高技术通讯 2023 年 第33 卷 第6 期:661-668

doi:10.3772/j.issn.1002-0470.2023.06.011

激光送丝熔覆过程液桥过渡行为及其实验研究①

应蒋杰② 陈 健 姚喆赫③ 王发博 陈雅伦 姚建华

(浙江工业大学激光先进制造研究院 杭州 310023)

(浙江工业大学机械工程学院 杭州 310023)

(浙江工业大学高端激光制造装备省部共建协同创新中心 杭州 310023)

摘 要 激光送丝熔覆在工艺敏感性与稳定性方面存在挑战,亟需深入理解激光送丝熔覆过程的液桥过渡行为。本文在液桥过渡机制分析的基础上,建立了激光功率、送丝速度、扫描速度及光丝间距等工艺参数的相互关系;搭建了可精密调控光丝间距的激光送丝熔覆实验装置;采用减光摄像对激光送丝熔覆工艺过程进行了图像采集,分析了丝材在激光热源作用下的熔化与过渡成形机理,揭示了液桥过渡、液滴过渡和非接触过渡3 种不同过渡形式下的送丝熔覆成形机制,分析了送丝熔覆成形件宏观和微观形貌;为零部件的送丝增材制造和受损零部件的送丝增材修复过程提供了理论支撑。

关键词 激光送丝熔覆;光丝间距;液桥过渡;过渡成形机理

0 引 言

激光熔覆技术在构件表面进行改性或增材,从而达到提高基板表面性能或修复表面缺陷的目的,已广泛应用于航空航天、能源动力、冶金机械等领域[1-3]。激光熔覆可采用送丝和送粉2 种送料方式,其中,激光送丝熔覆在材料利用率、沉积效率等方面具备优势[4-6],为高质高效激光表面改性与再制造提供了解决方案。目前国内外学者已在激光送丝熔覆方面开展了不少研究工作。文献[5]评估和比较粉末和丝材的2 种激光材料沉积工艺,结果表明送丝熔覆的沉积效率与材料利用率显著高于送粉熔覆。文献[6]采用固态激光对 IN600 丝材进行熔覆实验,分析了激光的扫描速度对稀释率和熔池尺寸的影响规律。文献[4]发现在送丝熔覆过程中增加送丝速度,熔覆层稀释率和纵横比增加,而接触角降低。文献[7]研究了“三分光束”光内同轴激光送丝熔覆过程中工艺参数对熔覆层成形形貌及性能的影响规律,并制备了表面形貌及性能优异的熔覆层。

激光送丝熔覆的工艺稳定性是限制其工业应用的重要因素之一,深入理解激光送丝熔覆过程丝材熔化过渡行为并进行合理的工艺调控是获得高质量熔覆层的前提。文献[8]研究了不同送丝位置和送丝速度下丝材的熔化动力学特征,发现处于液桥过渡时,焊接过程更加稳定,并且能获得均匀的焊缝。文献[9,10]分析了激光送丝熔覆过程中的送丝角度对熔覆层的影响,研究表明送丝角度仅在 40°±20°的范围内时,能实现液桥过渡。文献[11]采用药芯丝进行激光送丝熔覆,研究了液桥过渡模式下的陶瓷颗粒的溶解、扩散及凝固行为。文献[12]对比了单一冷金属过渡和激光-冷金属过渡焊接复合作用下的液滴过渡特性,分析了光丝间距、激光功率和焊接速度对液桥过渡的影响。文献[13]对于金属丝的过渡行为进行了分类研究,并进行了实验验证。上述研究主要集中在对送丝熔覆实验中液桥过

① 国家自然科学基金(52175443),浙江省重点研发计划(2019C04004)和浙江省属高校基本科研业务费专项(RF-B2020002)资助项目。

② 男,1995 年生,硕士生;研究方向:激光表面改性;E-mail:yjj8236@163.com。

③ 通信作者,E-mail:zhyao@zjut.edu.cn。

(收稿日期:2022-01-07)

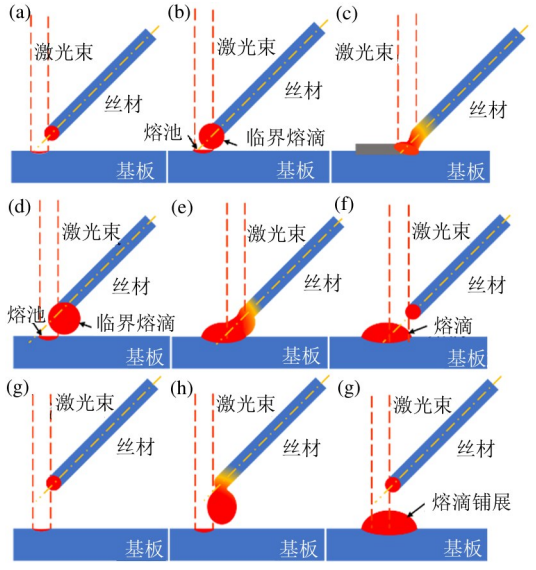
渡的工艺窗口探索及行为分析，但对于液桥过渡形成机制的研究仍较为欠缺。

本文在分析丝材熔化不同过渡行为形成机制的基础上，探寻了送丝熔覆平稳过渡下的光丝间距、送丝速度、激光功率等工艺参数之间的匹配规律，研究了不同过渡行为下熔覆层的宏微观形貌特征，为激光送丝熔覆技术的工程应用及其工艺参数优选提供支撑。

