



北京工业大学

“211工程”资助出版

# 制造用激光

## 光束质量、传输质量与聚焦质量

左铁钊 © 著



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)



北京工业大学

“211工程”资助出版

内容简介

# 制造用激光光束质量、传输质量 与聚焦质量

左铁钊 著

科学出版社

www.sciencep.com

www.sciencep.com

科学出版社

北京出版集团公司

科学出版社

科学出版社

科学出版社

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书面向大功率激光在工业制造领域的应用,以激光光束质量为主线,阐述了光束质量对激光制造过程贯穿始终的重要影响。

本书主要阐述了工业制造用激光器光束质量的评价和测量方法及其通过传输和聚焦对激光加工过程的影响。书中提出了用光束聚焦特征参数值作为评价激光光束质量的参数,介绍了光束质量和光束传输、聚焦特性之间的关系,描述了光束质量对激光加工过程的影响。实际上,光束质量的最大意义就在于它体现了激光束的可传输和聚焦能力。本书最后介绍了激光加工过程质量监测。

本书可作为高等院校光学、光学工程专业参考书,可供从事激光技术应用领域的科技工作者、教师、研究生或高年级学生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

制造用激光光束质量、传输质量与聚焦质量/左铁钊著. —北京:科学出版社, 2008

ISBN 978-7-03-023161-1

I. 制… II. 左… III. 激光加工-研究 IV. TG665

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 156328 号

责任编辑:童安齐 任加林 / 责任校对:刘彦妮  
责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2008 年 10 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2008 年 10 月第一次印刷 印张:16 1/4

印数:1—2 000 字数:366 000

定价:45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137026(BA08)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

## 总 序

“211工程”是我国建国以来教育领域唯一的国家重点建设工程,以便我国面向21世纪重点建设一百所高水平大学,使其成为我国培养高层次人才,解决经济建设、社会发展和科技进步重大问题的基地,形成我国高等学校重点学科的整体优势,增强和完善国家科技创新体系,跟上和占领世界高层次人才培养和科技发展的制高点。

中国高等教育发展迅猛,尤其是1400所地方高校已经占全国高校总数的90%,成为我国高等教育实现大众化的重要力量,成为区域经济和社会发展服务的重要生力军。“211工程”建设对于我校实现跨越式发展、增强服务北京的能力起到了重大的推动作用。

在北京市委市政府的高度重视和大力支持下,1996年12月我校通过了“211工程”部门预审,成为北京市属高校唯一进入国家“211工程”重点建设的百所大学之一,2001年6月以优异成绩通过国家“211工程”一期建设验收,2002年10月顺利通过国家“211工程”二期建设可行性论证。我校紧紧抓住这一难得的历史性发展机遇,根据首都经济和社会发展的需要,坚持“科学定位,找准目标,发挥优势,办出特色”的办学方针和“立足北京,融入北京,辐射全国,面向世界”的定位指导思想,以学科建设为龙头,师资队伍建设为关键,重点建设了电子信息、新材料、光机电一体化、城市建设与交通、生物医药、环境与能源、经济与管理类学科,积极发展了人文社会科学类学科,加强了基础类学科,形成了规模、层次及布局合理的学科体系,实现了从工科大学向以工为主,理、工、经、管、文、法相结合的多科性大学转变,从教学型大学向教学研究型大学的转变。

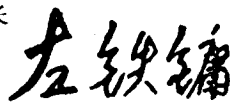
我校现有9个博士后科研流动站,6个一级学科博士学位授权点,25个二级学科博士学位授权点,55个硕士学位授权点。教师中有院士6人,博士生导师150人,教授230人,专任教师中具有博士学位的教师比例达到30%。我校年科研经费已达到2.3亿元,年获得国家自然科学基金资助项目近40项,材料学科获全国百篇优秀博士学位论文奖,抗震减灾学科与交通学科2002年分别获得国家科技进步二等奖,计算机学科2003年获得国家科技进步二等奖,光电子学科在新型高效高亮度半导体发光二极管、新医药与生物工程学科

在国家 P3 实验室建设和抗 HIV 药物的研制、环境与能源工程学科在奥运绿色建筑标准与大气环境治理、光学学科在大功率激光器研制、管理科学与工程学科在国家中长期能源规划等方面均取得了特色鲜明的科研成果。

为了总结和交流北京工业大学“211 工程”建设的科研成果,学校设立“211 工程”专项资金,资助出版系列学术专著,这些专著从一个侧面代表了我校教授、学者的学科方向、研究领域、学术成果和教学经验。

