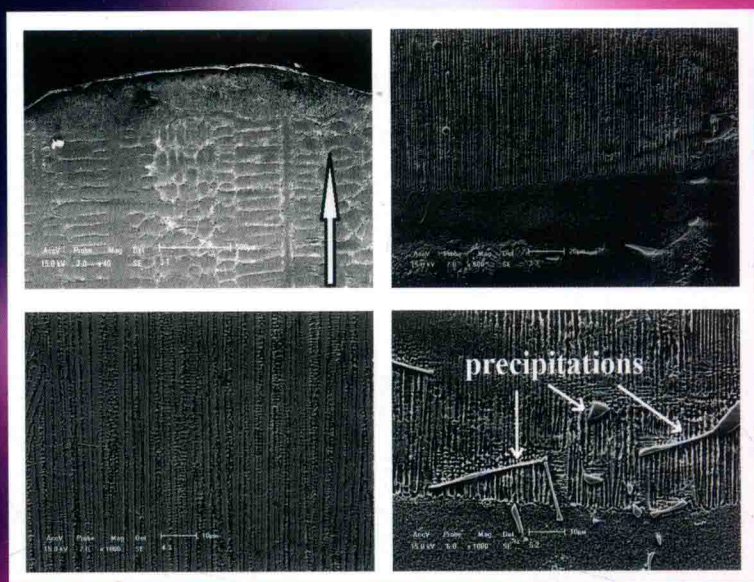


激光改性再制造技术

崔爱永 胡芳友 等著



化学工业出版社

激光改性再制造技术

崔爱永 胡芳友 等著

其他著者: 戴京涛 魏华凯 戚佳睿 赵培仲 易德先
胡 滨 卢长亮 刘浩东 付鹏飞



化学工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

激光改性再制造技术/崔爱永等著. —北京: 化学
工业出版社, 2017. 12
ISBN 978-7-122-30788-0

I. ①激… II. ①崔… III. ①激光熔覆-研究
IV. ①TG174.445

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 255239 号

责任编辑: 傅四周
责任校对: 王 静

装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 三河市航远印刷有限公司

装 订: 三河市瞰发装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张 13½ 字数 255 千字 2018 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 69.00 元

版权所有 违者必究

前言

飞机等装备在服役过程中,高性能结构件由于腐蚀、摩擦磨损等,损伤不可避免。传统技术无法对损伤区域实施良好修复,需要更换新件,造成极大的浪费和经济损失。激光增材制造技术可以直接实现对损伤结构的三维重建。在恢复损伤结构形状和尺寸的同时,激光表面改性技术(功能梯度、定向凝固)可通过改变材料表面的性能,实现损伤过程的人为可控。同轴送粉喷嘴是激光再制造系统的核心部件之一,是保证激光再制造结构件质量的重要环节之一。目前受同轴送粉喷嘴结构的影响,激光再制造过程中常出现气体保护效果不佳和粉末利用率低的问题,直接影响着成形质量和精度。

本书以整个团队的长期科研成果为基础,系统地阐述了同轴送粉喷嘴的气体流场和粉末流场,喷嘴气流速率、喷嘴距工件表面距离、工件位置、侧风速度(喷嘴移动速度)对喷嘴气体保护效果的影响,喷嘴结构参数(粉末通道锥角、粉末通道出口宽度)和送粉参数(送粉量、气流速度)对粉末浓度分布的影响;阐述了激光熔覆定向凝固理论与工艺;阐述了激光梯度改性去应力技术。为激光改性再制造技术在航空乃至民用原位修理领域的应用做出理论和实践探索。

本书对于从事激光加工技术应用和研究、材料加工成形、工程维修等领域的工程技术人员及高等院校师生有较强的参考价值。

全书由崔爱永、胡芳友等著,易德先、戴京涛、戚佳睿、赵培仲、魏华凯、胡滨、刘浩东、卢长亮、付鹏飞等参与了本书有关的实验研究和编写工作。在本书编写过程中,书中所列的参考文献为编写工作提供了较大的帮助,在此对文献作者表达最诚挚的感谢。

