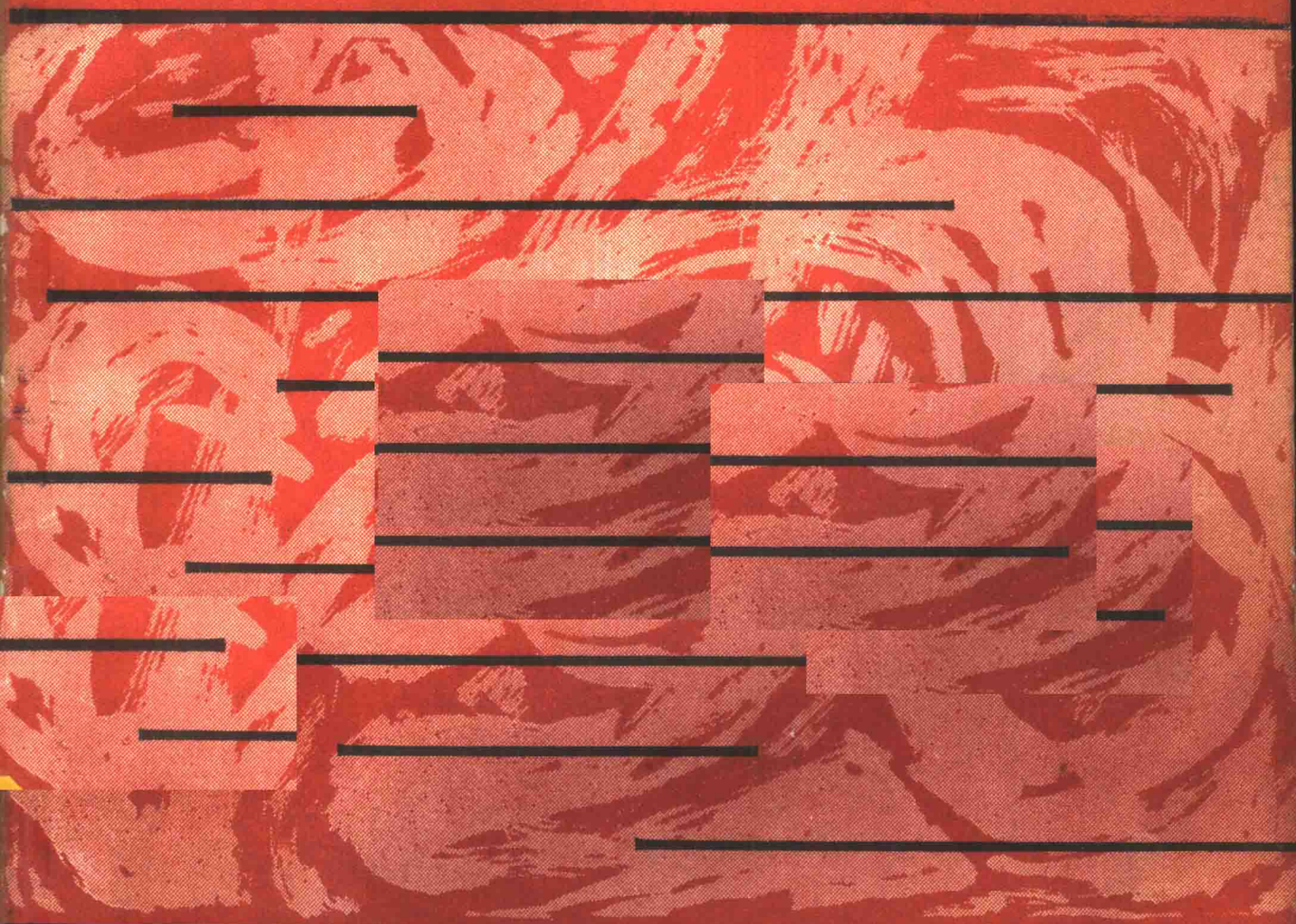


焊接热过程数值分析

武传松 编著

哈尔滨工业大学出版社



焊接热过程数值分析

武传松 编著

哈尔滨工业大学出版社

内 容 提 要

本书全面、系统地介绍了焊接热过程数值分析的概念、方法和发展方向。全书共分七章。第一章介绍了焊接热过程的特点、研究现状及存在的问题；第二章分析了霍卡林解析法的局限性；第三、四、五章论述了有限差分法和有限单元法在焊接热过程数值分析方面的应用；第六章介绍了TIG焊接熔池中的流体动力学状态及传热过程的数值分析方法和结果；第七章综述了焊接热效率和热源分布参数的研究成果及选用原则。

