

# 焊接热过程 与熔池形态

武传松 编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

# 焊接热过程与熔池形态

武传松 编著



机械工业出版社

本书在介绍焊接热过程与熔池形态的概念、物理意义及特点的基础上,论述了焊接热源模型,焊接热过程计算的解析法与无因次公式,焊接热传导计算的有限差分法与计算实例,焊接热传导的有限单元法分析与计算实例,TIG焊接熔池流场与热场的数值分析方法与计算实例,熔滴过渡动态过程的数值分析,MIG/MAG焊接熔池形态的数值模拟,等离子弧焊接的小孔和熔池行为,焊接熔池几何形状的视觉检测,最后讨论焊接电弧物理传输机制的数值分析。

本书可供广大焊接科技工作者阅读。

## 图书在版编目(CIP)数据

焊接热过程与熔池形态/武传松编著. —北京:机械工业出版社, 2007.8

ISBN 978-7-111-21962-0

I. 焊… II. 武… III. ①焊接-传热-过程②焊接熔池 IV. TG4

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第112320号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:吕德齐 版式设计:张世琴 责任编辑:樊钟英

封面设计:王奕文 责任印制:洪军汉

北京振兴源印务有限公司印刷厂印刷

2008年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·17.75印张·435千字

0001-4000册

标准书号:ISBN 978-7-111-21962-0

定价:33.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 68351729

封面无防伪标均为盗版

# 序 言

进入 21 世纪后,焊接已经成为制造业中非常重要的共性工艺技术。几乎所有的产品,从几十万吨的巨轮到不足 1g 的微电子元件,在生产过程中都不同程度地依赖于焊接技术。焊接技术已经渗透到制造业的各个领域,直接影响到产品的质量、可靠性和寿命以及生产的成本、效率和市场反应速度。而焊接过程中的物理传输机制(传热、传质、传量)和熔池中的流体动力学状态是决定焊接接头组织与性能、焊缝成形质量以及焊接效率的关键因素。通过建立焊接热过程和熔池形态的数学模型,对焊接熔池形态及其焊接热过程进行数值模拟与仿真,将为深入理解焊接过程中的复杂物理现象并进而实现焊接过程自动化提供重要而实用的理论依据和基础数据。采用科学的模拟技术和少量的实验验证相结合的方法,将焊接工艺的研究模式从“理论—实验—生产”转变为“理论—计算机模拟—生产”,是当今信息时代的发展趋势,将大大提高焊接热加工的科学水平,节约大量实验所需的人力、物力,具有十分重要的理论意义和工程实用价值。

武传松教授 20 多年来一直致力于焊接热过程与熔池形态的数值模拟研究,在电弧物理、熔滴过渡和熔池行为的数值分析领域取得了一系列创造性成果,丰富和发展了焊接工艺的理论 and 实践,他的成果得到国内外同行专家的认可和广泛引用,在国内外产生了重要影响,对我国焊接科学技术的发展起到了重要的推动作用。

武传松教授撰写的《焊接热过程与熔池形态》一书,全面、系统地总结了他近 10 年来的最新成果和研究进展,既有对国际上研究现状和发展趋势的分析,又有自己的独到见解;既有理论、模型,又有算法和计算实例,使得全书内容充实、完整、具体、生动。

相信该书的出版对焊接过程数值模拟的研究与开发、焊接工艺优化设计和焊接过程控制都具有重要的指导作用,对广大焊接科技工作者会大有裨益。



中国科学院院士、清华大学教授

# 前 言

焊接是制造技术的重要组成部分，在国民经济建设中具有不可替代的重要作用。随着科学技术的发展，追求焊接生产过程的优质、高效和低成本是一个永恒的主题，而焊接热过程与熔池形态是决定焊接质量和焊接生产率的关键因素，也是焊接工艺的科学基础。准确地计算焊接热过程与熔池形态，对于焊接冶金分析、应力变形分析、过程控制及工艺优化等都具有十分重要的意义。随着信息科学与技术的飞速发展，焊接热过程与熔池形态的数值模拟成为国际上的学科前沿与研究热点，这是使焊接工艺从“定性”走向“定量”分析、从“经验”走向“科学”的重要途径。

20多年来，作者一直从事焊接热过程与熔池形态数值模拟与实验测试领域的研究工作，主持完成国家自然科学基金和省部级课题十几项，并先后赴美国威斯康星-密尔沃基大学、德国柏林工业大学、日本大阪大学、德国汉诺威大学、美国肯塔基大学开展学术交流，完成多项国际合作研究课题。同时，多项研究结果被国际上的同行专家广为引用。主持完成的项目中，“焊接熔池形态及其热过程的数值模拟研究”获得2000年教育部自然科学奖一等奖；“电弧阳极边界层物理传输机理的研究”获得2004年教育部自然科学奖二等奖；另有两项成果分别获得1997年和2002年山东省科技进步奖。

作者1990年编著的《焊接热过程数值分析》一书，受到同行专家的好评，被多所大学选为研究生教学用书。由于近十几年来该领域有了很大的发展，作者本人主持的实验室也取得了一系列新的成果，作者希望写作一本新书，系统地总结最新的研究成果。

本书将飞速发展的计算机模拟技术与焊接科学技术融合在一起，全面总结了作者自1996年以来的研究成果，系统地论述了典型焊接工艺的热过程与熔池形态数值分析的理论、模型、算法及计算实例，为焊接冶金分析、应力变形分析、过程控制及工艺优化等提供理论指导和基础数据。

