





“十二五”国家重点图书出版规划项目
湖北省学术出版基金资助项目
世界光电经典译丛
丛书主编 叶朝辉

 Springer



定制光

激光制造技术

TAILORED LIGHT 2: LASER APPLICATION TECHNOLOGY

Reinhart Poprawe  

张冬云 

陈继民 肖荣诗  



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>



“十二五”国家重点图书出版规划项目
湖北省学术出版基金资助项目
世界光电经典译丛
丛书主编 叶朝辉

 Springer

定制光

激光制造技术

Reinhart Poprawe 编著

张冬云 译

陈继民 肖荣诗 审校

 华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

中国·武汉

Translation from English language edition:
Tailored Light 2
by Reinhart Poprawe
Copyright © 2011 Springer Berlin Heidelberg
Springer Berlin Heidelberg is a part of Springer Science+Business Media
All Rights Reserved

湖北省版权局著作权合同登记 图字:17-2015-352 号

图书在版编目(CIP)数据

定制光:激光制造技术/(德)普诺威(Poprawe, R.)编著;张冬云译. —武汉:华中科技大学出版社, 2015. 12
(世界光电经典译丛)
ISBN 978-7-5680-1481-6

I. ①定… II. ①普… ②张… III. ①激光加工 IV. ①TG665

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 292333 号

定制光:激光制造技术
Dingzhiguang: Jiguang Zhizao Jishu

Reinhart Poprawe 编著
张冬云 译

策划编辑:徐晓琦
责任编辑:余涛
封面设计:原色设计
责任校对:张琳
责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321913

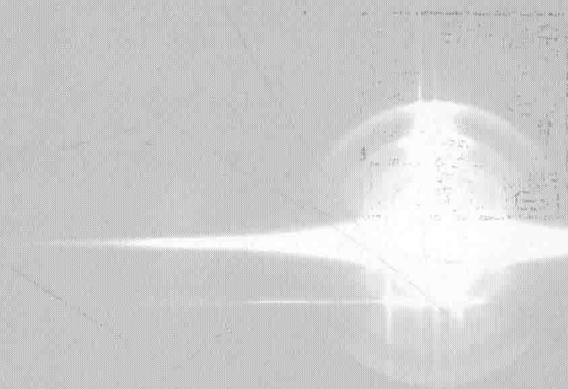
录排:武汉楚海文化传播有限公司
印刷:湖北新华印务有限公司
开本:710mm×1000mm 1/16
印张:37.5
字数:628千字
版次:2016年1月第1版第1次印刷
定价:238.00元

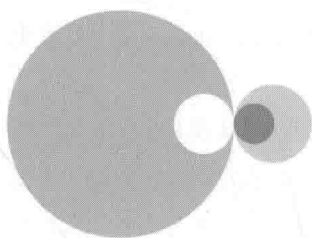


本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究



**TAILORED LIGHT 2:
LASER APPLICATION TECHNOLOGY**





译者序

激光具有可聚焦性、高能量密度、柔性传导特性以及可实现快速、准确加工的特点,因此激光优于传统热源。自1960年美国人梅曼发明了第一台红宝石激光后,全世界的科学家们对不同类型的激光器及其应用进行了深入的研究。早在1963年就出现了关于激光应用技术的报道,激光焊接、激光切割、激光表面加工、激光制孔、激光标刻等加工工艺在制造业的应用层出不穷,它们与大规模生产的结合为现代制造增添了活力。德国在这些技术中起到了引领前沿的作用,以激光焊接为例,20世纪80年代中期激光焊接技术在德国首先用于白车身制造;90年代中期激光焊接技术在德国用于船舶制造领域;21世纪初期激光焊接技术在欧洲用于A380大飞机机身制造中。这些应用案例充分证明了激光加工技术在机械制造领域的应用潜力。激光加工技术在面向机械制造的高功率领域长足发展的同时,也向超短、超快方向发展而拓宽了激光技术的应用范围,在通信、信息、医疗、测量等领域的应用正逐步扩大。其中,激光在制造领域的应用占整个激光技术应用的30%左右。德国在相关的关键技术领域如光学元器件、过程控制与监测以及其他外围设备等方面无不在世界的前列。德国在该领域的领先地位与其拥有多家世界一流的研究机构以及设备制造企业是分不开的。

