

中国材料 工程大典

中国机械工程学会 中国材料研究学会

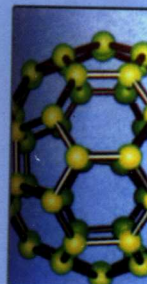


中国材料工程大典编委会

第 **25** 卷

材料特种加工成形工程 (下)

王至尧 主编



化学工业出版社

CHINA MATERIALS ENGINEERING CANON

中国材料 工程大典

中国机械工程学会 中国材料研究学会



中国材料工程大典编委会

第**25**卷

材料特种加工成形工程(下)

王至尧 主编

(京)新登字 039 号

内 容 简 介

中国材料工程大典是中国机械工程学会和中国材料研究学会共同组织全国 39 位院士、百余位各学科带头人、千余位材料工程专家共同执笔编写,全面反映当今国内外材料工程领域发展的最新资料和最新成果,集实用性、先进性和权威性于一体的大型综合性工具书。中国材料工程大典包括材料工程基础、钢铁材料工程、有色金属材料工程、高分子材料工程、无机非金属材料工程、复合材料工程、信息功能材料工程、粉末冶金材料工程、材料热处理工程、材料表面工程、材料铸造成形工程、材料塑性成形工程、材料焊接工程、材料特种加工成形工程、材料表征与检测技术等内容,涵盖了材料工程的各个领域,将最新的实用数据(特别是与国际接轨的标准数据)、图表与先进实用的科研成果系统地集合起来,并附应用实例,充分展示了材料工程各领域的现状和未来。中国材料工程大典不仅可以满足现代企业正确选材,合理用材,应用先进的材料成形加工技术,提高产品质量和性能,降低产品成本,增强产品市场竞争力的需要,而且对推动中国材料科学与材料成形加工技术的不断创新,促进制造业的发展,提高我国制造业的竞争能力、具有重要的现实意义。

本书为第 25 卷,材料特种加工成形工程(下)。主要内容包括材料高能束流加工技术、快速原型与快速制造、电加工机床质量控制与检测等。

本书主要供具有大专以上文化水平,从事材料工程研究的工程技术人员在综合研究和处理材料特种加工成形工程各类技术问题时使用,起备查、提示和启发的作用,也可供研究人员、理工院校的有关师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国材料工程大典.第 25 卷,材料特种加工成形工程.下/王至尧主编.——北京:化学工业出版社,2005.8
ISBN 7-5025-7327-5

I. 中… II. 王… III. ①材料科学②工程材料—特种加工—成形 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 094391 号

中国材料工程大典 第 25 卷 材料特种加工成形工程(下)

中国机械工程学会
中国材料研究学会
中国材料工程大典编委会
王至尧 主编
责任编辑:周国庆 陈志良 李骏带
责任校对:凌亚男
封面设计:雷嘉琦

化学工业出版社出版发行
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码:100029)
购书咨询:(010) 64982530
(010) 64918013
购书传真:(010) 64982630
<http://www.cip.com.cn>

新华书店北京发行所经销
北京蓝海印刷有限公司印装
开本 880mm×1230mm 1/16 印张 36 1/4 字数 1638 千字
2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷
ISBN 7-5025-7327-5
定价:120.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

序

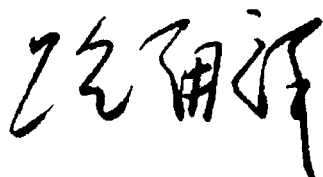
材料是当代社会经济发展的物质基础，也是制造业发展的基础和重要保障。进入 21 世纪以来，随着经济全球化的发展和中国的崛起，现代制造业的重心正不断向中国转移。据统计，今天中国制造业直接创造国民生产总值的 1/3 以上，约占全国工业生产的 4/5，为国家财政提供 1/3 以上的收入，占出口总额的 90%。但是与发达国家相比，我国制造业的水平不高、自主创新能力不足、高端市场竞争力还不强。我国虽然已是世界制造业大国，但还不是世界制造业强国。在有关因素中，材料工程基础薄弱是制约我国制造业发展的关键因素。广义的材料工程包括材料制备、测试和加工成形过程。为了提高我国制造业的水平和竞争力，突破材料工程这个薄弱环节，中国机械工程学会和中国材料研究学会牵头，会同中国金属学会、中国化工学会、中国硅酸盐学会、中国有色金属学会、中国复合材料学会共同组织编撰《中国材料工程大典》（简称《材料大典》），其目的是力图为我国制造业提供一部集科学性、先进性和实用性于一体的综合性专业工具书。以满足广大科技工作者的迫切需求，为科技自主创新和我国制造业的崛起加强技术基础。

经过 5 年多的艰苦努力，《材料大典》终将出版了。这部共 26 卷约 7000 万字的巨著，是 39 位两院院士和 1200 余位参编专家教授们辛勤劳动的智慧结晶。有的作者为此牺牲了健康，如一位退休了的总工程师，为了把他多年的研究成果和实践经验写成书稿，由于长时间写作，导致眼睛视网膜脱落……。这种敬业精神与坚强毅力是值得我们学习铭记的。借此机会，我们要感谢中国金属学会、中国化工学会、中国硅酸盐学会、中国有色金属学会、中国复合材料学会的支持。这些学会的众多专家教授积极参与了《材料大典》编写工作，与中国机械工程学会和中国材料研究学会的专家教授一起完成这项艰巨任务，从而使《材料大典》在完整性与先进性、科学性与实用性的结合上得到了加强；我们要感谢科学技术部、国防科学技术工业委员会、国家自然科学基金委员会、中国科学技术协会、中国科学院、中国工程院，以及各协作单位对编写工作的大力支持和积极帮助；我们也要感谢师昌绪院士等顾问的殷切指导，他们在编委会的两次工作会议上提出了许多重要的意见和建议，平时也给予了经常关心和指导，使我们少走了许多弯路；我们还要对关心和支持《材料大典》编写工作的科研院所、院校、企业以及有关人员表示感谢。没有大家的支持与协同，就不可能有《材料大典》的成功编写和顺利出版。

《材料大典》既总结了 10 多年来在材料工程方面的最新数据、图表及科研成果，还汇集了国内外在材料工程方面的成熟经验和先进理念，它体现了科学性、先进性和实用性的结合。可供具有大专以上文化水平的有关工程技术人员查阅使用，也可供理工院校的师生参考。

编撰《材料大典》涉及范围广，难度大，书中不可避免地会存在一些缺点和不足之处，恳请各位读者指正。

中国机械工程学会理事长
中国材料工程大典编委会主任



2005 年 9 月 23 日

前 言

《材料特种加工成形工程》为《中国材料工程大典》中的卷目之一。

材料特种加工成形是制造业材料成形的主要组成部分,是航天、航空、电子、兵器、船舶、汽车、电力、钢铁、石化、装备等支柱产业零部件加工的主要手段之一,涵盖了现代制造业中去除成形加工、受迫成形加工、离散-堆积成形加工、生长成形、极端制造等加工方法。

中国目前已成为材料特种加工成形大国。进入 21 世纪,中国的材料特种加工成形迎来了持续发展的大好局面,同时也面临着国外制造强国高品位、高精度、高自动化、高智能化等严峻挑战。只有向世界先进水平看齐,提高整体集成技术和创新水平,中国的材料特种加工才能在世界市场激烈的竞争中发扬优势,这也是技术人员面临的紧迫和艰巨的任务。《中国材料工程大典》中《材料特种加工成形工程》是在此形势和任务需求条件下编写出版的。

《材料特种加工成形工程》中是国机械工程学会特种加工分会首次组织编写的,是迄今为止篇幅最大、涵盖内容最新、最全的材料特种加工专业工具书。本书内容包括概论、材料电火花成形加工技术、材料数控电火花线切割技术、材料电化学加工技术、材料高能束流加工技术、快速原型与快速制造、电加工机床质量控制与检测等 7 篇约 400 万字。参加本书编写的有全国著名制造企业、研究所和大学等各方面专家教授共 50 余名。参加编写的主要单位有北京控制工程研究所、清华大学、上海交通大学、哈尔滨工业大学、南京航空航天大学、北京航空制造工程研究所、苏州电加工机床研究所、苏州三光科技集团、上海同济大学、大连理工大学、西北工业大学、江苏镇江大学、首都航天机械公司等。由王至尧负责统稿。编写工作历时 4 年完成。

