

激光熔覆工艺参数对单道熔覆层宽度的影响

李晓玄

(国营四达机械制造有限公司, 陕西 咸阳 712200)

摘要: 随着科技飞速发展, 发动机维修工艺方法不断增加。在发动机维修中, 转子叶片尖端尺寸修复的技术成为提升发动机性能的重要因素。激光熔覆是修复叶尖尺寸的重要修复方法。因此, 本文开展激光熔覆工艺研究, 通过探讨各项工艺参数对激光熔覆形貌的影响, 为了更好控制产品质量。本文通过不同激光能量和送粉量下单道熔覆对比实验, 分析研究激光功率、扫描速度和送粉量等主要工艺参数对熔覆层宽度的影响。结果表明, 送粉速率、扫描速率、激光功率对熔宽影响程度依次增强, 熔宽随激光功率增加而增加, 熔宽随扫描速率增加而减小。

关键词: 激光熔覆; 工艺参数; 熔宽

中图分类号: TN249; TG39

文献标识码: A

DOI: 10.12230/j.issn.2095-6657.2023.26.031

激光熔覆原理是以激光为热源, 通过物理或化学方法在材料表面涂覆一层想要达到性能的涂层, 它的主要机理是激光束照射覆于缺陷处的熔覆粉末, 使之充分熔化, 但基材表面微熔, 冷凝后形成一低稀释的熔覆涂层, 从而改善缺陷^[1]。与传统的涂层技术相比, 激光熔覆技术优势明显: 冷却速度快, 发生非平衡凝固, 组织细小, 固溶度增大, 产生亚稳相、超硬弥散相; 热输入小, 畸变小, 稀释度低, 与基体呈冶金结合; 粉末选择受限小, 许多金属、合金均能熔覆到金属基体上等。

在航空发动机涡轮转子叶片接长修复研究中, 对影响修复状态的几个关键因素开展研究。通过实验发现激光熔覆层宽度的控制直接影响叶片修复质量^[2]。当熔覆层宽度小于叶片待接长基体宽度时, 熔覆后叶片不能满足加工尺寸和载荷强度要求; 当熔覆宽度大于叶片待接长基体宽度时, 由于热量输入过大, 可能会对叶片造成损伤。通过前期实验发现, 激光熔覆功率、扫描速率、送粉量对熔覆宽度影响最为显著, 所以开展实验探讨激光熔覆功率、扫描速率和送粉量参数对熔覆层宽度的影响变化规律, 有利于熔覆层成型尺寸的控制^[3]。

1 实验条件

基体材料为高温合金 GH4169, 熔覆前基体材料表面预先用砂纸除去氧化层, 酒精去除油污。熔覆粉末为高温合金粉末 GH4169, 使用粉末之前, 在真空干燥箱中, 温度 200℃、真空度 -1bar 条件下对其进行不少于 6h 的干燥, 保证熔覆粉末干燥,

送粉过程中粉末不会黏着于送粉管内壁, 从而影响送粉速率。基体材料与熔覆材料与叶片修复材料一致^[4]。

实验设备应用 IPG 生产的光纤激光器、三轴联动激光加工数控机床和同轴送粉系统, 保护气体和送粉气体均为氩气, 激光光斑直径控制在 1.0mm。

2 实验步骤

1. 预先准备好的试样表面用酒精和丙酮清洗干净, 用电吹风风吹干备用;
2. 在激光加工工作头上安装反射聚焦工作头, 接通电源, 调节送粉嘴的位置, 在送粉器中加入适量的 GH4169 合金粉末;
3. 将试样平放在工作平面上;
4. 启动数控机床, 移动激光工作头至试样上面, 调节 Z 轴高度使喷嘴离试样距离约为 1.5mm;
5. 启动激光器;
6. 改变激光功率 210W-240W, 改变扫描速度 3.33-3.83mm/s, 改变送粉速度 0.6-1.2g/s, 进行送粉激光熔覆实验, 得到不同结果的激光熔覆层: 观察实验过程中的实验现象;
7. 关闭激光器, 关闭水冷机组, 关闭数控机床; 清理送粉器中的残留粉末; 关闭送粉器电源;
8. 待试样冷却后用游标卡尺测量各种熔覆层的高度和宽度, 观察记录熔覆层的外观形貌;
9. 观察工艺参数处理的试样块熔覆层显微组织。

