



广州中国科学院工业技术研究院

工业技术专著系列丛书

Lasertechnik für die Fertigung

Grundlagen, Perspektiven und
Beispiele für den innovativen Ingenieur

激光制造工艺

基础、展望和创新应用实例

(德) Reinhart Poprawe 著

张冬云 译

张庆茂 刘伟平 审

清华大学出版社

 Springer



广州中国科学院工业技术研究院工业技术专著系列丛书

Lasertechnik für die Fertigung

Grundlagen, Perspektiven und
Beispiele für den innovativen Ingenieur

激光制造工艺

基础、展望和创新应用实例

(德) Reinhart Poprawe 著

张冬云 译

张庆茂 刘伟平 审

清华大学出版社
北京

 Springer



北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2007-5043

Translation from the English language edition:

Lasertechnik für die Fertigung, by Reinhart Poprawe

Copyright ©Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005

Springer is a part of Springer Science+Business Media

All Rights Reserved.

本书中文简体字翻译版由德国施普林格公司授权清华大学出版社在中华人民共和国境内(不包括中国香港\澳门特别行政区和中国台湾地区)独家出版发行。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

激光制造工艺:基础、展望和创新应用实例/(德)浦诺威(Poprawe,R.)著;张冬云译. —北京:清华大学出版社,2008.4

(广州中国科学院工业技术研究院工业技术专著系列丛书)

ISBN 978-7-302-17263-5

I. 激… II. ①浦… ②张… III. 激光加工 IV. TG665

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 041256 号

责任编辑:庄红权

责任校对:刘玉霞

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

地址:北京清华大学学研大厦 A 座

http://www.tup.com.cn

邮编:100084

社总机:010-62770175

邮购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印刷者:北京市人民文学印刷厂

装订者:三河市李旗庄少明装订厂

经销:全国新华书店

开本:185×230 印张:26.25

字数:553千字

版次:2008年4月第1版

印次:2008年4月第1次印刷

印数:1~4000

定价:39.00元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:010-62770177 转 3103 产品编号:026217-01

序

为加强自主创新,提高广州和珠江三角洲地区工业产业的核心竞争力,促进经济的快速发展,广州市委、市政府解放思想,精心筹划,与中国科学院合作在国内率先创办了工业应用技术研究机构——广州中国科学院工业技术研究院(简称广州工研院)。广州工研院着力打造工业技术公共创新平台,聚集中国科学院、国内外高等院校、应用研究机构的研发资源和研发成果,与珠江三角洲工业企业紧密合作,共同开展面向工业产业共性技术、高新技术产业核心技术及社会公共事业关键技术的集成创新和自主创新,为工业产业和高新技术产业经济及现代服务业的发展提供科技驱动力。

根据广州与珠江三角洲产业布局和科技发展规划,广州工研院围绕工业装备先进制造、激光与光电、现代物流、机器人与自动化、新材料、工业设计等领域设立研究中心,开展系统的应用性创新研发活动。同时,广州工研院十分注重技术产业化应用和创业,以及人才的培养,期望通过自身的努力,为科技创新族群的共同发展尽自己应尽之力。据此,广州工研院组织编著和翻译出版系列国内外优秀科技书籍,将国内外相关领域研究成果推介给国内同行以供借鉴。《激光制造工艺:基础、展望和创新应用实例》是翻译出版系列的第一本。

自1960年美国人梅曼发明了第一台红宝石激光器后,不同类型的激光发生器不断涌现,激光焊接、切割、表面加工、打孔、打标等加工工艺在制造业的应用层出不穷,这些工艺与大规模生产的结合为现代制造业增添了活力。德国在激光及其应用技术的进步中起到了引领前沿的作用,在相关的关键技术领域走在了世界的前列。如将激光焊接技术在20世纪80年代中期首先应用于车身制造,在90年代中期应用于船舶制造领域,在21世纪初期应用于A380大飞机机身制造中,为激光技术的工业应用做出了开创性的贡献。

弗朗恩霍夫激光技术研究所(ILT)隶属于德国弗朗恩霍夫应用研究促进协会,是德国激光加工领域重要的研究机构之一。该所主要面向德国工业企业的需求,从事激光及激光加工领域的应用研究。本书汇编了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)多年来在激光加工领域的研究结果,是该所在该领域工业项目以及研究项目经验的汇总。在本书德文版出版之前,其内容一直作为研究所内部交流

