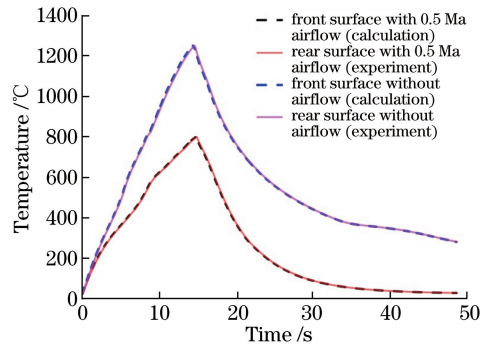


图 4 计算与实验测量的激光辐照前、后表面温度对比

Fig. 4 Comparison of calculated and experimental temperature on front and rear surface

图 4 结果显示,样品前、后表面温度基本重合,这是由于样品厚度薄,在厚度方向上导热速率相比表面温升速率快很多,在秒级温度上升时间尺度下,样品前、后表面温差可忽略。且从实验数据可以看出,在相同的激光加载下,有、无气流两种条件下的温度上升速率和上升最高温度均相差较大。

## 4 结果分析

### 4.1 反射率变化的简化模型

连续激光辐照于金属表面,形成金属氧化膜,氧化膜厚度增加的过程,可采用抛物型方程描述为

$$\frac{dx}{dt} = \frac{D}{x} \exp(-T_d/T), \quad (1)$$

式中  $x$  为金属氧化膜的厚度,  $t$  为时间,  $T_d$  为氧化物中金属或氧离子的扩散激活能量对应的温度,  $T$  为氧化物的温度,  $D$  为金属或氧离子在金属氧化物中的扩散系数<sup>[11]</sup>。(1)式中氧化膜厚度增加速率与氧化膜的厚度成反比,与扩散系数成正比,且这种正、反比关系只有在温度达到或超过扩散激活能量时才会明显体现。

在均匀介质模型的假设下,激光入射于金属氧化膜层内,形成多次反射和吸收,总的反射率随膜层厚度呈现衰减的震荡关系,具体表达式见参考文献[12]。

在以上两种机制中,可建立反射率与时间的关系,即普遍采用的反射率变化简化模型。

### 4.2 氧气分子运动状态影响氧气在氧化膜层内的扩散

文献[13]中,静态无气流空气环境下设计的重复加载实验体现了反射率对温度的依赖性,可采用(1)式描述。不同氧化膜层的温度  $T$ , 对应不同的扩散能力  $D \cdot \exp(-T_d/T)$ , 温度越高,扩散能力越强,膜层厚度增加越快。

以上过程中,仅考虑了氧化膜层的温度和厚度对膜层增厚速率的影响。然而,位于膜层一侧的氧气分子运动状态也会对氧化膜层内的扩散运动产生影响。

静态无气流条件下,由于氧化反应,金属表面氧气消耗完后,空气中的氧气会以扩散的形式逐步填补至金属表面,且单个氧分子在某一方向上平均动能的贡献项来源于氧分子热运动,当不考虑氧气分子自旋运动,只考虑空间三自由度方向上的平动时,由热运动引起单一方向上平均动能为热运动总能的  $1/3$ 。而在气流条件下,金属表面的氧气不断被来流空气更新,且因边界层效应,相比静态环境,氧气分子附加了定向动能,这使得氧分子在某一方向上平均动能的贡献项增加为热运动项和定向动能项<sup>[14]</sup>。

静态常温下氧分子在某一特定方向上的平均动能  $E_1$  约为

$$E_1 = k \cdot T. \quad (2)$$

在 0.5 Ma 气流条件下氧分子的平均动能  $E_2$  约为

$$\left. \begin{aligned} E_2 &= k \cdot T + \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2} m_0 v^2 \\ v &= a \cdot c = \frac{1}{2} c \\ \frac{1}{2} m_0 c^2 &\approx k \cdot T \end{aligned} \right\} \Rightarrow E_2 = \left(1 + \frac{a^2}{3}\right) k \cdot T = \frac{13}{12} k \cdot T = \frac{13}{12} E_1, \quad (3)$$

式中  $k$  为波尔兹曼常数,  $T$  为常温,  $m_0$  为氧分子质量,  $v$  为气流的平均速度,  $a$  为马赫数,  $c$  为声速。其中, 第一个关系式中,  $k \cdot T$  为热运动贡献,  $1/2 m_0 v^2$  为定向动能总能, 但由于边界层效应, 定向动能达到辐照表面时, 已向任意方向转变, 使其变为氧分子附加的热运动, 此时任意方向上平均动能为总定向动能的  $1/3$ ; 第二个关系式为马赫数的定义式; 第三个关系式表示: 空气在常温常压状态下的热运动过程中, 粒子平均距离远大于粒子间朗道长度<sup>[15]</sup>, 粒子处于碰撞状态获得势能, 相比粒子处于运动状态获得的动能可以忽略, 即粒子的热运动能量与粒子所具有的平均平动动能相当, 而气体粒子的扰动传播速度(声速)与粒子的某一方向平动速度相当。

