

倾斜基板激光熔覆 GH3536 熔池形貌的仿真与实验研究

王鹏飞, 杨坤, 陈明智, 王占栋, 卢轶, 孙桂芳**, 倪中华*

东南大学江苏省微纳生物医疗器械设计与制造重点实验室, 江苏 南京 211189

摘要 采用实验与仿真相结合的方法研究了工艺参数及基体倾斜角度对激光熔覆 GH3536 熔池流场及轮廓的影响。研究表明:倾斜基体激光熔覆时,基体倾斜导致的激光能量密度及粉末浓度的降低对熔高有显著影响,送粉量及激光能量的适度增加能够有效弥补熔高的降低;熔池内部存在的马兰戈尼对流分为前后流场,前流场主导轮廓前沿坡角,后流场主导熔高;基体倾斜时重力会加强相应方向的流场,进而影响最终的熔池轮廓。上坡熔覆时熔池轮廓下凹,下坡熔覆时熔池前沿更加平缓。结合温度场及流场分析基体倾斜对激光熔覆轮廓的影响,对于采用激光熔覆技术修复工作区间有限的倾斜面结构如燃烧室内部,在工艺参数调整及修复路径规划方面具有重要的指导作用。

关键词 激光加工; 激光熔覆; 倾斜基体; 数值模拟; 熔池轮廓; 重力作用

中图分类号 TG665

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1002121

1 引言

GH3536 是一种典型的镍基固溶强化高温合金,具有良好的抗氧化性、耐腐蚀性、冷热加工成形性和焊接性,国际牌号为 Hastelloy-X。该合金在 900 °C 以下具有中等持久强度和蠕变强度,当工作温度达到 1080 °C 时可短时使用,适用于制造航空发动机燃烧室及其他高温部件^[1]。燃烧室是航空发动机三大核心部件之一,其性能将直接影响发动机性能。先进航空发动机燃烧室技术研发离不开燃烧室试验,而且某项技术措施是否正确,必须由燃烧室试验来鉴定^[2]。马歇尔航天飞行中心曾对航天飞机的主发动机推进装置进行了 1200 次热试车试验,针对发生故障的 20 种情况有充分的文件证明资料可用于分析故障原因,其中与燃烧室活门有关的 3 个故障是由于振动造成的机械损伤、壳体裂纹、密封件受到热燃气侵蚀所致^[3]。

激光熔覆是一种新的表面改性技术,通过在基

材表面添加熔覆材料,并利用高能密度的激光束使之与基材表面薄层一起熔凝,显著改善了基体材料表面的耐磨、耐蚀、耐热、抗氧化或电气特性,从而达到表面改性或修复的目的。相比于传统的制造技术,激光熔覆具有冷却速率快、热输入量少、热影响区小、稀释率小、组织致密,以及涂层与基体结合强度高优势。激光熔覆技术在修复损伤及裂纹部件时具有明显的优势。张杰等^[4]采用激光增材修复技术和 Inconel 718 球形粉末对预制凹槽的 Inconel 718 合金进行逐层修复,然后在 800 °C 下进行不同时间的 δ 相析出时效处理,结果表明时效处理能够有效提高修复区及母材的显微硬度及抗拉强度,但随着时效时间的持续增加,硬度及力学性能均呈现下降的趋势。潘博等^[5]采用同轴送粉式激光熔覆技术对 ZTC4 钛合金板材上的圆孔形缺陷进行修复,发现 3 次修复后,熔覆区硬度平均比母材高 10.7%,热影响区的硬度平均比母材高 17.6%。庞小通等^[6]研究了 30CrMnSiA 高强钢粉末的激光熔覆

收稿日期: 2020-10-20; 修回日期: 2020-11-24; 录用日期: 2020-12-23

基金项目: 装备预研教育部联合基金(6141A02033103)、江苏省“六大人才高峰”高层次人才项目(2016GHKHTG001)、军委科技委前沿科技创新项目(1716313ZT01001801)

*E-mail: gfsun@seu.edu.cn; **E-mail: nzh12003@seu.edu.cn

修复组织特征与力学性能,结果表明 30CrMnSiA 基体缺口熔覆修复试样的抗拉强度为 30CrMnSiA 钢的 90% 以上,且冲击韧性、拉伸延伸率均优于 30CrMnSiA 钢,即 30CrMnSiA 粉末适用于 30CrMnSiA 钢的激光熔覆修复。因此利用激光熔覆技术对试验后的燃烧室进行损伤裂纹修复,能够有效降低燃烧室试验的成本。燃烧室主要由扩压器、喷油嘴、火焰筒、旋流器、点火器、联焰管构成,其中待修复区域形貌大多以曲面或斜面为主,且燃烧室内空间受限,常规垂直于修复面的修复方式工作空间受限,研究激光熔覆技术在一定角度倾斜基体的修复工艺及规律有益于在燃烧室有限空间范围内更好地进行修复工作。判断单道沉积层质量的方法是观察其表面质量和沉积层形貌,其中沉积层形貌是质量评价的重要参考^[7]。根据课题组前期研究发现,当工作面倾角过大时(45°以上),熔覆层会出现轨迹不连续甚至出现驼峰的情况,若以此种工艺对目标缺陷进行修复,势必会对最终的修复质量造成影响。

国内外学者围绕倾斜基体激光熔覆的能量分布^[8]、形貌^[9-10]、残余应力^[11]、力学性能^[12]等已经展开了研究。李海波等^[8]认为:激光竖直向下时,随着基体倾斜角度的增加,激光功率密度会逐渐减小,并且减小幅度逐渐增大;激光功率密度峰值会发生偏移,偏移量也随着倾斜角度的增加而增加且增加幅度逐渐增大。Gu 等^[13]通过计算流体力学方法研究了激光金属沉积过程中重力及压力的作用,并通过水平及竖直方向的增材实验进行验证。结果表明,降低重力时表面张力将主导熔池流动,进而导致不规则的沉积轨迹。于天彪等^[14]通过数值模拟技术分析了倾斜基体熔覆时的温度及残余应力场,认为倾斜基体上,沿倾斜方向熔覆相比沿水平方向熔覆更易产生裂纹,且两种扫描方式下基体的倾斜均会影响应力场的对称性及大小。

然而在探究倾斜面熔覆机理过程中,已发表的文章大多是通过理论及实验结合的方法来进行分析,并未通过数值模拟方式结合熔池内的温度场及流场,对倾斜基体下作用机理进行更加深入详尽的研究。本文为探究倾斜基体上 GH3536 激光熔覆的机理,分别在平面及不同倾斜角度的基体上进行相应的熔覆试验,并结合计算流体力学模型分析其熔覆过程中倾角、重力等因素对于熔池温度场、流场及最终轮廓的影响。通过仿真与实验对比发现,熔池内部的前流场分别主导了熔池前沿坡角和熔高,且基体倾斜时重力会对熔池内部流场产生显著作

用,从而最终影响熔覆轮廓。本文探究倾角、重力等因素对激光熔覆的影响,为激光熔覆技术修复倾斜部件提供了合适的理论指导,从而为激光熔覆修复燃烧室等倾斜基体的应用提供了参考依据。