本书适合作为高等院校有关专业的研究生与高年级本科生的教学参考书，亦可供科技工作者与工程技术人员阅读参考。

焊 接 热 过 程 数 值 分 析

武传松 编著

*

哈尔滨工业大学出版社出版

新华书店首都发行所发行

哈尔滨市和兴印刷厂印刷

*

开本787×1092 1/16 印张11.5 字数265000

1990年12月第1版 1990年12月第1次印刷

印数1—1500

ISBN 7-5603-0311-0/TG·21 定价7.50元

前 言

熔焊所涉及的加热、熔化和随后的连续冷却是决定焊接质量和焊接生产率的主要因素之一。准确地计算焊接热过程，对于焊接冶金分析、应力应变分析、过程控制及工艺方案制订等都具有十分重要的意义。近几年来，哈尔滨工业大学焊接教研室相继为研究生和本科生开设了“焊接传热学”、“焊接热过程数值分析”、“熔池流体动力学和传热学”等几门课程，为了提高教学质量，满足教学需要，我们综合分析了国内外学者所建立的焊接热过程模型及计算方法，总结了自己在这方面的科研成果，并参考和引用了文献中的有关内容，编写成本书。此书可作为高等院校有关专业的研究生和高年级本科生的教学参考书，亦可供科技人员阅读参考。

本书共分七章。第一章介绍了焊接热过程的特点，综述了国内外研究现状及发展趋势，提出了该领域研究工作中存在的一些亟待解决的问题。第二章简要介绍了焊接热过程计算的经典理论——雷卡林解析法，分析了这一方法赖以存在的不合理假设条件及其局限性。第三、四、五章论述了有限差分法和有限单元法在焊接热传导数值分析方面的应用。第六章提出了一种研究焊接热过程计算的新思路，即同时考虑焊接熔池中的流体对流传热和熔池外部的固体导热，详细介绍了传热与流体流动计算机数值模拟的重要工具——帕坦卡-斯波尔丁方法，给出了TIG焊接熔池中的流体动力学状态及传热过程的数值分析结果。第七章综述了国内外焊接工作者在焊接热效率和焊接热源分布参数方面的研究结果及选用原则。

本书由哈尔滨工业大学焊接教研室武传松副教授编著，由哈尔滨工业大学张修智教授审稿。

由于编著者水平有限，书中难免存在一些缺点和错误，敬请读者批评指正。

作 者

1990年3月

目 录

第一章	引论	1
§1.1	焊接热过程的特点.....	1
§1.2	焊接热过程计算方法的发展历史及研究现状.....	1
§1.3	影响焊接热过程计算方法进一步完善的几个因素.....	6
第二章	焊接热过程计算的经典理论	8
§2.1	传热的基本概念和定律.....	8
§2.2	无限体内的热传播过程.....	16
§2.3	有限体内的热传播过程.....	21
§2.4	电弧焊热过程计算的解析法——雷卡林公式.....	24
§2.5	雷卡林公式的局限性.....	34
第三章	焊接热传导的有限差分计算	35
§3.1	均匀网格中函数的导数.....	35
§3.2	非均匀网格中函数的导数.....	37
§3.3	稳定态热传导问题的有限差分方程.....	38
§3.4	非稳定态热传导问题的有限差分方程.....	42
§3.5	边界、界面、复合传热工件和非均匀物性的工件.....	44
§3.6	热传导差分解法的精确性、稳定性和收敛性.....	49
§3.7	非直角坐标系的热传导有限差分方程.....	51
§3.8	三角形网格.....	53
§3.9	有限差分方程的计算机解法.....	54
第四章	焊接热传导的有限单元法计算	58
§4.1	变分原理.....	58
§4.2	各种温度场的变分问题.....	64
§4.3	变分原理在求解热传导微分方程中的应用.....	69
§4.4	有限单元法的单元分析.....	71
§4.5	有限单元法的总体合成.....	83
§4.6	非线性热传导的有限元分析.....	89

第五章	三维焊接温度场的有限元分析	96
§5.1	三维热传导的变分问题.....	96
§5.2	三维温度场的等参数单元分析.....	97
第六章	焊接熔池中的流体动力学状态及传热过程的数值模拟	108
§6.1	对流换热概述.....	108
§6.2	对流换热微分方程组.....	109
§6.3	电弧固定时TIG焊接熔池中的流体流动及传热过程.....	111
§6.4	三维TIG焊接熔池中的流体动力学状态及传热过程的数值分析模型.....	121
§6.5	离散化方程的建立.....	125
§6.6	流场的计算.....	140
§6.7	计算方法.....	150
§6.8	三维TIG熔池中的流场与温度场的计算结果.....	152
§6.9	实验验证结果.....	155
第七章	焊接热效率与热源分布模型	158
§7.1	焊接热效率的确定.....	158
§7.2	焊接热源分布参数的选取.....	168
参考文献		174

第一章 引 论

§ 1.1 焊接热过程的特点

熔化焊接时，被焊金属在热源的作用下将发生加热和局部熔化的过程。因此，在被焊金属中必然存在着热量的传播和分布问题，通常称之为焊接热过程。

焊接热过程贯穿整个焊接过程的始终，可以说，一切焊接物理化学过程都是在热过程中发生和发展的。例如，焊接温度场决定了焊接应力场和应变场，它还与冶金、结晶、相变过程有着不可分割的联系，使之成为影响焊接质量和生产率的主要因素之一。焊接热过程的准确计算和测量是进行焊接冶金分析、焊接应力应变分析和对焊接过程进行控制的前提。然而，焊接过程的传热问题十分复杂，它的特点主要表现在以下四个方面：