资料没有公开发表。本书不仅对激光加工物理过程进行了基础阐述,同时也向激光加工工艺以及激光加工技术的应用高度作了延伸。

希望本书能为国内同行在开展激光技术的应用研发上,尤其是在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上有所借鉴和拓展,同时也希望通过本书,使国内同行感受到德国在制造领域至精至美的创新精神。

本书作者、弗朗恩霍夫激光技术研究所所长 Poprawe 教授对本书中译本的翻译计划给予了大力支持,并对翻译过程中遇到的疑难问题进行了细致的解答。Poprawe 教授的博士毕业生、北京工业大学张冬云副教授承担了本书的翻译工作,她的认真与勤奋给我们留下了深刻印象。同时,华南师范大学张庆茂教授、暨南大学刘伟平教授对译本作了大量的审校工作,在此一并致谢。

广州中国科学院工业技术研究院理事长



教授、研究员

2008年3月于广州

中文版前言

当隶属于弗朗恩霍夫应用研究促进协会的激光技术研究所(ILT)和隶属于亚琛工业大学的激光技术研究所(LLT)很荣幸地被问及是否同意把《激光制造工艺:基础、展望和创新应用实例》一书翻译成中文版时,我们的回答是坚决而肯定的。因为激光技术应用基础知识是属于全世界的。与中国伙伴的合作以及中国在激光技术领域快速增长的需求促进了这一译本的形成。为此特别感谢张冬云女士所做的努力,在短暂的几个月时间完成了这一艰辛的工作。

提起激光人们马上把它与仪器设备联系起来,激光技术发展到今天,它的概念已经发生了根本的转变。激光是一种能量,可以与电流相提并论,但是由于其拥有更高的自由度使之在应用过程中更加有效。特别是其在时间、空间以及频率上的可调制性使之对很多加工工艺具有适应性,从而扩大了应用空间,激光切割、打孔、焊接、刻蚀、钎焊、硬化、合金化、镭覆、清洗、快速成形以及打标等工艺已经成为制造领域的关键技术。

激光技术可以用于各个领域。目前的研究表明:新的应用促使着激光技术的不断更新。对未来的憧憬以及技术进步的追求为我们的创新赋予了必要的驱动力:光能具有量体裁衣的特性,具有极为广泛的应用空间。

本书汇编了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)多年以来在激光加工领域的研究成果,是我们在该领域工业项目以及研究项目经验的汇总,内容包括了面向应用的基础研究以及实际的工业应用。

我们希望本书能够进一步促进激光技术的创新以及在应用领域的扩展。并提出了很多出版建议。感谢广州工研院朱建满处长,感谢他给我机会把这样一部难得的好书推荐给国内同行。如果我的这一努力能够对促进我国激光加工领域的进步进而带动国内制造业的发展起到一点点推动作用,我将十分欣慰。

Prof. Dr. rer. nat. R. Poprawe M. A.

亚琛,2008年4月

张冬云

2008年4月

于北京工业大学激光工程研究院

译者前言

我是应广州中国科学院工业技术研究院(简称广州工研院)朱继满处长以及清华大学出版社庄红权先生的邀请翻译《激光制造工艺:基础、展望和创新应用实例》这本书的。作为弗朗恩霍夫激光技术研究所(ILT)的原工作人员,我有热情、有能力来完成这本书。因为德语语言的生僻以及德国注重工程应用等原因,国内同行对德国在该领域内取得的成绩只能从寥寥无几的英文文献中获得,研究的最新进展以及细节问题往往不能及时获得。希望这一译本使国内同行对德国以及弗朗恩霍夫激光技术研究所该领域的研究有更加深入的了解。

在该译本从德文版到中文版的翻译过程中,我在力求准确表达作者本意的情况下,保留了德文版的特点,例如在翻译该书的理论部分以及激光加工领域的新名词时,我或是保留了原有的德文名词,或是根据理解“杜撰”了一些中文术语。这些“杜撰”有待读者的鉴定。如果读者在阅读本书过程中发现不当之处请及时向我指出,我将十分感谢。