2 数学模型

2.1 简化条件

为研究倾斜基体激光熔覆过程,对激光熔覆过程进行了一定程度的简化,在保证计算效率的前提下确保获得的结果与实验结果较为贴合。主要的简化和假设有以下几点:1)熔池内液态金属为不可压缩的牛顿流体,流动方式为层流;2)模型为两相模型,熔覆粉末与基板为相同的 GH3536 材质;3)熔覆平面处的激光能量与粉末浓度分布均为高斯分布;4)激光经粉末流遮蔽及散射的作用,以统一的能量利用率系数体现,基体倾斜导致激光与粉末间作用距离的改变暂忽略不计。

2.2 控制方程

三维质量守恒方程为^[14]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} + S_m, \quad (1)$$

式中: ρ 为材料密度; t 为时间; \mathbf{v} 为速度; u 、 v 、 w 分别为 x 、 y 、 z 方向上的速度分量; S_m 为体积质量源项。

该模型中的流体被假定为具有层流的牛顿流体,动量守恒方程式为^[15]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} + \mathbf{S}_{\text{mom}}, \quad (2)$$

式中: p 为静态压力; $\boldsymbol{\tau}$ 为由于表面上的黏性应力导致的应力张量; \mathbf{S}_{mom} 为动量源项; $\rho \mathbf{g}$ 和 \mathbf{F} 分别为重力体积力及外部体积力。

热能守恒方程为^[15]

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_h, \quad (3)$$

式中: H 为焓值; k 为导热系数; T 为材料温度; S_h 为体积热量源项。

2.3 边界条件

模型中气体与基体材料的边界如图 1 所示,边界条件主要分为两类:外部边界与内部边界,其中外部边界指计算域的边界,而内部边界主要指熔池与空气间的自由界面。

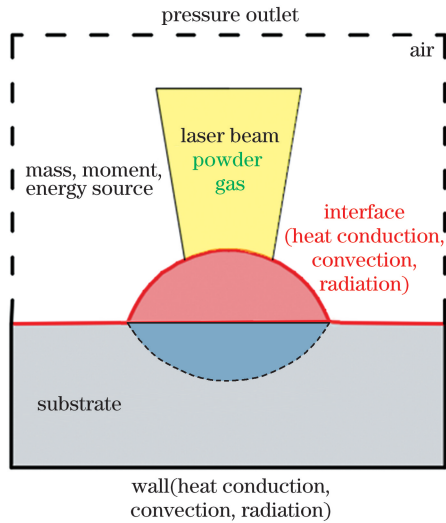


图 1 模型边界条件

Fig. 1 Boundary conditions of the model

2.3.1 外部边界

对于计算域的外部边界,气相区域的顶部与侧面,如图 1 虚线边界部分所示,在计算中被定义为压力出口,将热传导、对流及辐射应用于基体的侧面与底面,可得能量平衡方程为

$$k\mathbf{A} \cdot \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = -h_c(T - T_{env}) - \sigma\epsilon(T^4 - T_{env}^4), \quad (4)$$

式中: \mathbf{A} 为边界法线方向; \mathbf{n} 为等温线法线方向; h_c 为热对流系数; σ 为玻尔兹曼常数; ϵ 为辐射发射率; T_{env} 为环境温度。

2.3.2 内部边界

模型中考虑了气体与金属两相,因此采用有限体积法可追踪因熔池内粉末熔化及流体流动而不断变化的气体与金属材料的两相交界面。

当基体处于平面状态时,目标单元格与行进中的激光光斑中心间距离 r 的表达式为

$$r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}, S_{cell} = A_{cell}, \quad (5)$$

式中: x_0, y_0 为激光光斑中心的位置坐标; x, y 为单元格中心位置坐标; A_{cell} 为单元格的上表面面积。

当基体处于倾斜状态,与水平面的倾角为 θ 时,如图 2 所示,忽略因倾角 θ 、离焦距离 z 变化所导致的浓度场变化,同时忽略因基体倾斜,粉末碰撞基体后反弹的影响,粉末浓度场的变化可表示为

$$r = \sqrt{(x - x_0)^2 \cos^2 \theta + (y - y_0)^2}, \quad S_{cell} = A_{cell} \times \cos \theta. \quad (6)$$

熔池自由界面上的能量边界条件包括激光热源输入,同时包含热传导、辐射、对流在内的热输出,自由边界热平衡方程的表达式为

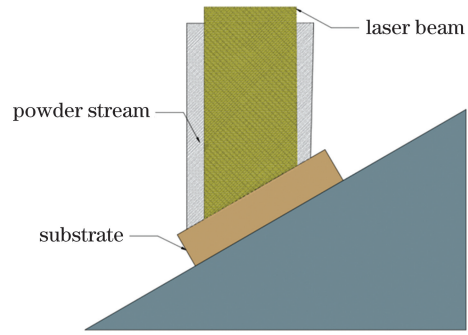


图 2 激光束及粉末作用于倾斜基体表面

Fig. 2 Laser beam and powder work on the surface of the inclined substrate

$$k\mathbf{A} \cdot \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = S_h - h_c(T - T_{env}) - \sigma\epsilon(T^4 - T_{env}^4). \quad (7)$$

基于对应模型,在气体和金属材料间的界面施加高斯分布的激光束。由于在每个时间步计算后,熔池的自由界面都会随着熔池形状的变化而发生相应的波动,因此根据所包括的面积对热源进行分配,则有

$$S'_h = \frac{c\eta_{la-pa}\eta_{la}P}{\pi r_{la}^2} \exp\left(-\frac{cr^2}{r_{la}^2}\right) \cdot S_{cell} \quad (8)$$

式中: c 为激光于熔覆面处高斯分布的集中系数; η_{la-pa} 为考虑粉末对激光的遮蔽、散射作用后激光到达熔覆面处的有效率; η_{la} 为基体及粉末对激光能量的吸收率; P 为激光功率; r_{la} 为激光高斯分布区域的半径。与基体相关的 S_{cell} 计算式参见(5)式和(6)式。

但与粉末分布不同的是,激光高斯面热源为表面热源模型,其作用大小与网格处自由界面的表面积呈正相关,激光热源的能量需要根据网格内自由界面的情况进行进一步的分配。由 Brackbill^[16] 的研究可知,连续表面力(CSF)模型可以将表面力如压力、剪切力有效地转化为体积力,由此将 CSF 模型应用于激光面热源的转化,则有

$$S_h = \frac{c\eta_{la-pa}\eta_{la}P}{\pi r_{la}^2} \exp\left(-\frac{cr^2}{r_{la}^2}\right) \cdot \frac{S_{cell}}{V_{cell}} \cdot V_{metal} = S'_h \cdot \varphi_{metal}, \quad (9)$$

式中: V_{cell} 为单元格的体积; V_{metal} 为单元格中金属材料的体积; φ_{metal} 为单元格中金属材料的体积分数。

在自由界面处的动量边界包括表面张力 f_s 和由气体及粉末带入熔池中的动量 f_{par} ,即

$$\mathbf{S}_{mom} = \mathbf{f}_s + \mathbf{f}_{par}. \quad (10)$$

除了在自由界面处添加上述源项外,还以

Boussinesq 近似的方式将流体区域中包括重力及浮力在内的体积力加入方程。浮力的 Boussinesq 近似^[17]方程表达式为

$$S_{\text{buoyancy}} = (\rho - \rho_m) g \approx -\rho_m \beta (T - T_m) g, \quad (11)$$