1　液桥过渡机制建模分析

激光送丝熔覆过程中，由于激光束与丝材之间复杂的相互作用，为了获得稳定的熔覆过程和质量良好的成形熔覆层，需调控丝材的熔化和过渡行为。

激光送丝过渡模式分为接触过渡和非接触过渡，其中接触过渡一般有液桥过渡和液滴过渡。过渡模式示意图如图 1 所示，子图(a)～(c)为液桥过渡、子图(d)～(f)为液滴过渡、子图(g)～(i)为非接触过渡。在液桥过渡时，激光束、丝材和熔池之间存在直接的相互作用。丝材端部熔滴在表面张力的作用下附着在丝材端部背向生长，并逐渐长大。在长大的某一瞬间熔滴下表面与熔池上表面接触形成液桥，产生指向熔池的表面张力，端部的熔滴通过液桥过渡到熔池中。该过程中熔滴对熔池几乎不产生



(a)～(c)为液桥过渡，(d)～(f)为液滴过渡，(g)～(i)为非接触过渡

图 1　激光送丝过渡模式示意图

冲击作用且在熔池中得到充分铺展，过渡过程稳定性较好。在液滴过渡时，初始形成的熔滴状态与液桥过渡相同，但熔滴在长大过程中将达到与熔池表面接触的临界状态，熔滴从丝材末端脱离并被迅速拉入熔池，丝材产生颈缩并在末端残留部分液态金属。而在非接触过渡时，由于过渡高度较大，丝材端部的熔滴在逐渐长大的过程中将始终与熔池表面保持一定的距离。直至到达熔滴临界尺寸时，熔滴由于向下的重力大于丝材端部对熔滴表面张力，熔滴在丝材端部产生颈缩，滴入熔池并随之铺展。

液桥过渡是激光送丝熔覆中最平稳的过渡方式。丝材的位置姿态将影响丝材过渡状态，通常采用光丝间距表示丝材与热源间的相对位置。光丝间距直接决定丝材吸收的激光能量，进而影响丝材的加热熔化过程，对熔覆过程的稳定性以及熔覆层的成形质量产生重要影响。光丝间距 d 为丝材端部中心延长线和基板表面的接触点与基板表面激光光斑中心点的距离，$d^2 = d_x^2 + d_y^2$，d_y 表示丝材的对中性，因为当丝材和激光光斑尺寸均较小，对中性差将直接影响丝材对激光能量的吸收效率，导致熔覆过程间断，因此在实验过程中需严格控制丝材的对中性，尽量满足 d_y 为 0，此时光丝间距 $d = d_x$。

在液桥过渡凝固成形后，其熔覆层通常呈现半圆柱状，熔覆层截面为半圆形，面积 S_c 可表示为 $S_c = 0.5\pi R_c^2$，其中 R_c 为熔覆层截面半径。忽略丝材蒸发导致的质量损失，则熔覆层增加的体积为熔化的丝材体积，因此由质量守恒可知熔覆层截面面积 S_c 与丝材横截面面积 S_w 之间的关系式为 $v_s S_c t = v_f S_w t$，其中 v_f 为送丝速度、v_s 为扫描速度、S_w 为丝材横截面面积、t 为送丝时间。简化后可得送丝速度与扫描速度间的关系为

$$v_f / v_s = 0.5 R_c^2 / R_w^2 \tag{1}$$

式中，R_w 为丝材半径。

丝材液桥过渡行为对丝材、基板、光斑的位置有一定的要求，只有在满足几何位置关系的前提下才能实现液桥过渡。图 2 中，状态 1 和状态 2 分别为丝材液桥过渡的 2 种临界状态。以激光光斑中心在基板表面的投影为原点，2 种临界几何位置下的光丝间距分别为 D_1 和 D_2，即 2 种临界状态下的丝材

端部中心延长线和基板表面分别交于 $(D_1,0)$ 和 $(D_2,0)$ 处。只有当光丝间距处于 2 种临界状态之间时,即 $D_1 < d < D_2$ 时,丝材才有可能发生液桥过渡。假设在光斑范围外的熔覆层和基体均为固体,通过几何关系求解,化简后可得:

$$\begin{cases} D_1 = -(R_f + (R_w/\cos\theta + R_c)/\tan\theta) \\ D_2 = R_f + R_w/\sin\theta \end{cases} \quad (2)$$

