



国际机械工程先进技术译丛

材料激光工艺过程

(原书第3版)

LASER MATERIAL PROCESSING

(荷兰) 威廉 M. 斯顿 著
蒙大桥 张友寿 何建军 等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国际机械工程先进技术译丛

材料激光工艺过程

(原书第3版)

(荷兰) 威廉 M. 斯顿 著
蒙大桥 张友寿 何建军 等译
张友寿 李盛和 审校



机械工业出版社

本书对激光光学原理、材料加工背景和材料激光加工的新领域及其最新进展进行了全面而系统的介绍。该书共 11 章: 第 1 章, 背景及用途; 第 2 章, 激光光学基础; 第 3 章, 激光切割; 第 4 章, 激光焊接; 第 5 章, 热流理论; 第 6 章, 激光表面处理; 第 7 章, 激光快速成型和微型制造; 第 8 章, 激光弯曲或激光成型; 第 9 章, 激光清洁; 第 10 章, 激光自动化及在线监测; 第 11 章, 激光安全防护。

本书可供从事激光技术和材料加工的工艺技术人员及大专院校相关专业的师生参考。

Translation from the English language edition: "Laser Material Processing" by Steen; ISBN 978-1-85233-698-1 3Th edition Copyright © 2003 Springer, The Netherlands as a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved.

本书中文版由机械工业出版社独家出版发行。未经机械工业出版社的书面许可, 不得以任何方式复制、传播本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2008-4827

图书在版编目(CIP)数据

材料激光工艺过程: 原书第 3 版/(荷)斯腾(Steen, W. M.)著; 蒙大桥等译. —北京: 机械工业出版社, 2012.9

(国际机械工程先进技术译丛)

ISBN 978-7-111-38515-8

I. ①材… II. ①斯…②蒙… III. ①工程材料—激光加工 IV. ①TB3②TG665

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 109083 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 吕德齐 责任编辑: 吕德齐 王彦青

版式设计: 霍永明 责任校对: 肖琳

封面设计: 鞠杨 责任印制: 杨曦

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2012 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·18.5 印张·456 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-38515-8

定价: 69.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

策划编辑: (010)88379772

社服务中心 : (010)88361066 网络服务

销售一部 : (010)68326294 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部 : (010)88379649 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

读者购书热线: (010)88379203 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

封面无防伪标均为盗版

翻译和审校人员

译者：蒙大桥 张友寿 何建军 何 菊 李盛和 张永彬
张新建 殷雪峰 王 巍 黄 俊 张红玉 陈雄文
章节审校：吴学义 倪然夫 宾 朋 陈勇忠
总 审 校：张友寿 李盛和

谢 辞

作者要感谢支持本书出版的研究院的很多学生，该研究院是由帝国学院和利物浦大学共同领导的。现在，研究院的很多学生还继续经营着自己的激光公司，他们从事教学工作和其他可以盈利的激光材料加工方面的业务，这是一件非常令人高兴的事情。

作者要特别感谢现在还领导着利物浦激光研究团队的 Ken Watkins 教授，他撰写了第 9 章激光清洁；在剑桥大学拥有自己的激光研究团队的 Bill O'Neill 博士，对书稿的第 1 章、第 2 章及第 7 章的部分材料进行了审校；在 UMIST 拥有自己的激光研究团队的李林教授对书稿的第 10 章进行了审校；在巴基斯坦从事激光研究的 Rehan Akhter 博士审校并整理了书稿第 4 章的前言部分，Heriot-Watt 大学的 Dennis Hall 和 Julian Jones 教授对本书中激光亮度及聚焦方面的理论给予了指导。最后，还要诚心感谢妻子 Margaret，她为本书第 3 版的顺利完成营造了一个良好的写作氛围。

一幅好的插图抵得上千言万语，就好像吃药时加一匙糖有助于下咽一样，作者也对为本书提供插图的 Patrick Wright 和 Noel Ford 两位漫画家表示感谢。

本书封面为一幅 Nd-YAG 激光打孔照片，拍摄于 1997 年贝肯黑德（Birkenhead）的新激光工程中心开幕之日，并得到了伯纳德·罗斯（Bernard Rose）的摄影授权。