展望北工大未来,我们任重而道远。我坚信,只要我们珍惜“211 工程”建设和奥运羽毛球馆建设这两大机遇,构建高层次学科体系,营造优美的大学校园,我校在建设成为国内一流大学的进程中就一定能够为“新北京、新奥运”的宏伟蓝图做出自己应有的贡献。

北京工业大学校长  
中国科协副主席  
中国工程院院士



2004 年 3 月

### 北京工业大学简介

北京工业大学创建于 1960 年,是一所以工为主,理工、文法、经管、艺术相结合的多科性市属重点大学,1981 年成为国家教育部批准的第一批硕士学位授予单位,1985 年成为博士学位授予单位。1996 年 12 月通过国家“211 工程”预审,正式跨入国家 21 世纪重点建设的百所大学的行列。学校占地面积约 120 080 亩,建筑面积近 70 万平方米,校内建有 2008 年北京第 29 届奥运会羽毛球暨艺术体操比赛场馆。

学校现有专任教师 1500 多人,其中,教授 288 人,副教授 742 人;全日制普通本科生 12 500 余人,研究生 4300 余人。学校设有 16 个二级学院。学校现开设 43 个本科专业;拥有 81 个硕士学位授权点和 17 个工程硕士授权培养领域,8 个一级学科博士学位授权点和 37 个二级学科博士学位授权点,13 个博士后科研流动站。拥有 3 个国家级重点学科(材料学、结构工程和光学)及 8 个北京市重点学科和 11 个北京市重点建设学科;设有 2 个教育部重点实验室(新型功能材料、传热强化与过程节能)、3 个省部共建重点实验室、12 个北京市级重点实验室或研究基地,以及精密超精密加工国家工程研究中心、国家产学研激光加工中心和中德激光技术中心、教育部数字社区工程中心、汽车结构部件先进制造技术教育部工程中心等一批重点科研基地。

建校 40 多年以来,北京工业大学已经为北京经济和社会发展的各个领域培养了约 83 000 名学生(其中硕士、博士研究生约 5300 人),他们在各条战线上发挥着骨干作用。在“立足北京、融入北京、辐射全国、面向世界”的办学定位思想指导下,学校现已成为北京市高素质、高层次人才的培养基地和科技创新与研究开发基地。

## 序 言

目前激光制造技术的迅速发展和应用领域的不断拓宽,以及新型制造用激光器不断涌现,使得如何加深激光技术应用领域对光束质量的认识和理解显得尤为重要。

本书的作者左铁钊教授 1992 年回国以来,一直关注激光光束质量的研究,她认为光束质量的优劣是制造用激光器发展的重要指标和追求。她对激光光束质量的重视完全基于对努力推动我国激光制造事业发展的热情。

本书对制造用大功率激光光束质量的评价和测量做出了系统的论述,通过分析光束质量与大功率激光传输和聚焦的关系,体现了光束质量对激光器发展的决定性作用,及其对激光加工过程的重要影响。全书结构严谨,内容深入浅出,物理概念清晰,反映了作者对激光制造技术应用发展的独特观点,具有积极的理论意义和对工程实际的指导意义。

本书对从事激光技术领域的科技人员和工程技术人员,以及光学、光学工程专业的本科生和研究生是一本十分有益的参考书。相信本书的出版有助于激光技术领域科技工作者之间的切磋与交流,我愿热忱向读者推荐。

左铁钊

2008年5月

## 前 言

激光现代制造技术与工程是随着激光技术及其应用的发展应运而生的一门新型交叉学科。其是将激光作为能源,将光子作为能量的载体,通过光子与材料的相互作用,引起一系列物理和化学变化,从而满足材料的连接、分离、改性、成形和制备等应用需求。其也是激光技术应用的主要领域之一,有力的促进了工业生产的进步和传统制造方法的革新。

激光制造以人造光作为能源,是继传统的力、火、电后出现的新型能源。对于制造用激光,除了总能量之外,光的波长特性、空间特性和时间特性是激光器发展中所关心的重要参量。波长特性决定了材料的吸收系数和光学衍射极限,空间特性,决定了光能的可汇聚程度和传输的发散趋势,以及能量的利用率和利用方式,是能量整体有用性的既抽象又具体的表征。本书主要介绍激光的空间特性。

空间特性的实际表征由光束质量完成,光束质量量化了激光光能的可传输性、可汇聚性和可变换性等激光本身的空间特性。一定能量的激光可利用性,可实现的能量密度、焦点和焦深的大小、焦斑形状,以及制造中可采用的聚焦系统的焦距大小都由光束质量约束。作为制造用的激光,实际上就是一把“光刀”,光束质量体现了这把“刀”的锋利程度。

