

激光焊接熔池动力学行为

WELD POOL DYNAMICS IN
DEEP PENETRATION LASER WELDING

■ 巩水利 庞盛永 王宏 张林杰 著

激光焊接

航空工业出版社

激光焊接熔池动力学行为

Weld Pool Dynamics in Deep Penetration Laser Welding

巩水利 庞盛永 王宏 张林杰 著



航空工业出版社

北京

内 容 简 介

本书系统地介绍了激光焊接过程熔池行为及其影响因素,包括试验测试技术、理论计算与过程仿真技术、熔池物态转换行为以及工艺条件对熔池行为的影响等。集中反映了我国在该方面的研究成果,其中部分研究成果反映了作者研究团队最新前沿研究工作,如双光束激光焊接熔池行为、激光填丝焊接熔池行为、大厚度全熔透激光焊接和真空、低真空条件激光焊接熔池行为等。

本书可供大专院校师生、工程技术人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

激光焊接熔池动力学行为 / 巩水利等著. --北京 :
航空工业出版社, 2018. 3

ISBN 978-7-5165-1545-7

I. ①激… II. ①巩… III. ①激光焊—焊接熔池—动
力学 IV. ①TG456. 7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 022875 号

激光焊接熔池动力学行为

Jiguang Hanjie Rongchi Donglixue Xingwei

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑 2 号院 100029)

发行部电话: 010-84936597 010-84936343

北京隆元普瑞彩色印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2018 年 3 月第 1 版

2018 年 3 月第 1 次印刷

开本: 787×1092 1/16

印张: 13

字数: 324 千字

印数: 1—1500

定价: 68.00 元

前 言

1917年，世界著名理论物理学家爱因斯坦提出了受激辐射的概念并发现了光电效应，为激光的发明奠定了理论基础。1960年5月，美国物理学家梅曼博士在量子电子学发展的基础上发明了世界第一台红宝石激光器，由此开启了激光及其应用的序幕。至20世纪60年代初已经出现了有关激光制孔和焊接等技术的有关报道。伴随着激光器技术的不断进步与完善，激光束流品质的不断优化，输出功率的不断增大，激光作为高能量密度束流的光源和热源被很快应用到材料加工方面，形成了具有重要地位的材料特种加工技术群——激光加工技术。该技术具有非接触、能量精确可控、材料适应性广、柔性强、质量优、资源节约、环境友好等综合优势，既可用于大批量高效自动化生产，又适用于多品种、小批量加工，甚至个性化产品的定制，因此成为传统制造业改造升级不可或缺的重要技术。经过多年的发展，激光加工技术已经发展为高能束流加工技术，在焊接与去除、表面工程和增材制造（3D打印）三大制造技术领域重要的技术手段之一，形成了焊接、切割、制孔、快速成形、刻蚀、微纳加工、表面改性、喷涂及气相沉积等多种门类技术，在国民经济和国防建设诸多领域发挥着重要的作用。

作为激光加工技术主要代表之一的激光焊接技术，同传统的电弧焊接技术相比，具有能量密度高（最高可达 $10^{15}\text{W}/\text{cm}^2$ ）、焊缝深宽比大、热影响区小、变形小、接头质量和性能好、生产效率高和控制操作灵活等一系列优点，是一种极具前途的先进焊接技术。

激光焊接技术也同样伴随着激光器技术的不断发展而发展，随着激光器输出功率的增大，束流品质的优化，理论研究的深入，技术研发的持续开展，激光焊接方式由“热传导焊接”转变为“深熔焊接”。焊接技术也在不断发展，激光对接焊、激光叠加焊、激光电弧复合焊接、激光填丝焊接、双光束激光焊接、多束激光焊接、双光束激光填丝焊接、超窄间隙激光焊接、全位置激光焊接、长焦距动光式激光焊接等技术不断出现和发展，相应的焊接装备、焊接系统以及过程检测控制技术也在不断发展完善，为激光焊接技术在国民经济和国防建设中的应用奠定了坚实基础。

自激光技术应用于焊接以来，激光焊接的理论研究深入发展。从不同模式的激光与材料的相互作用机理、熔池行为及其对焊接过程的影响等方面开展了系统的研究，为激光焊接技术的发展与应用提供了扎实的理论支持。科技工作者对激光与材料的作用机理和材料自身的物态变化过程的研究，获得了激光热传导焊接和深熔焊接两种典型的焊接模式，认识到激光能量密度是两种焊接模式相互转变的关键参量，并发现了激光深熔焊熔池具有动态小孔（Keyhole）行为的特征，深熔焊熔池小孔内热力学平衡是小孔稳定形成的必要条件。焊接科技工作者通过激光焊接应用研究和工程实践活动，发现了激光深熔焊接过程熔池行为对激光焊接过程稳定性的重要作用，研究和掌握激光焊接熔池动态行为成为焊接过

程工艺参数优化和稳定性控制的关键基础。

多年来,北京航空制造工程研究所、华中科技大学、西安交通大学、哈尔滨工业大学、大连理工大学等,在国家相关部门和单位的支持下,针对激光焊接技术基础开展了深入研究,围绕激光焊接过程熔池行为开展了持续的研究,系统地揭示了激光焊接过程熔池行为及其影响,为激光焊接技术的实际应用和推广提供了理论支持,为本书的成稿奠定了坚实基础。

