

Study on Dynamic Behaviors of Weld Pool and Keyhole in Laser Deep Penetration Welding

Qiang Wan^{#1}, Pingan Shi¹, Shengyong Pang², Xianfeng Shen³, Wenhua Teng³, Yixia Yan¹, Heng Xu¹

1. Institute of System Engineering, CAEP, Mianyang 621900, China

2. School of Material Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

3. Institute of Machinery Manufacturing Technology, CAEP, Mianyang 621900, China

[#]Email: wanzhenyu@126.com

Abstract

In order to accurately simulate the dynamic process of keyhole formation during laser deep penetration welding, a ray tracing method based on Particle level set method is proposed to describe the multiple reflections Fresnel absorption effect of keyhole wall on laser energy, and a three-phase unification mathematical model of laser keyhole welding is established to combine the effects of three dimensional transient keyhole and transient weld pool. Dynamic process of keyhole formation and its corresponding temperature and flow field distributions are obtained by numerical modeling of laser deep penetration welding process of 30CrMnSiA steel. The results shows that the depth and shape of keyhole have an obvious characteristic of periodic changes and a phenomenon of high frequency oscillations in process of laser deep penetration welding, and the high frequency oscillations of keyhole is the main factors of laser welding instability and defects forming. Through comparative analysis of the images of weld pool and keyhole obtained by the dynamic monitoring system and the macrograph of welding seam, the results show that the experiment result is in accordance with the simulation one approximately and the simulation method and the mathematical model can accurately simulate the dynamic process of keyhole formation during laser deep penetration welding.

Keywords: Deep Penetration Laser Welding; Keyhole; Dynamic Behavior; Numerical Simulation

激光深熔焊熔池-小孔动态行为研究 *

万强¹, 史平安¹, 庞盛永², 沈显峰³, 滕文华³, 颜怡霞¹, 许恒¹

1. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621900

2. 华中科技大学 材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430074

3. 中国工程物理研究院机械制造工艺研究所, 四川 绵阳 621900

摘要: 为了准确的模拟出激光深熔焊中小孔的动态变化过程, 根据小孔内激光的能量吸收机制, 采用光线追踪法来描述小孔对激光能量的多重反射吸收作用, 建立了描述激光深熔焊过程中瞬态小孔和运动熔池耦合行为的三维数值模型。通过对 30CrMnSiA 钢激光焊接过程的数值模拟, 得到焊接熔池-小孔的动态演变过程与相应的温度场和流场分布。结果表明, 激光深熔焊过程中小孔深度呈周期性变化并伴有高频振荡特征, 而小孔的振荡是焊接不稳定性和缺陷形成的重要原因。通过对激光焊接过程动态监测系统获得的熔池-小孔图像和焊缝宏观形貌的分析, 进一步验证了模拟的现象和规律, 表明本文建立的数值模型和方法能够比较准确地模拟激光深熔焊中小孔的动态行为。

关键词: 激光深熔焊; 熔池-小孔; 动态行为; 数值模拟

引言

激光深熔焊过程中熔池内小孔的形成极大地促进了工件材料对激光束能量的吸收, 小孔也成为焊缝

*国家自然科学基金(11372295)和中国工程物理研究院科学技术重点基金(2014A0203006)资助项目

成形的直接热源。因此，熔池和小孔的形态是影响、决定焊缝成形工艺和质量的重要因素。国内、外学者根据熔池内小孔所满足的能量和力学条件，提出来诸多熔池和小孔动态行为的数值模型^[1]。最具代表性的模型有三种：R. Fabbro等提出的小孔演化过程的动态模型；采用VOF方法追踪熔池自由表面的模型和采用Level Set方法追踪熔池自由表面的模型。R.Fabbro等^[2,3]建立的动态模型解释了焊接工艺中的一些试验现象和部分机理，但该模型无法用于研究激光焊接过程中瞬态小孔的形成和振荡以及熔池内部的流动行为等复杂物理现象。Ki等^[4,5]采用Level Set方法建立了激光深熔焊接过程模拟的耦合数学模型，模型考虑了小孔内部的蒸汽运动、熔池内的液体流动和传热，以及多重反射菲涅耳吸收等现象，并采用Level Set方法来追踪三维瞬态小孔气-液界面。研究认为，小孔的振荡是由于小孔壁面所吸收的激光能量的振荡引起的。但由于计算对小孔壁面的边界条件简化过多，造成模拟结果中小孔边界两侧的气-液流动速度是不连续的。汪任平等^[6]采用VOF方法追踪小孔界面，简化考虑了热毛细力和反冲压力对熔池流动的驱动作用，建立了激光深熔焊接过程综合数学模型。但该模型没有考虑多重反射吸收和小孔的振荡等行为。金湘中等^[7]在假设小孔为圆柱形的基础上，通过跟踪光线在小孔内的反射轨迹，对激光深熔焊接过程中小孔内等离子体的反韧致辐射吸收进行了研究。庞盛永^[8]把有限差分网格和Level Set方法相结合来描述任意形状小孔界面，提出了一种改进光线追踪方法。该方法能准确考虑等离子体对激光能量的逆韧致吸收作用。为了较准确地模拟激光焊接过程中激光与材料之间的能量作用过程，本文基于文[8]的研究成果，进一步考虑了等离子逆韧致吸收、金属蒸汽散射对激光传播和热传导以及对流传热对能量传递的影响，建立了描述激光深熔焊中瞬态小孔和运动熔池耦合行为的数学模型。通过对30CrMnSiA钢激光焊接过程的模拟，得到焊接熔池-小孔的动态演变过程与相应的温度场和流场分布。并利用高速摄像系统与激光头同步运动技术获得了高清的熔池-小孔图像，通过对熔池-小孔的动态变化过程和焊缝宏观形貌的分析，进一步验证了数值模拟中的一些现象和认识。研究对熔池-小孔的动态行为和焊接稳定性具有主要的理论价值和工程实际意义。