光束质量从根本上表征了一束激光可传输的距离和范围,决定着能量密度分布的纵向变化情况和加工过程中焦点漂移量。对于可用光纤传输的激光来说,光束质量决定了光和光纤的耦合效率,也决定了可用传输光纤的芯径大小。

激光光束质量是现代激光制造技术的核心,体现在它标志了激光器发展水平,是迄今为止发展和追求的一个重大目标,同时也决定了一台激光器的适用范围。光束质量的不断完善是整个制造用激光器发展的依据和指标之一。从横流 CO<sub>2</sub> 激光器到扩散冷却型 SlabCO<sub>2</sub> 激光器,从普通灯泵浦固体激光器到光纤激光器,光束质量作为原动力,在发展过程中发挥了巨大的作用。

本书就是在上述背景下,以激光光束质量为核心展开讨论,阐述了激光光束质量的评价和测量方法,系统地介绍了光束质量与大功率激光传输与聚焦的关系,飞行光学导光系统的设计方法,最佳聚焦系统的选择,并针对激光切割和激光焊接,研究了光束质量对加工过程的影响,最后介绍了激光加工过程监测。

本书由左铁钊教授主持撰写,内容力求将多年来的研究成果综合反映出来,希望使读者更多了解激光光束质量及其在激光制造领域的重要性。王智勇教授、雷甸副教授和陈虹博士参与了编写工作,本书面向从事激光技术研究的工程技术人员、科技工作者和相关

专业的高年级学生和研究生,同时本书也面向激光应用和激光器件开发领域的企业及其用户。如果读者能够从中受益,将是作者最大的宽慰。

最后,对北京工业大学“211 工程”给予本书出版工作的支持和资助表示衷心的感谢。

左铁钊

2008年6月



# 目 录

总序

序言

前言

第 1 章 概论	1
1.1 光束质量决定了激光制造应用技术的发展	2
1.2 光束质量标志了激光制造系统技术的水平	4
参考文献	6
第 2 章 光束质量评价	7
2.1 激光场的描述	7
2.1.1 光束束宽	7
2.1.2 光束直径	8
2.1.3 光束半径	8
2.1.4 束腰直径	9
2.1.5 束腰半径	9
2.1.6 束散角和束散半角	9
2.1.7 光束模式	10
2.1.8 Rayleigh 长度	13
2.2 评价激光光束质量的参数	13
2.2.1 光束聚焦特征参数值 $K_f$	14
2.2.2 $M^2$ 因子	15
2.2.3 光束远场发散角	16
2.2.4 亮度	16
2.2.5 等效光束质量因子 $M_e^2$	16
2.2.6 光束衍射极限倍数因子	16
2.2.7 Strehl 比	17
2.2.8 BQ 值	17
2.2.9 模式纯度	17
2.2.10 空间相干性或相干度	17
2.3 用 $K_f$ 值评价激光光束质量	19
2.3.1 用 $M^2$ 因子评价激光光束质量	19
2.3.2 用 $K_f$ 值评价激光光束质量	20
2.4 影响激光光束质量的因素	21
2.4.1 增益介质对光束质量的影响	22

2.4.2	谐振腔对光束质量的影响	22
2.4.3	光束控制系统对光束质量的影响	22
	参考文献	22
<b>第3章</b>	<b>激光光束质量的测量</b>	24
3.1	激光光束质量的测量方法	24
3.1.1	激光束模式鉴别方法	25
3.1.2	激光辐射束散角测量方法	25
3.1.3	激光辐射光束直径测量方法	26
3.2	大功率激光光束光斑质量诊断仪	29
3.2.1	工作原理	30
3.2.2	数学模型	31
3.2.3	探针的设计和加工	36
3.2.4	机械部件	39
3.2.5	测量系统	39
3.2.6	软件开发	42
3.2.7	数据处理和基本光束参数计算	44
3.2.8	能量密度分布的图形显示	45
3.3	系统性能参数与测量精度	49
3.3.1	测量窗口	49
3.3.2	采样点数	66
3.3.3	小孔孔径	68
3.4	测量系统的应用	71
3.4.1	激光器的检测	71
3.4.2	光学传输系统的检测	73
3.4.3	光束整形系统的检测	74
3.4.4	几种典型工业用大功率激光器的测量	75
3.5	光束参数的计算	80
	参考文献	81
<b>第4章</b>	<b>制造用激光器的光束质量</b>	83
4.1	制造用激光器的主要光学参数	83
4.1.1	波长	83
4.1.2	能量(功率)	86
4.1.3	偏振特性	90
4.1.4	时间特性	92
4.1.5	空间特性	95
4.2	制造用激光器的发展	97
4.2.1	工业用 CO <sub>2</sub> 激光器	98
4.2.2	工业用固体激光器	102