式中： ρ_m 为材料的液相线处密度； β 为材料的热膨胀系数。通过 $\rho = \rho_m (1 - \beta \Delta T)$ 的近似可以消除材料密度对于温度的依赖性。

3 实验设计

激光熔覆实验所用粉末及基板均为 GH3536，

主要的实验装置包括：Trudiode 3006 激光器、SINUMERIK 828D 数控机床、Precitec YC52 熔覆头、AFS-PF-D 双筒载气式送粉器。实验中使用的 GH3536 粉末化学成分如表 1 所示。

本实验主要包括两部分：1) 平面单道熔覆三因素三水平正交实验，实验序号记为 1~9；2) 沿 20°、40° 倾斜基板上坡及下坡方向进行单道熔覆实验，实验序号记为 10~25。将熔覆出的单道轮廓进行取点切割后磨样，用 ZEISS 显微镜拍摄测量取均值，得出相应的熔高及熔宽。实验参数及测量出的熔高、熔高及宽高比如表 2 所示。

表 1 GH3536 的化学成分

Table 1 Chemical composition of GH3536

unit: %

Element	C	Mn	Ni	Cr	Si	Mo	Cu	Nb	P	S
Mass fraction	0.02	0.08	46.77	21.8	0.08	8.20	—	—	0.005	0.007

表 2 单道熔覆实验数据

Table 2 Single-track cladding experiment data

Experiment number	Laser power /W	Powder mass flow /($g \cdot \text{min}^{-1}$)	Scanning speed / ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	Substrate inclination angle /($^{\circ}$)	Melting width /mm	Melting height /mm	Aspect ratio
1	1500	18	600	0	3.645	1.104	3.595
2	1500	15	1000	0	3.107	0.591	5.260
3	1500	12	800	0	3.670	0.567	6.471
4	1350	18	1000	0	2.645	0.795	3.325
5	1350	15	800	0	3.260	0.705	4.621
6	1350	12	600	0	3.685	0.726	5.079
7	1200	18	800	0	2.382	1.012	2.354
8	1200	15	600	0	2.924	1.130	2.587
9	1200	12	1000	0	2.831	0.784	3.611
10	1500	18	600	20	3.498	1.009	3.467
11	1700	18	600	20	4.116	0.991	4.154
12	1500	21	600	20	3.245	1.235	2.628
13	1700	21	600	20	3.988	1.339	2.978
14	1500	18	600	-20	3.492	0.790	4.417
15	1700	18	600	-20	3.907	0.874	4.470
16	1500	21	600	-20	3.265	1.111	2.938
17	1700	21	600	-20	4.047	0.973	4.161
18	1500	18	600	40	3.376	0.663	5.089
19	1700	18	600	40	3.776	0.750	5.036
20	1500	21	600	40	3.081	1.021	3.019
21	1700	21	600	40	3.615	1.020	3.546
22	1500	18	600	-40	3.394	0.586	5.790
23	1700	18	600	-40	4.024	0.684	5.886
24	1500	21	600	-40	3.195	0.794	4.024
25	1700	21	600	-40	3.702	0.814	4.551

4 结果与分析

4.1 平面正交实验分析

图 3 和图 4 分别为激光功率、粉末质流量、加工速率与熔高及宽高比的主效应图。在激光功率为 1200~1500 W、送粉质流量为 12~18 g·min⁻¹ 及加工速率为 600~1000 mm·min⁻¹ 的范围内,由图 3 中各因素的主效应曲线可知,激光功率取最小值 1200 W,粉末质流量取最大值 18 g·min⁻¹,加工速率取 600 mm·min⁻¹ 时熔覆层的熔高相对更高,其中随着激光功率增大,熔高变小,其原因可能是激光功率本身已能确保一定的粉末利用率。随着

激光能量的增大,熔覆区温度变高,熔池内流动加剧,促使熔池中心处的熔化粉末运送到熔池边缘,进而导致熔高下降;随着送粉质流量增大,熔高变高的原因可能是随粉末质流量增大,进入熔池且被熔池捕获的粉末变多,进而导致熔高上升。同样,在相应参数范围内,由图 4 中各因素的主效应曲线可知,激光功率取最大值 1500 W,粉末质流量取最小值 12 g·min⁻¹ 时,熔覆层的宽高比相对更大,这可能是激光功率取范围内最大及粉末质流量取范围内最小时,熔池内部温度相对更高,内部流动加剧,进而将熔池中心处的熔化粉末运送到熔池边缘,从而导致宽高比变大。

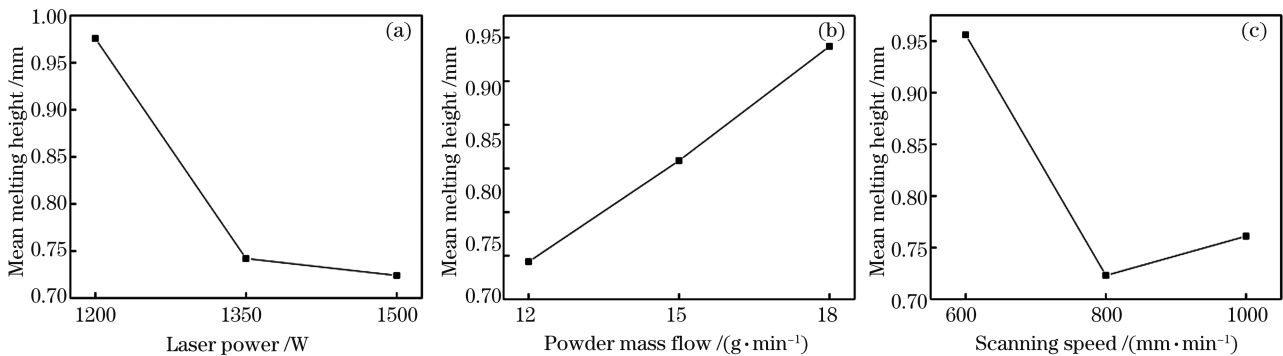


图 3 激光功率、粉末质流量、加工速率与熔高的主效应图。(a)激光功率;(b)送粉质流量;(c)加工速率

Fig. 3 Main effect diagrams of laser power, powder mass flow and scanning rate varying with melting height. (a) Laser power; (b) powder mass flow; (c) scanning speed