本书分为11章。在第1章介绍焊接热过程与熔池形态的概念、物理意义及特点的基础上，第2章论述焊接热源的种类、分布模式和特点以及焊接热效率和焊接熔化效率的定义。然后，第3至5章分别介绍焊接热过程计算的解析法与无因次公式、焊接热传导计算的有限差分法与计算实例、焊接热传导的有限单元法分析与计算实例。第6章论述瞬态TIG焊接熔池表面变形、流场和热场的数值分析方法与计算实例。第7、8两章分别介绍GMAW焊接熔滴过渡动态过程和熔池形态的数值模拟方法与计算实例。第9章论述等离子弧焊接熔池与小孔形态的分析例子。最后，第10章介绍焊接熔池几何形状的视觉检测系统及实验测试结果，第11章讨论了焊接电弧物理与阳极边界层传输机制的数值分析结果。

本书所介绍的研究工作都是作者在山东大学材料连接技术研究所指导的博士研究生和硕士研究生共同合作下完成的。他们作为课题骨干，不仅很好地配合完成了各项科研课题，而且做出了许多创造性的贡献。本书的取材除了作者本人和助手们已发表的论文外，还有研究

生的学位论文内容。对于他们为此做出的贡献，作者表示衷心的感谢。

本书成稿后，林尚扬院士和吴林教授热情推荐出版，潘际銮院士为本书作序。对于焊接领域学界前辈给予的关心和提携，作者深表谢意。

值本书出版之际，还要感谢所有给予作者关心、爱护和帮助的亲人、学生、朋友和同事。

由于焊接过程数值模拟技术在日新月异的发展，加上作者水平所限，书中难免有不当之处，敬请读者批评指正。

# 主要符号表

$A_d$	焊丝的横截面积	$J_r, J_z$	电流密度的径向和轴向分量
$A_R$	焊缝余高部分的横截面积	$K$	热能集中系数
$A_w$	焊缝的横截面积	$k_d$	熔滴中的电流密度分布集中系数
$a$	热扩散率	$k_e$	玻耳兹曼常数
$a_f, a_h, a_r$	焊接热源的分布参数	$k_{seg}$	偏析平衡常数
$b$	熔滴的阻尼系数	$L_e$	焊丝伸出长度
$b_c$	薄板的散温系数	$m_e$	电子的质量
$b_h$	焊接热源的分布参数	$m_i$	正离子的质量
$B$	磁感应强度	$m_D$	熔滴的质量
$B_\theta$	磁感应强度的分量	$n_3$	工艺条件无因次参数
$B_i$	毕欧数	$n_a$	原子的数量密度
$c_h$	焊接热源的分布参数	$n_e$	电子的数量密度
$c_p$	比热容	$n_i$	正离子的数量密度
$C_1, C_2$	自由表面变形方程中的常数	$P$	流体中的压力
$C_3, C_4$	自由表面变形方程中的常数	$P_a$	电弧压力
$d_w$	焊丝直径	$P_d$	熔滴的冲击力
$E$	电场强度	$Q_1$	电弧的有效功率
$F(i, j, t)$	流体体积分数	$Q_0$	电弧功率
$F_0$	傅里叶数	$Q_m$	熔化潜热
$F_m$	电磁力	$Q_q$	蒸发相变潜热
$F_v$	流体受到的体积力	$Q_{vd}$	熔滴带入熔池的热量分布
$F_x, F_y, F_z$	体积力的分量	$Q_{vh}$	内热源项
$F_r, F_z$	电磁力的分量	$q$	热流密度
$g$	重力加速度	$q_v$	体积热源的强度
$H$	焊件厚度	$q_{vo}$	体积热源的最大强度
$H_D$	熔滴在其轴线 $z$ 上的投影长度	$r$	半径
$H_m$	液体金属的焓	$R$	距离
$H_{dr}$	熔滴的焓	$R_D$	脱落时的熔滴半径
$H_{pv}$	熔池的焓	$R_g$	气体常数
$H_v$	液-气相变潜热	$r_D$	熔滴半径
$h_c$	焊件和环境的换热系数	$r_H$	电弧加热斑点的半径
$h_e$	普朗克常数	$r_w$	焊丝半径
$I$	焊接电流	$S_m$	焊丝的熔化速度
$J$	电流密度	$T$	温度
$J_a$	阳极表面上的电流密度	$T_0$	焊件初始温度

$T_b$	沸点	$\epsilon_i$	电离势
$T_f$	环境温度	$\lambda$	导热系数
$T_L$	液相线的温度	$\lambda_D$	德拜长度
$T_m$	熔点	$\lambda_e$	电子的导热系数
$T_s$	固相线的温度	$\lambda_h$	重粒子的导热系数
$T_a$	阳极表面的温度	$\lambda_m$	电子的平均自由程
$T_e$	电子的温度	$\Gamma_s$	表面过饱和参数
$T_h$	重粒子的温度	$\eta$	焊接热效率
$t$	时间	$\eta_m$	焊接熔化效率
$U_a$	电弧电压	$\mu$	动力粘度
$U, V, W$	直角坐标系中的流体速度分量	$\mu_e$	电子的迁移率
$U^*, V^*, W^*$	贴体坐标系中的流体速度分量	$\mu_i$	正离子的迁移率
$u, v, w$	流体速度的分量	$\mu_m$	真空磁导率
$V_D$	熔滴体积	$\rho$	密度
$V_\phi$	电子的逸出功	$\sigma_s$	斯蒂番-玻耳兹曼常数
$v_D$	熔滴到达熔池表面时的速度	$\sigma_j$	电流分布参数
$v_R$	熔滴进入熔池后的剩余速度	$\sigma_q$	热流分布参数
$v_0$	焊接速度	$\sigma_e$	电导率
$W_h$	喷嘴到焊件的距离	$\varphi$	熔池上表面形状函数
$x, y, z$	直角坐标	$\psi$	熔池下表面形状函数
$x^*, y^*, z^*$	贴体坐标	$\theta$	无因次温度
$\alpha$	换热系数	$\theta_b$	FFE 处重粒子温度与阳极表面温度的比值
$\alpha_b$	进入阳极晶格电子流所占的百分比	$\theta_s$	加权因子
$\alpha_{cr}$	对流与辐射的散热系数	$\omega$	超松弛因子
$\beta$	热膨胀系数	$\Delta T$	温度差
$\gamma$	表面张力	$\Delta H_d$	熔滴和熔池焓的差值
$\gamma_e$	复合系数	$\phi$	电位势
$\delta_t$	时间步长	$\phi_f$	阳极压降
$\delta_x, \delta_y, \delta_z$	网格间距	$\phi_d$	电子的热扩散系数
$\epsilon$	辐射率	$\bar{\omega}$	涡度
		$\Psi$	流函数