4.2.3 大功率半导体激光器 .....	106
参考文献 .....	108
<b>第5章 光束质量与大功率激光聚焦质量的关系</b> .....	<b>110</b>
5.1 大功率 CO <sub>2</sub> 激光聚焦理论的研究 .....	111
5.1.1 Gauss 光束通过薄透镜的聚焦理论 .....	111
5.1.2 基于附加相移的混合模激光束聚焦理论 .....	113
5.1.3 最小光强起伏的激光加工光学系统的设计 .....	116
5.2 大功率 YAG 激光束聚焦理论的研究 .....	119
5.2.1 大功率激光束的成像变换 .....	120
5.2.2 单透镜聚焦 .....	121
5.2.3 望远镜聚焦系统 .....	125
5.3 光束质量与大功率激光束的聚焦质量 .....	126
5.3.1 光束质量对光束聚焦影响的理论分析 .....	126
5.3.2 光束质量对焦斑大小的影响 .....	131
5.3.3 光束质量对焦斑位置的影响 .....	132
5.3.4 光束质量对焦深的影响 .....	132
参考文献 .....	134
<b>第6章 光束质量与大功率激光的传输质量的关系</b> .....	<b>135</b>
6.1 大功率 CO <sub>2</sub> 激光的传输理论 .....	136
6.1.1 大功率激光束的分类 .....	136
6.1.2 基于附加相移的混合模激光束的传输特性 .....	138
6.1.3 奇数模对光束横截面强度分布的影响 .....	140
6.2 光束质量与大功率 CO <sub>2</sub> 激光传输的关系 .....	141
6.2.1 CO <sub>2</sub> 激光传输过程中的焦点漂移 .....	141
6.2.2 改善焦点漂移现象的光学自适应系统 .....	147
6.2.3 光束质量对飞行光学导光系统设计的影响 .....	148
6.3 空气热透镜效应对大功率 CO <sub>2</sub> 激光传输与聚焦的影响 .....	152
6.3.1 压缩空气对光束传输的影响 .....	153
6.3.2 热透镜效应对光束的扩束作用 .....	154
6.3.3 空气热透镜效应对束腰位置和大小影响 .....	155
6.3.4 空气热透镜效应对激光束光束质量的影响 .....	155
6.3.5 空气热透镜效应对聚焦点的位置和大小影响 .....	155
6.4 大范围激光加工飞行光学导光系统的理论与设计 .....	157
6.4.1 多模激光光束变换原理 .....	157
6.4.2 飞行光学系统中光束变换系统的设计 .....	159
6.5 大功率 YAG 激光的传输理论 .....	160
6.5.1 光纤传输的优势 .....	160
6.5.2 光纤的构成、分类及损耗 .....	162

6.5.3	光纤耦合技术 .....	166
6.5.4	光束质量与耦合光纤芯径的关系 .....	175
	参考文献 .....	178
<b>第7章</b>	<b>光束质量对激光加工过程的影响</b> .....	<b>180</b>
7.1	光束质量对激光切割过程的影响 .....	180
7.1.1	激光切割的基本原理 .....	180
7.1.2	光束质量对激光切割的影响 .....	182
7.2	光束质量对激光焊接过程的影响 .....	183
7.2.1	激光深熔焊接机理 .....	184
7.2.2	激光深熔焊接的数学模拟 .....	186
7.2.3	激光深熔焊接物理数学模型 .....	192
7.2.4	光束质量对激光深熔焊接的影响 .....	204
7.2.5	数学模型计算误差的分析 .....	216
	参考文献 .....	223
<b>第8章</b>	<b>激光加工过程及加工质量监测</b> .....	<b>225</b>
8.1	引言 .....	225
8.1.1	监测对象和方法 .....	226
8.1.2	技术网络图 .....	227
8.2	激光与材料作用过程的监测 .....	228
8.2.1	高速摄影法监测体系 .....	228
8.2.2	采样信号对光致等离子体监测 .....	232
8.2.3	对工件物理参数和加工质量指标实时监测 .....	238
8.3	跟踪监测 .....	239
8.3.1	激光焊接焊缝跟踪系统 .....	240
8.3.2	激光切割高度调节系统 .....	243
	参考文献 .....	246