1 数学模型

1.1 控制方程

激光深熔焊接过程可以简化为含混合相的自由界面流体的流动和传热耦合问题。将熔池内液态金属视为不可压缩流体，则得到质量守恒方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (1)$$

式中， ρ 是液态金属的密度， $\mathbf{V} = (u, v, w)$ 为液态金属的流动速度。

将固-液相间运动边界进行渗流近似处理，固-液相间的作用力可用达西摩擦力来表示，并考虑浮力的作用，得到动量守恒方程：

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} \right) = \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{V}) - \nabla p - \frac{\mu}{K} \mathbf{V} - \frac{C_p \rho}{\sqrt{K}} |\mathbf{V}| \mathbf{V} + \rho g \beta (T - T_0) \quad (2)$$

式中， μ 是粘性系数， K 是渗流系数， T 和 T_0 为温度和参考温度， p 为熔池中的压力， β 为线胀系数。

考虑熔池流动和焊接速度对热量传递的对流影响以及温度扩散因素，得到能量守恒方程：

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) T \right) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (3)$$

式中， C_p 为比热容， λ 是等效热导率。

1.2 小孔壁面的能量密度

激光深熔焊接过程中激光能量主要通过小孔壁面传递到工件。而激光能量的作用方式主要有以下几种方式：小孔壁面对激光能量的菲涅耳吸收；金属蒸汽/等离子体对激光的逆韧致吸收和散射；熔池内部金属液的对流以及传导传热；小孔内部的金属蒸汽/等离子体对小孔壁面的对流、辐射传热；蒸发/凝结、熔化/凝固的

潜热吸收和释放。本文主要考虑小孔壁面对于激光能量的多重反射菲涅耳吸收、等离子逆韧吸收以及热传导和对流传热对能量传递的影响。

1.2.1 小孔运动界面的 Particle Level Set 追踪方法

在激光深熔焊接过程中，瞬态小孔的形貌可能会非常复杂。本文采用 Level Set 方法来描述追踪小孔界面。同时，为了克服 Level Set 的数值耗散性，采用 Particle Level Set 方法来修正 Level Set 数值耗散所带来的质量不守恒问题。

1.2.2 小孔壁面的菲涅耳吸收

假设小孔壁面任意给定点的能量密度 q_{beam} 为初次吸收和多重反射菲涅耳吸收能量的总和，则：

$$q_{beam} = I_0(r,z)(I_0 \cdot n_0)\alpha_{Fr}(\theta_0) + \sum_{m=1}^N I_m(r,z)(I_m \cdot n_m)\alpha_{Fr}(\theta_m)$$
 (4)

其中， θ 为激光束和小孔壁面法向的夹角， N 是激光束的入射次数， I 和 n 为归一化后的激光束入射方向和小孔壁面的法向量， α_{Fr} 是菲涅耳吸收系数。

$$\alpha_{Fr}(\theta) = 1 - \frac{1}{2} \{ [1 + (1 - \varepsilon \cos \theta)^2] / [1 + (1 + \varepsilon \cos \theta)^2] + (\varepsilon^2 - 2\varepsilon \cos \theta + 2\cos^2 \theta) / (\varepsilon^2 + 2\varepsilon \cos \theta + 2\cos^2 \theta) \}$$
 (5)

其中 ε 是常数，取 $\varepsilon = 0.2 \sim 0.25$ 。 $I_0(r,z)$ 是初始能量密度， $I_m(r,z)$ 是经 m 次反射后的剩余能量密度：

$$\begin{aligned} I_0(r,z) &= I_c(r,z) \exp(-\int_0^{I_0} k_{pl} dl) \\ I_m(r,z) &= I_r(r,z) \exp(-\int_0^{I_m} k_{pl} dl) \\ I_r(r,z) &= I_0(r,z)[1 - \alpha_{Fr}(\theta)] \end{aligned}$$
 (6)

其中， $I_r(r,z)$ 是入射激光束的能量密度， $\int_0^{I_0} k_{pl} dl$ 和 $\int_0^{I_m} k_{pl} dl$ 是 1 次和 m 次反射光线传输路径的光学浓度， k_{pl} 是光致等离子体的逆韧致吸收系数。从式(5)和式(6)可看出，小孔壁面吸收的激光能量密度与夹角 θ 和系数 ε 是密切相关的。

本研究假设激光能量密度的近似分布服从高斯分布，则激光能量的分布函数方程为：

$$I_0(r,z) = 3Q / (\pi R^2) \exp(-3r^2 / R^2)$$
 (7)

