

高等学校试用教材

# 焊接传热学

天津大学 张文钺 主编

GAO DENG XUE  
XIAO JIAO CAI

机械工业出版社

## 前 言

《焊接传热学》是高等学校焊接专业的选修教材，是根据 1985 年 3 月在哈尔滨召开的原焊接专业分编审委员会会议上所确定的大纲编写的。

本书比较系统而深入地论述了焊接传热过程的基本理论问题，如金属焊接的传热学基础、焊接温度场的分布及其计算、焊接热循环和焊接条件下连续冷却组织转变等。此外，本书还反映了近年来国内外关于焊接传热学的新发展及研究成就：如焊接温度场的数值积分解法、差分解法和有限元解法等；在焊接温度场的测试技术方面，还介绍了红外摄影图象处理及伪着色的热象法。

本书由天津大学张文钺任主编，其中绪论、第一、二、三章由张文钺执笔；第四、五、六章分别由西安交通大学的唐慕尧、孟繁森和上海交通大学的陈楚、汪建华执笔；第七章由天津大学赵家瑞执笔。本书由北京工业大学徐碧宇教授和镇江船舶学院沈世瑶教授主审。

在编写和审稿过程中，得到南昌航空学院、西北工业大学、清华大学和哈尔滨工业大学等单位的大力协助，提出许多宝贵意见，特此表示感谢。

限于编者的水平，本书在内容取舍、系统层次和观点论述等各方面，难免会存在一些问题，敬希读者批评指正。

编者

1987年12月

# 目 录

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 绪论 .....                  | 1  |
| 一、焊接传热学的研究对象 .....        | 1  |
| 二、国内外的研究现状及发展趋势 .....     | 1  |
| 三、本课的目的、任务和要求 .....       | 2  |
| 参考文献 .....                | 3  |
| 第一章 金属焊接的传热学基础 .....      | 4  |
| § 1-1 焊接热过程的特点 .....      | 4  |
| § 1-2 焊接热源和焊接热效率 .....    | 4  |
| 一、焊接热源的种类及其特点 .....       | 5  |
| 二、焊接热效率和焊件上加热区的热能分布 ..... | 5  |
| § 1-3 热传递的基本方式 .....      | 8  |
| 一、热传导 .....               | 8  |
| 二、对流 .....                | 9  |
| 三、辐射 .....                | 10 |
| § 1-4 焊接温度场及其影响因素 .....   | 11 |
| 一、焊接温度场的一般特征 .....        | 11 |
| 二、影响温度场的因素 .....          | 12 |
| § 1-5 焊接传热计算的基本公式 .....   | 18 |
| 一、傅立叶公式 .....             | 18 |
| 二、热传导微分方程式 .....          | 19 |
| § 1-6 边界条件 .....          | 20 |
| 一、初始条件 .....              | 20 |
| 二、表面换热条件 .....            | 20 |
| § 1-7 瞬时集中热源作用下的温度场 ..... | 21 |
| 一、瞬时集中点状热源 .....          | 22 |
| 二、瞬时集中线状热源 .....          | 22 |
| 三、瞬时集中面状热源 .....          | 22 |
| § 1-8 表面散热和累积原理 .....     | 24 |
| 一、表面散热 .....              | 24 |
| 二、累积原理（或叠加原理） .....       | 25 |
| 参考文献 .....                | 26 |
| 第二章 焊接温度场及其数学模型 .....     | 27 |
| § 2-1 厚大焊件连续焊接时的温度场 ..... | 27 |
| 一、点状连续固定热源 .....          | 27 |
| 二、点状连续移动热源 .....          | 28 |
| § 2-2 薄板焊接时的温度场 .....     | 31 |

