

激光焊接与切割

质 量 控 制

陈武柱 著

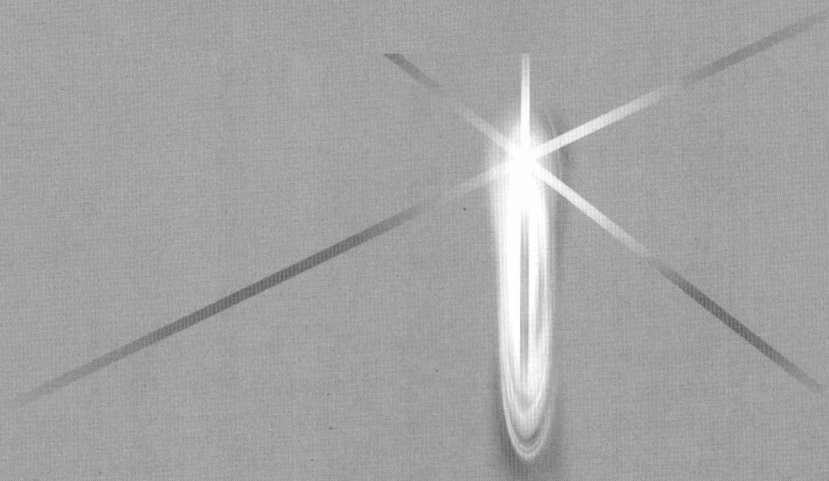
 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



激光焊接与切割

质 量 控 制

◎ 陈武柱 著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书以作者在激光焊接与切割领域的研究和应用成果为基础,论述控制激光焊接与切割质量的工艺措施、自动控制技术及其基本原理。内容包括:激光焊接的理论基础和工艺基础知识;激光深熔焊中成形不稳定性和小孔型气孔两种缺陷产生的机理、数学物理模型、抑制方法以及工程中获得优质焊缝的成功范例;光束焦点位置和深熔焊熔透状态的实时检测和闭环控制的原理、系统、技术关键和控制效果,提供兼有先进性和实用性的高水平控制方法;激光填丝焊、激光-GMA 复合焊和激光切割三种工艺方法的原理、工艺特点、影响加工质量的因素及实现质量实时控制的新方法。本书力图从理论和实际的结合上对以上涉及加工质量的主要问题进行全面综合论述,书中汇集了反映该领域目前国际水平的技术资料。

本书可作为研究激光焊接、切割和各种激光加工方法的教师、研究生和大学生的参考书和教材,也可作为从事相关激光加工技术和加工设备设计制造的工程技术人员的参考资料,还可供从事高能束加工和电弧焊方法研究和应用的科技人员、研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

激光焊接与切割质量控制/陈武柱著. —北京:机械工业出版社, 2010.6

ISBN 978-7-111-30922-2

I. ①激… II. ①陈… III. ①激光焊-质量控制②切割-质量控制
IV. ①TG4

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第106693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 版式设计:霍永明

责任校对:申春香 封面设计:赵颖喆 责任印制:乔宇

三河市国英印务有限公司印刷

2010年9月第1版第1次印刷

184mm×260mm·16.25印张·2插页·404千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-30922-2

定价:48.00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) 88379733

社服务中心:(010) 88361066

网络服务

销售一部:(010) 68326294

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

教材网:<http://www.cmpedu.com>

读者服务部:(010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

序

激光是 20 世纪人类的伟大发明，激光在焊接中的应用极大地推动了焊接技术的革新和发展，激光焊接正越来越显示出它显著的优越性和很强的生命力，被越来越广泛地应用和更深入地研究。

影响激光焊接技术发展的一个重要因素是如何确保快速的激光焊接过程的稳定性和质量的可靠性，从这个意义上来说，除了激光器和光学系统的因素之外，对激光焊接质量的实时检测与控制显得尤为重要。

1992 年，在清华大学机械系时任领导的规划和支持下，本书作者陈武柱教授负责建立了激光加工研究中心，十余年来他一直致力于激光焊接领域的科研、教学和研究生培养工作，尤其对激光焊接与切割质量的检测与控制，进行了较深入的研究，取得了较好的成果。本书核心内容取材于作者的研究成果，其中所涉及的三种激光焊接过程的分析、焊接不稳定性的监测与控制、小孔型气孔的抑制方法、激光束焦点位置的寻优与控制、激光深熔焊及复合焊熔透检测与控制、激光切割质量检测与控制等内容，都是实践中提出的重要问题，也是激光焊接和切割技术发展的前沿课题。将这些内容整理、归纳、总结成书，不仅对从事激光焊接与切割的工作者有很好的参考价值，对从事其他激光加工行业、其他焊接方法质量检测与控制的研究也有启迪作用。

全书除第 1 章综述激光焊接的理论和技術基础外，其余各章对相关的工艺方法、控制对象的特点、影响因素、国内外研究现状进行了分析，对检测与控制原理、系统、技术关键和控制效果进行了较详尽的介绍，较好地体现了系统性、实用性和先进性的统一。

相信本书的出版将有助于激光焊接的深入研究和推广应用，我愿热忱向读者推荐本书。

中国科学院院士
清华大学教授



前 言

世界上第一台激光器的问世到现在已有 50 年的历史，千瓦级 CO₂ 激光器的诞生带动了激光焊接的突破性进展，至今也已将近 40 年。几十年来，激光焊接已越来越显示出其高质量、高精度、低变形、高效率、高柔性等显著优越性，为越来越多的工业部门所应用并被更深入地研究。

