

气流作用下激光熔穿金属板效应研究

彭国良 韦成华 杜太焦 张相华

西北核技术研究所激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024

摘要 建立了气流作用下激光辐照金属的数值模型,利用 CFD 软件模拟了不同气流速度、不同厚度金属锡板的激光辐照熔化烧蚀过程,并对比了实验结果。通过研究液态金属迁移机理及对流散热机理,分析了气流速度对不同厚度金属板的辐照效应的影响。研究表明,较厚金属板的辐照过程中会形成较深的熔坑,使得相同气流速度下熔化的液态金属较难移除,导致熔穿时间随气流速度增大而减小;较薄金属板的熔坑较浅,液态金属容易移除,由于移除的金属液滴混合在空气中增强了对流换热效果,因此熔穿时间随气流速度增大而增大。

关键词 激光技术;激光辐照;气流;金属熔化物迁移;对流散热

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.061408

Effect of Airflow on Metal Plate Melted Through by Laser

Peng Guoliang Wei Chenghua Du Taijiao Zhang Xianghua

State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China

Abstract A numerical model of laser irradiating metal under airflow is established. The flame ablations irradiated by laser under different airflow velocity and thickness of tin plates are simulated by the CFD software and contrasted with experimental results. Laser irradiation on metal plates with different thickness affected by airflow velocity is analyzed based on the research on liquid metal removal and heat convection mechanisms. The results indicate that the melting-through time of thicker metal plate decreases with the increasing airflow velocity as deeper craters are formed in the irradiation process and the melted liquid metal is more difficult to remove at the same airflow velocity; however, the melting-through time of thinner metal plate increases with the increasing airflow velocity as the craters are shallower, the liquid metal is easier to remove, and the heat convection is enhanced by mixing of the removed metal drop with air.

Key words laser technique; laser irradiation; airflow; metal fusion removal; heat convection

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.2660; 350.3390; 350.5340

1 引言

在激光辐照金属过程中,气流作用包括熔化液态金属的迁移、对流换热、剥离或增加表面的氧化层及力学效应。对亚音速气流而言,力学效应一般只在大光斑、薄金属板中有一定效果。氧化层变化导致耦合率改变,具体计算可参考文献^[1-2]。对流换热导致表面能量损失,可利用经验公式计算。在表面气流作用下,液态层的迁移对辐照响应有较大影响。目前,已有很多学者研究了气流作用下激光辐照金属熔化物的迁移问题。Johnson 等^[3-4]研究了亚音速气流作用下激光烧蚀金属问题,从两种流体的界面波理论出发,提出了界面波失稳导致毛细柱破碎模型,推导了熔穿时间与气流速度和光斑尺寸的一维解析公式,但没有考虑温度梯度引起的热对流对界面波的影响,也没有考虑实际边界的影响。在此基础上,Robin 等^[5-7]提出了半无限大固体烧蚀液固界面移动速度与气流速度和激光功率密度的关系,研究了超音速气流下界面波的失稳现象,认为随

收稿日期: 2015-12-23; **收到修改稿日期:** 2016-01-23; **网络出版日期:** 2016-05-21

基金项目: 强激光与物质相互作用国家重点实验室基金(SKLLIM1301)

作者简介: 彭国良(1985—),男,硕士,助理研究员,主要从事激光辐照效应的数值模拟等方面的研究。

E-mail: pgl02@163.com

着气流速度增加,界面波失稳状态不会无限增加,反而会变成稳定的周期波,因此超音速气流引起的迁移机制以界面剪切应力为主。这些工作都是基于大量简化的理论分析,没有相关实验验证。Crane 等^[8]发现切向气流下激光辐照金属实验中烧蚀初期以剪切力为主,后期可能存在表面张力波机制。烧蚀实验中通过送料装置始终保持靶材表面与气流相切,回避了熔坑对熔化物迁移的影响。Steenr 等^[9]对材料的激光加工开展了大量研究,利用 level-set 方法追踪金属熔池的形成、发展等。Kwon 等^[10-11]实验研究了 10.6 μm 和 1.06 μm 波长激光对钢和钛合金熔穿时间的影响,测量了不同功率密度下的熔穿时间,认为剪切力是主要的迁移机制。国内学者也对金属的激光辐照效应开展了大量研究。杜秋等^[12-14]开展了激光金属成形的数值模拟和实验研究,张黎等^[15]通过实验数据拟合冲刷温度,模拟熔化物迁移的影响。严向峰等^[16]模拟了气流作用下的激光熔池发展过程,未作规律性分析。本文通过对气流作用下激光辐照金属效应的模拟,研究了激光辐照效应与气流速度、金属板厚度等参数的关系。