本书较系统地介绍了近年来国内激光焊接熔池行为研究的主要成果,来源于北京航空制造工程研究所高能束流加工技术国防科技重点实验室、华中科技大学、西安交通大学和太原科技大学等单位相关研究工作的提炼和总结,特别是作者所在研究团队的研究工作给予了本书大力支持。

本书共分9章,系统地介绍了激光焊接过程熔池行为及其影响因素,包括试验研究、理论计算与过程仿真技术、熔池物态转换行为以及工艺条件对熔池行为的影响等。研究成果集中反映了我国在该方面的研究成果,其中部分研究成果反映了作者研究团队最新前沿研究工作,如双光束激光焊接熔池行为、激光填丝焊接熔池行为、大厚度全熔透激光焊接和真空、低真空条件激光焊接熔池行为等。参加本书编写工作的人员有:巩水利、庞盛永、王宏、张林杰,其中巩水利负责前言和第1章内容,庞盛永负责第3~第5章、第7~第9章内容,王宏负责第2章内容,张林杰负责第6章内容。全书由巩水利统一审核定稿。本书不仅可以作为工程技术人员、激光材料加工领域科研人员、材料学专业科研人员和院校师生参考应用,而且对于激光设备研发人员、光学科研人员、激光应用物理学相关领域的科技人员和院校师生,也具有很高的参考价值。

在本书的编写过程中,得到了作者所在研究团队的大力支持和帮助,感谢北京航空制造工程研究所高能束流加工技术国防科技重点实验室、华中科技大学、西安交通大学和太原科技大学的支持,特别感谢西安交通大学张建勋教授对本书的辛勤指导,感谢华中科技大学肖建中教授、周建新教授对本书的大力支持,还要感谢同事们的支持和帮助。本书参考文献所列的作者,他们的著作和论文为本书的编写提供了帮助,在此表示感谢。

借以此书告慰华中科技大学胡伦骥和陈立亮两位教授,没有他们多年来的支持和指导,作者恐难完成此书。

由于作者水平有限,书中难免存在不当和不足,敬请广大读者批评指正。

作者

2017年7月10日

目 录

第 1 章 激光焊接基础	(1)
1.1 激光与材料的相互作用	(1)
1.1.1 材料对激光的吸收与被加热	(1)
1.1.2 激光热源模型及其固体材料中产生温度场	(3)
1.1.3 激光作用材料的熔化	(5)
1.1.4 激光作用下材料的气化	(6)
1.1.5 激光诱导等离子体及其效应	(7)
1.2 激光焊接的原理与特点	(8)
1.3 激光焊接熔池行为研究	(10)
第 2 章 准稳态熔池动力学模型及数值仿真	(13)
2.1 引言	(13)
2.2 准稳态激光焊接基本模型	(13)
2.2.1 描写流动与传热问题的控制方程	(14)
2.2.2 移动热源作用下激光深熔焊的三维数学模型	(15)
2.2.3 激光深熔焊过程的热源模型	(17)
2.3 数值解法的实现过程	(18)
2.3.1 迎风格式	(18)
2.3.2 交错网格技术	(20)
2.3.3 求解 Navier-Stokers 方程的压力修正方法	(22)
2.3.4 SIMPLE 算法	(23)
2.3.5 程序编制以及求解	(24)
2.4 计算参数	(25)
2.5 激光深熔焊焊接速度对小孔形态的影响	(26)
2.5.1 钛合金激光深熔焊温度分布	(26)
2.5.2 焊接速度对小孔尺寸的影响	(28)
2.5.3 激光深熔焊焊接功率对小孔尺寸的影响	(31)
2.6 激光深熔焊熔池几何形状模拟	(33)
2.6.1 激光深熔焊熔池形状的数值模拟	(33)
2.6.2 焊接速度及激光功率对熔池尺寸的影响	(34)
2.7 激光深熔焊熔池流动速度场的数值模拟	(36)
2.7.1 激光深熔焊熔池流动的特点	(36)
2.7.2 激光深熔焊熔池速度的分布规律	(39)

2.7.3 试验验证	(40)
2.8 小结	(42)
第3章 小孔熔池耦合模型及数值计算方法	(43)
3.1 引言	(43)
3.2 耦合模型控制方程	(43)
3.2.1 传热与流动方程	(43)
3.2.2 热源模型	(44)
3.3 自由界面追踪方法	(46)
3.3.1 Level set 方法	(46)
3.3.2 VOF 方法	(47)
3.4 耦合模型边界条件	(48)
3.4.1 基本约定	(48)
3.4.2 气液两相流中界面张力间断	(49)
3.4.3 表面张力、热毛细力、反冲压力的间断捕捉边界条件	(50)
3.5 数值求解计算方法	(54)
3.5.1 小孔壁面能量密度快速求解方法	(54)
3.5.2 小孔运动界面追踪方法	(58)
3.5.3 自由界面流动、传热耦合求解方法	(64)
3.5.4 数值求解程序的计算流程	(67)
3.6 小结	(68)
第4章 瞬态小孔与运动熔池动力学可视化仿真	(69)
4.1 引言	(69)
4.2 小孔与熔池瞬态耦合动力学行为	(69)
4.2.1 小孔的动力学演化过程及特征	(69)
4.2.2 稳定小孔时熔池的流动特征	(71)
4.2.3 非稳定小孔时熔池的流动特征	(73)
4.3 物理因素对耦合行为的影响	(78)
4.3.1 自由界面力和多重反射吸收	(78)
4.3.2 热物性参数	(85)
4.3.3 焊接工艺参数	(88)
4.4 小结	(92)
第5章 小孔内金属蒸气/等离子体动力学行为	(94)
5.1 引言	(94)
5.2 瞬态小孔内金属蒸气/等离子体动力学模型	(94)
5.2.1 动力学模型控制方程	(94)
5.2.2 动力学模型控制边界条件	(96)
5.3 瞬态小孔内金属蒸气/等离子体动力学	(99)

