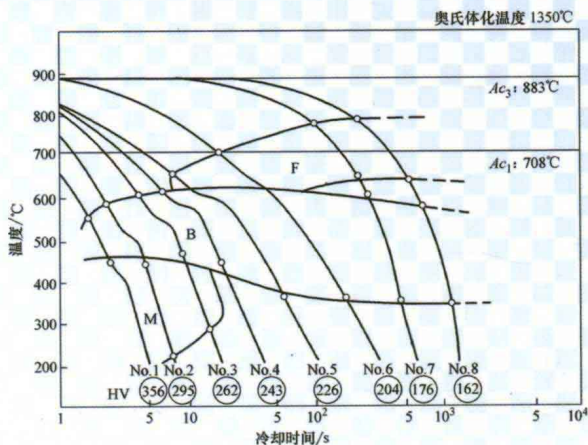
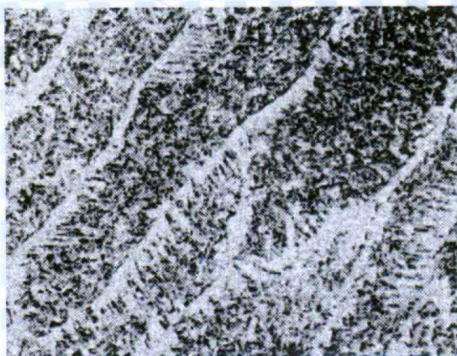




普通高等教育“十一五”国家级规划教材

材料连接原理

天津大学 杜则裕 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

材料连接原理

主 编 杜则裕
副主编 李亚江
参 编 武传松 王 勇 张彦华
主 审 单 平 邹增大



机械工业出版社

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材，以材料连接方法的基本原理为重点，深入分析材料的连接特性，其主要内容包括熔焊热源及温度场、焊接化学冶金、焊缝及热影响区、焊接裂纹、高能束焊接、摩擦焊连接、钎焊连接、陶瓷材料的连接、高温合金的焊接和复合材料的焊接。

本书可作为高等学校材料成形及控制工程专业、焊接技术与工程专业、材料加工工程专业以及材料类相关专业的本科生和研究生教材，也可供企业的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

材料连接原理/杜则裕主编. —北京: 机械工业出版社, 2011. 6
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-111-34224-3

I. ①材… II. ①杜… III. ①工程材料—连接技术—高等学校—教材
IV. ①TB30

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 072737 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: 冯春生 责任编辑: 冯春生 丁昕祯

版式设计: 霍永明 责任校对: 李秋荣

封面设计: 张 静 责任印制: 乔 宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2011 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 17.75 印张 · 440 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-34224-3

定价: 35.00 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

网络服务

社服务中心: (010)88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010)68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010)88379649

读者购书热线: (010)88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

随着科学技术的发展,我国的经济建设取得了辉煌的成就。载人航天及探月工程、西气东输工程、西电东送工程、南水北调工程、高速列车工程等,这些举世瞩目的、关系到国家发展的重点工程都显示出我国在经济建设上的决心与实力。这些重点工程也使我们体会到能源、信息、材料是现代经济发展的坚强支柱,而且,材料是人类物质文明的基础,支撑着当代新技术的发展。

人类的生产实践表明,材料必须经过加工过程才能在各种工程中发挥重要的作用,连接是重要的材料加工技术之一。材料连接技术广泛应用于航空航天、石油化工、电力、冶金、机械、电子等工业部门。目前,材料连接科学与工程已经发展成为一门独立的学科体系。而且“连接”的技术含义比“焊接”的范畴更加宽泛,特别是在我国大规模发展经济的形势下,材料连接技术更面临着难得的发展机遇。

本书可作为高等学校材料成形及控制工程专业、焊接技术与工程专业、材料加工工程专业以及材料类相关专业的本科生和研究生教材。编写本书的指导思想是:以材料连接方法的基本原理为重点,深入分析材料的连接特性,以提高材料连接质量为目的,并且注意培养学生分析问题与解决问题的能力,尤其是在阐明基本概念、基本规律上进行详细说明。本书由天津大学博士生导师杜则裕教授任主编;山东大学博士生导师李亚江教授任副主编;中国机械工程学会焊接学会理事长、天津大学博士生导师单平教授,山东大学博士生导师邹增大教授担任主审。第1、5章由山东大学博士生导师武传松教授编写,第2、3章由杜则裕教授编写,第4章由中国石油大学(华东)博士生导师王勇教授编写,第6、7章由北京航空航天大学博士生导师张彦华教授编写,第8、9、10章由李亚江教授编写。

本书的出版承蒙机械工业出版社的大力支持及帮助,特别是在本书申报“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”立项工作中机械工业出版社的领导及编辑们付出的辛勤劳动,编者在此表示衷心的感谢。