但是在所有激光加工方法中，激光焊接的物理过程最复杂，焊接过程中存在光致等离子体、小孔效应等极其不稳定的因素；它对焊件的准备、光学系统的状态、焊接参数的选择和控制等方面的要求都很高，稍有疏忽就会产生焊接缺陷。所以在高速的激光焊接中如何保证过程的稳定性和质量的可靠性，成为进一步发展和推广应用激光焊接技术的关键。因而对激光焊接质量的实时检测和控制有迫切的需要，已成为国内外的研究热点。十余年来，在这方面的研究已取得了明显的进展。

本书根据作者十余年的科研实践经验和国际上技术发展动向，提炼出涉及激光焊接与切割质量的 7 个重要问题进行论述。这些内容都是亟待澄清和解决的实际问题，也是激光焊接与切割的前沿课题，具有明显的实用性、前沿性和先进性。书中首先综述激光焊接的基本原理和工艺基础，然后就这 7 个问题按专题对相关的工艺方法、控制对象的特点、影响因素、国内外研究现状进行分析，对检测与控制原理、系统、技术关键和控制效果进行介绍。质量控制既包括有效的工艺措施，也包括先进的实时自动控制方法；叙述上理论与实际结合，硬件与软件并重，图文并茂，并提供丰富的参考资料。

在国内外有关激光加工的书籍中均包含有激光、激光器和激光加工系统（包括光学系统）方面的基本内容，本书不再专门论述，只在分析影响焊接质量的因素时提及。这里所说的焊接质量主要是焊缝的成形质量，材料的焊接性问题不属于本书的主要讨论范围。

本书共分 8 章。

第 1 章“激光焊接理论基础”，介绍材料吸收激光的规律和吸收后的物态变化、两种激光焊接模式（激光热导焊、激光深熔焊）、光致等离子体和小孔效应产生的机理、特征及其对焊接质量的影响。

第 2 章“激光焊接工艺基础和不稳定性控制”，分析从设备、工件状况和工艺参数三方面影响激光焊接质量的主要因素、主要工艺参数（激光功率、焊接速度、光束焦点位置）对焊缝成形及过程稳定性的影响、三种激光焊接过程（稳定深熔焊、模式不稳定焊、稳定热导焊）产生的机制、焊缝成形的特点、过程传感信号的特征以及工艺参数的影响、反映三种焊接过程参数范围的双 U 形模式转变曲线。最后介绍核供热堆锆元件盒和超薄壁钛盒等两个重要构件的精密激光焊接的工艺制定和质量控制实例。

第 3 章“小孔型气孔的产生及抑制方法”，介绍小孔型气孔的特点和产生机理、影响气孔的主要因素、抑制气孔的措施、薄板低功率激光焊时气孔产生的特有规律、航天工程上抑制气孔的成功范例。

第 4 章“激光束焦点位置寻优与控制”，论述激光束焦点位置控制对保证焊接质量的重

要作用,讨论引起激光束焦点位置变化的主要因素、焦点位置检测与控制技术的发展现状、焦点位置自寻优双闭环控制方法的提出及其基本原理、控制系统软、硬件和自寻优控制的效果。

第5章“激光深熔焊熔透的实时检测与控制”,介绍激光焊接熔透状态的分类、提出以同轴等离子体光信号的时域特征、频域特征和小孔图像三种实时识别熔透状态的方法、熔透状态闭环控制系统的构成及其控制效果。

第6章“填丝激光焊及焊缝成形自适应控制”,论述填丝激光焊的原理、特点和应用、填充焊丝与激光束的相互作用、影响填丝熔化速度的因素、填丝焊参数的匹配和许用范围。最后介绍实现焊缝成形自适应控制所用的三种坡口检测传感器的工作原理、技术特点、控制焊缝成形的过程和控制效果。

第7章“激光-GMA复合焊及熔透控制”,论述激光-GMA复合焊的原理、工艺优势和应用、两热源相互作用的机制,主要焊接参数对熔深、熔宽及熔透状态的影响。最后介绍激光-GMA复合焊熔透状态视觉检测系统、图像处理算法和熔透状态的闭环控制。

第8章“激光切割及其质量检测与控制”,论述激光切割的特点、分类和机理、评价切割质量的主要指标、影响激光切割质量的主要因素。最后介绍一种基于切割前沿和火花簇射同轴视觉传感的切割质量实时检测和控制方法,该方法能实现以抑制切割缺陷并获得最高切割质量(最小切割面粗糙度)为目标的切割速度自寻优控制。

书中汇集了反映该领域目前国际水平的技术资料。

全书以控制激光焊接与切割质量为中心,各章又有一定的独立性,读者可根据需要挑选有关章节参阅。

本书核心内容的取材除了本人和合作者已发表或未发表的论文、报告、工作总结外,主要是本人指导的研究生的学位论文,他们不仅很好地配合完成了各项国家、国际技术课题和横向合作任务,而且做出了许多创造性的发展,他们所发挥的作用在各章引言中已简要提及,对他们所做的贡献表示衷心的感谢。

书中引用了大量国内外的文献资料,在此对原作者深表感谢。

借此机会,作者感谢当年以潘际銮院士为首的清华大学机械系领导对建立激光加工研究中心做出的决策和鼎力支持。

感谢在创建激光加工研究中心初期,任家烈教授、朱允明教授、施克仁教授、李言祥教授、阎炳义高级技师给予的热情协助和支持。

最后,对我的夫人,钢铁研究总院邢小琳教授为本书的完成所付出的辛勤劳动,表示由衷的感谢。

对加工质量进行实时检测和控制是激光焊接和切割技术的前沿课题,目前在世界范围内仍处于不断探索和发展之中,希望本书的出版能起到抛砖引玉的作用,敬请各位专家、读者对书中的不足和错误批评指正。