2 计算模型

2.1 问题描述

如图 1 所示,气流环境下长方体金属锡表面受激光辐照,金属上表面尺寸为 15 cm \times 1.5 cm。实验时将金属置于与其宽度相同的风道内,风道上方开放,激光光斑整形为方形光斑,光斑宽度与金属相同。基于以上实验条件,计算模型可以简化为二维。由于金属熔化后的能量耦合系数较难测量,因此通过比对实验结果修正能量耦合系数。

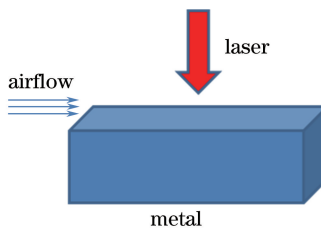


图 1 计算模型示意图

Fig. 1 Sketch of calculation model

2.2 控制方程

激光辐照金属后,金属温度上升,当温度达到熔点后,金属由固态转变为液态。此过程可由熔化模型描述。金属熔化后,液态金属在气流作用下发生迁移。该过程是典型的两相流问题,可以用流体体积函数 (VOF) 模型描述。由于金属气化温度非常高,对采用的激光器而言,可以不考虑金属气化,即不考虑相间质量运输。综合以上两个模型,控制方程可表示如下:

1) 质量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha\rho_a) + \nabla(\alpha\rho_a\mathbf{V}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}[(1-\alpha)\rho_m] + \nabla[(1-\alpha)\rho_m\mathbf{V}] = 0, \quad (2)$$

式中 α 为空气的体积分数, \mathbf{V} 为流体速度矢量, ρ_m 、 ρ_a 分别为金属和空气的密度;

2) 动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\mathbf{V}) + \nabla(\rho\mathbf{V}\mathbf{V}) = -\nabla p + \nabla[\mu(\nabla\mathbf{V} + \nabla\mathbf{V}^T)] + \rho\mathbf{g} + \mathbf{F} + \mathbf{T}, \quad (3)$$

式中 $\rho = \alpha\rho_a + (1-\alpha)\rho_m$, $\mu = \alpha\mu_a + (1-\alpha)\mu_m$, μ_a 和 μ_m 分别为空气和金属的粘度, p 为压强, \mathbf{g} 为重力加速度, \mathbf{T} 为表面张力引起的动量源项, \mathbf{F} 为未熔化金属导致的动量负源项,即

$$\mathbf{F} = -\frac{(1-\beta)^2}{\beta^3 + \epsilon}\mathbf{A}\mathbf{V}, \quad (4)$$

式中 ϵ 一般取 0.001, A 一般取 10^7 。

对于熔化问题,液相分数 β 可表示为

$$\beta = \begin{cases} 0, & T < T_s \\ 1, & T > T_1 \\ \frac{T - T_s}{T_1 - T_s}, & T_s \leq T \leq T_1 \end{cases}, \quad (5)$$

式中 T 为金属的温度, T_s 、 T_1 分别为材料的凝固点和熔点。

金属的焓值为

$$H_m = \int c_p dT + \beta L_m, \quad (6)$$

式中 c_p 为等压热容, L_m 为金属熔化潜热。

能量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla(\rho H V) = \nabla(k \nabla T) + S, \quad (7)$$

式中 S 为热源, k 为混合物的热导率, H 为混合物的热焓, 混合物的热导率和热焓可分别表示为

$$H = \frac{\alpha \rho_a H_a + (1 - \alpha) \rho_m H_m}{\rho}, \quad (8)$$

$$k = \alpha k_a + (1 - \alpha) k_m, \quad (9)$$

式中 k_a 和 k_m 分别为空气和金属的热导率。

2.3 材料参数

金属材料为白锡,其热导率、密度、粘度及表面张力系数如表 1 所示^[17]。

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

Temperature / °C	Density / (g · cm ⁻³)	Thermal conductivity / (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	Surface tension / (N · mm ⁻¹)	Viscosity / (mPa · s)
20	7.29	52.9		
100		60.7		
200		56.5	685	
280		34.1		
232	6.97			2.71
250	6.982	32.7		1.88
300	6.92	33.7		1.66
351				1.52
400	6.85	33.1	580	1.38
450				1.27
500	6.78	33.1	565	1.18
600	6.71		550	1.05
700	6.695		535	0.95
800	6.57		520	0.87
900	6.578			
1000	6.518			
1200	6.399			