式中,θ 为送丝角度,R_f 为光斑半径。

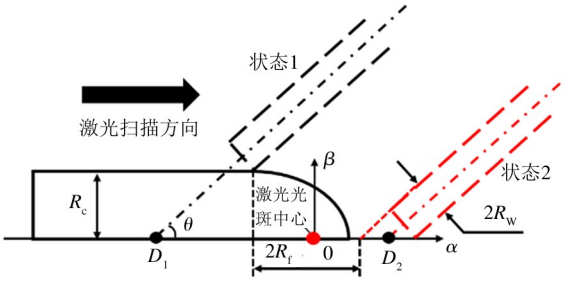


图 2　液桥过渡理论分析示意图

在激光送丝熔覆过程中,丝材在激光作用下从固态到熔化将经历 2 个过程,一是从初始温度加热至熔点,二是在熔点温度继续吸热到熔化。忽略损失,其所需能量为 $E_m = \pi R_w^2 l \rho_w [c(T_w - T_0) + L_w]$[14],其中 l 为熔化的丝材长度,ρ_w 为丝材密度,c 为丝材的比热容,T_w 为金属丝熔点,T_0 为初始加热时的丝材温度,L_w 为丝材的熔化热。当送丝体积与熔化的丝材体积相等时,熔覆过程处于动态平衡。因此在液桥过渡时,丝材加热到熔点并完全熔化所需要的能量可转化为

$$E_m = \pi R_w^2 v_f t \rho_w [c(T_w - T_0) + L_w] \quad (3)$$

在液桥过渡时,丝材吸收的能量主要分为 3 部分。第 1 部分为作用于丝材的激光热源 W_1;第 2 部分为熔覆过程中的熔池辐射能量和丝材及基底气化产生的蒸汽热量 W_2;第 3 部分为熔池的热传导能量和热对流能量 W_3。在热量作用于丝材时,丝材反射了相当一部分能量[15],因此丝材吸收的能量受到丝材吸收率 A[16] 的影响,则丝材吸收的能量 E_a 为 $E_a = A(W_1 + W_2 + W_3)$。在实际实验过程中,激光热源为丝材的主要热源,为简化理论计算过程,在此忽略熔覆过程中的熔池辐射能量和丝材及基底气化产生的蒸汽热量、熔池的热传导能量和热对流能量,将丝材吸收的能量 E_a 简化为 $E_a = AW_1$。

激光输入热源假设为高斯分布热源,则热流密度为 $q(r) = 2P_l/\pi R_f^2 \exp(-2r^2/R_f^2)$,其中 P_l 为激光功率。在激光光斑内的平均热流密度 H 可近似表示为 $H = \int_0^{R_f} q(r)(2\pi r)\mathrm{d}r/\pi R_f^2 = 0.865P_l/\pi R_f^2$。单位时间 t 内,激光光斑内的平均热输入量 E 为 $E = Ht$,根据光丝间距的变化,可将丝材上的激光光斑内的作用面积 S_1 近似求解为 $S_1 = 2(R_f - D)R_w$,因此作用于丝材的激光热源为

$$W_1 = ES_1 = 1.73P_1 R_w t(R_f - D)/\pi R_f^2 \quad (4)$$

丝材吸收的能量为

$$E_a = AW_1 = 1.73AP_1 R_w t(R_f - D)/\pi R_f^2 \quad (5)$$

丝材吸收的能量与熔化所需能量相等,即 $E_m = E_a$。基于此,并联立式(1)、(3)、(5),同时进行归一化处理,令 $\xi_v = v_f/v_s$,$\lambda_d = D/R_f$,可得激光功率、送丝速度、扫描速度及光丝间距间的相互关系表达式如式(6)所示,对其进行一定的变形便可以获得 λ_d 与 ξ_v 间的关系表达式如式(7)所示。

$$\pi^2 R_w^3 R_f \rho_w v_s [c(T_w - T_0) + L_w]\xi_v^2 = 0.865AP_1 R_c^2(1 - \lambda_d) \quad (6)$$

$$\lambda_d = 1 - \frac{\pi^2 R_w^3 R_f \rho_w v_s [c(T_w - T_0) + L_w]}{0.865AP_1 R_c^2}\xi_v^2 \quad (7)$$

IN718 镍基高温合金的物性参数等如表 1 所示,将相应的值代入式(6),可以得到在不同功率及送丝速度下实现液桥过渡时的 λ_d 与 ξ_v 的关系。为研究激光功率和扫描速度的影响,在激光功率为 1000 W 时,研究了 3 种扫描速度(5 mm/s、10 mm/s 和15 mm/s)的影响;并在扫描速度为10 mm/s时,

表 1　变量参数表

变量名称	变量符号	参数
IN718 丝材密度/(g/cm^3)[18]	ρ_w	8.19
IN718 丝材熔点/℃[18]	T_w	1260
IN718 丝材比热容/(J/(K·g))[18]	c	0.435
IN718 丝材熔化热/(J/g)[18]	L_w	270
IN718 丝材半径/mm	R_w	1
光斑半径/mm	R_f	1
激光功率/W	P_1	500/1000/1500
扫描速度/(mm/s)	v_s	5/10/15