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 一、线状连续固定热源 .....                | 31 |
| 二、线状连续移动热源 .....                | 31 |
| § 2-3 细棒焊接时的温度场 .....           | 33 |
| 一、面状连续固定热源 .....                | 33 |
| 二、面状连续移动热源 .....                | 34 |
| § 2-4 板极限饱和状态时温度场的简化计算法 .....   | 34 |
| 一、厚大焊件焊接时的简化计算法 .....           | 34 |
| 二、薄板焊接时的简化计算法 .....             | 35 |
| § 2-5 吸热及均匀化阶段温度场的计算 .....      | 37 |
| 一、吸热阶段焊件上某点温度的计算 .....          | 37 |
| 二、焊件均匀化阶段的温度计算 .....            | 38 |
| § 2-6 中厚板焊接时的温度场计算 .....        | 40 |
| 一、利用厚大焊件极限饱和状态传热公式 .....        | 41 |
| 二、利用薄板极限饱和状态的传热公式 .....         | 41 |
| § 2-7 大功率高速移动热源的温度场计算 .....     | 43 |
| 一、厚大焊件上快速焊接时的传热过程 .....         | 43 |
| 二、薄板快速焊接时的传热过程 .....            | 44 |
| § 2-8 其他焊接方法的温度场 .....          | 45 |
| 一、脉冲弧焊时的温度场 .....               | 45 |
| 二、电渣焊时的温度场 .....                | 47 |
| 三、电阻焊时的温度场 .....                | 51 |
| 参考文献 .....                      | 55 |
| 第三章 焊接热循环参数及其应用 .....           | 56 |
| § 3-1 焊接热循环的特征 .....            | 56 |
| 一、焊接热循环的主要参数 .....              | 56 |
| 二、研究焊接热循环的意义 .....              | 58 |
| § 3-2 焊接热循环参数的数学解析 .....        | 58 |
| 一、最高温度 $T_m$ 的计算 .....          | 58 |
| 二、相变温度以上停留时间 $t_H$ 的计算 .....    | 60 |
| 三、瞬时冷却速度 $\phi_c$ 的计算 .....     | 62 |
| § 3-3 冷却时间的计算及其影响因素 .....       | 68 |
| 一、冷却时间的计算 .....                 | 68 |
| 二、影响冷却时间的因素 .....               | 70 |
| 三、冷却时间的图解法 .....                | 71 |
| § 3-4 冷却时间与焊接热影响区组织、硬度的关系 ..... | 74 |
| 一、冷却时间与组织的关系 .....              | 74 |
| 二、冷却时间与硬度的关系 .....              | 76 |
| 三、SHCCT 图的应用 .....              | 78 |
| § 3-5 多层焊接热循环 .....             | 79 |
| 一、长段多层焊接热循环 .....               | 80 |
| 二、短段多层焊接热循环 .....               | 81 |
| 参考文献 .....                      | 83 |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 第四章 焊接温度场的数值积分解法         | 84  |
| § 4-1 焊接温度场的数值解法         | 84  |
| § 4-2 数值积分的一般概念          | 85  |
| § 4-3 焊接温度场的数值积分解法       | 88  |
| 参考文献                     | 93  |
| 第五章 焊接温度场的有限差分解法         | 94  |
| § 5-1 用有限差分法解稳定热传导问题     | 94  |
| 一、有限差商                   | 94  |
| 二、用有限差分法解稳定热传导问题的基本步骤    | 95  |
| § 5-2 用有限差分法解不稳定热传导问题    | 99  |
| 一、常见的差分格式                | 99  |
| 二、差分格式的稳定性               | 102 |
| 三、边界条件的处理方法              | 104 |
| 四、用有限差分法解二维不稳定热传导问题      | 108 |
| § 5-3 用有限差分法计算焊接热传导问题    | 110 |
| 一、一维稳态焊接温度场的差分计算         | 110 |
| 二、二维不稳定焊接温度场的差分计算        | 113 |
| 三、用有限差分法计算焊接温度场的实例       | 116 |
| 参考文献                     | 117 |
| 第六章 焊接温度场的有限元解法          | 118 |
| § 6-1 基于变分法的热传导问题的有限元分析  | 118 |
| 一、变分原理                   | 118 |
| 二、二维稳定热传导问题的有限元解法        | 121 |
| 三、二维不稳定热传导问题的有限元解法       | 126 |
| 四、轴对称不稳定热传导问题的有限元解法      | 129 |
| § 6-2 基于权余值法的热传导问题的有限元分析 | 130 |
| 一、权余值法                   | 130 |
| 二、非线性热传导方程的有限元解法         | 131 |
| § 6-3 焊接温度场的数学模型         | 134 |
| 一、一般假设                   | 135 |
| 二、薄板电弧焊                  | 136 |
| 三、厚板电弧焊                  | 137 |
| § 6-4 计算机程序的编制和实例分析      | 138 |
| 一、计算机程序框图                | 138 |
| 二、解题步骤                   | 139 |
| 三、计算实例                   | 140 |
| 参考文献                     | 142 |
| 第七章 热象法测定焊接温度场           | 143 |
| § 7-1 热象法概述              | 143 |
| 一、红外辐射                   | 143 |
| 二、红外探测器                  | 144 |
| 三、红外成象                   | 144 |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| § 7-2 热象法测温原理及温度定标 .....           | 146 |
| 一、热象法测温原理 .....                    | 146 |
| 二、温度定标 .....                       | 148 |
| § 7-3 热象法测定焊接温度场装置 .....           | 152 |
| 一、测定焊接温度场装置组成 .....                | 152 |
| 二、光学系统的设计 .....                    | 152 |
| 三、红外探测器成像器件的选择 .....               | 153 |
| 四、A/D接口设计 .....                    | 154 |
| § 7-4 热象法测定温度场 .....               | 156 |
| 一、计算机图象处理软件设计 .....                | 156 |
| 二、温度场伪着色处理 .....                   | 159 |
| 三、热象法测定温度场实例 .....                 | 161 |
| 参考文献 .....                         | 168 |
| 附表 I 指数函数 $e^u$ .....              | 169 |
| 附表 II 或然率积分函数 $\Phi(u)$ .....      | 170 |
| 附表 III 积分指数函数 $E_1(-u)$ .....      | 172 |
| 附表 IV 第二类虚自变数零次贝氏函数 $K_0(u)$ ..... | 173 |



# 绪 论

## 一、焊接传热学的研究对象

就现代的焊接生产而言,绝大部分焊接方法都需采用不同性质的热源来进行加热。熔化焊接时,被焊金属在热源的作用下发生加热和熔化过程,当热源离开以后,金属开始冷却,在整个焊接过程中必然存在着热的输入、传播和分布问题。它们的特征决定于热源的性质、热源的功率和规范参数、被焊金属的热物理性质,以及焊件尺寸和工况环境等。

焊接传热学,就是研究被焊金属受热之后热的传播和分布的有关规律,它是决定焊接质量和焊接生产率的重要因素。这一点可以体现在如下方面:

### 1. 焊接的各个过程

(1) 焊接热过程贯穿整个焊接过程的始终。因此可以说,被焊金属的加热、熔化、冶金反应、结晶、组织转变都是在热的作用下发生和发展的。

(2) 焊接热影响区的组织性能也都与热的作用有关。

### 2. 焊接质量

(1) 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。

(2) 由于焊接部位受不均匀的加热及冷却,也会造成不均匀的应力状态,产生不同程度的应力变形和应变,严重影响焊接质量。

(3) 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。

### 3. 焊接生产率

提高焊接生产率,必须设法提高母材和焊条的熔化速度,而熔化速度又决定于焊接热效率。

由以上的分析可以看出,焊接热过程对焊接质量的控制和产量的提高都具有很大影响。

## 二、国内外的研究现状及发展趋势

焊接过程中的传热问题的研究,在焊接领域中比起焊接冶金、焊接工艺和焊接强度等方面的研究历史要年轻得多,从1930年以后才开始较系统地发表研究成果<sup>[1][2][3]</sup>。此后,随着生产和科学技术的发展,世界上许多国家对焊接热过程都进行了深入的研究。然而,焊接过程的传热问题十分复杂、影响因素繁多,所以到目前为止尚未彻底解决。

苏联科学院H. H. 雷卡林院士,在D. 罗申赛尔(Rosenthal)的研究基础上对焊接过程的传热问题作了系统地研究,建立了焊接传热学的理论基础<sup>[3][4]</sup>。他利用热传导微分方程在特定条件下所建立的数学模型来描述焊接温度场的分布特征。但是,正如前面所说,焊接传热过程十分复杂,要解一个非线性的解析解十分困难,至今所进行的数学分析,几乎都是在材料热物理性质不随温度而变的假定条件下进行的,也都是假定焊接热源集中在一点

上(实际是一个热能分布不均匀的面积)。由于这些假定并不符合焊接的实际情况,因此使数学分析的各种焊接传热计算不能得到满意的结果,这是数学解析法的最大弊端。

C. M. 埃德姆斯(Adams)、木原博和稻垣道夫等人根据热传导微分方程,从另一途径进行了大量的研究工作<sup>[6][7][8]</sup>。这种方法是大量实验为基础,积累了不同材质、不同板厚、不同焊接线能量以及不同预热温度等有关温度测量数据,然后从传热理论的有关规律出发,经过整理、归纳和验证,最后建立不同情况下的传热计算公式。显然,这种方法比前者采用数学解析法要准确,但实验工作量很大,可靠性决定于测试手段的精度。

早在50年代就有人用数值法解决弹性力学中的应力分布和传热学中的温度分布问题。不过,当时都是用手工计算,由于计算工作量大,数值法的使用受到了限制。随着电子计算机的应用与发展,数值法所带来的繁重计算,完全可以用电子计算机来代替。由数值法求解热传导微分方程可有两个不同的途径:即有限差分法和有限单元法。

由于数值法有一系列的优点,目前世界各国都把数值法作为解决焊接传热问题的有力工具,国外是从70年代开始发展起来,近年来我国也开始了这方面的研究工作。

数值解法除上述两种途径之外,通常还有数值积分法。数值积分法是把积分区间分割成若干积分点,把每积分点函数的变化值,经积分后成为连续函数在这个积分区间的积分值。由于这种方法的边界条件难以处理,故在应用上受到局限。

最后应当指出,在焊接传热学的发展中,除借助电子计算机推动数学应用之外,由于科学技术发展,新的测试手段不断出现,同样也促使焊接传热学更进一步发展。例如,焊接传热过程的测试精度和方法,一直是研究焊接传热问题的关键。近年来出现了用“热象法测定焊接温度场并经过图象处理伪着色”,是一项新的突破。它是采用红外摄影,经电子计算机处理可以在图象上分辨出温度分布,绘制出温度场的轮廓。但是,这方面的工作目前尚处在研究阶段。

总括以上,焊接传热学在电子计算机的应用与发展的推动下,将进入更为完善、更为实用的阶段,对发展焊接理论、焊接工艺和焊接力学等方面也起到了很大的促进作用。

### 三、本课的目的、任务和要求

焊接传热学自形成独立学科以来,已有近50年的历史,经过世界上各国科学家的努力,至今无论在理论上,还是数学计算上,以及在测试技术上都达到了一个新的水平,并且越来越多地在工程实际上得到应用。它对焊接理论的发展,焊接工艺的创新和焊接质量的控制等都具有很大的指导意义。

焊接传热学是焊接专业的主要基础理论之一,学习本课的目的和任务在于掌握焊接时传热过程的基本规律,了解焊接温度场的分布特征及其影响因素,从而找到改善组织、提高焊接接头性能的途径。同时根据焊接传热学的基本理论,分析和确定焊接应力变形的趋势,正确选择焊接工艺及规范,它可以作为保证质量和提高生产率的重要理论依据。

本课是以“工程数学”、“传热学”、“焊接冶金与金属焊接性”、“焊接方法及设备”和“电子计算机”等课为基础,以碳钢和低合金钢为主要焊接对象,以电弧焊为主要焊接方法来讨论焊接过程中传热过程的基本规律。