表1 各因素实验水平

因素	激光功率/W	扫描速率/(mm·s ⁻¹)	送粉速率/(r·min ⁻¹)
水平1	210	3.33	0.6
水平2	220	3.50	0.8
水平3	230	3.66	1.0
水平4	240	3.83	1.2

3 实验方法设计与实验结果

本文采用正交实验法设计实验，选取的变量为激光功率、扫描速度和送粉量，研究对熔覆层宽度的影响。正交实验法是研究多因素多水平的一种设计方法，它依据 Galois 理论从全面实验中挑选出部分具有代表性的水平组合进行实验，并对结果进行分析从而找出最优的水平组合。其中，由于本实验采用的送粉器为转盘式送粉器，金属粉末由粉盘旋转送入管道，因此送粉速率由转盘旋转速度控制。本实验设计了 3 因素 4 水平的正交实验，各因素水平如表 1 所示。

实验完成后基板，每组参数下熔覆次数不少于 2 次，实验结果取平均值。后处理时，对激光熔覆熔道中部宽度方向进行

线切割，采用不同目数砂纸对截面进行打磨抛光，使用腐蚀液（硫酸铜 1.5g、盐酸 40ML、无水乙醇 20ML）进行腐蚀处理后，使用倒置金相显微镜测量熔覆层宽度。

4 实验结果分析

4.1 极差分析

极差分析法又称直观分析法，它具有计算简单、直观形象、简单易懂等优点，是正交试验结果分析最常用的方法。通过极差分析，在实验分析的三因素中，激光功率对熔宽影响最大，其次为扫描速率，送粉速率对熔宽影响最小。因此，对影响熔宽较大的两个因素进行交互作用分析，以进一步确定激光功率

表2 实验结果

组数	激光功率/W	扫描速率/(mm·s ⁻¹)	送粉速率/(r·min ⁻¹)	熔宽/mm
1	210	3.33	0.6	1.119
2	210	3.50	0.8	1.001
3	210	3.66	1.0	1.023
4	210	3.83	1.2	1.005
5	220	3.33	0.8	1.177
6	220	3.50	0.6	1.085
7	220	3.66	1.2	1.151
8	220	3.83	1.0	1.037
9	230	3.33	1.0	1.275
10	230	3.50	1.2	1.234
11	230	3.66	0.6	1.141
12	230	3.83	0.8	1.160
13	240	3.33	1.2	1.312
14	240	3.50	1.0	1.307
15	240	3.66	0.8	1.247
16	240	3.83	0.6	1.232

和扫描速率等单一工艺参数对熔宽的影响。

4.2 单因素分析

单因素分析是将实验或问题分析的变量控制在一个因素，检测该变量是不是导致结果的诱因。绘制在不同送粉速率下激光功率对熔宽的影响趋势曲线如图 1 所示；绘制在不同激光功率下送粉速度对熔宽的影响趋势曲线如图 2 所示。

由图 1 可知，在送粉速率一定时，激光功率增加，熔宽增加^[5]。通过分析可知，随着功率增加，输入基板能量增加，熔池面积增大，随着粉末熔化数量增多，熔宽增大。

由图 2 可知，在激光功率一定时，扫描速度增加，熔宽减小。通过分析可知，随着扫描速率增加，同等功率激光单位距离停留时间减少，输入基板能量减小，熔池面积减小，同等送粉速