我的博士生导师 Poprawe 教授在得知广州工研院和清华大学出版社计划出版该书中文版后,积极与广州工业研究院取得联系,敦促该书的翻译与出版过程,嘱咐我在翻译出版的过程中如有任何问题都与他取得联系,并在百忙之中亲自为本书写作序言。在本书中文版交付出版之时,我向 Poprawe 教授所作的这些努力表示衷心地感谢,感谢他对我信任和支持。我希望这个译本能够准确地反映该书的精华,不辜负我的导师 Poprawe 教授对我的期望。

感谢清华大学出版社庄红权先生,他对这个译本进行了认真仔细的审阅,并提出了很多出版建议。感谢广州工研院朱继满处长,感谢他给我机会把这样一部难得的好书推荐给国内同行。如果我的这一努力能够对促进我国激光加工领域的进步进而带动国内制造业的发展起到一点点推动作用,我将十分欣慰。

张冬云

2008年4月

于北京工业大学激光工程研究院

德文版前言

激光(Laser)——也许自从它具有“受激辐射光的放大”这样的缩写时,一开始就是一个熠熠生辉的名词。这种特殊的光是单色的、可束集的,这一特点一度使科学界处于兴奋之中。在激光技术发展的早期人们就开始了其应用研究和工业应用。

本书是亚琛工业大学激光技术系列教材的修订本。该系列教材由两部分组成,其中一部分为激光技术Ⅰ“激光光源”;另一部分为激光技术Ⅱ“激光应用”。本书的主要内容是激光应用,同时补充了许多研究人员感兴趣的激光应用领域的最新进展。本书从内容上可以分成两个部分:第一部分为材料加工基础,主要阐述材料加工过程中的基本物理现象;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章),其次在第11~17章论述了制造技术中的激光应用,这些应用不仅包括目前工业上的应用技术,也包括一些具有较大应用潜力的前沿技术如激光生长和激光清洗技术,最后在第18章中介绍激光测量技术。

特别感谢 Wester 教授概括性地介绍了材料加工基础部分。感谢 Mans 先生协调和编写了本书的第二部分。本书每一章的作者都为本书作出了较大的贡献。下面按照字母顺序列出他们的名字:

Dipl.-Phys. Ümit Aydin(ILT)

Dr. rer. nat. Herbert Balzer(ILT)

Dipl.-Ing. Christian Benter(ILT)

Dipl.-Ing. Luedger Bosse(ILT)

Dr. rer. nat. Kontantin Boucke(ILT)

Dipl.-Ing. Christian Fuhrmann(ILT)

Dipl.-Ing. Andres Gasser(ILT)

Dipl.-Ing. Arnold Gillner(ILT)

Dr. rer. nat. Jens Gottmann(LLT)

Dr. rer. nat. Alexander Horn(LLT)

De. rer. nat. Christoph Janzen (ILT)

Dipl. -Phys. Carsten Johnigk (ILT)

Dr. -Ing. Stefan Kaierle (ILT)

Dipl. -Ing. Kilian Klages (ILT)

Dipl. -Ing. Christian Kratzsch (ILT)

Dr. rer. nat. Joachim Makowe (ILT)

Dipl. -Phys. Torsten Mans (ILT)

Dr. -Ing. Wilhelm Meiners (ILT)

Dr. rer. nat. Reinhard Noll (ILT)

Dr. -Ing. Alexander Olowinsky (ILT)

Dr. -Ing. Chritoph Over (ILT)

Dipl. -Phys. , Dipl. -Ing. Ulrich-Andreas Russek (ILT)

Dipl. -Phys. Frank Schneider (ILT)

Dipl. -Phys. Bernd Seme (ILT)

Dr. rer. nat. Oliver Steffens (ILT)

Lena Trippe (ILT)

Dr. -Ing. Andreas Weisheit (ILT)

Dr. -Ing. Edgar Willenborg (ILT)

Dr. -Ing. Tobias Wirtz (ILT)

Dr. rer. nat. Konrad Wissenbach (ILT)

Dipl. -Ing. Norbert Wolf (ILT)

如果读者有将本书作为教材的需求或者对其中的某一专题有特殊的兴趣,可以与上述研究所联系。无论是基础还是较深的理论问题以及在应用和技术方面的探讨,研究所都会提供相应的服务。我们希望通过这样的方法能够促进激光技术的创新及其在应用领域的扩展。

Prof. Dr. rer. nat. R. Poprawe M. A.

