

L
A
S
E
R
M
A
N
U
F
A
C
T
U
R
I
N
G
T
E
C
H
N
O
L
O
G
Y

激光制造工艺力学

ASER
MANUFACTURING
TECHNOLOGY

虞钢 虞和济 著



國防工業出版社

National Defense Industry Press

激光制造工艺力学

Laser Manufacturing Technology

虞钢 虞和济 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

激光制造工艺力学/虞钢,虞和济著. —北京:国防工业出版社,2012. 1

ISBN 978-7-118-07431-4

I. ①激... II. ①虞... ②虞... III. ①激光加工—工艺学:力学 IV. ①TG665

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 192854 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 23 $\frac{3}{4}$ 字数 528 千字

2012 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 78.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第六届评审委员会组成人员

主任委员	王 峰			
副主任委员	宋家树	蔡 镭	程洪彬	
秘 书 长	程洪彬			
副 秘 书 长	邢海鹰	贺 明		
委 员	于景元	才鸿年	马伟明	王小谟
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	邬江兴
	刘世参	芮筱亭	李言荣	李德仁
	李德毅	杨 伟	肖志力	吴有生
	吴宏鑫	何新贵	张信威	陈良惠
	陈冀胜	周一宇	赵万生	赵凤起
	崔尔杰	韩祖南	傅惠民	魏炳波

前 言

激光制造工艺力学是研究激光制造工艺过程中激光和材料相互作用下物质运动和变化的一般规律的科学。

激光制造技术是一种先进的零件制造技术,零件制造包括成形和成性两个方面,成形是指按设计的尺寸精度、形状精度和表面精度完成零件形状的加工;成性是指激光制造工艺按设计要求实现零件服役时应具备的力学性能。在激光制造过程中零件与外界发生质量和能量的交换,即材料的去除或添加和热能交换。因此,激光制造是一个边界时变和质量时变的时变力学问题。由于研究对象的几何、物理和边界特性都随时间发生变异,在不同时刻系统的边界由不同的质点组成,并伴随有能量的流入和流出,是一个温度场尚未稳定就发生形状、质量和热传导区域变化的非定常的传质传热过程,导致热应力和热应变的产生。可见,激光制造工艺力学的第一个特点是力学问题的时变性。

激光制造的能源是激光的光能转变为制造过程中的热源,涉及激光能量场、靶材吸收热能后产生的温度场、在激光材料添加中的气粉两相流场和熔池流场等多场耦合作用下零件成形时的温度场、应力场和应变场。这些物理场和力场相互耦连而又独立作用,机理复杂。可见,激光制造工艺力学的第二个特点是力学问题的多场性。

在激光制造工艺过程的力学原理中既包含细观作用,例如激光材料添加的快速成形制造中激光—粉末—熔池系统的细观作用,也包含微观组织演化及裂纹和缺陷形成的微观力学规律,至于温度场、应力场和应变场之间的耦连则表征为宏观力学原理。可见,激光制造工艺力学的第三个特点是多尺度力学。

在激光制造中保证制造过程和制造质量最优的控制是现代控制理论与制造工艺过程的融合,成为激光制造工艺力学的关键力学问题。激光制造过程是多参数综合控制的制造工艺过程,这些参数包括激光功率、光强分布、保护气/粉末流速、扫描速度、材料性能和路径规划等,众多参数都影响成形质量,只有采用多参数综合最优控制才能实现产品的成形和性能的控制,提高激光制造的质量。可见,激光制造工艺力学的第四个特点是多参数控制原理。

为了减少激光制造反馈控制消耗的大量人力、能量、物资和时间,实行激光制造反馈控制的仿真,在仿真中找出激光制造工艺过程的最优参数,然后用最优工艺参数进行真实的激光制造。所以,激光制造工艺力学是具有时变性、多场性、多尺度、多参数等力学特点的一门涉及物理学、力学、控制学、仿真学等多学科耦合的新型力学学科。