在本书编写过程中,得到了天津大学、山东大学、中国石油大学(华东)、北京航空航天大学等院校的领导及老师们的大力支持与帮助,编者在此表示衷心的感谢。

在本书的编写过程中,引用了大量的相关技术文献及手册,在此向这些参考文献的作者及所在单位表示衷心的感谢。

由于编者的水平所限,书中不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 熔焊热源及温度场	1
1.1 焊接热源的种类及其特点	2
1.2 焊接热效率	3
1.3 焊件上的热量分布模式	4
1.3.1 集中热源	4
1.3.2 平面分布热源	4
1.3.3 双椭球体积分布热源	7
1.3.4 其他体积热源模型	7
1.4 焊接温度场	7
1.4.1 焊接传热的基本定律	7
1.4.2 焊接热传导问题的数学描述	9
1.4.3 典型的焊接温度场	11
1.4.4 影响焊接温度场的主要因素	15
1.5 焊接热循环	17
1.6 焊接热传导与熔池形态的数值模拟简介	19
1.6.1 数值模拟的基本概念	19
1.6.2 焊接热传导的有限差分法计算	19
1.6.3 焊接热传导的有限单元法计算	20
1.6.4 焊接熔池形态的数值模拟	20
复习思考题	22
第2章 焊接化学冶金	23
2.1 焊接化学冶金过程的特点	24
2.1.1 焊接区的金属保护	24
2.1.2 焊接化学冶金过程的区域性与连续性	26
2.1.3 焊接工艺条件对化学冶金反应的影响	29
2.1.4 焊接化学冶金系统的不平衡性	31
2.2 焊接区内的气体	31
2.2.1 气体的来源	31
2.2.2 气体的产生	31
2.2.3 气体的分解	33
2.2.4 气相的成分	34
2.3 气相对金属的作用	35
2.3.1 氮对金属的作用	35
2.3.2 氢对金属的作用	38
2.3.3 氧对金属的作用	45
2.4 焊接熔渣	50
2.4.1 焊接熔渣的作用	50
2.4.2 焊接熔渣的成分和分类	50
2.4.3 焊接熔渣的结构理论	51
2.4.4 焊接熔渣的性能	53
2.5 焊接熔渣对金属的作用	56
2.5.1 熔渣对金属的氧化	56
2.5.2 焊缝金属的脱氧	58
2.5.3 焊缝金属的脱硫、脱磷	60
2.6 焊缝金属的合金过渡	62
2.6.1 合金过渡的目的	62
2.6.2 合金过渡的方式	63
2.6.3 合金过渡过程分析	63
2.6.4 合金过渡系数及其影响因素	64
复习思考题	66
第3章 焊缝及热影响区	67
3.1 熔池凝固	68
3.1.1 熔池凝固的特点	68
3.1.2 熔池结晶的一般规律	69
3.1.3 熔池结晶线速度	70
3.1.4 熔池结晶的形态	73
3.1.5 焊接接头的化学成分不均匀性	75
3.2 焊缝固态相变	79
3.2.1 低碳钢焊缝的固态相变	79
3.2.2 低合金钢焊缝的固态相变	80
3.3 焊缝中的气孔和夹杂	87
3.3.1 焊缝中的气孔	87
3.3.2 焊缝中的夹杂	95
3.4 焊缝性能的改善	96
3.4.1 焊缝金属的强化与韧化	96
3.4.2 焊缝性能的改善	97
3.5 焊接条件下的金属组织转变特点	99
3.5.1 焊接加热过程中的组织转变	99
3.5.2 焊接冷却过程中的组织转变	101
3.6 焊接热影响区的组织和性能	103