式中， R 是激光光斑半径， Q 是激光功率密度。

表 1 30CrMnSiA 钢的热物理性能参数

参数	单位	量值
密度	$\rho(\text{kg/m}^3)$	2600
比热容	$C_p / (\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K}))$	1000
热导率	$\lambda / (\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}))$	90
固相线温度	$T_s / (\text{K})$	831
液相线温度	$T_l / (\text{K})$	889
蒸发温度	$T_v / (\text{K})$	2790
蒸发潜热	$H_m / (\text{J/kg})$	5.03×10^5
熔化潜热	$H_v / (\text{J/kg})$	1.07×10^7
表面张力	$\sigma / (\text{N/m})$	1.0
动力粘度	$\mu_l / (\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}))$	1.60×10^{-3}
线膨胀系数	$\alpha_l / (1/\text{K})$	2.36×10^{-5}
表面张力系数	$d\sigma / dT$	-3.0×10^{-4}
黑体辐射系数	ε_r	0.3
对流系数	h	60
菲涅耳吸收常数	ε	0.20
环境温度	$T_\infty / (\text{K})$	300

2 试样与材料

激光深熔焊接母材是 30CrMnSiA 低合金高强钢，焊接材料厚度为 2.5mm，焊接采用平板对接焊。材料的热物理性能参数和过程系数见表 1。表中的参数均通过专业热物性计算参数软件 J Mat Pro 的计算值加权平均得到。本研究采用温度升/下降法来处理凝固和熔化过程中的相变潜热，采用文[4,5]方法来处理蒸发潜热。激光焊接工艺参数：激光功率为 1.5kW，焊接速度为 3m/min，光斑半径为 0.2mm。

3 数值求解方法

图 1 是模拟得到的激光功率为 1.5kW、焊接速度为 3m/min 时小孔深度随焊接时间的变化曲线（小孔深度通过小孔的截面形貌获得）。可以看出，焊接过程中小孔深度的变化分为三个阶段：1)深度线性快速增长阶段；深度振荡增长阶段，此阶段的生长速度比阶段 I 慢，并且随着焊接时间的增加，越来越慢；深度平均值趋于稳定，但伴随着高频振荡。

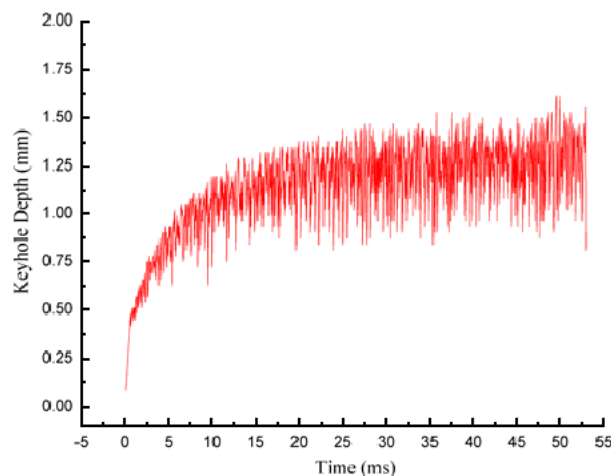


图 1 小孔深度随焊接时间变化曲线

特征阶段 I 的时间很短，约为 1.9ms。此阶段的小孔壁面的能量密度分布规则，小孔中心（底部）的温度最高，沿径向向外温度分布逐渐减小。特征阶段 II（时间：1.868ms~15.326ms）的持续时间约为 13ms。此阶段小孔深度呈振荡增长，小孔形貌以及小孔内的温度分布不规则，主要是由于壁面出现凸台，导致凸台上部和小孔底部远离凸台区域的温度较高，而被凸台遮挡部位的温度较低。特征阶段 III（时间：15.326ms~结束）中小孔处于高频振荡状态，小孔壁面的能量密度很不规则。凸台上部和小孔底部远离凸台区域的能量密度较大，温度梯度也较大，凸台下部和坍塌的小孔部分能量密度小，因此，温度梯度也较小。小孔形成时间的模拟结果与 Matsunawa 和 Fujinaga^[9,10]的试验结果吻合很好。

3.1 熔池和小孔内的温度场分布

图 2 和图 3 分别给出了激光深熔焊过程中熔池和小孔上表面和纵截面的温度分布情况。可以看出：在非常短的时间内，材料迅速熔化、汽化产生熔池、小孔。且小孔开口处温度相对较低，小孔壁面附近的温度比熔池其它部位的高。

起焊阶段 I 的小孔形状基本为圆锥体，因此，试样表面的温度场分布可以用高斯函数表述。

随着焊接时间的增加，由于部分小孔壁面上受到的反冲压力与表面张力以及金属液体的冲击力等不平衡，造成小孔发生振荡现象。阶段 II 中小孔振荡的一个突出表现就是小孔的深度基本达到了一个固定值，而小孔壁面出现了不规则的凸台，如图 2 和图 3 所示。小孔的深度达到固定值的时间在 12ms~15ms 区间。而实际焊接过程中小孔深度相对稳定的时间在几个到十几个毫秒之内。