陈武柱

目 录

序

前言

第1章 激光焊接理论基础	1
1.1 引言	1
1.2 材料对激光的吸收	1
1.2.1 材料吸收激光的一般规律	1
1.2.2 金属对激光的吸收	4
1.3 激光作用下材料的物态变化和焊接模式	7
1.3.1 激光作用下材料的物态变化	7
1.3.2 两种激光焊接模式	8
1.4 光致等离子体及其对焊接质量的影响	12
1.4.1 光致等离子体的产生	12
1.4.2 光致等离子体的特征	14
1.4.3 光致等离子体与激光的相互作用	18
1.4.4 光致等离子体的控制	21
1.4.5 光致等离子体的光、声、电信号与质量监测	24
1.5 小孔效应	27
1.5.1 小孔的产生与发展	27
1.5.2 小孔内激光能量的吸收	27
1.5.3 小孔内的压力平衡	29
1.5.4 小孔的不稳定性和小孔型气孔的产生	30
参考文献	31
第2章 激光焊接工艺基础和 不稳定性控制	34
2.1 引言	34
2.2 影响激光焊接质量的主要因素	34
2.2.1 焊接设备	35
2.2.2 工件状况	36
2.2.3 焊接参数	36

2.3 焊接参数对焊缝成形和过程稳定性的影响	37
2.3.1 焊接参数对焊接过程及成形的影响——两种焊接模式和三种焊接过程	37
2.3.2 多参数对焊接模式的综合影响	40
2.4 三种激光焊接过程的机理及模式转变曲线数学模型	42
2.4.1 三种激光焊接过程的产生机理分析	42
2.4.2 双U形激光焊接模式转变曲线的理论模型	46
2.4.3 双U形模式转变理论曲线的实验验证与模型修正	48
2.5 激光焊接过程稳定性的实时监测	50
2.5.1 激光焊接过程监测用传感器	50
2.5.2 激光焊接过程监测系统	52
2.5.3 焊接过程稳定性的实时监测	53
2.6 双U形模式转变曲线的应用和焊接工艺制定实例	55
2.6.1 双U形模式转变曲线应用中的问题	55
2.6.2 激光焊接工艺制定和质量控制实例	57
参考文献	62
第3章 小孔型气孔的产生及抑制方法	65
3.1 引言	65
3.2 小孔型气孔的特征及其产生机理	66
3.2.1 小孔的动态行为与小孔型气孔的产生	66
3.2.2 小孔型气孔的形状和分布特征	68

3.2.3 气泡产生的模型	68	与控制	104
3.3 影响小孔型气孔的因素	69	4.3.4 现有控制方法的局限性和 自寻优双闭环控制系统的 提出	105
3.3.1 小孔穿透状态的影响	69	4.4 焦点位置自寻优双闭环控制原理 分析	106
3.3.2 激光功率的影响	71	4.4.1 焦点位置自寻优双闭环控制 系统所用传感器	106
3.3.3 激光束倾角的影响	71	4.4.2 焦点位置自寻优控制原理	107
3.3.4 激光脉冲调制频率和波形 的影响	72	4.4.3 喷嘴-工件距离闭环控制 原理	110
3.3.5 保护气体种类的影响	74	4.5 焦点位置自寻优双闭环控制系统	115
3.3.6 激光-电弧复合焊的影响	78	4.5.1 焦点位置自寻优双闭环控制 系统的功能	115
3.4 抑制和减少小孔型气孔的方法	79	4.5.2 焦点位置自寻优双闭环控制 系统硬件构成	115
3.5 较低功率薄板焊接时小孔型气孔的 产生与防治	80	4.5.3 焦点位置自寻优双闭环控制 系统软件设计	117
3.5.1 背景	80	4.5.4 焦点位置自寻优双闭环控制 的效果	120
3.5.2 低功率薄板焊接时小孔型气孔 的特征	80	4.5.5 小结	123
3.5.3 连续激光焊接参数对气孔率 的影响	81	参考文献	124
3.5.4 激光脉冲调制频率对气孔率 的影响规律及其机理分析	85	第5章 激光深熔焊熔透的实时 检测与控制	127
3.5.5 小孔型气孔抑制方法的选择	89	5.1 引言	127
3.6 小孔型气孔抑制方法的工程应用	90	5.2 激光焊接熔透状态的分类和特征	128
3.6.1 产品结构及工程背景	90	5.3 CO ₂ 激光深熔焊熔透同轴检测 系统	129
3.6.2 技术方案实施流程和验证 试验	91	5.3.1 基于 PS 的同轴熔透检测 系统	129
3.6.3 正式产品批量施焊的效果	92	5.3.2 基于视觉传感器 (VS) 的同轴 熔透检测系统	131
参考文献	93	5.4 CO ₂ 激光深熔焊熔透状态的 实时识别	133
第4章 激光束焦点位置寻优与控制	96	5.4.1 利用同轴 PS 信号的时域特征 识别熔透状态	133
4.1 引言	96	5.4.2 利用同轴 PS 信号的频域特征 识别熔透状态	139
4.2 引起激光束焦点位置波动的主要 因素	96	5.4.3 利用小孔图像的灰度分布特征	
4.2.1 透镜-工件距离的变化	97		
4.2.2 热透镜效应	97		
4.2.3 飞行光路中不同光程的影响	100		
4.2.4 小结	101		
4.3 激光束焦点位置检测与控制发展 现状	102		
4.3.1 高度跟踪传感器	102		
4.3.2 自适应光束焦点调节系统	103		
4.3.3 激光焊接焦点位置的检测			