5.3.1	不均匀分布和高瞬态性	(99)
5.3.2	孔内多方向流动行为	(106)
5.3.3	剧烈振荡和摆动行为	(107)
5.3.4	局部蒸发处可压缩特性	(108)
5.4	小结	(110)
第 6 章	侧吹气流对小孔熔池动态行为的影响	(112)
6.1	引言	(112)
6.2	侧吹气体保护气流流场 (钛合金)	(113)
6.3	侧吹气流对小孔与熔池行为的影响	(116)
6.3.1	侧吹气流对熔池表面变形的影响	(116)
6.3.2	存在金属蒸气时侧吹气流对小孔和熔池动态行为的影响	(119)
6.4	侧吹气流影响小孔与熔池稳定性的机制	(122)
6.5	小结	(124)
第 7 章	双光束激光焊小孔与熔池动力学行为	(126)
7.1	引言	(126)
7.2	双光束焊接小孔与熔池瞬态耦合模型	(126)
7.2.1	瞬态耦合模型的控制方程	(126)
7.2.2	瞬态耦合模型的边界条件	(129)
7.3	双光束焊接小孔与熔池的耦合行为	(130)
7.3.1	焊接过程中动态小孔演化行为	(130)
7.3.2	焊接过程中运动熔池流动行为	(133)
7.4	双光束焊接过程稳定性的机理及影响因素	(134)
7.4.1	双光束焊接过程稳定性机理	(134)
7.4.2	工艺参数对双光束焊接稳定性的影响规律	(135)
7.5	小结	(139)
第 8 章	激光填丝焊小孔与熔池动力学行为	(141)
8.1	引言	(141)
8.2	激光填丝焊接多相瞬态耦合模型	(141)
8.2.1	焊丝熔化数学模型	(141)
8.2.2	小孔与熔池瞬态耦合模型	(142)
8.2.3	主要边界条件	(143)
8.3	填丝焊过程中小孔与熔池的动力学行为	(144)
8.3.1	自由过渡条件下瞬态小孔和运动熔池行为	(144)
8.3.2	送丝速度对自由过渡中的瞬态小孔和运动熔池行为的影响	(146)
8.3.3	焊丝直径对自由过渡中的瞬态小孔和运动熔池行为的影响	(148)
8.3.4	接触过渡条件下瞬态小孔和运动熔池行为	(149)
8.3.5	送丝速度对接触过渡中的瞬态小孔和运动熔池行为的影响	(151)

8.3.6	焊丝直径对接触过渡中的瞬态小孔和运动熔池行为的影响	(152)
8.3.7	无熔滴过渡和熔滴过渡中瞬态小孔和运动熔池行为的比较	(154)
8.4	填丝焊过程中小孔与熔池的不稳定性机理	(155)
8.4.1	单激光焊和激光填丝焊过程的熔池动力学	(155)
8.4.2	不同送丝速度下填丝焊过程的熔池动力学	(157)
8.4.3	填丝焊过程中小孔的不稳定性机理	(157)
8.5	填丝焊过程中运动熔池动态稀释行为	(159)
8.5.1	运动熔池稀释行为模型	(159)
8.5.2	准稳态运动熔池内的动态稀释行为特征	(160)
8.5.3	瞬态运动熔池内的动态稀释行为特征	(170)
8.6	小结	(175)
第9章	真空激光焊小孔与熔池动力学行为	(176)
9.1	引言	(176)
9.2	真空激光焊接小孔与熔池瞬态耦合模型	(176)
9.2.1	瞬态耦合模型的控制方程	(176)
9.2.2	瞬态耦合模型的边界条件	(178)
9.3	真空激光焊接小孔与熔池耦合行为特征	(179)
9.3.1	焊接过程中动态小孔的演化特征	(179)
9.3.2	焊接过程中运动熔池的流动特征	(182)
9.4	真空和低真空激光焊接熔深增加行为	(184)
9.4.1	熔深随环境压力减小而增加的物理机制	(184)
9.4.2	熔深有限增加理论	(187)
9.5	小结	(189)
参考文献		(191)

第 1 章 激光焊接基础

1.1 激光与材料的相互作用

激光与材料相互作用过程复杂，涉及激光物理、传热学、等离子体物理学、非线性光学、热力学、气体动力学、流体力学、材料力学、固体物理学等多学科领域。作为激光加工技术主要应用之一的激光焊接也是利用激光与材料相互作用产生的物理现象，这些物理现象可归结为被加工材料的热和力学效应，其主要研究内容和方向可分为材料对激光的反射、吸收和能量转化，激光对材料的加热、熔化、热压缩激波、蒸气喷射、等离子体膨胀、冲击波等。但实际在开展激光焊接研究工作中主要考虑被焊接材料对激光的吸收和材料本身的热物理和力学效应（如加热、熔化、气化、等离子体效应等），其物理现象主要表现为如图 1-1 所示。