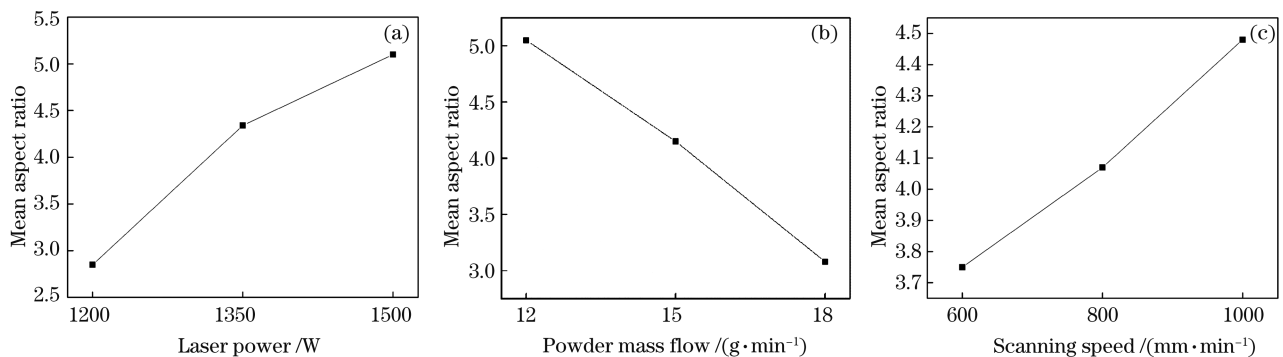


图 4 激光功率、粉末质流量、加工速率与宽高比的主效应图。(a)激光功率;(b)粉末质流量;(c)加工速率

Fig. 4 Main effect graphs of laser power, powder mass flow and scanning speed varying with aspect ratio. (a) Laser power; (b) powder mass flow; (c) scanning speed

4.2 仿真与实验对比

以实验 1 的工艺参数进行流体分析,以质量源的形式将高斯分布的激光能量、粉末加入至熔覆模型中,熔覆 0.8 s 后,熔覆轮廓如图 5 所示。由图 5 可知,此时熔池中心温度最高达 2470 K 且熔覆过程已进入准稳态。本文的仿真以质量源法添加粉末,相比传统的生死单元法,存在明显较长的熔池前沿,与实际吻合度较高。单道熔覆试样形貌有两个明显

特征:特征一为熔覆层轮廓,其可以与仿真中轮廓稳定段的轮廓进行对比;特征二为熔覆层的熔深(热影响区轮廓),试样中熔覆层因经过熔化凝固,枝晶与基体出现差异,其在显微镜下清晰可见,而在仿真结果中则表现为轮廓稳定段处金属已经冷却凝固,无法对比熔深,但可以对比温度云图液相线最下沿处的横截面轮廓,具体来说为仿真获得的激光中心实时位置(熔池前沿)处液态熔池下沿的轮廓。由此对

比仿真与实验中的熔高及熔深时,需分别截取仿真中稳定段的熔池轮廓及激光实时位置处的熔池轮廓与实验后的腐蚀金相图进行对比。为验证模拟有效性,需分别截取准稳态段(0.4 s 时激光位置)和此时激光中心位置(0.8 s 时熔深已稳定)处的熔池轮廓,

并与实验 1 中截取的横截面试样作对比,如图 6 所示。图 6(a)给出仿真结果轮廓与实验样品轮廓的对比图,图 6(b)给出仿真结果液相金属区轮廓与实验样品轮廓的热影响区对比图,结果表明熔覆层轮廓及熔深均具有较好的吻合性。

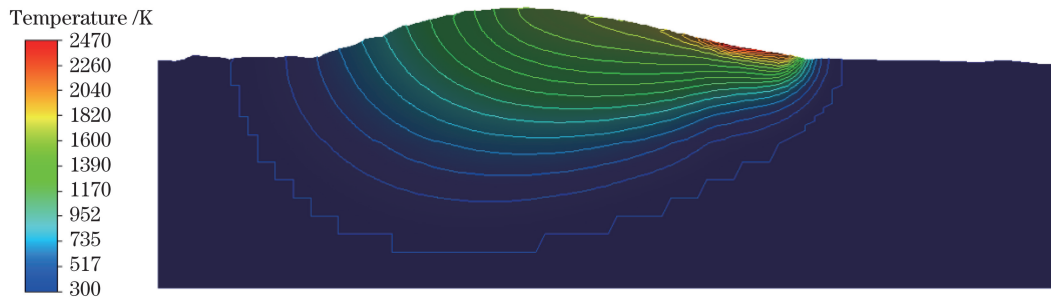


图 5 熔覆 0.8 s 后的熔覆轮廓及温度云图

Fig. 5 Simulated cladding profile and temperature cloud after 0.8 s cladding

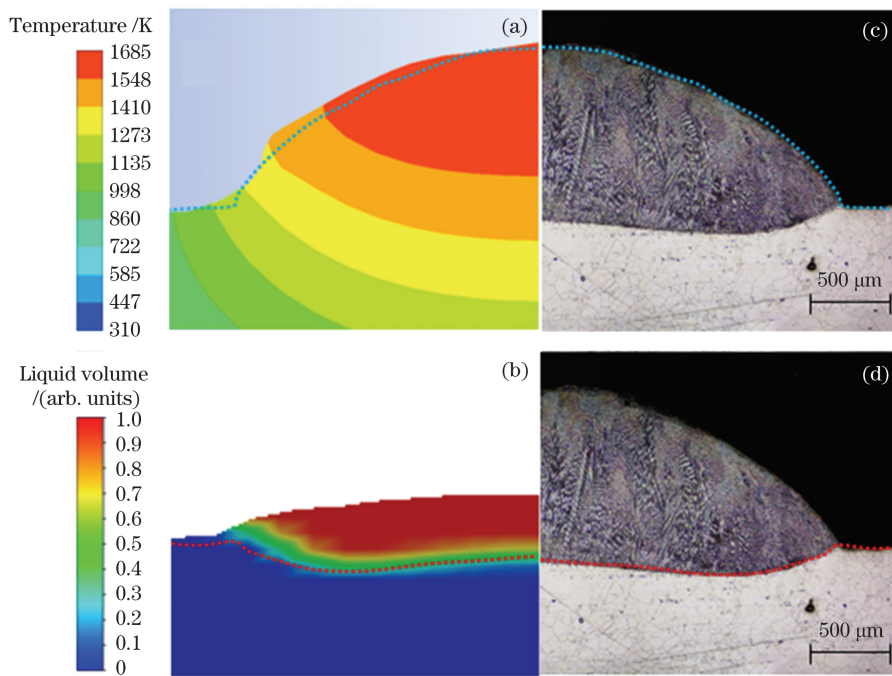


图 6 仿真与实验熔覆轮廓及熔深对比。(a)(c)仿真 0.4 s 时温度云图及其实验腐蚀金相图;(b)(d)仿真 0.8 s 时金属液态体积图及其实验腐蚀金相图

Fig. 6 Comparison of simulation and experimental cladding profile and penetration. (a)(c) Simulated temperature cloud picture at 0.4 s and its experimental corrosion metallographic diagram; (b)(d) simulated metal liquid volume picture at 0.8 s and its experimental corrosion metallographic diagram

将模型进行扩展,考虑基体倾斜角度对激光能量及粉末分布的影响,修改两者的模型输入,重新定义单元格作用面积,如(7)式,同时将重力的影响考虑在内,修改模型中重力的作用方向,以模拟倾斜基体上激光熔覆的过程,实验 10、14、18、22 采用与实验 1 相同的工艺参数,分别在 20° 、 -20° 、 40° 、 -40° 倾斜基体上进行熔覆仿真。