氧气分子沿某一方向的平均动能在有气流时要大于无气流情况, 即有气流环境下的氧分子相比无气流环境更活跃, 这使得相同温度下氧气在金属氧化膜中的扩散能力提升, 结果如图 5 所示。文献[11]中的实验规律可归纳为, 辐照表面温度的提升使其氧化膜一侧的氧分子可渗透氧化膜而扩散至更远处, 且与金属发生氧化反应, 从而增加氧化膜层厚度, 膜层厚度的增加又阻碍氧分子的进一步扩散, 最终达到相对平衡的状态。因此, 实验结果表明, 除了受辐照的固体表面(氧化膜层)温度以外, 气流会引起氧分子定向平动动能的增加(氧气运动状态的改变), 因其活跃程度的提升, 而成为又一个可提高氧分子扩散能力、增厚氧化膜的因素。即在相同温度下, 气流使氧气的扩散系数增加。

图 3 中, 在相对高温段对于同一温度, 有气流时的金属氧化膜形成厚度大于无气流的情况, 所以当建立表面实际吸收热流密度与表面温度关系时, 有气流的金属氧化膜厚度更厚、反射率更低, 进而导致吸收的热流密度更多。该结果表明, 氧气的运动状态影响了膜层内的扩散运动。

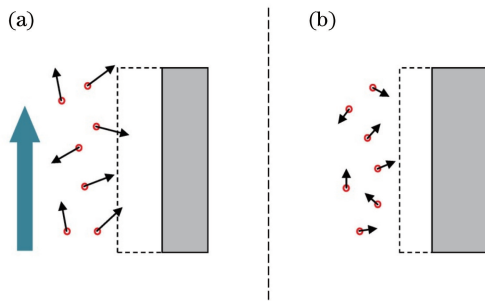


图 5 (a)有气流和(b)静态无气流条件下氧分子携带平均动能差异示意图

Fig. 5 Sketch maps of average kinetic energy carried by oxygen molecule at (a) airflow and (b) static condition

金属表面吸收的热流密度由吸收的激光功率密度减去经热辐射和对流等过程损失的能量密度后, 实际流入金属体内部进行传导, 该过程如图 6 所示。相同温度下, 有气流时金属表面对流系数相比静态无气流情况大很多, 损失的热流密度也更多。所以, 同一温度下, 金属表面吸收的激光功率密度差异比图 3 结果中体现的差异更显著, 即金属表面氧分子的平均动能影响激光反射率的程度比图 3 所示的差异更大。

借助数值反演方法<sup>[10]</sup>获得了气流环境下金属辐照表面实际吸收并传递的净热流密度, 与无气流环境下的比对实验结果表明, 在金属氧化膜增厚的动力学过程中, 气流的定向运动影响了金属的氧化过程。

#### 4.3 气流环境相比静态环境下激光辐照金属热耦合效率降低的原因

图 4 中的实验结果显示, 相同激光加载条件下, 气流环境中温度上升速率和上升最高温度相比无气流环境均有明显降低。通常容易将这种损失能量的主要原因归结为气流环境中对流系数的增大而引起的直接冷却作用, 但这样的理解并不完整。

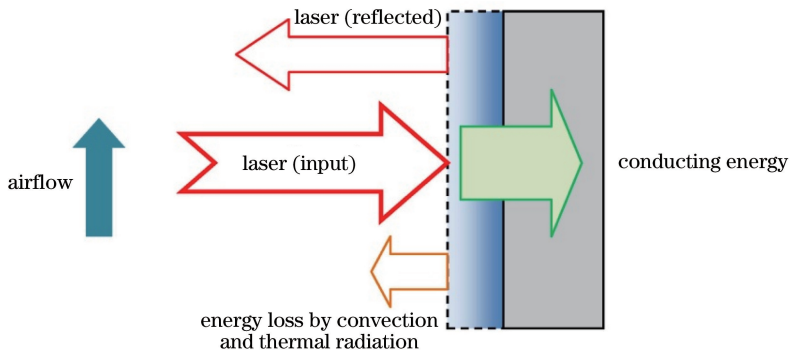


图 6 能量转移示意图

Fig. 6 Sketch map of energy flow

气流环境中对流系数增大而引起的冷却使得辐照表面温度相对无气流静态环境上升缓慢,进而导致处于高反射率状态的持续时间相对较长,表面反射的激光能量增大,实际吸收的激光能量减少,最终导致激光辐照金属热耦合效率降低。