但应指出,焊接传热学所涉及的问题十分复杂,虽经多年研究,还是有许多问题未能认



识。常常为了解决一些复杂的传热问题，不得不拟定某些孤立的假定，建立数学模型，进行推导和运算，再根据某些实验加以修正，所以从解决实际问题的效果来看，还不能完全令人满意。

因此，除了学习和掌握焊接传热基本理论之外，还应在今后的工作中通过更多的实践来认识它的全部本质，不断丰富和完善焊接传热学的理论，从而更进一步地指导生产实际。

## 参 考 文 献

- 〔1〕 D. Rosenthal, H. Schmenber: Thermal Study of Arc Welding, 《Welding Journal》, № 4, 1938, P2~8
- 〔2〕 Н. Н. Рыкалин: Распределение Температуры в Элементах Конструкций при сварке, 《Автогенное дело》, № 5, № 7, 1938
- 〔3〕 D. Rosenthal: Mathematical Theory of Heat Distribution During Welding and Cooling 《Welding Journal》, №5, 1941, P220~234
- 〔4〕 Н. Н. Рыкалин: Тепловые основы сварки (процессы распространения тепла при дуговой сварке), 1947
- 〔5〕 Н. Н. Рыкалин: 焊接热过程计算 (中译本), 机械工业出版社, 1958
- 〔6〕 C. M. Adams: Cooling Rate and Peak Temperature in Fusion Welding, 《Welding Journal》, Vol. 37, 1958
- 〔7〕 木原博等: ステンレス鋼の溶接中の冷却速度に関する研究, 《溶接学会誌》, Vol. 79, 1960, P805~811
- 〔8〕 稻垣道夫: 構造用鋼材溶接部の変質について, 《金属材料技術研究所報告》, № 3, 1960, P24

## 第一章 金属焊接的传热学基础

就现代的焊接生产而言,除冷压焊之外,一切焊接都要经历加热、熔化(或到热塑状态)和随后的连续冷却,热的传播贯穿在整个焊接过程的始终,对于焊接质量和生产率的提高具有重要的影响。

### § 1-1 焊接热过程的特点

焊接热过程比一般热处理条件下的热过程复杂得多,它的特点主要表现在以下三方面。

#### 1. 焊接热过程的局部集中性

熔化焊接时,热源集中作用在焊件的接口部位,在很短的时间内,被加热到熔化状态,使之形成焊接接头。也就是说,焊件在焊接时的加热不是整体,只是热源直接作用下的局部地区,使焊件加热及冷却极不均匀,从而增加了研究工作的困难。

#### 2. 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(电弧焊时可达  $1500^{\circ}\text{C}/\text{s}$  以上)。也就是说,在很短的时间内把大量的热能传给焊件。显然,这与热处理时工件缓慢加热的传热过程有很大区别。

#### 3. 焊接热源的运动性

焊接过程中热源是移动的,使焊件的受热区域不断变化。当热源接近焊件某一点时,使该点迅速升温,而随热源逐渐远离时,该点又冷却降温。在这种情况下,焊接时的传热过程实际上是一种准稳定状态(Quasi-Stationary State)的过程。

由此看来,以上这三个方面的特点使焊接过程中的传热问题十分复杂。因此,到目前为止,还难以控制焊接传热的多变因素,而对某些传热过程的数学计算还缺少简便而可靠的方法。

### § 1-2 焊接热源和焊接热效率

实现焊接过程,必须由外界提供相应的能量。也就是说,能源是实现焊接的基本条件。

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

熔焊工艺的发展过程,在某种意义上讲,也是焊接热源的发展过程。例如,19世纪末和本世纪初的气焊和碳弧焊,20年代至30年代的厚皮焊条电弧焊,40年代(二次大战期间)广泛应用的埋弧自动焊和电阻焊,50年代又出现了电渣焊和 $\text{CO}_2$ 气体保护焊,60年代以后等离子焊接和真空电子束焊接问世,70年代又找到了新的焊接热源,即激光焊接和太阳能焊接。历史进程转入80年代后,又出现了如晶体管万能电源、高频脉冲电源、离子束和微波等性能良好的焊接热源。总之,随着新热源的出现,往往就产生相应的焊接工艺方法,

在科学技术不断进步,生产规模日益发展的过程中,总是不断出现新的材料和新的结构,并且提出更高的要求,这就需要不断地开发新的焊接热源和新的焊接工艺。从发展的趋势来看,焊接逐步向高质量、高效率、降低劳动强度、降低能量消耗的方向发展。从这点出发,作为焊接热源应当是: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。

### 一、焊接热源的种类及其特点

根据上述的要求,能满足焊接条件的热源目前有以下几种:

电弧热——利用气体介质中的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;

化学热——利用可燃气体(液化气、乙炔)或铝、镁热剂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);

电阻热——利用电流通过导体时产生的电阻热作为焊接热源(电阻焊和电渣焊);

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);

等离子焰——电弧放电或高频放电产生高度电离的气流(严格讲应不存在分子和原子),它本身携带大量的热能和动能,利用这种能量作为焊接热源(等离子焊接及切割);

电子束——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,使这种动能转为热能作为焊接热源;