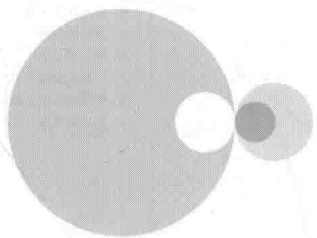
弗郎恩霍夫激光技术研究所(ILT)是面向德国企业进行激光以及激光加工领域应用研究的研究所之一。本书汇编了ILT多年以来在激光加工领域的研究成果,是该研究所工业项目以及理论研究项目经验的汇总。该书首先对

激光材料加工过程中发生的基本物理现象进行了理论阐述；接着论述了工业用重要光源的特征；大篇幅论述了制造领域中的激光加工工艺，不仅包括已经得到应用的技术（如激光连接、激光分离、激光表面加工、激光标刻和制孔、激光系统技术以及激光测量技术等），也包括一些具有较大应用潜力的前沿技术（如激光弯曲、激光成形、激光清洗技术以及新型半导体激光在工业中的应用等）。本书旨在成为激光加工领域科研人员、工程技术人员、在校研究生的重要参考书。

本书从激光加工过程的物理基础延伸到激光加工工艺以及应用技术。在这一过程中，激光加工技术从无形的、深奥的、抽象的理论阶跃为物质的、生动的、一目了然的制造技术。希望本书能为国内同行展开一个激光材料加工的物理空间以及扩大激光材料加工技术的应用空间，同时也希望通过本书感受到德国在制造领域精益求精的创业以及创新精神。

张冬云

2015年12月于北京



前言

激光——也许自从它作为“受激辐射的光放大”的缩写被发明以来就具有无限的魅力。激光是一种特殊的光，它是单色、可束集的，它的这一特点使科学界一直处于兴奋之中，也为我们铺就了通往现代世界的创新道路。

激光到底是什么？激光仅仅是设备吗？激光辐照是能量最纯粹的形式，这一点可以与电流相比。它也遵守能量的质量概念，也就是说，两种能量的熵在极限处接近于零，这就意味着，一种能量能够以最高的效率转化为其他能量。激光能量具有高度的自由性，能够被有效利用，能够更加有效地满足工艺的需求。特别是激光在时间、空间以及频率上的可调制性使之能够更好地满足每一加工过程的需要，如图 1 所示。

本书的书名取为“定制光”，主要是因为激光技术具有丰富的内容——一系列的工艺，如切割、制孔、连接、刻蚀、钎焊、硬化、合金化、镭覆、清洗、成形以及打标等。由此带动了激光技术的广泛应用，可应用于运输、能源、环境、健康和产品制造等领域。目前的研究表明：这些应用促使着激光技术不断更新。对未来的憧憬以及技术的进步在我们这一时代为创新赋予了必要的驱动力。

本书源自 12 年前亚琛工业大学的激光技术系列讲座。该系列讲座由两部分组成：激光技术 I “激光光源”和激光技术 II “激光应用”。本书的基础为激光应用，并补充了许多研究人员感兴趣的激光应用领域最新进展。本书从内容上可以分为两部分：一部分为材料加工基础，主要阐述材料加工过程的基本物理现象；第二部分为激光技术的应用，首先论述了工业用重要光源的特

征。第 10~17 章论述了激光在制造领域中的应用。这里不仅包括目前工业上的应用,还包括一些具有较大应用潜力的前沿技术,如激光快速成形以及激光清洗技术。第 19 章介绍了激光测量技术。