译 丛 序 言

一、制造技术长盛永恒

先进制造技术是20世纪80年代提出的，它由机械制造技术发展而来，通常可以认为它是将机械、电子、信息、材料、能源和管理等方面的技术，进行交叉、融合和集成，综合应用于产品全寿命周期的制造全过程，包括市场需求、产品设计、工艺设计、加工装配、检测、销售、使用、维修、报废处理、回收利用等，以实现优质、敏捷、高效、低耗、清洁生产，快速响应市场的需求。因此，当前的先进制造技术是以产品为中心，以光机电一体化机械制造技术为主体，以广义制造为手段，具有先进性和时代感。

制造技术是一个永恒的主题，与社会发展密切相关，是设想、概念、科学技术物化的基础和手段，是所有工业的支柱，是国家经济与国防实力的体现，是国家工业化的关键。现代制造技术是当前世界各国研究和发展的主题，特别是在市场经济高度发展的今天，它更占有十分重要的地位。

信息技术的发展引入到制造技术，使制造技术产生了革命性的变化，出现了制造系统和制造科学。制造系统由物质流、能量流和信息流组成，物质流是本质，能量流是动力，信息流是控制；制造技术与系统论、方法论、信息论、控制论和协同论相结合就形成了新的制造学科。

制造技术的覆盖面极广，涉及机械、电子、计算机、冶金、建筑、水利、电子、运载、农业以及化学、物理学、材料学、管理科学等领域。各个行业都需要制造业的支持，制造技术既有普遍性、基础性的一面，又有特殊性、专业性的一面；制造技术既有共性，又有个性。

我国的制造业涉及以下三方面的领域：

- 机械、电子制造业，包括机床、专用设备、交通运输工具、机械设备、电子通信设备、仪器等；
- 资源加工工业，包括石油化工、化学纤维、橡胶、塑料等；
- 轻纺工业，包括服装、纺织、皮革、印刷等。

目前世界先进制造技术沿着全球化、绿色化、高技术化、信息化、个性化和服务化、集群化六个方向发展，在加工技术上主要有超精密加工技术、纳米加工技术、数控加工技术、极限加工技术、绿色加工技术等，在制造模式上主要有自动化、集成化、柔性化、敏捷化、虚拟化、网络化、智能化、协作化和绿色化等。

二、图书交流源远流长

近年来，国际间的交流与合作对制造业领域的发展、技术进步及重大关键技术的突破起到了积极的促进作用，制造业科技人员需要及时了解国外相关技术领域的最新发展状况、成果取得情况及先进技术应用情况等。

必须看到，我国制造业与工业发达国家相比，仍存在较大差距。因此必须加强原始创新，在实践中继承和创新，学习国外的先进制造技术和经验，引进、消化、吸收、创新，提

高自主创新能力，形成自己的创新体系。

国家、地区间的学术、技术交流已有很长的历史，可以追溯到唐朝甚至更远一些，唐玄奘去印度取经可以说是一次典型的图书交流佳话。图书资料是一种传统、永恒、有效的学术及技术交流方式，早在 20 世纪初期，我国清代学者严复就翻译了英国学者赫胥黎所著的《天演论》，其后学者周建人翻译了英国学者达尔文所著的《物种起源》，对我国自然科学的发展起到了很大的推动作用。

图书是一种信息载体，图书是一个海洋，虽然现在已有网络、光盘、计算机等信息传输和储存手段，但图书更具有广泛性、适应性、系统性、持久性和经济性，看书总比在计算机上看资料要方便习惯，不同层次的要求可以参考不同层次的图书，不同职业的人员可以参考不同类型的技术图书，同时它具有比较长期的参考价值 and 收藏价值。当然，技术图书的交流具有时间上的滞后性，不够及时，翻译的质量也是个关键问题，需要及时、快速、高质量的出版工作支持。

机械工业出版社希望能够在先进制造技术的引进、消化、吸收、创新方面为广大读者做出贡献，为我国的制造业科技人员引进国外先进制造技术的出版资源，翻译出版国际上优秀的制造业先进技术著作，从而能够提升我国制造业的自主创新能力，引导和推进科研与实践水平的不断进步。