研究了 3 种激光功率(500 W、1000 W 和 1500 W)的影响。上述 5 种条件的对比研究结果如图 3 所示。

从曲线可以发现,在扫描速度保持恒定时,随 λ_d 的增加,ξ_v 逐渐减小,即丝材的热输入量降低后,为了满足丝材的熔化,需要送入更少的丝材。而在 λ_d 不变时,扫描速度增加的情况下,为保持液桥过渡需要降低 ξ_v。其原因是当扫描速度增加时,在相同时间内丝材吸收的热量将降低,为了满足液桥过渡的丝材熔化要求,需要到达熔池的丝材减少,即降低送丝速度。而在其他参数保持不变时,激光功率的增加将使得丝材在单位时间内能获取更多的热量,为实现稳定的液桥过渡状态,需要更大的送丝速度向熔池送入更多的丝材,即 ξ_v 增大。此外,在图 3 中可以发现,当 ξ_v 等于 0 时,λ_d 均收敛于 1 处。$\lambda_d = 1$ 对应图 2 中的丝材液桥过渡的临界状态 2,可见,$\lambda_d < 1$ 是获得液桥过渡的必要条件。

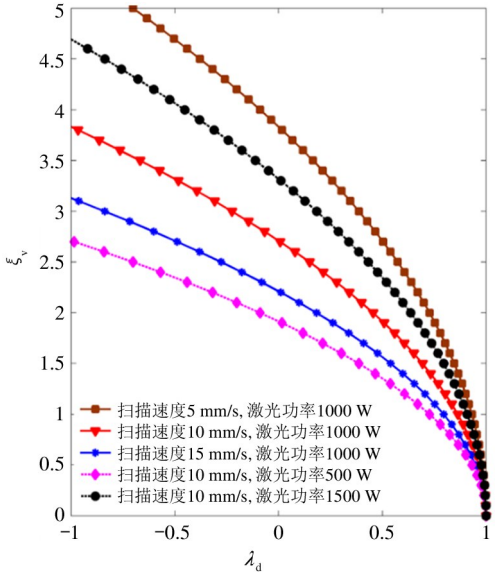


图 3　不同功率及扫描速度下的 λ_d 与 ξ_v 的关系图

2　实验设备与方法

2.1　实验设备

激光送丝熔覆实验装置主要包括 1000 W 半导体激光器、控制系统、冷却系统、伺服送丝系统和减光摄像采集装置,各部分的协调工作确保了实验的精准性及可重复性,系统装置如图 4 所示。定义沿激光扫描方向为 x 轴正方向,垂直于工作台朝里为 y 轴,以笛卡尔坐标系右手定则确定 z 轴方向。

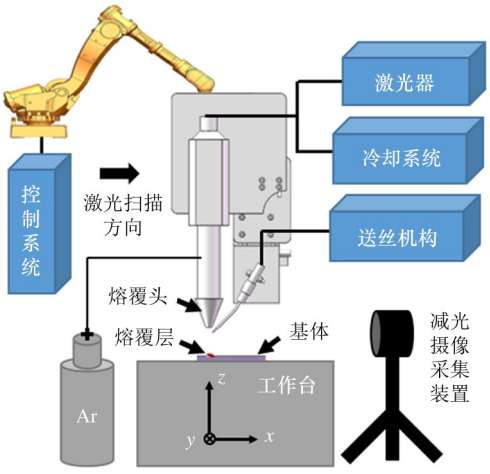


图 4　激光送丝熔覆实验装置示意图

为了激光送丝熔覆实验的顺利开展,实现送丝头与激光头随动,设计了包括 xy 轴移动平台、L 型角铝、螺柱和连接板的送丝头微调结构。通过调整 xy 轴移动平台的 x、y 螺旋调整轴,可实现送丝头相对激光头的 x、y 2 个方向位置的调整。移动平台可实现高精度平稳的滑动,且包含自锁紧结构,可以确保激光与丝材的相对位置调整后的固定性。两块 L 型角铝分别与 xy 轴移动平台的上表面和下表面连接,上表面的 L 型角铝与送丝头相连接,实现送丝头的固定。下表面 L 型角铝与激光头固定处的连接板进行连接,实现与激光头的随动。

连接板选择重量较小且刚度较大的铝合金板,能满足送丝头微调结构的稳定性要求。连接板与激光头的连接孔设计为滑槽阶梯孔,可以实现送丝头相对激光头 z 轴方向位置的调整,调整范围为 ±20 mm,以上均用螺纹进行连接,确保激光与送丝头的相对位置调整后的稳定性。

所用半导体光纤耦合激光器,其聚焦光斑直径为 1 mm,光斑直径可通过调节离焦量来调节,最高输出功率为 1000 W,能够在控制系统上调整激光功率、扫描速度以及扫描路径等参数。冷却系统控制激光器内部水循环,设置水温最低 20 ℃,最高 25 ℃,实验中的保护气采用氩气。伺服送丝系统将实验所需的丝材送至激光光斑处,实现侧向送丝,同时保证了送丝速度的稳定性;调整丝材前端位于激光光斑中心,经激光能量的输入,作用于丝材与基板表面,

实现激光送丝熔覆。

减光摄像采集装置由可调减光镜、摄像机和相机支架构成,将可调减光镜安装在摄像机镜头前端,选择不同档位减少亮度,起到减光作用,可以实现对熔覆过程的实时监测及图像采集。观察激光送丝熔覆不同过渡方式,摄像机的采集频率为 50 Hz,将采集后的图像通过后处理测量熔滴的尺寸及熔滴过渡周期。