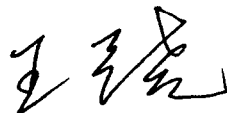
各篇的主编分别如下:

第 1 篇 概论	齐从谦
第 2 篇 材料电火花成形加工技术	刘晋春 白基成 郭永丰
第 3 篇 材料数控电火花线切割技术	李明辉
第 4 篇 材料电化学加工技术	徐家文
第 5 篇 材料高能束流加工技术	王亚军
第 6 篇 快速原型与快速制造	颜永年
第 7 篇 电加工机床质量控制与检测	连克仁

本书全面、系统地反映了我国材料特种加工成形的成就与经验,介绍了国内外材料特种加工的先进技术和研究动向,具有较强的“科学性、先进性和实用性”。在编写过程中强调以“全而精、新而准、实用便查”为特点,在整体设计上既立足全局,又突出重点。从材料特种加工成形的科学基础、加工工艺与设备、生产质量管理与检测,以及国内外最新技术应用等方面作了全方位论述;在取材上以“基础、通用、先进、实用”应用工程化为原则。其中第 6 篇快速原型与快速制造篇部分章节由美国卡布雷教授 (Dr. J. Keverian) 参与了编写,并提供相关资料,在此表示感谢。

本书主要供从事材料特种加工成形科技人员查阅使用,也可供研究人员、管理人员和高等院校师生参考。

感谢中国机械工程学会、中国材料研究学会和中国材料工程大典编委会对本卷编写工作的指导与大力支持。由于编写时间紧迫和编者水平有限,不当之处在所难免,恳请读者指正。



2005 年 10 月 6 日

目 录

第5篇 材料高能束流加工技术	1
第1章 激光加工技术	3
1 导论	3
1.1 激光的特性	3
1.2 光学谐振腔	3
1.3 高斯光束	6
1.4 激光加工材料原理	6
1.5 激光加工的特点	8
2 激光切割	8
2.1 激光切割的特性	8
2.2 激光切割的基本原理	8
2.3 激光切割过程温度场的数学模型	9
2.4 激光切割零件的尺寸精度	10
2.5 激光切割的质量及影响因素	11
2.6 常用工程材料的激光切割	12
3 激光焊接	13
3.1 概述	13
3.2 激光焊接工艺的特点	14
3.3 激光焊接的分类	15
3.4 热导焊	15
3.5 激光深熔焊接	17
3.6 激光焊缝组织和常见缺陷	24
3.7 激光焊接技术新发展	25
4 激光表面处理技术	28
4.1 概述	28
4.2 激光相变硬化	29
4.3 激光抛光	33
4.4 激光冲击强化	35
4.5 激光冲击成形	39
4.6 激光热应力成形	42
5 激光微细加工	45
5.1 概述	45
5.2 激光制备薄膜技术	48
5.3 激光刻蚀	51
第2章 电子束加工技术	56
1 概述	56
1.1 电子束加工技术的发展	56
1.2 电子束加工工艺	56
1.3 电子束加工的特点	56
2 电子束焊接	57
2.1 工作原理和分类	58
2.2 设备和装置	59
2.3 接头设计和焊接工艺	64
2.4 几种材料的焊接	66
2.5 应用	68
2.6 安全防护	69
3 电子束打孔	69
3.1 原理	69
3.2 设备	70
3.3 工艺及应用	71
4 电子束表面改性技术	72
4.1 电子束能量转变	72
4.2 电子束表面改性的应用	73
5 电子束物理气相沉积	74
5.1 概述	74
5.2 电子束物理气相沉积设备	74
5.3 电子束物理气相沉积的应用	76
6 电子束熔炼	79
7 电子束辐照技术	81
7.1 高分子材料电子束辐射加工	81
7.2 医疗用品及食品的电子束辐射灭菌消毒	83
7.3 硅功率器件的电子束辐射改性	84
8 电子束曝光	84
8.1 基本原理	84
8.2 扫描电子束曝光	85
8.3 投影电子束曝光	87
8.4 电子束曝光工艺特点	87
8.5 电子束曝光技术的最新进展	88
第3章 等离子体及离子束加工技术	89
1 等离子体基本概念	89
1.1 等离子体基本特性、频率、离子间的相互作用	89
1.2 等离子体应用技术简介	90
2 低气压等离子体	91
2.1 人造低温等离子体简介	91
2.2 低气压等离子体发生器	91
2.3 等离子体诊断技术	93
3 低温等离子体加工技术及应用	95
3.1 低温等离子体技术对材料的表面改性技术	95
3.2 等离子体注入与沉积技术	97
3.3 等离子体和离子束刻蚀技术	109
3.4 等离子体聚合技术	111
4 等离子体喷涂技术	111
4.1 湍流等离子喷涂	111
4.2 层流等离子喷涂	117
4.3 真空等离子喷涂设备及工艺	121
4.4 等离子喷涂涂层类型及其应用	123
第4章 磨料水射流加工	125
1 简介	125
1.1 磨料水射流加工系统	125
1.2 分类及特点	125
1.3 应用领域	126
2 磨料水射流加工技术基础	126
2.1 磨料水射流加工原理	126
2.2 材料的去除机理	127
2.3 切口性能	129
2.4 切割性能数学模型	129
3 磨料水射流性能与建模	131
3.1 磨料分类与性质	131
3.2 磨料水射流的计算流体力学模型	134
3.3 算例	134
4 加工参数及其应用	136
4.1 参数名称与简单分类	136
4.2 加工参数优化	136
4.3 加工实例	137
5 提高磨料水射流切割性能的方法	142

