

激光与光电子学进展

扫描速度对激光直接沉积机场供油管网材料组织及性能的影响

庞铭*, 浮艺旋

中国民航大学机场学院, 天津 300300

摘要 使用额定功率为 1 kW 的光纤激光器开展了激光直接沉积机场供油管网材料的实验研究,研究了激光扫描速度对沉积层显微组织、硬度、耐蚀性及耐磨性的影响。显微组织和硬度的实验结果表明:随着激光扫描速度的增加,沉积层厚度减小,基体发生的翘曲变形角度减小,沉积层在路径 2 上的峰值硬度逐渐升高。耐蚀性和耐磨性的实验结果表明,沉积层的耐磨性和耐蚀性对激光扫描速度具有非协同响应:当激光扫描速度为 10 mm/s 时,沉积层具有较好的耐蚀性,自腐蚀电流密度为基体的 27.76%;当激光扫描速度为 12 mm/s 时,沉积层具有较好的耐磨性,磨损率分别为 6 mm/s 和 10 mm/s 扫描速度下沉积层磨损率的 52% 和 42%。

关键词 激光技术; 激光直接沉积; 扫描速度; 硬度; 非协同响应

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0714001

Effects of Scanning Speed on Microstructure and Performances of Laser Direct Metal Deposition Airport Oil Pipeline Network Materials

Pang Ming*, Fu Yixuan

Civil Aviation University of China, College of Airport, Tianjin 300300, China

Abstract A fiber laser with a rated power of 1 kW is used to perform a laser direct metal deposition experiment on an airport oil pipeline network material to explore the effects of laser scanning speed on microstructures, hardness, corrosion resistance, and wear resistance of the deposition layers. The experimental results of microstructure and hardness show that as the laser scanning speed increased, the deposition layer thickness and the warpage deformation angle of the substrate decreased, and the peak hardness of path 2 gradually increased. The experimental results of corrosion resistance and wear resistance show that the above performance of the deposition layers had an asynchronous response with the scanning speed. At the laser scanning speed of 10 mm/s, the deposition layer showed very high corrosion resistance, and its self-corrosion current density was 27.76% of the substrate. At the laser scanning speed of 12 mm/s, the deposition layer displayed high wear resistance, and its wear rates were 52% and 42% of the deposition layer prepared at scanning speeds of 6 mm/s and 10 mm/s, respectively.

Key words laser technique; laser direct metal deposition; scanning speed; hardness; non-cooperative response

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 160.2120

收稿日期: 2020-07-12; 修回日期: 2020-08-17; 录用日期: 2020-08-27

基金项目: 国家自然科学基金(U1633111、51206179)、中央高校基本科研业务费项目中国民航大学专项项目(3122018D020)、中国民航大学蓝天青年科研资金资助项目、中央高校基本科研业务费资助项目(201909)

*E-mail: pangming1980@126.com

1 引言

为了满足机场在有限空间内的功能性需求及机场安全,机场供油管网埋设于机场道面以下。在服役工况下,航班的高输入量、高频率的飞机加油、机场道面的机械载荷等会诱发机场管网的失效。目前,提高机场供油管网可靠性和寿命的设计方法主要有:1)优化机场供油管网布局,降低加油过程对管网材料可靠性与寿命的不良响应;但由于机场空间的限制,该方法提高的裕度有限。2)选择高性能材料,但该方法的成本较高。3)基于现有的材料体系,采用新工艺提高零件的可靠性和耐久性;该方法具有经济性好、技术成熟度高等特点。激光直接沉积技术具有热输入可控、沉积层基体变形小、与基体结合良好、后处理工序少等特点^[1-3],已被广泛应用于修复及再制造中^[4-9]。

目前,已有大量研究激光扫描速度对激光直接沉积影响的公开报道。中南大学的张军涛等^[10]在不锈钢粉末激光直接沉积中发现,合适的扫描速度可以在获得一定沉积高度的同时使沉积层与基体保持适当的结合深度,但在最优参数下获得的沉积层性能还需进一步提高。南非约翰内斯大学的Mahamood与尼日利亚伊洛林大学的Akinlabi等^[11-12]进行了激光直接沉积Ti-6Al-4V/TiC钛合金的实验研究,结果发现:当激光扫描速度在5~50 mm/s范围内时,随着激光扫描速度的增加,沉积层的显微硬度、耐磨性升高,腐蚀速率降低;当激光扫描速度为20~120 mm/s时,熔池的凝固速度以及沉积层的显微硬度和表面粗糙度均会增加。

机场供油管网在服役工况下容易发生水击磨损、腐蚀等失效,鉴于此,本文提出将激光直接沉积工艺应用于机场供油管网材料的修复与再制造中,以提高供油管网的耐磨性和耐蚀性。所查资料显示,目前进行激光直接沉积的基体材料主要是钛合金、不锈钢、合金钢等,还没有针对机场供油管网材料进行激光直接沉积的相关报道,也没有全面针对沉积层控形和控性的系统研究。激光沉积的工艺选择、沉积层的质量控制与选用的材料密切相关,现有的激光直接沉积工艺不能直接应用到机场供油管网材料上。因此,本文探究了扫描速度对激光直接沉积工艺机场供油管网沉积层宏观形貌、显微组织、显微硬度、电化学腐蚀性能及摩擦磨损性能的影响规律,为激光直接沉积工艺应用于机场供油

