

# ⑰ 激光作用下合金熔池内的熔体流动

109-114 Melt Flow in Alloy Melted Pool Under the Action of Laser

刘江龙

Liu Jianglong

(重庆大学冶金及材料工程系, 重庆, 630044)

刘朝

Liu Chao

(重庆大学热力工程系)

TG111.4

A

**摘要** 从力学角度研究了激光合金化过程中的熔体流动。研究表明激光合金化熔体的流动受控于熔池表面的表面张力梯度的作用和来自熔池水平方向的温差所致的浮力作用。这两个力的作用区域在合金化熔池中是有差异的。激光合金化的 Bond 无量纲的分析说明上述两个作用力的强度在同一数量级内,在一定条件下,两者几乎相当。

**关键词** 激光; 熔体; 驱动力

合金化, 流动

中国图书分类法分类号 TG665

**ABSTRACT** Melt flow in the course of laser alloying is considered on the basis of mechanics. The findings show that the melt flow in laser alloying pool is mainly controlled by two action forces, i. e. the surface tension force on alloying pool surface, caused by the temperature difference on the pool surface and the buoyancy force in alloying pool caused by the temperature difference in the horizontal direction in the melt pool. These two forces differ in their acting areas. The analysis of the Bond dimensionless number used for laser alloying shows that the two force actions are in the same order, and almost equal under the certain condition.

**KEYWORDS** laser; melt; driving force

## 0 前言

在 高能激光 ( $10^4 \sim 10^5 \text{ W/cm}^2$ ) 快速 ( $10^{-3} \sim 10^{-1} \text{ sec}$ ) 熔化金属的研究领域, 自从 1978 年, T. R. Anthony 提出高能激光束作用于金属熔池上时将形成高的表面张力梯度从而导致熔体流动的观点<sup>[1]</sup>, 其后, S. M. Copley 进一步强调在激光合金化过程中的这种流动作用对其合金成分的混合具有极大的意义<sup>[2]</sup>以来, 许多研究者, 包括 C. Chan<sup>[3]</sup>, J. L. Liu<sup>[4]</sup> 和 J. C. chen<sup>[5]</sup>, 对这种对流运动的特征、影响因素及其结果等进行了深入探讨。但是许多研究均认为激光熔化条件下的合金熔体的对流主要由其表面张力梯度所决定的, 并未考虑重力场的潜在作用。

实际上, J. Szekely<sup>[6]</sup> 和 Y. H. Wang<sup>[7]</sup> 对一般焊接条件下的焊接熔体的流动的研究极有启发性。其工作表明重力场引起的浮力对熔体流动也有不可忽略的作用。但其浮力的概念不明

\* 收文日期 1991-12-18

确。在激光合金化时,其熔池内的温度梯度和熔池表面的能量密度比常规焊接的高出2~3个数量级,显然在激光合金化时也应考虑浮力的作用。另一方面,激光作用下的熔池内的浮力有何特点也值得研究。本文拟研究激光作用下的合金化熔池里的流动驱动力特征及其变化,以对激光合金化时熔体的流动有一个清晰的物理概念。

## 1 熔体流动驱动力

在激光合金化过程中,其过程的驱动力来自金属熔池内的温度梯度、浓度梯度和压力梯度之综合作用。在激光合金化过程中,其激光功率密度一般小于 $10^6 \text{ W/cm}^2$ 。在这种条件下,在其熔池的上方不形成等离子体。另外,在激光功率密度小于等于 $10^6 \text{ W/cm}^2$ 时,其光压小于等于 $3 \times 10^{-4} \text{ atm}$ ,所以在激光合金化时可以不考虑压力梯度的作用。

作用在合金熔池内的流体单元上的力有多种形式。这主要包括体积力和表面力两大类。其体积力主要由熔池内的温度差( $\Delta T$ )和浓度差( $\Delta C$ )所引起的浮力所致,而其表面力则主要由熔池表面的温度差( $\Delta T$ )和浓度差( $\Delta C$ )所引起的表面张力差所致。将此归纳于表1(其符号意义见附录)。