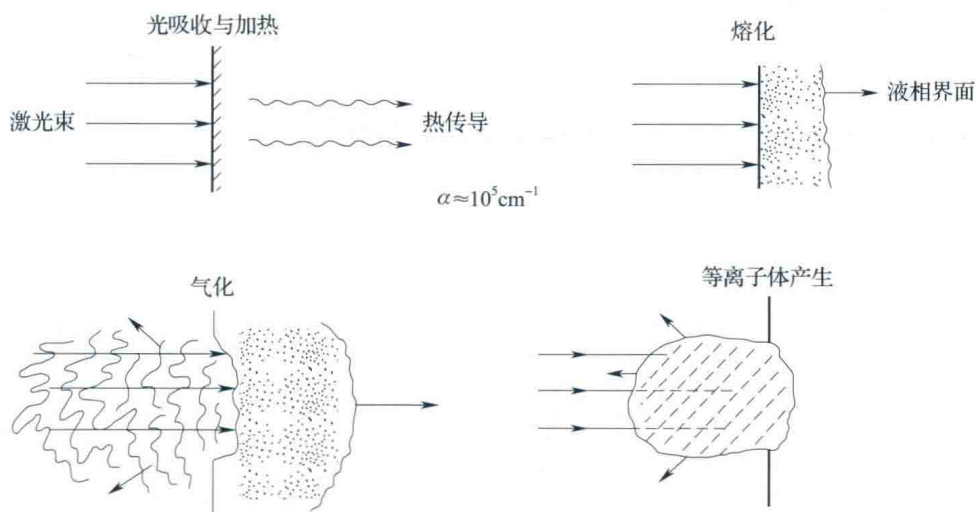


图 1-1 激光作用材料表面物理效应

1.1.1 材料对激光的吸收与被加热

原子内部带电粒子的阻尼振动规律运动采用经典力学理论来描述，即视带电粒子为服从经典力学的振子。振子被与位移成正比的弹性恢复力束缚在某一平衡位置附近振动，当振子偏离平衡位置，就受到一个回复力的作用。对金属而言，金属材料中的振子主要是自由电子。金属中吸收主要由自由电子振动完成，自由电子可以在电场作用下自由移动，不受回复力的作用，振子的自然振动频率 $\omega_0 = 0$ ，折射率 n 和消光系数 κ 与阻尼因子 γ 、等离子体频率 ω_p 的关系如下

$$n = \left\{ \frac{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma^2}\right)^2 + \left(\frac{\omega_p^2 \gamma}{\omega^3 + \gamma^2 \omega}\right)^2} + \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma^2}\right)}{2} \right\}^{1/2} \quad (1-1)$$

$$\kappa = \left\{ \frac{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma^2}\right)^2 + \left(\frac{\omega_p^2 \gamma}{\omega^3 + \gamma^2 \omega}\right)^2} - \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma^2}\right)}{2} \right\}^{1/2} \quad (1-2)$$

其中

$$\omega_p = \sqrt{\frac{Ne^2}{m\epsilon_0}} \quad \gamma = \frac{e^2 \omega_0^2}{6\pi\epsilon_0 c^3 m}$$

等离子频率 ω_p 为强度参数，它确定了振子的相对强弱；阻尼因子 γ 是波段宽度的参数。从式 (1-1) 和式 (1-2) 可以看出，在激光频率远小于等离子频率时， n 、 κ 迅速增大，绝大部分激光被反射，吸收很少；而在激光频率在等离子频率附近时， n 出现极小值，而 κ 值单调下降。因此，在等离子频率附近激光被较好地吸收；激光频率继续上升，远大于等离子频率时， n 迅速趋近于 1，而 κ 迅速变为 0，此时金属是透明的。金属材料的等离子频率处于紫外到近红外波段，因此，从近红外激光、可见激光到紫外激光对金属加工较为有利；对于远红外激光，金属几乎是反射的。对光子能量较低的红外光而言，光频电磁波只能对金属中的自由电子起作用，对光子能量较高的可见光或紫外光而言，由于金属中的束缚电子的固有频率常处于可见光或紫外光频段，因而还能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、透射能力加强，并增强了金属对激光的吸收，使之呈现出某种非金属的光学性质。

由于激光与材料中的电子、离子、晶格振动、杂质和缺陷等发生相互作用，产生了对激光的吸收。因此，材料的光学特性与激光的吸收关系很密切。

激光作用在材料中的传播可用麦克斯韦方程组描述，把激光在材料中的电场强度代入麦克斯韦方程组即可得出反映电磁波传播特性的复折射系数 \hat{n} ($\hat{n} = n - ik$) 与材料物理常数的关系

$$n^2 = \frac{\mu}{2} \left[\sqrt{\epsilon^2 + \left(\frac{4\pi\sigma}{\omega}\right)^2} + \epsilon \right] \quad (1-3)$$

$$\kappa^2 = \frac{\mu}{2} \left[\sqrt{\epsilon^2 + \left(\frac{4\pi\sigma}{\omega}\right)^2} - \epsilon \right] \quad (1-4)$$