3.6.1 焊接热影响区的组织	103	6.1.1 旋转摩擦焊	166
3.6.2 焊接热影响区的性能	109	6.1.2 线性摩擦焊	166
复习思考题	113	6.1.3 搅拌摩擦焊	167
第4章 焊接裂纹	115	6.1.4 耗材摩擦堆焊	167
4.1 概述	116	6.2 旋转摩擦焊基本原理	168
4.1.1 焊接裂纹的危害	116	6.2.1 旋转摩擦焊过程分析	168
4.1.2 焊接裂纹的产生	116	6.2.2 摩擦性质分析	170
4.1.3 焊接裂纹的分类	117	6.2.3 摩擦焊热源的特点	171
4.2 焊接热裂纹	120	6.2.4 摩擦焊焊接参数	173
4.2.1 热裂纹的形成机理	120	6.3 搅拌摩擦焊基本原理	175
4.2.2 热裂纹的防止措施	122	6.3.1 搅拌摩擦焊的焊缝成形过程	175
4.3 焊接冷裂纹	125	6.3.2 搅拌摩擦焊产热机制	176
4.3.1 冷裂纹的形成机理	125	6.3.3 搅拌摩擦焊工具	176
4.3.2 冷裂纹的防止措施	128	6.3.4 搅拌摩擦焊工艺参数	177
4.4 其他裂纹	132	6.3.5 搅拌摩擦焊接头组织	177
4.4.1 再热裂纹	132	复习思考题	178
4.4.2 层状撕裂	135	第7章 钎焊连接	179
4.4.3 应力腐蚀裂纹	137	7.1 钎焊过程分析	180
复习思考题	141	7.1.1 钎焊及其特点	180
第5章 高能束焊接	143	7.1.2 液态钎料与母材的相互作用	184
5.1 电子束焊	144	7.1.3 钎焊接头的不均匀性	186
5.1.1 电子束焊的特点	144	7.2 钎料与钎剂	189
5.1.2 电子束焊的工作原理	145	7.2.1 钎料	189
5.1.3 电子束焊的分类	147	7.2.2 钎剂	190
5.1.4 电子束焊的设备	147	7.3 钎焊工艺	190
5.1.5 电子束焊的焊接参数	149	7.3.1 钎焊方法	190
5.2 激光焊	150	7.3.2 钎焊的工艺要求	192
5.2.1 激光焊的特点	150	7.4 钎焊接头设计	194
5.2.2 激光焊设备	151	7.4.1 钎接头的基本形式	194
5.2.3 激光焊焊接工艺	152	7.4.2 钎接头间隙的选定	195
5.2.4 激光焊焊缝的形成及特点	155	复习思考题	197
5.2.5 激光焊焊接工艺及参数	156	第8章 陶瓷材料的连接	199
5.3 激光+电弧复合热源焊接	157	8.1 陶瓷的分类、特点及性能	200
5.3.1 激光+电弧复合热源焊接的特 点	157	8.1.1 陶瓷的分类及特点	200
5.3.2 激光与电弧的复合方式	159	8.1.2 陶瓷的性能及应用前景	201
5.3.3 激光与电弧之间的相互作用	162	8.2 陶瓷材料的焊接性分析	202
5.3.4 激光+电弧复合热源焊接的工 艺参数	163	8.2.1 裂纹及焊接应力	202
复习思考题	163	8.2.2 界面润湿性及界面反应	204
第6章 摩擦焊连接	165	8.2.3 接头结合强度	205
6.1 摩擦焊概述	166	8.3 陶瓷材料的焊接工艺特点	207
		8.3.1 陶瓷连接的特点及基本要求	207
		8.3.2 陶瓷材料的钎焊连接	209
		8.3.3 陶瓷材料的扩散连接	213

8.3.4 陶瓷材料的电子束焊	217	10.1 复合材料的分类、特点及性能	250
复习思考题	219	10.1.1 复合材料的分类	250
第9章 高温合金的焊接	221	10.1.2 复合材料的特点及性能	252
9.1 高温合金的分类及性能	222	10.2 复合材料的焊接性	255
9.1.1 高温合金的分类和强化方式	222	10.2.1 金属基复合材料的焊接性 分析	255
9.1.2 高温合金的性能及应用	225	10.2.2 树脂基复合材料的连接特点	259
9.2 高温合金的焊接性分析	227	10.2.3 C/C复合材料的连接特点	261
9.2.1 高温合金的裂纹敏感性	227	10.2.4 陶瓷基复合材料的连接	265
9.2.2 接头组织的不均匀性	230	10.3 金属基复合材料的焊接工艺特点	267
9.2.3 焊接接头的力学性能	230	10.3.1 连续纤维增强金属基复合材料的 焊接特点	267
9.3 高温合金的焊接工艺特点	231	10.3.2 非连续增强金属基复合材料的 焊接特点	271
9.3.1 惰性气体保护焊	231	复习思考题	276
9.3.2 等离子弧焊	236	参考文献	277
9.3.3 电子束焊和激光焊	237		
9.3.4 钎焊和扩散焊	239		
复习思考题	246		
第10章 复合材料的焊接	249		

第1章

熔焊热源及温度场

1

在熔焊过程中，热源向被焊金属输入热，焊件上出现温度分布（温度场），经历加热、熔化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，是影响和决定焊接质量和焊接生产率的主要因素之一。

焊接热过程比一般热处理条件下的热过程要复杂得多，它具有如下四个方面的主要特点：

(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，又由于加热的局部性和热源的移动而使冷却速度也提高。

(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，还存在着对流换热以及辐射换热。因此，焊接热过程涉及各种传热方式，是复合传热问题。

以上几方面的特点使得焊接传热问题十分复杂。本章主要介绍熔焊过程中焊接热传导的基本知识。由于焊接热传导对焊接质量的控制和生产率的提高有重要影响，因此焊接工作者必须掌握其基本规律及在各种工艺参数下的变化趋势。

