

激光与光电子学进展

激光内送粉变姿态增材制造薄壁墙的试验研究

李光明, 朱刚贤*, 李加强, 石世宏

苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215137

摘要 为了探索在非水平基面上激光增材制造薄壁件的成形规律, 拓展激光增材修复技术的广泛应用。基于激光内送粉技术, 分别在 0° ~ 150° 的倾斜基板上进行薄壁件的成形试验, 研究了不同倾斜角度下薄壁墙的成形规律, 并分析了非水平基面下熔池的受力规律。试验结果表明: 随基板倾斜角度的增大, 薄壁墙的总体宽度及高度增大, 熔池长度变短; 随着基板倾斜角度的增大, 成形件尾部塌陷越来越严重, 在基板角度 150° 时, 产生最大角度为 21° 的斜坡。该研究结果可以为非水平基面上激光增材制造及修复提供参考价值。

关键词 激光技术; 激光增材修复; 内送粉; 非水平基面; 薄壁墙

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220782

Experimental Study on Thin Walls by Laser Additive Manufacturing Based Inside-Beam Powder Feeding with Variable Posture

Li Guangming, Zhu Gangxian*, Li Jiaqiang, Shi Shihong

School of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou 215137, Jiangsu, China

Abstract To investigate the forming rules of laser additive manufacturing thin-walled parts on a nonhorizontal substrate and expand the extensive use of laser additive repair technology, the forming experiments of thin-walled parts were conducted on an inclined substrate from 0° to 150° , based on the inside-beam powder feeding technology. The forming rules of thin walls under different inclination angles were examined, and the forces of a molten pool under the nonhorizontal substrate were investigated. The experimental findings demonstrate that the total width and height of thin walls increase, and the length of the molten pool decreases with the increase of substrate inclination angle. The forming part's tail collapse becomes severe with the increasing substrate inclination angle. A slope with a 21° maximum angle is obtained when the substrate angle is 150° . The study findings offer reference value for laser additive manufacturing and repair on the nonhorizontal substrate.

Key words laser technique; laser additive repair; internal powder feeding; non-horizontal base surface; thin wall

1 引言

激光增材修复是增材制造的一个典型应用, 基于激光熔覆等材料激光沉积技术原理, 实现零部件损伤部位尺寸修复和零部件性能恢复甚至提升^[1]。与其他常规修复技术相比, 修复层与基体是冶金结合, 具有冷却速度快、热影响区小、晶粒细化、层内组织均匀等优点, 可以使修复后的零部件恢复性能甚至是优于基体的力学性能^[2]。现有激光增材修复技术大多基于水平基面加工, 即熔覆头/喷粉头始终保持垂直位置在水平

基面上进行加工, 而对于不便搬运及不便摆平的大型火电站、核电站、轮船、石化, 以及航空航天行业的装备、结构件、零部件的表面等就很难进行修复加工^[3]。为了进一步拓宽激光增材制造技术的应用范围, 在非水平基面上进行增材制造, 学者们也进行了积极的探索。1998年, Milewski等^[4]构建了一套五轴联动的直接光制造系统, 采用螺旋轨迹扫描成形出全致密半球薄壁件。刘立峰等^[5]研发了一套基于机器人的柔性激光熔覆再制造系统, 通过机器人对熔覆喷头小角度偏摆的控制, 实现了在复杂形状曲面的三维激光修复。

收稿日期: 2022-02-21; 修回日期: 2022-03-02; 录用日期: 2022-03-14; 网络首发日期: 2022-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(52105387)、国家重点研发计划(2016YFB1100300)、中国博士后科学基金面上项目(2021M692349)、江苏省普通高校自然科学基金研究计划项目(21KJB460019)、“香江学者计划”项目(XJ2021032)

通信作者: *gxzhu@suda.edu.cn

Dwivedi 等^[6]搭建了一套激光直接金属沉积系统,熔覆喷头在堆积过程中呈一定角度偏摆并始终垂直于成形表面,通过对轨迹路径及工艺的优化,成形了最大倾斜角度达 45°枝状悬垂结构件。李宽等^[7]基于光内送粉技术,实现了大倾角、大扭曲结构的三元叶片成形,有效缓解了大倾角所产生的台阶效应。余超等^[8]提出了在激光束与基板垂直方向之间预设夹角的方法,实现了无支撑大倾斜角薄壁结构的成形。以上研究虽然可以实现不同倾斜角度下熔覆成形,但是在非水平面下不同倾斜角对增材制造薄壁件的成形规律尚缺乏系统研究。