式中： ω ——频率；

ϵ ——介电常数；

μ ——磁导率；

σ ——电导率；

n ——折射率；

κ ——消光系数，反映了电磁波幅度的衰减特性。

式 (1-3)、式 (1-4) 表明了材料的折射率和消光系数与材料的磁导率、介电常数、电导率和激光频率有紧密的联系。

对于各向同性的均匀物质来说, 根据 Lambert-Beer-Bouguer 定律, 激光强度 I 随着在材料内的传播距离 z 呈指数衰减, $I_z = I_0 \exp(-\alpha_0 z)$, α_0 为吸收系数, 吸收系数与激光频率和消光系数的关系如下

$$\alpha_0 = \frac{2\omega\kappa}{c} = \frac{4\pi\kappa}{n\lambda} \quad (1-5)$$

式中: c ——真空中激光光速;

λ ——真空中激光波长;

$1/\alpha_0$ ——光吸收长度, 是指光子能量被吸收导致光束强度降低至原来的 $1/e$ (37%) 时光束传播的距离。

吸收系数与激光波长有关的特性称为选择性吸收, 而吸收系数不随激光波长变化的吸收称为一般吸收。一般情况下, 吸收系数与激光强度无关。

激光在材料中的吸收依赖于材料的磁导率、介电常数、电导率和激光频率。在激光加工过程中, 激光频率一旦确定, 则吸收系数值只和消光系数有关, 因此, 分析激光在材料中的吸收问题就转化为分析消光系数和材料物理特性的问题。如果材料的介电常数越高, 电导率越低, 则折射率越高, 消光系数越小, 吸收系数则越小; 如果材料磁导率越高, 电导率越高, 介电常数越低, 材料吸收系数则越高。此外, 激光的吸收还与材料的微观结构和表面状态有关。

1.1.2 激光热源模型及其固体材料中产生温度场

物质吸收激光后首先产生的不是热量, 而是某些质点的过量能量 (自由电子的动能、束缚电子的激发能, 或者过量的声子)。这些有序的原始激发能要经历两个步骤才能转化为热能: 第一步是受激粒子运动的空间和时间随机化, 这个过程在粒子的碰撞时间 (动量弛豫时间) 内完成, 是一个极短的过程; 第二步是能量在各质点间的均布, 这个过程包含有大量的碰撞和中间状态, 而以非金属材料尤甚。最终结果是在材料内部形成一定形式的能量分布。总之, 激光作用材料的加热过程非常短。

研究激光与材料相互作用产生热作用, 一般假设一个激光能量分布与所吸收的激光能量分布相同的热源作用于材料表面, 在此前提之下, 建立温度场模型分析激光处理时的加热和冷却过程。在表层材料向基体内部传热阶段, 主要是遵循傅里叶热传导定律而进行。对于不同材料, 其激光热源模型也不同。对于金属材料, 激光的吸收长度非常小, 激光吸收发生在材料表层 $1 \sim 5 \mu\text{m}$ 的范围内, 其热源模型可表示为

$$Q_{V(x,y,z,t)} = AI_0(x, y, t) \delta(z) \quad (1-6)$$

式中: A ——材料对激光的吸收率;

$I_0(x, y, t)$ ——激光强度在材料表面的分布;

$\delta(z)$ ——狄拉克函数。

激光强度 $I_0(x, y, t)$ 通常可表示为空间分布 $I_0(x, y)$ 和无量纲时间波形 $B(t)$ 的乘积, 典型的波形 $B(t)$ 有阶梯波、矩形波、三角波、梯形波和高斯波形等。

在激光加热过程中, 材料的热物理参数 (吸收系数、比热容、热扩散率、导热系数) 是随温度变化的, 但对于大多数材料而言, 其热物理参数随温度变化较小, 可近似视为常数, 也可对过程所涉及的温度取平均值, 以下讨论假设材料的热物理参数与温度无关。

当高斯分布激光光束相对材料表面静止，在半无限材料表面的温度场极大值分布为

$$\Delta T = \frac{AP}{k\pi^{3/2}r} \arctan \sqrt{\frac{4\alpha\tau}{r^2}} \quad (1-7)$$

式中：A——激光吸收率；

P——激光功率；

r——激光束等效半径；

k——材料导热系数；

α ——材料的热扩散系数。

激光对材料的加热与多种因素有关，如激光功率密度、激光束等效半径、激光对材料的加热时间。等效半径一般被定义为激光束中心至光强降至中心光强的 1/e 位置的距离。对于高斯光束，等效半径为 $\omega/\sqrt{2}$ (ω 为高斯光束的腰斑)。如果引入时间特征常数 $\tau_0 = r^2/4\alpha$ ，则式 (1-7) 可改写为

$$\Delta T = \frac{AP}{k\pi^{3/2}r} \arctan \sqrt{\frac{\tau}{\tau_0}} \quad (1-8)$$