2.2 实验材料

在实验中选择的基体材料为固溶处理的 IN718 镍基高温合金,尺寸为 100 mm × 60 mm × 6 mm。在实验开始前,为防止基板表面氧化膜、杂质、水汽及油污等因素对熔覆过程产生影响,使用角磨机对基板表面进行打磨处理,去除掉材料表面的杂质,确保表面洁净且平整;继而用丙酮对基板进行清洗并快速吹干后备用,避免基板表面残留的油渍或其他杂质对实验结果产生影响。

实验中熔覆的丝材材料采用直径为 1.0 mm 的镍基高温合金 IN718。为了避免丝材因表面氧化而对实验结果产生影响,实验前将丝材存放于干燥皿中处理 24 h。

2.3 实验方法

激光送丝熔覆实验开始前,通过调节 xy 轴移动平台的 y 轴螺旋调整轴,调整丝材的对中性,满足 d_y 为 0。实验中,通过调节 xy 轴移动平台的 x 轴螺旋调整轴产生不同的光丝间距进行激光送丝熔覆;熔覆过程中采用氩气对高温熔池和熔覆层进行保护,防止熔覆层表面发生高温氧化,同时提高熔池的冷却速度。实验中采用摄像机对激光送丝熔覆过程进行图像采集,为了清楚地观察到熔覆过程中丝材端部熔滴的动态演变过程,选择 ND2 ~ 2000 减光镜进行减光,消除熔覆时大部分激光的干涉影响。

根据实验需求,调整激光功率、扫描速度、送丝速度和离焦量等工艺参数进行熔覆实验。

3 实验结果与讨论

3.1 液桥过渡实验分析

在不同工艺参数下开展激光送丝熔覆实验研究,调节光丝间距等实验参数实现了液桥过渡。在图 5 中,散点为 2 种工艺参数下实现液桥过渡的 λ_d 与 ξ_v 关系实验数据点;同时,基于第 1 节中的理论模型和实验数据点,绘制了上、下 2 条包络线,以展示实验结果的趋势。可见,在 2 种不同的扫描速度下,呈现的趋势均为 λ_d 增加时 ξ_v 降低,该结果与图 3的理论预测趋势相符。实验中,光丝间距在一定工艺窗口内变化时,由于熔化丝材的黏性和表面张力,送丝熔覆可保持液桥过渡。此外,在相同 λ_d 的情况下,随扫描速度的增加,满足液桥过渡的 ξ_v 显著降低,该趋势与理论预测结果相符。

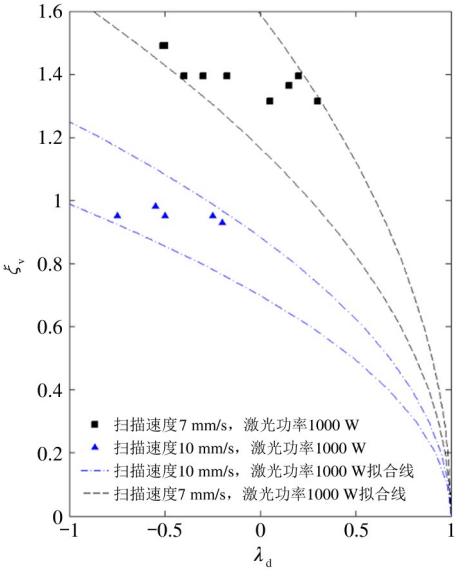


图 5 不同工艺参数下的液桥过渡实验结果

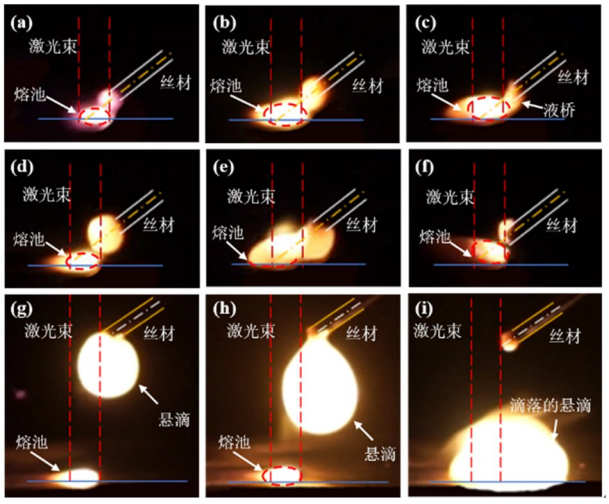
由于理论模型推导中进行了大量的简化,理论模型中部分高温下的特性参数难以获得,理论预测结果在定量上与实验结果差异较大,但在定性趋势上,理论模型预测结果可为工艺实验提供参考。