同时，当小孔处于振荡状态时，靠近小孔底部后沿运动熔池内部总是存在强烈的漩涡流动，且熔池两

侧也存在一个较强的漩涡，这就造成小孔壁面凸台的位置和形状都不确定。凸台可能在前壁面或后壁面，且凸台在小孔的位置随时间变化。当小孔壁面出现凸台时，凸台上表面能够吸收较多的能量。同时，由于凸台的遮挡使得激光不能直接照射到凸台下部和小孔壁面的局部区域，因此，凸台上、下部和小孔壁面的局部区域存在较大的温度梯度。激光束作用下，凸台上部的温度接近或超过材料的沸点，因此，凸台上部的液态金属发生强烈的蒸发现象，并产生很大的反冲压力。反冲压力将驱使凸台附近的液态金属高速向下运动，并试图关闭小孔，见图 2 和图 3 的 c)。同时，由于凸台附近小孔壁面的曲率较大，因此，壁面的表面张力也较大。而相对于其它部位，凸台处的小孔半径较小，受到相同大小的液态金属冲击力时此处相对更脆弱。正是由于这些因素的耦合作用，导致小孔的塌陷并分裂成两段。底部闭合的小孔将会变成一个气泡，如果气泡被凝固前沿俘获，将会形成一个气孔缺陷。当小孔闭合之后，小孔的深度显然会变浅。这也是焊深不均匀的重要原因。其实，小孔振荡是激光深熔焊接过程一种固有的现象，其原因在于小孔壁面所吸收的能量总是振荡的。而小孔壁面能量的任何振荡直接影响到小孔的稳定性。

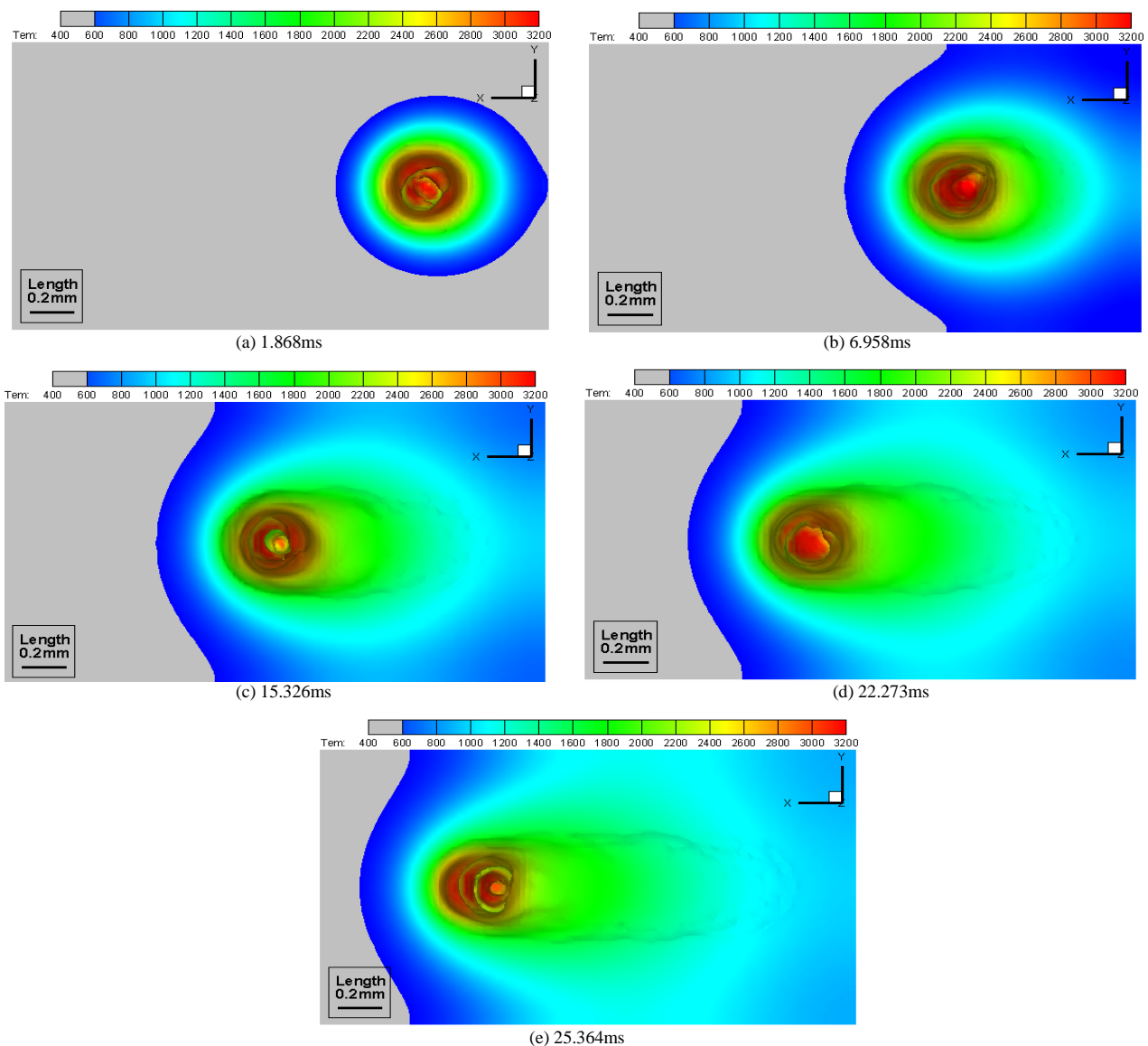


图 2 激光深熔焊过程中熔池和小孔内的温度分布（俯视图）

从图 2 和图 3 的 d)和 e)可以看到，进入准稳态后，熔池内小孔的振荡频率增大，但深度变化较小。熔池内小孔的周期性高频振荡，使得小孔壁面再次形成凸台和小孔塌陷的几率增加，也为熔池底部缺陷的形成提供了条件。因此，在实际的激光深熔焊接过程是小孔反复振荡的过程，而小孔的振荡也是焊接不稳定