5.1 射流入射角的实验优化	142	2.3 扫描振镜的校正	199
5.2 喷嘴的控制振动	143	3 光固化快速成形工艺的软件	200
5.3 多次切割	144	3.1 数据处理软件	200
参考文献	146	3.2 成形控制软件	202
第6篇 快速原型与快速制造	151	4 光固化快速成形设备	208
第1章 快速原型概述	153	4.1 美国 3D Systems 公司	209
1 快速成形技术的发展历程	154	4.2 日本 CMET 公司	210
1.1 按所用材料形态分类	155	4.3 陕西恒通智能机器有限公司	211
1.2 按堆积单元的几何形态分类	156	4.4 北京殷华公司	211
1.3 按是否需另外设计支撑结构分类	156	4.5 武汉滨湖机电技术产业有限公司	212
1.4 按材料状态变化及其连接机理分类	156	第5章 激光选区烧结快速成形工艺	213
2 快速成形技术在新产品开发中的应用	156	1 激光选区烧结快速成形工艺的概述	213
3 快速成形应用情况	157	1.1 激光选区烧结基本原理	213
4 快速成形技术的发展趋势	157	1.2 SLS 工艺特点	214
5 快速成形技术的国内外现状	158	2 激光选区烧结快速成形设备的主要构成	214
第2章 离散-堆积成形原理	159	2.1 机械主体部分	214
1 去除成形和受迫成形	159	2.2 光路系统	214
2 生长成形	160	2.3 控制系统	215
3 离散方法与离散论方法学	160	2.4 辅助加热装置与冷却装置	215
4 数字化方法与数字化成形	161	3 激光选区烧结快速成形工艺的软件	215
5 基于集合论的离散模型	162	3.1 分层软件	215
6 快速成形工艺过程的离散分析	162	3.2 扫描路径生成软件	215
7 离散-堆积成形与其他成形原理的比较	163	3.3 设备控制软件	216
第3章 RP 技术链	165	4 激光选区烧结快速成形工艺的成形材料	216
1 三维数据模型获取	165	4.1 石蜡粉末	216
1.1 CAD 直接设计	165	4.2 聚合物粉末材料	216
1.2 逆向工程	165	4.3 金属粉末材料	216
2 STL 文件格式	169	4.4 陶瓷粉末材料	216
2.1 STL 文件的正确性	170	4.5 国内外 SLS 成形材料产品	217
2.2 STL 文件拓扑信息的建立	172	5 激光选区烧结快速成形的工艺研究	217
2.3 STL 文件错误修正	172	5.1 可控制参数	217
3 成形方向优化	173	5.2 成形机参数	218
3.1 基本概念	173	5.3 材料性能参数	219
3.2 成形方向决定因素的量化计算	174	5.4 分层参数	221
3.3 最佳成形方向的选择	174	6 激光选区烧结快速成形工艺的应用	221
3.4 成形方向自动选择的实例分析	174	6.1 设计和装配验证	221
4 支撑添加	175	6.2 外科整形模拟	222
4.1 影响支撑结构质量的因素	175	7 激光选区烧结典型设备	223
4.2 支撑结构添加方式	175	第6章 叠层实体制造快速成形工艺	226
4.3 FDM (MEM) 工艺支撑	176	1 叠层实体制造的工艺过程及技术性能	226
4.4 SL 工艺支撑	179	1.1 叠层实体制造工艺的发展过程及特点	226
4.5 SSM 工艺自适应网格划分	182	1.2 叠层实体制造系统的主要性能指标	227
5 分层技术	184	1.3 叠层实体制造设备	228
5.1 基本分层原理	184	2 叠层实体制造系统的功能与总体结构	230
5.2 减小分层层厚	186	2.1 系统功能	230
5.3 自适应分层	186	2.2 叠层实体制造控制系统	232
5.4 CAD 直接分层	188	2.3 叠层实体制造结构设计要求	233
5.5 曲面成形和曲面分层	191	2.4 本体结构设计	234
6 扫描路径填充	192	3 成形材料及其性能要求	235
6.1 扫描填充方式	192	3.1 基纸的性能要求	235
6.2 扫描填充算法及软件设计	193	3.2 熔融胶黏结剂及其热压变形	236
第4章 光固化快速成形工艺	194	4 叠层实体制造工艺的关键技术	237
1 光固化快速成形工艺	194	4.1 激光切割工艺	238
1.1 光固化快速成形工艺的定义	194	4.2 热压工艺	239
1.2 光固化快速成形工艺的特点	194	4.3 叠层实体制造工艺中零件的变形	241
2 光固化快速成形工艺的硬件	195	4.4 温度场计算	243
2.1 光固化快速成形设备的总体组成	195	5 叠层实体制造技术的工艺改进	245
2.2 光固化成形设备的子系统	196	5.1 大型原型的分区平行加工技术	245
		5.2 减小翘曲应力的预分割方法	247

第 7 章 熔融挤出快速成形工艺	250	2 轮廓成形工艺	295
1 熔融挤出快速成形工艺概述	250	3 三维绘图工艺	295
1.1 熔融挤出快速成形技术工艺原理	250	4 弹道微粒制造工艺	296
1.2 熔融挤出快速成形技术的特点	250	5 选择性抑制烧结 SIS	296
2 熔融挤出成形系统的构成	251	第 10 章 多功能快速成形制造系统	298
2.1 系统构成	251	1 功能集成的设计方法	298
2.2 喷头系统概述	251	1.1 功能分解	298
2.3 丝材挤压喷头系统	252	1.2 功能集成	298
2.4 螺旋挤压喷头系统	253	2 基于功能集成的多功能快速成形系统	298
2.5 喷头可靠性	254	2.1 单一与复合的离散-堆积原理	298
3 熔融挤出成形过程的数值模拟	255	2.2 单元技术的简单集成	299
3.1 MEM 工艺过程描述	255	2.3 单元技术的复杂集成	299
3.2 材料特性	255	3 统一模型	300
3.3 热力耦合问题的有限元分析理论	256	3.1 统一数据处理模型	300
3.4 物理模型的建立	256	3.2 统一功能模型——机械电子学模型	302
3.5 各因素对熔融堆积成形工艺成形质量的影响	256	3.3 统一结构模型	304
3.6 因素的综合影响	264	4 集成度计算	305
4 MEM 工艺质量控制	265	4.1 集成度计算原理	305
4.1 材料的收缩与偏置	265	4.2 具有三种 RP 工艺的多功能 RPM 系统的集成度计算	306
4.2 连续路径	265	5 多功能快速成形系统 M-RPMS	306
4.3 送丝速度与扫描速度匹配	266	第 11 章 快速制造概述	308
4.4 喷头的启停响应	266	1 快速制造的组装性和微滴性	308
4.5 路径的数控代码编排	267	2 快速制造的内涵	308
4.6 其他工艺性方法	267	2.1 制造过程中信息过程与物理过程相统一	308
5 熔融挤出成形工艺典型设备	267	2.2 制造过程中材料制备与材料成形相统一	309
5.1 美国 Stratasys 公司	267	2.3 制造过程中结构梯度与材料梯度相统一	309
5.2 北京殷华激光快速成形及模具技术有限公司	268	3 快速制造的绿色制造本质	309
6 熔融挤出快速成形工艺的典型实例	269	4 快速制造发展现状	310
6.1 熔融挤出成形工艺在产品开发中的应用案例	269	4.1 主要的快速制造技术	310
6.2 基于熔融挤出工艺的快速制造以及快速工具应用案例	271	4.2 快速制造的主要工艺方法	310
6.3 MEM 技术在医学组织工程降解支架成形的应用案例	271	5 金属零件和模具快速制造主要研发和生产单位	311
第 8 章 三维打印快速成形工艺	273	6 快速制造的应用	312
1 三维打印快速成形工艺原理	273	第 12 章 激光快速制造技术	313
1.1 三维打印快速成形工艺	273	1 激光熔覆快速制造技术	313
1.2 三维打印快速成形工艺的特点和优势	273	1.1 概述	313
2 三维打印快速成形工艺的使能技术——数字微滴喷射技术	273	1.2 激光熔覆快速制造技术的硬件	314
2.1 微滴喷射微输运方法	274	1.3 激光熔覆快速制造技术的软件	317
2.2 蘸笔直写微输运方法	276	1.4 激光熔覆快速制造技术的工艺研究	320
2.3 国内外在微输运技术方面的其他相关研究工作	277	1.5 尺寸精度和表面粗糙度分析	323
3 基于压电晶体的微滴喷射技术研究	278	1.6 激光熔覆快速制造技术的主要研究单位	323
3.1 基于压电晶体的微滴喷射原理	278	1.7 激光熔覆快速制造技术的应用领域及发展方向	326
3.2 压电驱动微滴喷射装置设计	279	2 激光选区烧结快速制造技术	327
3.3 压电驱动微滴喷射系统的实现	283	2.1 激光选区烧结快速制造技术的分类	327
3.4 喷射过程中微滴形态控制	284	2.2 激光选区烧结快速制造技术的材料	328
4 3DP 工艺的应用	286	2.3 激光选区烧结快速制造技术的应用	331
4.1 基于 MIT 三维打印专利的应用	286	2.4 激光选区烧结快速制造技术的研究内容与 发展方向	333
4.2 其他采用微输运技术的工艺	288	3 激光选区熔化快速制造技术	333
第 9 章 其他快速成形工艺	290	4 金属板材叠加制造技术	333
1 低温冰型快速成形工艺	290	5 生坯带激光烧结技术 GTLS	334
1.1 低温冰型快速成形工艺原理	290	第 13 章 电子束快速制造技术	335
1.2 低温冰型快速成形工艺研究	290	1 电子束技术	335
1.3 低温冰型工艺的应用	293	1.1 电子束技术发展及应用概况	335
		1.2 电子束技术原理	335
		1.3 电子束加工的物理基础	335
		1.4 电子束加工设备	336
		1.5 电子束加工设备分类	337