本文采用课题组研发的光内同轴送粉激光熔覆头^[9],在非水平基板上分别进行了 0°~150°的薄壁墙的增材制造试验,研究了非水平基板倾斜角下薄壁件的成形规律,结合非水平面下熔池的受力分析对试验结果进行了解释,该研究结果为非水平基面上激光增材

制造及修复提供了参考价值。

2 试验材料与方法

试验用粉末为铁基 316L 不锈钢,粒度为 140~325 目,其材料成分(质量分数,%)如下: C(0.02%), Cr(16.9%), Ni(10.3%), Mn(1.77%), Mo(2.11%), Si(0.5%), P(0.04%), S(0.01%), Nb(0.03%), Cu(0.39%), Fe(余量)。基材为 316L 不锈钢,其化学成分(质量分数,%)如下: Ni(10.17%), Cr(16.75%), Mo(2.05%), C(0.024%), Si(0.51%), Mn(1.53%), P(0.024%), S(0.003%), Fe(余量),几何尺寸为 100 mm×100 mm×8 mm。试验装置由功率 2 kW 光纤激光器、6 轴机器人、可倾斜工作台、光内同轴送粉喷嘴和 GTV 送粉器组成。送粉载气和保护气都是氮气。整个增材制造试验系统装置如图 1(a)所示。

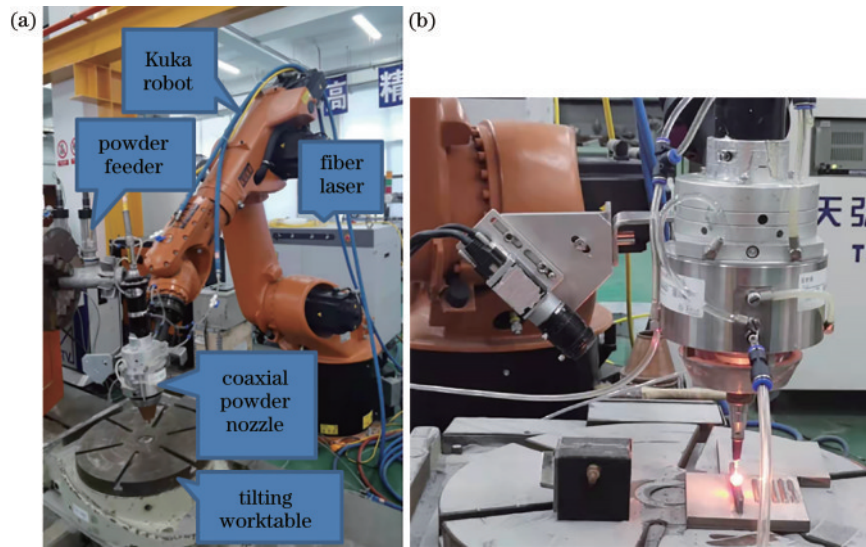


图 1 试验装置。(a) 增材制造系统;(b) CCD 摄像机安装位置

Fig. 1 Experimental device. (a) Additive manufacturing system; (b) location of CCD camera

试验前,将粉末烘干,以确保粉末的流动性。将基板先用砂纸打磨,再用乙醇丙酮清洗。试验过程中,将基板固定在可倾斜工作台上,通过调整工作台角度来改变基板的倾斜角度,再调整机器人角度以保证同轴送粉喷嘴始终垂直于基板,调整后的角度如图 2 所示。同时使用高速 CCD 摄像机实时监测熔池大小,CCD

摄像机安装位置如图 1(b)所示。试验完成后,用线切割将成形试样沿着垂直于扫描方向切出一个 5 mm 宽的长条,经过镶样、打磨、抛光、腐蚀处理后,在 MX6R 金相显微镜下观察成形件宽度。采用的试验工艺参数如表 1 所示。

