

薄壁空心球体的多自由度随形激光熔化沉积制备工艺与精度

张荣伟¹, 万乐^{1*}, 石拓^{2**}, 吴捷³, 傅戈雁¹, 庄锐¹, 程梦颖¹

¹苏州大学机电工程学院激光制造技术研究所, 江苏 苏州 215021;

²苏州大学光电科学与工程学院, 江苏 苏州 215006;

³苏州大学工程训练中心, 江苏 苏州 215131

摘要 为提高激光熔化沉积(LMD)技术对空心零部件的成形能力,优化成形质量,提出连续多姿态 LMD 成形方法。将原始空心球体 3D 模型分段进行路径规划,建立了相应的熔池数学模型,进行了空心球体的 LMD 实验,并系统分析了成形质量。结果表明:连续多姿态 LMD 成形方法可有效实现空心球体的成形,且随着沉积角 α 的增大,成形件尺寸的精度呈先升高后降低的趋势,侧方位封闭式沉积成形精度较差;成形件显微组织致密、晶粒细小,随着沉积角 α 的增大,晶粒尺寸呈先细化后粗化的趋势,而显微硬度则先升高后降低;台阶效应得到了有效缓解,各沉积角球面的平均粗糙度(Ra)低至 $6.55 \mu\text{m}$,重熔处理后 Ra 达 $1.1 \mu\text{m}$ 。连续多姿态成形方法有效提高了 LMD 技术对复杂结构件及封闭件的成形能力,为拓展其应用领域提供了支持。

关键词 激光加工;激光熔化沉积;路径规划;连续多姿态;封闭式薄壁空心球体;成形质量

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.2202018

1 引言

先进航空器制造、核电、化工业生产和国防装备的研制过程,常对空心零部件的制造提出半封闭或全封闭需求,例如航空发动机的机匣、放电反应舱体、薄壁压力容器封头、燃烧室和空心涡轮机叶片等^[1-2]。其中,封闭式薄壁空心球体(简称为空心球体)也是典型零部件之一。对于空心球体类零件的制造成形,传统制造工艺常采用车削、铸造、焊接等技术,其材料浪费严重且存在性能指标不达标的情况^[3]。近年来,具有高成形自由度、低制造周期优势的增材制造技术在制造业的应用范围内正逐步扩大^[4],相关学者也在尝试进行空心球体类零部件的成形,但该工艺技术总体尚不成熟^[5-6]。

目前,主流的金属增材制造技术主要有选区激光熔化(SLM)、激光熔化沉积(LMD)和电子束选区熔化(EBSM)等^[7]。由于极限悬垂角的限制,采用

SLM 技术与 EBSM 技术成形空心球体时,通常需要内部添加支撑来辅助成形^[8]。而在成形结束后留在空心球体内部的支撑结构与金属粉末常难以去除,这限制了铺粉式金属增材制造成形空心球体的应用推广。而采用送粉式金属增材制造(如 LMD 技术)可以有效避免该问题,但同时也存在极限倾斜角限制、台阶效应、成形过程易塌陷和球体封闭难等问题^[6,9-12]。诸多学者对 LMD 成形技术的此类问题进行了研究,大多基于传统水平分层法进行层间错位沉积成形,即利用液态金属的表面张力进行逐层斜向沉积增材,最终实现了带有一定倾斜角度零部件的成形。但倾斜角度通常非常有限^[11-12]。王续跃等^[5,13]建立了 LMD 成形倾斜角度数学模型,采用变 Z 轴提升量法实现了非封闭式 136 层半圆弧截面倾斜薄壁件的 LMD 成形,其顶部最大倾斜角为 39.5° 。Paul 等^[14]基于立面 LMD 熔道宽度与偏移距离参数的理论模型,实现了在空心圆柱体表面的

收稿日期: 2021-05-26; 修回日期: 2021-06-28; 录用日期: 2021-07-08

基金项目: 国家自然科学基金(61903268)、江苏省自然科学基金(BK20190823)

通信作者: *wanle9@qq.com; **shituo@suda.edu.cn

立面激光沉积。

国内石世宏课题组^[15]基于自主研发的沉积头,进行了针对沉积倾斜角与结构件封闭的研究,从分析结果可以看出基板的倾斜角会对沉积层截面尺寸与显微组织产生影响^[16],采用法向分层法、离散分层法进行三维运动成形可实现带有 81°和 90°倾斜角结构件的成形^[17-18]。此外,史建军等^[19]优化了仰面沉积(大于 90°的倾斜角)的工艺,王聪等^[20]实现了封闭空腔回转薄壁件的成形。但由于成形工艺的限制,目前尚未实现对空心球体的有效增材制造成形。

对于空心球体的 LMD 成形,目前仍存在变倾角沉积、大倾角沉积、台阶效应消除和封闭结构沉积等难点尚未得到良好解决,这也是复杂结构件 LMD 成形的难点所在。本文针对这一现状,基于环形束 LMD 实验平台进行空心球体沉积成形实验。将原始空心球体 3D 模型分段进行连续多姿态路径规

划,并建立相应的沉积过程,以期实现空心球体的 LMD 成形。此外,分析空心球体的成形质量及该成形方法的成形效果,从而提高 LMD 技术对复杂结构件及封闭件的成形能力,拓展其应用领域。

2 实验设备、材料

实验采用自行搭建的 LMD 成形系统,实验装置包括:YLS-2000-CT 型激光器(IPG 公司产)、PF2/2 型送粉器(GTV 公司产)、KR60-3F 型六轴机器人(KUKA 产)、自主研发的可成形多种材料^[21-22]的环形光沉积头^[15](原理如图 1 所示)。选用 304 不锈钢圆柱作为成形基体材料,表面经丙酮洗净。粉末材料选用气雾化工艺制备的 316L 不锈钢(其材料成分见表 1),粒径分布为 45~105 μm。采用质量分数为 99.99%的氮气作为实验过程中的保护气和粉末输送气体。

表 1 316L 不锈钢粉末材料成分

Table 1 Chemical composition of 316L stainless steel powder

unit: %

Element	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	N	O	P	C	S
Mass fraction	Bal.	17.3	12.4	2.3	2.1	1.0	0.1	0.1	0.045	0.03	0.03