率单位距离粉末输出减少，熔宽减小^[6]。

4.3 能量角度分析

激光熔覆成形中，成形形状包括宽度和高度与激光能量输入多少也有密切关系，在激光熔覆研究中，常用激光输入能量密度来衡量能量的大小，其用字母 E 表示，与激光功率成正比，激光光斑直径和扫描速率成反比，其计算表达式为：

$$E = \frac{P}{DV}$$

其中 E 为激光能量密度，P 为激光功率，D 为激光光斑直径，V 为扫描速率。通过公式可以看出，当激光光斑直径不变，扫描速率不变时，激光功率增加，能量密度增加，当送粉粉末未完全融化时，能量密度增加将会导致融化粉末增多，熔宽也会增

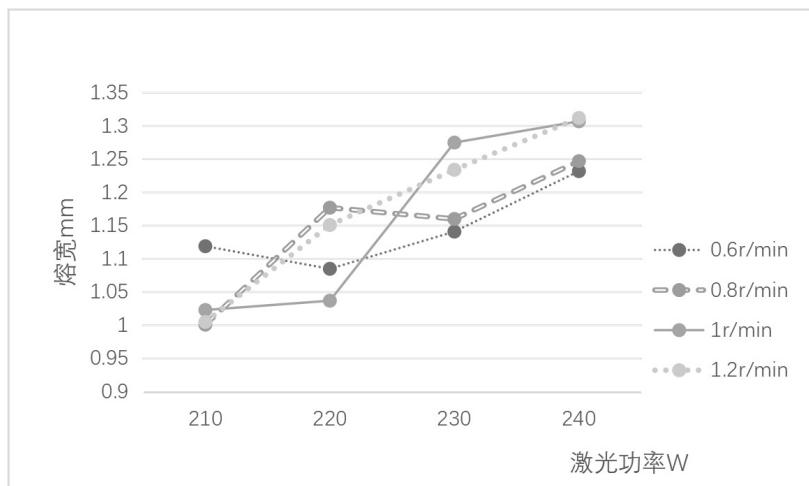


图 1 激光功率对熔宽的影响

(图片来源：通过实验数据绘制)

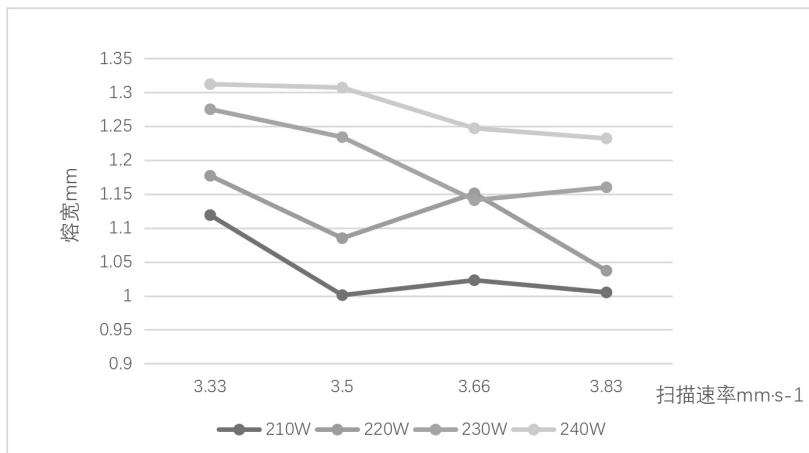


图 2 扫描速度对熔宽的影响

(图片来源：通过实验数据绘制)

大。当激光功率不变,激光光斑直径不变时,扫描速率增加,能量密度减少,将会导致融化粉末减少,熔宽也会减小。当激光功率不变,扫描速率不变,激光光斑直径增大,能量密度减少,但激光辐射面积增大,熔宽增加和减小将取决于激光能量是否可以熔化金属粉末,此处做出假设,当能量足够熔化金属粉末,虽然能量密度降低,但辐射面积增大,粉末将与基体结合,也将增大熔宽,当能量不够熔化金属粉末,虽然辐射面积增大,但粉末直接被保护气体吹散,无法和基体结合,也无法增加熔宽尺寸。