性和缺陷形成的重要原因。

Matsunawa 等^[10]利用细焦 X 射线透射成像设备检测了激光焊接中小孔的二维形状, 研究发现, 小孔的形状很不稳定, 小孔后沿熔体有向前倒塌的过程, 在金属内部形成封闭的气孔。结合本文前面的分析, 可以看出, 这种周期性分布的气孔是焊接过程中小孔周期性塌陷后将小孔中部分气体卷入到闭孔中所形成的, 这与 Katayama 等^[11,12]的研究结果比较一致。

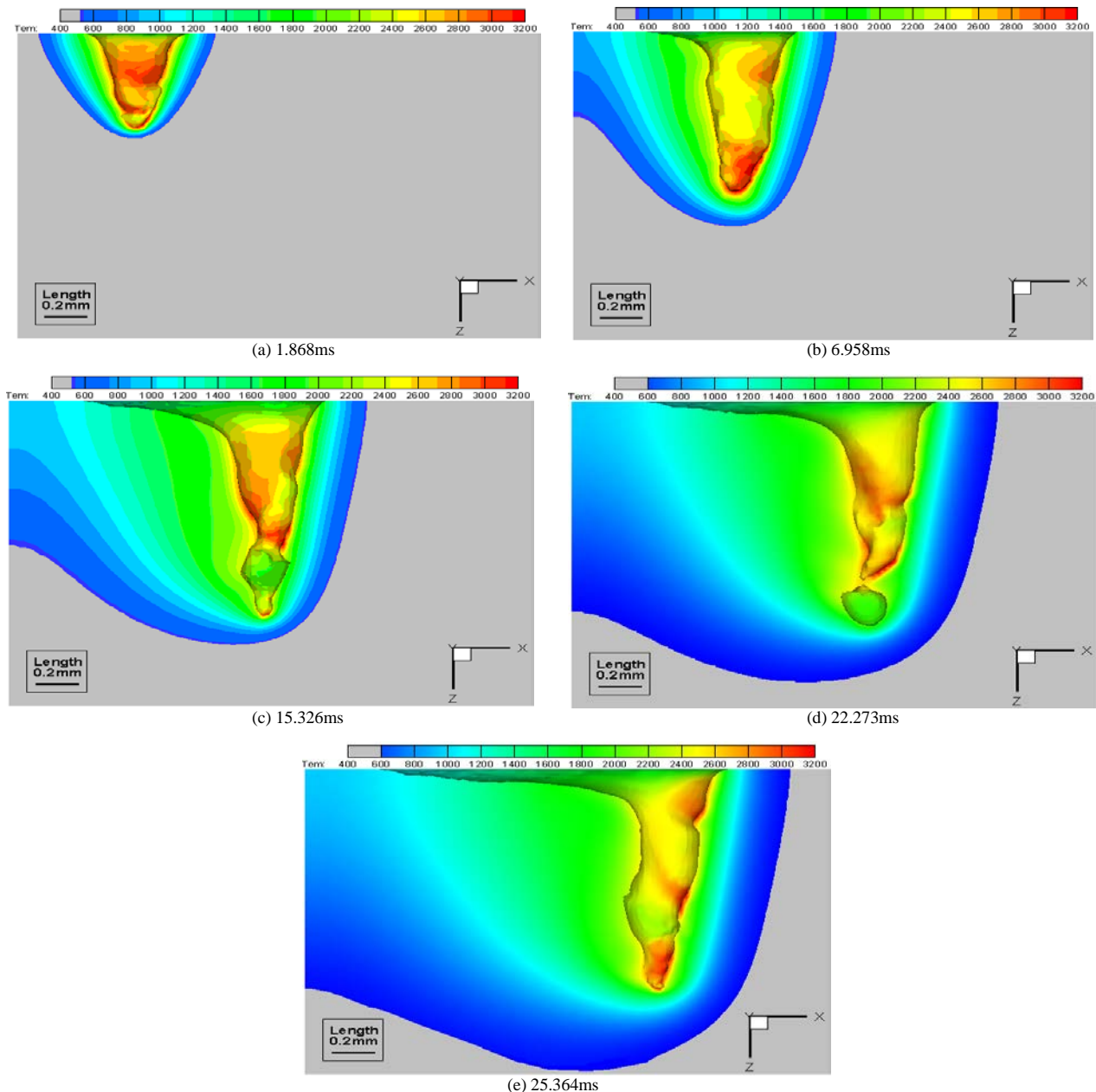


图 3 激光深熔焊过程中熔池和小孔的温度分布（正视图）

3.2 熔池和小孔内的流场分布

图 4 给出了激光深熔焊过程中熔池和小孔纵截面的流场矢量图。可以看出: 小孔壁面的液态金属存在着周期性的高速运动的特征。其总流动趋势是, 小孔前壁和两侧的液态金属高速向下运动, 达到熔池底部时, 由于反冲压力的驱动作用, 液态金属又沿着小孔后壁向上运动。这是由于强烈的蒸发产生的反冲压力和表面张力共同作用的结果。