1.1 焊接热源的种类及其特点

到目前为止，实现金属焊接所需的能量主要是热能和机械能。对于熔化焊接，主要是热能，这里只讨论与熔焊有关的热源。

作为焊接热源，应当热量高度集中，快速实现焊接过程，并保证得到高质量的焊缝和最小的焊接热影响区。目前，能满足这些条件的热源有以下几种：

(1) 电弧热 利用气体介质中的电弧放电过程所产生的热能作为焊接热源，是目前焊接中应用最广泛的一种热源。

(2) 化学热 利用可燃气体（液化气、乙炔）或铝、镁热剂与氧或氧化物发生强烈反应时所产生的热能作为焊接热源（气焊、热剂焊所用的热源）。

(3) 电阻热 利用电流通过导体时所产生的电阻热作为焊接热源（电阻焊和电渣焊）。

(4) 摩擦热 由机械高速摩擦所产生的热能作为焊接热源（摩擦焊）。

(5) 等离子焰 由电弧放电或高频放电产生高度电离的气流（远高于一般电弧的电离度）并携带大量的热能和动能，利用这种能量作为焊接热源（等离子弧焊和切割）。

(6) 电子束 在真空中利用高压下高速运动的电子猛烈轰击金属局部表面，使这种动能转化为热能作为焊接热源。

(7) 激光束 利用激光即由受激辐射而增强的光（Laser），经聚焦产生能量高度集中的激光束作为焊接热源（激光焊及激光切割）。

每种焊接热源都有它自身的特点，一些常用焊接热源的主要特征，如最小加热面积、最

大功率密度和正常焊接参数条件下的温度见表 1-1。

表 1-1 一些常用焊接热源的主要特性

热源	最小加热面积 /cm ²	最大功率密度 /W·cm ⁻²	正常焊接参数下的温度 /K
氧乙炔焰	10 ⁻²	2 × 10 ³	3473
金属极电弧	10 ⁻³	10 ⁴	6000
钨极氩弧 (TIG)	10 ⁻³	1.5 × 10 ⁴	8000
埋弧焊	10 ⁻³	2 × 10 ⁴	6400
电渣焊	10 ⁻³	10 ⁴	2273
熔化极氩弧焊 (MIG)	10 ⁻⁴	10 ⁴ ~ 10 ⁵	—
CO ₂ 气体保护焊			
等离子弧	10 ⁻⁵	1.5 × 10 ⁵	18000 ~ 24000
电子束	10 ⁻⁷	10 ⁷ ~ 10 ⁹	—
激光束	10 ⁻⁸		

1.2 焊接热效率

在电弧焊过程中, 电弧功率 q_0 , 即电弧在单位时间内放出的能量 (W) 为

$$q_0 = UI \quad (1-1)$$

式中 U ——电弧电压 (V);

I ——焊接电流 (A)。

由热源所产生的热量并不是全部被利用, 而是有一部分热量损失于周围介质中, 焊件吸收到的热量要少于热源所提供的热量。故真正有效用于加热焊件的功率为

$$q = \eta q_0 \quad (1-2)$$

式中 q ——电弧有效热功率;

η ——焊接电弧热功率有效利用系数, 简称为焊接热效率。

根据定义, 电弧加热焊件的热效率 η 是电弧在单位时间内输入到焊件内部的有效热功率 q 与电弧总功率 q_0 的比值, 即

$$\eta = \frac{q}{q_0} \quad (1-3)$$

设

$$q = q_1 + q_2 \quad (1-4)$$

则

$$\eta = \frac{q_1 + q_2}{q_0} \quad (1-5)$$

式中 q_1 ——单位时间内熔化焊缝金属 (处于液态时, 金属温度为 T_m , T_m 为熔点) 所需的热量 (包括熔化潜热);

q_2 ——单位时间内使焊缝金属处于过热 (金属温度大于 T_m) 的热量和向焊缝四周传导热量的总和。

式 (1-4) 说明, 进入焊件的有效热功率 q 也不是全部用来熔化焊缝金属的。因此, 定义使焊缝金属熔化的热有效利用率 η_m 为单位时间内被熔化的母材金属在 T_m 时 (处于液态)

的热量与电弧有效热功率的比值，即

$$\eta_m = \frac{q_1}{q_1 + q_2} \quad (1-6)$$

从焊接热过程的计算角度来看，焊接热效率 η 的准确选取是提高计算精度的先决条件。在一定的条件下 η 值是常数，主要取决于焊接方法、焊接参数、焊接材料和保护方式等。一般情况下 η 值的大小见表 1-2。

表 1-2 不同焊接方法的 η 值

焊接方法	焊条 电弧焊	埋弧焊	钨极氩弧焊 (TIG)	电子束 及激光焊	CO ₂ 气体保护	熔化极氩弧焊 (MIG)
η	0.65 ~ 0.85	0.80 ~ 0.90	0.60 ~ 0.70	> 0.9	0.75 ~ 0.85	0.70 ~ 0.80