识别熔透状态	142
5.4.4 小结	146
5.5 CO ₂ 激光深熔焊熔透的闭环控制	147
5.5.1 控制方案分析	147
5.5.2 熔透闭环控制系统的建立	147
5.5.3 平板熔透闭环控制	147
5.5.4 斜板熔透闭环控制	150
参考文献	154

第6章 填丝激光焊及焊缝成形

自适应控制	156
6.1 引言	156
6.2 填丝激光焊的特点和应用	156
6.3 激光束和焊丝的相互作用	158
6.3.1 焊丝对激光的吸收、反射和 被透射	158
6.3.2 影响焊丝熔化的因素	159
6.4 填丝激光焊焊接参数的选择与 匹配	162
6.4.1 送丝速度与焊接速度的匹配	162
6.4.2 送丝速度与焊接速度的 许用范围	163
6.4.3 坡口间隙变化时的焊接 参数调节	164
6.5 用于坡口状态实时检测的传感器	165
6.5.1 基于三维视觉的坡口检测 传感器	165
6.5.2 基于线阵 CCD 的坡口检测 传感器	167
6.5.3 扫描式 Laser-PSD 传感器	167
6.6 填丝激光焊焊缝成形质量自适应 控制	170
6.6.1 控制系统的构成	170
6.6.2 焊缝成形自适应控制实验	171
参考文献	173

第7章 激光-GMA 复合焊及熔透

控制	174
7.1 引言	174
7.2 激光-GMA 复合焊的特点和应用	174
7.3 激光-GMA 复合焊接参数对焊缝	

成形的影响	179
7.3.1 激光功率对熔深、熔宽的 影响	179
7.3.2 GMA 电流对熔深、熔宽的 影响	180
7.3.3 激光与电弧间距离 (DLA) 对熔深、熔宽的影响	181
7.3.4 焊接速度对熔深的影响	182
7.4 激光-GMA 复合焊接参数对熔透 状态的影响	182
7.4.1 评价激光-GMA 复合焊熔透 状态的指标	182
7.4.2 激光功率对熔透状态的影响	183
7.4.3 GMA 电流对熔透状态的影响	184
7.4.4 焊接速度对熔透状态的影响	185
7.4.5 坡口间隙对熔透状态的影响	186
7.4.6 小结	187
7.5 复合焊熔透状态视觉检测方法	187
7.5.1 复合焊熔透检测方法的选择	187
7.5.2 熔池背面视觉检测系统	188
7.5.3 熔池背面视觉检测关键技术	188
7.6 复合焊熔池背面图像处理算法	194
7.6.1 坡口间隙宽度检测算法	195
7.6.2 熔池图像特征分析和熔宽 检测算法	196
7.7 复合焊熔透状态闭环控制	205
7.7.1 控制方案分析	205
7.7.2 复合焊熔透闭环控制系统	206
7.7.3 复合焊熔透闭环控制的效果	208
参考文献	211

第8章 激光切割及其质量检测与

控制	214
8.1 引言	214
8.2 激光切割的特点	214
8.3 激光切割的分类及机理	215
8.3.1 汽化切割	215
8.3.2 熔化切割	215
8.3.3 反应熔化切割	215
8.3.4 控制断裂切割	216

8.4 激光切割质量的评价指标	216	——火花簇射同轴视觉检测与 图像处理	237
8.4.1 评价切割质量的主要指标	216	8.7.1 火花簇射同轴视觉检测可行性 分析	237
8.4.2 切割面粗糙度的评价基准	217	8.7.2 火花簇射同轴视觉检测的 图像算法	239
8.5 影响激光切割质量的主要因素	219	8.7.3 火花簇射同轴图像特征参数与切割 面粗糙度的关系	241
8.5.1 激光切割系统性能对切割 质量的影响	219	8.8 激光切割质量自寻优控制	243
8.5.2 激光切割参数对切割质量 的影响	222	8.8.1 控制方案设计	243
8.6 激光切割质量实时检测方法	223	8.8.2 激光切割质量实时检测与 控制系统	245
8.6.1 激光切割质量实时检测方法 的选择	223	8.8.3 自寻优控制过程及效果	246
8.6.2 基于切割前沿图像的缺陷 识别	225	参考文献	252
8.6.3 基于火花簇射图像的切割面近 下缘粗糙度检测	229		
8.7 实用化的切割面粗糙度检测方法			

第 1 章 激光焊接理论基础

1.1 引言

本章结合焊接过程中发生的几种重要物理现象介绍有关的基础理论知识。

激光焊接的产生可以简单归纳为这样的过程：首先是激光被材料吸收，材料吸收激光后产生物态变化，由于物态的不同，激光焊接分为热导焊和深熔焊两种模式。热导焊时材料只是熔化，焊接过程简单、平稳、熔深小；深熔焊发生了材料熔化、汽化和等离子化，并有小孔效应，过程十分复杂，但焊缝深宽比大，是工业应用的主要激光焊接方法。