管网的失效修复及再制造等应用提供工艺支撑。

2 实验材料和方法

在本文的激光直接沉积实验中,使用与机场供油管网材料成分、配比一致的金属粉末作为同轴送粉材料,粉末的粒度为75~150 μm ,粉末的化学成分如表1所示。

表1 同轴送粉粉末的主要化学成分

Table 1 Main chemical composition of powder for coaxial feeding

Element	Fe	C	Ca	Mn	Si	Al	Cr
Mass fraction /%	Bal.	0.19	0.37	1.84	0.23	0.14	0.04

采用L290M管线钢作为基体,基体尺寸为20 mm×50 mm×7 mm。实验前用50目砂纸去除基体表面的氧化层,然后用丙酮清洗基体表面,以去除其表面的油污。实验设备有额定功率为1 kW的光纤激光器(RFL-C1000,激光波长为1060 nm)和送粉器(RC-PGF-D2,同轴送粉头喷嘴与基材的距离为2.5 mm,送粉量为6.8 g/min)。实验过程中持续通入氩气,氩气作为送粉气及保护气。进行激光直接沉积的实验参数如下:激光功率为800 W,激光扫描速度分别为6,10,12 mm/s,激光光斑半径为1 mm,搭接率为50%,进气量为5 L/min。实验过程如图1所示,沉积层数为3层。

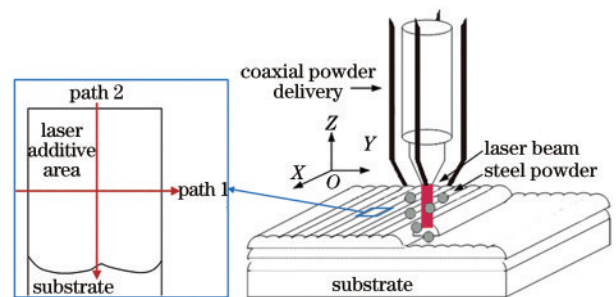


图1 同轴送粉激光直接沉积实验图及硬度测试路径

Fig. 1 Coaxial powder feeding laser direct metal deposition experiment and schematic of the hardness measurement paths

沉积实验结束后,采用线切割机切取不同参数下横截面和纵截面的金相试样,其中X-Z面为横截面,Y-Z面为纵截面;然后采用磨抛机(MP-2B)对金相试样进行打磨和抛光处理,然后采用体积分数为5%的硝酸酒精侵蚀金相试样10 s,之后立即使用无水乙醇清洗试样并用冷风吹干。

使用金相显微镜(TK-C1031EC)和扫描电镜表征试样的显微组织。采用维氏显微硬度仪(HVS-

1000 Z)在沉积层横截面、纵截面分别沿路径 1、路径 2 每隔 150 μm 进行一次硬度测试,加载载荷为 2.94 N,保荷时间为 10 s,测试路径如图 1 所示。采用线切割机切割尺寸为 10 mm \times 10 mm \times 8 mm 的试样,对其沉积面进行打磨抛光后,将其浸泡于 3.5%NaCl 水溶液(电解液)中,浸泡 60 min 后进行电化学腐蚀实验。采用线切割机切取尺寸为 12 mm \times 10 mm \times 8 mm 的试样,使用磨损试验机(M-2000 型)进行摩擦磨损实验,加载载荷为 150 N,实验时长为 45 min。

3 结果分析和讨论

3.1 激光扫描速度对沉积层宏观形貌的影响

图 2 为不同激光扫描速度下沉积层的宏观形貌,其中沉积面尺寸为 20 mm \times 40 mm,激光扫描速度分别为 6, 10, 12 mm/s。从图 2 可以观察到:沉积层起始与收尾处呈现弧形;随着激光沉积的进行,沿激光沉积方向(Y 方向)沉积层厚度逐渐增加;沉积层厚度随着扫描速度的增加而逐渐减小;基体出

现了不同程度的翘曲变形。基体最低点与桌面接触,将基体最低点与基体尾部连成直线,此直线与桌面所形成的夹角定义为变形角度,如图 2 所示,变形角度随着激光扫描速度的增加而减小。

沉积层起始与收尾处的弧形形貌是由液态熔池表面张力、重力及熔池凝固体积收缩等导致的。在激光直接沉积过程中,沉积层厚度与熔池吸收能量、送粉量等密切相关。在同轴送粉激光直接沉积过程中,送粉与激光辐照同步运动,随着激光扫描速度的提升,激光作用在材料表面的时间缩短,导致单位面积内的激光输入能量与粉末数量同时减少,同时,单位面积内激光输入能量的减少会导致单位长度的熔池熔化粉末的能力降低,从而使得沉积层厚度减小。前面的沉积实验对后续未开始的激光沉积实验有预热、热积累等影响,使得后续沉积时形成的熔池具有更高的温度,能够熔化的粉末增加,从而导致不同扫描速度下沉积层的起始与收尾处都存在一定的厚度差,如表 2 所示。

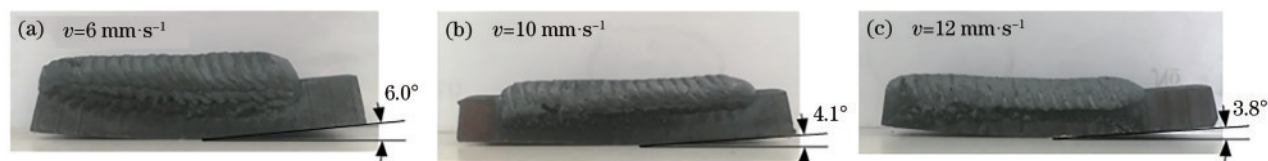


图 2 激光扫描速度对沉积层宏观形貌的影响

Fig. 2 Effect of laser scanning speed on macroscopic morphology of deposition layer