1.3 焊件上的热量分布模式

按照热源作用方式的不同，可以将焊接热源作为集中热源、平面分布热源、体积分布热源来处理。当关心的焊件部位离焊缝中心线比较远时，可以近似地将焊接热源作为集中热源来处理。对于一般的电弧焊，焊接电弧的热流是分布在焊件上一定的作用面积内，可以将其作为平面分布热源。但对于高能束焊接，由于其产生较大的焊缝深宽比，说明焊接热源的热流沿焊件厚度方向施加影响，必须按某种恰当的体积分布热源来处理。

1.3.1 集中热源

所谓集中热源，就是把焊接电弧的热能看做是集中作用在某一点（点热源）、某条线（线热源）、某个面（面热源）上。显然，这是对实际情况加以简化的描述。焊接热过程的经典理论——雷卡林公式就是采用的集中热源。对于厚大焊件表面上的焊接，可以把热源看做是集中在电弧加热斑点中心的点热源；对于薄板对接焊，可以把电弧热看做是施加在焊件厚度上的线热源；对于某些杆件对接焊，可以认为是把电弧热加在杆件断面上的面热源。

1.3.2 平面分布热源

焊接电弧把热能传给焊件是通过焊件上一定的作用面积进行的。对于电弧焊来讲，这个面积称为加热斑点。根据加热斑点形状的不同，平面分布热源区分为高斯分布热源和双椭圆分布热源。

1. 高斯分布热源

如图 1-1 所示，设加热斑点的形状为圆，其半径为 r_H 。 r_H 的定义是：电弧传给焊件的热能中，有 95% 落在以 r_H 为半径的加热斑点内。在加热斑点上热流的分布，一般近似地用高斯函数来描述，即

$$q(r) = q_m \exp(-Kr^2) \quad (1-7)$$

式中 $q(r)$ ——距离热源中心 r 处的热流密度；

q_m ——热源中心处的最大热流密度；

K ——热能集中系数。

由于作用在焊件表面上的总热量等于焊接电弧的有效热功率 q ，所以有

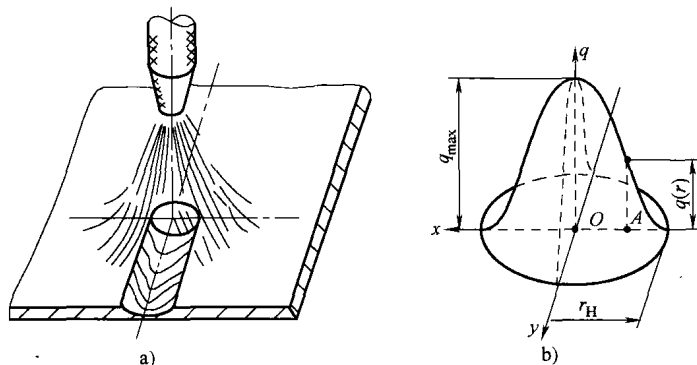


图 1-1 加热斑点上热流密度的分布

a) 热源在焊件上的分布 b) 热流密度的分布

$$q = \int_0^{\infty} q(r) 2\pi r dr = \frac{q_m \pi}{K} \quad (1-8)$$

故
$$q_m = \frac{qK}{\pi} \quad (1-9)$$

式中 $q = \eta UI$ ，是式 (1-2) 定义的电弧有效热功率。

将式 (1-9) 代入式 (1-7)，有

$$q(r) = \frac{qK}{\pi} \exp(-Kr^2) \quad (1-10)$$

K 值说明热流集中的程度。由试验可知，它主要取决于焊接方法、焊接参数。不同焊接方法的 K 值见表 1-3。

表 1-3 不同焊接方法的 K 值

焊接方法	K/cm^{-2}	焊接方法	K/cm^{-2}
焊条电弧焊	1.2 ~ 1.4	TIG 焊	3.0 ~ 7.0
埋弧焊	6.0	气焊	0.17 ~ 0.39

根据加热斑点的定义

$$95\% q = \int_0^{r_H} q(r) 2\pi r dr \quad (1-11)$$

将式 (1-10) 代入式 (1-11)，有

$$0.95q = \int_0^{r_H} \frac{qK}{\pi} \exp(-Kr^2) 2\pi r dr = q[1 - \exp(-Kr_H^2)]$$

整理，得

$$Kr_H^2 = 3$$

由此可见， r_H 和 K 两者之间具有如下的关系

$$K = \frac{3}{r_H^2} \quad (1-12)$$

将式 (1-12) 代入式 (1-10)，可以得到国外文献中一般用到的焊接热源高斯分布公式

$$q(r) = \frac{3q}{\pi r_H^2} \exp\left(-\frac{3r^2}{r_H^2}\right) \quad (1-13)$$