由于作者水平有限,书中难免有不妥和疏漏之处,敬请广大读者批评指正。

崔爱永 胡芳友

2017年7月于海军航空大学青岛校区

主要符号表

a_p : 粉末颗粒加速度	Re_p : 粉末颗粒雷诺系数
A : 喷嘴出口截面积	Re : 气流雷诺数
b_1 : 喷嘴粉末流出口宽度	Pr : 普朗特数
c : 材料比热	P_0 : 激光输出功率
C_D : 阻力系数	P : 气体压强
e : 粉末利用率	q : 激光束产生的热流密度
d_f : 粉末流汇聚焦点直径	q_f : 对流换热
d_p : 粉末颗粒直径	q_r : 辐射换热
$\overline{d}_{50}$: 粉末颗粒中位直径	Q_{1g} : 喷嘴中心气体流量
d_{p1} : 喷嘴中心孔出口处半径	Q_{2g} : 喷嘴内环气体流量
f_1 : 粉末流汇聚焦点距喷嘴出口 的距离	Q_{3g} : 喷嘴外环气体流量
f_2 : 粉末流汇聚起始点距喷嘴出口 口的距离	R_0 : 激光束有效半径
F_p : 压力梯度力	S : 层流段长度
F_{Ba} : 巴塞特力	T_L : 某随机涡旋生存时间
F_g : 浮力	T_R : 颗粒穿过某随机涡旋时间
F_D : 气流阻力	T_p : 颗粒弛豫时间
F_v : 附加质量力	T_w : 工件表面温度
g : 重力加速度	T_e : 环境温度
H : 材料的潜热	$\bar{u}$: 流体时均速度
h_f : 对流换热系数	u' : 流体随机脉动速度
h_r : 辐射换热系数	u_g : 气流速度
h : 综合换热系数	u_{1g} : 喷嘴中心气流速度
L : 喷嘴出口距工件表面的距离	u_{2g} : 内环气流速度
L_e : 涡的特征长度	u_{3g} : 外环气流速度
R : 粉末颗粒累计频率分布	u_p : 粉末速度
Re : 雷诺数	u_c : 侧风速度
	W : 重力
	V_p : 粉末颗粒体积
	α : 喷嘴粉末通道内壁半锥角

β : 喷嘴粉末通道外壁半锥角

ρ : 材料密度

ρ_g : 气体密度

ρ_p : 粉末颗粒密度

η : 激光吸收率

λ_g : 保护气体热导率

λ : 热导率

λ_x 、 λ_y 、 λ_z : 分别为 x 、 y 、 z 方向的热导率

μ : 气体动力黏度

ϵ : 实际物体表面的辐射率

σ : 斯蒂芬-波尔兹曼常数, $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

目 录

上篇 加工设备篇—激光同轴喷嘴

第 1 章 绪论 2

1.1 激光再制造技术	2
1.2 送粉方式	3
1.2.1 侧向送粉	3
1.2.2 同轴送粉	4
1.3 同轴送粉喷嘴	5
1.4 喷嘴气体流场	6
1.5 喷嘴粉末流场	9
参考文献	11

第 2 章 喷嘴气体保护范围 13

2.1 温度场	13
2.1.1 物理模型	14
2.1.2 热传导方程	15
2.1.3 初始条件和边界条件	15
2.1.4 激光热源	16
2.1.5 相变潜热	17
2.1.6 材料的热物性参数	18
2.1.7 表面吸收系数	19
2.1.8 有限元模型	19
2.1.9 结果分析	20
2.2 保护范围	21
2.2.1 激光功率对保护范围的影响	22
2.2.2 扫描速度对保护范围的影响	23

2.2.3 保护范围	24
参考文献	24

第3章 喷嘴流场实测方法

25

3.1 喷嘴气流 PIV 实测	25
3.1.1 PIV 测速基本原理	25
3.1.2 PIV 系统	27
3.1.3 喷嘴气体流动系统	29
3.1.4 PIV 测试方案	29
3.1.5 实测结果	30
3.2 喷嘴气流烟雾流动显示	33
3.2.1 气体流动系统	34
3.2.2 流动显示系统	34
3.2.3 侧吹气流系统	34
3.2.4 烟雾流动显示方法	35
3.2.5 实测结果	36
3.3 喷嘴粉末流动	37
3.3.1 粉末浓度分析原理	38
3.3.2 实测结果	38
参考文献	39

第4章 喷嘴气体流场

40

4.1 紊流模型	40
4.2 控制方程	41
4.2.1 标准 $k-\varepsilon$ 模型	41
4.2.2 RNG $k-\varepsilon$ 模型	42
4.3 计算区域及边界条件	43
4.3.1 同轴射流及同轴冲击射流	43
4.3.2 工件边缘和侧风	44
4.3.3 壁面边界	45
4.4 网格划分及数值解法	45
4.4.1 网格划分	45