亚琛, 2004 年 7 月

目 录

第 1 章 绪论	1
文献	3
第 2 章 电磁射线在工件表面的行为	4
2.1 Fresnel 公式	4
2.1.1 Fresnel 吸收公式	6
2.1.2 Fresnel 公式, Brewster 效应	7
2.1.3 全反射	8
2.2 激光技术中 Fresnel 公式的特殊应用	9
2.2.1 Brewster 效应	9
2.2.2 全反射	9
文献	9
第 3 章 工件对激光的吸收	10
3.1 现象描述	11
3.1.1 相互联系	12
3.1.2 波公式	13
3.1.3 零件的几何形状	13
3.1.4 边界条件	13
3.2 非导体	14
3.2.1 电偏振	15
3.2.2 离子偏振	16

3.2.3 塑性材料中的填充材料	18
3.3 等离子体的介电性能	18
3.3.1 无碰撞等离子体	19
3.3.2 碰撞决定的等离子体	20
3.4 金属材料的吸收	22
3.5 Drude 吸收模型	23
3.6 金属材料的吸收率及其与温度的关系	25
3.7 表面状态的影响	28
文献	30
第4章 能量传递和热传导	31
4.1 能量传递公式	31
4.2 热传导机制	32
4.3 具有常数系数以及 Green 函数的热传导公式	33
4.3.1 点热源	35
4.3.2 线热源	36
4.3.3 横向无限膨胀表面热源	38
4.3.4 横向无限膨胀体积热源	41
4.3.5 高斯光强分布	42
4.3.6 有限材料厚度	42
4.4 热物理常数与温度的关系	43
4.5 短脉宽时的热传导	44
文献	44
第5章 热力学	46
5.1 弹性变形	46
5.1.1 同轴加载	47
5.1.2 同轴应变	47
5.2 热致应力	47
5.3 塑性变形	48
5.3.1 塑性变形举例	49
文献	49

第 6 章 相变	50
6.1 铁碳相图	50
6.1.1 纯铁	50
6.1.2 铁碳混合	52
6.2 珠光体组织硬化	54
6.2.1 碳的扩散	54
文献	56
第 7 章 熔池流态	57
7.1 质量、动量和能量平衡	57
7.2 边界条件	58
7.3 平面流势	60
7.3.1 源熔流和偶极熔流	60
7.3.2 柱体周围的熔流	61
7.4 层状边界层流	63
7.4.1 摩擦决定的边界层流	65
7.4.2 惯性决定的边界层流	66
文献	67
第 8 章 光致蒸发	68
8.1 热动态平衡中的蒸发压力	68
8.2 蒸发率	69
8.3 光致蒸发过程中的粒子和能量平衡	72
8.4 采用燃烧波描述蒸发过程	75
8.5 蒸发和 Knudsen 层的动态描述	78
文献	80
第 9 章 等离子物理	81
9.1 Debye 半径和定义	83
9.2 等离子热动力学以及静力学的几个结果	85
9.2.1 理想等离子体的状态数	86
9.2.2 理想等离子体的状态参数	88

9.2.3	Coulomb 纠偏	89
9.2.4	质量作用法则以及 Saha 公式	91
9.3	等离子体的传递性能	94
9.4	电磁波与等离子体的相互作用	98
9.5	非平衡过程	103
9.6	LTE 模型中的等离子辐射	106
9.6.1	线性辐射	107
9.6.2	两个连接状态之间过渡区的吸收	108
9.6.3	线性辐射的辐射能量	108
9.6.4	线性轮廓	109
9.6.5	韧致辐射	110
9.6.6	复合辐射	110
9.6.7	仪器影响	111
	文献	111
第 10 章	激光光源	113
10.1	CO ₂ 激光器	113
10.1.1	基本原理	113
10.1.2	结构	113
10.2	Nd:YAG 激光器	115
10.2.1	基本原理	115
10.2.2	结构	115
10.3	半导体激光器	117
10.3.1	基本原理	117
10.3.2	结构和性能	118
10.4	准分子激光器	121
10.4.1	基本原理	121
10.4.2	结构	122
	文献	123
第 11 章	表面技术	124
11.1	激光相变硬化	124
11.1.1	目的	124