1. 焊接热过程是局部的，也就是说，工件在焊接时的加热不是整体，只是热源直接作用下的附近地区，加热极不均匀，这一点要比热处理条件下工件整体均匀受热复杂得多。

2. 焊接热过程具有瞬时性，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），也就是说，在很短的时间内把大量的热由热源传递给焊件。

3. 焊接传热过程中，热源相对于工件是运动的。由于焊接时工件受热的区域不断变化，就使得这种传热过程是不稳定的。

4. 焊接熔池中的液体金属不是静止不动的，而是强烈运动着的，并进行着一系列的物理化学反应。就是说，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。此外，在工件表面上，还有空气的对流换热以及辐射换热。因此，焊接热过程涉及到各种热传递方式，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，给研究工作带来许多困难。然而，由于它对焊接质量具有重要的影响，所以人们从来没有停止过对焊接热过程本质的研究和探讨。

§ 1.2 焊接热过程计算方法的发展历史及研究现状

对于焊接热过程的研究早在30年代就已开始。D·罗森塞尔⁽¹⁾分析了移动热源在固体中的热传导。之后，苏联的雷卡林⁽²⁾又进行了大量工作，用解析法推导出了一整套计算公式。但是，这些研究是在如下一些假设条件的基础上进行的：

- (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) 焊接构件的几何尺寸是无限的 (对应于点热源和线热源, 焊接试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, 确定熔化区域的尺寸及形状是十分有意义的; 从冶金上, 相变点以上的加热范围是研究的重点。

由于焊接热过程的经典理论公式给不出令人满意的结果, 所以从50年代开始, 有许多研究者试图在雷卡林公式的基础上, 针对其不合理的假设条件, 对其从某一方面进行修正和改进。但由于不能从根本上避免这些解析式赖以存在的不合理假设条件, 因而进展不大⁽³⁾⁻⁽²³⁾。

高速电子计算机的广泛应用使得焊接热过程的数值分析得到发展。数值分析为我们准确计算焊接热过程提供了有力的工具。由于它可以处理各种复杂的边界条件、热源的分布以及非线性问题, 能够从根本上避免雷卡林公式所固有的缺陷, 所以, 在焊接热过程的分析中得到了越来越广泛的应用。

1975年, 加拿大的 Z·佩雷⁽²⁴⁾编制了可以分析非矩形截面以及常用的单层、双层 U、V型坡口的焊接温度场计算程序, 所用的方法是有限差分法。考虑了材料热物理性能参数与温度的关系。在热源处理时采用半经验方法, 将熔化线内的单元都作为被加热单元, 这使得热源是在一个有限体积内, 因而与实际情况较为符合。根据计算数据绘制了焊缝各个断面的等温线图、某些点的热循环曲线以及三维温度场图。但是, 为使计算模型简化, 假设工件为无限长, 忽略了向周围的热损失。

美国的 G·W·格鲁斯⁽²⁵⁾在 1976 年的博士论文中建立了用有限元法计算二维焊接温度场的分析模型。该模型将导热系数和比热作为温度的函数, 考虑到了相变潜热问题, 采用的边界条件中涉及到了通过辐射和对流向周围的放热。其缺陷是: (1) 为了产生二维问题, 假设电弧运动速度比材料热扩散率高, 因而传到电弧前面的热量与总的热输入量相比是比较小的, 从而忽略了在电弧运动方向上的传热 (雷卡林的高速热源公式也是这样处理的)。(2) 相变潜热问题的处理不够精确。(3) 没有说明焊接热源的处理方法。

S·丘⁽²⁶⁾建立了模拟厚板钨极氩弧焊或等离子弧堆焊的准稳态三维热场有限差分计算模型。解决了热源分布、材料热物理性能的非线性和工件表面热损失等问题。他又在 1982 年应用无因次参数对薄铝板的二维准稳态温度场问题用有限差分法进行了计算⁽²⁷⁾。所建立的计算模型考虑了如下问题: (1) 被焊试件材料热物理性能随温度变化。(2) 热源的大小和分布。(3) 材料熔化潜热。通过工艺试验测出了熔化区宽度, 与计算结果作了比较, 认为两者吻合程度良好。存在的问题是: (1) 虽然模型本身考虑了材料热物理性能与温度的关系, 但是在计算时又认为铝合金的热物性参数随温度变化不大, 取为常数代入计算。(2) 未考虑工件表面的热损失。(3) 在固液两相区域同时求解固态热传导方程, 认为固液两相的比热值差别不大而取同一值。

此外, 苏联的 B·拉尼沃夫⁽²⁸⁾用差分法计算了薄板的焊接热场。文献^{[29][30]}

对电渣焊热场进行了计算机数值模拟。在日本，一般用解析法或差分法分析焊接热场⁽³¹⁾。

在国内，西安交通大学唐慕尧用有限元法计算了薄板二维稳态温度场，计算中未计及材料热物性的非线性及工件表面热损失⁽³²⁾。上海交通大学陈楚⁽³³⁾⁽³⁴⁾对二维非线性稳态及瞬态温度场进行了有限元分析。