2. 双椭圆分布热源

高斯分布热源模式将电弧热流看做是围绕加热斑点中心的对称分布, 从而只需一个参数 (r_H 或 K) 来描述热流的具体分布。实际上, 由于电弧沿焊接方向运动, 电弧热流围绕加热斑点中心是不对称分布的。由于焊接速度的影响, 电弧前方的加热区域要比电弧后方小; 加热斑点不是圆形的, 而是椭圆形的, 并且电弧前、后的椭圆形状也不相同, 如图 1-2 所示。

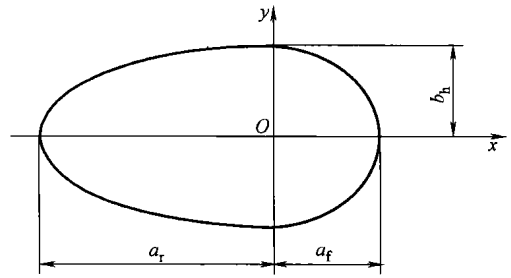


图 1-2 双椭圆分布热源示意图

电弧前部的热流分布可用下式表示

$$q_f(x, y) = q_{mf} \exp(-Ax^2 - By^2) \quad (1-14)$$

式中 q_{mf} ——电弧前部的最大热流值;

A 、 B ——椭圆分布参数。

电弧后部的热流分布可用下式表示

$$q_r(x, y) = q_{mr} \exp(-A_1x^2 - B_1y^2) \quad (1-15)$$

式中 q_{mr} ——电弧后部的最大热流值;

A_1 、 B_1 ——椭圆分布参数。

电弧前部区域的总热量为

$$q_f = 2 \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} q_{mf} \exp(-Ax^2 - By^2) dx dy = q_{mf} \frac{\pi}{2\sqrt{AB}}$$

于是, 有

$$q_{mf} = q_f \frac{2\sqrt{AB}}{\pi} \quad (1-16)$$

如图 1-2 所示, 前半椭圆的长轴是 a_f , 短轴是 b_h 。假定电弧传给焊件的热能中, 有 95% 落在以 a_f 、 b_h 、 a_r 、 b_h 为半轴的双椭圆内, 则有

$$q_f(0, b_h) = q_{mf} \exp(-Bb_h^2) = 0.05q_{mf} \quad (1-17)$$

$$B = \frac{3}{b_h^2}$$

同理 $q_f(a_f, 0) = q_{mf} \exp(-Aa_f^2) = 0.05q_{mf}$

$$A = \frac{3}{a_f^2} \quad (1-18)$$

将式 (1-16)、式 (1-17) 和式 (1-18) 代入式 (1-14) 中, 得到前部热流的分布公式为

$$q_f(x, y) = \frac{6q_f}{\pi a_f b_h} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_f^2} - \frac{3y^2}{b_h^2}\right) \quad (1-19)$$

同理可得, 后部热流的分布公式为

$$q_r(x, y) = \frac{6q_r}{\pi a_r b_h} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_r^2} - \frac{3y^2}{b_h^2}\right) \quad (1-20)$$

其中

$$q = \eta UI = q_f + q_r, q_f = \frac{a_f}{a_f + a_r} q, q_r = \frac{a_r}{a_f + a_r} q \quad (1-21)$$

如果 $a_f = a_r = b_h = r_H$, 则 $q_f = q_r = \frac{q}{2}$, 式 (1-19) 和式 (1-20) 将转化为式 (1-13), 即为高斯分布。

1.3.3 双椭球体积分布热源

对于熔化极气体保护电弧焊或高能束流焊, 焊接热源的热流密度不光作用在焊件表面上, 也沿焊件厚度方向作用。此时, 应该将焊接热源作为体积分布热源。为了考虑电弧热流沿焊件厚度方向的分布, 可以用双椭球体模型来描述。

由于电弧沿焊接方向运动, 电弧热流是不对称分布的。由于焊接速度的影响, 电弧前方的加热区域要比后方小; 加热区域不是关于电弧中心线对称的单个半椭球体, 而是双半椭球体, 并且电弧前、后的半椭球体形状也不相同, 如图 1-3 所示。作用于焊件上的体积热源分成前、后两部分。设双半椭球体的半轴为 a_f 、 a_r 、 b_h 、 c_h , 可以写出前、后半椭球体内的热流分布, 即

$$\begin{cases} q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}(f_f q)}{a_f b_h c_h \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_f^2} - \frac{3y^2}{b_h^2} - \frac{3z^2}{c_h^2}\right) & x \geq 0 \\ q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}(f_r q)}{a_r b_h c_h \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_r^2} - \frac{3y^2}{b_h^2} - \frac{3z^2}{c_h^2}\right) & x < 0 \end{cases} \quad (1-22)$$