激光束——通过受激辐射而使放射增强的光(即激光),经聚焦产生能量高度集中的激光束作为焊接热源(激光焊接及切割)。

每种焊接热源都有它本身的特点,一些常用焊接热源的最小加热面积、最大功率密度和正常焊接规范条件下的温度如表 1-1 所示。

表 1-1 各种热源的主要特性

| 热 源                 | 最小加热面积/ $\text{cm}^2$ | 最大功率密度/ $(\text{W} \cdot \text{cm}^{-2})$ | 正常焊接规范下温度                  |
|---------------------|-----------------------|-------------------------------------------|----------------------------|
| 乙炔火焰                | $10^{-2}$             | $2 \times 10^3$                           | $3200^\circ\text{C}$       |
| 金属极电弧               | $10^{-3}$             | $10^4$                                    | $6000\text{K}$             |
| 钨极氩弧(TIG)           | $10^{-3}$             | $1.5 \times 10^4$                         | $8000\text{K}$             |
| 埋弧自动焊               | $10^{-5}$             | $2 \times 10^4$                           | $6400\text{K}$             |
| 电渣焊                 | $10^{-3}$             | $10^4$                                    | $2000^\circ\text{C}$       |
| 熔化极氩弧(MIG)          | $10^{-4}$             | $10^4 \sim 10^5$                          |                            |
| $\text{CO}_2$ 气体保护焊 |                       |                                           |                            |
| 等离子                 | $10^{-5}$             | $1.5 \times 10^5$                         | $18000 \sim 24000\text{K}$ |
| 电子束                 | $10^{-7}$             | $10^7 \sim 10^8$                          | —                          |
| 激光                  | $10^{-8}$             |                                           | —                          |

限于本书所讨论的主要内容,对各种焊接热源的物理本质和产生的详细过程就不多论述了。

## 二、焊接热效率和焊件上加热区的热能分布

### 1. 焊接热效率

焊接过程中,由热源所提供的热量并没有全部被利用,而是有一部分热量损失于金属导

热、周围介质和飞溅等，也就是说，用于焊接的热量仅是所提供热源的一部分。

(1) 电弧焊的热效率 如果把电弧看成是无感的，则全部电能转为热能时，电弧功率可由下式表示：

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

式中  $q_0$ ——电弧功率，即电弧在单位时间内所提供的能量；

$U$ ——电弧电压；

$I$ ——焊接电流。

由于有损失，故真正用于加热焊件的有效功率为：

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

式中  $\eta$ ——加热过程中的功率有效系数或称热效率。

在一定的条件下  $\eta$  值是常数，主要决定于焊接方法、焊接规范、焊接材料和保护方式等，一般情况下  $\eta$  值的大小如表 1-2 所示。

表1-2 不同焊接方法的 $\eta$ 值<sup>[7] [8]</sup>

| 焊接方法   | 厚皮焊条<br>手工电弧焊 | 埋弧自动焊     | 电渣焊  | 电子束及<br>激光焊 | TIG       | MIG       |           |
|--------|---------------|-----------|------|-------------|-----------|-----------|-----------|
|        |               |           |      |             |           | 铜         | 铝         |
| $\eta$ | 0.77~0.87     | 0.77~0.90 | 0.83 | >0.9        | 0.68~0.85 | 0.66~0.69 | 0.70~0.85 |

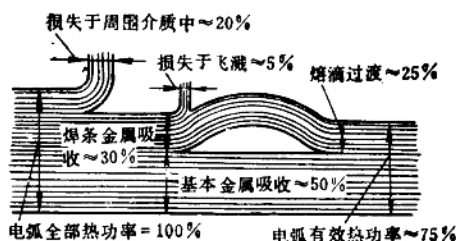
同样的焊接方法，由于焊条或焊剂不同，电流变化时对  $\eta$  值也有一定的影响，因为药皮和焊剂中的稳弧剂、电离度、导热性，熔化数量等均对  $\eta$  有影响。

为了细致分析电弧焊接时热能的利用情况及其损失的分配，可参见图1-1。

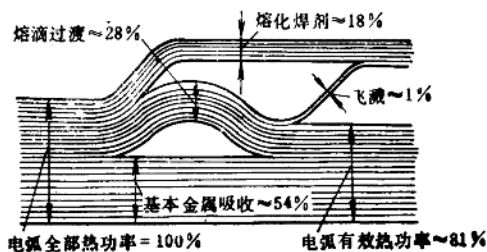
应当指出，这里所说的热效率  $\eta$  是指焊件所吸收的热量。实际上这部分热量，一方面用于熔化金属而形成焊缝，另一方面传给母材造成热影响区及其他散失热量。而热效率  $\eta$  并没有反映这两部分的比例，所以  $\eta$  值尚不能反映热能利用的合理性。

(2) 电渣焊的热效率 电渣焊时，渣池处于厚大焊件的中间，热能直接向外散失很少，主要损失于强制焊缝成形的冷却滑块。实践证明，焊件的厚度越大，滑块带走热能的比例越小，这说明电渣焊时，板厚越大，热效率越高。

电渣焊90mm厚的钢板，其热量分配如图 1-2 所示，它的  $\eta$  值可达80%以上（包括熔化焊丝和部分母材及向母材



a)



b)

图1-1 电弧焊时的热量分配

a) 厚皮焊条 ( $I = 150 \sim 250 \text{ A}$ ,  $U = 35 \text{ V}$ )

b) 埋弧自动焊 ( $I = 1000 \text{ A}$ ,

$U = 36 \text{ V}$ ,  $v = 36 \text{ mm/s}$ )