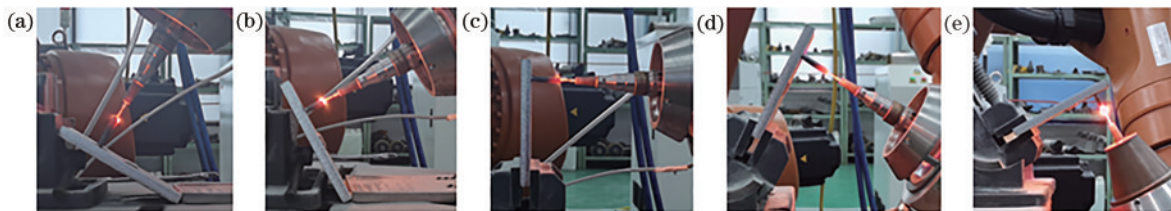


图 2 基板倾斜角度示意图。(a) $\theta=30^\circ$; (b) $\theta=60^\circ$; (c) $\theta=90^\circ$; (d) $\theta=120^\circ$; (e) $\theta=150^\circ$

Fig. 2 Schematic of substrate tilt angle. (a) $\theta=30^\circ$; (b) $\theta=60^\circ$; (c) $\theta=90^\circ$; (d) $\theta=120^\circ$; (e) $\theta=150^\circ$

表 1 激光增材制造试验工艺参数

Table 1 Process parameters of laser additive manufacturing experiment

Laser power /W	Powder mass flow rate / $(\text{g}\cdot\text{min}^{-1})$	Laser defocusing distance /mm	Scanning speed / $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	Carrier gas flow rate / $(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	Shielding gas pressure /MPa
1600	12	-5	4	3	0.2

3 试验结果与分析

3.1 试验结果

采用表 1 中的工艺参数,选取 6 个典型倾斜角度进行薄壁墙增材制造。倾斜角度分别为 0° 、 30° 、 60° 、 90° 、 120° 、 150° ,扫描方式为单向扫描,单层提升量设为 0.8 mm ,扫描长度为 50 mm ,共 50 层,成形试件如图 3

所示。首先,测量不同薄壁件的尾部塌陷倾斜角度,通过图像处理获得结果,如图 4 所示;其次,通过游标卡尺测量薄壁件的成形总高度;然后,在金相显微镜下测量薄壁墙的最大成形宽度 w 及通过 CCD 测量薄壁墙顶端尾部的熔池长度 l ;最后,通过图像处理将 CCD 采集出的熔池面积及熔池中阴影部分面积进行计算,获得熔池中阴影部分面积 S_1 与整个熔池面积 S_2 比值。

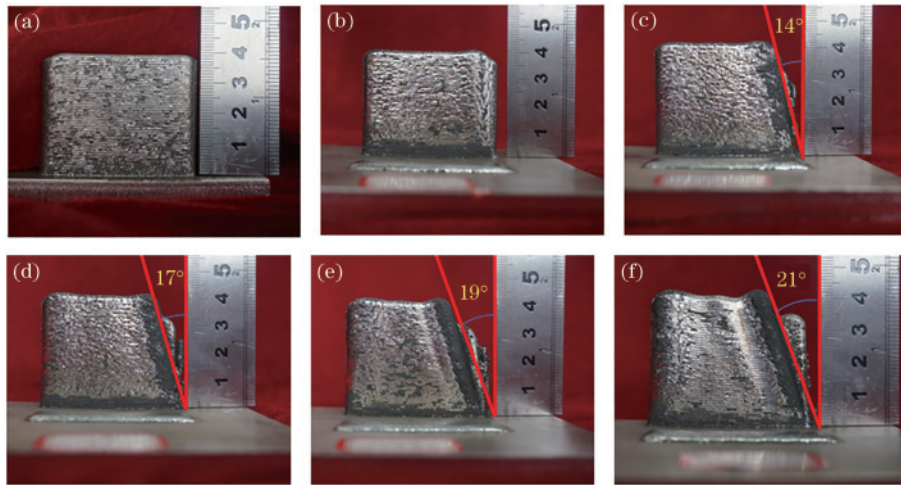


图 3 不同倾斜角下的成形薄壁件。(a) $\theta=0^\circ$; (b) $\theta=30^\circ$; (c) $\theta=60^\circ$; (d) $\theta=90^\circ$; (e) $\theta=120^\circ$; (f) $\theta=150^\circ$

Fig. 3 Thin-walled parts with different inclination angles. (a) $\theta=0^\circ$; (b) $\theta=30^\circ$; (c) $\theta=60^\circ$; (d) $\theta=90^\circ$; (e) $\theta=120^\circ$; (f) $\theta=150^\circ$