4.3 熔高分析

将实验 10~25 的熔覆实验进行分组:1)标准工艺组(A组,standard),激光功率取 1500 W,送粉速率取 $18 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$;2)B组(laser+),将激光功率增大为 1700 W,送粉速率保持 $18 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ 不变;3)C组(powder+),激光功率保持 1500 W 不变,送粉速率增大为 $21 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$;4)D组(laser,

powder+), 激光功率增大为 1700 W, 送粉速率增大为 $21 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ 。A~D 组实验的熔高随基体倾角的变化如图 7 所示, 在基体倾角为 20° , -20° , 40° , -40° 时熔高依次降低。在 20° 倾角时, A 组与 B 组相比, 激光功率从 1500 W 增加至 1700 W, 熔高下降, 其原因是与上述正交实验分析宽高比时的结果一致, 即激光能量的增加促进熔池内部流动, 进而导致熔宽增加、熔高下降。由表 2 可知实验 10~11, 熔宽从 3.498 mm 增加至 4.116 mm; 而在 -20° , 40° , -40° 倾角情况下, 增加功率导致熔高上升的原因是熔覆区域本身温度略低, 激光能量的加入加大了粉末的利用率, 从而使最终熔高有明显上升。在 4 种倾角下, 增加送粉均导致熔高明显上升, 这可能是熔池中粉末捕获量增加所致。在 4 种倾角下, 同时增大能量与送粉, 对比单纯增加送粉, 20° 倾角时熔高明显上升, 40° 与 -40° 无明显变化, -20° 熔高明显下降, 这可能是因为激光能量增加导致内部流动加剧(因素①), 导致熔池中心粉末流动至边缘, 高度降低, 也可能是因为激光能量增加导致熔池温度升高, 从而使得粉末利用率增加(因素②), 熔高上升。这两因素之间存在竞争关系, 对比表 2 中实验

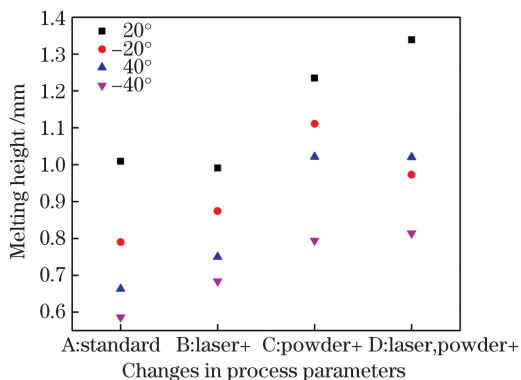


图 7 实验 10~25 中熔高变化图

Fig. 7 Melting height change graph in the experiment 10-25

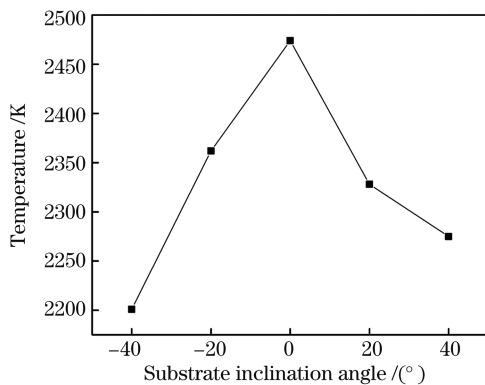


图 8 仿真熔池中心温度

Fig. 8 Temperature of the simulated molten pool center

12~13, 16~17, 20~21, 24~25 中的熔覆宽度即可发现熔覆宽度均有明显上升。与此同时, 5 组仿真 (0° , 20° , -20° , 40° , -40°) 中熔池的中心位置的温度统计如图 8 所示。随着基体倾角的增加, 激光能量受倾角的影响, 能量密度降低, 熔池中心温度明显降低, 这与分析中功率增加后因素②相比因素①逐渐占据主导地位相对应。

4.4 熔覆前沿倾角分析

将仿真结果中准稳态时刻(0.8 s)的熔池前沿坡角与实际试样打磨抛光腐蚀后的结果进行对比, 如图 9 所示, 对比结果如图 10 所示。

实际试样坡角普遍大于仿真坡角, 这是由多种因素所致。1) 模型搭建时的假设: 激光经粉末流遮蔽及散射的作用, 以统一的利用率系数体现。实际熔覆过程中, 熔池后沿相对于前沿, 热量累积得更多, 熔池更深, 对于粉末有更好的捕获率。故模型中熔池前沿对于输入的粉末捕获量偏多, 造成熔池前沿偏长, 坡角偏小。2) 仿真轮廓为准稳态熔池轮廓, 而试样轮廓为凝固轮廓, 即准稳态熔池在关闭激光后会经历冷却过程, 冷却过程中内部的流动导致的物质输运作用及凝固收缩过程促进了前沿轮廓的变化。2019 年 Lu 等^[18] 通过实时测量熔池状态和凝固层高度, 使用两种状态之间的表面位移来计算凝固过程中的应力发展, 并在过程中发现固化层高度略低于熔池高度, 且凝固层与熔池间的高度差, 在熔覆开始时, 相比其他时间更明显, 其原因是当材料首先沉积在冷基板上时, 熔池很快冷却, 收缩强度比之后更高。由这一结论可推知, 当熔覆结束时, 熔池前沿的凝固过程, 相比熔覆过程中熔池的凝固过程, 由于没有了激光能量的热影响, 熔池的收缩效应较为明显, 从而造成了轮廓的变化。

分析仿真熔池前沿轮廓与试样前沿轮廓的不同, 不能排除其他因素的影响, 虽然在结果上有一定的差距, 但在基体倾角变化时呈现出的趋势相同: 熔池前沿坡角在平面时较大, 随着基体倾斜角度的增加, 前沿坡角逐渐减小, 且相同倾斜角下, 上坡熔覆的前沿坡角略小于下坡熔覆的前沿坡角。由此可看出基体的倾斜会对熔池前沿轮廓产生显著的影响, 且上坡及下坡角度相同时前沿坡角不同, 由此排除了(6)式和(7)式中基体倾斜导致的激光能量及粉末浓度降低的影响, 其原因可能是重力作用的不同导致了熔池内部流场的变化, 进而产生了不同的前沿轮廓。