上述的焊接热过程研究工作（包括经典理论雷卡林解析公式和70年代发展起来的焊接热过程有限元法或差分法数值分析模型）都没有考虑焊接熔池内部液态金属的对流传热特点，而把只能用于固体的导热微分方程式一起应用于液态熔池和熔池外部的固体区域，忽视了高温过热液态金属熔池对传热过程的重要影响，这必然导致热影响区焊接温度场的计算有较大的误差。

为了克服上述固体热传导数值分析模型的局限性，V·派勒卡⁽³⁶⁾把焊接热过程的求解分为两个问题：一是确定出熔池的形状；二是以熔池形状作为一个边界条件（熔池边界处于材料熔点），在固体中求解热传导方程。他在低碳钢试板上进行钨极氩弧焊接，形成GTA焊接熔池，使用高压氩气流将液态金属从熔池中吹掉，测出焊接规范参数值、熔池的最大长度和宽度。对实验数据进行处理，得到了以焊接热输入参数表示的熔池长度和宽度 ξ_m 、 B_m 的表达式，并利用 ξ_m 和 B_m 两个参数建立了二维TIG焊接熔合线方程。以熔合线为边界条件用差分法计算出了3mm厚低碳钢焊件的二维焊接热场。麻省理工学院的K·玛苏布切教授⁽³⁷⁾在1978年发表的论文中也提出了同样的想法。他认为焊接过程中熔化了了的液态金属与固态金属之间的界面（即熔合面）总是处于材料熔点，因此在传热分析中可将其作为一个内边界条件，因而熔池外部的传热计算就转化为纯粹的固体导热问题。这种做法的关键是确定熔合面方程，即熔池形状。K·玛苏布切通过实验测出了三个焊缝形状参数：熔宽、熔深和焊缝波纹长度，将此三个参数和D·罗森塞尔点热源公式相结合，给出了三维熔池形状方程式，并据此建立了三维有限差分焊接热场计算模型。但是，关于三维熔池形状方程的构成，作者直接利用了D·罗森塞尔公式，这样得到的熔池形状与实际有差别。因此，将这样一个与实际情况有差别的熔池形状作为内边界条件而求出的温度分布就更会偏离真实值。

V·派勒卡和K·玛苏布切提出的这种利用熔池边界作为内边界条件，通过在热影响区中求解固体导热方程来计算焊接热场的方法，其成功与否取决于熔合面方程本身的精度。影响焊接熔池形状的因素是复杂的。国外许多学者对此进行了研究。C·R·黑玻尔⁽³⁸⁾⁽³⁹⁾指出：在熔池内部，由于温度梯度很大，所以在熔池表面上存在着表面张力梯度（表面张力的大小与温度有关）。在许多情况下，表面张力梯度作为驱动流体流动的因素之一，影响到熔池内部液体金属的流动形式。微量元素通过影响表面张力梯度而影响熔池内部液体金属的流动形式，进而影响到熔化区形状。对于表面活性元素（如S，O等），当其在熔池中的集中程度足够高时，就会产生一个正的表面张力温度系数（随着温度的升高，表面张力系数增加），因而表面张力梯度和罗伦兹力（电磁力）方向相同，驱使流体在熔池表面上向内流动，并在熔池中部向底部流动，从而有足够的热量传到熔池底部，熔深增加。当缺少表面活性元素（或当与其他元素相结合形成隋性化合物，如氧与铝形成氧化铝）时，表面张力梯度的方向与罗伦兹力的作用方向相反，流体流动强度就会有所减弱，传到熔池底部的热量会有所减少。如果此时表面

张力梯度的作用大于罗伦兹力，那么流体在熔池表面上会从中心向外流动，并且在熔池周界上向下运动，这样就使得热量传到焊缝两侧部，形成宽而浅的熔池。W·H·吉德特⁽⁴⁰⁾测量固定电弧焊熔池中心冷却过程中的表面温度变化（加热过程进行到3.5s熄弧开始测量）如表1-1。可见，由于两种材料化学成分不同，含硫量不同，硫作为活性元

表1-1

材料	含硫量(%)	熔池表面中心的最高温度(°C)	熔深(mm)
303S 不锈钢	0.32	1750	4.66
304 不锈钢	0.015	2000	2.33

素影响到表面张力梯度的方向，致使熔池内部流体流动情况不同，而使熔池几何尺寸参数相差较多。G·S·米勒⁽⁴¹⁾研究了电弧和熔池的相互作用以及这种作用对GTA焊缝熔深的影响。他认为电弧和母材性能影响熔池内金属的流动形式，因而影响到熔深。E·夫瑞德曼⁽⁴²⁾指出，焊接熔池变形会显著地影响到焊缝熔深，熔池表面上的表面张力严重影响到熔池表面的下陷和熔深。

因此，熔池中的流体流动对传热过程影响甚大。正是熔池中的流体动力学状态和传热过程直接影响到熔池的形状，进而影响到焊接温度场。确定熔池形状时必须考虑熔池中的流体传热特点，求解焊接温度场时也必须考虑熔池中的流体传热特点。V·派勒卡和K·玛苏布切提出的把确定熔池形状和热过程求解分开的做法，仍然带有较大的局限性。