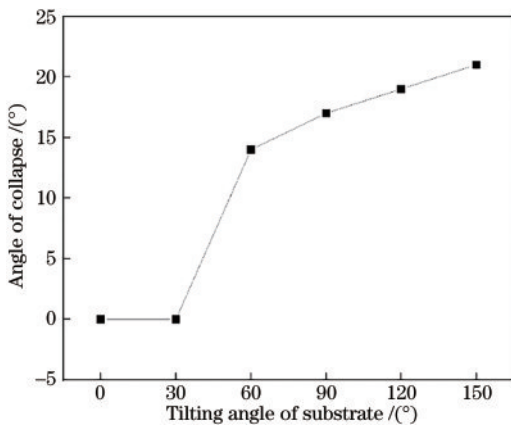


图 4 不同倾斜角下的成形薄壁件尾部塌陷角度

Fig. 4 Tail collapse angles of formed thin-walled parts under different inclination angles

从图 3 和图 4 可以看出,随着基板倾斜角度的增大,成形件尾部塌陷越来越严重,在基板倾斜角度为 150° 时,形成最大角度为 21° 的斜坡。如图 5(b) 和图 6 所示,随着基板倾斜角度的增大,成形件的宽度 w 总体呈现逐渐增大的趋势。CCD 图像显示,熔池沿扫描方向的长度 l 越来越小,产生原因由下面的熔池受力

分析加以解释。

如图 7 所示,随基板倾斜角度增大,熔池中阴影部分的面积占比越来越大,且阴影往熔池顶部延伸,延伸部分的阴影是由于重力作用而聚集在熔池顶部的未能熔透的金属粉末,该现象在每层的末端影响尤为明显,由于末端进入熔池的金属粉末未能完全熔化,即不能形成完整的熔池,且反弹大量金属粉末,粉末利用率明显降低,故每一层的末端都比前一层缺失一些,经过逐层累积,造成了成形件尾部塌陷的现象,并且随着基板倾斜角度的增大而越来越严重。

同时,如图 5(a) 所示,随着基板倾斜角度的增大,成形件高度也越来越高,与理想值 40 mm 偏离越来越大,这是由于随着基板倾斜角度的增大,熔池受重力拉伸作用的影响越来越大,导致单层生长高度稍有增大,经过 50 层的累积,总体高度明显增大,并且熔池自身的重力作用使其有向下滴落的趋势,造成熔池长度随基板角度的增大而越来越短,末端熔池的粉末利用率进一步降低,导致成形件塌陷程度越来越严重。

3.2 熔池受力分析

从机理上对试验现象进行解释,并对不同倾斜角

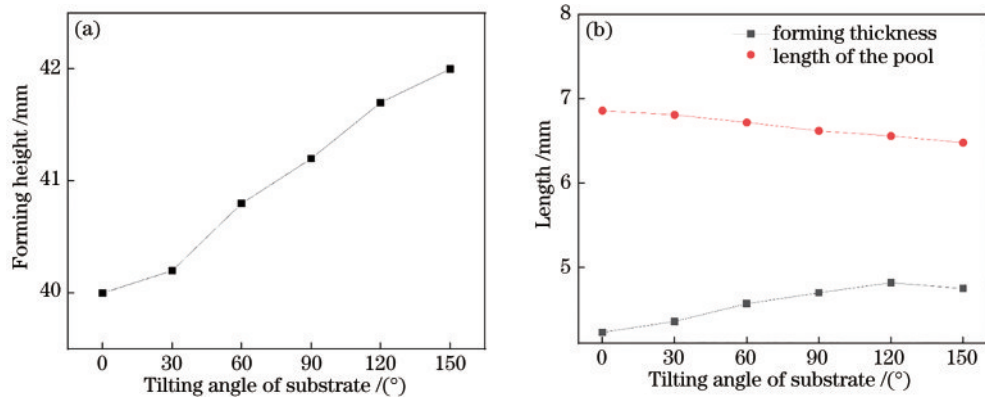


图 5 不同基板倾斜角时薄壁墙成形尺寸。(a) 成形件总高度;(b) 成形件宽度及熔池长度

Fig. 5 Forming dimensions of thin wall with different substrate inclination angles. (a) Overall height of forming part; (b) width of forming part and length of molten pool