# 第 1 章 概 论

现代激光制造是继力加工、火焰加工和电加工之后一种崭新的加工技术,可以完善周到地解决不同材料的加工、成型和精炼等技术问题,从最小结构的计算机芯片到超大型飞机和舰船,激光制造都将是不可或缺的重要手段,其应用领域不断拓宽加深,加工工艺已完全趋于成熟与稳定。大功率激光以“光能源”和“光工具”作为新加工手段应用于材料加工,扮演了一个创新尖兵的角色,代表了先进制造业发展方向,引领制造技术进入激光制造的新时代,极大地提升了传统制造业的水平,带来了产品设计、制造工艺和生产观念的巨大变革,并正在引发一场制造技术的革命。

20 世纪以来,世界各国都加大了对发展制造业的重视程度。在发达国家,激光制造在社会生产中的效益十分显著,保持高增长率,市场潜力巨大。我国激光技术的研究在世界范围内起步较早,但与发达国家相比,激光技术达到应用推广的还是不多,尤其在汽车、机械制造等领域,还没有发挥出应有的作用。为了更广泛地普及激光制造技术的应用,弥补高投入的问题,需要在充分认识影响激光制造技术应用关键因素的基础上,控制成本,寻找获得最佳加工条件、提高加工效率的方法。

激光制造技术不是单纯的激光加工技术,是集光、机、电为一体的系统工程,同时与材料、物理、生命等多个学科交叉,是新世纪科技发展的前沿领域之一。自 20 世纪 70 年代大功率激光器件诞生以来,已形成了激光焊接、激光切割、激光打孔、激光表面处理、激光合金化、激光熔覆、激光快速原型制造、金属零件激光直接成型、激光刻槽、激光标记、激光掺杂等十几种应用工艺,与传统的加工方法相比,具有高能密聚焦、易于操作、高柔性、高效率、高质量、节能环保等突出优点,在航空航天、冶金、电力、石油、电子信息、交通和新材料等领域广泛应用,几乎包括了国民经济的所有领域,被誉为“制造系统共同的加工手段”。激光制造技术在工业中应用的广泛性已经成为衡量一个国家工业水平高低的重要标志。美国、德国、日本等发达国家都已经将激光制造技术列入国家重大发展计划,开展持续长久的研发和应用研究。当今世界格局中,我国随着经济地位的不断提升,参与国际竞争的深度与广度不断加大,对于高品质现代化加工手段的需求日益迫切,改革开放和市场经济的发展,极大地推动了激光科学技术的研发和应用。我国是一个制造大国,在一些研究领域取得了具有国际先进水平的成果,但激光制造技术的发展只有几十年时间,把它作为能源和工具,从起步、推广、大规模应用到产业化,需要一个过程。我们不能只依赖人力资源优势,先进的制造技术才是我国成为世界制造业中心和制造强国的关键。发达国家的实践已经证明,激光制造技术在改造和提升传统产业和发展高新技术产业上都起着前沿开拓者的作用。现代激光制造技术在 21 世纪经济可持续发展中占有重要地位,将给我国国民经济的发展以深刻的影响。

与激光在通讯、国防和医疗领域的应用不同,在激光制造领域是将激光作为新型能源来完成加工任务,主要利用激光的能量特性,不仅要重视激光束的高能量,还要重视其高

品质,这是对制造用激光源提出的基本要求。激光作为制造用的“光能源”和“光工具”,其能源特性,包括激光能量(或功率)、光束质量以及对光的控制等不仅是衡量激光制造系统性能的标准,也是激光制造工艺选择的依据,所以要兼顾到激光功率和光束质量两个方面。激光能量(或功率)表征激光制造系统加工能力的可能性;光束质量直接限定了可能实现的加工方法、可能传输的距离、可能获得的焦斑尺寸,以及最终可以获得加工质量;对光的控制是实现产业化应用的前提条件。这三者是激光制造系统的整体要求。激光这把“刀”的质量,既是工业应用的“金刚钻”,也是激光制造系统激光器发展、进步的重要标志。

现代激光制造技术由激光制造应用技术和激光制造系统技术构成。激光制造应用技术包括材料的连接技术、去除和分离技术、成型技术、表面技术、材料制备技术及微制造技术;激光制造系统技术包括制造用激光源的产生技术、光束传输与聚焦技术、激光光束光斑质量诊断与控制技术、激光加工运动系统技术、制造过程中的传感跟踪监测技术等。两者之间互为因果、相互促进,是共同发展的一个整体。激光制造应用技术的发展,推动激光制造系统技术的进步,激光制造系统技术的发展,推动激光制造应用技术更加广泛的应用。