表 2 激光扫描速度对沉积层厚度的影响

Table 2 Effect of laser scanning speed on deposition layer thickness

Laser scanning speed / (mm \cdot s $^{-1}$)	Initial thickness / mm	Thickness of the tail / mm	Thickness difference / mm
6	4.57	5.90	1.33
10	2.15	3.07	0.92
12	0.47	1.08	0.61

预热效果与激光输入能量、外界换热、材料自身的热传导效果等相关。随着激光扫描速度的增加,单位面积内激光输入能量降低,前面沉积区域对后续沉积区域的预热作用和热积累效应降低,使得熔池温度的提升减小,熔化更多粉末的能力降低,从而导致沉积层厚度差随着激光扫描速度的增加而减小。由表 2 可知,扫描速度为 6, 10, 12 mm/s 时,沉积层的厚度差分别为 1.33, 0.92, 0.61 mm。激光直接沉积过程是局部的快速加热和冷却过程,导致沉积区域及基体的温度在空间上的分布具有非均匀性,这一因素以及温度变化导致材料膨胀或收缩等,共同导致基体的不同区域发生非协调变形,从而使

得基体出现翘曲变形。随着激光扫描速度增加,激光输入能量降低,预热及热积累产生的能量减少,因此基体的翘曲角度减小:扫描速度为 6 mm/s 时翘曲角度为 6.0°,扫描速度为 10 mm/s 时翘曲角度为 4.1°,扫描速度为 12 mm/s 时翘曲角度为 3.8°。

3.2 激光扫描速度对沉积层显微组织的影响

图 3 为不同激光扫描速度下沉积层底部、中部、顶部的显微组织,可见,它们的显微组织均主要为铁素体。由图 3 可以看出:随着沉积层与基体距离的增加,晶粒尺寸逐渐增大;随着激光扫描速度增加,同一位置的晶粒尺寸逐渐减小。

在激光直接沉积过程中,第一层沉积在冷态基

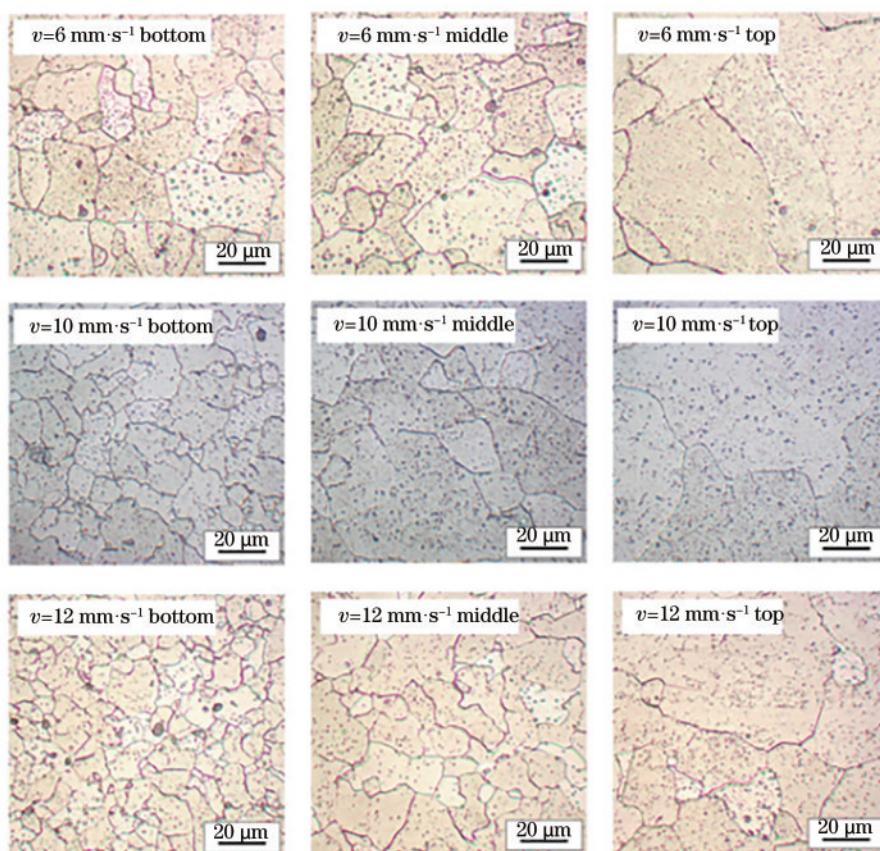


图 3 激光扫描速度对沉积层不同位置处显微组织的影响

Fig. 3 Effect of laser scanning speed on microstructures at the different positions of the deposition layer

体上,冷态基体起到了传热作用,而第二层和第三层直接沉积在未冷却至室温的前一层沉积层上,前一层沉积层对还未进行的下一层沉积具有预热效果,使得下一层沉积晶粒具有更长的生长时间;因此,随着沉积层与基体距离的增加,晶粒尺寸逐渐增大。随着激光扫描速度增加,激光作用时间减少,单位面积内的激光输入能量减少,熔池温度降低,导致相同位置的晶粒尺寸随着激光扫描速度的增加而减小。