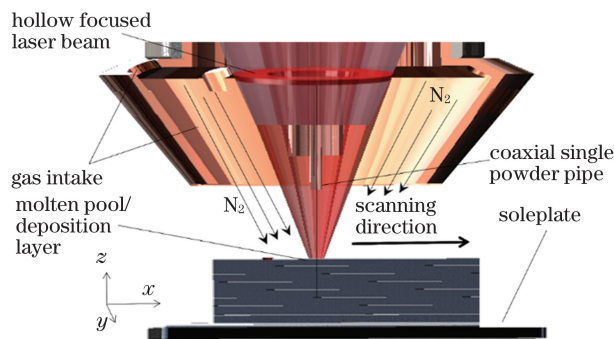


图 1 送气保护式环形光沉积头原理图

Fig. 1 Schematic of N₂-supplied protective hollow beam deposition nozzle

3 实验方法

3.1 空心球体模型与路径规划数据处理

本实验采用如图 2(a)所示的空心球体模型作为原始数据,该模型来源于化学工业领域使用的电离反应室模型,将模型四分之一透明化处理后,通过剖面可以看出其球形度高,壁厚均匀,其中一端常留有较小的开口以供原料与生成物进出。对于 LMD 成形技术的数据处理,传统方法常采用水平位错分层法[图 2(b)],但该方法对于零部件倾斜角较大的

部分容易导致成形失败。为优化成形能力,本研究基于光内单粉束式沉积头(图 1),采用基于库卡机器人在线编程系统的沉积路径规划方法,将原始模型法向分层[图 2(c)]以实现最佳的成形能力与质量,从而进行空心球体的连续变姿态激光沉积。

图 2(b)中,传统水平分层成形过程中的单层悬出量 Δx 为沉积角 α (沉积方向与重力方向夹角)正切值与该层层高 Δh 之积,即

$$\Delta x = \Delta h \tan \alpha, \quad (1)$$

式中: Δh 为定值。 α 增大至极限角 α_{\max} 时, Δx 会超过单道宽度,故上一层已凝固金属的支撑面积会极大地减小甚至丢失,从而导致熔池悬伸端塌陷,沉积成形无法继续,如图 2(b)中虚线部分所示。而光内单粉束式沉积头因消除了光、粉、气的相互干涉作用,提高了光、粉耦合精度,提升了熔池的粉末捕获能力^[15]。以连续大角度变化的沉积头进行沉积成形,可使光束、粉束方向始终沿模型体的切线方向,且上下层之间无错位。因而,已凝固金属对熔池有着足够的承接面积,可以达到有效的托举支撑效果,借此可实现变姿态角的倾斜、仰面、侧方位封闭式激光沉积。

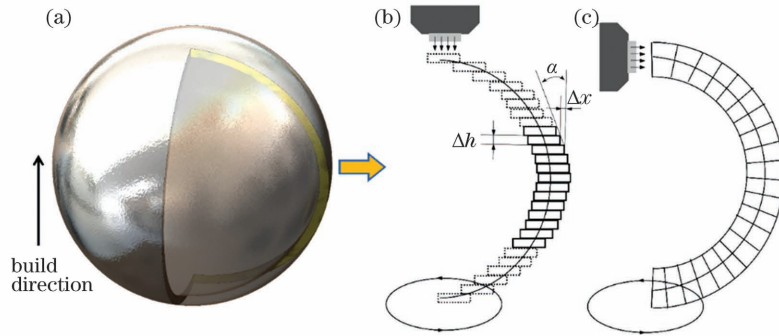


图 2 模型及数据处理。(a)空心球体模型及其四分之一剖面;(b)水平位错分层法;(c)法向分层法
Fig. 2 Model and data processing. (a) Hollow sphere model and its quarter section; (b) horizontal dislocation stratification method; (c) normal stratification method

3.2 连续多姿态 LMD 成形工艺设计

由于空心球体结构圆滑,采用变姿态的沉积过程对沉积头的姿态要求较高,因此,为保证沉积过程无塌陷,且稳定性高,设置夹持圆柱基体的 KUKA 机器人水平旋转平台进行控速旋转,以作为空心球体的沉积成形基体,并配以沉积头的连续变姿态沉积成形,总体设计如图 3(a)所示。实验设计沉积成形过程分为三种成形姿态,根据沉积角 α 和沉积头

姿态角 θ (送料方向与重力夹角)的变化,依次分为 ①倾斜沉积($\alpha = 0^\circ \sim 90^\circ$)、②仰面沉积($\alpha = 90^\circ \sim 145^\circ$)、③侧方位封闭式沉积($\alpha = 145^\circ \sim 180^\circ$),如图 3(b)所示。得益于沉积过程中层间位错的消除,该成形工艺可从原理上提高 LMD 技术对空心球体的成形能力,同时减小甚至消除空心球体表面因“台阶效应”导致的层间熔道式凹痕,并保证空心球体壁厚均匀性,从而有效提高空心球体成形质量。

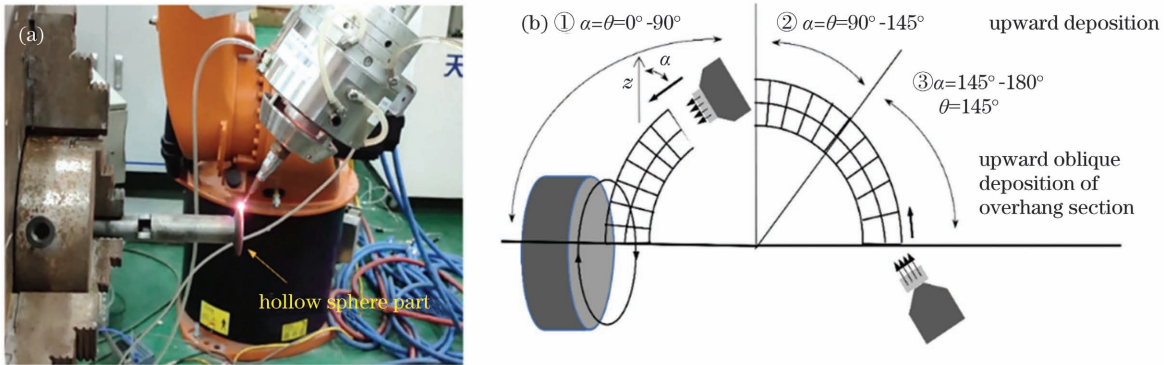


图 3 连续多姿态 LMD 成形工艺。(a)LMD 实验设计;(b)三种姿态成形设计
Fig. 3 Continuous multi-position LMD process. (a) LMD experimental design; (b) three posture forming design