说明：1. 书中每个符号在正文第一次出现时，都在相应位置对其所代表的物理意义做了标注和说明。

2. 正文所用到的符号很多，这里只是列出主要符号。



# 目 录

序	
前言	
主要符号表	
<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 焊接热过程的特点 .....	1
1.2 焊接熔池形态 .....	2
1.3 焊接热过程解析法的发展历史与现状 .....	3
1.4 焊接热传导的数值分析 .....	4
1.5 TIG 焊熔池形态及其热过程的数值分析 .....	5
1.6 MIG/MAG 焊熔池形态及其热过程的数值分析 .....	9
1.7 PAW 焊接热过程数值分析模型的研究现状 .....	11
1.8 GMAW 焊接熔滴过渡动态过程的数值分析 .....	11
1.8.1 静力平衡理论和不稳定收缩理论 .....	12
1.8.2 能量最小原理 .....	13
1.8.3 流体动力学理论 .....	13
1.8.4 “质量—弹簧”理论 .....	13
1.9 激光焊熔池的数值分析 .....	14
<b>第 2 章 焊接热源模型</b> .....	16
2.1 焊接热效率和焊接熔化效率 .....	16
2.1.1 电弧物理分析法 .....	17
2.1.2 计算-测试法 .....	19
2.1.3 量热计测量法 .....	19
2.1.4 理论模型与温度测试相结合确定 $\eta$ 值 .....	21
2.2 焊接热源的作用模式 .....	22
2.3 集中热源 .....	22
2.4 平面分布热源 .....	22
2.4.1 高斯分布热源 .....	22
2.4.2 双椭圆分布热源 .....	24
2.5 体积分布热源 .....	25
2.5.1 半椭球体分布热源 .....	25
2.5.2 双椭球体分布热源 .....	26
2.5.3 其他体积热源模型 .....	27
<b>第 3 章 焊接热过程计算的解析法</b> .....	28
3.1 热传导问题的数学描述 .....	28
3.2 无限大物体内的热传导 .....	31
3.2.1 瞬时集中热源作用下的热过程 .....	31
3.2.2 叠加原理 .....	33
3.3 电弧焊热过程计算的解析法——Rosenthal-Rykalin 公式 .....	34
3.3.1 电弧加热金属的计算方式 .....	34
3.3.2 电弧作为瞬时集中热源时的计算公式 .....	35
3.3.3 电弧作为功率恒定的运动集中热源时的热过程计算 .....	36
3.3.4 传热过程的准稳定状态 .....	37
3.3.5 物体尺寸的局限性对于热传播过程的影响 .....	39
3.3.6 大功率高速移动热源的温度场计算公式 .....	40
3.4 Rosenthal-Rykalin 公式的无因次形式 .....	42
3.4.1 厚大焊件的情况 .....	42
3.4.2 薄板的情况 .....	47
3.5 Rosenthal-Rykalin 公式的局限性 .....	50
3.6 Rosenthal-Rykalin 公式的改进 .....	51
<b>第 4 章 焊接热传导的有限差分计算</b> .....	54
4.1 均匀网格中函数的导数 .....	54