另外, 当液态金属流动到小孔底部后沿时, 向下流动的液态金属与熔池边界发生交互作用, 产生强烈

的涡流。这种流动不利于气泡的上浮溢出，因此控制该特征流动可能减少焊缝中的气孔缺陷。尤其是在小孔壁面出现凸台的情况下，液态金属的涡流对底部气孔闭合和长大起着加速的作用。

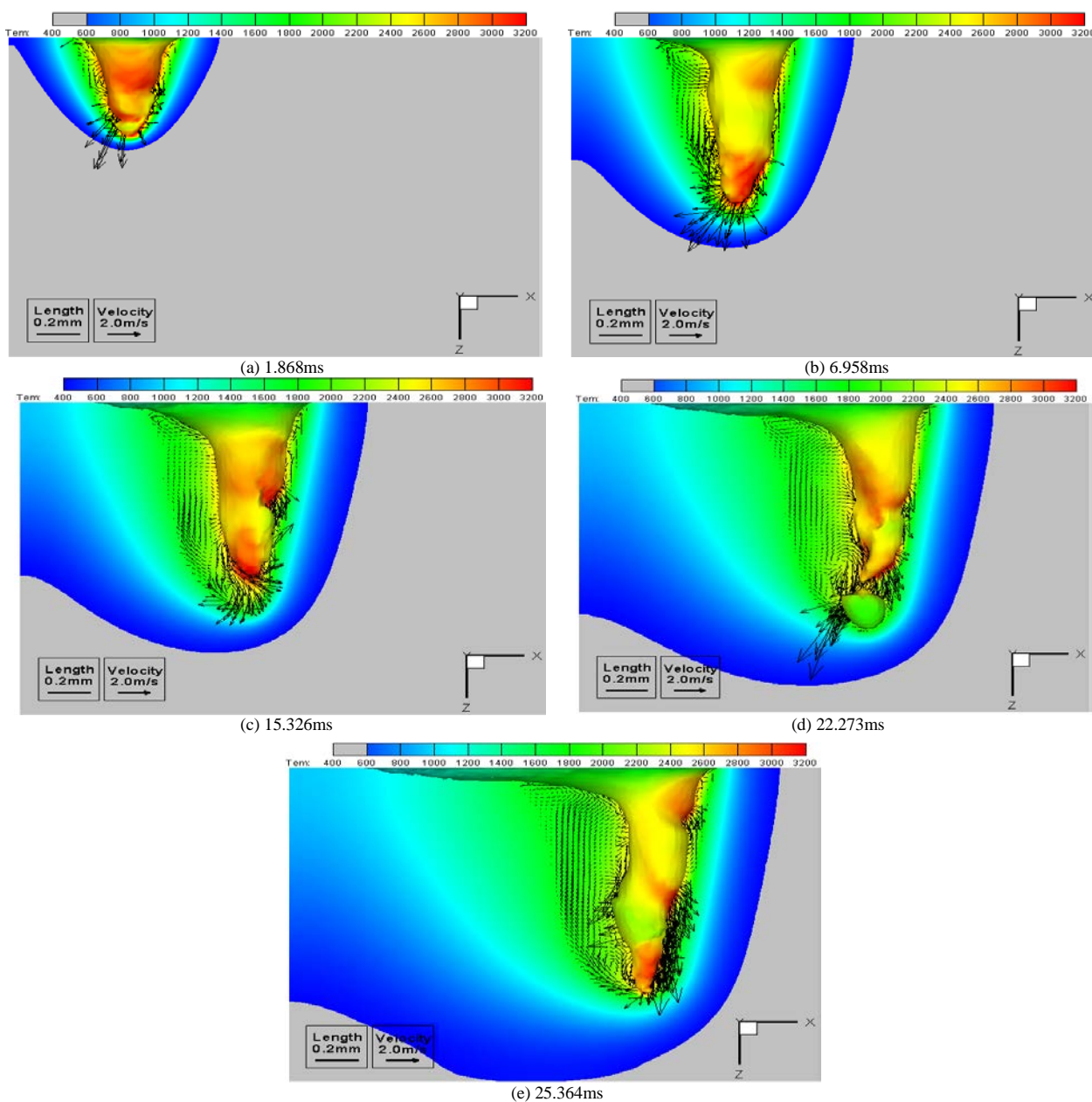


图 4 激光深熔焊过程中熔池和小孔的流场分布（正视图）

同时，反冲压力作用在小孔壁面上会产生一些绕过小孔的横向流动，液态金属的这种流动特征主要发生在熔池的两侧。由于横向流动、热毛细流动以及反冲压力趋势的向上流动与熔池边界的交互作用，使得熔池两侧也存在一个强烈的漩涡流动。

由于小孔总是处在不断的振荡闭合之中，反冲压力和小孔壁面上周期性出现的凸台相互作用，使得液态金属产生周期性的沿小孔后壁向上运动的流动趋势。此流动特征也导致熔池表面产生波浪式的流动状态。

4 实验研究

实验选用厚度为 2.5mm 的 30CrMnSiA 低合金高强钢作为母材，焊接采用平板对接焊。图 5 是基于高速摄像的激光焊接过程监测系统。在系统中采用了波长为 808nm 的主动激光光源和德国 Optronis 的 CL600X2 黑白高速摄像机。为获取激光焊接动态过程的高清图像，高速摄像系统与激光头同步运动。激光输出镜头