3.3 多姿态 LMD 熔池建模

在进行空心球体连续多姿态 LMD 成形的过程中,熔池中液态金属的受力状态会发生持续变化,如:空间姿态变化导致的熔池所受重力的改变,及已形成层、光、粉、气之间耦合形式变化导致的熔池所受粉、气冲击力的变化。因而,熔池中的液态金属有流淌或滴落的可能,应对三种姿态进行熔池受力分析,进而通过优化工艺参数来提升熔池的稳定性。

如图 4(a)所示,在成形过程的阶段①倾斜沉积中,沉积角 α 的变化范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$,此阶段的熔池受力模型可以以图 4(b)为典型代表。其中, γ 为熔池随温度的升高而减小的表面张力, μ_L 为黏度系

数, F_{Lpg} 为光、粉、气对熔池的冲击力,在 $\alpha = 0^\circ \sim 145^\circ$ 时 F_{Lpg} 垂直于熔池表面,而在 $\alpha = 145^\circ \sim 180^\circ$ 时随着 α 的增大, F_{Lpg} 与熔池平面的夹角逐渐增大。在阶段①中,根据悬垂薄壁件与回转体的 LMD 成形熔池受力分析^[17-18],斜面熔池液态金属位移模型可表示为

$$\mu_L \frac{\partial u_x(z)}{\partial z} = \rho_L g z \sin \alpha - \gamma_s, \quad (2)$$

式中 ρ_L 为液态金属的密度, g 为重力加速度, $\partial u_x(z)/\partial z$ 为 z 沉积方向的溶液流速梯度, γ_s 为与熔池边界长度 S 相关的表面张力。代入熔池移动速度 v 、光斑直径 D 、层高 z 并解析积分可得熔池位移 Δl ,其表达式为

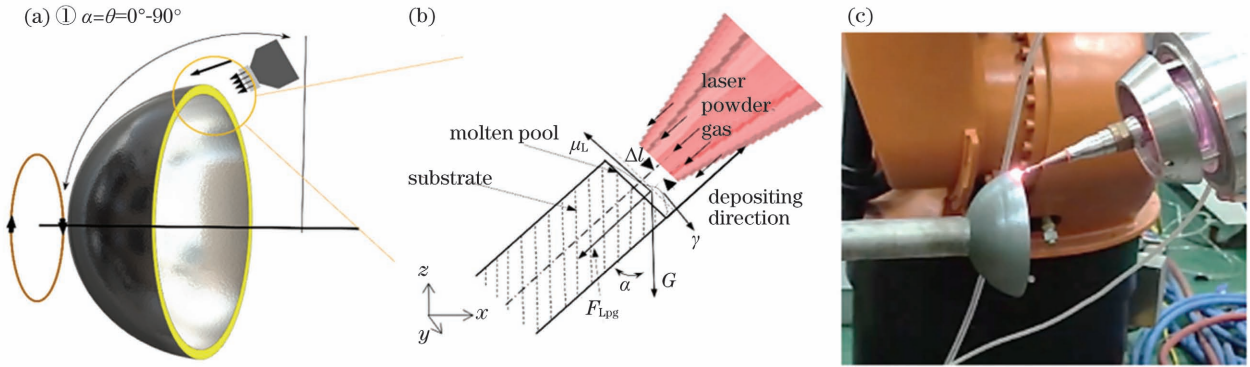


图 4 沉积成形过程阶段①。(a)实验设计;(b)熔池受力模型;(c)实验过程

Fig. 4 Stages ① of the deposition process. (a) Experimental design; (b) mechanical model of the molten pool; (c) experimental process

$$\Delta l = \frac{D}{v\mu_L} \left(\rho_{L,g} \frac{z^2}{2} \sin \alpha - \gamma_1 D_s z \right), \quad (3)$$

式中 Δl 为熔池溶液的位移量, γ_1 为在第一点熔池位置处的表面张力, D_s 为单位边界长度下光斑辐照面积。由(3)式可得熔池溶液的位移量 Δl 与光斑直径 D 、层高 z 和沉积角 α 成正相关, 与扫描速度 v 、黏度系数 μ_L 成反比。空心球体沉积成形过程中 D 保持不变, 因此, 采用低层高、高扫描速度可以有效提高凝固速度并降低熔池溶液偏移量 Δl 。另外, 阶段①期间 F_{LPG} 垂直于熔池, 合适的 F_{LPG} 只会使熔池更为扁平化而不影响 Δl 值的变化。其实验过程如图 4(c) 所示。

在成形过程阶段②的仰面沉积中[图 5(a)], 沉积角 α 变化范围为 $90^\circ \sim 145^\circ$, 其熔池受力模型以图 5(b) 为代表。同理, 参考阶段①的受力模型, 由于该阶段的仰面成形特性, 熔池受到重力在沉积方向的

分力与 F_{LPG} 方向的关系变为反向。因而须增加模型对 F_{LPG} 作用力的分析, 并根据文献[19]可推得

$$\rho_L \cdot z \sin \alpha = \mu_L \frac{\partial u_x(z)}{\partial z} + \gamma_s + p, \quad (4)$$

式中 p 为粉、气、光作用力 F_{LPG} 的影响分量, 主要受载粉气和保护气流量的影响。将(4)式代入变量并积分可得熔池位移 Δl 的表达式为

$$\Delta l = \frac{D}{v\mu_L} \left(\rho_{L,g} \frac{z^2}{2} \sin \alpha - \gamma_1 D_s z - pz \right). \quad (5)$$

由(5)式可得阶段②中熔池溶液偏移量 Δl 除了受 D 、 z 、 α 、 v 、 μ_L 的影响之外, 还与 F_{LPG} 的影响分量 p 成负相关。与阶段①不同的是, 因 $\sin \alpha$ 的值在 $\alpha = 90^\circ \sim 180^\circ$ 范围内随 α 增加而降低, 阶段②的偏移量 Δl 与 α 成负相关。因此, 阶段②除了采用低层高、高扫描速度外还可采用高载粉气和保护气流量来减小偏移量 Δl 。其实验过程如图 5(c) 所示。