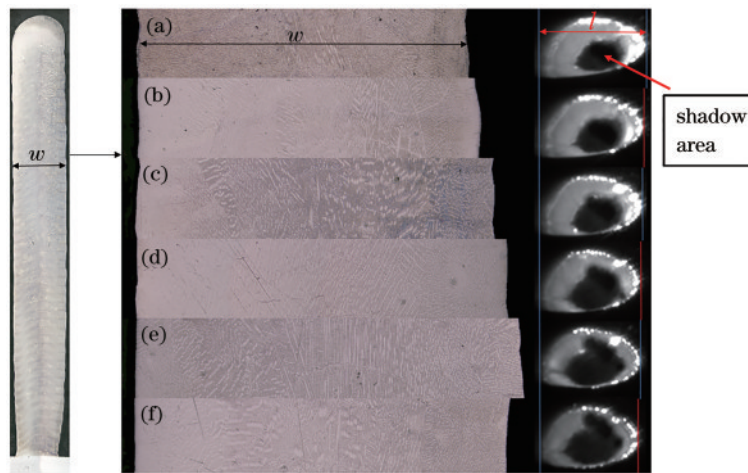


图 6 不同基板倾斜角时成形件宽度及熔池长度的对比图。(a) $\theta = 0^\circ$; (b) $\theta = 30^\circ$; (c) $\theta = 60^\circ$; (d) $\theta = 90^\circ$; (e) $\theta = 120^\circ$; (f) $\theta = 150^\circ$
Fig. 6 Comparison of width and molten pool length with different substrate inclination angles. (a) $\theta = 0^\circ$; (b) $\theta = 30^\circ$; (c) $\theta = 60^\circ$; (d) $\theta = 90^\circ$; (e) $\theta = 120^\circ$; (f) $\theta = 150^\circ$

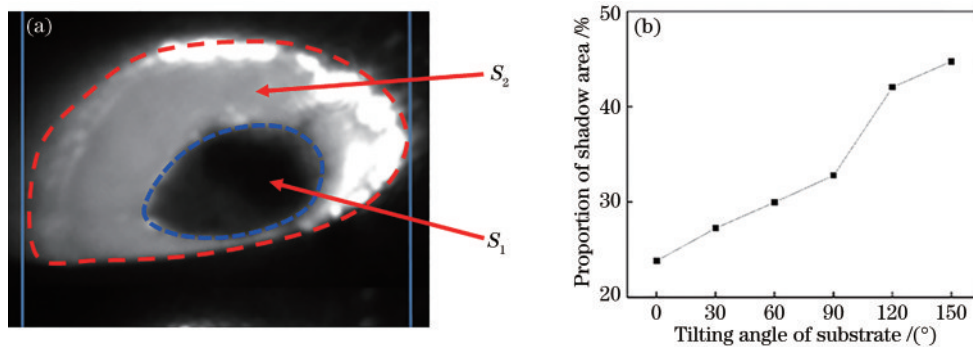


图 7 不同基板倾斜角时熔池中阴影面积与熔池面积的比值。(a) 熔池区域及阴影区域示意图;(b) 熔池阴影面积比例

Fig. 7 Proportion of shadow area in the molten pool to the molten pool area with different substrate inclination angles. (a) Diagram of molten pool area and shadow area; (b) proportion of shadow area in molten pool

度的熔池受力进行分析。由文献[10-11]及结合内送粉特征可知,变姿态激光增材制造时,液态熔池主要受熔池重力 G 、基板的支持力 F_n 、表面张力 γ 、粘附力 F_μ 和保护气压力 F_g 的共同作用,受力示意图如图 8 所示。