三、选译严谨，质高面广

1) 精品重点高质 本套丛书作为我社的精品重点书，在内容、编辑、装帧设计等方面追求高质量，力求为读者奉献一套高品质的丛书。

2) 专家选译把关 本套丛书的选书、翻译工作均由国内相关专业的专家、教授、工程技术人员承担，充分保证了内容的先进性、适用性和翻译质量。

3) 引纳地区广泛 主要从制造业比较发达的国家引进一系列先进制造技术图书，组成一套《国际机械工程先进技术译丛》。当然其他国家的优秀制造科技图书也在选择之内。

4) 内容先进丰富 在内容上具有先进性、经典性、广泛性，应能代表相关专业的技术前沿，对生产实践有较强的指导、借鉴作用。本套丛书尽量涵盖制造业各行业，例如机械、材料、能源等，既包括对传统技术的改进，又包括新的设计方法、制造工艺等技术。

5) 读者层次面广 面对的读者对象主要是制造业企业、科研院所的专家、研究人员和工程技术人员，高等院校的教师和学生，可以按照不同层次和水平要求各取所需。

四、衷心感谢不吝指教

首先要感谢许多积极热心支持出版《国际机械工程先进技术译丛》的专家学者，他们积极推荐国外相关优秀图书，仔细评审外文原版书，推荐评审和翻译的知名专家，特别要感谢承担翻译工作的译者，对各位专家学者所付出的辛勤劳动表示深切敬意，同时要感谢国外各家出版社版权工作人员的热心支持。

本套丛书希望能对广大读者的工作提供切实的帮助，欢迎广大读者不吝指教，提出宝贵意见和建议。

中文版序

英国 William M. Steen 教授和帝国学院、利物浦大学的教授们于 1991 年编著了《Laser Material Processing》一书，书中用通俗的语言叙述和总结了他们在激光加工工艺方面的研究成果，以及若干新发展的激光加工技术。故本书将《Laser Material Processing》原书第 3 版（2003 版）全文译出，可供从事材料加工专业的师生和专业技术人员阅读。

本书的特点是将激光束对不同材料、不同工艺过程的作用以物理学为基础进行描述。本书各章对不同工艺过程都有相关的理论分析和表述，为此，本书的书名为《材料激光工艺过程》是很恰当的。例如，当我们开展激光焊接工艺的研究时，遇到一些激光能量对焊接过程的影响问题，如激光光斑尺寸大小、光束波长、能量参数、材料热容量、材料的反射和吸收特性、材料的初始温度、工件移动速度等，都需要对一些基本的物理过程进行了解。在焊接过程中，激光输入能量对焊接区的熔化、凝固过程是一个区域性的冶金学问题，焊区材料从熔化到凝固到再结晶，熔池和热影响区的凝固冷却过程和重熔材料的晶粒变化、相变及冷却后的焊接接头残余应力等问题，都是我们十分关心的。为此，了解激光能量对材料作用的基本物理模型，对优化焊接工艺条件和焊接参数，都具有重要的参考意义。通过这些焊接过程物理现象的描述，对培训激光焊接操作者也有很好的帮助。

本书的第 1 章介绍了激光发展背景和应用开发，以及开发应用市场的前景。第 2 章激光光学基础，介绍了基础光学特性。第 3 章激光切割，是目前工业应用最广泛的加工工艺方法，介绍了激光切割过程的理论模型和实际性能。第 4 章激光焊接，介绍了工艺过程的机理 Keyholes 和 Plasmas，有助于我们理解焊接过程的物理现象。第 5 章专门对激光焊接过程的热流理论进行了分析，有助于具体焊接参数的选择和优化，并为焊接过程的计算建模分析提供了物理图像和基础理论。第 6 章激光表面处理，也是当前激光加工应用较多、较广的领域，本章叙述了激光对材料表面热处理的基本原理、工艺过程、熔化和凝固过程及机理。第 7 章激光快速成型和微型制造是激光制造工艺较新的发展内容。第 8 章激光弯曲或激光成型，介绍了工艺过程的基本原理和效应分析。第 9 章激光清洁，介绍了一些新开发的激光清洁工艺及其清洗机理。第 10 章激光自动化及在线监测，介绍了工艺过程的在线监测和自动控制技术，提供了先进的激光工艺过程、质量控制的理念和方法。第 11 章激光安全防护，较系统地论述了激光工艺过程的安全性，以及如何有效避免事故发生，保证人身安全。