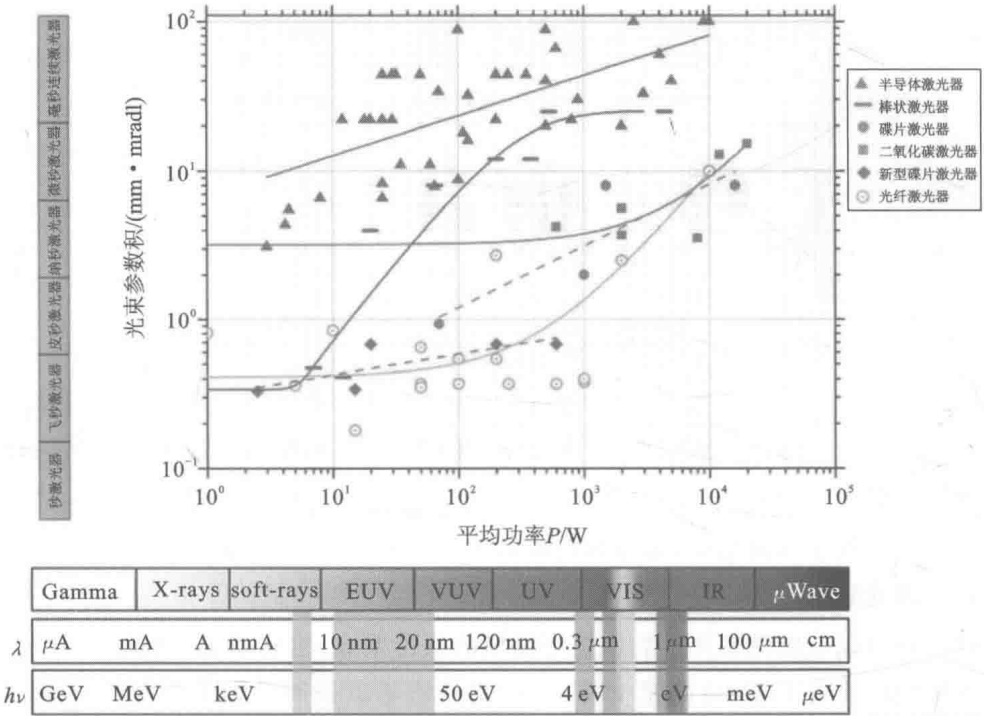


图 1

图 1 中的激光为商业上可获得的激光(不包括目前正处于研发阶段的激光),其范围包括连续激光到低于飞秒脉冲长度的激光,波长范围从远红外(IR)到几个纳米,光束质量(可聚焦性)在时域范围和频域范围内连续增加。

本书的撰写由弗朗恩霍夫激光技术研究所(ILT)以及亚琛工业大学激光技术研究所(LLT)的多名科学家完成。书中总结了他们多年以来在激光加工领域所做的基础研究和应用研究的成果。

特别感谢 R. Wester 教授准确、系统地介绍了本书的第一部分“材料加工基础”。感谢 Torsten Mans 先生在本书第二部分编写过程中所做的协调工作,使这部分内容成为本书中最为宏大的部分。本书每一章的作者都为本书出版做出了巨大的贡献。下面按照字母顺序(从上到下)列出他们的名字:

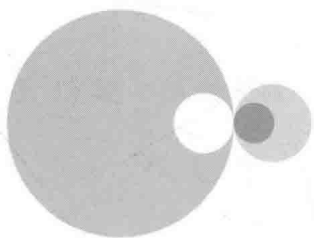
- Ü. Aydin K. Klages F. Schmitt
- G. Backs K. Kowalick F. Schneider

A. L. BoGlea	T. Kuhlen	T. Schwendt
L. Bosse	A. Lammot	B. Seme
K. Boucke	T. Mans	O. Steffens
M. Brajdic	W. Meiners	A. Temmler
C. Farkas	R. Noll	K. Walther
A. Gasse	A. Olowinsky	W. Wawers
A. Gillner	C. Over	A. Weisheit
J. Gottmann	D. Petring	R. Wester
A. Horn	B. Regaard	E. Willenborg
C. Janzen	A. Roesner	K. Wissenbach
C. Johnigk	U. A. Russek	N. Wolf
S. Kaierle	F. Sari	

如果读者对本书有作为教材的需求或者对其中的某一章节有特殊的兴趣,可以与上述研究人员联系。无论是基础问题还是较深入的应用问题或者技术方面的探讨我们都会提供相应的服务。我们希望能够通过这样的方法促进激光技术的创新,以及该技术在应用领域的扩展。

Reinhart Poprawe

亚 琛,2010年10月



目录

第 1 章 介绍 /1

第 2 章 电磁辐射在工件表面的行为 /5

2.1 Fresnel 公式 /5

2.2 激光技术领域 Fresnel 公式的应用 /11

第 3 章 激光辐照发生的吸收 /13

3.1 现象描述 /14

3.2 绝缘体 /17

3.3 等离子体的介电性能 /22

3.4 金属材料的吸收 /26

3.5 Drude 吸收模型 /28

3.6 金属材料的吸收率及与温度的关系 /31

3.7 表面状态的影响 /34

第 4 章 能量传递和热传导 /38

4.1 能量传递公式 /38

- 4.2 热传导机制 /40
- 4.3 具有常数系数以及 Green 函数的热传导公式 /41
- 4.4 与温度相关的热物理系数 /53
- 4.5 短脉宽时的热传导 /54