4.4.2 数值解法	46
4.5 计算模型验证	46
4.5.1 同轴射流	46
4.5.2 同轴冲击射流	48
4.5.3 误差原因分析	51
4.6 喷嘴气体流动特征	51
4.6.1 同轴射流	51
4.6.2 同轴冲击射流	53
4.7 气流速度变化对流场稳定性的影响	54
4.8 工艺参数对喷嘴气体保护性能的影响	55
4.8.1 喷嘴气流速度	56
4.8.2 喷嘴距工件表面距离	56
4.8.3 工件位置	57
4.8.4 侧向气流和喷嘴移动	58
参考文献	59

第5章 喷嘴粉末流场

60

5.1 气固两相流模型	60
5.2 粉末流模型	61
5.3 气固两相流场求解	62
5.3.1 气相流场的求解	62
5.3.2 粉末颗粒受力分析	63
5.3.3 粉末颗粒的紊流扩散	64
5.3.4 气相和颗粒相的相互作用	65
5.4 金属粉末颗粒特性	66
5.5 边界条件及网格划分	68
5.5.1 气体-粉末流的边界条件	68
5.5.2 网格划分	68
5.5.3 Fluent 软件中的假设	69
5.6 粉末流场计算模型验证	69
5.7 喷嘴结构参数对粉末流参数的影响	72
5.7.1 粉末通道锥角	73
5.7.2 粉末通道出口宽度	74

5.8 送粉参数对粉末流参数的影响	75
5.8.1 送粉量	75
5.8.2 载气速度	76
5.8.3 喷嘴中心及外环气流速度	77
5.9 工件形状对粉末流的影响	78
参考文献	80

中篇 改性修理篇——激光梯度去应力改性修理技术

第6章 绪论 82

6.1 FGM 的概念	83
6.2 FGL 的设计	85
6.3 FGL 的制备	86
6.4 FGL 的性能评价	87
6.5 FGL 的应用前景和存在的问题	87
参考文献	88

第7章 FGL 物系及结构优化设计 89

7.1 FGL 物系设计	89
7.2 FGL 结构优化设计	91
7.2.1 成分分布及几何模型	92
7.2.2 物性参数	93
7.2.3 有限元模型	94
7.2.4 初始条件和边界条件	94
7.2.5 模拟结果分析	96
参考文献	99

第8章 FGL 激光直接制备 100

8.1 工艺参数设计	100
8.2 工艺参数对单道单层质量的影响	102
8.3 工艺参数对单道多层质量的影响	103
8.4 工艺参数对多道单层质量的影响	103

8.5 工艺参数对多道多层质量的影响	105
8.6 FGL 的制备	105
参考文献	107

第 9 章 FGL 组织和相结构 108

9.1 微观组织	108
9.1.1 FGL 单道单层截面形貌	108
9.1.2 FGL 微观组织	110
9.1.3 凝固过程和晶体结构对增强体 TiC 生长 形态的影响	113
9.2 生成相	114
参考文献	116

第 10 章 FGL 性能评价 117

10.1 力学性能测试	117
10.2 常温耐磨性能测试	118
10.2.1 强化机制	119
10.2.2 摩擦磨损机制	120
10.3 常温腐蚀测试	122
10.3.1 EXCO 溶液全浸实验	122
10.3.2 在海水溶液中的电化学行为	123
10.4 高温腐蚀性能测试	129
10.4.1 高温腐蚀动力学	129
10.4.2 XRD 相结构分析	131
10.4.3 FGL 和 Ti600 基体腐蚀产物显微结构 分析	133
10.4.4 高温腐蚀机理分析	134
10.5 高温氧化性能测试	140
10.5.1 恒温氧化动力学	140
10.5.2 XRD 相结构分析	143
10.5.3 FGL 和 Ti600 基体氧化层显微结构分析	145
10.5.4 高温氧化机理分析	146

10.6 抗热震、热疲劳测试	152
参考文献	155

下篇 控性修理篇——激光定向凝固控性修理技术

第 11 章 绪论 158

11.1 定向凝固的晶体学原理	159
11.2 定向凝固界面形态	160
11.3 定向凝固合金的微观组织及形成机理	163
11.4 晶粒定向生长理论计算	164
11.5 快速定向凝固技术	165
参考文献	167

第 12 章 定向凝固熔覆层柱状晶几何参数的影响因素 169

12.1 扫描速度对柱状晶几何参数的影响	170
12.1.1 影响规律	170
12.1.2 关联分析	170
12.2 电流对柱状晶几何参数的影响	175
12.2.1 影响规律	175
12.2.2 关联分析	176
12.3 脉宽对柱状晶几何参数的影响	177
12.3.1 影响规律	177
12.3.2 关联分析	177
12.4 频率对柱状晶几何参数的影响	178
12.4.1 影响规律	178
12.4.2 关联分析	178
12.5 定向凝固边界条件	180
12.5.1 激光功率密度	180
12.5.2 搭接率	182
参考文献	183