纵览本书内容，激光对材料加工工艺过程的每种工艺都有基础理论和实际应用的描述。本书可作为学生和工艺操作者的基础教材，通过对书中内容的了解可引发深入的研

究思路，所以值得相关专业人员去阅读。本书每一章节后列出的参考文献，虽然发表的年份较早，但也可供参考，当今后把“材料激光工艺”导向近代研究领域时，可从文献中找到一些线索。

中国工程院院士

中国工程物理研究院研究员

**于中国工程物理研究院
(四川省绵阳科学城)**

译者序

激光是基于原子、分子受激发射放大而产生的一种相干辐射光，具有极高的方向性、单色性、相干性和亮度。激光的这些重要特性可为材料加工和表面处理提供所需的能量。激光器诞生不久，便开始把激光用于材料的加工和表面处理的研究之中。五十多年来，材料激光加工和表面处理技术发展迅速，已遍布材料加工工艺技术及表面处理的许多新领域，如在工业上广泛使用激光进行材料的焊接、切割、钻孔、标记、表面处理、清洗以及材料的激光弯曲成型等，大大促进了材料激光加工工艺力学和激光表面工程技术的发展，丰富和发展了材料激光加工领域的知识。

William M. Steen 教授和帝国学院、利物浦大学的教授们所著的《Laser Material Processing》一书，全面系统地介绍了激光光学原理、材料加工背景和材料激光加工的新领域及其最新进展，内容完整丰富。这些内容有助于从事激光技术和材料加工的工艺技术人员在工作中参考。中国工程院院士徐志磊先生向从事材料激光加工工艺的科研人员和工程技术人员推荐了此书，并建议从事材料激光加工的科研人员将其译成中文，把它作为材料激光加工工程的培训教材和参考书。

全书共 11 章。译文根据 2003 年版本（第 3 版）全文译出。第 1 章，背景及用途；第 2 章，激光光学基础；第 3 章，激光切割；第 4 章，激光焊接；第 5 章，热流理论；第 6 章，激光表面处理；第 7 章，激光快速成型和微型制造；第 8 章，激光弯曲或激光成型；第 9 章，激光清洁；第 10 章，激光自动化及在线监测；第 11 章，激光安全防护。由激光加工研究小组的成员承担翻译工作，最后由张友寿、李盛和、张永彬等同志审校定稿。

本书的翻译、审校、定稿和出版工作，得到了罗文华、赖新春、杨江荣等同志和机械工业出版社的大力支持；科技情报档案室的郝宁、付蓉等同志也付出了很大精力；翻译者、审校者和组织者以及科技情报档案室的密切合作和相互支持，才使本译著得以顺利出版，我谨向他们表示深切的谢意。希望本译著的出版有助于推动材料激光加工技术、激光表面处理与改性技术的发展和人才培养。

应该指出，近年来激光技术和材料激光加工工艺的发展非常快，可以说是日新月异，许多新技术、新领域、新方法、新工艺、新术语不断涌现，由于有些还没有明确规范和定义，也为最终的定稿工作增加了不少困难；加之翻译、审校者的水平有限，译文的缺点和错误在所难免，恳请读者批评指正。

中国工程物理研究院研究员：
于四川省绵阳科学城

目 录

谢辞

译丛序言

中文版序

译者序

绪论	1
参考文献	7
第1章 背景及用途	9
1.1 激光器工作原理	9
1.1.1 整体结构	9
1.1.2 受激发射现象	11
1.2 工业激光器的类型	17
1.2.1 CO ₂ 激光器	17
1.2.2 CO 激光器	22
1.2.3 固体激光器	22
1.2.4 半导体激光器	24
1.2.5 准分子激光器	26
1.3 不同激光器之间的比较	26
1.4 激光的应用	27
1.4.1 高亮度	28
1.4.2 准直	29
1.4.3 长度测量	29
1.4.4 污染监测	31
1.4.5 速度测量	31
1.4.6 全息照相	34
1.4.7 斑纹干涉仪	35
1.4.8 检查	35
1.4.9 分析技术	36
1.4.10 信息记录	36
1.4.11 通讯	38
1.4.12 热源	38