综上所述，为了准确地计算焊接热过程，就必须考虑熔池中的流体流动状态对焊接热过程的影响。就是说，必须同时考虑熔池中液态金属以对流为主（也有液态导热）的传热过程和热影响区及母材固体中以导热为主的传热过程，才符合焊接传热的实际情况，才能从根本上克服以往模型的局限性，提高计算精度。

J·G·安德鲁斯⁽⁴³⁾在半球形容器的中心轴上，距容器表面以上有一定距离处，放一个电流源，同时在容器下面设置一个点电流源，这样就在容器表面上得到一个分布的电流密度，电流密度在中心轴上强度最大，随着径向距离的增加，强度减小。他用这样一个简单模型模拟GTA熔池表面上的电流密度。针对这样一个简单模型，描述半球形容器内部流体动力学状态的动量方程就成为线性化方程，用解析法就可求解。这样一个简单模型所适用的电流最大值为1EA。索斯欧⁽⁴⁴⁾假设电极端部与容器表面相接触，在电极端部的圆形截面上电流密度均匀分布。这样的电流作用在一个半扁球体容器表面之上。对于这样一个简单模型，描述该容器内流体流动状态的动量方程可简化为四阶常微分方程。D·R·阿特海⁽⁴⁵⁾指出，索斯欧模型将电极端部与容器表面（从而与容器内的流体）相接触，这与实际情况不符。TIG焊接过程中，电弧总是有一定的长度。他

考察了一个具有固定尺寸的半球形熔池内部的流体流动状态，这是一个高度理想化的稳态系统，只有电磁力驱动流体流动。该模型使电极端部与熔池表面保持一定距离，在半球形熔池表面上作用有一个分布的电流密度，并利用了数值分析方法，所以比安德鲁斯和索斯欧的模型有了改进。将电流值提高到100A时，该模型仍能给出数值分析结果。结果表明，对于这样一个模型，半球形熔池中流体流动的Peclet数（表示对流与导热的强度之比）在10~70的范围之内，说明了在熔池中流体对流是主要的传热过程。横谷直一⁽⁴⁶⁾指出了在焊接熔池中对流传热对熔池形状的重要性。他应用一个简单的模型，即假设液体处于一个壁温不变的半球形熔池中，定量地分析了在表面张力作用下流体的流动。斯拉夫⁽⁴⁷⁾论述了薄板材料非熔化极脉冲电弧焊时熔池内部热过程和流体力学之间的相互关系。

上述五位研究者所建立的模型都非常简单，所考察对象都是在一个形状固定的容器内部，装有流体，流体表面上作用有电磁力或表面张力。这样一些模型与焊接的实际情况有较大的距离。

麻省理工学院的G.M.欧瑞玻⁽⁴⁸⁾⁽⁴⁹⁾⁽⁵⁰⁾研究了电弧固定时TIG焊接熔池中的流体对流状态。之所以选择电弧固定时的情况为研究对象，只是为了使问题简化。在〔48〕中G.M.欧瑞玻考察电弧固定时的情况，但却将熔池形状作为数值分析的前提条件，预先确定下来。他利用实验数据整理出TIG点焊时的熔宽 W 和熔深 D ，并认为熔池形状方程式为：

$$z = D \left(1 - \frac{r}{\sqrt{W}} \right)$$

式中， r 是径向坐标， z 是轴向坐标。对于给定的一组焊接规范参数，G.M.欧瑞玻以为熔池形状就是确定的，而不考虑TIG电弧固定时焊接温度场的瞬态特点。他在该模型中只涉及到熔池内部的流场和热场求解过程。由于电弧是固定的，考虑到轴对称的特点，熔池内的传热问题就是二维的。在〔49〕中，G.M.欧瑞玻将TIG电弧固定时的情况作为瞬态问题，随着电弧加热时间的延长，熔池体积逐步扩大，并同时求解熔池内外的温度分布，考虑了电磁力、表面张力梯度和自然对流的影响，并考察了电弧作用在熔池表面上的热流密度和电流密度大小对流体流动和传热过程的影响。G.M.欧瑞玻在〔50〕中分析了TIG电弧固定时加热和冷却两个过程中熔池内部的流体流动状态和传热过程。分析结果表明，流体对流在确定熔池中的传热过程和温度分布时起着重要的作用，对熔池形状和随后的焊缝结晶过程也有着明显的影响。P.S.魏⁽⁵¹⁾在美国加州大学所做的博士论文中建立了一个二维模型，用以描述电子束焊过程中围绕着EB Cavity（电子束焊时在被焊材料上形成，由蒸汽压力作用所致）的液体薄层内液态金属的流动状态。利用该模型可以得出液体薄层内的流体速度和温度值。他认为电子束焊时，焊缝的深、宽比在5-10之间，因此工件厚度方向上的传热可以忽略，从而简化为二维情况。该模型将表面张力梯度作为主要的驱动力。M.戴维斯⁽⁵²⁾给出了描述激光焊过程中小孔外部液体区内流体对流传热的二维模型。该模型将材料热物理性能参数取为常数，并且不考虑试件厚度方向的流体运动情况以及传热过程。S.丘⁽⁵³⁾⁽⁵⁴⁾建立了描述运动熔池中流体对流的数