其中, $f_f + f_r = 2$, $q = \eta UI$ 。

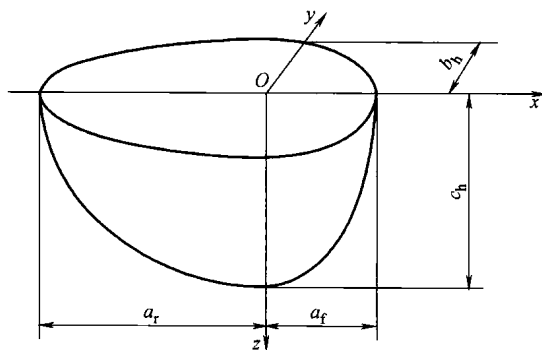


图 1-3 双椭球体分布热源示意图

1.3.4 其他体积热源模型

除了上面介绍的双椭球体分布热源之外, 还有一些用于高能束焊接的其他体积热源模型, 如锥体、曲面衰减型体积热源等。

1.4 焊接温度场

1.4.1 焊接传热的基本定律

1. 热传导定律

描述热传导现象的基本定律是傅里叶定律, 其基本形式为

$$q_c = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (1-23)$$

式中 λ ——热导率 [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$];

$\partial T/\partial n$ ——温度梯度(单位长度上的温度变化, K/m)。

式(1-23)表明,在热传导现象中,通过物体某一点的热流密度 q_c (W/m^2)与垂直于该点处等温面的温度梯度成正比。

2. 对流换热定律

对流是指流体各个部分之间发生相对位移,冷、热流体相互掺混所引起的热量传递方式。对流仅能发生在流体中,而且必然伴有热传导现象。工程中经常遇到的不是单纯的对流方式,而是流体流过另一物体表面时,对流与热传导联合起作用的热量传递过程,这称之为对流换热。焊接过程中,空气流过焊件表面,冷却水流过焊炬内部,都是对流换热的例子。对流换热的基本计算式是牛顿冷却公式

$$q_k = \alpha_k \Delta T \quad (1-24)$$

式中 ΔT ——流体温度与壁面温度的差值 (K);

α_k ——表面传热系数 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]。

表面传热系数的大小与换热过程中的许多因素有关,它不仅取决于流体的物理性能以及换热表面的形状与布置,而且还与流速有密切的关系。

3. 辐射换热定律

物体因热的原因而发生辐射能量的现象称为热辐射。自然界中各个物体都不停地向空间发出热辐射,同时又不断地吸收其他物体发出的热辐射。辐射和吸收的综合结果就造成了以辐射方式进行的物体间的热量传递——辐射换热。当物体与周围环境处于热平衡时,辐射换热等于零,这是一种动态平衡过程。

根据斯蒂芬-玻耳兹曼定律,受热物体辐射的热流密度 q_r 与其表面温度 T 的四次方成比例,即

$$q_r = \varepsilon C_0 T^4 \quad (1-25)$$

式中 ε ——物体的黑度系数。

T 的量纲是热力学温度 K ,绝对黑体的辐射系数 $C_0 = 5.67 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$,适用于“绝对黑体”(即能够吸收全部落在它上面的辐射能的物体, $\varepsilon = 1$);对于“灰体”而言, $0 < \varepsilon < 1$;对抛光后的金属表面, $\varepsilon = 0.2 \sim 0.4$;对粗糙、被氧化的钢材表面, $\varepsilon = 0.6 \sim 0.9$ 。 ε 会随温度而增加,在熔化温度范围内, $\varepsilon = 0.90 \sim 0.95$ 。

焊接时相对比较小的焊件(温度 T),在相对较宽阔的环境中(温度 T_f)冷却,通过热辐射发生的热损失可按以下方式计算

$$q_r = \varepsilon C_0 (T^4 - T_f^4) \quad (1-26)$$

为了计算中能用统一的形式,把辐射换热的热流 q_r 和焊件表面上的温度落差 ($T - T_f$) 联系起来,有

$$q_r = \alpha_r (T - T_f) \quad (1-27)$$

式中 α_r ——辐射换热系数,可见

$$\alpha_r = \varepsilon C_0 \frac{T^4 - T_f^4}{T - T_f} \quad (1-28)$$

4. 全部换热

固体表面和外界的热量交换往往同时存在对流换热和辐射换热两种形式。为了应用方便,常常引用一个总的表面传热系数 α 来考虑这两种换热方式的综合影响

$$q_T = q_k + q_r = (\alpha_k + \alpha_r)(T - T_f) = \alpha(T - T_f)$$

即
$$q_T = \alpha \Delta T \quad (1-29)$$

式中 α ——总的表面传热系数 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$], 它等于对流和辐射换热系数之和。

传热系数 α 随表面温度的升高而增加。当表面温度不超过 $200 \sim 300^\circ\text{C}$ 时,大部分热量是经对流出放的;在较高温度时,则主要由辐射换热放出,比如说 800°C 时辐射的热量约占总放出热量的 80%。