3.3 激光扫描速度对缺陷的抑制

图 4(a)、(b)、(c)为不同激光扫描速度下沉积层横截面的宏观形貌,图 4(d)、(e)、(f)为不同激光扫描速度下纵截面的宏观形貌,图 4(a)、(d)对应的扫描速度为 6 mm/s,图 4(b)、(e)对应的扫描速度为 10 mm/s,图 4(c)、(f)对应的扫描速度为 12 mm/s。由图 4(a)、(b)、(c)可以看到:随着激光扫描速度增加,沉积层的孔隙率减少,沉积层与基体的熔合线由连续弧形演变为平滑的直线,沉积层与基体的熔合深度减小。由图 4(d)、(e)、(f)可以看到:沉积层与基体的熔合线呈连续弧形,且随着激光扫描速度

的增加,连续弧形逐渐趋于平稳。

将同一参数下横截面和纵截面孔隙率的平均值作为该参数下孔隙率的平均水平。实验测得激光扫描速度为 6, 10, 12 mm/s 时,沉积层的孔隙率分别为 9.30%、8.05%、6.69%。沉积层中出现气孔的主要原因是:1)粉末中携带的水分或粉末中的 H、O 和 N 元素在高温下形成气体,而形成的气体被包裹在熔池中;2)在实验过程中粉末会吸收保护气,或将保护气吸入熔池中。随着扫描速度增加,孔隙率减少,且气孔分布在沉积层底部。由于熔池内温度降低、激光沉积中热循环作用减少等,粉末中携带的水分以及 H、O、N 等元素在高温中形成的气体减少,同时,熔池凝固速度增加使得形成的气体更难以逸出,因此气孔分布在熔池底部。由于激光光斑能量呈高斯分布,光斑中心的能量密度最高,因此形成的熔池底部形貌为弧形形貌。随着激光扫描速度的提高,沉积层与基体的熔合形貌由连续弧形逐渐演变为平滑直线,熔合深度也减小,这是由激光能量密度的降低以及激光在基体上的预

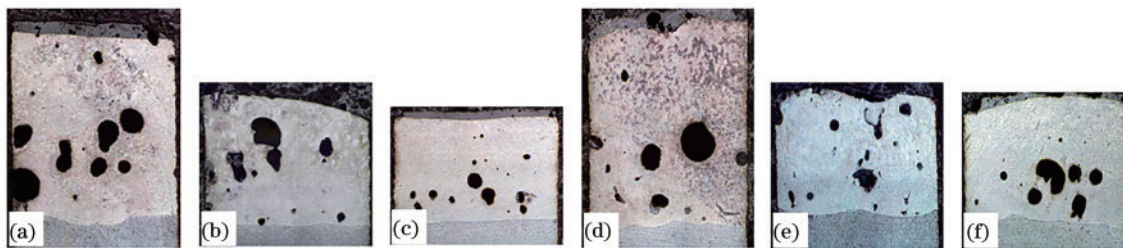


图 4 激光扫描速度对沉积层截面宏观形貌的影响。(a) $v=6$ mm/s, 横截面; (b) $v=10$ mm/s, 横截面; (c) $v=12$ mm/s, 横截面; (d) $v=6$ mm/s, 纵截面; (e) $v=10$ mm/s, 纵截面; (f) $v=12$ mm/s, 纵截面

Fig. 4 Effect of laser scanning speed on section macroscopic morphologies of the deposition layer. (a) $v=6$ mm/s, cross section; (b) $v=10$ mm/s, cross section; (c) $v=12$ mm/s, cross section; (d) $v=6$ mm/s, longitudinal section; (e) $v=10$ mm/s, longitudinal section; (f) $v=12$ mm/s, longitudinal section

热、前面沉积对基体的预热、实验过程中的热积累等效果的减少造成的。与横截面相比,纵截面中存在搭接,搭接的存在使得上一道的沉积也发生了部分熔化,新旧沉积道一起形成纵截面的熔合线。随着激光扫描速度的提升,熔池内吸收的热量减少,熔深减小,熔合线的连续弧形线逐渐趋于平稳。

图 5 是激光扫描速度分别为 6 mm/s 和 10 mm/s 时杂质的背散射像。从图 5 中可以观察到杂质中主要含有 Fe、O、Cr、Si 等元素,且随着扫描速度的改变,杂质的形状、尺寸及成分都有所改变。

由于粉末中携带有氧原子,或者保护气中含有少量空气等,因此沉积过程中形成了各种氧化物杂质。由图 5 可以观察到当激光扫描速度较小时,由于熔池的

温度较高,沉积形成的杂质熔化成了直径较小、致密度较高的球状,并分散在沉积层中;随着扫描速度增加,熔池温度降低,形成的杂质没有足够的温度完全熔化和扩散,因此呈直径较大的不规则状分布于沉积层中。

对比图 5(a)、(b)还可以发现,杂质中硅氧化物的含量随着扫描速度的变化而变化。扫描速度的降低使得熔池温度升高,低熔点、低沸点的硅氧化物杂质在高温中熔化甚至气化,因此在扫描速度为 6 mm/s 时,杂质中没有检测出 Si 元素。

3.4 扫描速度对沉积层硬度的影响

图 6(a)为不同激光扫描速度下路径 1 上沉积层的维氏硬度。分别沿横截面、纵截面的路径 1 取硬度值,将横、纵截面相同位置处的维氏硬度值相加后取平均值,用该值代表整体路径 1 上沉积层的硬度,图中虚线表示该激光扫描速度下整体路径的平均硬度。从图 6(a)中可以观察到:随着激光扫描速度由 6 mm/s 增加到 12 mm/s,硬度的峰值由 193.56 HV 升高至 208.15 HV,平均硬度由 185.09 HV 升高至 194.22 HV,沉积层硬度的均匀程度降低。