熔融金属在倾斜基面产生的流淌行为主要受到表

面张力 γ 和粘附力 F_μ 的共同约束。不同基板倾斜角度下熔池沿 X 方向的受力可分解为

$$G \sin \theta = F_\mu + \gamma_x, \quad (1)$$

式中: γ_x 为表面张力沿 X 方向的分力。

随着基板倾斜角度的增大,式(1)中,重力 $G \sin \theta$ 沿 X 方向上的分力先增大后减小,故熔池的流淌趋势也是

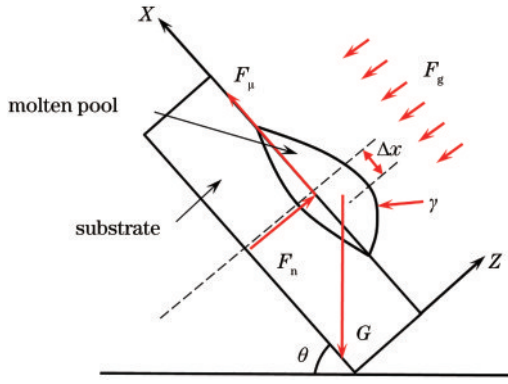


图 8 熔池受力分析图

Fig. 8 Force analysis diagram of molten pool

先增大后减小,如图 9 所示,因为不同倾角下单道的宽度不同,为了方便对比顶点偏移量,将拟合曲线沿着单道底部的中点对齐排列。可以发现,随着基板倾斜角度的增大,单道熔覆层的顶点偏移量 Δx (熔覆层横截面轮廓顶点与中心线的距离) 先增大后减小,试验结果与受力分析结果一致。 F_μ 是由于熔池有向下流淌的趋势而产生的约束熔池流淌趋势的粘附力,其方向与熔池流淌方向相反,熔池流淌越严重,粘附力 F_μ 越大。

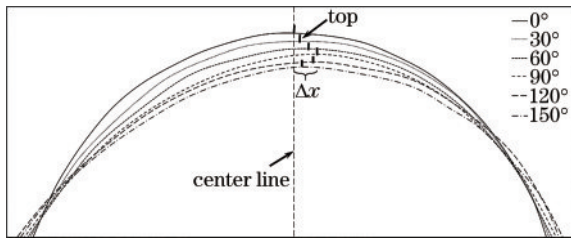


图 9 不同倾斜角度下单道横截面轮廓曲线

Fig. 9 Single cross-sectional contour curves under different inclination angles

表面张力的作用使得液态熔池液面内外产生压力差,这种弯曲液面的附加压力可由拉普拉斯方程^[12]进行描述,如图 10 所示。附加压力指向液面的曲率中心,导致液面内侧的压力 P_{in} 高于液面外侧的压力 P_{out} ,定义 $\Delta P = P_{in} - P_{out}$, ΔP 始终大于 0。

附加压力与曲率半径的关系如图 11 所示。

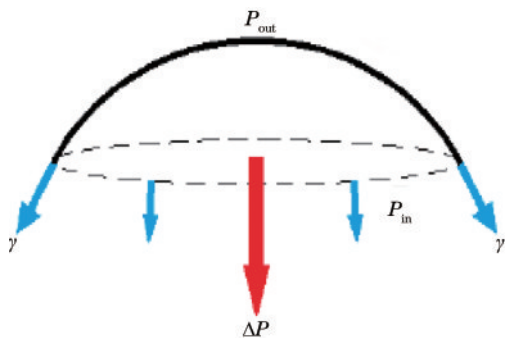


图 10 弯曲液面的附加压力

Fig. 10 Additional pressure on curved surface

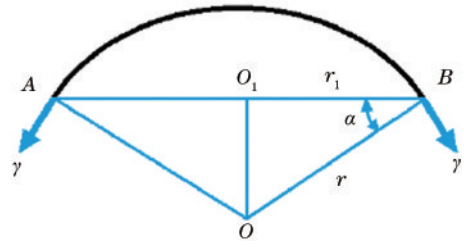


图 11 附加压力与曲率半径的关系

Fig. 11 Relationship between additional pressure and radius of curvature

设截面周界线上表面张力的合力为 F , 则合力 F 和附加压力 ΔP 可由下式求得,

$$F = 2\pi r_1 \gamma \cos \alpha = \frac{2\pi \gamma r_1^2}{r}, \quad (2)$$

$$\Delta P = \frac{F}{\pi r_1^2} = \frac{2\gamma}{r}, \quad (3)$$

式中: r_1 为截面半径 O_1B ; r 为液面的曲率半径。

由式(3)可知,附加压力只随着熔池液面曲率半径 r 的增大而减小,如图 12 所示。当基板倾斜时,由于重力的影响熔池有向下流淌的趋势,熔池 A 处的曲率半径大于 B 处的曲率半径,故 $\Delta P_2 > \Delta P_1$, 经过熔池各点处附加压力的叠加,可知熔池总的附加压力 ΔP_{all} 偏向 X 正方向,附加压力 ΔP_{all} 沿 X 正方向的分力可以阻碍熔池流淌。当基板倾斜角度为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 时,随着基板角度的增大,附加压力 ΔP_{all} 沿 X 正方向的分力增大;当基板倾斜角度为 $90^\circ \sim 180^\circ$ 时,随着基板角度的增大,附加压力 ΔP_{all} 沿 X 正方向的分力减小。因此,当基板倾斜角度为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 时,粘附力 F_μ 和表面张力 γ 共同抵制熔池流淌,与重力沿 X 方向的分力形成一组相互作用力作用于熔池,随着基板角度的增大,成形件宽度越来越大,而熔池沿扫描方向的长度则越来越短。当基板倾斜角度为 $90^\circ \sim 150^\circ$ 时,熔池“倒吸”在上一层熔道上,随着基板角度的增大,熔池自身重力沿垂直于基板