4.1.1 直观法 .....	54	5.2 单元划分和温度场的离散 .....	86
4.1.2 泰勒级数法 .....	55	5.3 温度插值函数的选择 .....	87
4.2 非均匀网格中函数的导数 .....	56	5.4 有限单元法的单元分析 .....	88
4.2.1 直观法 .....	56	5.4.1 边界单元变分计算 .....	88
4.2.2 泰勒级数法 .....	57	5.4.2 内部单元的变分计算 .....	91
4.3 稳定态热传导问题的有限差分 方程 .....	57	5.5 有限单元法的总体合成 .....	92
4.3.1 偏微分方程替代法 .....	57	5.6 单元节点温度的求解 .....	94
4.3.2 能量平衡法 .....	58	5.7 三维有限单元法 .....	95
4.4 瞬态热传导问题的有限差分 方程 .....	60	5.7.1 三维热传导的变分问题 .....	95
4.4.1 显式差分格式 .....	60	5.7.2 八节点六面体等参数单元 .....	96
4.4.2 隐式差分格式 .....	61	5.8 MIG 焊接温度场的有限单元法 计算实例 .....	98
4.4.3 C-N 格式 .....	61	5.8.1 余高的处理 .....	98
4.4.4 加权差分格式 .....	62	5.8.2 网格划分及热源的处理 .....	99
4.5 边界、界面、复合传热焊件和非 均匀物性的焊件 .....	62	5.8.3 计算结果 .....	100
4.5.1 边界点 .....	62	<b>第 6 章 瞬态 TIG 焊熔池流场和热场 的数值分析</b> .....	102
4.5.2 表面放热边界条件 (稳定态) .....	63	6.1 焊接熔池形态的数学描述 .....	102
4.5.3 表面放热边界条件 (瞬态) .....	64	6.1.1 直角坐标系下的控制方程组 .....	102
4.5.4 界面 .....	64	6.1.2 熔池的自由表面变形 .....	103
4.5.5 非均匀物性 .....	65	6.1.3 贴体坐标下控制方程组的 形式 .....	106
4.6 热传导差分解法的精确性、 稳定性和收敛性 .....	65	6.1.4 贴体坐标下控制方程组的定解 条件 .....	108
4.6.1 误差 .....	65	6.2 数值模拟的方法 .....	111
4.6.2 稳定性 .....	65	6.2.1 采用的算法 .....	111
4.6.3 精确度 .....	67	6.2.2 离散化方程的建立 .....	112
4.7 非直角坐标系的热传导有限差分 方程 .....	67	6.2.3 边界条件的离散化 .....	118
4.8 有限差分方程的计算机解法 .....	69	6.3 计算过程和程序编制 .....	120
4.8.1 简单迭代法 .....	69	6.3.1 三维瞬态数值计算的主程序 .....	120
4.8.2 高斯-塞德尔迭代法 .....	70	6.3.2 表面变形子程序 .....	122
4.8.3 超松弛迭代法 .....	71	6.3.3 熔池热场和流场的计算 .....	122
4.9 焊接瞬态温度场的有限差分计算 实例 .....	71	6.4 算例用到的试件材料、尺寸和 物性参数 .....	122
4.9.1 瞬态焊接热传导模型 .....	72	6.5 熔池形状和流场的瞬态演变 .....	124
4.9.2 动态非均匀网格 .....	73	6.6 熔池表面变形的瞬态演变 .....	128
4.9.3 控制方程的离散化 .....	77	6.7 熄弧后熔池形状及流场的动态 演变 .....	130
4.9.4 计算结果 .....	79	6.8 实验验证 .....	133
<b>第 5 章 焊接热传导的有限单元法 计算</b> .....	83	6.8.1 熔池上表面形状的比较 .....	134
5.1 焊接热传导的变分问题 .....	83		

6.8.2 熔池表面下塌变形的比较 .....	134	建立 .....	171
6.9 焊接参数阶跃变化时 TIG 焊接 熔池的动态响应 .....	136	8.1.1 直角坐标系下描述 MIG/MAG 焊接 熔池行为的控制方程 .....	172
6.9.1 计算程序的调整 .....	136	8.1.2 MIG/MAG 焊接熔池表面形状及 焊缝余高 .....	173
6.9.2 焊接电流发生阶跃变化时熔池动态 响应的数值模拟 .....	136	8.1.3 贴体坐标系下的控制方程 .....	174
6.9.3 焊接速度发生阶跃变化时熔池动态 响应的数值模拟 .....	139	8.1.4 MIG/MAG 焊接熔池行为控制 方程的边界条件 .....	176
6.9.4 实验验证 .....	142	8.1.5 控制方程的离散化 .....	176
<b>第 7 章 GMAW 焊接熔滴过渡动态 过程的分析 .....</b>	<b>144</b>	8.2 电弧电流密度在变形的 MIG/MAG 熔池表面上的分布 .....	177
7.1 GMAW 熔滴过渡的数理 模型 .....	144	8.3 体积力和电弧压力的计算 .....	183
7.1.1 控制方程 .....	144	8.3.1 熔池中的体积力 .....	183
7.1.2 自由表面的跟踪 ——VOF 法 .....	145	8.3.2 焊接电弧压力在变形熔池表面的 分布 .....	184
7.1.3 熔滴的受力分析 .....	145	8.4 MIG/MAG 焊接电弧热流在变形 熔池表面上的分布 .....	185
7.1.4 定解条件 .....	147	8.5 熔滴熔量在 MIG/MAG 熔池 内部的分布 .....	188
7.2 算法及编程 .....	147	8.5.1 熔滴过渡过程的动量和能量 分析 .....	188
7.3 数值分析结果 .....	151	8.5.2 熔滴熔量在 MIG/MAG 焊接熔池 内部的分布区域 .....	190
7.3.1 熔滴形状的动态变化 .....	151	8.5.3 熔滴熔量在熔池内部分布的计算 结果 .....	190
7.3.2 熔滴中的速度场 .....	152	8.6 MIG/MAG 焊接熔池行为的 数值分析结果 .....	191
7.3.3 残留熔滴及脱离熔滴的 形状变化 .....	153	8.6.1 程序设计和计算所需参数的 确定 .....	191
7.3.4 焊接电流对过渡熔滴尺寸的 影响 .....	154	8.6.2 焊接参数对熔池表面变形的 影响 .....	194
7.4 基于“质量—弹簧”理论的熔滴 过渡动态模型 .....	155	8.6.3 焊接参数对电弧热流密度分布的 影响 .....	196
7.4.1 数学模型的建立 .....	155	8.6.4 焊接温度场的计算结果 .....	197
7.4.2 力学模型描述 .....	156	8.6.5 焊接熔池流场的计算结果 .....	198
7.4.3 关键技术问题的处理 .....	157	8.7 模型的实验验证 .....	201
7.4.4 分析方法及材料物性参数的 选择 .....	161	8.7.1 试验方法及试验材料 .....	202
7.4.5 不同焊接电流条件下熔滴的振荡和 脱离 .....	162	8.7.2 焊缝几何尺寸的实验验证 .....	202
7.4.6 熔滴过渡动态过程的分析 .....	164	8.7.3 焊件上温度分布的实验验证 .....	206
7.4.7 熔滴尺寸的预测 .....	167	<b>第 9 章 等离子弧焊的熔池与小孔 形态 .....</b>	<b>207</b>
7.4.8 计算值与实验结果比较 .....	169	9.1 小孔等离子弧焊准稳态热场的数值	
<b>第 8 章 MIG/MAG 焊接熔池形态的 数值模拟 .....</b>	<b>171</b>		
8.1 MIG/MAG 焊接熔池模型的			