随着激光扫描速度增加,激光作用于材料单位面积上的时间缩短,熔池温度下降,晶粒尺寸减小,析出相的数量与分布改变。在上述因素以及热传导、外界复杂换热等的综合作用下,沉积层的硬度增加。从图 6(a)中可以观察到沉积层的硬度具有不均匀性,这是由液态金属的非平衡凝固、片状铁素体的形状及大小不完全一致、中间相分布不均等导致的。过快的扫描速度不仅会降低熔池的温度,使熔池中的液态金属没有充足的时间混合均匀,还会使晶粒的生长时间不充分以及某些难熔物质没有完全熔化等,从而导致水平方向上硬度的均匀性随着激光扫描速度的提高而降低。

图 6(b)为激光扫描速度对路径 2 上沉积层硬度

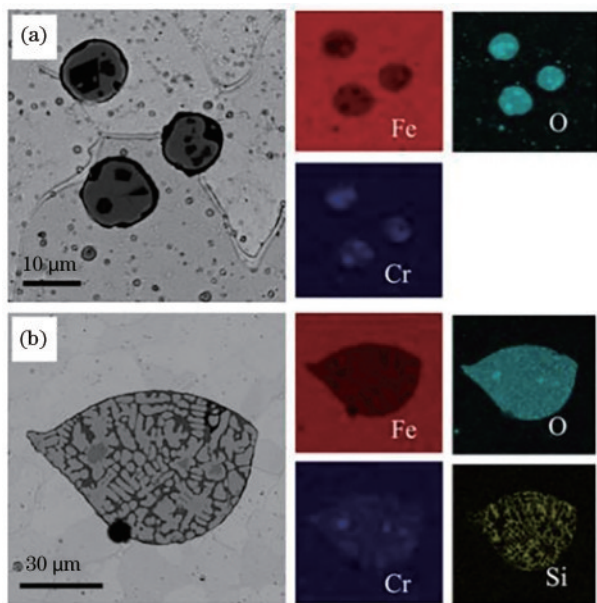


图 5 激光扫描速度对沉积层中杂质的影响。

(a) $v=6$ mm/s; (b) $v=10$ mm/s

Fig. 5 Effect of laser scanning speed on impurities in deposition layer. (a) $v=6$ mm/s; (b) $v=10$ mm/s

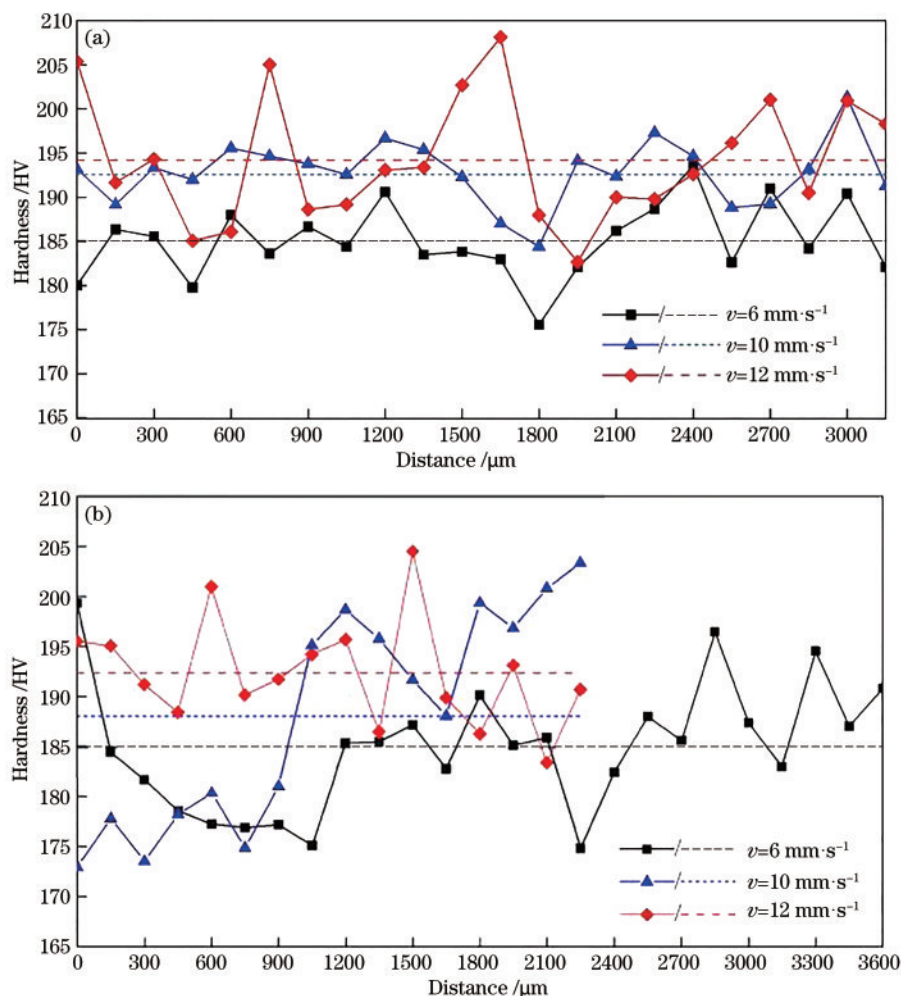


图6 激光扫描速度对沉积层硬度的影响。(a)路径1;(b)路径2

Fig. 6 Effect of laser scanning speed on hardness of the deposition layer. (a) Path 1; (b) path 2