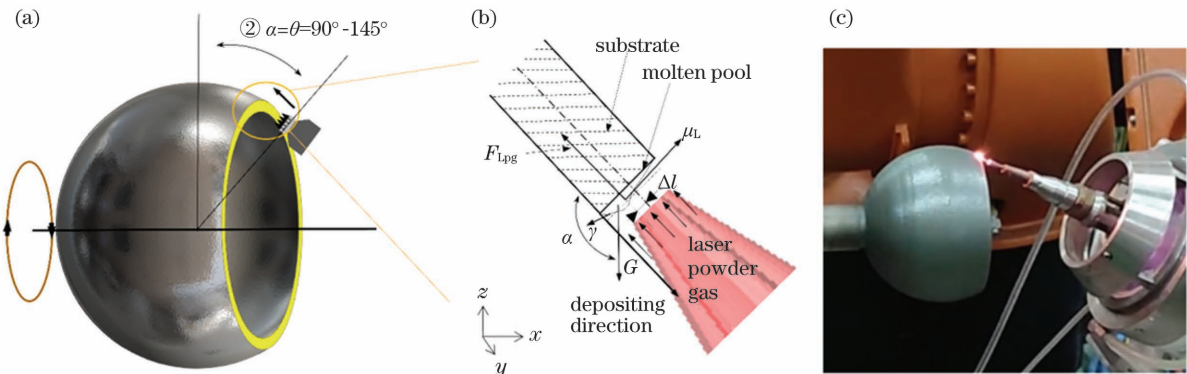


图 5 沉积成形过程阶段②。(a)实验设计;(b)熔池受力模型;(c)实验过程

Fig. 5 Stages ② of the deposition process. (a) Experimental design; (b) mechanical model of the molten pool; (c) experimental process

在成形过程的阶段③侧方位封闭式沉积中[图 6(a)], 沉积角 α 的变化范围为 $145^\circ \sim 180^\circ$, 由于成形件对环形激光束的干涉遮挡作用的影响, 该阶段无法继续采用法向分层数据处理方法, 而是选用

侧方位封闭式沉积方法。姿态角 θ 与沉积角 α 形成夹角 β (设置 $\beta = 0^\circ \sim 35^\circ$), 其熔池受力模型以图 6(b) 为代表。与阶段①和阶段②不同, 阶段③的沉积过程中熔池受到光、粉、气作用力 F_{LPG} 的方向与沉积

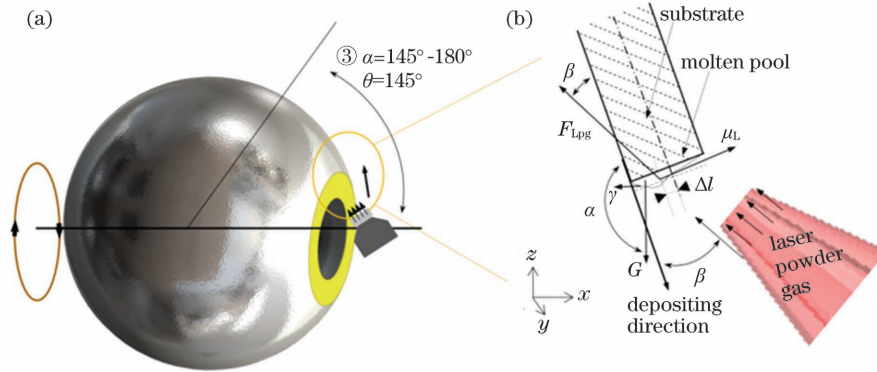


图 6 沉积成形过程阶段③。(a)实验设计;(b)熔池受力模型

Fig. 6 Stages ③ of the deposition process. (a) Experimental design; (b) mechanical model of the molten pool

方向变角为 $180^\circ - \beta$, 因而朝向空心球体内部的方向变角为 $180^\circ - \beta$, 因而朝向空心球体内部的 F_{LPG} 横向分力随沉积角 α 增大而增大。根据文献[20]可推得侧方位封闭式沉积偏移量的表达式为

$$\begin{cases} \Delta z = z \sin \alpha / \cos \beta \\ \Delta x = z \cos \alpha / \cos \beta \end{cases} \quad (6)$$

$$\Delta l = \mu_L / (\rho_L g \cos \theta) - \frac{1}{2} z \tan \theta, \quad (7)$$

将(7)式与(5)式整合, 可得

$$\Delta l = \frac{D}{v \mu_L} \left(\rho_L g \frac{z^2}{2} \sin \alpha - \gamma_1 D_s z - p z + z F_{LPG} \sin \beta \right), \quad (8)$$

由此可得阶段③的沉积过程中, 熔池溶液偏移量 Δl 除了受 D 、 z^2 、 α 、 v 、 μ_L 、 p 影响之外, 还与 $0^\circ \sim 35^\circ$ 区间内的 β 和 F_{LPG} 成正相关, 应逐渐降低气流量、增加最后封闭过程中 Δl 的控制强度来调节偏移量, 从而实现侧方位封闭式沉积成形。综上, 阶段③应采用低层高 z 、高扫描速度 v , 通过调控气流量调控 Δl 进行沉积成形。由于侧方位封闭式沉积采用的是错位分层, 本方法中的阶段③采用沿重力方向增材, 该方法理论上可以减少横向悬垂量, 减少塌陷的概率并提升成形稳定性。其实验过程如图 7(a) 所示。

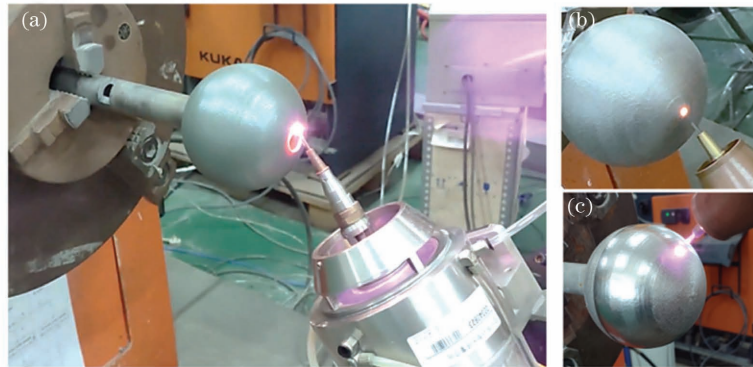


图 7 空心球体 LMD 成形。(a)阶段③的空心球体;(b)最后封闭沉积;(c)表面重熔

Fig. 7 LMD forming of hollow sphere. (a) Hollow sphere at stage ③; (b) final closed deposition; (c) surface remelting