学模型。该模型存在下列几点局限性：（1）材料热物理性能参数取为常数。（2）只能描述熔池内部的热场分布。（3）只能模拟 TIG 焊接热过程。

从上面的文献综述中可以了解到，同时考虑熔池中液态金属以对流为主的传热过程和熔池外部固体金属以导热为主的传热过程，已成为焊接热过程数值计算方法的发展趋势。本书作者在这一领域内开展了如下两方面的研究工作^{[55]—[60]}：

1. 为了找出影响焊接熔池流体动力学状态及传热过程的主要因素，为建立运动电弧作用下的三维模型作准备，首先建立了一个描述电弧固定时 TIG 焊接熔池内部流体流动状态及传热过程的数学模型。该二维模型采用“流函数/涡度法”，能够给出任一时刻固定 TIG 熔池内外的温度分布和熔池中的流线图。

2. 建立了运动电弧作用下三维 TIG 焊接熔池中的流体流动及传热过程的数值分析模型。该三维模型的特点如下：①同时考虑熔池内部液态金属的对流——传导和熔池外部热影响区、母材中的固体导热。把熔池中的流体动力学状态和传热过程的研究紧密结合起来，克服了经典热过程理论和 70 年代发展起来的焊接热过程数值模型将焊接热过程作为纯粹的固体热传导问题的局限性，更为符合焊接热过程的实际情况。②综合考虑了使熔池中液态金属发生运动的主要原因，即：由于熔池温度分布不均匀而产生的自然对流；由于焊接电流通过斑点进入熔池后在熔池中造成电流场的发散从而产生的电磁力；由于熔池表面温度分布不均匀所引起的表面张力梯度。③焊接电弧作为热源向工件输入的热流，按高斯函数分布热源处理。④材料的热物理性能系数随温度而变化，在每一个计算步上都根据当时的温度分布重新确定其取值。⑤考虑工件表面通过对流与辐射向周围的热损失。

§ 1.3 影响焊接热过程计算方法进一步完善的几个因素

数值分析为我们准确计算焊接热过程提供了有力的工具，但是，目前仍存在一些问题，这影响到焊接热过程数值分析方法的进一步发展和完善。这些问题是：

1. 电弧功率有效利用系数的选取

电弧功率有效利用系数 η 的正确选取是提高焊接热过程计算精度的问题之一。不同的文献资料给出的 η 值差别很大，例如，对于钨极氩弧焊接低碳钢试件，有的研究者认为 $\eta = 0.3$ ，而有的研究者得出的结果是 $\eta = 0.90$ 。

2. 热源分布参数的确定

电弧的热量分布形式和有效加热半径与焊接方法及规范参数有关，目前还缺乏系统而准确的资料。

3. 熔池中的流体动力学状态

熔池中液态金属的运动形式是层流还是紊流，以及焊接方法、工艺规范、电极直径及其相对于水平面的夹角、焊接材料的成分及被焊件的化学成分等对熔池中流体运动方向和速度的影响规律，目前还未完全弄清楚。

4. 材料的热物理性能

许多材料的热物性（比热、导热系数、密度、粘度等）数据在高温特别是接近熔化态时还是空白，某些材料仅有室温时的数据。

由于存在以上这些问题，从解决实际问题的效果来看，焊接热过程理论还不能令人满意。但是，我们绝不能因此而忽视焊接传热理论的重要意义，应当通过更多的实践和理论上的探讨来认识它的本质，并建立和运用更为有效的方法不断地丰富和完善焊接热过程理论。

在本书中，我们首先简要介绍焊接热过程计算的经典理论——雷卡林解析法，分析这一方法赖以存在的不合理假设条件及其局限性。接着介绍有限差分法和有限单元法在焊接热过程数值分析，即纯导热数值解方面的应用。然后，提出一种研究焊接热过程计算的新思路，即同时考虑焊接熔池中的流体对流传热和熔池外部的固体导热，介绍传热与流体流动计算机数值模拟的重要工具——帕坦卡-斯波尔丁方法，并给出TIG熔池中的流体动力学状态及传热过程的数值分析结果，还将这些结果与雷卡林公式、纯导热数值解、实验测试给出的数据进行比较，这部分内容是本书的重点。最后，介绍国内外焊接工作者在焊接热效率与焊接热源分布模型方面的研究成果。

第二章 焊接热过程计算的经典理论

早在40年代,美国的罗森塞尔和苏联的雷卡林就用解析法推导出了一整套焊接热过程计算公式。但是,这些公式是在一系列假设条件的基础上得到的,所以这些经典理论公式的计算误差很大,不能给出令人满意的结果。本章简要介绍雷卡林公式的推导过程、假设条件及其局限性,以便读者掌握焊接传热理论的基础知识,为学习以后几章的内容做好准备。

§ 2.1 传热的基本概念和定律

传热理论是研究热量传递规律的。凡是有温度差的地方,就有热量自发地从高温物体传向低温物体。就物体温度与时间的依赖关系而言,热量传递过程可区分为稳态过程与非稳态过程两大类。凡是物体中各点温度不随时间而改变的热传递过程,均称为稳态热传递过程,反之则称为非稳态热传递过程。