### 1.1 光束质量决定了激光制造应用技术的发展

高能量和高品质是对制造用激光源和激光应用技术提出的两个基本要求。光束质量可以理解为激光制造用的这把“刀”的锋利程度,不仅决定了激光器的可加工范围,也直接影响到应用的质量。图 1.1 所示为不同加工方式对激光功率和光束质量的要求,可以看出光束质量和光功率是决定可以实现的材料加工方式的两个决定性因素。

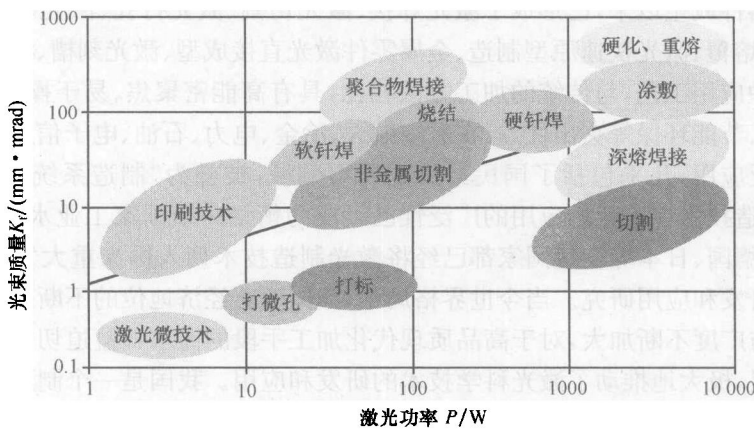


图 1.1 不同的材料加工方式对激光制造系统的激光功率和光束质量的要求

以汽车工业为例,在样车的开发和小批量试生产时,用高度柔性的激光三维切割取代冲孔和修边模具,不仅可以节省大量模具,同时极大地缩短了新车型的开发周期。传统方法研制开发一代新车一般需要 5~7 年的时间,采用计算机辅助设计和辅助制造技术后,新车型的开发周期缩短到了 3 年,在此基础上应用激光技术,新车型的开发周期缩短到 7 个月。由于激光三维切割取代模具的优势显著,德国大众汽车公司早在 1986 年就采用了

激光柔性机器人切割系统,逐步发展成为汽车制造业巨头。

在汽车零部件制造方面,激光焊接的变速器齿轮替代了花键连接的齿轮,极大地减少了零部件的数量,提高了变速器的整体质量与性能,降低了变速器齿轮的制造成本;根据车身不同部位的承重和使用要求,利用激光焊接将不同材质、不同厚度和不同表面状态的坯板拼焊在一起,然后一次压制成型制造车身部件,极大地简化了生产工艺流程,节省了大量材料,显著降低了车身重量。汽车工业发达的欧、美等国家和地区都建立了生产激光拼焊板的专业公司。

在车身总装上,激光焊接取代了电阻点焊工艺(图 1.2),使得汽车设计师可以自由地发挥其想象力和创造性,设计出独特风格的车型。同时激光焊接较之电阻点焊具有更高的效率、更优异的性能、更小的材料消耗等优势。

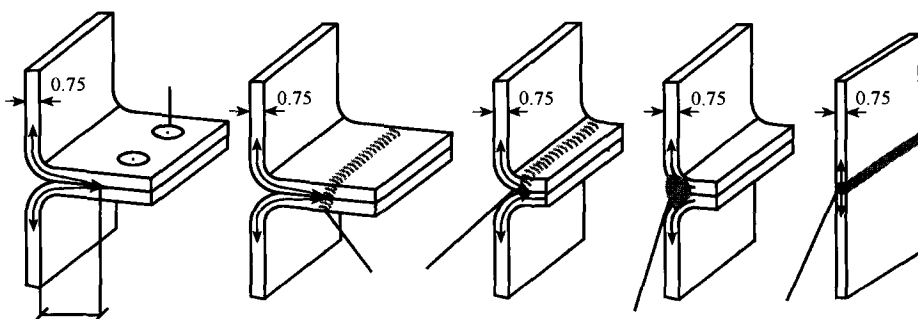


图 1.2 激光焊接取代电阻点焊

由于激光制造技术所具有的无与伦比的优势,在欧洲,几乎所有汽车制造厂在汽车研制开发和生产中都无一例外的大量采用激光加工。德国大众公司 2002 年一次性就订购了 260 台 4kW 大功率 YAG 激光器,主要用于车身的总装。德国博世(Bosch)公司的生产线上总共安装了不同类别的大功率激光加工设备 400 余台套,主要用于汽车零部件的加工。实际上,激光制造技术在汽车制造中应用的广度和深度已经成为汽车工业先进性的重要标志。