第 13 章 熔覆层组织和结晶取向 185

13.1	横向显微组织	185
13.2	纵向显微组织	186
13.3	三维立体成型	187

第 14 章 基材结晶方向的影响 189

14.1	非择优取向	189
14.2	非定向凝固基材	190

第 15 章 合金元素对熔覆层柱状晶组织的影响 192

15.1	Mo 对柱状晶组织的影响	192
15.2	Al 对柱状晶组织的影响	194
15.3	Fe 对柱状晶组织的影响	195
15.4	Ti 对柱状晶组织的影响	196
15.5	W 对柱状晶组织的影响	198
15.6	关联分析	200

上 篇

加工设备篇——激光同轴喷嘴

第 1 章

绪 论

1.1 激光再制造技术

激光作为一种高能量密度、非接触、清洁热源进入加工领域以来,解决了许多常规方法无法解决的问题,显著地提高了生产效率和加工质量。激光再制造技术是近年兴起的先进制造技术,以激光熔覆技术为基础,采用激光作为热源,结合计算机辅助设计和制造技术,在飞机结构件的损伤部位实施修复。在激光光斑内同步输送金属粉末,使金属粉末熔化后与基体实现冶金结合,在结构不完整部位逐层堆积,修复损伤的结构件,恢复其几何形状尺寸和性能^[1],近年来,此技术在国际上已受到普遍关注。应用激光再制造技术对发动机、工业模具、输油泵等进行了修复,取得了较好的经济效益和社会效益。如 L. Sexton 等^[2]将激光再制造技术用于涡轮发动机叶片的修复。沈阳大陆激光技术有限公司采用激光再制造技术修复从俄罗斯进口的 80 万千瓦汽轮机叶片和轴颈。美国海军实验室用激光再制造技术修复舰船的螺旋桨叶等^[3]。在美国俄克拉马州 Tinker 空军基地的后勤维修中心,每年要有约 1200 台发动机进行大修,采用激光再制造技术对叶片进行修复,成本费用平均值仅为更新叶片费用的 20%^[4]。

熔覆层与金属基体呈现完全的冶金结合,结合强度不低于原基体材料的 90%。材料成分不受通常的冶金和热力学条件的限制,可在金属基材上熔覆不同成分的材料,因此在金属基材表面形成与基材相互熔合且具有完全不同成分与性能的合金熔覆层。该项技术可广泛用于多种航空材料,可以使维修更迅速、更可靠地完成,其优点为维修过程自动化、热应力小、变形小,能够维修可焊性差的材料,如某些镍基高温合金、铝合金等。同时由于快速凝固和冷却,熔覆区和热影响区都可以保持高强度和韧性。与普通激光熔覆相比,激光再制造技术可以预先对维修区的尺寸和形状进行检测和分析,对维修路径进行优化和设计,对维修工艺和过程进行检测和闭环反馈控制,从而保证了工艺过程更加稳定,可以获得更好的成形和表面质量^[5]。

激光熔覆可采用预置粉末、侧向送粉和同轴送粉三种方式。为了保证熔覆层的质量,结构损伤部位激光再制造一般采用同轴送粉方法进行。同轴送粉喷嘴是

激光再制造系统的核心技术之一,是保证激光再制造质量的重要环节之一。同轴送粉喷嘴依靠气体动能输送粉末,为激光熔池提供稳定、连续和精确的粉末流,同时喷嘴喷出保护气流,保护激光金属熔池及附近的高温区域,免受空气中有害气体影响。

激光再制造过程中,经常会出现气体保护效果不好的问题。周围的空气容易混入喷嘴喷出的保护气流中,高温金属熔池容易与混入的空气发生反应,生成氧化物和氮化物,影响再制造的冶金性能,这是制约修复质量和激光再制造技术推广应用的关键因素之一。

喷嘴输送粉末的均匀性、汇聚性能影响损伤结构激光再制造的质量。喷嘴输送的粉末不均匀,将会导致熔覆层在各个方向的性能不均匀。喷嘴输送的粉末汇聚性能差,即喷嘴喷出粉末的最终分散面积大于熔池面积,粉末沉积在熔池外面,将会降低金属零件的性能和结构的准确性。另外,粉末的汇聚性能差将导致粉末的利用率低,降低生产效率和增加生产成本,这也是制约激光快速成型与激光修复的瓶颈之一。