的导热)。

电渣焊时,焊接速度较慢,所以在熔化金属的同时,有大量的热能向固态金属传导,能量不能得到合理的应用,致使焊接热影响区过宽,晶粒粗大。

(3) 真空电子束和激光焊接时热效率 电子束焊接时是在真空中进行,因此它的能量损失很少,热效率可达90%以上。

激光焊接时加热的机理与电子束不同,光束照射工件表面时,一部分被吸收,另一部分被工件表面反射,吸收和反射的比例与材料种类及其表面状态有关。一般来讲,从激光发生器发射出的能量,均能被充分利用,能量的损失极少。

这两种热源的共同特点是能量极其集中(见表1-1),利用这种热源进行焊接时,绝大部分能量均用于熔化金属(90%以上),只有很少一部分能量损失。在焊接同样的焊件时,所需的功率比其他焊接方法要小的多。

## 2. 焊件上加热区的热能分布

热源把热能传给焊件是通过焊件上一定的加热面积进行的。对于焊接电弧来讲,该面积称为加热斑点。如果进一步分析,这个加热斑点又可分为活性斑点区和加热斑点区,如图1-3所示。

(1) 活性斑点 带电质点集中轰击直径为 $d_A$ 的斑点面积,把电能转为热能,电流密度 $j$ 的变化如图1-3虚线所示。

(2) 加热斑点 在直径为 $d_H$ 的区域内,金属受热是通过弧柱的辐射和电弧周围介质的对流而进行的。由图1-3可以看出,加热斑点区的热能分布是不均匀的,中心多而边缘少。在电流密度不变的情况下,电弧电压越高,则中心与边缘的热能相差越小。如电压不变,电流密度越大时,则中心与边缘的热能相差越大。

单位时间内通过单位面积提供给焊件的热能称为热流密度 $q(r)$ 。根据研究证明,加热斑点上的比热流分布,可以近似地用高斯曲线来描述。如图1-4所示,距斑点中心为 $r$ 的点A的热流密度可用下式计算:

$$q(r) = q_0 \exp(-Kr^2) \quad (1-3)$$

式中  $q(r)$ ——A点的热流密度;

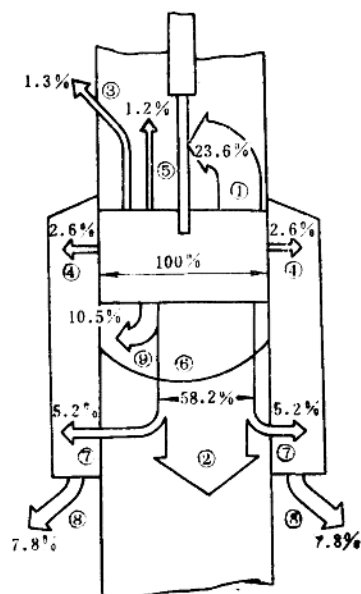


图1-2 电渣焊时的热量分配 (板厚90mm)

- ①—用于熔化焊丝 ②—用于熔化及加热母材
- ③—用于辐射工件边缘 ④—由渣池损失于滑块
- ⑤—损失于辐射周围介质 ⑥—渣池传给熔池的热量 ⑦—由熔池损失于滑块的热量
- ⑧—冷却水带走的热量 ⑨—用于熔池过热的热量

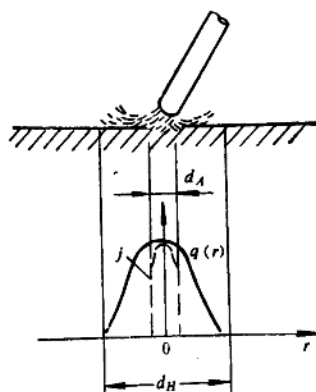


图1-3 电弧作用下的加热斑点  
 $d_A$ —活性斑点直径  $d_H$ —加热斑点直径  
 $q(r)$ —热流密度

$q_m$ ——加热斑点中心最大比热流，  
 $K$ ——能量集中系数，  
 $r$ —— $A$ 点距加热斑点中心的距离。

由式(1-3)可以看出，如果知道  $q_m$  和  $K$  值就可以求出任意点的热流密度，高斯曲线下面所覆盖的全部热能为：

$$Q = \int_F q(r) dF = \int_0^\infty q_m e^{-Kr^2} 2\pi r dr$$

$$= \frac{\pi}{K} q_m$$

故  $q_m = \frac{K}{\pi} Q$  (1-4)

式中  $Q$ ——电弧的有效功率， $Q = \eta IU$ 。

$K$ 值说明热流集中的程度，由实验可知，它主要决定于焊接方法、焊接规范等。在电弧焊和气焊的条件下，不同焊接方法的 $K$ 值如表1-3所示。从今后的发展趋势来看，应采用 $K$ 值较大的焊接方法，如高压真空电子束和激光焊接等。