和发达国家相比,我国激光制造技术应用的水平和规模虽然还存在很大差距,但市场潜力巨大。中小功率焊接已在企业应用,形成了一批激光加工站,一些大型企业也建立了激光加工工位,如一汽轿车股份公司建立了汽车覆盖件的激光三维制造生产线(图 1.3),新一代大“红旗”CA7460 轿车仅用了 11 套成型模,所有覆盖件的切孔和修边均由激光切割来完成,节省模具几百套。同时,在我国蒂森接缝公司与中人公司合资于 2002 年在武汉建设了中国第一条激光拼焊板生产线,为德国汽车企业在中国的合资公司提供拼焊板(图 1.4)。

在航空航天领域,20 世纪 70 年代之前,由于没有高功率连续激光器件,研究的重点是脉冲激光焊接,应用于小型精密零件的点焊,或者由单个焊点搭接而成的缝焊。1971~1972 年,随着数千瓦 CO<sub>2</sub> 激光焊接试验的报道,情况发生了根本性的变化。几毫米厚钢板能够一次性完全焊透,所得焊缝与电子束焊接相似,显示出了高功率激光焊接的巨大潜力。

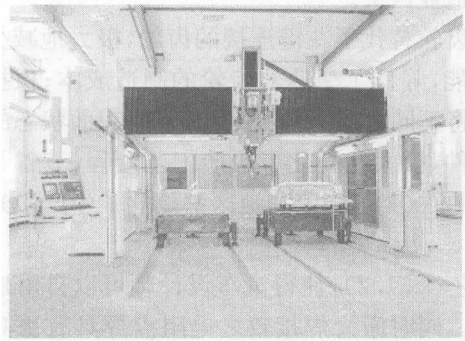


图 1.3 “一汽”的激光三维加工样车生产工位

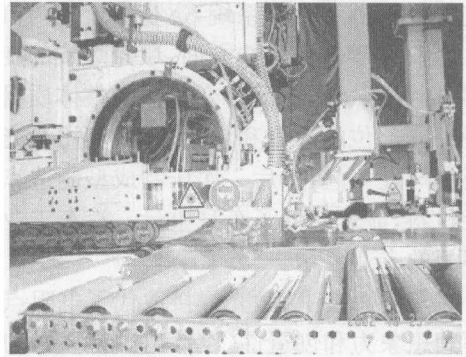
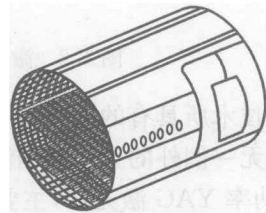
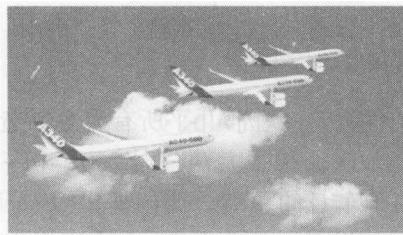


图 1.4 在武汉建立的激光车用集成拼焊板生产线

空中客车公司拥有 35 年设计和建造飞机的历史,空客 A380 将整体制造工艺向前推进了一大步,是欧洲空中客车公司设计生产的运输力最大的民用飞机,全机最高载客量为 840 人,面积多出 40% 以上,机身重量减轻 18%,成本下降 21.4%~24.3%。空客 A380 之所以能大大减轻飞机重量,减少油耗排放,降低运营成本的主要原因就是采用激光焊接技术应用于飞机机身、机翼的内隔板与加强筋的全部连接(图 1.5),取代原有的铆接工艺,被德国宇航界称为航空制造业中的一大技术革命。