的影响,分别沿横截面、纵截面的垂线取硬度值,并将横、纵截面相同位置处的维氏硬度值相加后取平均值,用该值代表整体路径2上沉积层的硬度,图中虚线表示该速度下沉积层硬度的平均水平。可以看出,随着激光扫描速度从6 mm/s提高12 mm/s,路径2上的平均硬度从184.9 HV增加到192.33 HV,峰值硬度从199.32 HV增加到204.5 HV

随着激光扫描速度的提高,激光输入能量下降,熔池温度降低,晶粒的生长时间不足,晶粒尺寸减小。在晶粒尺寸减小、中间相分布发生变化以及沉积层与环境的热传递等的综合作用下,沉积层的平均硬度增加。激光沉积的第一层作用在冷态基体上,因此第一层沉积层具有更快的凝固速度和更细小的晶粒。随后的沉积实验均在之前的沉积层上进行,之前的沉积层没有冷却到室温,具有一定的热量积累和预热作用,因此沉积层的晶粒尺寸从底部到顶部逐渐增大,导致硬度从底部到顶部逐渐

降低。晶粒尺寸以及杂质的分布随温度的变化而变化。当激光扫描速度较低时,单位面积材料吸收的激光能量更多,熔池具有更高的温度,散热速度相对减缓,随着沉积层数增加,晶粒生长的时间更加充分,因此沉积层表面的硬度低,而越靠近基体硬度越高。在激光扫描速度为12 mm/s时,熔池温度较低且凝固速度较快,晶粒尺寸以及中间相、难熔物质的分布随着沉积层数的增加而发生相对较小的变化,使得路径2上的硬度值稳定在一定的范围内。此外,金属具有非均匀性,且在该扫描速度下氧化物等杂质并没有充足的时间充分熔化并均匀分散在熔池中,因此在12 mm/s的扫描速度下沉积层在路径2上的硬度具有明显的波动特性。

3.5 扫描速度对沉积层耐电化学腐蚀性能的影响

图7为沉积层试样的极化曲线图。从图7可以观察到不同扫描速度下极化曲线的形状及变化趋势相似,说明不同扫描速度下的沉积层具有相同的腐蚀行

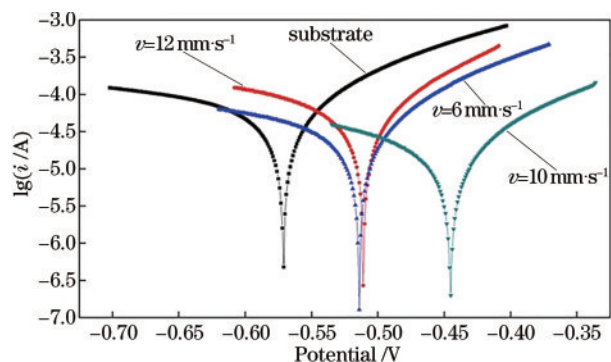


图 7 激光扫描速度对沉积层耐电化学腐蚀性能的影响
Fig. 7 Effect of laser scanning speed on corrosion resistance of deposition layer

为与动力学规律^[13]。对极化曲线进行分析后可知:基体的腐蚀电位为 -0.572 V , 自腐蚀电流密度为 $1.698 \times 10^{-4}\text{ A/cm}^2$; 采用 6 mm/s 激光扫描速度制备的沉积层的腐蚀电位为 -0.471 V , 自腐蚀电流密度为 $6.538 \times 10^{-5}\text{ A/cm}^2$; 采用 10 mm/s 激光扫描速度制备的沉积层的腐蚀电位为 -0.4450 V , 自腐蚀电流密度为 $4.714 \times 10^{-5}\text{ A/cm}^2$; 采用 12 mm/s 激光扫描速度制备的沉积层的腐蚀电位为 -0.5090 V , 自腐蚀电流密度为 $1.392 \times 10^{-4}\text{ A/cm}^2$ 。

激光辐照后,在晶粒尺寸改变以及合金元素、中间相、杂质等重新分布的综合作用下,相对于基体,沉积层的腐蚀电位正移,自腐蚀电流密度降低。腐蚀电位表征发生腐蚀的倾向,而自腐蚀电流密度表征腐蚀反应的速度,是评价耐腐蚀性能的主要动力学参数之一^[14],腐蚀电位的正移以及自腐蚀电流密度的减小都会使沉积区域的耐电化学腐蚀性能提高。可以发现,采用 10 mm/s 激光扫描速度制备的沉积层的自腐蚀电流密度约为基体自腐蚀电流密度的 27.76% ,说明该沉积层发生腐蚀的倾向相对较小,展现出了最佳的耐电化学腐蚀性能。

3.6 扫描速度对沉积层耐磨性能的影响

图 8 为不同激光扫描速度下制备的沉积层在稳定磨损阶段的摩擦因数曲线。当激光扫描速度分别为 $6, 10, 12\text{ mm/s}$ 时,沉积层的平均摩擦因数分别为 $0.704, 0.739, 0.656$ 。将磨损实验损失的质量与磨损实验前试样质量的比值作为磨损率,可以计算出 $6, 10, 12\text{ mm/s}$ 扫描速度下制备的沉积层的磨损率分别为 $0.31\%, 0.25\%, 0.13\%$ 。