3.4 LMD 实验与表征方法

在建模分析的基础上进行成形实验的参数优化, 为达到最佳成形效果, 进行了多次试验, 最终得到由 LMD 技术沉积成形的空心球体。扫描速度为 10 mm/s, 送粉速率为 4.8 g/min, 离焦量为 -2.5 mm。沉积成形完成后, 采用电火花线切割将试样沿球体中线平剖为两个半球, 进行成形件尺寸测量。然后沿沉积角 α 变化选 8 个点进行切割取样, 将试样进行研磨、抛光、腐蚀, 以在光学显微镜下观察其显微组织。并使用维氏显微硬度仪测得各点

的显微硬度, 加载载荷为 300 g, 加载时间为 15 s。后采用激光扫描共聚焦显微镜(Keyence VK-X1000)进行典型表面形貌表征, 采用 Mitutoyo SJ-210 便携式粗糙测量仪测量空心球体的表面粗糙度(Ra)。

4 结果与讨论

4.1 成形质量与尺寸精度

基于连续多姿态沉积方法的建模分析与参数优化, 以及 KUKA 机器人以优良轨迹控制能力保证的离焦量稳定性, 最终实现了空心球体的 LMD 成

形,如图 7 所示。空心球体分别经过图 7(a)到图 7(c)的成形、封顶和表面重熔过程后,最终形成成形件。在沉积成形过程中沉积头姿态过渡平稳,空心球体稳定持续增材成形,熔池稳定,飞溅少,无塌陷,球体表面始终均一平整,总体成形过程及零件外观达到了预期要求。

本文设计的原始空心球体模型与连续多姿态 LMD 成形的空心球体沿中心线切割后如图 8 所示。图 8(a)中的原始模型球形度良好,内外直径分别为 98 mm 和 102 mm。而 LMD 成形的球体[图 8(b)]在封顶处则略微向外凸起,这是由于在进行末端侧方位封顶式沉积成形过程采用的是位错分层沉积方法,增加的金属材料易向空心球体轮廓线外聚集,其成形精度稍低且轮廓向光头一侧的外部凸起。初步量得成形件的内外径分别为 99 mm 和 101 mm,这与原始模型尺寸差异并不大。

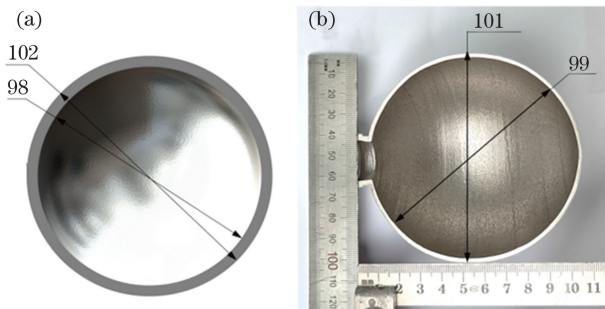


图 8 空心球体尺寸。(a)半剖的模型;(b)沿中线切割的成形件

Fig. 8 Hollow sphere size. (a) Half-section of model; (b) formed part cut along the center line

为进一步分析零件成形尺寸,分别进行各角度球体半径、壁厚测量,结果如图 9 所示。其中原模型的外径、壁厚设计尺寸分别为 51 mm 和 2 mm,已作为对比横线在图中标出。一方面,可以得到相比于原始球体,随着沉积角的变化,沉积的空心球体半径呈先减小后增大的趋势,这是由于沿中心线切割后球体的大沉积角和小沉积角两端拉应力被释放,形成两端被拉中间被压的形式,因此得到半径两端稍大中间稍小的椭圆形截面。另一方面,封闭式沉积的位错分层方法也使得沉积缝补收尾部分向外凸起,导致大沉积角部分的半径为最大值。相对于空心球体半径的变化规律,其壁厚值总体均一且数值稍小,这是由于沉积速度工艺参数控制误差导致了小范围壁厚误差。此外,由于侧向封闭式沉积的熔池相对不稳定,最终大沉积角末端的壁厚波动较大,如图9壁厚末端数据所示,但沉积熔池尚未出现

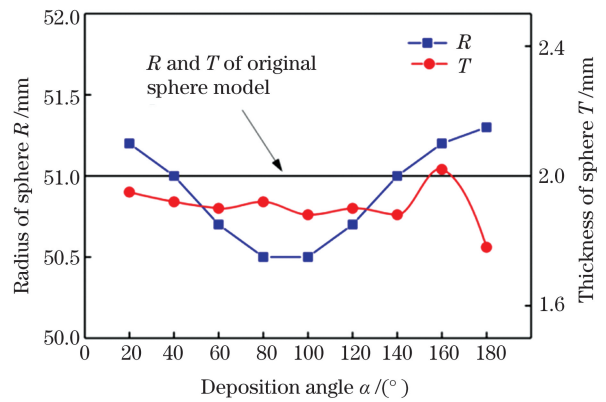


图 9 空心球体 LMD 成形件外径 R 与壁厚 T 随沉积角 α 变化的曲线

Fig. 9 Curves of outer radius and thickness of the as-deposited hollow sphere with deposition angle α

明显缺陷。

4.2 显微组织与硬度

由于 LMD 增材制造工艺的成分过冷度极高,其成形件往往具有非常细小的晶粒组织,故本文沉积成形的空心球体具有非常细小的晶粒组织。为分析不同沉积角 α 位置的显微组织,本研究选取其等轴晶部分作为显微组织的代表进行分析,如图 10 所示。图中,显微组织总体细小均一,且随着沉积角 α 的变化,可以看出其马氏体显微组织总体呈现出两端晶粒粗大、中部晶粒细小的特性。这一特性可以从图 10 中 $\alpha=20^\circ$ 、 $\alpha=80^\circ$ 、 $\alpha=170^\circ$ 三个典型的低、中、高沉积角沉积部分的显微组织中明显看出。其晶粒尺寸随沉积角的变化曲线如图 11(a)所示,曲线也是呈现出两端高中间低的趋势,这与图 10 观察到的组织变化特性一致。这个结果是由沉积过程的热累积量变化所致。由于激光在不停断加载的过程

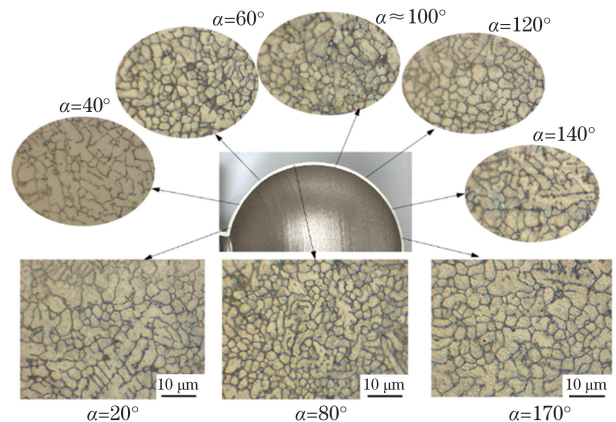


图 10 空心球体 LMD 成形件显微组织随沉积角 α 变化
Fig. 10 Microstructure of the as-deposited hollow sphere change with deposition angle α