根据这样的思路，本章首先介绍材料对激光的吸收，包括材料吸收激光的朗伯定律，反射比、吸收比和线性吸收系数与材料光学常数及光偏振性的关系，金属吸收激光的机制，影响金属对激光吸收的因素。然后介绍材料在激光作用下的物态变化（从固态、液态、气态到等离子态），两种激光焊接模式（激光热导焊、激光深熔焊）的原理、特点和应用范围。

后两节涉及激光深熔焊产生的两种特殊的物理现象：激光诱导产生等离子体和小孔效应。首先介绍光致等离子体的产生、特征、等离子体与激光的作用、等离子体的控制以及等离子体的光、声、电信息对质量实时检测和控制的意义。最后介绍小孔效应的内容，包括小孔的产生和发展，小孔内激光能量的吸收机制及影响因素，小孔内的压力平衡以及小孔失衡可能产生的缺陷。

1.2 材料对激光的吸收

1.2.1 材料吸收激光的一般规律

1. 吸收比和线性吸收系数

激光照射到材料表面时，一部分被材料表面反射，其余部分进入材料内部后，部分被材料吸收，还有一部分则透过材料。

根据能量守恒定律有

$$E_0 = E_r + E_a + E_t \quad (1-1)$$

式中 E_0 ——照射到材料表面的总激光能量；

E_r ——被材料表面反射的激光能量；

E_a ——被材料吸收的激光能量；

E_t ——透过材料的激光能量。

式 (1-1) 可变形为

$$1 = \frac{E_r}{E_0} + \frac{E_a}{E_0} + \frac{E_t}{E_0}$$

$$= R + A + \tau \quad (1-2)$$

式中 R ——反射比;
 A ——吸收比;
 τ ——透射比。

对于不透明材料, $E_t = 0$, 则有

$$1 = R + A \quad (1-3)$$

吸收的光, 在材料内部传播。按朗伯定律, 激光的辐射照度随穿透深度按指数衰减, 入射到表面以下 x 处的辐射照度为

$$I(x) = I_0 e^{-ax} \quad (1-4)$$

式中 I_0 ——材料表面 ($x=0$) 吸收的辐射照度;

a ——材料对激光的线性吸收系数 (cm^{-1})。

若把光在材料内的穿透深度定义为辐射照度降至 I/e 时的深度, 则穿透深度为 $1/a$ (cm)。

2. 激光垂直入射时的吸收比

材料对激光的反射比 R 、吸收比 A 和线性吸收系数 a 的值可由材料的光学常数或复数折射率的测定值进行计算。对光具有吸收作用的材料复数折射率 n 为

$$n = n_1 + in_2 \quad (1-5)$$

式中 n_1 ——复数折射率的实部;

n_2 ——复数折射率的虚部。

激光垂直入射时的反射比为

$$R = \left| \frac{n-1}{n+1} \right|^2 = \frac{(n_1-1)^2 + n_2^2}{(n_1+1)^2 + n_2^2} \quad (1-6)$$

吸收比为

$$A = \frac{4n_1}{(n_1+1)^2 + n_2^2} \quad (1-7)$$

线性吸收系数不仅取决于材料的复数折射率, 还与激光的波长有关, 可表示为

$$a = \frac{4\pi n_2}{\lambda} \quad (1-8)$$

3. 吸收比与激光束的偏振及入射角的关系

激光束垂直入射时, 吸收比与激光束的偏振无关。但是当激光束倾斜入射时, 偏振对吸收的影响变得非常重要。

激光是横向电磁波, 由相互垂直并与传播方向垂直的电、磁振荡组成。电场矢量方向决定激光束的偏振方向。如果电场矢量只在一个固定平面内振动, 称为平面偏振光 (或线偏振光)。如电场矢量绕着传播方向旋转, 其端点描绘的轨道为一个圆, 称为圆偏振光。如电场矢量端点旋转的轨迹为一椭圆, 称为椭圆偏振光。圆偏振光可视为互相垂直、强度相等的两线偏振光的叠加, 椭圆偏振光则为互相垂直、强度不等的两线偏振光叠加。

设光束的入射角为 θ ($\theta \leq 90^\circ$) 时, 则偏振方向平行于入射面的线偏振光 (P 偏振光) 和垂直于入射面的线偏振光 (S 偏振光) 在材料表面的反射比分别为

$$R_p(\theta) = \frac{(n_1^2 + n_2^2) \cos^2 \theta - 2n_1 \cos \theta + 1}{(n_1^2 + n_2^2) \cos^2 \theta + 2n_1 \cos \theta + 1} \quad (1-9)$$

$$R_s(\theta) = \frac{(n_1^2 + n_2^2) - 2n_1 \cos \theta + \cos^2 \theta}{(n_1^2 + n_2^2) + 2n_1 \cos \theta + \cos^2 \theta} \quad (1-10)$$

对激光为非透明的材料，吸收比与偏振和入射角度的关系为

$$A_p(\theta) = 1 - R_p(\theta) = \frac{4n_1 \cos \theta}{(n_1^2 + n_2^2) \cos^2 \theta + 2n_1 \cos \theta + 1} \quad (1-11)$$

$$A_s(\theta) = 1 - R_s(\theta) = \frac{4n_1 \cos \theta}{(n_1^2 + n_2^2) + 2n_1 \cos \theta + \cos^2 \theta} \quad (1-12)$$

以上为反映光束在材料表面反射、吸收关系的公式，式(1-6)、式(1-7)、式(1-9)~式(1-12)称为菲涅尔(Fresnel)公式，基于Fresnel公式的吸收称为Fresnel吸收。