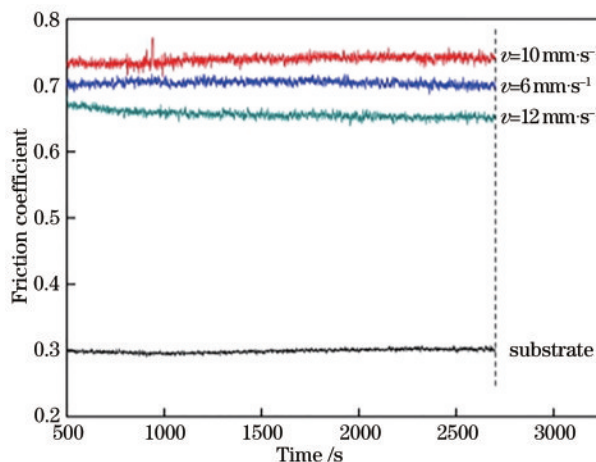


图 8 激光扫描速度对沉积层耐磨性能的影响
Fig. 8 Effect of laser scanning speed on wear resistance of deposition layer

与基体相比,沉积层顶部的晶粒尺寸、沉积层的硬度以及杂质与中间相的形状、大小、分布等都随着激光扫描速度的变化而改变。这些改变使得沉积层的摩擦因数高于基体。与其他激光扫描速度相比,在 12 mm/s 激光扫描速度下制备的沉积层,其顶层组织的晶粒尺寸更细小,中间相及硬质相没有被完全融化,因此该沉积层具有较小的摩擦因数和磨损率,磨损率分别为 6 mm/s 和 10 mm/s 扫描速度下沉积层磨损率的 52% 和 42% ,展现出了较好的耐磨性能。

图 9 为不同扫描速度下制备的沉积层的磨损形貌

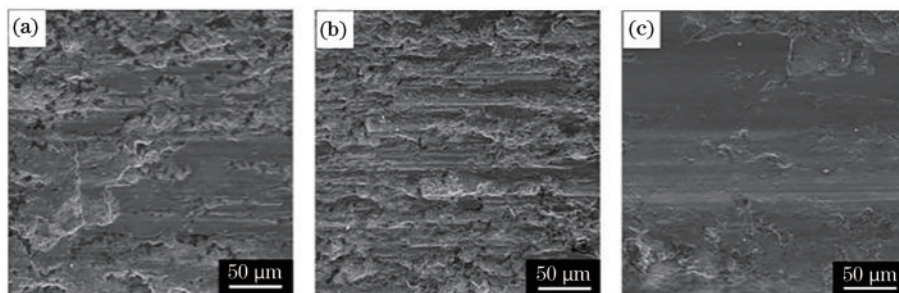


图 9 不同激光扫描速度下制备的沉积层的磨损形貌。(a) $v=6\text{ mm/s}$; (b) $v=10\text{ mm/s}$; (c) $v=12\text{ mm/s}$ 。
Fig. 9 Wear morphologies of deposition layer prepared at different laser scanning speeds. (a) $v=6\text{ mm/s}$; (b) $v=10\text{ mm/s}$; (c) $v=12\text{ mm/s}$

貌,其磨损机理均主要为黏着磨损和磨粒磨损^[15-18]。对比图 9(a)、(b)、(c)可以看出:对于 12 mm/s 扫描速度下制备的沉积层,其表面磨损轻微,磨痕表面较为平整,表面上有极轻微的材料转移和很浅的犁沟;对于 10 mm/s 扫描速度下制备的沉积层,其表面磨损严重,磨痕表面粗糙,表面上分布着深浅不一的犁沟,且存在明显的塑性变形,犁沟附近有切削下来的磨屑和颗粒,属于磨粒磨损的典型特征^[17];对于 6 mm/s 激光扫描速度下制备的沉积层,其表面有较多的材料转移和较浅的犁沟。磨痕表面特征与摩擦因数及磨损率的变化规律一致。

4 结 论

本文使用额定功率为 1 kW 的光纤激光器开展了激光直接沉积机场供油管网材料的实验研究,得到的主要结论如下:

1)随着激光扫描速度的增加,基体的翘曲变形程度减小;增加激光扫描速度可以有效降低沉积层首尾的厚度差,获得厚度均匀的沉积层。

2)增加激光扫描速度可以有效降低沉积层中的孔隙率,提高沉积金属的连续性和致密度;随着激光扫描速度的增加,沉积层与基体的熔合深度降低。

3)随着激光扫描速度增加,熔池温度降低,熔池的凝固速率相对提高,导致杂质及中间相等不能充分熔化。在晶粒尺寸减小、中间相及杂质分布变化以及复杂的散热换热等的共同作用下,沉积层的平均硬度随着扫描速度的增加而增大。

4)在机场供油管网激光能量直接沉积实验中,沉积层的耐磨性、耐蚀性对激光扫描速度变化的响应具有不同一性:当激光扫描速度为 10 mm/s 时,腐蚀电位正移,自腐蚀电流密度最小,此时的沉积层具有最佳的耐化学腐蚀性能;在激光扫描速度为 12 mm/s 下制备的沉积层具有较小的摩擦因数与磨损率,表面磨损轻微,出现了很少的材料迁移,犁沟状磨痕较浅,沉积层展现出了较好的耐磨性。

在机场供油管网的修复及再制造过程中,应当结合损伤部位或管道所处的应用场合选择合适的激光参数。

参 考 文 献

[1] Liu F G, Lin X, Song K, et al. Microstructure and mechanical properties of laser forming repaired 300M steel[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2017, 53(3): 325-334.