如果激光与材料作用时间 τ 远小于时间特征常数 τ_0 ，即激光辐照时间很短，则有

$$\arctan \sqrt{\frac{\tau}{\tau_0}} \approx \sqrt{\frac{\tau}{\tau_0}}$$

式 (1-8) 可简化为

$$\Delta T = \frac{AP}{k\pi^{3/2}r} \sqrt{\frac{\tau}{\tau_0}} \quad (1-9)$$

如果激光与材料作用时间 τ 远大于时间特征常数 τ_0 ，则激光照射时间较长，温度场达到稳态，则有

$$\arctan \sqrt{\frac{\tau}{\tau_0}} \approx \frac{\pi}{2}$$

式 (1-8) 可简化为

$$\Delta T = \frac{AP}{2k\pi^{1/2}r} \quad (1-10)$$

如果激光与材料作用时间 τ 和时间特征常数 τ_0 相当 (一般 $0.1\tau_0 \leq \tau \leq 3\tau_0$)，则有

$$\arctan \sqrt{\frac{\tau}{\tau_0}} \approx \frac{\tau}{4} \left(\frac{\tau}{\tau_0} \right)^{3/8}$$

式 (1-8) 可简化为

$$\Delta T = \frac{AP}{4k\pi^{1/2}r} \left(\frac{\tau}{\tau_0} \right)^{3/8} \quad (1-11)$$

激光对材料的加热主要应用在激光热处理技术，通常在热处理的情况下，激光光束以扫描的形式作用在材料表面，这种情况下的激光束可以看作是运动的热源。运动热源产生的温度场为准稳态，相当于静止温度场沿激光扫描速度 v 在材料内部拖动，则需要定义一个等效激光作用时间 $\tau^* = Cr/v$ 。为了近似地用静止激光表面温度来描述运动激光表面温度变化，常数 C 可适当调整，一般取 1.25。

将激光等效作用时间 $\tau^* = 1.25r/v$ 代入式 (1-7), 可得到光斑中心最大温度

$$\Delta T = \frac{AP}{k\pi^{3/2}r} \arctan \sqrt{\frac{5\alpha}{vr}} \quad (1-12)$$

引入特征速度 $v_0 = 5\alpha/r$, 一般在实际中激光热处理时, 激光扫描速度在 v_0 附近, 式 (1-12) 可改写为

$$\Delta T = \frac{AP}{k\pi^{3/2}r} \arctan \sqrt{\frac{v_0}{v}} \quad (1-13)$$

从式 (1-13) 可以看出, 材料表面温度与加热时间的平方根成正比。对于给定能量的激光加热脉冲, 当增加功率密度时, 脉冲持续时间 (即加热时间) 必然缩短, 同时材料表面的温度也会升高, 也就是说, 使用峰值功率高、持续时间短的激光脉冲可以更有效地加热材料表面。

1.1.3 激光作用材料的熔化

与激光加工更密切的物理问题是激光引起材料的熔化和气化。当激光加热材料表面的温度达到材料的熔化温度和气化温度时, 式 (1-7) 就不再成立了。材料熔化和气化要吸收潜热, 而且在熔化、气化后材料的热导率变化较大, 热传导变得非常复杂。

当一定强度的激光照射到材料表面时, 材料表面温度达到熔点 T_m 时, 等温面 (熔化波前 $T = T_m$) 将以一定的速度向材料内部传播, 其传播速度取决于激光功率密度和材料的固相、液相的热力学参数。通常把不发生气化的熔化称为浅层熔化, 浅层熔化时, 光斑大于熔池直径, 横向热扩散的影响可以忽略。浅层熔化区的最大深度可表示为

$$Z_{m,\max} = \frac{1.2k}{AP} T_v \left(\frac{T_v}{T_m} - 1 \right) \quad (1-14)$$

式中: T_m ——材料的熔化温度;

T_v ——材料的气化温度。

对于材料特性而言, 材料的热导系数 k 和 T_v/T_m 的比值越大, 则熔化深度 Z_{\max} 就越大。对于激光特性而言, 为了提高熔化深度, 应采用较小的激光功率密度, 因为较小的激光功率密度, 材料表面加热到 T_v 的时间较长。因此, 在激光脉冲给定的情况下, 应调整激光功率密度, 以便在激光脉冲结束时, 材料表面恰好达到气化温度, 以获取最大的熔化深度。通常激光照射下材料纯熔化的最大深度约为数微米至数百微米。

与浅层熔化对应的是深层熔化, 深层熔化是指熔化深度不小于光斑半径的情形, 但不发生溶液的沸腾, 只在气-液相面上发生平衡气化, 蒸气对激光是透明的。连续高斯光束照射下引起材料深层熔化的激光功率密度阈值约为

$$I_{\text{md}} = 2kT_m / (\sqrt{\pi}\alpha A) \quad (1-15)$$

深层熔化时, 熔池直径大于光斑直径, 熔池中心出现一个直径小于光斑的平稳气化井区, 井区内的蒸气密度小, 对激光基本透明, 激光直接进入照射在井区底部的气-液界面上被吸收, 吸收的激光能量被用于井壁的热扩散和井底的气化。假设激光光斑和气化井的半径均为 R_s , 深层熔化的深度可表示为

$$Z_v = \frac{R_s^2 A I_0}{k_q T_v} \left[1 - \exp \left(- \frac{k_q T_v}{R_s^2 L_v \rho_q} t \right) \right] \quad (1-16)$$

深层熔化中，气化井的长径比 Z_v/R_s 不能过大（一般 $0.5 \leq Z_v/R_s \leq 40$ ），否则会发生蒸气和溶液的不稳定运动。

如果激光强度较高，井区内气-液相面的气化加剧，蒸气压力升高，蒸气压力和蒸气反作用力等能克服溶液表面张力以及溶液静压力而形成小孔现象，造成液态质量迁移，小孔类似于黑体，它有助于对光束能量的吸收，显示出“壁聚焦效应”，由于激光束聚焦后不是平行光束，与孔壁间会形成一定的入射角，激光束照射到孔壁上后，经过多次反射而到达孔底，最终被完全吸收。