3.2 丝材熔化与过渡行为实验分析

采用减光摄像采集装置对激光送丝熔覆中的丝材熔化与过渡进行观测和分析。液桥过渡是一种稳定的丝材过渡方式,需同时保证丝材空间位置、热源能量、送丝速度和扫描速度的高度匹配,才能达到动态平衡,该方式下的丝材熔化及过渡动态行为如图 6(a) ~ (c)所示。图 6(a)为实验初始阶段,部分激光直接作用于丝材,在激光的加热下丝材前端发生熔化,同时,部分激光能量则直接传递至基板,使得基板产生部分熔化并形成熔池;在激光持续作用

下,熔化的丝材逐渐长大形成熔滴并在表面张力的作用下而附着在丝材端部,如图 6(b)所示;在激光能量的持续传递及丝材的稳定传输下,熔滴保持持续生长并被运输至基板上的熔池中,在接触的瞬间,液态金属从丝材上稳定“流动”过渡到熔池并逐渐铺展;丝材前端持续熔化并被送入熔池,“流动”过渡保持稳定进行,从而丝材前端与熔池之间建立起“流动”过渡的“液桥”,如图 6(c)所示;在保持该状态下,丝材前端熔化形成的液态金属通过“液桥”源源不断地进入熔池并缓慢铺展。

液滴过渡是接触过渡的另一种方式,过渡的形式是以熔滴的状态与熔池发生接触传递,该方式下的丝材熔化与过渡的动态过程如图 6(d) ~ (f)所示。该方式的实验初始阶段与液桥过渡类似,即在图 6(d)中,激光束同时作用于丝材与基板,在丝材端部与基板上分别形成熔滴与熔池;由于激光束与丝材间的持续作用,熔滴逐渐长大为球状;不同于液桥过渡,随着丝材的连续进给,在液滴过渡方式下的熔滴会逐渐增大至接触的临界状态;实验持续进行下,临界状态的熔滴将与基板表面熔池接触,在熔池表面张力及熔滴自身重力的共同作用下被迅速“拉”入熔池并开始铺展,见图 6(e);随后,丝材熔滴末端产生颈缩,熔滴与基板表面熔池分离,部分熔体残留在丝材上,如图 6(f)所示;在基板熔池上的液态金属会继续铺展,至此便完成了一个液滴过渡周期。完成一个过渡周期后,在激光束的连续加热作用下丝材端部会重新形成熔滴从而进入下一个周期,液滴过渡就在该周期循环下持续进行。



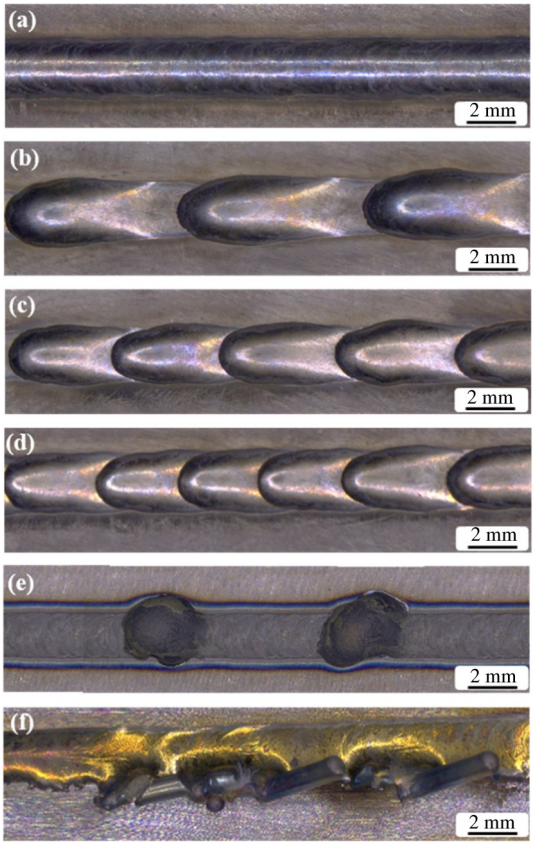
(a) ~ (c)液桥过渡,(d) ~ (f)液滴过渡,(g) ~ (i)非接触过渡

图 6　过渡动态过程拍摄

在非接触过渡过程中,由于丝材熔体与基板熔池间距离较远,丝材前端持续在激光热源作用下使得熔滴能一直生长至临界尺寸,并破坏临界受力平衡导致熔滴发生脱落,该过渡方式下的丝材熔化及过渡的动态过程如图 6(g) ~ (i)所示。非接触过渡主要阶段包括:熔滴的形成阶段;熔滴的长大阶段,如图 6(g);熔滴长大到临界尺寸阶段,如图 6(h);熔滴的滴落过渡阶段,如图 6(i)。

3.3　激光送丝熔覆成形件宏观形貌分析

液桥过渡时,能量在丝材与基板上的分配较为合理,对熔覆过程激光能量、送丝速度和控制精度波动的适应性较强。液桥过渡时液态金属对熔池的冲击较小,也无明显的飞溅产生;同时,由于激光能量对基板的加热作用形成的熔池较大,过渡到熔池中的液态金属能够得到充分的铺展。液桥过渡时熔覆层连续,无明显起伏,成形质量良好,是理想的激光送丝熔覆行为,其成形件宏观形貌如图 7(a)所示。