温度范围为 273.15~503.15 K 时,比热容 $C_p = 221.9004 + 921.096 \times 10^{-4}(T - 273.15) \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 温度范围为 505~1273.15 K 时, $C_p = 234.4608 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。金属熔点为 232 °C,相变潜热 $L_m = 7075.692 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

3 结果与讨论

根据给出的模型,计算了厚度为 10 mm 和 5 mm 的金属板在不同气流速度下的熔穿情况,激光功率密

度为 500 W/cm^2 , 光斑宽度为 2 cm , 初始温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

图 2 所示为不同气流速度下两种厚度金属板的熔穿时间实验结果与模拟结果。从图中可以看出, 模拟结果与实验结果略有差异, 但基本趋势相同。较薄的金属板熔穿时间随气流速度增大而增大, 较厚的金属板熔穿时间随气流速度增大而减小。

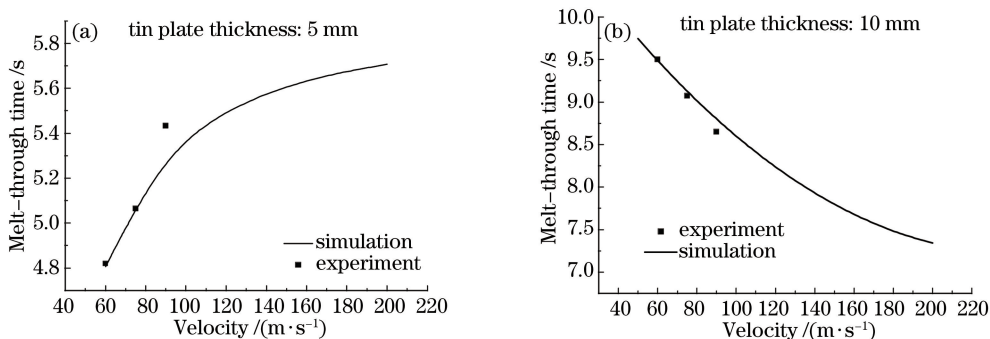


图 2 熔穿时间随气流速度的变化

Fig. 2 Variation in melt-through time with airflow velocity

熔化后液态金属的迁移机理包括界面波失稳破碎机制及气流剪切力机制。下面估计界面波失稳破碎机制导致的特征迁移速度^[6]。

界面波幅值增长最快的波长为

$$\lambda_m = 3\pi\sigma / \rho_a \nu_g^2, \quad (10)$$

幅值增长特征时间为

$$\tau_e \approx [\lambda_m^3 \rho_m / 4\pi\sigma]^{1/2}, \quad (11)$$

特征迁移速度为

$$v_e \approx \lambda_m / (5\tau_e) \approx 0.57 \sim 0.86 \text{ m/s}, \quad \nu_g \in [60, 90], \quad (12)$$

熔化速度为

$$v \approx \frac{\alpha I}{\rho_m c (T - T_0) + \rho_m L} < 0.004 \text{ m/s}, \quad (13)$$

即迁移速度远大于熔化速度, 此时一定范围内的气流速度变化对熔化物的迁移结果影响不大。(10)~(13)式中 σ 为表面张力系数, ν_g 为气流速度, I 为激光强度, c 为比热容。当熔坑变深后, 熔坑中气流速度重新分布并形成回流, 气液界面的气流速度大大降低, 局部甚至低于界面波失稳的临界速度, 导致熔化的液态金属滞留在熔坑内。显然, 熔坑越深, 来流速度越小, 熔坑内滞留的液态金属越多。

气流剪切力机制主要作用于熔池下游。当熔坑变深时, 除界面上气流速度变慢以外, 熔坑边缘斜率增大, 剪切力需要克服液体重力而做功更多, 从而减弱了移除效果。总之, 对于厚板, 气流速度越大, 液态金属移除越快; 对于薄板, 气流速度对液态金属的移除影响较弱。设 h_p 为金属板厚度, 图 3 所示为不同气流速度下金属板典型液态金属分布云图, 从图中可以看出, 当气流速度增大时, 厚板中液态金属层变薄, 薄板中液态金属层变化不大。