切向气流环境下氧气分子的运动状态促进了氧化膜的生长,导致激光辐照金属热耦合效率的降低速率有所缓解。因此,图 4 中的实验结果为以上几种机制共同作用的结果。

## 5 结 论

在 0.5 Ma 气流条件下,进行了激光辐照 30CrMnSiA 钢材料的温度测量实验。实验结果显示,气流条件影响了激光金属反射率,在金属表面形成氧化膜并以其厚度变化为主导的反射率变化物理模型中,金属表面氧分子携带的平均动能影响氧气在金属氧化膜中的扩散作用,使得相同温度下,有气流环境下形成氧化膜厚度大于无气流环境,进而导致反射率和吸收热流密度产生差异。

## 参 考 文 献

- [1] Sun Chengwei, Lu Qisheng, Fan Zhengxiu, *et al.* Laser irradiation effects[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002: 28-76.  
孙承伟, 陆启生, 范正修, 等. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 28-76.
- [2] Yamamoto R, Parker J, Boley C, *et al.* Laser-material interaction studies utilizing the solid-state heat capacity laser [C]. 20<sup>th</sup> Annual Solid State and Diode Laser Technology Review Los Angeles, 2007: 230816.
- [3] Boley C D, Cutter K P, Fochs S N, *et al.* Study of laser interaction with thin targets[C]. Sixth Annual High Energy Laser Lethality Conference Monterey, 2009: 411215.
- [4] Wang Weiping, Liu Changling, Wang Chunyan, *et al.* Tangential airflow influence on laser heating materials[J]. High Power Laser and Particle Beams, 1996, 8(3): 373-377.  
王伟平, 刘常龄, 王春彦, 等. 切向气流对激光加热材料的影响[J]. 强激光与粒子束, 1996, 8(3): 373-377.
- [5] Zheng Yanli, Du Taijiao, Shu Qiangbang, *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): 2531-2534.  
郑艳丽, 杜太焦, 束庆邦, 等. 不同气流环境下激光辐照金属材料温升的数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(11): 2531-2534.
- [6] Hu Peng, Chen Faliang. Numerical simulation of plane target in airflow under laser irradiation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(7): 1935-1939.  
胡 鹏, 陈发良. 高速气流中激光加热平板数值模拟与分析[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(7): 1935-1939.
- [7] Zhang Yongqiang, Tao Yanhui, Zhang Li, *et al.* Thermal response of TA15 titanium alloy and LY12 aluminum alloy irradiated by laser under supersonic tangential flow[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(8): 081005.  
张永强, 陶彦辉, 张 黎, 等. 激光辐照超音速气流下 TA15 钛合金和 LY12 铝合金的热响应[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(8): 081005.
- [8] Yuan Chun, Jiang Houman, Zhao Guomin. 45<sup>#</sup> steel interaction with DF Laser beam in different gas flow[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(4): 041011.

- 袁 春, 江厚满, 赵国民. 不同气流环境下氟化氙激光对 45# 钢靶的辐照效应[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(4): 041011.
- [9] Zhang Jianmin, Ma Zhiliang, Feng Guobin, *et al.* Influence of tangential airflows velocity on ablation heat of laser irradiated glass fiber reinforced resin composites[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0306004.  
张检民, 马志亮, 冯国斌, 等. 切向空气流速度对玻璃纤维增强树脂基复合材料激光烧蚀热的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0306004.
- [10] Jin Yunsheng, Tan Fuli, He Jia, *et al.* Numerical inverse computation of reflectivity[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(3): 549-552.  
金云声, 谭福利, 贺佳, 等. 反射率的数值反演[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(3): 549-552.
- [11] Arzuov M I, Barchukov A I, Bunkin F V, *et al.* Influence of interference effects in oxide films on the kinetics of laser heating of metals[J]. Soviet Journal of Quantum Electronics, 1979, 9(3): 281-284.
- [12] Li Ding, Chen Yinhu, Ma Jinxiu, *et al.* Plasma physics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.  
李 定, 陈银华, 马锦秀, 等. 等离子体物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [13] Born M, Wolf E. Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light[M]. 7th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999: 614-634.
- [14] Jin Yunsheng, Tan Fuli, Li Mu, *et al.* Reflectivity of 30CrMnSiA steel under continuous-wave laser repeated irradiation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(12): 2827-2830.  
金云声, 谭福利, 李 牧, 等. 连续激光重复加载下 30CrMnSiA 钢的反射率[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(12): 2827-2830.
- [15] Cao Liezhao, Zhou Zifang. Thermology thermodynamics and statistical physics[M]. Beijing: Science Press, 2008.  
曹烈兆, 周子舫. 热学 热力学与统计力学[M]. 北京: 科学出版社, 2008.