图1-1a所示为CO₂激光入射不锈钢时，不同入射角时R_p、R_s的理论计算值和试验值。由图可见，R_s对所有入射角均较高，且随入射角的增加单调上升，当入射角为90°时，R_s达100%（即A_s为0）；R_p首先随入射角的增加而减小，当入射角增至接近90°的某一大角度时，R_p达最小值，然后随入射角的进一步增加而急剧上升，在入射角为90°时，R_p也达100%。出现最小R_p（即最大A_p）的入射角相当于材料的布儒斯特角，此角度约为85°，R_{pmin} ≈ 20%。

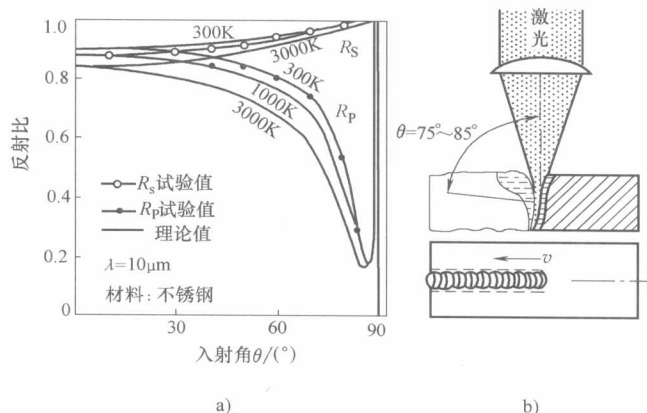


图1-1 偏振光反射比与入射角的关系^[1]

a) 不同入射角时R_p、R_s的理论计算值和试验值 b) 激光深熔焊时的入射角

由图1-1a还可见，对于入射角较小的通常情况，材料表面的反射比或吸收比实际上不受偏振特性的影响。例如θ < 40°时，R_p和R_s差别并不大。但对于某些出现大入射角的情况，例如在激光切割和激光深熔焊时，激光束作用在倾斜的切割前沿或焊接小孔前沿，入射角可以大至75°~85°（见图1-1b），这时R_p、R_s相差很大。偏振面垂直于入射面的S偏振光几乎全部被反射，而平行于入射面的P偏振光则大部分被吸收。

这种情况下，偏振特性对加工的影响必须考虑：如果激光加工的方向是固定不变的，可以直接利用激光器输出的偏振光，以P偏振光的取向进行加工，可以增强工件对激光的吸收；如果激光加工方向是变化的，为了避免由于偏振光取向的改变导致工件对激光吸收比的

改变,使加工质量不均匀,则可采用圆偏振镜将激光器输出的线偏振光转换为圆偏振光,这样吸收比就与加工方向无关了。

1.2.2 金属对激光的吸收

1. 金属吸收激光的机制

光在材料表面的反射、吸收和透射本质上是光波的电磁场与材料中的带电粒子相互作用的结果。

金属中存在密度很大的自由电子,自由电子受到光波电磁场的强迫振动而产生次电磁波(次波)。这些次波之间以及次波与入射波相干涉的结果,造成了强烈的反射波和比较弱的透射波,而透射波在很薄的金属表层被吸收。因而金属表面对激光常有较高的反射比。尤其频率较低的红外线,其光子能量较低,主要只能对金属中的自由电子起作用,反射强烈。而频率较高的可见光和紫外线,光子能量较大,可对金属中的束缚电子发生作用。束缚电子的作用将使金属的反射能力降低,透射能力增大,增强金属对激光的吸收。

由于自由电子数密度大,透射波在金属的一个很薄的表层内被吸收。对于从波长为 $0.25\mu\text{m}$ 的紫外线到波长为 $10.6\mu\text{m}$ 的红外线范围的测量结果表明,光在各种金属内的穿透深度只有 $0.01\sim 0.1\mu\text{m}$ 。上面已经说明,穿透深度等于线性吸收系数的倒数,据此可知金属对光波的线性吸收系数很大,为 $10^5\sim 10^6\text{cm}^{-1}$ 之间。

材料吸收激光后,通过激发带电粒子的谐振以及粒子间的互相碰撞,光能转换为热能。整个过程是在很短的时间内完成的。这一总的能量弛豫时间,对于金属的典型值为 10^{-13}s 。对于一般激光加工,均可认为材料吸收的激光转换为热能是瞬间完成的。在这一瞬间,热能仅仅局限于材料的激光辐照区。通过随后的热传导,热量才由高温区流向低温区。

2. 影响金属对激光吸收的因素

金属对激光的吸收与激光波长、材料性质、温度、表面状况、偏振特性等一系列因素有关。

(1) 激光波长的影响 总体来说,激光波长越长,反射比越高,吸收比越低。

图1-2所示为常用金属在室温下的反射比 R 与波长的关系曲线。在红外区,吸收比 A 与材料电阻率 ρ 及波长 λ 的关系近似为 $A\propto(\rho/\lambda)^{1/2}$,随着波长的增加,吸收比 A 减小,反射比 R 则增加。

20°C 时各种金属在不同激光波长下的吸收比 A 见表1-1。由表1-1可见,室温下金属表面对 $10.6\mu\text{m}$ 波长红外激光的吸收比可见光(表中波长为 500nm , 700nm 的激光)的吸收比几乎小一个数量级,而对波长为 $1.06\mu\text{m}$ 的YAG红外激光的吸收比要比 CO_2 激光大得多。