小孔内的高压蒸气压迫溶液沿熔池边缘或气化井壁喷溅出来，造成液态质量迁移。这种液态质量迁移将大大提高某些激光加工的效率，如激光打孔或激光切割等。材料的蒸气挤压作用是造成液态质量迁移的重要原因，假设蒸气是气-液截面处的平衡气化产生的，且忽略蒸气的动量和能量，只考虑蒸气压 P_v ，蒸气挤压一定厚度无黏性、不可压缩的溶液层，蒸气做功完全转化为被挤出溶液的动能，得出环境压力 P_0 下单位时间内从单位光斑面积上迁移的液态材料质量，即液态质量迁移率 \dot{m}_q 为

$$\dot{m}_q = \left[\frac{2\lambda_q}{R_s} \ln \left(\frac{T_v}{T_m} \right) \right]^{1/2} \rho_q^{3/4} [2(P_v - P_0)]^{1/4} \quad (1-17)$$

1.1.4 激光作用下材料的气化

从激光作用下材料的熔化可以看出，熔化过程中一般伴随着材料的气化。材料的气化机制与激光功率密度密切相关。

从激光照射开始至物质表面达到气化温度 T_v 的时间称为气化开始时间 t_v ， t_v 可估算为

$$t_v = \frac{\pi}{4\alpha} \left(\frac{kT_v}{AI_0} \right)^2 \quad (1-18)$$

对于低气化温度金属，当 AI_0 为 $10^4 \sim 10^6 \text{ W/cm}^2$ ， t_v 约为若干毫秒至微秒；对于高气化温度金属，当 AI_0 为 $10^5 \sim 10^7 \text{ W/cm}^2$ ， t_v 约为若干毫秒至几百纳秒。如果 t_v 远小于激光脉冲宽度，则认为材料表面的气化在激光开始照射时就发生了。

当激光功率密度不是很高时，材料气化不剧烈，饱和蒸气压力与环境气压平衡，蒸气粒子运动速度分布各向同性，处于平动平衡的麦克斯韦分布。各国学者建立许多激光平衡气化模型，目前激光气化的理论模型只有定性的意义，定量的认识主要依靠试验。激光平衡气化得到的气化压力公式都认为蒸气压力与激光功率密度成正比。

当激光功率密度较大时，材料气化率增大，蒸气压力升高，并明显高于环境压力，蒸气中返回溶液的粒子数减少，速度分布偏离平衡的麦克斯韦分布。离开液面的气体粒子必须经过一段距离，通过彼此之间碰撞才能重建平动平衡。液面之上蒸气处于不平衡向平衡状态过渡的薄层称为克努森（Knudsen）层。在强烈气化极限，克努森层外表面蒸气做声速流动，向外流动的蒸气比溶液表面饱和蒸气明显地冷且稀薄。

连续激光照射下，气化阵面速度（即后退速度）从零很快增长到近似不变的恒定值，气化进入定常状态。定态气化的建立时间 t_{sv} 与定常后退速度 U_v 有关。一般 t_{sv} 比 t_v 大几十倍，例如 AI_0 为 10^7 W/cm^2 ，铝的后退速度约为 2.34 m/s ，对应的 $t_{sv} \approx 15 \mu\text{s}$ ，而 t_v 不到 $0.3 \mu\text{s}$ 。

由于蒸气压的作用,式(1-18)中 T_v 应高于标准气压下的正常气化温度。当激光功率密度在 $10^6 \sim 10^7 \text{ W/cm}^2$,金属的气化阵面温度比正常气化温度略高;当激光功率密度在 $10^6 \sim 10^{10} \text{ W/cm}^2$,前者气化阵面温度为后者的几倍至几十倍。由于 T_v 随激光功率密度而升高,导致后退速度 U_v 在 10^8 W/cm^2 以上范围随激光功率密度增大而减小,在 10^9 W/cm^2 以上这种下降更为明显。

气态质量迁移率 m_v 取决于后退速度, $m_v = \rho U_v$,总的气态迁移质量则为 $\rho \int_{t_v}^t U_v dt$ 。当激光功率密度较低时,热扩散损失的热量对 U_v 有明显的影响,气态质量迁移率也较低。后退速度和气态质量迁移率的计算往往与试验结果差别较大,一方面由于反射率、吸收率及热物理特性与温度有关,实际的激光波形很不规则等原因,另一方面因为质量迁移实际上是多种机制造成的综合结果,迁移的质量中被蒸气压迫而喷溅的液滴占主要部分。

1.1.5 激光诱导等离子体及其效应

激光作用在材料表面,引发蒸气,蒸气继续吸收激光能量,使温度升高,最终形成高温高密度的等离子体。等离子体是大量带电粒子(电子、离子)及原子和分子组成的物质体系,它整体呈电中性。高功率密度激光产生等离子体的机制主要有三种:光电离、热电离和碰撞电离。光电离是指原子中的电子受到激光照射时,由于光电效应或多光子效应吸收足够的光子能量而发生电离的现象。光电离主要适用于较冷的介质中初始载流子的萌生过程,而激光等离子体处于完全电离状态,光电离不是其形成的主要机制;热电离是指激光作用下蒸气的温度足够高时,高温下的热运动速度很大的原子相互碰撞,使其电子处于激发态,其中一部分电子的能量超过电离势使原子发生电离;碰撞电离是指蒸气中的带电粒子在电场的作用下加速,并与中性原子碰撞,发生能量交换,使原子中的电子获得足够能量而发生电离。