无论是保护气体流场还是粉末流场,都与喷嘴的结构参数、气体参数有着直接的关系,然而至今仍没有行业公认的设计依据,这对于技术的标准化和推广应用十分不利。

1.2 送粉方式

激光再制造过程中,向修复部位添加材料的方式主要有预置法和同步送粉法。预置法采用热喷涂、电镀、电沉积、等离子喷涂或直接粘接、粉末松散铺展等方法,将熔覆层材料预先粘接在基体表面,然后利用激光辐照,使熔覆层材料熔化,进而实现与基材的冶金结合。其优点是不受材料成分的限制,易于进行复合成分粉末的熔覆,工艺简单,操作灵活,但熔覆层易出现气孔、变形、开裂、夹渣等现象,不易获得光滑的熔覆层,增加了机械加工量。此外还存在熔覆层稀释率不易控制、难以实现自动化和粉末材料在激光辐照下定位难等缺陷,影响熔覆材料的性能,在工程上应用较少。

同步送粉法是在激光辐照基体表面的同时,熔覆粉末送入激光辐照区域,在保护气氛条件下,粉末被加热熔化,又迅速在基材表层凝固,形成熔覆层^[6]。同步送粉有侧向送粉和同轴送粉两种形式。

1.2.1 侧向送粉

侧向送粉的基本原理如图 1-1 所示,送粉喷嘴(通常为单管)位于激光束的一侧。侧向送粉有两种送粉方式:一种是正向送入法,即粉末流的运动方向与工件的运动方向小于 90° ;另一种是逆向送入法,即粉末流的运动方向与工件的运

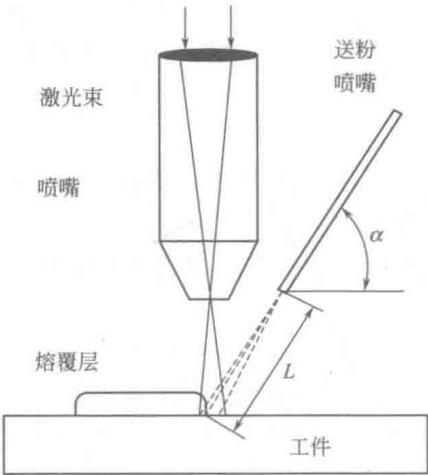


图 1-1 侧向送粉基本原理图

动方向大于 90° 。喷嘴位置由喷嘴与工件间的夹角 α 和喷嘴出口距熔池中心的距离 L 决定。根据 Jehnming^[7] 建立的粉末利用率模型，粉末利用率与工件上的激光光斑直径和粉末流直径之比有关。在重力作用下，粉末离开喷嘴出口后形成发散的粉末流，离喷嘴出口距离 L 越远，粉末流的横截面积越大，尽可能减小 L ，可以提高粉末利用率。当角度 α 增大时，粉末流在工件上的横截面积减小，因此粉末利用率增大。另一个影响侧向送粉粉末利用率的因素是粉末送入方向。一般来说，逆向送粉法的粉末利用率大于正向送粉法，主要是因为逆向送粉使熔池边缘变形，导致液态金属沿表面铺开，增大了熔池的表面积。因此在相同的条件下，逆向送粉法的粉末利用率较高。

侧向送粉法的优点是送粉喷嘴粉末出口距激光束喷嘴出口较远，不会出现因粉末过早熔化而阻塞激光束出口的现象。侧向送粉的缺点是只有一个送粉方向，激光束和粉末输入的不对称，限制了激光扫描方向，因此侧向送粉不能在任意方向形成均匀的熔覆层，只适合线形轨迹运动，不适合复杂轨迹运动。激光再制造要求熔覆层各向同性，侧向送粉不能满足激光再制造的要求。

1.2.2 同轴送粉

同轴送粉的基本原理如图 1-2 所示，激光辐照基体表面的同时，粉末送入激光束和辐照区域，粉末熔化的同时基体表层熔化，粉末和基体冶金结合在一起，

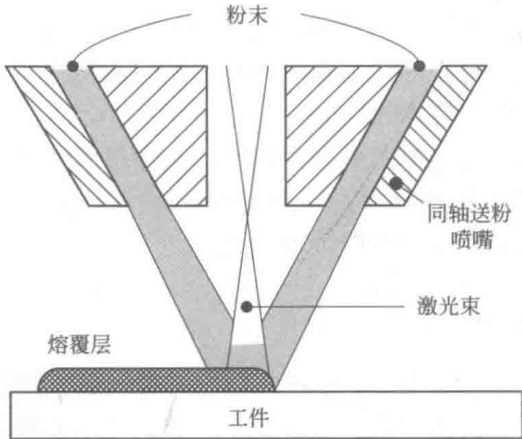


图 1-2 同轴送粉基本原理