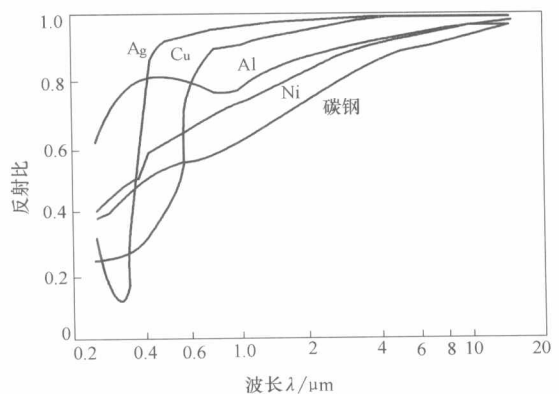


图 1-2 常用金属在室温下的反射比 R 与波长的关系曲线^[3]

表 1-1 20℃时各种金属在不同激光波长下的吸收比^[4]

材 料	氩离子	红宝石	YAG	CO ₂
波长	500nm	700nm	1.06μm	10.6μm
铝	0.09	0.11	0.08	0.019
铜	0.56	0.17	0.10	0.015
金	0.58	0.07	—	0.017
铀	0.36	0.30	0.22	—
铁	0.68	0.64	—	0.035
铅	0.38	0.35	0.16	0.045
钨	0.48	0.48	0.40	0.027
镍	0.40	0.32	0.26	0.03
铌	0.58	0.50	0.32	0.036
铂	0.21	0.15	0.11	0.036
铯	0.47	0.44	0.28	—
银	0.05	0.04	0.04	0.014
钽	0.65	0.50	0.18	0.044
锡	0.20	0.18	0.19	0.034
钛	0.48	0.45	0.42	0.08
钨	0.55	0.50	0.41	0.026
锌	—	—	0.16	0.027

注：表中吸收比的数值是采用光洁的金属表面在真空中测得。

(2) 材料性质的影响 由图 1-2 可见，在可见光及其邻近区域，不同金属材料的反射比呈现出错综复杂的变化。但在 $\lambda > 2\mu\text{m}$ 的红外线范围内，金属的反射比的排序均为：银 > 铜 > 铝 > 镍 > 碳钢，即材料的导电性越好，对红外线的反射比越高。这种规律可以从上述金属吸收激光的机制分析中得到解释：在这个红外波段，光子能量较低，只能和金属中的自由电子耦合。金属的电阻率越低即其自由电子数密度越大，自由电子受迫振动产生的反射波越强，反射比也就越大。

计算表明，吸收比与金属电阻率之间近似有如下关系^[5]：

$$A \approx 0.365(\rho/\lambda)^{1/2} \quad (1-13)$$

式中 A ——金属对激光的吸收比；

ρ ——金属材料实测时的电阻率 ($\Omega \cdot \text{cm}$)；

λ ——激光波长 (cm)。

此关系已为不同抛光金属表面的测定试验所证实。

(3) 温度的影响 金属的电阻率随温度升高而加大，有

$$\rho = \rho_{20} [1 + \gamma(T - 20)] \quad (1-14)$$

式中 ρ_{20} ——金属材料在 20℃ 时的电阻率 ($\Omega \cdot \text{cm}$)；

γ ——电阻温度系数 ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)；

T ——温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

将式 (1-14) 代入式 (1-13)，即可计算出不同温度下的吸收比，有

$$A \approx 0.365 \{ \rho_{20} [1 + \gamma(T - 20)] / \lambda \}^{1/2} \quad (1-15)$$

由式(1-15)可见,吸收比随温度升高而增加。这个关系不仅适用于固态金属,对液态金属也是正确的。

表1-2列出了各种金属20℃时的电阻率 ρ_{20} 和电阻温度系数 γ ,图1-3所示为按照式(1-15)计算的几种金属对10.6 μm 波长红外激光的吸收比随温度的变化。从中可见,低碳钢与铝、铜比较,电阻温度系数虽然差别不大,但因其20℃时的电阻率大得很多,所以其吸收比不仅绝对值大,随温度增加的速度也快。不过总体来说,绝大部分固体金属材料的光洁表面对10.6 μm 波长激光的吸收比都是很低的,均不超过11%。

表1-2 各种金属20℃时的电阻率 ρ_{20} 和电阻温度系数 γ ^[5]

材 料	ρ_{20} ($\Omega \cdot \text{cm}$)	γ ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	材 料	ρ_{20} ($\Omega \cdot \text{cm}$)	γ ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
铝	2.82×10^{-6}	3.6×10^{-3}	镍	7.24×10^{-6}	5.4×10^{-3}
黄铜	8.00×10^{-6}	1.5×10^{-3}	铂	1.05×10^{-5}	3.7×10^{-3}
青铜	8.00×10^{-6}	3.5×10^{-3}	银	1.62×10^{-6}	3.6×10^{-3}
康铜	4.90×10^{-5}	1.0×10^{-5}	合金钢	1.50×10^{-5}	1.5×10^{-3}
铜	1.72×10^{-6}	4.0×10^{-3}	低碳钢	1.50×10^{-5}	3.3×10^{-3}
金	2.42×10^{-6}	3.6×10^{-3}	结构钢	1.20×10^{-5}	3.2×10^{-3}
殷钢	7.80×10^{-5}	2.0×10^{-3}	钽	1.55×10^{-5}	3.1×10^{-3}
铁	9.80×10^{-6}	5.0×10^{-3}	锡	1.14×10^{-6}	4.0×10^{-3}
锰	4.40×10^{-6}	1.0×10^{-5}	镉	5.50×10^{-5}	5.2×10^{-3}
铅	5.60×10^{-6}	4.7×10^{-3}	锌	5.92×10^{-5}	3.5×10^{-3}
镍铬合金	1.00×10^{-4}	4.0×10^{-4}			