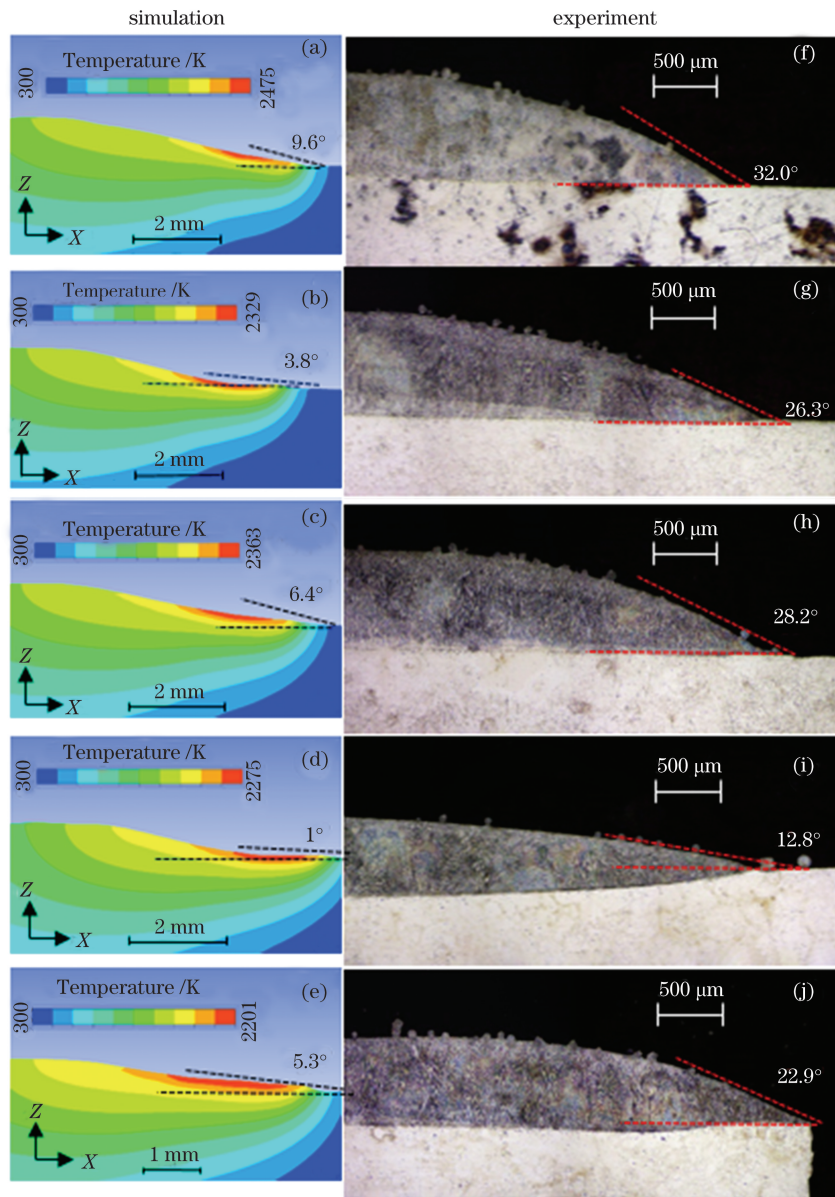


图 9 各倾角下仿真与实验熔覆层前沿倾角对比。(a)(f) 0°; (b)(g) 20°; (c)(h) -20°; (d)(i) 40°; (e)(j) -40°
 Fig. 9 Comparison of the inclination angle of the cladding layer between the simulation and the experiment at various inclination angles. (a)(f) 0°; (b)(g) 20°; (c)(h) -20°; (d)(i) 40°; (e)(j) -40°

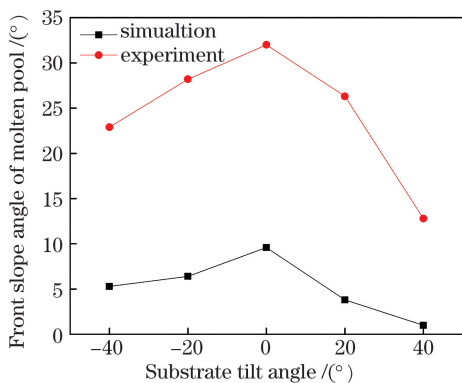


图 10 熔覆层前沿坡角随基体倾斜角度变化
 Fig. 10 Front slope angle of the cladding layer changes with the inclination angle of the substrate

4.5 熔池流场分析

5 组仿真案例中的内部流场对比如图 11 所示, 由图 11(a)可知, 基体平面熔覆时熔池横截面处的内部马兰戈尼对流主要分为前后部分, 前后部分以熔池高温区为界限分开, 同时熔池前流动与后流动在熔池表面速度相对于内部流动更大, 这表明因温度梯度引起的表面张力为熔池内部马兰戈尼对流的主驱动力。

观察图 11(b)与图 11(d)可以发现, 熔池前沿前后段倾角出现明显变化, 同时熔池内部的前后流场出现明显分化, 且轮廓变化段与前后流场的分化位置吻合得很好, 故可推测熔池内部流场对熔池轮

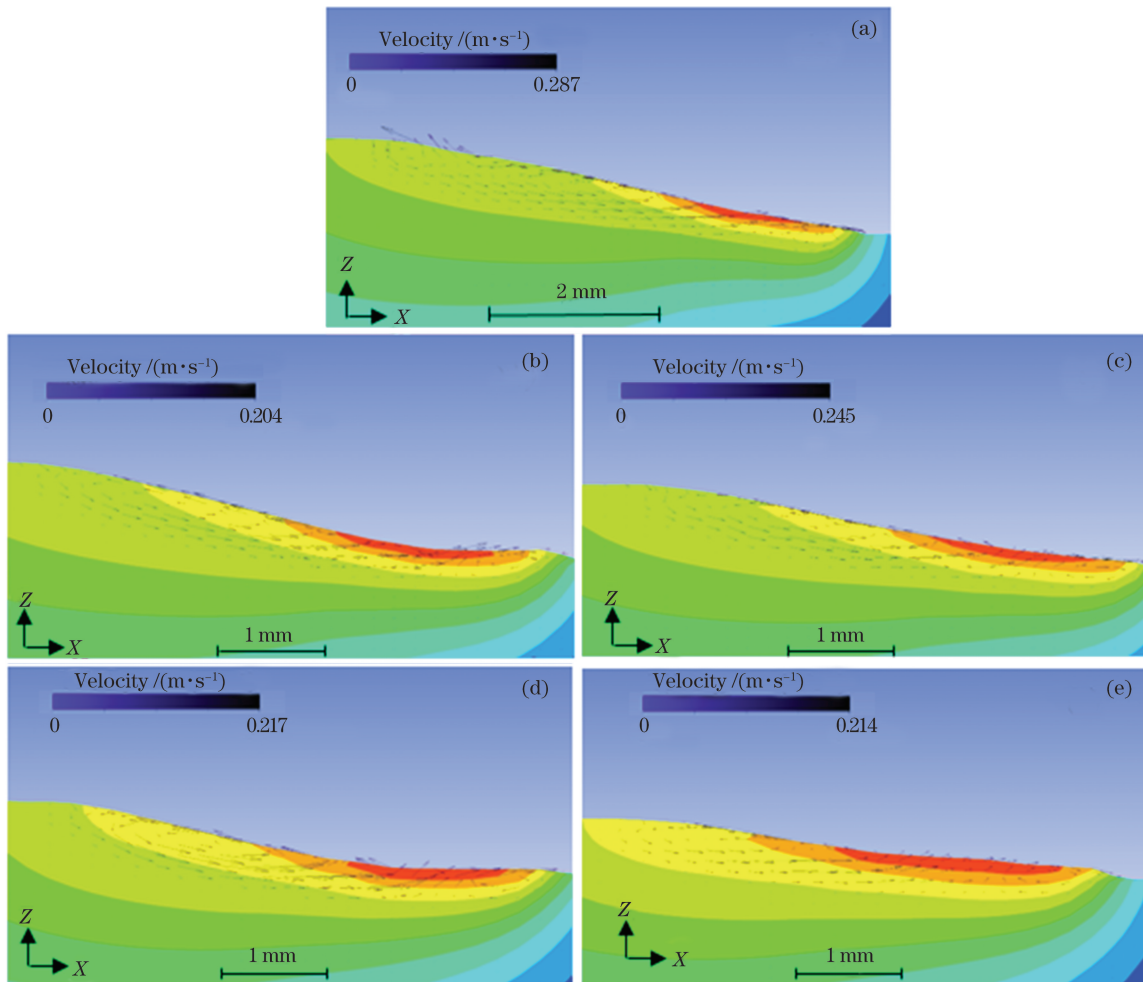


图 11 倾斜基体下熔覆层内部流场。(a) 0° ; (b) 20° ; (c) -20° ; (d) 40° ; (e) -40°

Fig. 11 Internal flow field of the cladding layer under the inclined substrate. (a) 0° ; (b) 20° ; (c) -20° ; (d) 40° ; (e) -40°