一、热量传递的三种基本方式

热量传递有三种基本方式:导热、对流和热辐射。

1. 导热

物体各部分之间不发生相对位移时,依靠分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动而产生的热量传递过程称为导热(或称热传导)。例如,物体内部热量从温度较高的部分传递到温度较低的部分,以及温度较高的物体把热量传递给与之接触的温度较低的物体都是导热现象。

从微观角度来看,气体、液体、导电固体和非导电固体的导热机理是有所不同的。气体中,导热是气体分子不规则热运动时相互碰撞的结果。众所周知,气体的温度越高,其分子的运动动能越大。不同能量水平的分子相互碰撞的结果,使热量从高温处传到低温处。导电固体中有相当多的自由电子,它们在晶格之间象气体分子那样运动。自由电子的运动在导电固体的导热中起着主要作用。在非导电固体中,导热是通过晶格结构的振动,即原子、分子在其平衡位置附近的振动来实现的。晶格结构振动的传递在文献中常被称为弹性波。至于液体中的导热机理,还存在着不同的观点。有一种观点认为在定性上类似于气体,只是情况更复杂,因为液体分子间的距离比较近,分子间的作用力对碰撞过程的影响远比气体大。另一种观点则认为液体的导热机理类似于非导电固体,主要靠弹性波的作用。

一端加热的金属棒,终将使其另一端变热。这是最简单的热传导例子,传导定律可用简明的数学定义表述;在许多情况下可用解析方法分析其热流。

2. 对流

对流是指流体各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，而且必然伴随有导热现象。工程上常遇到的不是单纯对流方式，而是流体流过另一物体表面时对流和导热联合起作用的热量传递过程，后者称为对流换热，以区别于单纯对流。

就引起流动的原因而论，对流换热可区分为自然对流与强制对流两大类。自然对流是由于流体冷、热各部分的密度不同而引起的，暖气片表面附近受热空气的向上流动就是一个例子。如果流体的流动是由于水泵、风机或其他压差作用所造成的，则称为强制对流。冷凝器等管内冷却水的流动都由水泵驱动，属于强制对流。

事实上，不可能观察到流体内的纯热传导，因为温度差一加到流体上，就会因密度差而发生自然对流。

为了对热对流过程作数学描述，须将热传导的基本定律与流体流动的基本定律联系起来。所得出的微分方程组的数学解析，可能是应用数学最复杂的领域之一。

3. 热辐射

物体通过电磁波来传递能量的方式称为辐射。物体会因各种原因发出辐射能，其中因热的原因而发生辐射能的现象称为热辐射。本书以后所提到的辐射一律指热辐射。

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。辐射与吸收过程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，辐射换热量等于零，但这是动态平衡，辐射与吸收过程仍在不停地进行。

热辐射可以在真空中传播，而导热、对流这两种热量传递方式只有在物质存在的条件下才能实现。这是热辐射区别于导热、对流，是一种独立的基本热量传递方式的有力说明。当两个物体被真空隔开时，例如地球与太阳之间，导热与对流都不会发生，只能进行辐射换热。辐射换热区别于导热、对流的另一个特点是，它不仅产生能量的转移，而且还伴随着能量形式的转化，即发射时从热能转换为辐射能，而被吸收时又从辐射能转换为热能。

二、导热基本定律

1. 傅立叶定律

单位时间内通过单位截面积所传递的热量，正比例于该截面法线方向上的温度变化率，即：

$$\frac{Q}{F} \sim \frac{\partial T}{\partial x}$$

此处，温度变化率是温差 ΔT 与距离 Δx 比值的极限，即

$$\text{温度变化率} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{\partial T}{\partial x}$$

引入比例常数可得

$$Q = -\lambda F \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2-1)$$

这就是导热基本定律，又称为傅立叶定律的数学表达式。式中负号表示热量传递的方向

指向温度降低的方向，这是满足热力学第二定律所必须的。傅立叶定律用文字来表达是：在导热现象中，单位时间内通过给定截面的热量，正比例于该截面法线方向上的温度变化率和截面面积。它是导热现象规律性的经验总结。

单位时间内通过单位面积的热量称为热流密度，记为 q ，单位为 W/m^2 。傅立叶定律用热流密度 q 表示时有下列形式

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2-2)$$

以下补充说明两点：

(1) 温度变化率与 $\Delta T/\Delta x$ 的区别：为了说明问题起见，想象在物体中存在着两个彼此平行的平面，参看图2-1。它们的温度在整个平面上是均匀的，分别是 T_1 和 T_2 ，平面面积为 F ，彼此间距离为 Δx 。经验表明，对于两个平行平面间的热量转移，下列傅立叶公式（它是傅立叶定律的特例）是适用的

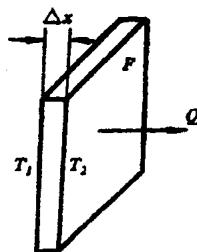


图2-1 导热示意图

$$Q = \lambda F \frac{T_2 - T_1}{\Delta x} = -\lambda F \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2-3)$$