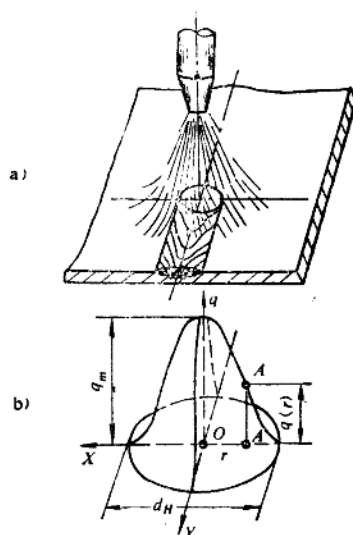


图1-4 加热斑点上热流密度的分布

a) 热源在焊件上的作用

b) 热流密度的分布

表1-3 不同焊接方法 $K$ 值

| 焊 接 方 法 | $K/cm^{-2}$ | 资 料 来 源 |
|---------|-------------|---------|
| 手工电弧焊   | 1.2~1.4     | [2]     |
| 埋弧自动焊   | 6.0         | [2]     |
| TIG焊    | 3.0~7.0     | [9]     |
| 气 焊     | 0.17~0.39   | [2]     |

### § 1-3 热传递的基本方式

由于冷热现象是自然界最普遍、最易感受的现象之一，因而，自古以来人们就自然地对此现象积累了许多感性认识，并且不断探索这种现象的本质。但当时由于历史客观条件所限，在认识上还难以弄清楚，以至谬误的“热素学说”在很长的一段时期占据统治地位。

18世纪末，由于蒸气机等热力机械的发明与使用，促进了传热理论的迅速发展，牛顿、付立叶、斯忒藩等学者先后对固体与气体接触面之间的换热、固体内部的热传导，以及物体的热辐射等基本传热方式进行了研究。这些研究虽然是初步的，但它是当今“传热学”的理论基础。

根据本书所讨论的内容，这里仅对热传递的三种基本方式——传导、对流和辐射，进行简要讨论。

#### 一、热传导

热传导是由于温度不同，在导体内存在温差或温度梯度，引起自由电子移动的结果。温差越大，自由电子的移动越激烈。因此，好的导体也是好的导热体。



热传导理论,是研究物体内部有温差存在时各部位随时间温度变化的规律。假设所研究的物体的组织结构完全致密,热能经过导体的任何断面、任何时间都是相同的,那么,在一定的温度梯度、一定时间,经过一定面积所传递的热量可用下式计算:

$$Q = -\lambda \left( \frac{T_2 - T_1}{S} \right) F t \quad (1-5)$$

式中  $Q$ ——传导热量;

$(T_2 - T_1)$ ——温度差;

$S$ ——温差距离;

$F$ ——传热面积;

$t$ ——传热时间;

$\lambda$ ——导热系数。

但任何物体都不是理想的致密,所以要用微分式来表示:

$$dQ = -\lambda \frac{\partial T}{\partial S} dF \cdot dt \quad (1-6)$$

故单位面积、单位时间内所传递的热量:

$$dq = -\lambda \frac{\partial T}{\partial S} \quad (1-7)$$

## 二、对流

对流是由运动的流体质点发生相对位移而引起热能转移的现象。它是利用不同温度的质点密度不同来传热,在流体受热密度变小而上浮的同时,冷的流体就会流过来补充,这样一个周而复始的过程,即所谓对流。

研究对流传热时,主要以牛顿定律为根据,即传热流体的温度为  $T$ ,放于温度为  $T_0$  的流体中,传热面积为  $F$ ,经过时间  $t$ ,则对流传热为:

$$Q_c = \alpha_c (T - T_0) F t \quad (1-8)$$

式中  $\alpha_c$ ——对流传热系数。

影响  $\alpha_c$  的因素很多,它是一个复杂的函数:

$$\alpha_c = f(T, T_0, \omega, \lambda, c_p, \rho, \mu, \phi, \dots)$$

式中  $T$ ——放热流体(或固体)的温度;

$T_0$ ——受热流体(或固体)的温度;

$\omega$ ——流动速度;

$\lambda$ ——流体的导热系数;

$c_p$ ——流体的比热容;

$\rho$ ——流体的密度;

$\mu$ ——流体的粘度;

$\phi$ ——放热表面形状。

由上述可知,对流传热要比传导传热复杂的多。另外,对流传热的介质虽只是流体,但传热之间的物体,可以是固、液、气同时存在。这样,就增加了研究对流传热的复杂性,并伴随有传导,以至辐射存在。

### 三、辐射

辐射能是物体受热后,内部原子振动而出现的一种电磁波能量传递。一切物体只要其温度高于绝对零度 ( $T > -273^{\circ}\text{C}$ ),就会从表面放出辐射能。所以,辐射能主要是以热能形式发射出的一种能量。在放热体和吸热体之间的辐射是彼此往复的,只是两物体以不同的速度进行相互辐射,经过一定时间之后,两物体以同等速度辐射时,便可以达到暂时的平衡。

如图1-5所示,辐射能量  $Q_0$  辐照物体上后分为三部分,其中一部分被吸收 ( $Q_A$ ),一部分被反射 ( $Q_R$ ),另一部分 ( $Q_D$ ) 透过该物体,即:

$$Q_A + Q_R + Q_D = Q_0 \quad (1-9)$$

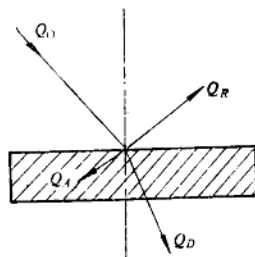


图1-5 辐射能的分配

等式左右各除以  $Q_0$ , 则得

$$\frac{Q_A + Q_R + Q_D}{Q_0} = 1, \text{ 或令 } A + R + D = 1$$

式中  $A = Q_A/Q_0$ ——物体的吸收率;