飞机机身蒙皮与筋板结构

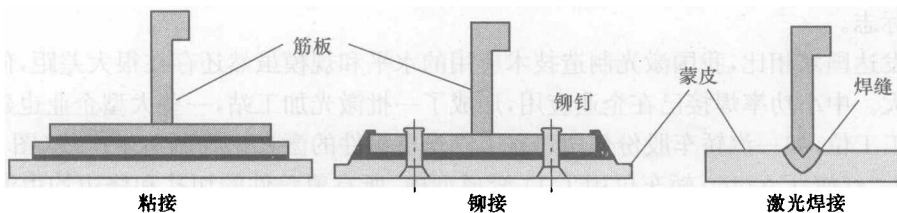


图 1.5 机身、机翼筋板与蒙皮粘接、铆接和激光焊接结构对比

## 1.2 光束质量标志了激光制造系统技术的水平

激光制造系统由激光源、传输、聚焦系统、运动、控制系统、传感与检测系统的组成,其核心是光的产生、传播和操纵。激光制造系统是激光加工技术应用的基础,不具备优良的激光器,其他都无从谈起。光束质量是激光制造系统发展、进步的重要标志。追求高光束



质量的大功率激光输出是现代激光制造用激光器不断发展的目标。

激光制造系统的光源主要包括 CO<sub>2</sub> 激光器、固体激光器、光纤激光器、大功率半导体激光器和准分子激光器。随着科学技术的发展,各种不同类型的新颖激光器不断涌现,激光的功率、可靠程度不断提高,体积日益缩小。图 1.6 显示了不同种类光制造用激光器发展的一个过程。从图中可以看出,虽然各种激光器的工作物质或者激励方式有很大的不同,也各有优缺点,但是高功率和高品质始终是所有制造用高功率激光器发展的两根主线。

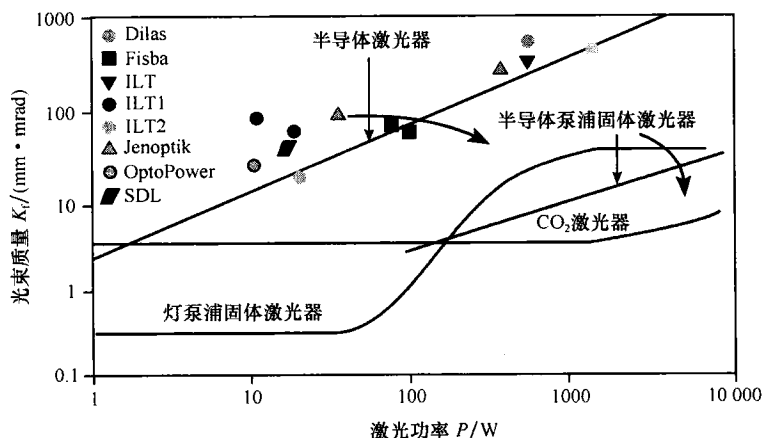


图 1.6 制造用激光器随光功率和光束质量的发展

CO<sub>2</sub> 激光器出现到现在,经过近四十年发展,从封离式 CO<sub>2</sub> 激光器、慢速轴流 CO<sub>2</sub> 激光器、横流 CO<sub>2</sub> 激光器到高频罗兹泵型快速轴流、turbo 型快速轴流及目前出现的扩散型 Slab CO<sub>2</sub> 激光器。一方面激光输出功率不断提高,已可以提供最高功率 45kW 工业应用的 CO<sub>2</sub> 激光器,更高功率不在于技术,而取决于市场需求;第二方面是光束质量越来越好,高功率扩散型 Slab CO<sub>2</sub> 激光器 K 值已经达到 0.99,十分接近 1 的理论值;第三方面是对光的控制能力不断提高,在五轴联动的光传输机床之后,出现了运动速度达 200m/min 的光传输机床、扫描加工系统。

固体激光器与 CO<sub>2</sub> 激光器相比较,具有波长短,吸收率高,体积小,能采用光纤传输实现柔性加工等优点,是现代激光制造的重要激光制造系统之一。目前,工业用固体激光器主要还是采用灯泵浦技术,商品化多棒串联的 YAG 激光器激光输出功率已达 6kW,并可采用光纤耦合输出。但灯泵浦的电光转换效率低,同时受抽运方式和工作物质热物理性质的制约,激光光束质量相对较差。如何提高光束质量和激光功率,是 YAG 激光器发展的主要方向之一。目前出现了几种提高光束质量的途径:一是半导体泵浦的固体激光器,因其受抽运方式的改变,转换效率大大提高,光束质量明显改善,已经成为中小功率固体激光器的主流。4400W 大功率半导体泵浦的固体激光器已有商品供应,但目前价格及维修费用居高不下。二是半导体泵浦的薄片式固体激光器,目前单模块的输出功率已达 500W,组合输出已达 4000W。因其激光增益介质为盘状薄片,采用准端面泵浦,由于温度场为近一维分布,大大降低了热透镜效应,输出激光的光束质量与半导体泵浦棒状激光