1.4.13 医疗	39
1.4.14 印刷	41
1.4.15 同位素分离	42
1.4.16 核聚变	42
1.5 激光的商业应用	42
参考文献	43
第2章 激光光学基础	45
2.1 电磁辐射特性	45
2.2 电磁辐射与物质的相互作用	47
2.2.1 荧光性	49
2.2.2 受激 Raman 散射	49
2.2.3 受激 Brillouin 散射	49
2.2.4 二次谐波的产生	50
2.2.5 Kerr 光学效应	50
2.3 反射和吸收	50
2.3.1 波长的影响	52
2.3.2 温度的影响	52
2.3.3 表面薄膜的影响	52
2.3.4 入射角度的影响	53
2.3.5 材料及表面粗糙度的影响	53
2.4 折射	53
2.4.1 Rayleigh 散射	55
2.4.2 Mie 散射	55
2.4.3 Bulk 散射	55
2.5 干涉	56
2.6 衍射	56
2.7 激光的特征	56
2.7.1 波长	56
2.7.2 相干性	57
2.7.3 模式和光束直径	57
2.7.4 偏振	59
2.8 单一透镜的聚焦	59
2.8.1 焦斑的最终尺寸	60
2.8.2 焦深	67
2.9 光学元器件	67
2.9.1 双谱线透镜	67

XII 材料激光工艺过程

2.9.2 消偏器	68
2.9.3 准直仪	68
2.9.4 金属光学	69
2.9.5 衍射光学元件-全息透镜	70
2.9.6 激光扫描系统	71
2.9.7 光纤传输系统	71
参考文献	73
第3章 激光切割	75
3.1 引言	75
3.2 切割工艺-具体操作	76
3.3 切割方式	77
3.3.1 气化切割/打孔	78
3.3.2 熔化切割——熔融和吹除	79
3.3.3 反应燃烧切割	84
3.3.4 可控断裂切割	85
3.3.5 激光刻划	86
3.3.6 冷切割	86
3.3.7 氧气辅助激光切割-LASOX 工艺	86
3.4 激光切割的理论模型	88
3.5 实用特性	88
3.5.1 光束特性	88
3.5.2 传输特性	91
3.5.3 气体性质	93
3.5.4 材料特性	96
3.5.5 实用技巧	97
3.6 应用实例	97
3.6.1 模切板切割	98
3.6.2 石英管的切割	98
3.6.3 仿形切割	98
3.6.4 布料切割	98
3.6.5 航空材料	99
3.6.6 切割玻璃纤维	99
3.6.7 切割凯芙拉复合材料	99
3.6.8 原型车制造	99
3.6.9 切割氧化铝和绝缘板	99
3.6.10 家具工业	99

3.6.11 多孔水管的打孔	100
3.6.12 香烟纸穿孔	100
3.6.13 柔性版印刷滚轮	100
3.6.14 放射性材料的切割	100
3.6.15 电子工业的应用	100
3.6.16 激光打孔	101
3.6.17 废品回收	102
3.6.18 激光加工	103
3.6.19 船舶制造	103
3.6.20 激光冲压	103
3.6.21 自行车和管结构的制造	103
3.6.22 轨道车辆制造中的切割和焊接	103
3.7 成本实例	103
3.8 工艺变化	104
3.8.1 电弧增强激光切割	104
3.8.2 加热切削	105
3.9 未来发展	105
3.9.1 较高功率的激光器	105
3.9.2 辅助切割能源	105
3.9.3 改善能量耦合	105
3.9.4 更小的焦斑尺寸	105
3.9.5 增加拖拽能力	105
3.9.6 增加流动性	106
3.10 功率需求实例	106
参考文献	106
第4章 激光焊接	110
4.1 引言	110
4.2 工艺布局	112
4.3 焊接加工机制-匙孔和等离子体效应	113
4.4 激光焊接的影响因素	116
4.4.1 激光功率	117
4.4.2 光斑尺寸和模式	120
4.4.3 偏振	120
4.4.4 光束波长	120
4.4.5 焊接速度	121
4.4.6 焦点位置	122