廓的影响显著。

观察图 11(c)与图 11(e) 可以发现,相比平面熔覆时的图 11(a),熔池前后流场对应的整体熔池轮廓更加平缓。结合图 11(b)与图 11(d)可进一步推测出基体倾斜时重力明显影响了熔池内部的流场:上坡熔覆即重力作用于后流场时,平面熔覆时较小的前流场进一步削弱,进一步加剧了前后流场的强弱对比,表现在熔池轮廓上即出现明显的下凹现象;下坡熔覆即重力作用于前流场时,平面熔覆时较小的前流场得到一定的加强,减弱了前后流场的强弱对比,表现在熔池轮廓上即为整体的熔池轮廓更加平缓。

此外,2015 年钱远宏等^[19]采用停光方式,用超景深三维显微镜实时拍摄倾斜熔覆形貌,可以看出,当沿着倾斜基体上坡扫描时,熔池气液界面向下凹陷,此时拍摄的熔池形貌与本文仿真结果中上坡熔池轮廓出现下凹相一致。

对比同等基体倾角的上下坡,即图 11(b)与

图 11(c)作对比,图 11(d)与图 11(e)作对比。结合图 7 中同等基体倾角时上坡熔高高于下坡熔高的结论,可推测出重力作用于后流场时,熔高更高,即熔池内部后流场对熔高占据主导作用;当结合图 9 中同等基体倾角时上坡前沿倾角小于下坡前沿倾角的结论,可推测出重力作用于前流场时,前沿倾角更大,即熔池内部前流场对熔覆前沿倾角占据主导作用。

Gu 等^[13]通过实验结合数值模型仿真,发现在竖直平面进行送丝增材熔覆时,熔覆层出现明显起伏,重力对熔覆层前沿轮廓产生明显影响,且光斑越小,影响越明显,前沿坡角越大。该研究中对比了竖直平面与水平面熔覆实验,得出重力对熔覆的影响。但在竖直平面进行熔覆时熔覆轮廓已出现明显起伏,并未考虑一定倾斜角度下重力的影响,且实验时激光始终垂直于熔覆基体,需要较大的工作空间,不适用于空间受限的沉积;Song 等^[20]对不考虑保护气体冲击力、不考虑马兰戈尼对流运动、不考虑重力、高重力作用这 4 种情况进行对比内部流场仿真,

得出以下结论:保护气体对熔池表面的影响会影响到熔池内部的马兰戈尼对流,而重力对熔池的对流影响有限,仅在超重力的情况下,熔池的对流才会产生明显改变,在现实条件下,重力对熔池内部对流的影响可以忽略。该研究中通过重力系数的改变探讨重力对于内部流场的影响,并未考虑到倾斜角度下重力作用方式的改变对于熔覆的影响。

而本文通过改变基体倾斜角度发现,随着熔覆方向与重力作用方向夹角的变化,重力会通过影响熔池内部前后流场,对熔池前沿轮廓产生显著变化,并随着基体倾角的增大,熔池轮廓发生明显变化,从而影响到凝固轮廓,且熔覆方向上下坡的不同决定了重力对于内部流场的作用趋势。削弱或增强前流场导致了截然不同的前沿轮廓及前沿坡角。

5 结 论

结合激光熔覆实验与计算流体力学方法研究了倾斜 GH3536 基体上激光熔覆行为,在实验中倾角、重力等因素对熔覆轮廓的影响与仿真中熔池的内部温度场及流场之间建立了关联,揭示了基体倾角对激光熔覆形貌的影响机理。得到以下结论:

1) 基板倾斜导致熔覆处激光能量密度及粉末浓度降低,进而显著降低熔高,适度地增大激光功率及送粉质流量能够对熔高的降低起到一定的弥补作用,然而激光功率过大会导致熔池中间向两侧的输送作用加强,反而导致熔高的降低。

2) 熔池内部存在的马兰戈尼对流分为前后流场,其中后流场主导熔高,前流场主导熔覆层前沿坡角。因基体倾斜导致的重力作用方式不同,会对熔池轮廓尤其前沿轮廓产生明显影响,而熔覆方向上下坡的不同,会显著改变重力对于内部流场的作用,进而导致截然不同的前沿轮廓及前沿坡角。当倾角为正时,重力作用分量促进后流场,前后流场的分歧加剧,熔池准稳态轮廓出现明显下凹现象,熔覆层前沿坡角明显变小,且相对于倾角为负时,由后流场主导的熔高有明显升高。

参 考 文 献

- [1] China Aviation Material Manual Editorial Committee. China aviation material manual [M]. Beijing: Standards Press of China, 2002: 224-225
《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002: 224-225.
- [2] Zhang H, Sun Y F, Xiong J X. Design and application of aeroengine combustion chamber test general measurement system[J]. Aeroengine, 2019, 45(4): 67-70.
张毫, 孙永飞, 熊进星. 航空发动机燃烧室试验通用测试系统设计与应用[J]. 航空发动机, 2019, 45(4): 67-70.
- [3] Cikanek H A, Zhang J. Analysis of the causes of the main engine failure of the space shuttle[J]. Missiles and Space Vehicles, 1989(9): 14-17.
Cikanek H A, 张静. 航天飞机主发动机故障原因分析[J]. 国外导弹与航天运载器, 1989(9): 14-17.
- [4] Zhang J, Zhang Q L, Li D, et al. Effect of δ aging treatment on microstructure and tensile properties of repaired Inconel 718 alloy using laser additive manufacturing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0102001.
张杰, 张群莉, 李栋, 等. δ 时效处理对激光增材修复 Inconel 718 合金组织与性能的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0102001.
- [5] Pan B, Huang Y C, Li L Q, et al. Effects of multiple laser repairs on microstructure and hardness of ZTC4 titanium alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 1002011.
潘博, 黄怡晨, 李俐群, 等. 多次激光修复对 ZTC4 钛合金组织与硬度的影响[J]. 中国激光, 2019, 46(10): 1002011.
- [6] Pang X T, Gong Q F, Wang Z J, et al. Microstructures and mechanical properties of 30CrMnSiA and 30CrMnSiNi2A high-strength steels after laser-cladding repair [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(11): 1102002.
庞小通, 龚群甫, 王志杰, 等. 30CrMnSiA 和 30CrMnSiNi2A 高强钢激光熔覆修复后的组织特征与力学性能[J]. 中国激光, 2020, 47(11): 1102002.
- [7] Li J B, Shang S, Sun Y Z, et al. Parameter nondimensionalization in laser direct metal deposition formation of Inconel 625 and its influence on single track geometric morphology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0302010.
李进宝, 商硕, 孙有政, 等. Inconel 625 激光直接金属沉积成形参数无量纲化及其对单道几何形貌的影响[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0302010.
- [8] Li H B, Li T, Wang X L, et al. Study on the influence of the inclined substrate to the energy distribution of laser cladding [J]. Applied Laser, 2017, 37(3): 333-339.
李海波, 李涛, 王鑫林, 等. 倾斜基体对激光熔覆能量分布的影响研究[J]. 应用激光, 2017, 37(3): 333-339.
- [9] Li H B. Study on the morphology of laser cladding layer on inclined substrate [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.