分析 .....	208	检测结果 .....	236
9.1.1 PAW 焊接的体积热源模型 .....	208	10.2.1 焊接电流变化时熔池形状参数的 检测结果 .....	237
9.1.2 小孔等离子弧准稳态热源模式 (QPAW: Quasi-steady state PAW heat source) .....	212	10.2.2 焊接速度变化时熔池形状参数的 检测结果 .....	239
9.1.3 单元划分 .....	212	10.3 不锈钢薄板 TIG 焊熔池形状 参数的检测结果 .....	240
9.1.4 有限元分析结果 .....	213	10.4 基于激光频闪视觉检测的试验 系统 .....	242
9.2 小孔等离子弧焊热场瞬时演变 过程的数值分析 .....	216	10.5 GMAW 焊接熔池图像的激光 频闪视觉检测结果 .....	245
9.2.1 瞬态小孔 PAW 焊接热源模式 (TPAW: Transient PAW heat source) .....	216	10.5.1 CO <sub>2</sub> 焊接熔池图像检测结果 .....	245
9.2.2 瞬态小孔 PAW 焊接温度场的 有限元计算结果 .....	217	10.5.2 MAG 焊接熔池图像检测 结果 .....	245
9.3 PAW + TIG 电弧双面焊接过程的 数值模拟 .....	223	<b>第 11 章 焊接电弧物理传输机制的     数值分析 .....</b>	247
9.3.1 数值分析模型的建立 .....	224	11.1 TIG 焊接电弧的数学模型 .....	247
9.3.2 数值分析结果 .....	225	11.1.1 控制方程组 .....	247
9.4 小孔形状的描述 .....	228	11.1.2 边界条件 .....	249
9.4.1 轴对称形状的小孔 .....	228	11.1.3 传向阳极的热量 .....	249
9.4.2 任意形状的小孔 .....	229	11.1.4 计算结果 .....	250
9.4.3 熔池形状及温度场计算 .....	230	11.2 电弧阳极边界层的数值分析 模型 .....	253
<b>第 10 章 焊接熔池几何形状参数的     视觉检测 .....</b>	231	11.2.1 电弧阳极边界层的微观分析 .....	253
10.1 TIG 焊熔池几何形状参数的视觉 检测系统 .....	231	11.2.2 控制方程组 .....	253
10.1.1 试验系统组成 .....	231	11.2.3 边界条件 .....	255
10.1.2 熔池图像标定 .....	233	11.2.4 求解方法 .....	255
10.1.3 焊接熔池图像特点的分析 .....	233	11.3 电弧阳极边界层的主要计算 结果 .....	256
10.1.4 图像处理 .....	235	<b>参考文献 .....</b>	261
10.1.5 正面熔池几何参数的定义 .....	236		
10.2 低碳钢薄板 TIG 熔池形状参数的			

# 第1章 绪论

熔焊时,利用热源对焊件的热输入来加热焊件,使被焊材料产生局部熔化,形成熔池;熔池中的液态金属凝固之后形成焊缝。靠近焊缝的部位,由于温度也上升到足以引起冶金和力学性能产生变化的程度,因此出现焊接热影响区。焊接过程中,输入到焊件上的热量及其作用模式、热量在焊件上的分布与传播以及焊件的熔化与凝固等物理现象,对焊接质量有着决定性的影响,是焊接过程分析的最重要的理论基础。为了对此有一个概括的了解,本章先简述焊接热过程与熔池形态的特点,再综述该领域的国内外研究现状和发展趋势。

## 1.1 焊接热过程的特点

在焊接过程中,被焊金属由于热的输入和传播,而经历加热、熔化(或达到热塑性状态)和随后的连续冷却过程,通常称之为焊接热过程。

焊接热过程贯穿于整个焊接过程的始终,通过以下几个方面的作用成为影响并决定焊接质量和焊接生产率的主要因素之一:

- 1) 施加到被焊金属试件之上的热量的大小与分布状态决定了熔池的形状与尺寸。
  - 2) 焊接熔池进行冶金反应的程度与热的作用及熔池存在时间的长短有密切的关系。
  - 3) 加热和冷却参数的变化,影响熔池金属的凝固、相变过程,并影响热影响区的金属显微组织的转变,因而焊缝和焊接热影响区的组织与性能也都与热的作用有关。
  - 4) 由于焊接各部位经受不均匀的加热和冷却,从而造成不均匀的应力状态,产生不同程度的应力变形和应变。
  - 5) 在焊接热作用下,受冶金、应力因素和被焊金属组织的共同影响;可能产生各种形态的裂纹及其他冶金缺陷。
  - 6) 焊接输入热量及其效率决定母材和焊条(焊丝)的熔化速度,因而影响焊接生产率。
- 焊接热过程比一般热处理条件下的热过程复杂得多,它具有如下四方面的主要特点:

(1) 焊接热过程的局部集中性 焊件在焊接时不是整体被加热,而热源只是加热直接作用点附近的区域,加热和冷却极不均匀。

(2) 焊接热源的运动性 焊接过程中热源相对于焊件是运动的,焊件受热的区域不断变化。当焊接热源接近焊件某一点时,该点温度迅速升高;而当热源逐渐远离时,该点又冷却降温。

(3) 焊接热过程的瞬时性 在高度集中热源的作用下,加热速度极快(在电弧焊情况下,可达 $1500^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 以上),即在极短的时间内把大量的热能由热源传递给焊件,同时又由于加热的局部性和热源的移动而相应提高了冷却速度。

(4) 焊接传热过程的复合性 焊接熔池中的液态金属处于强烈的运动状态。在熔池内部,传热过程以流体对流为主;而在熔池外部,以固体导热为主。另外,还存在着对流换热、辐射换热以及蒸发散热。因此,焊接热过程涉及到各种传热方式,是复合传热过程。

以上几方面的特点使得焊接传热过程十分复杂。然而，由于它对焊接质量的控制和生产率的提高有重要影响，掌握其基本规律及在各种工艺参数下的变化趋势是非常有意义的。

## 1.2 焊接熔池形态

按照传热理论，焊接热过程分为两个部分：其一是熔池内部高温过热液态金属以对流为主的传热；其二是熔池外部热影响区和母材区域中的固体热传导。这两部分的传热过程是相互联系和相互影响的。焊接熔池形态（焊接熔池的几何形状、熔池内流体动力学状态及传热传质过程）是影响焊接过程和焊接质量的主要因素之一。为了更准确地计算和分析焊接热过程，必须深入研究熔池中液态金属的流体动力学状态。

电弧焊接时，熔池中的流体流动主要受以下几种力的驱动：

(1) 表面张力梯度 表面张力是温度的函数。由于熔池表面的温度分布不均匀，也就带来了表面张力的不均匀分布，从而在熔池表面上存在着表面张力梯度。表面张力梯度是熔池中流体流动的主要驱动力之一，它使流体从表面张力低的部位流向表面张力高的部位。对于液态钢，一般情况下温度越高，表面张力越小，即表面张力温度系数 ( $\partial\gamma/\partial T$ ) 为负值。此时，熔池中心部位温度高，表面张力小；而熔池边缘处温度低，表面张力大。因此，熔池表面上作用的这个表面张力梯度，使液态金属沿径向从中心向边缘流动（图 1-1a、图 1-2b），在熔池中心处由下向上流动。

但是，如果向熔池中加入某些表面活性元素（如 S、O、Se 等），就会使液态钢的表面张力温度系数从负值变为正值<sup>[1]</sup>。此时，熔池中心部位温度高，表面张力大；而熔池边缘处温度低，表面张力小。因此，表面张力梯度使液态金属沿径向从边缘向中心流动，在熔池中心处由上向下流动（图 1-1b）。在这种流态的情况下，较多的热量被传输到熔池底部，熔深较大。这就是说，表面张力温度系数的大小和符号能够改变熔池内的液体流动方向，进而影响着熔池内的温度分布及熔合区形状，如图 1-1 所示。

(2) 电磁力 电弧焊时，焊接电流从斑点进入熔池后会产生电流线的发散，熔池内部电流同其自身的磁场相互作用就产生了电磁力（洛伦兹力）。电磁力对熔池中的流体流动有着重要的影响。它推动熔池液态金属在熔池中心处向下流动，然后沿熔合线返回熔池表面，在熔池表面沿径向由边缘向中心流动（图 1-2c）。

(3) 浮力 浮力是由于熔池中存在着温度梯度或成分梯度，从而使得液态金属的密度发生变化而产生的。温度高的地方液态金属密度小，温度低的地方液态金属密度大。在浮力作用下，熔池中过热的液态金属将上升至表面，较冷的液态金属被推至底部。与表面张力梯