另一方面, 不同气流速度条件下, 材料表面对流系数不同, 材料表面的散热量亦不同。根据牛顿冷却公式, 对流传热量可表示为

$$q = h(t_w - t_f), \quad (14)$$

式中 h 为表面对流系数, t_w 、 t_f 分别为材料表面温度及来流温度。试样表面平均对流系数为

$$\bar{h} = 0.664 \frac{k_c}{l} R_e^{1/2} P_r^{1/3}, \quad (15)$$

式中 k_c 为来流导热系数, l 为试样长度, P_r 为气体普朗特数, R_e 为雷诺数。在金属熔化前, 代入空气的参数, \bar{h} 的量级为 10^2 , 而材料表面与来流温度之差也是 10^2 量级, 代入(14)式得到对流传热量为 10^4 量级, 而激光功率密度为 10^6 量级, 故对流散热相对于激光辐照能量较小, 可以忽略。金属熔化后, 液态金属在界面波失

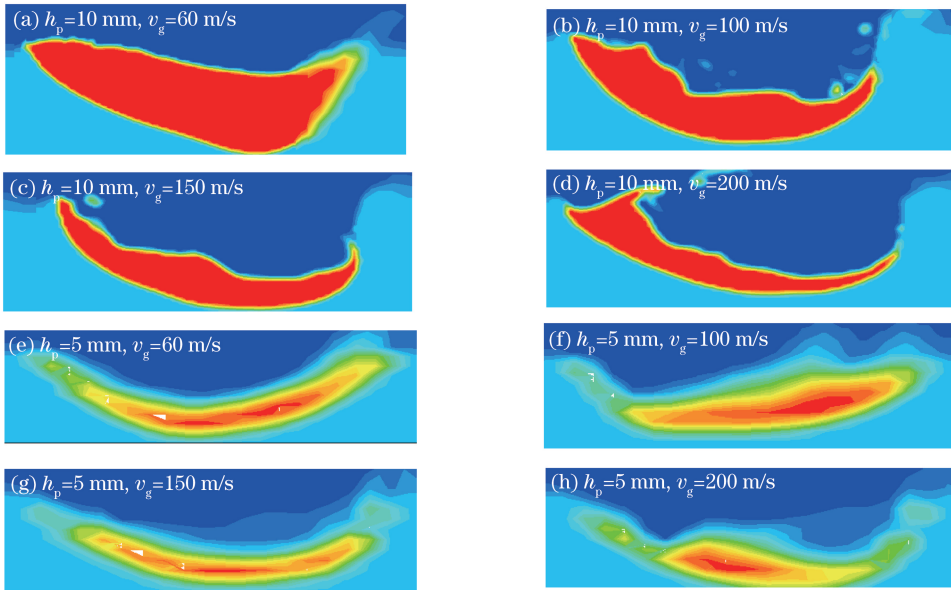


图 3 典型液态金属分布

Fig. 3 Representative liquid metal distribution

稳破碎机制下变成小液滴混合在气体中,此时有效热导率为

$$k_e = k_a \alpha + k_m (1 - \alpha). \quad (16)$$

设空气中的小液滴体积分数为 0.01,即 $\alpha = 0.99$,则 \bar{h} 的量级为 10^3 ,对流传热量为 10^5 量级。可见,由于金属液滴热导率远大于空气,极大地增强了对流散热效果,此时对流散热不能忽略。气流速度越大,雷诺数越高,对流散热效果越强。

熔穿时间与气流速度的关系是液态金属迁移与对流散热两种机制竞争的结果。对于薄板而言,对流散热受气流速度的影响较大,液态金属的迁移受气流速度影响较小,最终导致熔穿时间随气流速度增大而增大;对于厚板而言,对流散热和液态金属的迁移受气流速度的影响都较大,但液态金属迁移受气流速度的影响更大,最终导致熔穿时间随气流速度增大而减小。

4 结 论

针对气流和激光共同作用下的金属熔化问题,联合熔化模型和 VOF 多相流模型,利用 CFD 软件计算了不同气流速度下的金属锡熔化迁移过程,分析了气流速度和金属板厚度对熔穿时间的影响。分析结果表明,熔穿时间是液态金属迁移和对流散热两种机制竞争的结果,对于厚板而言,熔穿时间随气流速度增大而减小,对于薄板而言,熔穿时间随气流速度增大而增大。