作者在激光与物质相互作用和激光制造工艺力学领域潜心研究二十多年,主持完成的科研计划和项目有国家自然科学基金项目模具表面的激光造型强化处理技术、中国科学院大型装备研制项目模具工作表面激光强化处理技术及装备、中国科学院第一批重大知识创新项目集成化智能制造及柔性加工系统、上海大众科技合作项目汽车冲压模具激

光强化技术及装备系统、中国科学院仪器研制项目激光智能制造工艺力学实验研究系统、瑞典—中国科技合作项目、中国北方发动机研究所异种材料激光焊接技术试验研究和中国科学院力学研究所创新项目高性能航空结构件激光直接制造等一系列项目,并组建了国内最早从事激光制造工艺力学研究的实验室之一,带出了一个强有力的科研团队,创建了激光制造工艺力学学科。本书将首次较全面地阐述这个新的力学理论。

本书共十章,较全面地阐述了激光制造的理论体系。第1章绪论,概述本学科的核心内容——激光制造工艺力学,包括具有时变特性的一般力学系统和具有时不变特性的力学系统在激光制造工艺过程中的力学理论。第2章基于物理学的量子力学,从微观角度讨论光子运动产生激光,论述激光束的变换与传输的理论,介绍激光制造工艺的技术基础之一,即工业激光器。第3章根据能量变换原理讲述激光与材料相互作用中的光能—热能—机械能之间的转换,从微观到宏观,分析了激光与材料相互作用中的相变原理、熔化、气化及等离子体发生的物理基础。第4章在第2、3章所述物理学和能量转换原理的基础上深入分析激光制造过程中的时空效应,也就是激光与工件材料相互作用中的材料改性、材料去除和材料添加过程中的时空效应,讲述了时空效应的热传导计算力学和实验力学,讨论了激光制造中时空效应的相互作用,构成了激光制造工艺的力学基础。第5章到第8章分别具体论述激光制造的各种工艺过程的力学原理。第5章讲述材料的激光改性原理,讨论了激光表面改性的力学原理、激光弯曲成形的力学原理和激光摩擦改性中的力学理论。第6章讲述激光材料去除的力学原理,分析了激光材料去除工艺过程中的热转换、热传导、热对流和热辐射理论,介绍了热转换的数值算法和数学建模。第7章讲述激光材料连接的力学原理,分析了传导焊接和穿透焊接,分析了熔池和匙孔特性,研究了匙孔动力学和激光焊接建模,讨论了激光焊接中的等离子体特性和异种金属激光焊接。第8章讲述几个快速成形原理,讨论了金属零件激光快速成形的实验力学和计算力学,阐述了传热学和固体力学耦合的温度场和应力场的计算。第9章讲述激光制造过程的多参数综合控制原理,讨论了激光制造系统中的计算机控制系统、激光器控制、机器人控制和综合控制,分析了激光制造过程的监测、诊断和控制,介绍了激光改性过程的控制、激光去除过程的控制、激光连接过程的控制和激光快速成形过程的控制等的工程应用实例。第10章讲述激光制造过程仿真的原理,分析了激光制造仿真力学中的物理仿真和几何仿真,讨论了激光制造仿真系统的构建与完善,介绍了应用实例。

本书总结了作者带领的研究团队的科研工作和工程实践,形成了激光制造的理论体系,提出了激光制造工艺力学这门新学科的构架和内涵,希望能对激光制造理论体系的发展有所推动。书中难免有所欠缺,恳请读者赐教。

作者
2010.8

主要符号

S	激光制造工艺力学一般规律总超集
J	基本规律分超集
G	工艺力学规律分超集
$u_\nu(\nu, T)$	光谱辐射能密度
C	光速
λ_c	光的波长
h	普朗克常量
k	玻耳兹曼常数
m	约化质量
E_F	费米能级
p	压强
x	电离度
n_e	电子浓度
v	粒子速度
λ_D	德拜长度
σ	斯蒂芬—玻耳兹曼常数
τ_0	脉宽
E_p	脉冲能量
λ	激光波长
T_e	等离子体激发温度
n_e	等离子体中的电子密度
n_c	临界电子密度
r_t	实际光束的腰斑半径
r_0	基模高斯光束的腰斑半径
P	激光器辐射的光功率
n_1	纤芯折射率
n_2	包层折射率
$\tilde{n}$	复数折射指数
R	表面反射率
a	吸收系数
q	光功率密度
c	比热容