应该指出，式(2-3)有它的局限性，如在 Δx 这一段范围内， $\Delta T/\Delta x$ 不是常量，而是变化着的，式(2-3)就不能正确地表示穿过 F 的真实热量。要克服这个局限性，必须取 $\Delta T/\Delta x$ 比值的极限，即用温度变化率来代替 $\Delta T/\Delta x$ 。

(2) 傅立叶定律的矢量表达式：实际上，在傅立叶定律中，所传递的热量、温度的变化都是有方向的物理量，数学上称这种量为矢量。因此，必须采用矢量的形式才能把傅立叶定律更完整地表达出来。温度变化率是个标量，它必须与单位矢量相乘才是矢量。数学上，梯度这个矢量指向变化最激烈的方向。在等温面的法线方向上，单位长度的温度变化率最大。采用数学上梯度的定义，温度梯度可表示如下

$$\lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta n} \vec{n} = \text{grad}T = \frac{\partial T}{\partial n} \vec{n} \quad (2-4)$$

式中， \vec{n} 表示单位法向矢量； $\partial T/\partial n$ 表示温度在 \vec{n} 方向上的导数。温度梯度在空间三个坐标轴上的分量等于其相应的偏导数，即有

$$\text{grad}T = \frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k} \quad (2-5)$$

式中， \vec{i} ， \vec{j} ， \vec{k} 表示三个坐标轴上的单位矢量。

用矢量表示的傅立叶定律的表达式为

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad}T = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \vec{n} \quad (2-6)$$

图2-2(a)表示出温度梯度与热流矢量 \vec{q} 的关系，图2-2(b)则为等温线与热流线间的

关系。热流矢量为表示热流方向的线，恒与等温线垂直相交。

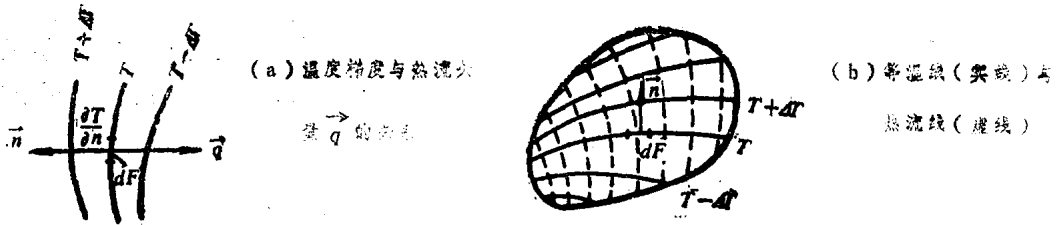


图2-2 温度梯度、热流矢量、等温线与热流线

2. 导热系数

导热系数的定义式由傅立叶定律的数学表达式给出。由式(2-6)得

$$\lambda = - \frac{q}{\frac{\partial T}{\partial n}} \quad (2-7)$$

数值上，它等于在单位温度梯度作用下物体内部所产生的热流密度。

工程计算采用的各种物质的导热系数的数值都是专门实验测定出来的。导热系数的数值取决于物质的种类和温度。金属的 λ 值取决于其化学成分、微观组织结构和温度。对于铁、碳钢和低合金钢来讲， λ 随温度的增加而下降。而对于高合金钢（不锈钢、耐热钢等），随着温度的增加， λ 值增加，如图2-3所示。

金属的导热系数很高。常温（20°C）条件下，纯铜为399W/(m·°C)，碳钢（C≈1.5%）为36.7W/(m·°C)。气体的导热系数很小，如20°C时干空气的 λ 值为0.0259W/(m·°C)。液体的 λ 值介于金属和气体之间，如20°C时水的导热系数为0.599W/(m·°C)。非金属固体的导热系数在很大范围内变化，数值高的同液体相近，数值低的则接近甚至低于空气导热系数的数量级。

3. 温度场

傅立叶定律表明，导热热量与温度梯度有关，所以研究导热必然涉及物体的温度分布。一般地讲，物体的温度分布是坐标和时间的函数，即

$$T = f(x, y, z, t) \quad (2-8)$$

式中， x, y, z 为空间直角坐标， t 为时间坐标。

象重力场、速度场等一样，物体中存在着温度的场，称为温度场，它是物体中各点温度分布的总称。物体的温度场有两大类。若物体各点的温度不随时间变化，这种温度

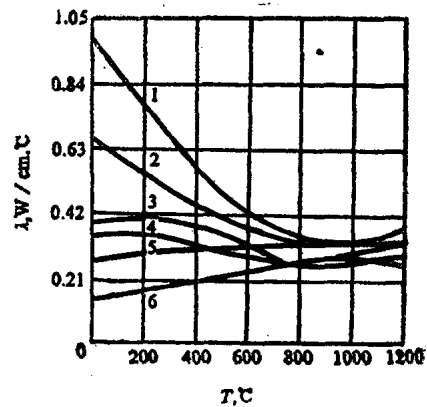


图2-3 各种碳钢导热系数与温度的关系

- 1—纯铁 2—低碳钢（C=0.1%） 3—中碳钢（C=0.45%） 4—低合金钢（Cr=4.98%）
- 5—高铬钢（1Cr13） 6—不锈钢（18-8型）