所以,从能量的角度分析熔宽影响因素,可以得出能量密度增大,熔覆金属粉末将会增多,是否增加熔宽,还需要从变量因素实际情况结合金属粉末性质进行综合研究实验,从而进一步分析影响关系。

4.4 熔覆质量分析

激光熔覆成形中,也并非呈冶金结合等同质量达标,在熔宽达标后,也要进行质量分析,是否为有效宽度。通常检测熔覆层质量好坏参数通常有结合强度、孔隙率、稀释率、硬度耐磨性等。

结合强度。高速激光熔覆与热喷涂的最主要区别在于:高速熔覆在熔化粉末的同时,也将小部分能量用于熔化工件基体,熔融粉末在熔融基体界面处产生原子相互扩散而形成冶金结合。高速激光熔覆层与基体结合强度可高达 360MPa 以上。

孔隙率。孔隙的出现主要原因有粉末未熔化充分、粉末过度氧化等,选择适当的熔覆功率、送粉量和工件运动速度,高速熔覆的孔隙率可接近零。

稀释率。指熔敷金属被稀释的程度,用基材在熔覆层中所占的百分比来表示。稀释率对熔覆层性能有较大的影响,稀释率的大小主要受金属粉末流量、熔覆功率和熔覆速率等因素影响。中科中美大量的用户数据表明,高速熔覆的稀释率极低,可降到 3% 以下。

硬度耐磨性。高速熔覆层的硬度耐磨性主要取决于粉末特性。

5 结语

通过数据分析,送粉速率、扫描速率、激光功率各影响

因素极差分别为 0.04、0.11、0.23,对熔宽影响程度依次增强,激光功率、扫描速度成为熔宽的主要影响因素。通过单因素分析,送粉速率为 $1.2\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,随着激光功率从 210W 增加到 240W,熔覆宽度从 1.005mm 增加到 1.312mm,其他 3 组送粉速率下分析实验数据,影响趋势均表现相同,得出结论,激光熔覆熔宽随激光功率增加而增加。通过单因素分析,激光功率为 210W 时,随着扫描速率从 $3.33\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 $3.83\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$,熔覆宽度从 1.119mm 减小到 1.005mm,其他 3 组激光功率下分析实验数据,影响趋势均表现相同,得出结论,激光熔覆熔宽随扫描速度增加而减小。

通过激光熔覆工艺参数对单道熔覆层宽度影响研究,在航空装备维修领域,特别是航空发动机叶片修复中具有指导意义,同时在金属零部件修复领域,减少优化工艺参数研发时间,提质增效,降低研发成本,进一步推动国家可持续发展战略,具有理论意义和经济价值。

参考文献:

- [1] 常庆明, 陈长军. 材料加工工程 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [2] 黄卫东. 激光立体成形 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007, 36 (07): 56-58.
- [3] 赵洪运, 杨贤群, 舒凤远, 等. 激光熔覆层形貌预测对比分析 [J]. 焊接学报, 2009, (01): 51-54, 59.
- [4] 张若宾, 张瑞乾, 陈勇, 等. 激光熔覆铁基合金单道成形工艺参数的研究 [J]. 热加工工艺, 2017, (22): 162-165, 169.
- [5] 于天彪, 宋博学, 郗文超, 等. 激光熔覆工艺参数对熔覆层形貌的影响及优化 [J]. 东北大学学报, 2019, (04): 537-542.
- [6] 薛春芳, 董世运, 田欣利, 等. 工艺参数对激光直接烧结成形涂覆层的影响 [J]. 机械工程材料, 2003, 27 (11): 26-29.

作者简介: 李晓玄 (1996-), 男, 山西运城人, 助理工程师, 大学本科, 主要从事飞机发动机增材修复技术研究。