4.4.7 接头形状	123
4.4.8 保护气和气压	127
4.4.9 保护气压力的影响	129
4.4.10 材料性能的影响	130
4.4.11 重力	132
4.5 其他焊接工艺	132
4.5.1 激光复合焊	132
4.5.2 双光束焊接	132
4.5.3 移动和旋转光束	133
4.6 应用	133
4.7 成本估计	136
参考文献	138
第5章 热流理论	140
5.1 引言	140
5.2 一维热流分析模型	142
5.3 静态点源分析模型	145
5.3.1 瞬态点热源	145
5.3.2 连续点热源	145
5.3.3 点热源以外的其他热源	145
5.4 移动点热源的分析模型	146
5.5 其他的表面加热模型	147
5.5.1 Ashby-Shercliffe 模型: 移动多维曲面线热源	147
5.5.2 Davis 模型: 移动高斯热源	148
5.6 匙孔模型分析-线热源解	148
5.7 移动点-线热源解	150
5.8 有限差分模型	150
5.9 半定量模型	152
5.10 流体模型	155
5.11 应力模型	155
5.12 结论	155
5.13 符号列表	155
参考文献	156
第6章 激光表面处理	158
6.1 引言	158
6.2 激光热处理	159

6.2.1	热流	163
6.2.2	扩散质量流动	165
6.2.3	相变过程机制	165
6.2.4	相变钢的性能	167
6.3	激光表面熔化	168
6.3.1	凝固方式	172
6.3.2	凝固组织尺度	173
6.3.3	熔池内的质量流动	174
6.4	激光表面合金化	175
6.4.1	工艺变量	175
6.4.2	应用	176
6.5	激光涂敷	177
6.5.1	预置粉末激光涂敷	177
6.5.2	吹粉激光涂敷	179
6.6	粒子注入	183
6.7	表面纹理处理	184
6.8	增强电镀	185
6.9	激光化学蒸气沉积	186
6.10	激光物理气相沉积	187
6.11	非接触弯曲	187
6.12	磁畴控制	187
6.13	激光清理和涂料去除	188
6.14	表面粗糙化	188
6.15	粗琢	188
6.16	微加工	189
6.17	激光标识	189
6.18	冲击硬化	190
6.19	结论	192
	参考文献	192
第7章	激光快速成型和微型制造	197
7.1	引言	197
7.2	加工范围	198
7.2.1	制造类型	198
7.2.2	快速成型技术按原材料分类	198
7.3	CAD 文件处理	198
7.4	分层制造问题	200

7.4.1	综述	200
7.4.2	台阶式分级	200
7.4.3	层厚的选择	200
7.4.4	精确度	200
7.4.5	部件取向	200
7.4.6	支撑结构	200
7.5	特殊工艺	200
7.5.1	立体光刻成型	200
7.5.2	激光选择性烧结	203
7.5.3	叠层实体制造	205
7.5.4	激光定向熔铸	206
7.6	快速制造技术	207
7.6.1	硅树脂橡胶浇模	207
7.6.2	熔模铸造	207
7.6.3	砂模铸造	208
7.6.4	激光定向铸造	208
7.6.5	快速成型工具	208
7.7	应用	208
7.8	结论	209
	参考文献	209
第8章	激光弯曲或激光成型	211
8.1	引言	211
8.2	加工机制	211
8.2.1	热梯度机制	211
8.2.2	点源机制	213
8.2.3	褶皱机制	213
8.2.4	镦压机制	213
8.3	理论模型	213
8.3.1	热梯度机制模型	214
8.3.2	褶皱机制模型	217
8.3.3	镦压机制模型	219
8.4	操作特点	220
8.4.1	功率影响	220
8.4.2	速度的作用-“线能量”	221
8.4.3	材料的影响	221
8.4.4	厚度的影响-弯曲增厚	221