K	材料的传热系数
$\bar{q}_{th}$	热流密度矢量
T_m	材料熔点
I_a	吸收辐照度(强度)
α_1	热源和电子对晶格的热转换系数
V	热源扫描速度
ν	运动黏度
η	动力黏度
R_h	水力半径
h_L	摩擦损头
h_x	对流热转换系数
Re	雷诺数
ε_H	涡流对热的扩散性
C_f	表面摩擦系数
x_e	进入长度
x_{et}	热进入长度
I	辐射强度
E_b	黑体的总发射功率
ε	总发射率
ε_λ	单色发射率
η	激光能量利用系数
α	热膨胀系数
β	熔化层的反射率
V_s	去除熔化材料的速度
S	切割深度
δ	能量储存深度
R	光滑表面的正入射反射率
A^*	粗糙表面吸收率
R^*	粗糙表面反射率
$T(0, t)$	激光光束聚焦中心($r = 0$ 处) t 时刻的温度
T_0	环境温度
T_m	熔化温度
L	熔解潜热
V_m	熔解首先发生的临界速度
T_v	气化温度(蒸发温度)
β	质量蒸发率
N	匙孔内的反射数
η_k	匙孔中能量储存的近似效率因子
v_d	匙孔壁在其垂直方向的速度

d	均匀圆柱形匙孔深度
HB	布氏硬度
f	静摩擦系数
f'	动摩擦系数
δ	滚动摩擦系数
ε_w	磨损率
U	磨损量
p_g	流体静压力
p_σ	表面张力
p_v	气体压力
p_u	流体动压力
p_l	辐射压力
κ	热扩散率
$\Delta\lambda$	谱线宽度
ΔZ	离焦量
U_f	侧吹保护气体流量
h_f	表面换热系数
η	材料表面对激光的吸收率
r_0	热流分布的特征半径
$\bar{q}$	单位体积热产生率
Q'_e	热流密度引起的载荷
Q^e_e	单元表面对流载荷
Q^e_v	单元体积热产生的载荷
η	材料表面对激光的吸收率
σ_t	热应力(温度应力)
$\{\sigma\}$	应力列阵
$\{\varepsilon\}$	应变列阵
$[D]$	弹性矩阵
γ	剪应变
μ	泊松比
E	弹性模量
k	弹簧常数
G	剪切弹性模量
σ_θ	切向应力
σ_s	屈服强度(屈服限)
$r(t)$	参考输入
$u(t)$	控制作用
$V(t)$	干扰
$y(t)$	输出

$G(s)$	传递函数
$g(t)$	单位脉冲响应
$\delta(t)$	单位脉冲函数
$x(t)$	状态向量
$Q(s)$	开环传递函数或回路传递函数
$M(s)$	闭环传递函数
$H(s)$	反馈传递函数
$G(j\omega)$	频率特性
$A(\omega)$	幅频特性
$\varphi(\omega)$	相频特性
T_0	平移变换矩阵
R_{ox}, R_{oy}, R_{oz}	绕 X 、 Y 、 Z 轴旋转变换矩阵