处于热力学平衡状态下的蒸气电离度完全由蒸气密度和温度决定。在部分电离的气体中,入射激光能量被热激发原子通过束缚—自由机制和粒子通过逆韧致吸收。蒸气吸收激光能量而升温,并导致电离度和吸收系数进一步增大,这种正反馈有助于蒸气中形成等离子体。

等离子体通过多种机制吸收在其中传播的激光束的能量,使其温度升高、电离度增大。逆韧致吸收是等离子体吸收激光的主要机制。逆韧致吸收是指处在激光电场中的电子被激励发生高频振荡,并且以一定概率与粒子相互碰撞,把能量交给较重的粒子(离子、原子),从而使等离子体升温。

金属材料的蒸气是单原子气体,气化温度 T_v 很高,而电离势很低,因此,材料的气化率不大,蒸气压力仅略高于环境气压时,弱电离的蒸气也存在大量的自由电子,可以对激光产生有效的逆韧致吸收,也就是处于离子库仑场中的自由电子吸收激光能量,加速运动或改变运动方向,从而把激光能量转移给离子,使蒸气加热升温。

当光强较高,蒸气吸收的能量速率超过其各种损耗时,蒸气电离,自由电子数量随时间呈指数上升,使得蒸气完全电离,变成对激光不透明。等离子体吸收增大,到达材料表面的激光功率密度变小,气化减弱,使得等离子体密度、温度下降,吸收减小;反之,等

离子体吸收变弱，达到材料表面的激光功率密度变大，气化增强，使得等离子体温度、密度上升，等离子体吸收增强。

由于等离子体对激光的吸收，阻碍了激光到达材料表面，切断了激光与材料之间的能量耦合。这种效应称之为等离子体屏蔽效应。等离子体吸收的能量与入射激光能量之比，被称为等离子体屏蔽系数。等离子体屏蔽系数与激光波长有关，长波长激光的等离子体屏蔽效应比短波长激光要强烈一些，出现时间更早。在激光焊接技术中，等离子体的吸收和散射作用影响了激光的传输效率，降低了到达工件上的激光能量；而等离子体的负透镜效应（折射）扩大了激光能量在工件上的作用区，从而降低了焊接质量。

1.2 激光焊接的原理与特点

激光焊接是一种利用经聚焦后具有高能量密度（ $10^6 \sim 10^{12} \text{W/cm}^2$ ）的激光束作为热源来加热熔化工件的特种熔化焊方法。它是基于上述激光与材料相互作用基础光热效应的熔化焊接，其前提是激光被材料吸收并转化为焊接需求的热能。通常，激光作用于材料表面所导致的物理现象不同，包括表面温度升高、熔化、气化，形成小孔以及产生光致等离子体等（见图 1-2）。

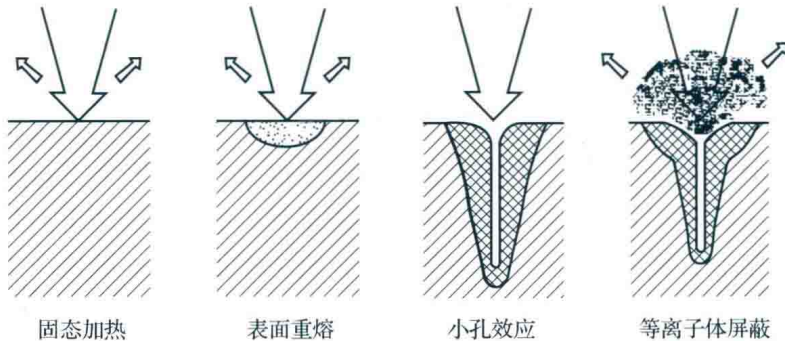


图 1-2 不同强度激光作用于金属产生的物理过程

这些物理现象决定了焊接过程热作用机制，使得激光焊接存在热导焊和深熔焊两种焊接模式。两种模式的转变主要取决于作用在材料上的激光斑点功率密度。对于特定的材料，存在一个特定的功率密度阈值。当作用于材料的激光功率密度低于该阈值时，激光能量被材料表面吸收并很快向材料内部传输，形成宽深比较大的热导焊缝。而当作用于材料的激光功率密度高于该阈值时，在工件表面还来不及向材料内部传热之前，激光能量就使材料表面迅速升温、熔化和气化，并随着激光能量的继续输入，形成沿穿透厚度方向的小孔。小孔周围为液体金属熔池，小孔内充满了高温金属蒸气和等离子体。高温金属蒸气和等离子体的膨胀力与小孔周围液体金属的重力和表面张力共同作用，维持小孔的稳定存在（见图 1-3）。

小孔沿着焊接方向移动，后部熔池迅速冷却凝固，并形成深宽比较大的深熔焊缝，如图 1-4 所示。因此，激光焊接模式与决定热作用机制的激光功率密度和焊接线能量密切相关。