参 考 文 献

- Peng Guoliang, Yan Hui, Liu Feng, *et al.*. Oxidation effect for laser irradiating the metal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013(5): 1253-1257.
彭国良, 闫 辉, 刘 峰, 等. 金属氧化膜对激光辐照效应的影响[J]. *红外与激光工程*, 2013(5): 1253-1257.
- Wei Chenghua, Wang Lijun, Liu Weiping, *et al.*. Thermal response of 45 # steel coupling with multi-layer oxide film evolution by laser radiation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(8): 2061-2066.
韦成华, 王立君, 刘卫平, 等. 基于多层氧化膜演化的 45 # 钢激光辐照效应[J]. *光学 精密工程*, 2014, 22 (8): 2061-2066.
- Johnson R L, O'keefe J D. Laser burn through time reduction due to tangential airflow - an interpolation formula[J]. *AIAA Journal*, 1974, 12(8): 1106-1109.
- O'keefe J D, Johnson R L. Laser melt through time reduction due to aerodynamic melt removal[J]. *AIAA Journal*, 1976, 14(6): 776-780.

- 5 Robin J E, Nordin P. Enhancement of cw laser melt-through of opaque solid materials by supersonic transverse gas flow [J]. Applied Physics Letters, 1975, 26(6): 289-292.
- 6 Robin J E, Nordin P. Effects of gravitationally induced melt removal on cw laser melt-through of opaque solids [J]. Applied Physics Letters, 1975, 27(11): 593-595.
- 7 Robin J E, Nordin P. Reduction of cw laser melt-through times in solid materials by transverse gas flow [J]. Journal of Applied Physics, 1975, 46(6): 2538-2543.
- 8 Crane K C A, Garnsworthy R K, Mathias L E S. Ablation of materials subjected to laser radiation and high-speed gas flows [J]. Journal of Applied Physics, 1980, 51(11): 5954-5961.
- 9 Steen W, Mazumder J. Laser material processing [M]. London: Springer Science & Business Media, 2010.
- 10 Kwon H, Baek W K, Kim M S, *et al.*. Temperature-dependent absorptance of painted aluminum, stainless steel 304, and titanium for 1.07 μm and 10.6 μm laser beams [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(2): 114-121.
- 11 Baek W K, Lee K C, An S I, *et al.*. Melt-through characteristics in continuous beam irradiation of flying metal samples in flow speeds up to 85 m/s [J]. Optics & Laser Technology, 2013, 45: 250-255.
- 12 Du Qiu, Hang Xiaolin, Wang Mingdi, *et al.*. Mechanism and experimental study of laser milling on laser cladding parts [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(10): 101403.
杜秋, 杭小琳, 王明娣, 等. 激光铣削对激光熔覆成形件的整形机理和实验研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(10): 101403.
- 13 Liu Haiqing, Liu Xiubo, Meng Xiangjun, *et al.*. Study on γ -NiCrAlTi/TiC + TiWC₂/CrS + Ti₂CS high-temperature self-lubricating wear resistant composite coating on Ti-6Al-4V by laser cladding [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0303005.
刘海青, 刘秀波, 孟祥军, 等. Ti-6Al-4V 合金激光熔覆 γ -NiCrAlTi/TiC + TiWC₂/CrS + Ti₂CS 高温自润滑耐磨复合涂层研究 [J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0303005.
- 14 Zhang Dongyun, Wu Rui, Zhang Huifeng, *et al.*. Numerical simulation of temperature field evolution in the process of laser metal deposition [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(5): 0503006.
张冬云, 吴瑞, 张晖峰, 等. 激光金属熔覆成形过程中温度场演化的三维数值模拟 [J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0503006.
- 15 Zhang Li, He Jia, Tan Fuli. Numerical simulation of metal plates under laser irradiation based on fluid-solid coupling [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(4): 866-870.
张黎, 贺佳, 谭福利. 激光加热金属板流固耦合数值模拟 [J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(4): 866-870.
- 16 Yan Xiangfeng. Numerical calculation of the metal melting in the laser loading process [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2013.
严向峰. 激光加载过程中金属熔化的数值计算 [D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2013.
- 17 Zhao Tiancong. A handbook for extractive metallurgy of nonferrous metals [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1999.
赵天丛. 有色金属提取冶金手册 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999.