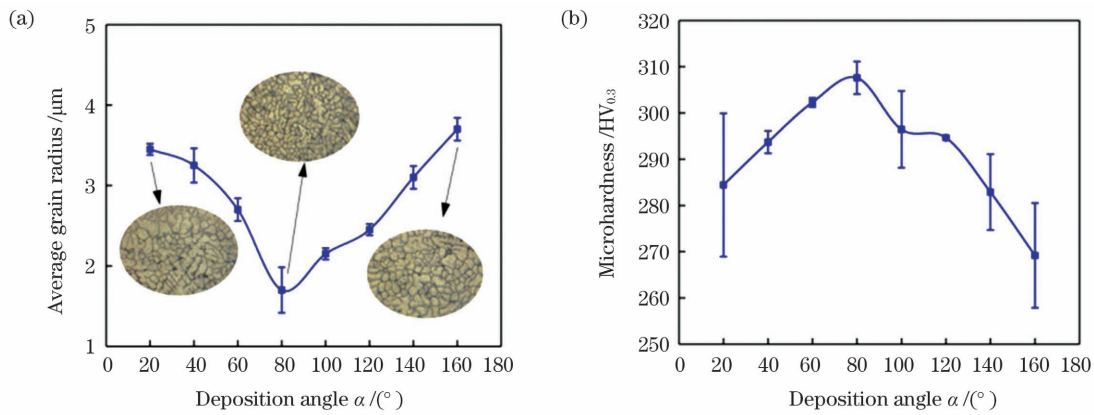


图 11 空心球体 LMD 成形件的晶粒尺寸与显微硬度随沉积角 α 变化曲线。(a) 晶粒尺寸; (b) 显微硬度

Fig. 11 Curves of grain size and micro-hardness of the as-deposited hollow sphere with deposition angle α . (a) Grain size; (b) micro-hardness

中单位时间的输入热量相同,而随着沉积角的逐渐升高,沉积空心球体一个圆周所用的时间随其圆周长同步,即先增加($\alpha = 0^\circ \sim 90^\circ$)后降低($\alpha = 90^\circ \sim 180^\circ$),因此,每个沉积点的冷却时间(两次沉积间隔时间)也是先增加后降低,低、高沉积角段的球体两端的热累积量要高于中沉积角段的球体中部,最终导致晶粒随沉积角增大呈先细化后粗化的规律。另外,如图 11(b)所示,随着沉积角的增大,材料等轴晶组织的显微硬度呈先上升后下降的趋势,这归因于中沉积角部分晶粒细小,细晶强化作用导致其硬度升高。这也从侧面印证了图 10 的组织变化特性。

4.3 表面形貌与粗糙度

空心球体成形件的表面 3D 形貌图与实物图如图 12(a)所示和图 13(a)所示。图 12(a)中,表面形貌总体均一,部分凸起为表面黏附的粉末颗粒以及球化效应导致的颗粒,台阶效应产生的层纹并不显著。具体表面粗糙度值随沉积角 α 的变化曲线如图 12(b)所示,从 $\alpha = 20^\circ$ 至 $\alpha = 100^\circ$ 表面的粗糙度值保持在 $3 \mu\text{m}$ 上下波动,而当 α 到达 100° 及以上时,粗糙度值则逐渐上升并最终达到 15.8。这是由于阶段②的仰面成形工艺增加了熔池不稳定性,提高了 $\alpha = 90^\circ \sim 145^\circ$ 时的表面粗糙度,以及阶段③的位错分层与仰面沉积联合作用导致 $\alpha = 145^\circ \sim 180^\circ$ 时的粗糙度上升。

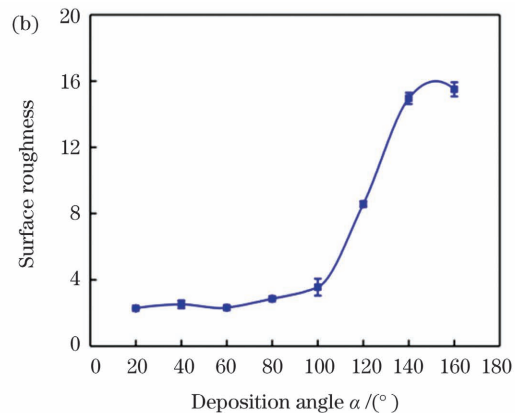
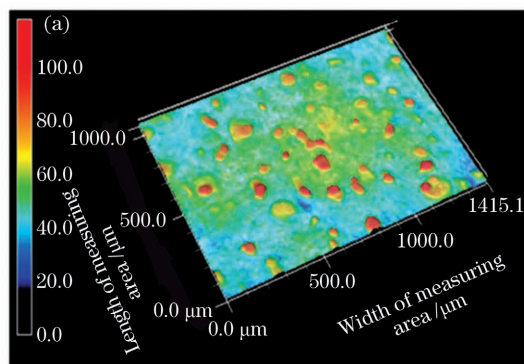


图 12 空心球体 LMD 成形件。(a) 典型表面 3D 形貌; (b) 表面粗糙度随沉积角 α 变化曲线

Fig. 12 Hollow sphere fabricated by LMD. (a) Typical surface 3D topography; (b) curve of surface roughness with deposition angle α

将沉积成形后的空心球体沉积角 $\alpha = 90^\circ \sim 180^\circ$ 的部分进行表面激光重熔处理,得到优化后的表面如图 13(a)所示,最终表面粗糙度低至 $1.1 \mu\text{m}$,其粗糙度线轮廓图如图 13(b)所示。综上,连续多姿

态 LMD 成形的空心球体,其各沉积角球面粗糙度的平均值低至 $6.55 \mu\text{m}$,激光重熔后表面粗糙度进一步降低至 $1.1 \mu\text{m}$ 的水平。