$R = Q_R/Q_0$ ——物体的反射率;

$D = Q_D/Q_0$ ——物体的穿透率。

$A$ 、 $R$ 、 $D$  的数值都是在  $0 \sim 1$  的范围内变化,它们的大小与物体的温度、表面情况、物体的性质、射线的波长等有关。

如果  $A = 1$ , 则  $R = D = 0$ , 说明落在物体上的全部辐射能都被该物体所吸收,这类物体叫作绝对黑体。

如果  $R = 1$ , 则  $A = D = 0$ , 即所有落在物体上的辐射能,完全被该物体反射出来。一种是正常反射,称为镜体;另一种是乱反射,则称为绝对白体。对于介于黑体与白体之间的物体,一律称为灰体。

如果  $D = 1$ , 则  $A = R = 0$ , 即所有落在物体上的辐射能,完全透过该物体,这一类物体称为绝对透明体或透热体。

应当指出,在自然界中并不存在绝对黑体、绝对白体和绝对透明体。这里所讲的黑体、白体、透明体,并不是对可见光而言,而是对热辐射线而言。如玻璃对可见光线是透明的,但对热辐射线却几乎是不透明体。白色的物体只能反射可见光线,对于热辐射,白布与黑布一律能吸收。

在单位时间内物体单位表面所辐射出的能量  $M$  可根据斯忒藩—玻耳兹曼定律求得:

$$M = \sigma T^4 \quad (1-10)$$

式中  $T$ ——热力学温度;

$\sigma$ ——辐射系数,根据物体的表面情况而定,对于灰体而言,  $\sigma = \epsilon \sigma_0$ ;

$\epsilon$ ——黑度系数,在  $0 \sim 1$  之间;

经过磨光的金属表面  $\epsilon = 0.2 \sim 0.4$

粗糙的金属表面  $\epsilon = 0.6 \sim 0.95$

金属到达熔点时  $\epsilon = 0.9 \sim 0.95$

$\sigma_0$ ——斯忒藩—玻耳兹曼常数,  $\sigma_0 = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

两个物体（例如热源与焊件）所处的温度不同，彼此都可发射辐射能，并且一个辐射体能够吸收另一个辐射体的辐射能量。对于焊接时被焊金属与热源之间的热辐射交换，可用下式计算：

$$M = \varepsilon \sigma_0 (T^4 - T_0^4) \quad (1-11)$$

式中  $T$ ——热源的热力学温度；

$T_0$ ——焊件的初始热力学温度。

式 (1-11) 适用于任何物体之间的辐射热交换。

以上简要讨论了热传递的三种基本方式，实际上热传递并非单纯以一种方式进行。对于焊接过程来讲，以哪一种传热方式为主呢？根据研究的结果，认为由热源传给焊件，除电阻焊，摩擦焊等以外，主要是以辐射和对流为主，而焊件和焊条获得热量之后，热的传播主要是以热传导为主。

焊接传热学所研究的内容主要是焊件上温度分布和随时间变化的规律性，因此本书是以热传导为主进行讨论，同时适当考虑对流和辐射的作用。

## § 1-4 焊接温度场及其影响因素

焊接时在热源的作用下，焊件各点的温度每一瞬时都在变化，在一定的焊接条件时，这种变化是有规律的。焊件上某一瞬时各点温度的分布称为温度场，它与磁场和电场有类似的概念，可以用数学的关系表示：

$$T = f(x, y, z, t) \quad (1-12)$$

式中  $T$ ——工件上某一瞬时某点的温度；

$x, y, z$ ——工件上某点的空间坐标；

$t$ ——时间。

### 一、焊接温度场的一般特征

表示温度场的分布情况，可以用等温线或等温面。所谓等温线或等温面，就是把焊件上瞬时温度相同的各点连在一起成为一条线或一个面。各个等温线或等温面彼此不能相交，而它们之间存在温度差，温差的大小可以用温度梯度来表示。

由图 1-6 可以看出，与  $Y$  轴相交的各个等温线彼此温度不同，如相邻的温度为  $T_1$  和  $T_2$ ，则温度差为  $(T_1 - T_2)$ ，温度梯度为  $(T_1 - T_2)/\Delta S$ ，如  $\Delta S$  很小时，

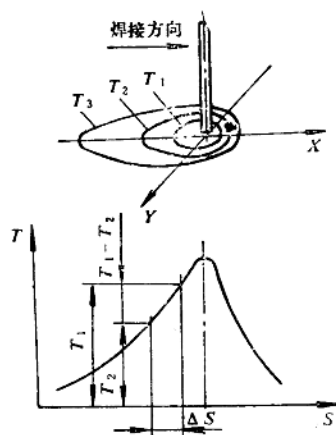


图1-6 温度场中的等温线和温度梯度

$$\lim_{\Delta S \rightarrow 0} \left| \frac{T_1 - T_2}{\Delta S} \right| = \frac{\partial T}{\partial S} \quad (1-13)$$

应当指出，不同的方向，就有不同的温度梯度，假如  $nn$  线与  $SS$  线成  $\alpha$  角时，则  $nn$  方向的温度梯度为（见图1-7），

$$\frac{\partial T}{\partial n} = \frac{\partial T}{\partial S} \cos \alpha \quad (1-14)$$