11.1.2	工艺	125
11.1.3	物理基础	128
11.1.4	应用研究	128
11.1.5	工业应用实例	131
11.2	激光重熔	135
11.2.1	物理基础	136
11.2.2	工艺	139
11.2.3	应用研究	140
11.2.4	工业应用实例	142
11.3	激光抛光	143
11.3.1	目的	143
11.3.2	工艺	144
11.3.3	设备	146
11.3.4	应用举例	147
11.4	熔覆	149
11.4.1	目的	149
11.4.2	工艺	149
11.4.3	材料技术	152
11.4.4	应用	153
11.5	合金化和弥散化	155
11.5.1	目的	155
11.5.2	物理基础	156
11.5.3	工艺	157
11.5.4	应用研究	158
11.5.5	应用举例	161
11.6	激光脉冲沉积工艺	161
11.6.1	物理基础	162
	文献	166
	第 12 章 热变形技术	168
12.1	弯曲	168
12.1.1	引言	168
12.1.2	过程模型	169

12.1.3	变形研究	173
12.1.4	激光微变形技术在继电器生产中的应用	173
	文献	176
第 13 章	快速成形技术	178
13.1	激光选区烧结	178
13.1.1	引言	178
13.1.2	塑性粉末的激光选区烧结	178
13.1.3	金属材料间接激光选区烧结	179
13.1.4	金属材料直接激光选区烧结	180
13.1.5	激光选区熔化	181
13.2	激光生长技术	183
13.2.1	介绍	183
13.2.2	激光生长零件的性能	184
13.2.3	CAD/NC 结合	187
13.2.4	应用范围	188
13.2.5	修复	190
13.3	立体印制	191
13.4	层加工技术	193
13.5	非激光支持快速成形工艺	194
13.5.1	固相结合技术	194
13.5.2	熔覆沉积制造技术	196
13.5.3	三维印刷技术	197
13.5.4	层铣削技术	198
	文献	199
第 14 章	连接技术	200
14.1	金属材料的焊接	200
14.1.1	热导焊	200
14.1.2	深熔焊	205
14.1.3	激光复合焊	208
14.2	热缩性材料的激光焊接	213
14.2.1	目标	213

14.2.2	工艺基础	214
14.2.3	应用研究	217
14.2.4	工业应用	218
14.2.5	小结	220
14.3	钎焊	220
14.3.1	物理基础	221
14.3.2	工艺	222
14.3.3	工业应用	224
14.4	微小件焊接	224
14.4.1	引言	224
14.4.2	工艺和结果	225
文献		229
第 15 章	去除和打孔技术	232
15.1	单脉冲打孔	232
15.1.1	物理基础	233
15.1.2	工艺	236
15.1.3	应用	236
15.1.4	应用举例	238
15.2	叩击打孔	240
15.2.1	物理基础	240
15.2.2	工艺	242
15.2.3	应用	243
15.2.4	应用举例	244
15.3	环转打孔	244
15.3.1	工艺	245
15.3.2	应用	246
15.3.3	应用举例	247
15.4	微结构化	248
15.4.1	引言	248
15.4.2	微结构化中的光束变换	248
15.4.3	对激光的吸收	250
15.4.4	应用举例	252

15.5 清洗	253
15.5.1 工艺	253
15.5.2 应用举例	254
文献	257
第16章 分离技术	260
16.1 激光助燃切割	260
16.1.1 引言	260
16.1.2 助燃切割对功率的要求和供给	260
16.1.3 火焰助燃切割	261
16.1.4 工艺原理	263
16.1.5 燃烧稳定的激光助燃切割	265
16.2 熔化切割	266
16.2.1 基础	266
16.2.2 工艺参数	267
16.2.3 带有反射光学系统和火焰喷嘴的熔化切割	270
16.2.4 应用举例	272
16.3 高速切割	272
16.3.1 基础	272
16.3.2 工艺	274
16.3.3 应用举例	275
16.4 升华切割	275
16.4.1 引言	275
16.4.2 激光升华切割的能量平衡	276
16.4.3 非金属材料升华切割的应用举例	277
16.5 激光精细切割	279
16.5.1 引言和应用范围	279
16.5.2 工艺基础	279
16.5.3 所用光源	281
16.5.4 应用举例	281
文献	283