能够使 YAG 激光以很高的透过率通过，而来自熔池的可见光则被反射^[13,14]。



图 5 激光焊接过程监测系统

图 6 是监测系统获得的一组熔池-小孔图像（时间间隔 0.167 ms）。图中小孔中心高亮度部位的变化反映出小孔的振荡行为。从熔池上表面来看，小孔的宽度为熔池的 1/6~1/4。显然，不同时刻小孔的大小和形状也不同，这说明激光焊接过程中小孔始终处于振荡状态。在动态监测过程中可以明显观测到熔池中存在类似于水波纹的波动。另外，在小孔后部有颗粒状悬浮物，应为焊接过程中产生的熔渣。

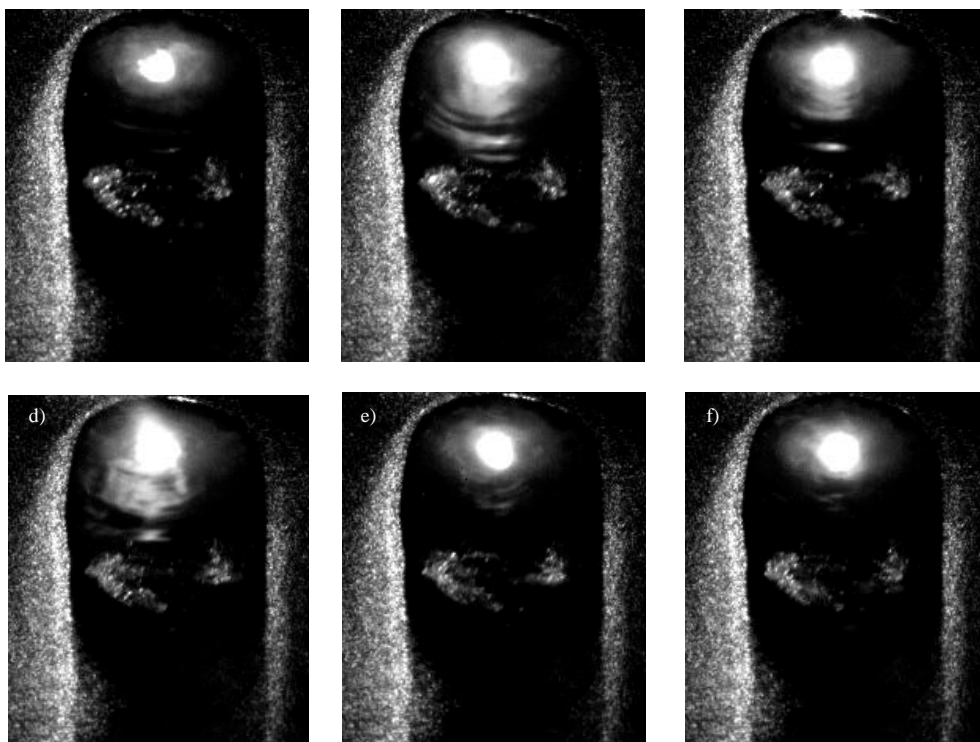


图 6 不同时刻小孔与熔池区的图像

图 7 给出了焊缝上表面和纵剖面的宏观形貌，可以看出，焊缝上表面和纵剖面都具有周期性特征，反映出熔池和小孔的周期性振荡。焊缝上表面周期性振荡的宏观表现形式是熔宽由宽到窄、再由窄到宽的变化呈周期性的循环变化过程；熔深周期性振荡使得小孔由深到浅、再由浅到深的变化。

研究发现，金属蒸汽/等离子体对激光能量的吸收和熔深的稳定性影响较大。焊接初始阶段金属蒸汽的强度最弱，而熔深最大；随着焊接的继续进行，越来越多的液态金属成为金属蒸汽，小孔逐渐变浅、变细，对应的熔深和熔宽也相应地减少。而小孔的减少使得金属蒸汽的强度降低、小孔吸收的激光能量增

大，小孔的几何尺寸增加。因此，激光深熔焊熔池和小孔始终处于周期性振荡中。

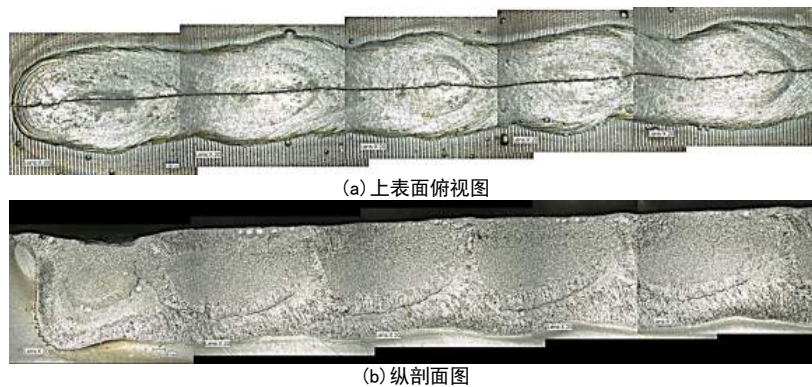


图 7 焊缝上表面和纵剖面的宏观形貌

5 结论

本文在进一步考虑了等离子逆韧吸收、金属蒸汽散射对激光传播和热传导以及对流传热对能量传递的影响的基础上，建立了描述激光深熔焊中瞬态小孔和运动熔池耦合行为的数学模型。通过对 30CrMnSiA 钢激光焊接过程的模拟和实验观测到的熔池-小孔图像和焊缝宏观形貌的分析，得到了如下结论：