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 激光制造	1
1.1.1 21 世纪先进制造技术	1
1.1.2 激光制造的特点	2
1.2 激光制造工艺的力学原理	3
1.2.1 具有时不变特性的力学系统	4
1.2.2 具有时变特性的一般力学系统	4
1.2.3 激光制造力学原理的表达	5
1.3 激光制造工艺过程	7
1.3.1 激光制造的工艺过程	7
1.3.2 激光制造工艺过程中的力学原理	8
参考文献	9
第 2 章 激光制造的物理基础和技术基础	10
2.1 光子、原子、分子的相互作用	11
2.1.1 自发辐射和受激辐射	11
2.1.2 粒子数反转	12
2.1.3 分子的振转能级	12
2.2 激光器	17
2.2.1 激光器基本原理	17
2.2.2 工业激光器	19
2.3 激光束变换与传输	32
2.3.1 激光束变换	32
2.3.2 激光束传输	45
参考文献	48
第 3 章 激光与材料的相互作用	50
3.1 激光与原子团簇的相互作用	50
3.1.1 激光的时空特性	50
3.1.2 激光与原子团簇的相互作用	51
3.1.3 晶体结构	52
3.2 激光与材料相互作用的力学原理	54
3.2.1 光能—热能转换	54

3.2.2	激光与材料的相互作用	56
3.2.3	激光熔化和气化的物理基础	57
3.2.4	激光相变原理	59
3.3	激光与等离子体的相互作用	71
3.3.1	等离子体基本概念	71
3.3.2	激光与等离子体的相互作用	74
	参考文献	80
第4章	激光制造中的时空效应	82
4.1	激光制造中的时空效应	82
4.1.1	激光材料改性、去除和增加过程中的时空效应	82
4.1.2	能量转换	83
4.2	热传导计算力学	87
4.2.1	热传导方程	88
4.2.2	相变潜热	89
4.2.3	瞬态热传导方程的有限元形式	93
4.2.4	有限元方程的求解	95
4.2.5	有限元计算的精度和力学模型	99
4.2.6	对流与辐射的影响	109
4.3	时空效应中的实验力学	110
4.3.1	靶材的力学性能测试	110
4.3.2	激光工艺效应测试	112
4.3.3	实验技术和方法	115
4.4	激光制造中时空效应的正向和反向过程	117
4.4.1	时空效应的相互作用	117
4.4.2	激光制造的虚拟过程	117
	参考文献	118
第5章	激光改性原理	120
5.1	材料的激光改性	120
5.1.1	激光材料改性的基本思路	120
5.1.2	激光材料改性的工程应用	120
5.2	激光表面改性的力学原理	121
5.2.1	激光相变强化	122
5.2.2	激光熔凝强化	124
5.2.3	激光冲击强化	124
5.2.4	激光表面强化工艺	125
5.3	激光弯曲成形力学	129
5.3.1	激光弯曲成形原理	129
5.3.2	激光弯曲成形工艺	133

5.4 激光摩擦改性	136
5.4.1 材料的摩擦特性	136
5.4.2 激光处理改变材料的摩擦特性	139
5.4.3 耐磨性机理	146
参考文献	150
第6章 激光材料去除原理	151
6.1 激光材料去除的基本原理	151
6.1.1 激光材料去除过程	151
6.1.2 激光材料去除的加工系统	156
6.2 激光材料去除的力学原理	157
6.2.1 力学原理的基本思路	158
6.2.2 激光材料去除中的热转换	158
6.2.3 激光材料去除中的热传导	160
6.2.4 激光材料去除中的热对流	165
6.2.5 激光材料去除中的热辐射	167
6.2.6 激光材料去除中热转换的数值计算	167
6.3 激光材料去除的建模与分析	168
6.3.1 建模的基本概念	168
6.3.2 激光材料去除的加工过程建模	169
6.3.3 激光材料去除过程的一般模型	185
6.4 激光材料去除的工程应用	191
6.4.1 金属的激光去除	191
6.4.2 陶瓷的激光去除	192
6.4.3 塑料的激光去除	193
6.4.4 复合材料的激光去除	193
参考文献	193
第7章 激光材料连接原理	196
7.1 激光连接原理	196
7.1.1 激光连接原理概述	196
7.1.2 激光焊接的两种形式	197
7.2 激光焊接的热传递	198
7.2.1 激光辐射的吸收	198
7.2.2 传导焊接阈值	200
7.2.3 穿透焊接阈值	201
7.2.4 匙孔的稳定性和动力学	205
7.2.5 匙孔的运动	209
7.3 激光焊接的建模	211
7.3.1 激光焊接中的热转换	211