(4) 表面状态的影响 金属表面的粗糙程度、氧化膜状况以及覆盖特殊的表面涂层会对红外激光的吸收比产生显著的影响。

表1-1中的吸收比是采用光洁的金属表面在真空中测得的,而实际激光加热的金属表面,由于被氧化和受污染,其对红外激光的吸收比要比表中数值大得多。而表面状况对可见光吸收比的影响则较小。

表1-3为铝及铝合金表面状况对 CO_2 激光吸收比的影响。

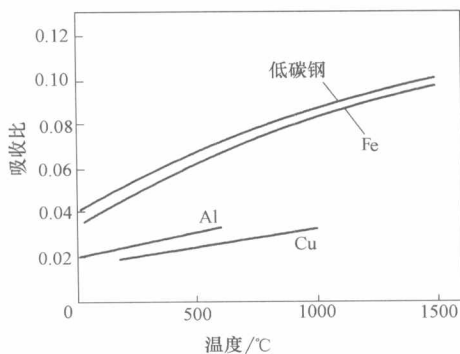


图1-3 几种金属对10.6 μm 波长红外激光的吸收比随温度的变化^[4]

表1-3 铝及铝合金表面状况对 CO_2 激光吸收比的影响^[6] (%)

材 料	原始表面	电解抛光	喷 砂	阳极氧化
纯铝	7	5	20	22
5456 铝合金	5 ~ 11	4	22	27

金属材料在高温下形成的氧化膜使吸收比显著提高。图 1-4 所示为 304 不锈钢表面在空气中氧化 1min 后对 $10.6\mu\text{m}$ 波长红外激光的吸收比与氧化温度的关系；图 1-5 所示为铝表面对同样激光的吸收比与氧化时间和温度的关系。由于氧化膜的厚度是氧化时间和温度的函数，所以对激光的吸收比也受氧化时间和温度的影响。金属材料对 $10.6\mu\text{m}$ 波长 CO_2 激光的吸收比随温度升高而显著增加，有两方面的原因：电阻率的增加和表面高温氧化。

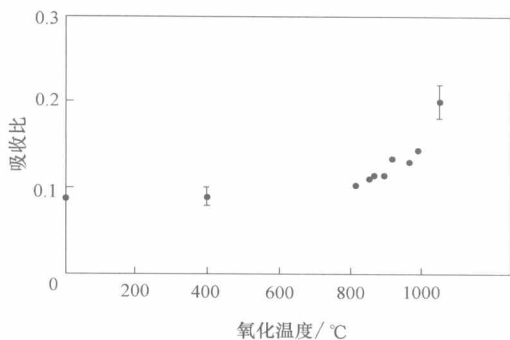


图 1-4 304 不锈钢对 $10.6\mu\text{m}$ 波长红外激光的吸收比与氧化温度的关系^[4]

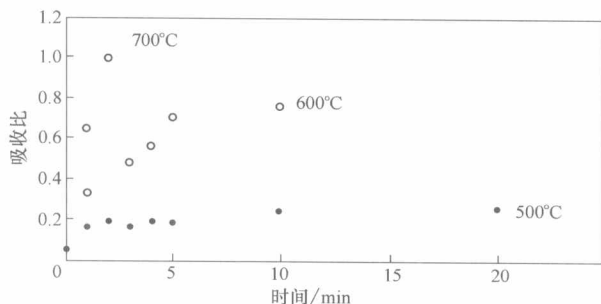


图 1-5 铝表面对 $10.6\mu\text{m}$ 波长红外激光的吸收比与氧化时间和温度的关系^[4]

磷酸盐、氧化锆、氧化钛、二氧化硅以及炭黑、石墨等是一些对 CO_2 激光具有高吸收比的物质，以这些物质为主要成分的表面涂层可以非常显著地提高金属对红外激光的吸收比，这已成为激光表面热处理时必须采取的重要措施^[9,10]。但对激光焊接来说，磷、氧、碳的增加却是十分有害的，它们会降低焊缝的塑性和韧性，应慎重采用。

(5) 偏振的影响 一旦入射激光不垂直材料表面，反射比和吸收比就与入射激光的偏振状况有关，有关问题在 1.1.1 节中已作讨论。

1.3 激光作用下材料的物态变化和焊接模式

1.3.1 激光作用下材料的物态变化

激光被加工材料吸收后基于光热效应转化为热能。在不同的激光辐射照度下，材料表面状态将发生不同的变化，这些变化包括温度升高、熔化、汽化并形成小孔、产生等离子体等。材料表面物态的变化反过来又极大地影响材料对激光的吸收。图 1-6 所示为不同辐射照度激光作用下金属表面产生的几种物态变化。

1. 固态加热

当辐射照度较低 ($< 10^4 \text{W}/\text{cm}^2$) 时，金属吸收激光的能量只能引起材料表层温度的升高，但维持固相不变，主要用于零件的表面退火和相变硬化 (图 1-6a)。

2. 表面熔化

当辐射照度提高到 $10^4 \sim 10^5 \text{W}/\text{cm}^2$ 范围时，材料表面将发生熔化，熔池深度随辐射照度的增加和辐照时间的加长而增加，主要用于金属的表面重熔、合金化、熔敷和热导型焊接 (图 1-6b)。