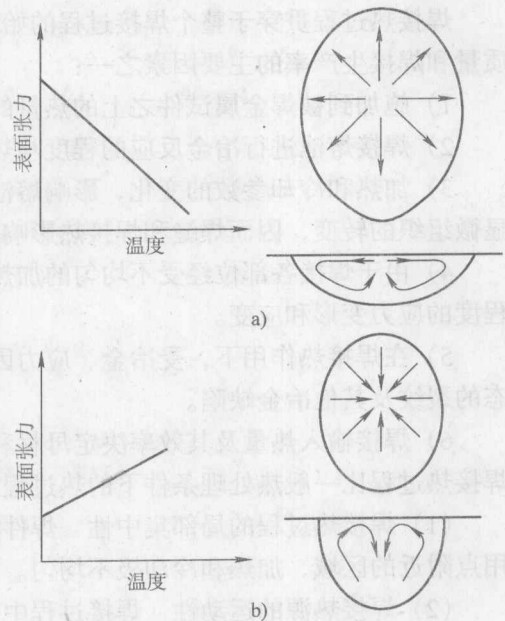


图 1-1 表面张力温度系数对熔池流体流动的影响

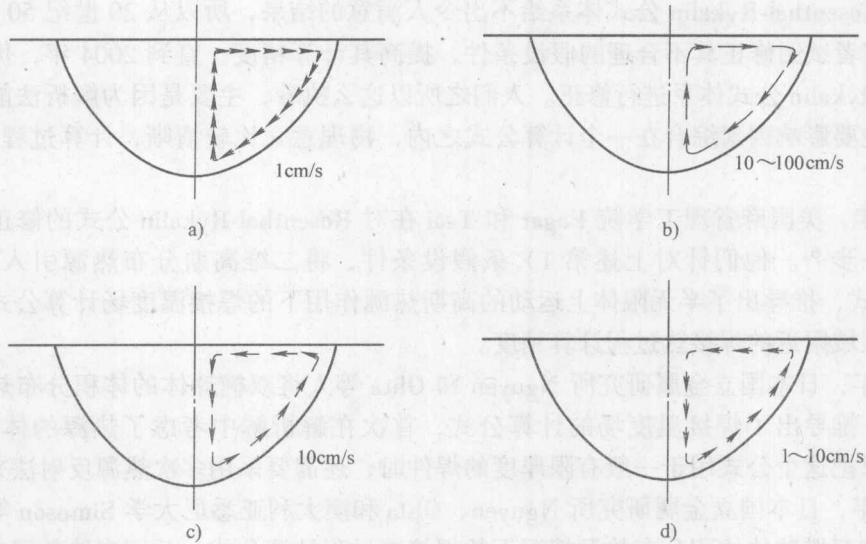


图 1-2 各种力单独作用时造成的熔池流体流动模式 (箭头表示流动方向和流速)

a) 浮力 b) 表面张力 c) 电磁力 d) 冲击力

度和电磁力对流体流动的作用相比, 浮力所起的作用很小 (图 1-2a)。

(4) 电弧等离子流的冲击力 电弧等离子流冲向熔池表面时, 施加的是冲击力或剪切力 (图 1-2d)。

考虑上述力的作用之后, 焊接熔池流体动力学状态及传热过程的数学描述涉及到热能方程、动量方程和连续性方程等, 构成一个偏微分方程组, 使问题的处理和求解过程更为复杂。但是, 由于这种处理更接近实际, 会大大提高计算精度。

### 1.3 焊接热过程解析法的发展历史与现状

焊接热过程解析计算的研究开始于 20 世纪 40 年代。美国的 Rosenthal<sup>[2,3]</sup> 和前苏联的 Rykalin<sup>[4,5]</sup> 提出了移动热源在固体中的热传导模型, 给出了焊接温度场的解析解, 形成了焊接热过程计算的经典理论——Rosenthal-Rykalin 公式体系。1997 年, 挪威理工大学 Grong 将 Rosenthal-Rykalin 公式转化成无因次形式, 给出了一些计算结果图<sup>[5]</sup>。但是, 这些解析公式是在如下一些不合理假设条件的基础上推导出来的:

- 1) 热源集中于一点、一线或一面;
- 2) 材料无论在什么温度下都是固体, 不发生相变;
- 3) 材料的热物理性能参数不随温度变化;
- 4) 焊件的几何尺寸是无限的 (对应于点热源和线热源, 焊件分别为半无限大体和无限大薄板)。

这些假设条件与焊接传热过程的实际情况有较大的差异, 致使距离热源较近部位的温度计算发生了极大的偏差。但这里恰恰是我们最关心的部位。因为从工艺上来看, 确定熔化区域的尺寸及形状是十分有意义的; 从冶金上来看, 相变点以上的加热范围是研究的重点。

由于 Rosenthal-Rykalin 公式体系给不出令人满意的结果, 所以从 20 世纪 50 年代开始, 有许多研究者试图修正其不合理的假设条件, 提高其计算精度。直到 2004 年, 仍有人在对 Rosenthal-Rykalin 公式体系进行修正。人们之所以这么执着, 主要是因为解析法能够将焊接温度场的主要影响因素综合在一个计算公式之内, 物理意义比较清晰, 计算过程相对简单、快速。

1983 年, 美国麻省理工学院 Eagar 和 Tsai 在对 Rosenthal-Rykalin 公式的修正方面迈出了重要的一步<sup>[6]</sup>。他们针对上述第 1) 条假设条件, 将二维高斯分布热源引入 Rosenthal-Rykalin 公式, 推导出了半无限体上运动的高斯热源作用下的焊接温度场计算公式, 改进了热源作用区域附近的焊接热过程计算精度。

1999 年, 日本国立金属研究所 Nguyen 和 Ohta 等人将双椭球体的体积分布热源应用于半无限体, 推导出了焊接温度场的计算公式, 首次在解析解中考虑了热源的体积分布<sup>[7]</sup>。但是, 如果把这个公式用于一般有限厚度的焊件时, 还需要采用多次热源反射法来处理。

2004 年, 日本国立金属研究所 Nguyen、Ohta 和澳大利亚悉尼大学 Simpson 等人推导了有限板厚和双椭球体体积分布热源情况下的焊接热过程计算公式, 并用实验数据对公式进行了标定<sup>[8]</sup>。这样, 就可以直接利用该式计算一般焊接情况的温度场, 不再需要采用多次热源反射法来处理。

2005 年, 作者主持的课题组针对上述的第 1) 和第 4) 两个假设条件做出改进, 同时考虑焊件上、下表面的散热条件和双椭球体体积分布热源, 推导出了更接近实际情况的焊接热过程解析法计算公式<sup>[9]</sup>。