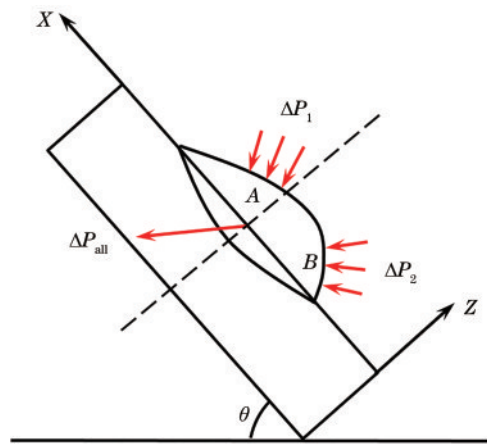


图 12 熔池表面张力的附加压力示意图

Fig. 12 Schematic of additional pressure on surface tension of molten pool

方向的径向分力影响越来越明显,从而进一步减小了熔池沿扫描方向的长度,产生了如图 5 和图 6 所示的结果。

4 结 论

本文基于激光内送粉技术,通过在 $0^{\circ}\sim 150^{\circ}$ 的非水平倾斜基板上进行薄壁墙激光增材制造试验,获得如下结论:随基板倾斜角度的增大,薄壁墙的总体宽度及高度增大,沿扫描方向的熔池长度变短;随着基板倾斜角度的增大,成形件尾部塌陷越来越严重,在基板倾斜角度 150° 时,产生最大角度为 21° 的斜坡。该研究结果可以为非水平基面上激光增材制造及修复提供参考价值。

参 考 文 献

- [1] 徐滨士,董世运.激光再制造[M].北京:国防工业出版社,2016.
Xu B S, Dong S Y. Laser remanufacturing technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016.
- [2] Luo J, Gao J J, Gou S, et al. Study on microstructure and mechanical properties of Ni60+WC/Ni35/AISI1040 functional surface gradient structure of remanufacturing chute plate for the mining scraper by a low cost high power CO₂ laser cladding technique[J]. Materials Research Express, 2020, 7: 086521.
- [3] 朱刚贤,石世宏,傅戈雁,等.基于激光加工机器人的光内送粉变基面熔覆研究[J].中国激光,2015,42(3): 0303010.
Zhu G X, Shi S H, Fu G Y, et al. Research on variable reference plane cladding based on laser processing robot with inside-laser powder feeding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(3): 0303010.
- [4] 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.
- [5] 刘立峰,杨洗陈,王非,等.基于机器人的柔性激光再制造系统[J].中国激光,2011,38(12): 1203003.
Liu L F, Yang X C, Wang F, et al. Flexible laser remanufacturing system based on robot[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(12): 1203003.
- [6] 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.
- [7] 李宽,石拓,石世宏,等.异形基面三元叶片激光送粉增材制造研究[J].中国激光,2022,49(2): 0202019.
Li K, Shi T, Shi S H, et al. Laser Powder feeding additive manufacturing of ternary blade with abnormality base plane[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(2): 0202019.
- [8] 余超,苗秋玉,石龙飞,等.大倾斜角薄壁结构激光近净成形实验研究[J].中国机械工程,2020,31(5): 595-602.
Yu C, Miao Q Y, Shi L F, et al. Experimental research on laser engineered net shaping of thin-walled structures with large inclination angles[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(5): 595-602.
- [9] 石世宏,傅戈雁,王安军,等.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.
Shi S H, Fu G Y, Wang A J, et al. Technique for manufacturing inner-light powder-supplying by laser machining forming and inner-light powder-supplying spray head: CN101148760A[P]. 2008-03-26.
- [10] 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.
- [11] Nowotny S, Scharek S, Beyer E, et al. Laser beam build-up welding: precision in repair, surface cladding, and direct 3D metal deposition[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2007, 16(3): 344-348.
- [12] Scott C F, Sander G C, Norbury J. Computation of capillary surfaces for the Laplace-Young equation[J]. The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, 2005, 58(2): 201-212.