7.3.2	熔池和焊缝特性	212
7.3.3	激光焊接系统响应函数	213
7.4	激光焊接中的等离子体	215
7.4.1	激光焊接中等离子体的基本概念	215
7.4.2	激光焊接中等离子体的性质	216
7.5	异种金属激光焊接	218
7.5.1	异种金属激光焊接实验研究	218
7.5.2	异种金属激光焊接温度场数值模拟	223
	参考文献	226
第8章	激光快速成形原理	228
8.1	激光直接成形过程	228
8.1.1	激光直接成形的基本原理	228
8.1.2	直接成形的方法	229
8.1.3	激光直接成形工艺	229
8.2	激光直接成形的实验研究	236
8.2.1	激光直接成形系统	236
8.2.2	激光直接成形工艺参数	236
8.2.3	激光功率对成形零件的影响	237
8.2.4	扫描速度对成形零件的影响	240
8.3	激光成形温度场分析	242
8.3.1	瞬态温度场计算的基本原理	243
8.3.2	瞬态温度场计算方法	243
8.3.3	有限元模型建模	244
8.3.4	瞬态温度场计算结果分析	245
8.4	激光成形的热应力计算	249
8.4.1	热应力场计算基本原理	249
8.4.2	激光成形的热应力计算	253
8.4.3	热应力计算结果分析	254
8.5	激光直接成形的工程应用	262
8.5.1	应用实例	262
8.5.2	激光成形工程应用策略	264
	参考文献	264
第9章	激光制造的多参数过程控制原理	265
9.1	激光制造过程控制原理	265
9.1.1	激光制造过程控制概述	265
9.1.2	过程控制原理	267
9.1.3	控制系统分析	273
9.2	激光制造控制系统	274

9.2.1 激光制造过程的控制系统 274

9.2.2 计算机控制系统 275

9.2.3 激光器控制 276

9.2.4 机器人控制 278

9.2.5 示教编程器设计 283

9.2.6 激光制造过程的监测、诊断与控制 285

9.3 激光改性过程的控制 290

9.3.1 激光改性过程的监测与控制 290

9.3.2 激光相变强化的控制实例 291

9.4 激光材料去除过程的控制 293

9.4.1 激光材料去除过程的监测与控制 293

9.4.2 过程监测的传感技术 294

9.4.3 激光材料去除过程的控制 294

9.5 激光连接过程的监测与控制 297

9.5.1 激光连接过程中的各种信号 297

9.5.2 等离子体和穿透深度等信号的监测 297

9.5.3 激光连接过程中的声发射信号 301

9.5.4 激光连接过程中的可视监测 302

9.5.5 激光连接过程的控制 303

9.6 激光直接成形过程的控制 308

9.6.1 激光成形过程控制的原理 308

9.6.2 激光成形过程的控制系统 309

参考文献 310

第 10 章 激光制造过程的仿真 312

10.1 激光制造过程的虚拟与仿真 312

10.1.1 激光制造工艺规划 312

10.1.2 激光制造过程的仿真 314

10.2 激光制造仿真原理 316

10.2.1 激光制造过程仿真的物理基础 316

10.2.2 激光制造过程仿真的几何基础 316

10.2.3 逆向工程技术 319

10.2.4 轨迹规划算法 320

10.2.5 激光制造中的轨迹优化 331

10.3 激光制造过程仿真的实现 341

10.3.1 几何仿真系统的构建与完善 342

10.3.2 物理仿真工艺参数验证 348

10.4 激光制造过程仿真的工程应用 353

10.4.1 激光改性过程仿真 354

10.4.2 激光材料连接过程仿真 354

10.4.3 激光快速成形过程仿真 354

参考文献..... 354