## 1.4 焊接热传导的数值分析

由于 Rosenthal-Rykalin 公式本身固有的不足, 很难全面修正其不合理的假设条件, 只能在某一个或某两个方面做出改进, 无法从源头上根本解决问题。

电子计算机的发展推动了数值模拟在焊接热过程计算中的应用。数值模拟技术通过一组描述焊接基本物理过程的偏微分方程及其定解条件来模拟焊接过程, 采用数值方法求解以获得对焊接过程的定量认识。数值分析法能够处理焊接过程中各种复杂的边界条件、热源分布和非线性问题, 具有解析法不可比拟的优势。因此, 数值分析在焊接热过程的研究中得到了广泛的应用。

为了完整、准确地对焊接熔池形态和传热过程进行数值模拟, 需要同时考虑熔池中液态金属的对流传热和熔池外部固体区域的导热过程。但是, 流体流动涉及到五个偏微分方程的联立求解, 计算过程复杂, 计算时间较长。为了加快计算速度, 以便于实际应用, 人们试图简化整个计算过程, 只考虑电弧焊接的热传导问题, 不涉及熔池中的对流传热。

德国亚琛工业大学研制出的薄板 GMAW (熔化极气体保护电弧焊) 焊接热传导模型 MAGSIM (气体保护焊模拟系统)<sup>[10]</sup>, 能够计算试件上各点的热循环和焊缝的形状。MAGSIM 包含两部分: 一是焊丝加热熔化的过程模拟, 描述电弧作用于试件上的热能分布; 二是焊接温度场的有限差分模拟, 可以计算熔池的三维形状、焊缝和热影响区的形状尺寸。另外, MAGSIM 根据欧盟标准 EN25817 的要求, 可以确定焊缝几何形状参数允许变化的范围, 针对具体的被焊材料、板厚、焊丝直径等工艺条件来选择最合适的焊接电流、电压和焊



接速度等工艺参数。

德国戴姆勒—奔驰公司研制出填丝激光焊接的热传导模型<sup>[11]</sup>，其目的是预测不同焊接参数和不同被焊材料时焊缝横截面的位置、形状和尺寸。

Pardo 采用有限元法建立了 MIG（熔化极惰性气体保护电弧焊）焊接三维准稳态热传导模型<sup>[12]</sup>，计算出了 MIG 焊接熔池的几何形状和焊缝余高。模型考虑了液固界面熔化潜热的释放，同时电弧热流采用高斯分布模式，并把熔滴带入熔池的热量也假定符合高斯分布，与电弧的热流密度一起考虑。另外，他采用提高液态金属导热系数的方法来近似处理熔池对流对熔池形状的影响。该模型将余高横截面的外轮廓线假定为抛物线，求解时先由 Rosenthal-Rykalin 解析解公式求出熔宽，再预先确定焊缝余高的高度，通过有限元的计算结果加以修正，直到收敛。

Tekriwal 等也采用有限元方法建立了 MIG 焊接传热模型<sup>[13]</sup>，热流密度采用高斯分布模式。为了适应 MIG 焊接熔滴过渡的需要，采用了连续运动的有限元网格。在每一个时间步距上增加网格来模拟 MIG 焊接的熔滴过渡，即在步距上加入温度为 2300 K 的熔滴，模拟熔滴带入熔池的热量，这些单元的形状、温度事先确定，没有考虑焊缝的余高。

1994 年，印度的 Kumar 和 Bhaduri 设计了一个三维 GMAW 焊接温度场的有限元模型<sup>[14]</sup>。电弧热流密度亦采用了高斯分布模式，没有考虑焊缝余高。其模型在能量方程中将过热熔滴带给焊接熔池的焓量作为一个体积热源来考虑，假设该体积热源分布在电弧正下方的一定体积内，这个体积是一个圆柱体。先假定圆柱体的半径与熔滴的直径相等，再根据能量平衡推导出圆柱体的高度。

## 1.5 TIG 焊熔池形态及其热过程的数值分析

图 1-3 表示出了 TIG（钨极惰性气体保护电弧焊）焊接熔池传热的物理作用机制。焊件上发生熔化、凝固结晶、流体流动、对流传热、热传导、蒸发、体积膨胀等各种现象。作用在熔池上的力有：电弧压力、等离子流力、电磁力、浮力、表面张力等。熔池表面上作用有分布的电弧热流密度和压力，从而导致熔池的表面产生变形。为了得到熔池形状尺寸和焊件上的温度分布，必须利用合适的边界条件描述 TIG 焊接过程，并联立求解能量、动量和质量守恒方程以及描述自由表面变形的方程。

描述 TIG 焊接热过程的数学模型是数值模拟方法的基础，按照所描述的具体热过程可分为稳态、准稳态和瞬态模型三类。理论上，在固定电弧 TIG 焊接过程中，经过一段瞬时变化过程之后，当从电弧输入焊件的热量等于焊件向周围散失的热量时，焊接熔池就会保持一种形状不变的形态，此时熔池达到了稳态。这种所谓的稳态问题在实际焊接过程中很少遇到，目前已经少有人研究。当电弧运动的时候，如果以电极为参照系，焊接开始以后，经过一段短暂时间，熔池的形状和焊接温度场不再变化，而是跟随热源一起移动，达到了准稳态。尽管熔池的形状不再变化，但其在焊件上的位置不断地沿焊接方向运动，整个过程实际上仍然是瞬态的。可见，准稳态模型是对瞬态模型的简化。瞬态模型能够描述焊接过程的各个阶段，如起弧、熔池逐渐长大达到准稳态、熔池准稳态时对焊接参数改变的动态响应，以及熄弧后熔池急剧缩小直至消失。因此，瞬态模型最贴近于焊接过程的实际情况。TIG 焊接热过程的数值模型正是从稳态、准稳态和瞬态逐步发展而来的。