表1 激光合金化时熔池内的各种作用力

序号	名称	物理量	量纲	
1	体积力	重力差(温度差引起)	$g \cdot \rho \cdot \beta_T \cdot \Delta T$	$ML^{-2}T^{-2}$
2	体积力	重力差(浓度差引起)	$g \cdot \rho \cdot \beta_C \cdot \Delta C$	$ML^{-2}T^{-2}$
3	表面力	表面张力差(温度差引起)	$\frac{\partial \sigma}{\partial T} \cdot \Delta T$	$MT^{-2}$
4	表面力	表面张力差(浓度差引起)	$\frac{\partial \sigma}{\partial C} \Delta C$	$MT^{-2}$
5	体积力	静压力差(熔池表面起伏引起)	$\rho \cdot g \cdot \Delta h$	$ML^{-1}T^{-2}$

注:  $L$ : 长度,  $M$ : 质量,  $T$ : 时间

在激光合金化过程中,其激光束以恒速运动。笛卡尔坐标系随激光束一同运动。该坐标系的原点位于激光束中心。其  $Z$  轴为熔池深度方向,  $x$  轴为激光运动方向。在此给定系统中,表面张力受熔池表面的温度变化及其溶质浓度变化的影响,即

$$\sigma = \sigma_0 + \frac{\partial \sigma}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial \sigma}{\partial C} \Delta C \quad (1)$$

而

$$\Delta \sigma = \sigma - \sigma_0, \quad r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

∴

$$\frac{\Delta \sigma}{\Delta r} = \frac{\partial \sigma}{\partial T} \cdot \frac{dT}{dr} + \frac{\partial \sigma}{\partial C} \cdot \frac{dC}{dr} \quad (2)$$

式中,  $\sigma_0$  是一个与温度和浓度无关的常数,它是纯金属在熔点时的表面张力值。显然,当激光作用下的熔池表面存在温度梯度或溶质浓度时,势必产生一个表面张力梯度  $\Delta \sigma / \Delta r$ ,由此引起熔体的对流驱动力  $F_s$ 。

表面张力驱动力

$$\vec{F}_s = \left[ \frac{\partial \sigma}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial \sigma}{\partial C} \Delta C \right] \cdot \delta(z) \cdot H(d-r) \quad (3)$$

$$\delta(z) = \begin{cases} 1 & z = 0 \\ 0 & z \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$H(d-r) = \begin{cases} 1 & r \leq d \\ 0 & r > d \end{cases} \quad (5)$$

$\delta(z)$  为 delta 函数,  $H(d-r)$  为 Heaviside 函数。delta 函数和亥氏函数表明表面驱动力仅存在于熔池表面, 它是一个表面力。这是一个十分重要的物理概念。对于 Fe、Ni、Cr、V、Mo 等金属熔体, 其表面张力的浓度系数值差异不大, 在一定条件下可忽略  $\frac{\partial \sigma}{\partial c} \cdot \Delta c$  项对  $\vec{F}_s$  的作用。但当表面活性元素 O、S 等溶入铁基熔池表面后, 将极大地影响其表面张力的值, 在这种条件下不能忽略  $\frac{\partial \sigma}{\partial c} \cdot \Delta c$  对  $\vec{F}_s$  的作用。在多数情况下, 已将  $\frac{\partial \sigma}{\partial c} \cdot \Delta c$  并入  $\frac{\partial \sigma}{\partial T}$  中一并考虑。

在重力场作用下, 当激光合金化熔池内存在温度差和浓度差时, 将由浮力作用引起熔体流动, 从而形成驱使熔体流动的驱动力  $\vec{F}_b, \vec{F}_b = -[\rho\beta_r\Delta T + \rho\beta_c\Delta C] \cdot \vec{g}$ 。负号表示浮力  $\vec{F}_b$  与重力  $\vec{g}$  反向。显然  $\vec{F}_b$  是一个体积力, 它存在于熔池内部。在激光快速作用下, 对于铁基合金等, 其密度与其溶剂组元的密度相比而言, 变化不显著。另一方面, 液态金属的  $\beta_c$  数据匮乏。为简化问题, 在激光合金化时, 一般只考虑温差对体积力的作用, 因而  $\vec{F}_b$  可用下式表述:

$$\vec{F}_b = -\rho\beta_r\Delta T\vec{g} \quad (6)$$

在激光合金化时, 由于熔池相对较浅, 因而一般不考虑静压力差的作用。

## 2 驱动力的作用及其影响因素

在激光合金化过程中, 其熔池表面中心区域附近的温度最高, 而熔池边缘处(固-液界面)的温度最低(等于其熔点)。在一般情况下, 液态金属系统的  $\frac{\partial \sigma}{\partial T} < 0$ 。由(3)可知其表面张力驱动力为负值。这意味着表面张力差的作用结果是使熔池表面中心区域的熔体流向熔池表面边缘区域, 即强制对流的流向是沿熔池表面半径  $r$  增加的方向。对流的结果是使熔池表面形状呈月牙状。当熔池表面溶入了氧或硫等表面活性元素时, 表面张力将反向。这时的强制对流流向为熔池表面半径  $r$  减小的方向。相应地对流结果是使熔池表面形状呈山峰状。表 2 是表面张力差引起的对流驱动力特征。其基本数据取自 U. S. A 的 Metals Reference Book<sup>[8]</sup> 和文献[3、9、10]。

表 2 各种熔体材料的表面张力驱动力

材 料	$\frac{\partial \sigma}{\partial T} (\text{mN/m} \cdot \text{K})$	$\vec{F}_s (\text{mN/m})$			
		$\Delta T = 100 \text{ K}$	250 K	500 K	750 K
Fe	-0.49	-49.0	-122.5	-245.0	-367.5
Steel	-0.112	-11.2	-28.0	-56.0	-84.0
Al	-0.35	-35.0	-87.5	-175.0	-262.5
Fe + 0.1% S	+0.102	+10.2	+25.5	+51.0	+76.5
Fe + 0.02% O	+0.47	+47.0	+117.5	+235.0	+352.5

熔池表面的最高温度差取 750 K 的根据来自作者最近的激光熔池测温的实验结果。在激光功率密度为  $1.5 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$  的条件下, 其熔池的最大过热度为 700 K。

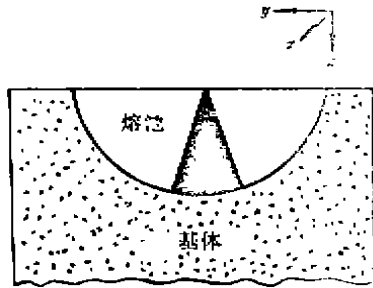


图1 由于密度变化导致的比重分布特征  
(正楔形,在熔池的垂直方向)

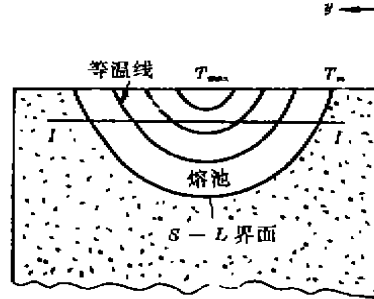


图2 在Y-Z平面上,合金熔池的等温线分布规律

由于在熔池的深度( $z$ )方向上存在上高下低的温度分布特征,在重力场作用下,其比重的分布则是上小下大,形成一种正楔形分布即稳定分布(如图1所示)。这显然是一种稳定的热力学状态。熔体在力的正楔形分布作用下不可能形成自然对流。但由于在合金化熔池的水平方向(如图2中 I-I 线)上仍然存在陡的温度差,这在微观上可以抽象为传热学中的垂直冷热板之间的自然对流模型<sup>[11-12]</sup>。熔池的水平温差所导致的重力分布是一斜楔形分布(见图3),即所引起的浮力使热端熔体向上运动(与  $\vec{g}$  反向),而冷端熔体向下运动(与  $\vec{g}$  同向)。这就构成了一个自然对流。通过自然对流,使熔池下部区域的熔体向其上部区域及其表面流动。由于体积力与熔池某一水平方向上的局部温度差成正比,因而在熔池下部的水平温差相对较小的情况下,其流动状况较差,反之,在熔池上部的水平温差较大,则其流动较强烈。从总体上讲,体积力导致的熔体流动将在熔池内占主导地位。表3是激光合金化时,浮力引起的对流驱动力特征。