1.4.2 焊接热传导问题的数学描述

1. 热传导微分方程式

在三维情况下,分析从物体中分割出来的微元平行六面体,并应用傅里叶公式和能量守恒定律,就可以建立起热传导微分方程式的普遍形式

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1-30)$$

式中 ρ ——密度 (kg/m^3);

c_p ——比定压热容 [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$];

T ——温度 (K);

t ——时间 (s);

λ ——热导率 [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$];

x, y, z ——坐标 (m)。

一般情况下,体积比热容 ρc_p [$\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$] 和热导率 λ 都是 x, y, z, T 的函数。对均匀、各向同性的材料,且其材料热物理性能参数值与温度无关,或在讨论的温度范围内取一平均值时,式 (1-30) 可简化为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = a \nabla^2 T \quad (1-31)$$

式中 a ——热扩散率。 $a = \lambda/\rho c_p$, 它表示物体在加热或冷却时,各部分温度趋于一致的能力,其单位是 (m^2/s)。

对二维板材和一维棒材,热传导微分方程式可进一步简化。在稳态温度场中,所有各点的温度在不同时刻均为常数,即 $\partial T/\partial t = 0$, 式 (1-31) 就可简化为与材料无关的拉普拉斯微分方程

$$\nabla^2 T = 0 \quad (1-32)$$

2. 运动热源情况下的热传导微分方程式

由于焊接热源是移动的,我们所处理的问题就是一个热流密度为 $q(r)$ 的热源以恒定速度 v 沿 x 轴移动,要求计算出热源周围的温度分布,即焊接温度场。如图 1-4 所示,设固定坐标系为 ($O'\xi yz$) 和动坐标系为 ($Oxyz$), 则 ξ 就是式 (1-31) 中的 x 。根据两坐标系间的关系,用 ξ 代替式 (1-31) 中的 x , 并将 $x = \xi - vt$ 代入式 (1-31), 那么热传导微分方程式就完成了从固定坐标系到以热源中心为坐标原点的移动坐标系的转换,其中 x 是所考察的点到

热源中心（即动坐标系原点）的距离，即

$$\frac{\partial T}{\partial t} - v \frac{\partial T}{\partial x} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1-33)$$

式中 v ——热源的运动速度（m/s）。

3. 初始条件和边界条件

在焊接工作中，经常遇到的问题就是在确定状态和有限维数结构下，计算焊接热源产生的焊接温度场的问题，即求解给定了初始条件和边界条件的热传导微分方程式。初始条件指的是初始时刻物体上的温度分布，例如预热温度场或多道焊时前一焊道产生的温度场。边界条件指的是物体边界上的热损失条件。对于稳态热传导，没有初始条件，仅有边界条件。

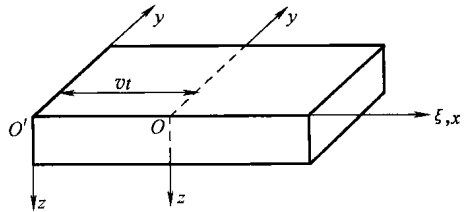


图 1-4 动坐标系

热传导问题的常见边界条件可归纳为以下三类：

1) 规定了边界上的温度值，称为第一类边界条件，即

$$T_s = T_s(x, y, z, t) \quad (1-34)$$

特殊情况是：等温边界条件，即物体边界上的温度是常数，且不随时间而变化。

2) 规定了边界上的热流密度值，称为第二类边界条件，即

$$q_s = q_s(x, y, z, t) \quad (1-35)$$

特殊情况是：绝热边界条件， $q_s = \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_s = 0$ 。

3) 规定了边界上的物体与周围介质间的换热系数及周围介质的温度 T_f ，称为第三类边界条件，即

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_s = \alpha(T_s - T_f) \quad (1-36)$$

当 $\alpha/\lambda \rightarrow \infty$ 时， $T_s = T_f$ ，即为等温边界条件，此时传热系数很大而热导率很小，使表面温度接近于周围介质的温度。当 $\alpha/\lambda \rightarrow 0$ 时， $\left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_s \rightarrow 0$ ，即为绝热边界条件，此时传热系数十分小，而热导率非常大，通过边界表面的热流趋近于零。

4. 材料热物理性能参数

根据热传导基本公式计算温度场时，需要材料的下列热物理性能的数值：

- 热导率 λ [W/(m·K)]；
- 比定压热容 c_p [J/(kg·K)]；
- 密度 ρ (kg/m³)；
- 热扩散率 a (m²/s)；
- 表面传热系数 α [W/(m²·K)]。

实际上，这些参数均随温度而变化，应将材料热物理性能参数随温度变化的瞬时值和在一定温度范围内的平均值区分开来。前者更适合于有限元分析，后者可供线性化的解析求解。

一些常用金属材料在焊接温度变化范围内的热物理性能参数的平均值可参见表 1-4。