(a)液桥过渡,(b) ~ (d)液滴过渡,(e)非接触过渡,(f)顶丝

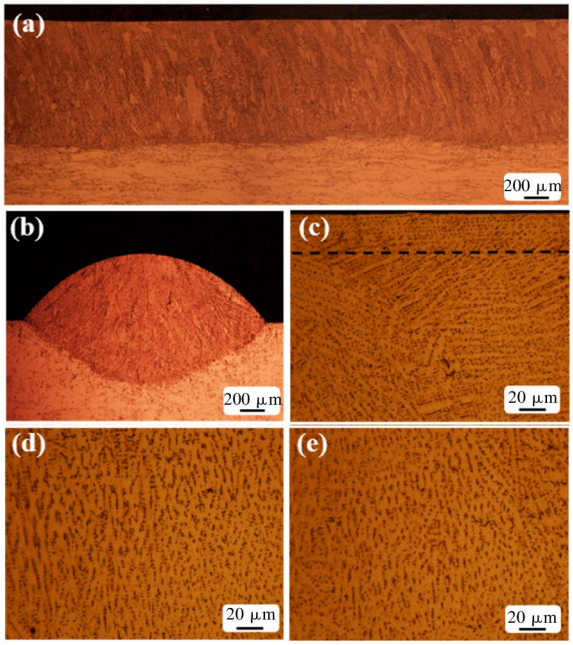
图 7　不同过渡情况下的宏观形貌

液滴过渡时,液滴以周期性过渡到熔池,不同过渡周期成形件宏观形貌如图7(b)~(d)所示;随着过渡周期的减小,凝固熔滴间的中心距离逐渐减小。丝材熔化形成的熔滴逐渐增大直至过渡时,对熔池液态金属产生较大的冲击力,导致熔覆层成形不平稳。在液滴过渡过程中,可通过调节扫描速度以及熔滴过渡周期来减小相邻熔滴间距,从而获得表面形貌可接受的熔覆层,但该方式的工艺区间较小。

非接触过渡时,熔滴在达到临界尺寸之前一直处于摆动状态,这使得熔滴滴落位置与基板表面的熔池位置存在一定的偏差。同时,由于熔滴过渡高度较大,滴落到基板时将对熔池产生较大冲击和飞溅,熔覆过程极不稳定。熔滴尺寸甚至大于熔池,因此过渡时熔池被液态熔滴覆盖。此外,熔滴与固态金属接触将阻碍其流动,又由于激光送丝熔覆过程冷却速率较快,导致滴落的液态金属未完全铺展便已凝固,成形质量较差,其成形件宏观形貌如图7(e)所示。图7(f)为顶丝状态时的成形宏观形貌。顶丝是由于激光辐射到丝材上的能量较少,且送丝速率较快时,丝材以固态形式与熔池底部发生接触并产生弯曲,熔覆过程被迫中断。

3.4 液桥过渡成形件微观组织分析

微观组织往往影响着成形件的性能,液桥过渡时成形件的组织形貌如图8所示。从图8(a)和(b)可以看出液桥过渡时,熔覆层主要由细长的柱状树枝晶及顶部少量的转向枝晶组成。在激光熔覆过程中,熔池的温度梯度大,冷却速率快且热流方向性强,熔覆层呈现典型的树枝晶外延生长特征。在冷却过程中,由于熔覆层不同位置温度梯度的差异,熔覆层组织形貌随位置发生变化。在图8(e)所示的熔覆层底部区域,由于靠近基体,因此熔体冷却速度较快,晶粒形核后优先沿着与最大热流方向的反方向外延生长,所以该区域的柱状树枝晶垂直于结合界面。图8(d)所示为熔覆层中部区域,由于该区域熔池的冷却速度相对较慢,晶粒沿着热流方向生长,其他方向晶粒的生长受到抑制,形成了大片连续生长的柱状树枝晶。如图8(c)所示为熔覆层顶部区域,树枝晶生长方向发生偏转,在最顶部的树枝晶生长方向几乎平行于扫描方向。这是由于在保护气及已凝固合金散热共同作用下,顶部熔池沿扫描方向的温度梯度最大,从而导致熔覆层顶部的树枝晶沿着激光扫描方向生长。



(a)纵截面,(b)横截面,(c)横截面顶部,
(d)横截面中部,(e)横截面底部

图8 液桥过渡成形件组织形貌

4 结 论

本文针对激光送丝熔覆技术,对丝材的过渡行为进行了理论分析和实验观测,并开展了熔覆件宏、微观形貌分析,主要结论如下。

(1)基于液桥过渡机制分析,揭示了液桥过渡下的扫描速度及光丝间距等工艺参数的匹配规律。结果表明,在扫描速度保持恒定时,随 λ_d 的增加,ξ_v 逐渐减小;而在 λ_d 不变、扫描速度增加的情况下,为保持液桥过渡需要降低 ξ_v。

(2)通过调控光丝间距等参数,在激光送丝熔覆中可获得稳定的液桥过渡。在相同 λ_d 的情况下,随扫描速度的增加,满足液桥过渡的 ξ_v 显著降低,该趋势与理论预测相同。

(3)液桥过渡情况下的熔覆层连续,无明显起伏;液滴过渡呈现周期性显著的表面起伏,较难形成连续平稳的熔覆层;而非接触过渡则将产生形貌不佳的熔覆层。由于凝固过程中的热流影响,液桥过

渡下的熔覆层主要由细长的柱状树枝晶及顶部少量的转向枝晶组成。

参考文献

[1] ZHANG P, LIU Z. Machinability investigations on turning of Cr-Ni-based stainless steel cladding formed by laser cladding process[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016,82(9-12):1707-1714.