2 电子束与快速制造技术	337	2.2 光压力的估算	409
2.1 电子束与激光特征比较	337	2.3 基于 GLMT 的光力计算方法	409
2.2 电子束与激光的应用领域比较	338	3 应用光力的制造技术	410
2.3 电子束与激光在快速制造领域的应用 特点比较	338	3.1 激光引导直写技术 LGDW	410
3 电子束选区熔化快速制造技术	339	3.2 MAPLE DW 技术	411
3.1 定义及特点	339	4 基于激光引导直写的微堆积制造方法	411
3.2 粉末状态分析	339	4.1 成形系统	411
3.3 电子束熔化快速制造系统	341	4.2 粒子的捕获和输运	412
3.4 电子束熔化快速制造工艺	341	4.3 粒子的沉积	413
3.5 电子束熔化快速制造技术的典型应用	344	4.4 应用前景	413
4 电子束熔覆快速制造技术	345	第 18 章 生物制造	415
4.1 电子束熔炼技术	345	1 生物制造概论	415
4.2 电子束熔覆快速制造技术	345	1.1 概述	415
第 14 章 化学沉积快速制造技术	348	1.2 生物制造的科学技术前景	415
1 基于热化学沉积方法的快速制造技术	348	1.3 生物制造的定义	416
1.1 基于热化学沉积方法的快速制造技术的基本 原理	348	1.4 细胞受控组装	416
1.2 适用于热化学沉积方法的快速制造技术的成形 材料	348	1.5 细胞受控组装的技术路线	417
1.3 基于热化学沉积方法的快速制造技术的 特点	349	1.6 生物制造与其他相关学科的关系	418
1.4 基于热化学沉积方法的快速制造系统	349	1.7 生物制造产品的特点	418
1.5 热化学沉积成形原理	351	1.8 生物制造的体系结构	418
1.6 影响工艺过程的主要参数	351	1.9 生物制造的应用情况与前景	418
1.7 成形材料与工艺参数之间的合理匹配	352	2 生物制造的建模	419
1.8 基于热化学沉积方法的快速制造工艺试验	352	2.1 生物制造相关模型及其建模技术	419
2 激光诱导气相化学沉积成形技术	354	2.2 组织工程支架的梯度结构模型	420
3 电子束诱导气相沉积成形技术	355	2.3 模型的应用	423
4 激光诱导液相化学沉积成形技术	355	3 器官假体的快速制造	425
5 电化学液相沉积成形技术	356	3.1 假体的医学价值	425
6 基于化学沉积方法的快速制造技术的应用前景	356	3.2 假体材料	425
第 15 章 快速模具制造	357	3.3 假体快速制造	426
1 快速模具概述与分类	357	3.4 假体临床应用	427
1.1 快速模具概述	357	3.5 假体的发展方向	430
1.2 快速模具技术的分类	357	4 组织工程生物材料的快速成形	431
1.3 快速模具技术的应用前景	359	4.1 组织工程	431
2 非金属模具	359	4.2 组织工程生物材料	432
2.1 直接非金属模具	359	4.3 组织工程生物材料的快速成形工艺	432
2.2 间接非金属模具	361	4.4 应用	436
3 金属模具	365	5 细胞-材料单元受控组装	439
3.1 直接金属模具	365	5.1 细胞-材料单元受控组装的生物学基础	440
3.2 间接金属模具	366	5.2 细胞-材料单元三维受控组装的生物材料 基础	440
第 16 章 铸型制造技术	381	5.3 细胞组装的国内外研究现状	441
1 基本概念及分类	381	5.4 细胞受控组装的发展及应用前景	448
2 基于微滴喷射的直接 RP 铸型制造	381	第 19 章 快速成形与快速制造技术的精度和表面 质量研究	449
2.1 无模铸型制造工艺 (PCM)	381	1 快速成形误差的主要表现形式	449
2.2 直接壳型铸造工艺 (DSPC)	395	1.1 尺寸误差	449
2.3 Extrude Hone [®] Prometal RCT	397	1.2 形状误差	449
2.4 Z Cast Direct Metal Casting 工艺	398	1.3 表面误差	449
3 基于激光的直接 RP 铸型制造	399	1.4 分辨率	449
3.1 基于 SLS 工艺的直接 RP 铸型制造	399	2 快速成形工艺中的误差分析	450
3.2 基于 SL 工艺的直接 RP 铸型制造	404	2.1 快速成形工艺的误差来源	450
3.3 基于 LOM 工艺的直接 RP 铸型制造	406	2.2 快速成形技术的误差模型	451
4 结语	407	2.3 快速成形技术中的误差分析与控制	453
第 17 章 激光引导直写技术	408	3 快速成形原型或零件的变形	455
1 概述	408	3.1 变形的力学分析	455
2 光力原理	408	3.2 工艺参数对变形的影响及其控制	456
2.1 光力的几何光学解释	408	4 快速成形零件的表面质量	456
		4.1 表面特征	456
		4.2 表面几何形状偏差	457

4.3 成形件表面质量控制	458	5 加工工艺的质量控制	514
5 MEM 系统的误差分析与造型质量控制	459	5.1 加工间隙及加工参数	515
5.1 MEM 系统造型的误差分析	459	5.2 电解液	515
5.2 MEM 工艺过程中数据处理产生的误差	459	5.3 电解液流场	517
5.3 成形过程中材料收缩和黏结产生的误差	460	5.4 工艺装备的质量控制	517
5.4 设备与控制系统产生的误差	461	第4章 电加工机床检测的一般要求	519
5.5 成形工艺产生的误差	461	1 检测依据	519
6 快速成形机床的标准化研究	462	2 抽样	519
附录	464	3 测量不确定度评定	519
A GARPA 成员	464	4 粗大检验误差的判别	520
B 国内 RP& RM 主要研究和应用单位	466	5 首次检验结果出现“边缘数据”时的处理	520
C 国内 RP& RM 主要设备制造单位	485	6 数据处理	521
参考文献	488	7 重要度	521
第7篇 电加工机床质量控制与检测	501	8 满足度	521
第1章 绪论	503	第5章 电火花加工机床的精度检测	522
1 坚持“质量第一”的方针	503	1 电火花加工机床精度检测的一般要求与特点	522
2 采用国际标准和国外先进标准	503	2 电火花成形机的精度检验	523
3 产品的认证制度	503	2.1 检验要求说明	523
4 建立质量保证体系	503	2.2 电火花成形机几何精度检验	524
第2章 电火花加工机床的质量控制	504	2.3 电火花成形机定位精度检验	530
1 电气系统的质量控制	504	2.4 电火花成形机加工检验	535
1.1 元器件的采购供应	504	3 低速走丝电火花线切割机的精度检验	536
1.2 防止静电对器件与系统的损坏	504	3.1 检验要求说明	536
1.3 印刷板制作的质量控制	505	3.2 低速走丝电火花线切割机几何精度检验	537
1.4 PCB 板的测试与检查	506	3.3 低速走丝电火花线切割机数控精度检验	540
1.5 线缆制作的质量控制	506	3.4 低速走丝电火花线切割机工作精度检验	542
1.6 电柜安装	507	4 高速走丝电火花线切割机的精度检验	543
1.7 电柜的调试	508	4.1 检验要求说明	543
2 电火花加工机床的联机调试	510	4.2 高速走丝电火花线切割机几何精度检验	543
2.1 机床外观检验	510	4.3 高速走丝电火花线切割机数控精度的检验	546
2.2 安全可靠性检验	510	4.4 高速走丝电火花线切割机工作精度检验	547
2.3 主机几何精度检验	510	第6章 电加工机床安全防护的检测	548
2.4 机床性能检验	510	1 机械安全防护	548
2.5 机床定位精度检验	510	1.1 防止划伤	548
2.6 机床工作精度检验	510	1.2 防止颠覆	548
2.7 检验文件归档	510	1.3 限位装置	548
第3章 电解加工机床的质量控制	511	1.4 信号中断时的安全性	548
1 机床本体的质量控制	511	1.5 电极夹持的可靠性	549
1.1 床身	511	1.6 储丝筒的安全运行	549
1.2 工作箱	511	1.7 联锁机构	549
1.3 主轴头	511	1.8 操作力	549
1.4 进给系统	512	1.9 操作性	550
1.5 导电系统	512	1.10 工作液系统	550
1.6 机床总体形位公差的控制	512	2 电气安全防护	550
2 电源的质量控制	512	2.1 控制系统可靠性	550
2.1 输出参数	512	2.2 急停功能	551
2.2 稳压性能	513	2.3 “停止”器件	551
2.3 快速短路保护系统	513	2.4 脉冲电源电缆线的绝缘	551
2.4 可靠性控制	513	2.5 保护电路连续性	551
3 电解液系统的质量控制	513	2.6 绝缘电阻试验	552
3.1 电解液系统的组成	513	2.7 耐压试验	553
3.2 输液系统	513	2.8 电源适应能力	553
3.3 热交换系统	514	2.9 电箱直接接触电的防护	553
3.4 净化系统	514	2.10 电箱(壁龛)一般要求	554
4 控制系统的质量控制	514	2.11 电箱防护等级	554
4.1 参数控制系统	514	2.12 电机	555
4.2 循环控制系统	514	2.13 照明	555
4.3 保护和联锁系统	514	2.14 其他	555
		3 电磁兼容性(EMC)	555