刘丰刚, 林鑫, 宋衍, 等. 激光修复 300M 钢的组织及力学性能研究[J]. *金属学报*, 2017, 53(3): 325-334.

- [2] Wu D J, Liu N, Yu C, et al. Microstructure and mechanical properties of Al₂O₃ reinforced NiCrAlY coatings by directed laser deposition[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(1): 203-212.
吴东江, 刘妮, 余超, 等. 直接激光沉积 Al₂O₃ 增强 NiCrAlY 涂层的微观组织及力学性能[J]. *表面技术*, 2020, 49(1): 203-212.
- [3] 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.
- [4] Xu Q D, Wang S G, Le G M, et al. Process parameters and microstructure of laser forming repaired Inconel 625 alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2019, 48(5): 1598-1604.
徐庆东, 王述钢, 乐国敏, 等. 激光成形修复 Inconel 625 合金的工艺特性和组织研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2019, 48(5): 1598-1604.
- [5] Zhao Z, Chen J, Zhang Q, et al. Microstructure and mechanical properties of laser additive repaired Ti17 titanium alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017, 27(12): 2613-2621.
- [6] Li Q G, Lin X, Wang X H, et al. Research on the cracking control of laser additive repaired K465 superalloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, 46(4): 955-960.
李秋歌, 林鑫, 王杏华, 等. 激光增材修复 K465 高温合金裂纹控制研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2017, 46(4): 955-960.
- [7] Zhong M L, Sun H Q, Liu W J, et al. Boundary liquation and interface cracking characterization in laser deposition of Inconel 738 on directionally solidified Ni-based superalloy[J]. *Scripta Materialia*, 2005, 53(2): 159-164.
- [8] Ying J L, Chao B X, Li Z Y. Research on laser additive remanufacturing technology of 4J36 invar alloy steel[J]. *New Technology & New Process*, 2019(12): 54-57.
应俊龙, 巢昺轩, 李智勇. 因瓦合金钢 4J36 激光增材再制造工艺研究[J]. *新技术新工艺*, 2019(12): 54-57.
- [9] Bian H Y, Zhai Q X, Qu S, et al. Effect of aging

- heat treatment on microstructure and properties of laser deposition repaired GH738 alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2019, 48(1): 317-322.
- 卞宏友, 翟泉星, 曲伸, 等. 激光沉积修复 GH738 合金时效热处理组织及性能[J]. *稀有金属材料与工程*, 2019, 48(1): 317-322.
- [10] Zhang J T, Zhang W, Li Y J, et al. Laser deposition additive/subtractive hybrid manufacturing process for stainless steel powder based on DMG MORI LASERTEC 65 3D[J]. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*, 2018, 23(4): 368-374.
- 张军涛, 张伟, 李宇佳, 等. 基于 DMG MORI LASERTEC 65 3D 加工中心的不锈钢粉末激光沉积增/减材复合制造[J]. *粉末冶金材料科学与工程*, 2018, 23(4): 368-374.
- [11] Mahamood R M, Akinlabi E T. Scanning speed and powder flow rate influence on the properties of laser metal deposition of titanium alloy[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 91(5/6/7/8): 2419-2426.
- [12] Mahamood R M, Akinlabi E T. Effect of the scanning speed of treatment on the microstructure, microhardness, wear, and corrosion behavior of laser metal-deposited Ti-6Al-4V/TiC composite[J]. *Materials Science*, 2017, 53(1): 76-85.
- [13] Wang J C, Zeng R X, Jin Y F, et al. Effect of Mg and Cu elements on corrosion resistance of low-silicon cast aluminum alloy[J]. *Shanghai Metals*, 2019, 41(6): 44-50, 56.
- 王嘉诚, 曾瑞祥, 金洋帆, 等. Mg、Cu 元素对低硅铸造铝合金耐腐蚀性能的影响[J]. *上海金属*, 2019, 41(6): 44-50, 56.
- [14] Huang N B, Qiu Z Y, Ren J, et al. Effect of lanthanum-cerium mixed rare earth on electrochemical behavior of AM60B magnesium alloy[J]. *Material Sciences*, 2019, 9(10): 923-933.
- 黄乃宝, 邱忠瑜, 任婧, 等. 镧铈混合稀土对 AM60B 镁合金电化学行为的影响[J]. *材料科学*, 2019, 9(10): 923-933.
- [15] Zhou Z Y, Liu X B, Zhuang S G, et al. Preparation and high temperature tribological properties of laser *in situ* synthesized self-lubricating composite coatings containing metal sulfides on Ti6Al4V alloy[J]. *Applied Surface Science*, 2019, 481: 209-218.
- [16] Liu X B, Meng X J, Liu H Q, et al. Development and characterization of laser clad high temperature self-lubricating wear resistant composite coatings on Ti-6Al-4V alloy[J]. *Materials & Design*, 2014, 55: 404-409.
- [17] Yang M S, Liu X B, Fan J W, et al. Microstructure and wear behaviors of laser clad NiCr/Cr₃C₂-WS₂ high temperature self-lubricating wear-resistant composite coating[J]. *Applied Surface Science*, 2012, 258(8): 3757-3762.
- [18] Yang G, Wang W, Qin L Y, et al. Microstructure and property of laser metal deposition composite coating on Ti6Al4V alloy surface[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(10): 2723-2728.
- 杨光, 王维, 钦兰云, 等. Ti6Al4V 合金表面激光沉积复合涂层的组织和性能[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(10): 2723-2728.