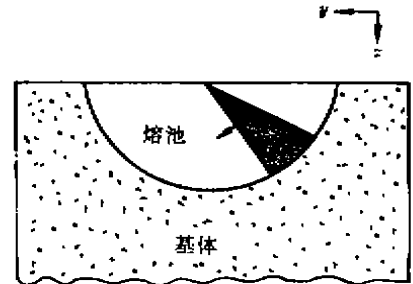


图3 由于密度变化导致的斜楔形比重分布特征

表3 各种熔体材料在重力作用下的对流驱动力特征

材料	$\frac{\partial \rho}{\partial T} (\text{mg/cm}^3 \cdot \text{K})$	$\bar{F}_b / \text{N} \cdot \text{m}^{-3}$			
		$\Delta T = 100\text{K}$	250K	500K	750K
Fe	-0.883	$8.65 \times 10^3$	$2.16 \times 10^4$	$4.33 \times 10^4$	$6.49 \times 10^4$
3.44C+2.56Si+Fe	-1.579	$1.55 \times 10^4$	$3.87 \times 10^4$	$7.74 \times 10^4$	$1.16 \times 10^5$
1.0C+Fe	-3.500	$3.43 \times 10^4$	$8.58 \times 10^4$	$1.72 \times 10^5$	$2.57 \times 10^5$
10Ni+Fe	+1.002	$-9.80 \times 10^2$	$-2.45 \times 10^3$	$-4.90 \times 10^3$	$-7.350 \times 10^3$
Al	-0.280	$2.74 \times 10^3$	$6.86 \times 10^3$	$1.37 \times 10^4$	$2.06 \times 10^4$

归纳上述分析可以发现在激光合金化条件下,合金熔池的熔体对流驱动力主要来自两种不同的机制。一是表面张力梯度引起的强制对流机制,另一是熔池水平温差梯度决定的浮力引起的自然对流。从物理概念上讲,两种力的作用范围是有差异的,前者仅作用于熔池表层,而后者主要作用于熔池内部。

当不考虑表面活性元素对熔池表面的作用时,两种力作用产生的熔体流动路径的方向在宏观上基本一致。此时强制对流和自然对流在熔池的右侧耦合成一个宏观的沿顺时针方

向流动的主循环对流回路(在其左侧为逆时针方向流动),从而完成激光合金化过程中的宏观传质和传热。其具体的循环对流花样还与激光束的运动速度有关。在考虑了表面活性元素的作用之后,熔池的表面张力梯度的驱动力将下降,直至反号(参阅表2)。在这种情况下,两种力产生的熔体流动方向可能相异。其最终耦合流动主回路方向(相对熔池的右侧而言为顺时针或逆时针)取决于具体工艺因素和材质物性。

过去的许多文献将激光合金化的对流传质和传热主要归因于其熔池的表面张力梯度的作用,这似乎不全面。在重力场的作用下,激光对金属的快速熔化行为仍然受其制约。

在此引入定量描述表面张力作用与浮力作用的相对重要性的无量纲参数 Bond。在激光合金化的特定条件下,其熔池的 Bond 数的表达式为:

$$B = \frac{\partial \sigma}{\partial T} \cdot \Delta T / \rho \cdot g \cdot \beta_T \cdot \Delta T \cdot R^2 \quad (7)$$

当 Bond 数大于1时,表面张力的作用大于浮力的作用。研究 Bond 数的表达式发现 Bond 值与激光和熔池交互作用产生的温差无关。这是极重要的,也就是说该判据是与系统的温差无关的常数。表4给出了激光作用条件下的常见合金系统的 Bond 数值(由(8)式计算得到)。

表4 激光与液态金属作用时的 Bond 数

系统	Fe	Ti	Ni	Fe+0.1%S	3C+2.5Si+Fe	10Ni+Fe
熔池半径 2.5mm	9.1	6.0	5.3	-2.1	4.4	7.1
5.0mm	2.3	1.5	1.3	-0.51	1.1	1.9

从表4可知在激光作用条件下,表面张力差的作用与浮力的作用在数值上为同一数量级,即在一定条件下,两者对合金熔体的流动作用几乎相当。当激光光斑直径增大时,两者之比下降,且趋于1值。显然在大激光光斑条件下和小激光光斑条件下,激光合金化熔池中的两种力的作用程度有所差异。在小光斑尺寸的情况下( $R = d/2 \leq 2.5 \text{ mm}$ ),表面张力的作用略占优势。当  $R$  值更小时( $R \leq 1.0 \text{ mm}$ ),这相当于激光焊接,则其表面张力的作用占显著优势。由此可看出激光合金化与激光焊接在流体力学特征方面是不同的,两者不应混淆。

如将上述两个驱动力代入下列运动方程

$$\rho = (\nabla \cdot \nabla) \vec{v} = -\nabla \tau + \vec{F}_b + \vec{F}_s \quad (8)$$