3.1 适应项目	555	5 环境影响	556
3.2 要求	555	5.1 噪声	556
3.3 检查	555	5.2 油雾、烟雾（适用于电火花成形机类 机床）	557
4 防燃、防火（适用于使用可燃性工作液的电火花 机床）	555	6 其他	557
4.1 工作液	555	6.1 使用说明书	557
4.2 液面监控装置	556	6.2 警示标志	557
4.3 液温监控装置	556	6.3 包装	558
4.4 灭火器（适用于使用可燃性工作液的电火花 机床）	556	参考文献	559

中国材料工程大典
CHINA MATERIALS ENGINEERING CANON

第 25 卷 材料特种加工成形工程(下)

第 5 篇

材料高能束流加工技术

主 编	王亚军				
主 审	王先逵				
副主编	段爱琴	张永康	赵福令		
编 写	张永康	周建忠	左敦稳	段爱琴	
	邹世坤	刘方军	左从进	李晋炜	
	胡 刚	姚振中	武洪臣	张东辉	
	马国佳	叶云霞	徐路宁	周建明	
	王续跃	王 军			
审 稿	中国材料工程大典编委会				

中国机械工程学会
中国材料研究学会
中国材料工程大典编委会

第1章 激光加工技术

1 导论

1.1 激光的特性

激光是强相干光源,它所辐射的激光是一种受激辐射相干光,是在一定条件下光电磁场和激光工作物质相互作用,以及光学谐振腔的选模作用的结果。激光束与普通光相比最突出的特性是它具有高度的方向性、单色性、相干性和亮度。实际上,这四个特性本质上可归结为一个特性,即激光具有很高的光子简并度,也就是说,激光可以在很大的相干体积内有很高的相干光强。以下我们将分别讨论激光束的这四个特性,说明这些特性的物理意义并分析激光束具有这些特性的原因。

1) 方向性 激光器输出的激光束具有很高的方向性,一般激光器只向着数量级约为 10^{-6} sr (球面度) 的立体角范围内发射激光束,它比普通光源 4π 弧度的立体角范围里发光要小几百万倍。由此可见,激光束的方向性比普通光源发出的光好得多。

激光束之所以具有方向性强的特点是由于激光器受激辐射的机理和光学谐振腔对光束的方向限制所决定。然而,激光所能达到的最小光束发散角还要受到衍射效应的限制,它不能小于激光通过输出孔径的衍射角 θ_m , θ_m 称为衍射极限。

$$\theta_m \approx \frac{\lambda}{D} \quad (5.1-1)$$

式中, θ_m 为衍射角, rad; λ 为激光波长, μm ; D 为光斑直径, mm。由此可得激光束的立体发散角

$$\Omega_m = \theta_m^2 = \left(\frac{\lambda}{D}\right)^2 \quad (5.1-2)$$

式中, Ω_m 为立体衍射角, sr。

不同类型激光器的方向性差别很大,这与工作物质类型和均匀性、光腔类型、腔长、激励方式以及激光器的工作状态等都有关系。例如, He-Ne 气体激光器, $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$, 取 $D = 3 \text{ mm}$, 则衍射极限 $\theta_m \approx 2 \times 10^{-4} \text{ rad}$ 。固体激光器方向性较差,一般在 10^{-2} rad ; 半导体激光器发散角更大,约在 $(5 \sim 10) \times 10^{-2} \text{ rad}$ 。

2) 单色性 光源的单色性是指光源谱线的宽度程度。如果谱线较窄,则说明光源单色性好,反之则单色性差。单色性常用比值 $\Delta\nu/\nu$ 来表征, ν 为谱线的中心频率, $\Delta\nu$ 为谱线宽度,当然单色性也可用 $\Delta\nu$ 直接表示。

普通光源的单色性是很差的,即使是单色性最好的氪灯,线宽也有 $10^4 \text{ Hz} \sim 10^6 \text{ Hz}$ 。激光产生的原理决定了其线宽相当窄,理想状况下其线宽接近于零。但实际情况由于种种谱线加宽机制的作用,使得激光谱线有一定的宽度,即使这样,激光的谱线线宽与普通光源的线宽也是不可比的,He-Ne 激光器的线宽极限可达 10^{-4} Hz ,显然这是极高的单色性。

3) 相干性 光的相干性是指在不同时刻、不同空间点上两个光波场的相关程度。这种相关程度在两个光波传播到空间同一点叠加时,则表现为形成干涉条纹的能力。

光频电磁场的相干特性,完全由辐射场本身的空间方向分布特性和频率分布特性所决定。相干性又可分为空间(横向)相干性和时间(纵向)相干性。空间相干性用来描述垂直于光束传播方向上各点之间的相位关系,而时间相干性则

用来描述光束传播方向上各点的相位关系。

空间相干性是指光源在同一时刻、不同空间,各点发出的光波相位关联程度。光束的空间相干性和它的方向性是紧密联系的。对于普通光源,其空间相干性可以用杨氏双缝干涉试验来说明光辐射场的空间相干性。光束发散角满足条件 $\Delta\theta \leq \frac{\lambda}{\Delta x}$,由此可看出光束发散角与空间相干性紧密联系。

发散角小,则空间相干性好,反之,空间相干性差。由于激光本身就具有方向性好,即发散角小的特点,所以激光光束具有明显的空间相干性。

时间相干性是指光源上同一点在不同时刻 t_1 和 t_2 发出的光波的相位关联程度。同样,光束的时间相干性和它的单色性亦是紧密联系的。对于普通光源可用迈克尔逊干涉仪试验来说明光波辐射场的时间相干性。

$$\tau_c = 1/(\Delta\nu) \quad (5.1-3)$$

该式体现了光波的相干时间 τ_c 和单色性 $\Delta\nu$ 之间的关系。由于激光辐射的单色性很高,频宽 $\Delta\nu$ 很小,其相干时间 τ_c 很长,亦即时间相干性很好。

4) 亮度 光源的亮度 ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$) 是表征光源定向发光能力强弱的一个重要参量,其定义为

$$B = \frac{\Delta P}{\Delta S \Delta \Omega} \quad (5.1-4)$$

式中, ΔP 为光源在面积为 ΔS 的发光表面上和 $\Delta \Omega$ 立体角范围内发出的光功率,对于激光器来说, ΔP 相当于输出激光功率; ΔS 为激光束截面积; $\Delta \Omega$ 为光束立体发散角。

普通光源,由于方向性很差,能量非常分散,即使使用透镜进行聚焦,能量也很难聚到很小的范围内,故亮度极低。例如太阳的亮度值为 $B \approx 2 \times 10^3 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ 。对于激光器来说,输出光束的发散角很小,其亮度是普通光无法比拟的。按目前发展水平,一般常见的各类激光器输出激光的亮度值范围为