(1)激光深熔焊接过程中小孔深度处于不断变化之中，且其变化伴有高频振荡特征；同时，由于激光深熔焊接过程中小孔的周期性闭合，导致小孔底部和中部可能出现气泡。

(2)小孔壁面的液态金属存在着周期性的高速运动的特征。而高速向下运动的液态金属与熔池边界发生交互作用时会产生强烈的涡流。这种流动不利于气泡的上浮溢出，因此控制该特征流动可能减少焊缝中的气孔缺陷。尤其是在小孔壁面出现凸台的情况下，液态金属的涡流对底部气孔闭合和长大起着加速的作用。

(3)激光焊接过程中小孔始终处于振荡状态。在动态监测过程中可以明显观测到熔池中存在类似于水波纹的波动。另外，在小孔后部有颗粒状悬浮物，应为焊接过程中产生的熔渣。

(4)实验研究表明，焊缝上表面和纵剖面具有周期性特征（图 7 所示），反映了熔池和小孔的周期性振荡。周期性振荡的宏观表现是熔宽由宽到窄、再由窄到宽的变化呈周期性的循环变化过程，而熔深的周期性振荡使得小孔由深到浅、再由浅到深的变化过程。

(5)金属蒸汽/等离子体对激光能量的吸收和熔深的稳定性影响较大。焊接初始阶段金属蒸汽的强度最弱，而熔深最大；随着焊接时间的延长，小孔逐渐变浅、变细，对应的熔深和熔宽也相应地减少。而小孔的减少使得金属蒸汽的强度降低，小孔吸收的激光能量增大，小孔的几何尺寸增加。因此，激光深熔焊熔池和小孔始终处于周期性振荡中。

致谢

本文研究工作感谢国家自然科学基金(11372295)和中国工程物理研究院科学技术重点基金(2014A0203006)，(2013A0302008)资助。

REFERENCES

- [1] 张林杰, 张建勋, 巩水利. 激光深熔焊接过程中小孔行为的研究进展[J]. 激光杂志, 2009, 30(5): 3-5
- [2] R Fabbro and K Chouf. Keyhole behavior for deep penetration laser welding[C]. Proceeding of ICALEO, 1999, 92-101
- [3] V V Semak, R J Steele, P W Fuerschbach and B K Damkroge. Role of beam absorption in plasma during laser welding[J]. J. Phys D: Appl. Phys., 2000, 33: 1179-1185
- [4] Ki H, Mohanty PS, Mazumder J. Modeling of laser keyhole welding: Part I. Mathematical modeling, numerical methodology, role of recoil pressure, multiple reflections, and free surface evolution. Metallurgical and Materials Transactions A, 2001, 33: 1817-1830

- [5] Ki H, Mohanty P S, Mazumder J. Modeling of laser keyhole welding: Part II. Simulation of keyhole evolution, velocity, temperature profile, and experimental verification[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2001, 33: 1831-1842
- [6] Wang R P, Lei Y P, Shi Y W, et al. Three dimensional transient model of keyhole dynamics during laser deep penetration welding. Proceedings of the 3rd International Conference on Power Beam Processing Technologies, Beijing, China, 2010
- [7] 金湘中, 鄢铨. 激光深熔焊接小孔内等离子体的反韧致辐射吸收研究[J]. 湖南大学学报, 2003, 30(6): 45-50
- [8] 庞盛永, 陈亮, 陈涛, 等. 激光深熔焊接任意形状小孔的能量密度计算[J]. 激光技术, 2010, 34(5): 614-618
- [9] Fujinaga S, Takenaka H, Narikiyo T, et al. Direct observation of keyhole behaviour during pulse modulated high-power Nd: YAG laser irradiation. Journal of Physics D: Applied Physics, 2000, 33 (5): 492-497
- [10] Matsunawa A, Kim J D, Seto N, et al. Dynamics of keyhole and molten pool in laser welding. Journal of Laser Applications, 1998, 10(6): 247-254
- [11] Seto N, Katayama S, Matsunawa A. High-speed simultaneous observation of plasma and keyhole behavior during high power CO₂ laser welding: Effect of shielding gas on porosity formation. Journal of Laser Applications, 2000, 12 (6): 245-250
- [12] Katayama S, N Seto, J Kim and Matsunawa A. Formation mechanism of porosity in high power laser welding, *ICALEO*, 2000, section C: 16-25
- [13] 杨家林, 高进强, 秦国梁, 等. 基于视觉的激光深熔焊熔池检测及图像处理[J]. 焊接学报, 2011, 32(11): 21-24
- [14] Shen Xianfeng, Liu Shijie. Characterization of Weld Pool and Keyhole in Gas-Jet-assisted Keyhole Laser Welding. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(S2): 001-005

【作者简介】



¹ 万强 (1979-), 男, 汉, 博士, 副研究员, 力-电、力-磁、力-化学多物理场耦合研究, 涂层、界面力学, 西安交通大学固体力学博士(2006.11), 美国哈佛大学应用科学与工程系博士后(2010-2011)。Email: wanzhenyu@126.com

² 史平安 (1968-), 男, 汉, 硕士, 结构静力学分析

³ 庞永盛 (1981-), 男, 汉, 博士, 副教授, 激光焊接行为模拟。