第 5 章 热力学 /56

- 5.1 弹性变形 /56
- 5.2 热致压应力 /58
- 5.3 缩性变形 /58

第 6 章 相变 /61

- 6.1 铁碳相图 /62
- 6.2 珠光体组织硬化 /66

第 7 章 熔池流动 /70

- 7.1 质量、动量和能量守恒 /70
- 7.2 边界条件 /71
- 7.3 平面势流 /74
- 7.4 层状边界层流 /79

第 8 章 光致蒸发 /84

- 8.1 热动态平衡中的蒸发压力 /85
- 8.2 蒸发率 /86
- 8.3 光致蒸发过程中的粒子和能量守恒 /90
- 8.4 蒸发过程被描述为燃烧波 /94
- 8.5 蒸发和 Knudsen 层的动态模型 /98

第 9 章 等离子物理 /102

- 9.1 Debye 半径和定义 /104

- 9.2 等离子体热力学以及静力学的一些结果 /107
- 9.3 等离子体的传递特性 /118
- 9.4 电磁波与等离子体之间的相互作用 /123
- 9.5 非平衡过程 /128
- 9.6 LTE 模型中的等离子体辐射 /132

第 10 章 激光光源 /140

- 10.1 CO₂激光器 /140
- 10.2 固体激光器 /143
- 10.3 半导体激光器 /148
- 10.4 准分子激光器 /154

第 11 章 表面处理 /158

- 11.1 激光相变硬化 /158
- 11.2 激光重熔 /172
- 11.3 激光辐照抛光 /182
- 11.4 采用重熔的方法进行表面结构制备 /189
- 11.5 合金化和弥散化 /194
- 11.6 激光熔覆 /203
- 11.7 脉冲激光沉积工艺 /212

第 12 章 弯曲成形 /231

- 12.1 热弯曲 /231

第 13 章 快速原型技术和快速模具制造 /243

- 13.1 激光选区烧结 /243
- 13.2 立体印制 /250
- 13.3 叠层加工技术 /252

第 14 章 连接技术 /255

- 14.1 热传导焊接 /255
- 14.2 深熔焊 /261
- 14.3 激光复合焊接 /266
- 14.4 热塑性材料的激光焊接 /273
- 14.5 激光透射熔接 /295
- 14.6 钎焊 /306
- 14.7 激光微焊接 /314

第 15 章 去除技术 /331

- 15.1 微观技术和纳米结构制备 /331
- 15.2 激光清洗技术 /344

第 16 章 激光制孔技术 /353

- 16.1 介绍 /353
- 16.2 单脉冲制孔 /355
- 16.3 叩击制孔 /360
- 16.4 穿透制孔 /365
- 16.5 环转制孔 /370

第 17 章 激光分离技术 /384

- 17.1 激光氧气切割 /384
- 17.2 熔化切割 /391
- 17.3 高速切割 /398
- 17.4 升华切割 /402
- 17.5 激光精细切割 /407