气体激光器: $B = 10^4 \sim 10^8 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$

固体激光器: $B = 10^7 \sim 10^{11} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$

调 Q 固体激光器: $B = 10^{12} \sim 10^{17} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$

由上述数值可看出,激光输出定向亮度值远远大于普通光源的亮度值。目前利用锁模技术,已能使钕玻璃激光器发出 $\Delta t < 3 \times 10^{-12} \text{ s}$ 的超短脉冲,峰值功率已超过 $17 \times 10^{12} \text{ W}$,其亮度就更高了。

1.2 光学谐振腔

激光之所以具有方向性、单色性、相干性和高亮度的特点,是与激光器中光学谐振腔密不可分的。光学谐振腔是常用激光器的主要组成部分之一,其作用包括两点。第一,提供正反馈,在简单情况下,激光谐振腔是在激活物质两端适当地放置两个反射镜组成,受激辐射经过两反射镜多次反射,从而使受激辐射多次通过激活介质而进一步被放大,当受激辐射所提供的增益超过损耗时,建立并维持自激振荡。第二,控制腔内振荡光束的特性,使腔内建立的振荡被限制在腔所决定的少数本征模式中,从而提高单个模式内的光子数,获得单色性好、方向性好的强相干光。研究光学谐振腔的目的,就是通过了解谐振腔的特性,来正确设计激光器的谐振腔,使激光器的输出光束特性达到应用的要求。

1.2.1 有关光学谐振腔的基本概念

(1) 光学谐振腔的构成和分类

最简单的光学谐振腔是在激活介质两端恰当放置两个镀有高反射率的反射镜构成。随着激光技术的发展,以后又广泛采用由两块具有公共轴线的球面镜构成的谐振腔,称为共轴球面腔,这种腔的主要特点是:侧面敞开,没有光学边界以抑制振荡模式,并且它的轴向尺寸(腔长)远大于振荡波长,一般也远大于横向尺寸即反射镜的宽度。因此,这类腔为开放式光学谐振腔,简称开腔。根据光束几何逸出损耗的高低,开腔通常可分为稳定腔、非稳腔和临界腔三类。通常,气体激光器具有开腔的特性。

在固体激光器中,由于固体激光材料通常都具有比较高的折射率,在侧壁磨光的情况下,那些与轴线交角不太大的光线在侧壁上发生全内反射,因此如果使得腔反射镜紧贴着激光棒的两端,这样构成的激光谐振腔为封闭腔,从理论上分析这类腔时作介质腔处理。

另一种光腔是气体波导谐振腔,其结构为一段空心介质波导管两端适当位置处放置两款适当曲率的反射镜片。这样,在空心介质波导管内,场服从波导管中的传输规律;而在波导管与腔镜之间的空间中,场按与开腔类似的规律传输。在这种腔中,由于波导管的孔径往往较小,所以不能忽略侧面边界的影响。

以上是从光在两反射镜之间传输时,侧面边界对光传输的影响角度进行的分类。实际上谐振腔还可以按不同的方法分类,如端面反馈腔与分布反馈腔、球面腔与非球面腔、高损耗腔与低损耗腔、驻波腔与行波腔、两镜腔与多镜腔、简单腔与复合腔等。

(2) 光学谐振腔的作用

谐振腔是激光器的重要组成部分之一,对大多数激光工作物质,适当结构的谐振腔对产生激光是必不可少的。其主要作用表现在以下两个方面。

1) 提供光学正反馈作用 激光器内受激辐射过程具有“自激”振荡的特点,即由激活介质自发辐射诱导的受激辐射,在腔内多次往返而形成持续的相干振荡。腔的正反馈作用是通过使光束在腔内往返而增加光束通过的路程,进而不断放大光强,直到能够保证有足够能量克服腔内损耗而维持自激振荡。

谐振腔的光学反馈作用取决于两个因素:一是组成腔的两个反射镜面的反射率,反射率越高,反馈能力越强;二是反射镜的几何形状以及它们之间的组合方式。上述两个因素的变化都会引起光学反馈作用大小的变化,即引起腔内光束损耗的变化。

2) 产生对振荡光束的控制作用 主要表现为对腔内振荡光束的方向和频率的限制。由于激光束的特性与光腔结构有密切联系,因而可用改变腔的参数(反射镜、几何形状、曲率半径、镜面反射率及配置)的方法来达到控制激光束。具体地说,可达到以下几方面的控制作用:①有效地控制腔内实际振荡的模式数目,使大量的光子集结在少数几个状态之中,提高光子简并度,获得单色性好、方向性强的相干光;②可以直接控制激光束的横向分布特性、光斑大小、谐振频率及光束发散角等;③可以改变腔内光束的损耗,在增益一定的情况下能控制激光束的输出功率。

3) 光学谐振腔的稳定条件 在光学谐振腔中,光在两反射镜之间来回不断反射,如果在腔内经过几次反射后就离开腔体,则腔的损耗较高,因而不易形成激光。一般激光器要求谐振腔能够保证光在腔内来回反射始终不离开谐振腔,满足这一要求的腔称为稳定腔。

腔内近轴光束经往返无限多次而不会横向逸出腔外即没有几何偏折损耗,即认为谐振腔处于稳定工作状态,称为稳定腔,其特点是横向逸出损耗可以忽略。反之则腔内任何近轴光束在往返有限次后,会横向偏折腔外,从几何上看必定

是高损耗的,这种谐振腔处于非稳定工作状态,称为非稳定腔。当然,不是说这类腔不能稳定工作,而是仅指这类腔损耗大而已,在有些高增益激光器中仍需应用。

1.2.2 光学谐振腔的模式

电磁场理论表明,在具有一定边界条件的腔内,电磁场只能存在一系列分立的本征状态之中,场的每种本征状态将具有一定的振荡频率和空间分布。通常将谐振腔内可能存在的电磁场本征态称为腔的模式(或称波型)。从光子的观点来看,腔的模式也就是腔内可区分的光子状态,同一模式内的光子具有完全相同的状态(如频率、偏振和运动方向),不同的模对应于不同的场分布和振荡频率。光学谐振腔的模式可以分为纵模和横模。

1) 纵模 均匀平面波传播在平行平面腔内沿腔轴线方向的往返腔镜上反射时,入射波和反射波会发生干涉。为在腔内形成稳定的振荡,要求光波因干涉而得到加强。由多光束干涉理论知道,干涉的条件是:光波在腔内沿轴线方向传播,在腔内往返一周再回到原来位置时,应该与初始出发波同相,即相差 $\Delta\phi$ 为 2π 的整数倍,也就是说,只有某些特定频率的光才能满足谐振条件:

$$\Delta\phi = q \times 2\pi \quad (5.1-5)$$

式中, q 为正整数。

设图 5.1-1 中所示的平行平面谐振腔内充满折射率为 n 的均匀介质,腔长为 L (几何长度),光在腔内沿轴线方向来回一周所经历的光学长度为 $2L' = 2nL$ 。由光程差和相差之间的关系得到相位改变量为

$$\Delta\phi = \frac{2L'}{\lambda_0} \times 2\pi = \frac{2nL}{\lambda_0} \times 2\pi = q \times 2\pi \quad (5.1-6)$$

式中, λ_0 为光波在真空中的波长; L' 为腔的光学长度; q 为整数。

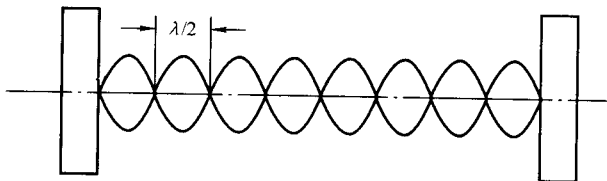


图 5.1-1 光腔内形成驻波示意图

将满足上式的波长用 λ_{0q} 来标识,则由式 (5.1-6) 可得

$$L' = q \times \frac{\lambda_{0q}}{2} \quad (5.1-7)$$

上式也可以用频率来表示,则有:

$$\nu_q = q \times \frac{c}{2L'} \quad (5.1-8)$$

由上述讨论可知,长度为 L 的平行平面腔只对频率满足式 (5.1-7) 和式 (5.1-8) 提供正反馈,因此,这两式就是平面波在该腔中传播的谐振条件, λ_{0q} 为腔的谐振波长, ν_q 称为腔的谐振频率。