同时和激光合金化的能量方程及其连续方程进行联立求解,可以得到合金化的熔池的熔体流速。利用 G. M. Oreper<sup>[13]</sup>和 J. Szekely<sup>[6]</sup>的流速公式,可以简化地求出表面张力梯度引起的熔体流速和浮力作用引起的熔体流速。对于铁合金,在激光光斑尺寸为5 mm,熔化深度0.75 mm,温度差 $\Delta T = 500 \text{ K}$ 时,其表面流速高达8.2 m/s,而其熔池内的流速为1.9 cm/s。这个现象与 S. A. David<sup>[14]</sup>在焊接中得到的结果相似。

### 3 结 论

1) 在激光合金化过程中,其熔池内存在两种使熔体流动的驱动力。一个是由表面张力梯度差产生的表面力,另一个是由熔池的水平温差产生的浮力。这两种力的作用范围不一样。前者仅作用于熔池表面,其作用方向与液面法线方向垂直,而后者作用于熔池内部,其作用方向为熔池深度方向。

2) 在激光合金化条件下,表面张力和浮力对熔体的作用近似相当。因此,浮力引起的流动对熔池内的宏观熔体流动做出了大的贡献。

3) 激光合金化与激光焊接在熔体的流体力学特征方面存在差异。后者的流动主要由表面张力梯度所致。

### 参 考 文 献

- 1 Anthony T R. Surface ripping induced by surface-tension gradients during laser surface melting and alloying. *Journal of Applied Physics*, 1977, 48(9), 3888~3894
- 2 Copley S M. Laser-solid interactions and laser processing. *AIP Conference Proceedings*, 1979, 50(1), 161~172
- 3 Chan C. A two-dimensional transient model for convection in laser melted pool. *Metallurgical Transactions*, 1984, 15A(12), 2175~2184
- 4 Liu J L. The study on relationship between composition of laser alloying and convection in the molten pool. *Key Engineering Materials*, 1990, 46/47, 487~498
- 5 Chen J C. Thermocapillary flows of surface melting due to a moving heat flux. *International Journal of Heat & Mass Transfer*. 1991, 34(3), 663~671
- 6 Szekely J. The mathematical modeling of arc welding operations. In: *Advances in welding science and technology*. ed; David S A. Metals Park, U. S. A., 1986, 65, 3~14
- 7 Wang Y H. Driving forces for convection in weld pools. In: *Advances in welding science and technology*. ed; David S A. Metals Park, U. S. A., 1986, 65, 65~70
- 8 Smithells C J. *Metals Reference Book*, 5th edition. Butterworths, USA, 1971; 940
- 9 Paul A. Free Surface flow and heat transfer in conduction mode laser welding. *Metallurgical Transactions*, 1988, 19B(6), 851~858
- 10 陈家祥. 炼钢常用数据手册. 北京:冶金工业出版社, 1984, 10~12
- 11 胡汉起. 金属凝固原理. 北京:冶金工业出版社, 1991, 21~23
- 12 罗稼庵. 传热应用与分析. 北京:清华大学出版社, 1990, 3~5
- 13 Oreper G M. Heat and fluid-flow phenomena in weld pools. *Journal of Fluid Mechanics*, 1984, 147(10), 53~79
- 14 David S A. Correlation between solidification parameters and weld microstructures. *International Materials Reviews*, 1989, 34(5), 213~245

### 附 录

$g$ —重力加速度( $m/s^2$ );  $\rho$ —密度( $g/cm^3$ );

$\beta_T$ —与温度有关的热胀系数( $\beta_T = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial T}$ ,  $1/K\%$ );

$\beta_C$ —与浓度有关的热胀系数( $\beta_C = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial T}$ ,  $1/at.\%$ );

$\frac{\partial \sigma}{\partial T}$ —表面张力的温度系数( $mN/m \cdot K$ );

$\frac{\partial \sigma}{\partial c}$ —表面张力的浓度系数( $mN/m \cdot at\%$ );

$\Delta h$ —液面起伏的谷与峰之差值(mm);  $\Delta T$ —温度差(K)  $\Delta c$ —浓度差(at. %);

$d$ —熔池直径(mm);  $R$ —特征尺寸(mm),  $R = d/2$ ;  $\vec{v}$ —速度矢量(mm/sec);

$\tau$ —切应力( $N/cm^2$ );  $\sigma$ —表面张力( $N/cm$ ).