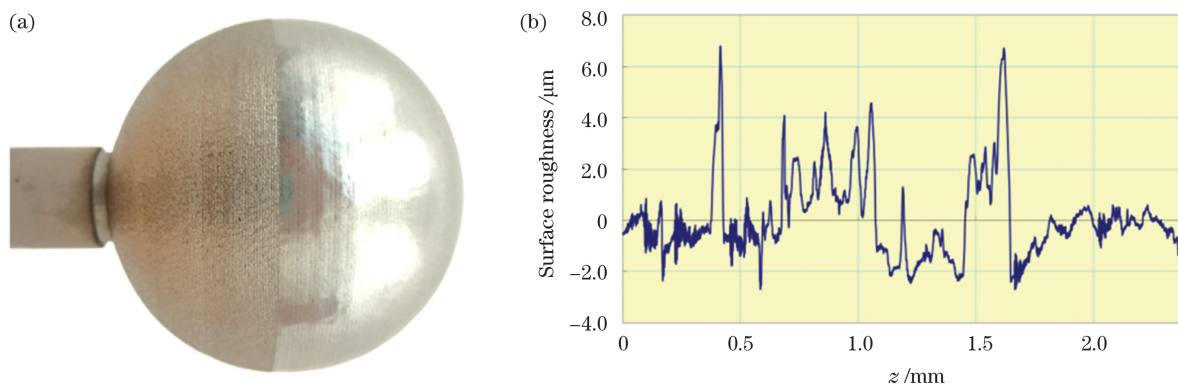


图 13 空心球体 LMD 成形件。(a)重熔处理;(b)重熔表面的粗糙度线轮廓

Fig. 13 Hollow sphere fabricated by LMD. (a) Surface re-melting; (b) roughness line profile of re-melting surface

5 结 论

提出一种连续多姿态 LMD 成形方法,通过数学建模分析与工艺优化,实现了稳定的空心球体 LMD 成形。随着姿态角的变化,成形球体的外径与壁厚总体均一,封口处波动稍大。成形件的显微组织致密、晶粒细小,随着姿态角的增大,晶粒尺寸呈先降低后升高的趋势,显微硬度则先升后降。空心球体表面的台阶效应不显著,各沉积角的球面平均粗糙度低至 $6.55 \mu\text{m}$,重熔处理后表面粗糙度更是低至 $1.1 \mu\text{m}$ 。最终,连续多姿态 LMD 的成形方法有效提升了 LMD 技术对复杂结构件及封闭件的成形能力,这为其应用领域的推广提供了支持。

参 考 文 献

- [1] Li D C, Lu Z L, Tian X Y, et al. Additive manufacturing: revolutionary technology for leading the aerospace manufacturing [J/OL]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*: 1-17 [2021-05-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20210429.1424.042.html>.
李涤尘, 鲁中良, 田小永, 等. 增材制造——面向航空航天制造的变革性技术 [J/OL]. *航空学报*: 1-17 [2021-05-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20210429.1424.042.html>.
- [2] Gu D D, Zhang H M, Chen H Y, et al. Laser additive manufacturing of high-performance metallic aerospace components[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0500002.
顾冬冬, 张红梅, 陈洪宇, 等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造 [J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0500002.
- [3] Ouyang H B, Yu Z H, Chen T, et al. Sub-regional process planning for large nuclear power head [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2014(5): 253-255.
- [4] Santos E C, Shiomi M, Osakada K, et al. Rapid manufacturing of metal components by laser forming [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, 46(12/13): 1459-1468.
- [5] Wang X Y, Wang Y F, Jiang H, et al. Laser cladding forming of round thin-walled parts with slope angle [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(1): 0103006.
王续跃, 王彦飞, 江豪, 等. 圆形倾斜薄壁件的激光熔覆成形 [J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 0103006.
- [6] Milewski J O, Lewis G K, Thoma D J, et al. Directed light fabrication of a solid metal hemisphere using 5-axis powder deposition [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, 75(1/2/3): 165-172.
- [7] Frazier W E. Metal additive manufacturing: a review [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, 23(6): 1917-1928.
- [8] Calignano F. Design optimization of supports for overhanging structures in aluminum and titanium alloys by selective laser melting [J]. *Materials & Design*, 2014, 64: 203-213.
- [9] Wu X, Mei J. Near net shape manufacturing of components using direct laser fabrication technology [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 135(2/3): 266-270.
- [10] Griffith M L, Keicher D M, Atwood C L, et al. Freeform fabrication of metallic components using laser engineered net shaping (LENS) [C]//Proceeding of the Solid Freeform Fabrication Symposium, August 12-14, 1996, Austin, TX, USA. Austin: University of Texas, 1996: 121-128.
- [11] Qian Y H, Tan H, Huang W D. The deposition morphology of laser solid forming on the inclined

- surface[J]. *Applied Laser*, 2015, 35(1): 53-57.
- 钱远宏, 谭华, 黄卫东. 倾斜基体表面激光立体成形沉积特性研究[J]. *应用激光*, 2015, 35(1): 53-57.
- [12] Dwivedi R, Zekovic S, Kovacevic R. A novel approach to fabricate uni-directional and branching slender structures using laser-based direct metal deposition[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, 47(7/8): 1246-1256.
- [13] Wang X Y, Jiang H, Xu W J, et al. Laser cladding forming of arc-section inclined thin-walled parts with variable Z-increments[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(10): 1003007.
- 王续跃, 江豪, 徐文骥, 等. 变 Z 轴提升量法圆弧截面倾斜薄壁件激光熔覆成形研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(10): 1003007.
- [14] Paul C P, Mishra S K, Kumar A, et al. Laser rapid manufacturing on vertical surfaces: analytical and experimental studies [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2013, 224: 18-28.
- [15] Shi S H, Fu G Y, Wang A J, et al. Laser processing forming and manufacturing intra-light powder feeding process and optical powder feeding nozzle: CN101148760A[P]. 2008-03-26.
- 石世宏, 傅戈雁, 王安军. 激光加工成形制造光内送粉工艺与光内送粉喷头: CN101148760A[P]. 2008-03-26.
- [16] Li D S, Shi T, Shi S H, et al. Laser cladding forming technology of flat-top thin-walled part based on special-shaped base surface[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(11): 1102002.
- 李东升, 石拓, 石世宏, 等. 异形基面平顶薄壁结构激光熔覆成形工艺研究[J]. *中国激光*, 2019, 46(11): 1102002.
- [17] Shi T, Wang Y Q, Lu B H, et al. Laser cladding forming of cantilevered thin-walled part based on hollow-laser beam inside powder feeding technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(10): 0703003.
- 石拓, 王伊卿, 卢秉恒, 等. 中空激光内送粉熔覆成形悬垂薄壁件 [J]. *中国激光*, 2015, 42(10): 0703003.
- [18] Su H, Shi T, Shi S H, et al. Algorithm and implementation of laser cladding with equal overlapping ratio on free-form surface [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(4): 0402008.
- 苏昊, 石拓, 石世宏, 等. 自由曲面等搭接率算法及激光熔覆工艺实现 [J]. *中国激光*, 2020, 47(4): 0402008.
- [19] Shi J J, Shi T, Shi S H, et al. Process study and optimization of upward cladding by laser inside powder feeding[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(3): 0306005.
- 史建军, 石拓, 石世宏, 等. 激光光内送粉仰面熔覆工艺研究及优化 [J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(3): 0306005.
- [20] Wang C, Shi S H, Fang Q Q, et al. Laser cladding forming of closed hollow cavity rotary thin-wall parts [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(1): 0106006.
- 王聪, 石世宏, 方琴琴, 等. 封闭空腔回转薄壁件的激光熔覆成形 [J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(1): 0106006.
- [21] Wan L, Shi S H, Xia Z X, et al. Laser preheating/fluid cooling assisted laser metal deposition of AlSi₁₀Mg[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(7): 20200365.
- 万乐, 石世宏, 夏志新, 等. 激光预热/流体冷却辅助激光金属沉积 AlSi₁₀Mg 成形 [J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(7): 20200365.
- [22] Wan L, Shi S H, Xia Z X, et al. Directed energy deposition of CNTs/AlSi₁₀Mg nanocomposites: powder preparation, temperature field, forming, and properties[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 139(1): 106984.