在平行平面腔内存在两列沿轴线相反方向传播的同频率光波,这两列光波叠加的结果,将在腔内形成驻波。根据波动光学,当光波波长与平行平面腔腔长 L 满足式 (5.1-7) 时,将在腔内形成稳定的驻波场,这时腔长应为半波长的整数倍,参看图 5.1-1。所以式 (5.1-7) 又称为驻波条件,激光器中满足谐振条件的不同纵模对应着谐振腔内各种不同的稳定驻波场。

平行平面腔中,满足式 (5.1-7) 沿轴线方向(即纵向)形成的驻波场称为它的本征模式。其特点是:在腔的横截面内场是均匀分布的,沿腔的轴线方向形成驻波,驻波的波节数由 q 决定。通常把由整数 q 所表征的腔内纵向的稳定场

分布称为激光的纵模, q 称为纵模的序数 (即驻波系统在腔的轴线上零场强度的数目)。不同的纵模相应于不同的 q 值, 对应不同的频率。

腔内两个相邻纵模频率之差 $\Delta\nu_q$ 称为纵模间隔。由式 (5.1-8) 可得

$$\Delta\nu_q = \nu_{q+1} - \nu_q = \frac{c}{2L'} = \frac{c}{2\eta L} \quad (5.1-9)$$

由此可知, $\Delta\nu_q$ 与 q 无关, 对于一定的光腔为一常数, 腔的纵模在频率分布上是等距离排列的, 如图 5.1-2 所示。其形状像一把梳子, 常称为“频率梳”, 图中每一个纵模均有一定的谱线宽度 $\Delta\nu_c$ 。但实际上在激光器光学谐振腔中能够存在的纵模在满足驻波条件的同时, 符合一定的阈值条件, 而且还要能够在“模竞争”中获胜。

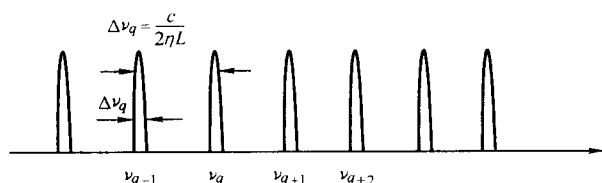


图 5.1-2 光学谐振腔内满足驻波条件的纵模形成的“频率梳”

2) 横模 除了纵向 (沿光腔轴线方向 z 向) 外, 腔内电磁场在垂直于其传播方向的横向 $x-y$ 面内也存在稳定的场分布, 通常称为横模。纵模是由于在腔内的多次往返传播形成纵向稳定驻波场分布, 那么往返传播对横向光场分布是什么影响呢?

设平行平面谐振腔如图 5.1-3a 所示, 两块反射镜的直径为 $2a$, 间距为 L (即腔长)。由于反射镜几何尺寸是有限的, 因此只有落在镜面上的那部分光束才能被反射回来, 亦即当光束在两镜间往返传播时, 必然会因镜边缘的衍射效应而产生损耗。设初始时刻在镜 1 上有某个场分布 u_1 , 则光波在腔镜中由镜 1 传到镜 2 时, 将在镜 2 上产生一个新的场分布 u_2 , 场 u_2 经过第二次反射传播后又将在镜 1 上产生一个新的场分布 u_3 , 每经过一次传播, 光波因衍射而损失一部分能量, 并且衍射还将引起能量分布的变化。因此, 经过一次往返传播之后所生成的场 u_3 不仅振幅小于 u_1 , 而且其分布可能与 u_1 不同。以后 u_3 又产生 $u_4 \dots$, 这一过程将一直往返下去。理论分析表明, 经过足够多次的往返传播之后, 腔内形成这样一种稳态场, 它的相对分布不再受衍射影响, 它在腔内往返一次后能够“自再现”出发时的场分布, 这种稳态场经一次往返后惟一可能的变化, 仅是镜面上各点的场振幅按同样的比例衰减, 各点的相位发生同样大小的滞后。这种在腔反射镜面上经过一次往返传播后能“自再现”的稳定场分布称为自再现模或横模。若两个镜面是完全相同的对称腔, 这种稳定场分布经单程传播后即实现自再现。

在实际情况下, 谐振腔的截面是受腔内的其他光阑所限制。如气体激光器, 放电管孔径就是谐振腔的限制孔。为了形象地理解开腔中自再现模的形成过程, 把平行平面谐振腔中光波来回反射的传播过程, 等效于光波在光阑传输线中的传播。这种光阑传输线如图 5.1-3b 所示, 它由一系列间距为 L 、直径为 $2a$ 的同轴孔结构构成, 这些孔径开在平行放置无限大、完全吸收的屏上。设有一个无限扩展的具有等相位面的平面光波, 沿轴向射到第一个光阑上, 如图 5.1-3c 所示, 假如入射光在进入第一个光阑之前, 场的振幅分布沿光阑是均匀的。经第一个光阑后由于衍射作用将使波阵面发生畸变, 部分光将偏离原来的传播方向, 产生一些衍射瓣, 使光波的振幅和相位分布均发生一些变化, 射到光阑孔以外的

光将被黑体屏完全吸收。当通过第二孔时, 边缘部分的衍射波又被光阑所挡, 其边缘强度将比中心部分小, 且振幅和相位分布又产生了一些新的变化。这样顺次通过第三、四光阑时将继续发生上述过程, 每通过一次光阑, 光波的振幅和相位都要发生一次改变。可以设想, 通过一系列的光阑后光波逐渐趋近于一种稳定的状态, 即相当于镜面上来回反射光波的相对振幅和相位分布不再发生变化, 这种稳态“自再现”场分布称为谐振腔的横模。这种分布的特点是光能集中在光斑中心部分, 而边缘部分光强甚小。

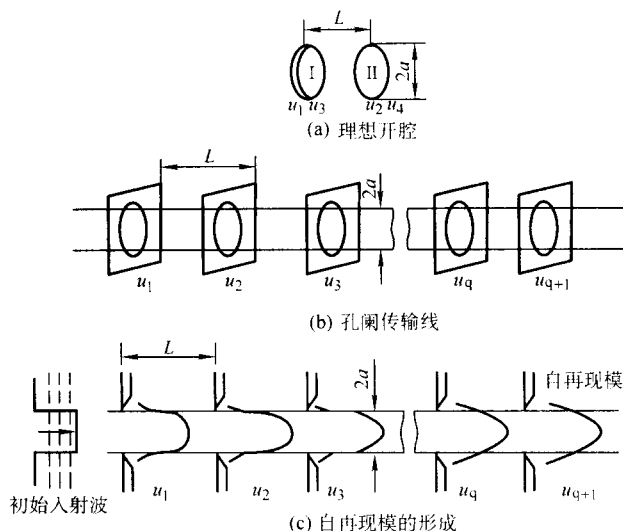


图 5.1-3 开腔中自再现模的形成

应当指出, 振荡模主要是因为光波通过光阑系统, 一再受到周期性的损失, 其振幅和相位不断地进行再分布所造成的结果, 它与初始的波形特性无关, 即使原始波不是空间相干的, 它在经过一系列光阑之后, 也将变成相干光。因为光孔截面上的一列子波的传播, 在衍射时不仅使部分光波衍射朝外, 也使一部分光波衍射朝内, 光阑截面上的各列子波的这种相互混杂, 在经过大量的穿透之后, 光阑截面上一点的光波就不总是与第一光阑上某一点的光波相联系, 而是与它整个截面上的子波列有关。在这种情况下, 一种原来是部分空间相干的或完全不相干的准单色光, 将可能变成完全的空间相干光。当然, 在空腔中, 这种过程将伴有巨大的能量损失。在激光器中, 这种损失将由激活介质的增益获得补偿。