[2] 李俐群,王宪,曲劲宇,等. 激光熔化沉积 AlSi10Mg 及气孔对力学性能的影响[J]. 中国表面工程, 2019,32(3):109-114.

[3] 姚喆赫, 姚建华, 向巧. 激光再制造技术与应用发展研究[J]. 中国工程科学, 2020,22(3):63-70.

[4] ABIOYE T E, FOLKES J, CLARE A T. A parametric study of Inconel 625 wire laser deposition[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013,213(12):2145-2151.

[5] ARRIZUBIETA J I, KLOCKE F, KLINGBEIL N, et al. Evaluation of efficiency and mechanical properties of Inconel 718 components built by wire and powder laser material deposition[J]. Rapid Prototyping Journal, 2017,23(6):965-972.

[6] KIM J D, PENG Y. Plunging method for Nd: YAG laser cladding with wire feeding[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2000,33(4):299-309.

[7] 刘凡, 吉绍山, 傅戈雁, 等. 三光束激光熔覆工艺参数对熔覆层几何特征影响[J]. 机械工程学报, 2020, 56(15):227-237.

[8] YU Y C, HUANG W, WANG G Z, et al. Investigation of melting dynamics of filler wire during wire feed laser welding[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2013,27(4):1097-1108.

[9] MOK S H, BI G, FOLKES J, et al. Deposition of Ti-6Al-4V using a high power diode laser and wire, Part I: investigation on the process characteristics[J]. Surface and Coatings Technology, 2008,202(16):3933-3939.

[10] MOK S H, BI G, FOLKES J, et al. Deposition of Ti-6Al-4V using a high power diode laser and wire, Part II: investigation on the mechanical properties[J]. Surface and Coatings Technology, 2008,202(19):4613-4619.

[11] ZHAO S, YANG L, HUANG Y, et al. A novel method to fabricate Ni/WC composite coatings by laser wire deposition: processing characteristics, microstructural evolution and mechanical properties under different wire transfer modes[J]. Additive Manufacturing, 2021,38:101738.

[12] LEI Z, LI B, BI J, et al. Influence of the laser thermal effect on the droplet transfer behavior in laser-CMT welding[J]. Optics and Laser Technology, 2019,120: 1-8.

[13] HU R, CHEN X, YANG G, et al. Metal transfer in wire feeding-based electron beam 3D printing: modes, dynamics, and transition criterion[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018,126:877-887.

[14] QUATAERT D, BROSSA F, SCHILLER P, et al. Melting and conduction during short electron-beam pulses[J]. Fusion Engineering and Design, 1991,13(4):381-393.

[15] SALMINEN A. The effects of filler wire feed on the efficiency of laser welding[C]//The 1st International Symposium on High-Power Laser Macroprocessing. Osaka: SPIE, 2002:263-268.

[16] SYED W U H, LI L. Effects of wire feeding direction and location in multiple layer diode laser direct metal deposition[J]. Applied Surface Science, 2005,248(1-4):518-524.

[17] LABUDOVIC M, HU D, KOVACEVIC R. A three dimensional model for direct laser metal powder deposition and rapid prototyping[J]. Journal of Materials Science, 2003,38(1):35-49.

[18] KENNETH C M. Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys[M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2002:175-180.

Mechanisms and experimental studies on wire melting and transfer behaviors in laser wire deposition

YING Jiangjie, CHEN Jian, YAO Zhehe, WANG Fabo, CHEN Yalun, YAO Jianhua

(Institute of Laser Advanced Manufacturing, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

(Collaborative Innovation Center of High-end Laser Manufacturing Equipment, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

Abstract

There are challenges on sensitivity and stability for laser wire deposition. It is urgent to deeply understand the liquid spreading transfer behavior in laser wire deposition. Based on the analysis of liquid spreading transfer mechanism, the relationship among laser power, wire-feeding speed, scanning speed and laser beam-wire distance is established in this study. An experimental setup of laser wire deposition with precise control of laser beam-wire distance is developed. The melting and transition mechanisms of wire with laser heat source are analyzed by light reduction camera. Then, the forming mechanisms of laser cladding with three different transition modes of liquid spreading transfer, droplet transfer and non-contact transfer are revealed. The macrostructures and microstructures of the parts after laser wire deposition are analyzed. This study provides theoretical support to the laser wire additive manufacturing of parts and additive remanufacturing of damaged parts.

Key words: laser wire deposition, laser beam-wire distance, liquid spreading transfer, transfer forming mechanism