第 18 章 系统技术 /416

18.1 过程监控 /416

18.2 激光材料加工的数控机床 /440

第 19 章 激光测量技术 /463

19.1 光三角法 /463

19.2 干涉测量法 /477

19.3 光致荧光法 /489

19.4 共焦显微术 /498

19.5 光学存储介质的读取 /505

19.6 激光致击穿光谱学 /509

附录 A 光学 /531

A.1 Fresnel 公式的推导 /531

A.2 等离子体的介电性能 /534

A.3 通过复数描述电磁场 /536

附录 B 连续体力学 /539

B.1 坐标系统和变形梯度 /539

B.2 变形 /541

B.3 时间导数 /543

B.4 Reynold 的传输理论 /544

B.5 质量平衡 /546

B.6 动量平衡 /546

B.7 材料公式 /548

B.8 能量公式 /551

B.9 能量传输计算中几个重要数学公式的总结 /554

B.10 金属中的扩散 /557

附录 C 光致蒸发 /560

C.1 Clausius-Clapeyron 公式 /560

C.2 与温度相关的蒸发焓 /561

C.3 速度转矩 /562

附录 D 等离子物理 /564

D.1 热动力学的几个结果 /564

D.2 多次加载离子的概括 /566

附录 E 文中符号和常量的意义 /568

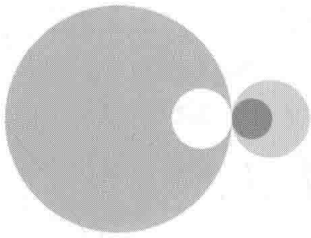
E.1 公式中的符号 /570

E.2 物理常数 /577

E.3 特征数 /577

E.4 参考状态 /578

E.5 材料常数 /578



第 1 章 介 绍

1960年,第奥多·梅曼发明了第一台激光器^[2]。对激光与材料之间的相互作用,以及其在材料加工领域的应用研究是从1963年开始的^{[3][1]}。目前许多激光加工工艺在工业上得到了应用。虽然激光加工技术在工业上得到了应用,但是激光技术的进一步发展仍然是物理学家关注的焦点。首先这是由激光发展的历史以及发展现状造成的,因为激光技术只是在最近几年才发展到工程领域而成为工程师们关注的焦点。激光加工过程即激光与材料相互作用过程中发生的物理过程非常复杂,因而直到今日对物理学家来说它还是一个挑战,这种挑战也将一直持续到未来。

图1.1所示的为激光材料加工过程示意图。这里列出的参数对加工过程有着显著的影响,但是它们只是对激光加工过程有影响的一小部分因素。除这些参数外,被加工工件中发生的一些流体力学现象以及等离子形成等也在激光材料加工过程中起到举足轻重的作用。具有这些庞大的参数系统的过程不是只通过简单尝试就可以进行优化的,而是需要通过系统的试验,对激光与材料加工过程发生的物理过程进行更加充分的理解。激光到达工件表面后,部分激光被材料吸收,部分被反射。吸收的能量可以通过下式表示,即

$$W_A = \iint A(\lambda, I) I(\lambda, r, t) d^2 r dt \quad (1.1)$$

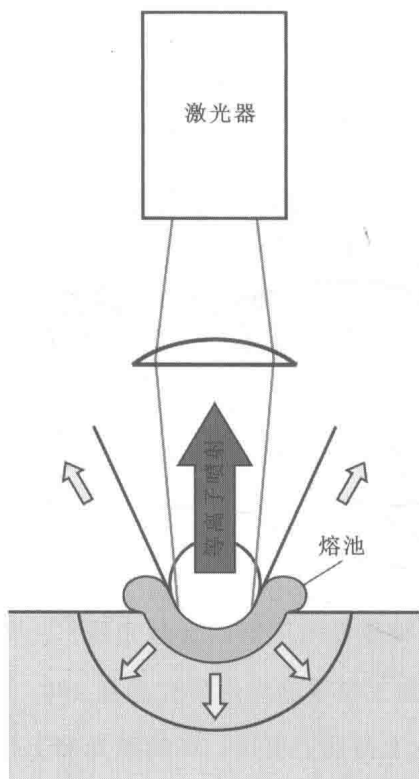


图 1.1 工件表面光束半径的大小由波长、光束质量和聚焦光学系统决定。激光辐照时工件对激光的吸收取决于与波长相关的材料本身性能、工件表面的状态和几何形貌。被吸收的激光引起材料的升温、熔化和蒸发。液态金属运动的主要动力来自剪切力(表面张力或者气束的梯度)和压力。压力是由气束或者蒸发引起。蒸气吸收大部分的激光能量并在工件与激光之间造成屏蔽

这里 $A(\lambda, I)$ 是吸收系数,它的大小与波长和能量密度有关,而 $I(\lambda, r, t)$ 是波长为 λ 时的入射能量密度,它是空间和时间的函数。吸收除取决于激光的波长和偏振外,还取决于材料的性能、工件表面的状态以及几何形貌。光束截面取决于波长、光束质量和聚焦系统。由于热传导的作用,热前沿进入材料内部。工件的温度取决于吸收的激光能量密度 $I_{\text{abs}} = A_{\lambda}(I)I_{\lambda}$ 、光束的入射时间 t_P 、工件表面的光束直径 $2r_B$ 、工件相对于光束的进给速度 v_P 和材料的热物性性能如热传导能力 K 以及热容 c :