- 李海波. 倾斜基体上的激光熔覆层形貌研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [10] He Y, Wei J C, Liu J Y, et al. Experimental study on the fabrication profile and mechanical properties by substrate-inclined angle using laser melting deposition (LMD) integrating with the substrate of stainless steel[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 125: 106038.
- [11] Yu T B, Qiao R Z, Han J B, et al. Residual stress numerical simulation of laser cladding on inclined substrate[J]. *Hot Working Technology*, 2020, 49 (2): 75-79.
于天彪, 乔若真, 韩继标, 等. 倾斜基体激光熔覆残余应力场的数值模拟[J]. *热加工工艺*, 2020, 49 (2): 75-79.
- [12] He Y. Research on process basis and mechanical properties of laser engineered net shaping basis on inclined substrate[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
何宇. 倾斜基面上激光熔覆成形工艺基础与力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [13] Gu H, Li L. Computational fluid dynamic simulation of gravity and pressure effects in laser metal deposition for potential additive manufacturing in space[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 140: 51-65.
- [14] Batchelor G K. An introduction to fluid dynamics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [15] Voller V R, Prakash C. A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1987, 30(8): 1709-1719.
- [16] Brackbill J U, Kothe D B, Zemach C. A continuum method for modeling surface tension[J]. *Journal of Computational Physics*, 1992, 100(2): 335-354.
- [17] Spiegel E A, Veronis G. On the Boussinesq approximation for a compressible fluid [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 1960, 131: 442.
- [18] Lu Y, Sun G F, Xiao X F, et al. Online stress measurement during laser-aided metallic additive manufacturing[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 1-11.
- [19] 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.
- [20] Song B X, Yu T B, Jiang X Y, et al. The relationship between convection mechanism and solidification structure of the iron-based molten pool in metal laser direct deposition [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 165: 105207.

Simulation and Experimental Research on the GH3536 Molten Pool Laser Cladding on Inclined Substrate

Wang Pengfei, Yang Kun, Chen Mingzhi, Wang Zhandong, Lu Yi, Sun Guifang**,
Ni Zhonghua*

*Jiangsu Key Laboratory for Design and Manufacture of Micro-Nano Biomedical Instruments,
Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China*

Abstract

Objective GH3536 is a typical nickel-based solid solution strengthened high-temperature alloy with good oxidation resistance, corrosion resistance, as well as cold and hot processing formability and weldability, which is suitable for manufacturing aero-engine combustion chambers and other high-temperature components. The failure mode of the combustion chamber is mainly mechanical damage and shell cracks. Laser-cladding technology can be used to repair the failures, which can effectively reduce the combustion chamber test's cost. However, the topography of the area to be repaired is mainly curved or inclined surface, and the operation space is limited. Therefore, it is necessary to study the repair process and role of laser-cladding technology on the inclined substrate. In this study, we analyzed the influence of factors such as inclination angle and gravity on the temperature field, flow field, and final contour of the molten pool during GH3536 cladding on the inclined surface with both experimental and simulation methods and laid a foundation for the application of laser-cladding technology to repair inclined substrates, such as combustion chambers.

Methods This study investigated the process and role of GH3536 laser cladding on inclined surfaces with both experimental and simulation methods. First, we used the orthogonal experiment to analyze the influence of factors such as laser power and powder-feeding flow rate on the melting height and profile during GH3536 laser cladding on a plane substrate. Then, we performed a controlled variable experiment of laser cladding on an inclined surface to analyze the influence of factors such as the inclination of the substrate, laser power, and powder-feeding flow rate on the melting height. Afterward, we established a computational-fluid-dynamics model to simulate GH3536 laser cladding on inclined surfaces and compared the cladding profile and penetration depth via simulation and experiment to verify the effectiveness of the model. Finally, we investigated the influence of the inclination angle of the inclined surface on the front contour, internal temperature field, and the flow field of the cladding layer.

Results and Discussions In the orthogonal experiment, within a set range of the experimental parameters, when the laser power is selected as the lowest value of 1000 W, and the powder mass flow rate is selected as the maximum value of 18 g/min, the melting height is the largest (Fig. 4). When the substrate starts to tilt, the melting height gradually decreases with the increase in the inclination angle. A moderate increase in the laser power and powder feed mass flow can compensate for the decrease in the melting height. Further, at the same inclination angle, the melting height increases during upward cladding (Fig. 8). In the simulation model, comparing the quasi-steady state molten pool contours under different substrate inclination angles, the slope angle of the molten pool front contour decreases with the increase in the inclination angle, and the front slope angle during upward cladding is slightly smaller than that of downward cladding (Fig. 10). In addition, comparing the internal flow field of the molten pool under different substrate inclination angles, the front and rear flow fields appeared in the quasi-steady molten pool, and the latter is stronger. They are separated by the high-temperature zone of the molten pool. The substrate inclination has a significant influence on the flow field in the molten pool. During upward cladding, gravity strengthens the rear flow field and weakens the front flow field, thereby accelerating their divergence. At their divergent positions, the contour of the molten pool also shows obvious slope angle changes (Fig. 12). The changes in both flow fields correspond to the changes in the front of the upper molten pool and the changes in the melt height. It can be inferred that the flow fields have a significant influence on the profile of the molten pool—the front flow field dominates the front slope angle of the molten pool, while the rear flow field dominates the molten pool height.

Conclusions The tilt of the substrate decreases the laser energy and powder concentration at the cladding area, thereby reducing the cladding height considerably. A moderate increase in the laser power and powder delivery mass flow rate can compensate for the decrease. The Marangoni convection in the molten pool is divided into two flow fields—the front and rear flow fields. The latter dominates the height of the cladding layer, while the former dominates the slope angle of the cladding layer. The difference in gravity influence due to the inclination of the substrate has a significant influence on the contour of the molten pool, especially the front contour. In addition, the difference in the cladding direction will significantly change the effect of gravity on the internal flow field, resulting in a completely different front contour and front slope angle: when the inclination angle is positive, the gravity component promotes the rear flow field, accelerates the divergence of both flow fields, leading to the concave phenomenon of the molten pool, and reduces the front slope angle and has higher melting height compared with a negative inclination angle.

Key words laser processing; laser cladding; inclined substrate; numerical simulation; cladding profile; gravity effect

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3390