综上所述, 激光的横模, 实际上就是谐振腔所允许的 (也就是在腔内来回反射, 能保持稳定不变的) 光场的各种横向稳定分布。

不同的横模对应于不同横向稳定的光场分布和频率, 图 5.1-4 示出矩形反射镜 (轴对称) 和圆形反射镜 (旋转对称) 系统中最初若干个横模的图形。

激光的模式一般用符号 TEM_{mq} 来标记, 其中 TEM 表示横向电磁场, q 为纵模的序数, 即纵向驻波波节数, m, n 为横模的序数, 用正整数表示, 它们描述镜面上场的节线数。我们把 $m=0, n=0$, TEM_{00q} 称为基模 (或横向单模), 是光斑的最简单结构, 模的场集中在反射镜中心。而其他的横模称为高阶横模, 即在镜面上将出现场的节线 (即振幅为零的节线), 且场分布的“重心”也将靠近镜的边缘。不同横模不仅振荡频率不同, 在垂直于其传播方向的横向 $x-y$ 面内的场分布也不同。对于方形镜 (轴对称情况) TEM_{mn} , m 表示 x 方向的节线数; n 表示 y 方向的节线数。对圆形镜 (旋转对称情况) m 表示径向节线数, 即暗环数; n 表示角向节线数, 即暗直径数。

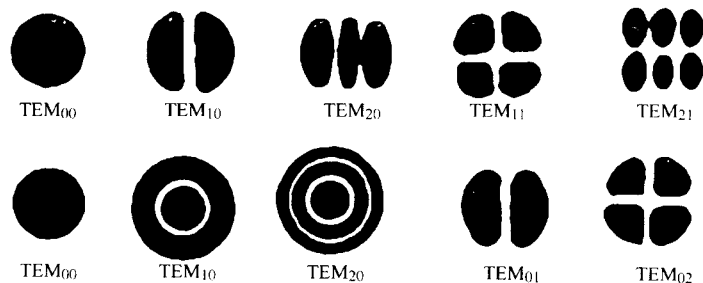


图 5.1-4 方形镜和圆形镜的横模图形

1.3 高斯光束

稳定腔输出的激光束属于各种类型的高斯光束,非稳腔输出的基模光束经准直后,在远场的强度分布也接近高斯型。因此研究高斯光束的有关特性对与激光束有关的光学系统的设计,以及光学谐振腔的工程设计都是很重要的。

无论是由何种结构的稳定腔所产生,沿 z 轴方向传播的基模高斯光束解析表达式可表示为:

$$E(x, y, z) = E_0 \frac{\omega_0}{\omega(z)} e^{-\frac{x^2+y^2}{\omega^2(z)}} e^{-i[k(z + \frac{z^2}{2R(z)}) - \arctan \frac{z}{f}]} \quad (5.1-10)$$

式中

$$\begin{cases} r = x^2 + y^2 \\ k = \frac{2\pi}{\lambda} \\ \omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{f}\right)^2} \\ R(z) = z + \frac{f^2}{z} \\ f = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda}, \omega_0 = \sqrt{\frac{\lambda f}{\pi}} \end{cases} \quad (5.1-11)$$

z 轴坐标原点设在光腰处, ω_0 为光腰处的光斑直径, f 为产生高斯光束的共焦腔参数,也称高斯光束的共焦参数, $R(z)$ 、 $\omega(z)$ 分别表示 z 坐标处高斯光束的等相位面曲率半径及等相位面上的光斑半径。

高斯光束的基本性质如下:

1) 振幅分布及光斑半径 高斯光束在任一 z 坐标处,其横向振幅分布为高斯分布,从中心向外平滑降落。当振幅降落到中心的 $1/e$ 处,该处到中心的距离定义为光斑半径:

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{f}\right)^2} = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi\omega_0}\right)^2} \quad (5.1-12)$$

光斑半径随 z 坐标按双曲线规律变化。在 $z=0$ 处, $\omega(0) = \omega_0$ 为腰斑半径;在 $z = \pm f$ 处, $\omega(\pm f) = \sqrt{2}\omega_0$ 。

2) 等相位面分布 沿高斯光束轴线每一点处的等相位面都可以视为球面,其相对于 $(0, 0, 0)$ 点的相移由式中的相移因子决定。曲率半径也随 z 坐标而变,即:

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{f}{z}\right)^2 \right] = z \left[1 + \left(\frac{\pi\omega_0^2}{\lambda z}\right)^2 \right] \quad (5.1-13)$$

由上式可以看出:

$z \rightarrow \infty$, $R(z) \rightarrow \infty$, 即离腰无穷远处的等相位面是平面。

$z = \pm f$ 处, $|R(\pm f)| = 2f$, 这是等相位面曲率半径数值的极小值。

$z > 0$ 时, $R(z) > 0$, 等相位面凸向 z 轴正向。

$z < 0$ 时, $R(z) < 0$, 等相位面凸向 z 轴负向。

$z = 0$, $R(z) \rightarrow \infty$, 即光腰处等相位面是平面。

3) 远场发散角 高斯光束的远场发散角的大小为:

$$\theta = 2\sqrt{\frac{\lambda}{\pi f}} = \frac{2\lambda}{\pi\omega_0} \quad (5.1-14)$$

由此式可见,腰斑越小,发散角越大。

综上所述,高斯光束既不是平面波,也不是一般的球面波。在傍轴近似条件下,可以把它看成是一种曲率中心与曲率半径都随传播过程而不断改变的非均匀球面波,这是因为它的等相位面是球形,但等相位面上的光场振幅分布却是非均匀的高斯分布。

1.4 激光加工材料原理

激光应用的重要基础就是激光与材料相互作用,利用激光与材料相互作用过程中或作用后产生的各种物理、化学和生物效应等,达到应用目的。本书内容侧重于介绍一些相对较为成熟的激光加工技术,如激光淬火、激光切割、激光焊接等,这些技术主要应用激光与材料(尤其是金属材料)相互作用过程中的热效应和力效应达到加工目的,所以本节主要介绍与此相关的一些规律。

1.4.1 激光与材料相互作用的一般规律

激光束照射工件表面,其能量转化要遵循能量守恒定律,即

$$E_0 = E_r + E_a + E_p$$

或

$$1 = \frac{E_r}{E_0} + \frac{E_a}{E_0} + \frac{E_p}{E_0} = R + \alpha + \psi \quad (5.1-15)$$

式中, E_r 为被材料表面反射的能量; E_a 为被材料表面吸收的能量; E_p 为被材料表面透射的能量; E_0 为入射到材料表面的总能量。相应的 R 、 α 、 ψ 为材料表面对光的反射系数、吸收系数和透射系数。

当激光束用于对金属材料进行热处理时,激光束是不能穿透金属材料的,因此上式中 $E_p = 0$, 即式 (5.1-15) 可写成:

$$R + \alpha = 1 \quad (5.1-16)$$

所以激光束照射金属材料表面,入射能量分成两部分:一部分被材料表面反射掉,另一部分被材料表面吸收。当金属表面吸收光能后,将激活晶格点结点原子,进而使光能转化为晶格的热振荡,即光能转化为热能,然后在此基础上发生其他过程,如从表层向基体方向进行热扩散和热传导完成加热过程,或表层材料气化,结合一些外界条件形成冲击压力波等。

对于各向同性的均匀物质来说,强度为 I 的入射激光在材料中随着深度增加而减弱,设通过厚度为 dx 薄层后,其强度的相对减少量为 dI/I , 则 $dI/I \propto dx$, 即

$$\frac{dI}{I} = \alpha dx \quad (5.1-17)$$

式中, α 为吸收系数。设入射到表面的激光强度为 I_0 , 将上式从 0 到 x 积分,可得激光入射到距离表面深度为 x 处的激