Multi-Degree of Freedom Conformal Laser Metal Deposition Process and Precision of Thin-Walled Hollow Sphere

Zhang Rongwei¹, Wan Le^{1*}, Shi Tuo^{2**}, Wu Jie³, Fu Geyan¹,
Zhuang Rui¹, Cheng Mengying¹

¹ *Institute of Laser Manufacturing Technology, School of Mechanical and Electrical Engineering, Suzhou University, Suzhou, Jiangsu 215021, China;*

² *School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China;*

³ *Engineering Training Center, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215131, China*

Abstract

Objective Manufacturing requirements for semi-enclosed or fully-enclosed hollow parts are common in the development of advanced aircraft manufacturing, nuclear power, chemical industry production, and national defense equipment. Scholars have also attempted to develop closed hollow parts using additive manufacturing in recent years, but the process technology is still in its early stages. For example, when using selective laser melting (SLM) and electron beam selective melting (EBSM) technology to form hollow spheres, internal support is usually required to aid in the forming process. The support structure and metal powder that remain in the hollow sphere after forming are difficult to remove, limiting the application and promotion of powder-bed metal additive manufacturing hollow spheres. The use of powder-feeding metal additive manufacturing [such as laser metal deposition (LMD) technology] can effectively avoid this problem; however, there are issues such as limit inclination angle limitation, step effect, forming collapse, and difficulty in closing the sphere at the same time. Several scholars have studied these problems in LMD forming technology. Wang Xuyue et al. used the variable z -axis lift method to form nonclosed 136-layer semicircular inclined thin-walled parts. Paul et al. conducted a study on the deposition inclination angle and the closure of structural parts. Shi Jianjun et al. optimized the process of upside deposition. Wang Cong et al. realized the formation of a closed cavity rotary thin-walled part. However, due to the limitation of the forming process, effective additive manufacturing forming of hollow spheres has not been realized yet. Therefore, in this study, we conduct hollow sphere LMD forming experiments to improve LMD technology's forming ability for complex structural parts and closed parts, as well as to provide support for the expansion of its application fields.

Methods A continuous multiposture LMD forming method is proposed. The original hollow sphere 3D model was segmented using the annular beam LMD experimental platform, and the continuous multiposture deposition path planning method was used for normal layering (Fig. 2). The force mathematical model analyses of the deposition process are conducted. And based on modeling analysis, the parameters of the forming experiment are optimized, multiple experiments are performed to achieve the best forming effect, and the hollow sphere formed by LMD technology are obtained. After deposition, the sample is cut into two hemispheres along the sphere's centerline using wire electrical discharge machining and the size of the formed part is measured. Then, eight points are selected along the deposition angle α for cutting and sampling, and the sample is ground, polished, and corroded to observe its microstructure under an optical microscope. In addition, the Vickers microhardness tester is used to determine the microhardness of each point, a laser scanning confocal microscope (Keyence VK-X1000) is used to characterize the typical surface morphology, and the Mitutoyo SJ-210 portable roughness measuring instrument is used to determine the surface roughness (Ra) of the hollow sphere.

Results and Discussions The deposition head's posture transition was stable during the hollow sphere deposition process, as were the molten pools; there was little splashing, and there was no collapse during the deposition and forming process, and the sphere's surface was uniform and flat. Forming process and the appearance of the parts met the expected requirements. The size difference between the original model and formed parts was slight (Fig. 8), indicating that with the increase of the deposition angle α , the grains were refined first and then coarsened; the microhardness of the equiaxed crystal structure shows a trend of first increasing and then decreasing (Fig. 11). The Ra value fluctuates at $3 \mu\text{m}$ from $\alpha = 20^\circ$ to $\alpha = 100^\circ$. When α reached 100° and above, the roughness value gradually increased, finally achieving a higher value of $15.8 \mu\text{m}$ (Fig. 12). The average value was as low as Ra of $6.55 \mu\text{m}$

(Fig. 13).

Conclusions This paper proposed a method for forming a continuous multiposture LMD. Stable hollow sphere LMD forming can be achieved through mathematical modeling analysis and process optimization, and the outer diameter and wall thickness of the sphere were generally uniform with the change of the deposition angle, whereas the sealing part fluctuated slightly. The microstructure of the formed part was dense and the grains were fine. With the increase in the deposition angle, the grain size decreased first and then increased, whereas the microhardness first increased and then decreased. The step effect on the surface of the hollow sphere is insignificant. The average roughness of the spherical surface of each deposition angle was as low as Ra of $6.55 \mu\text{m}$, and even as low as Ra of $1.1 \mu\text{m}$ after remelting. Finally, the continuous multiposture LMD forming method significantly improves the forming ability of LMD technology for complex structural parts and closed parts, paving the way for its wider application.

Key words laser processing; laser metal deposition; path planning; continuous multi-posture; closed thin-walled hollow sphere; forming quality

OCIS codes 140.3390; 140.6810; 160.3900; 350.3390