

高等学校教材

专科适用

金属熔焊工艺

东北水利水电高等专科学校 康云武 主编



(京)新登字115号

内 容 提 要

本书是高等专科学校焊接专业(金属结构与焊接方向)的试用教材。

全书共分八章, 主要内容包括金属熔焊的焊接热过程、焊接化学冶金过程、焊接结晶过程及焊接接头的组织特性、焊接主要缺陷的成因及防止措施、常用金属材料的焊接性分析及焊接工艺、典型的裂纹试验方法和焊接生产实例等。

本书除作为高等专科学校教材外, 还可供焊接技术人员参考。

高等学校教材

专 科 适 用

金 属 熔 焊 工 艺

东北水利水电高等专科学校 康云武 主编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

北京市地矿局印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 16印张 361千字

1995年11月第一版 1995年11月北京第一次印刷

印数 0001—1470 册

ISBN 7-120-02391-8/TG·7

定价 12.40 元

前 言

本书是根据1989年11月原能源部“高等学校教学协作组会议”精神决定编写的专业教材。

本书所研究的内容是以金属熔焊为对象，比较系统地讨论了金属熔焊过程的一些基本理论和基本焊接工艺原理。全书主要包括：焊接热过程、焊接化学冶金过程、焊接结晶过程及焊接接头的组织特性、焊条及焊剂的组成及特性、焊接主要缺陷的成因及防止措施、常用金属材料的焊接性分析及焊接工艺、典型的裂纹试验方法和焊接生产实例等。

本书是高等工程专科学校焊接专业（金属结构与焊接方向）的专业教材，也可供职工大学、业余大学使用和有关技术人员参考。本书在编写时力求做到学以致用，注意理论与生产实际的结合，既强调基本理论和概念，又避免内容的庞杂繁难，使其能够将科学性、系统性和实用性有机地结合起来。

本书由长春水利电力高等专科学校康云武和孙立权编写。康云武任主编，编写了第八章；其余各章均由孙立权编写。全书由沈阳工业大学王宗杰主审。

由于我们水平有限，书中难免有不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

1994年12月于长春

目 录

前言

绪论	1
参考文献	2
第1章 焊接热过程	3
§1-1 焊接热源	3
一、焊接热源的种类及其特性 二、焊接热源的热效率	
§1-2 焊接温度场	5
一、焊接时的热作用特点 二、焊接传热的基本方式 三、焊接温度场的概念 四、焊接温度场的表达式	
五、影响焊接温度场的因素	
§1-3 焊接热循环	15
一、焊接热循环的意义 二、焊接热循环的基本参数和主要特性 三、焊接热循环参数的确定方法 四、多层(多道)焊接热循环 五、焊接热循环的影响因素 六、热计算示例	
参考文献	31
第2章 焊接化学冶金过程	32
§2-1 焊接化学冶金过程的特点	32
一、焊接化学冶金过程在特定的相间进行 二、焊接化学冶金过程分区连续进行 三、焊接冶金反应具有超高温特征 四、焊接冶金反应界面大 五、焊接冶金反应过程短促 六、焊接熔池中的对流及搅拌现象	
七、焊接化学冶金过程与焊接规范联系密切	
§2-2 焊接熔渣	36
一、熔渣的作用及组成物质 二、焊接熔渣的结构 三、焊接熔渣的碱度 四、焊接熔渣的物理性能	
§2-3 电弧气氛与金属的反应	42
一、焊接区气体的来源及组成 二、氢与金属的作用 三、氮与金属的作用 四、氧与金属的作用	
§2-4 熔渣与金属的作用	52
一、熔渣与金属间的氧化还原反应 二、焊缝金属的合金化 三、焊缝金属的脱硫 四、焊缝金属的脱磷	
§2-5 焊缝金属的成分预测	59
一、焊缝的熔合比 二、焊剂熔化率 三、合金过渡系数	
参考文献	61
第3章 焊条与焊剂	62
§3-1 焊条	62
一、焊条的组成及其分类 二、焊条的工艺性能 三、焊条的冶金性能 四、焊条的发展状况	
§3-2 焊剂	78
一、焊剂的分类 二、焊剂的型号与牌号 三、焊剂的组成 四、焊剂的性能及用途	
附录一 焊接钢丝国家标准GB1300—77(附表3-1)	85
附录二 国内外焊条对照表(附表3-2)	87
附录三 不锈钢焊条型号编制方法	91
附录四 铸铁焊条牌号编制方法	92
参考文献	92

第4章 焊接接头的形成	93
§4-1 焊缝金属的结晶	93
一、焊接熔池的结晶特点 二、焊缝金属的一次结晶 三、焊缝金属一次结晶组织的改善 四、焊缝金属的二次结晶 五、焊缝金属二次结晶组织的改善	
§4-2 焊接熔合区	101
一、熔合区的构成 二、熔合区的化学不均匀性 三、熔合区的物理不均匀性	
§4-3 焊接热影响区	104
一、焊接热循环的特点 二、焊接加热时的组织转变特点 三、焊接条件下热影响区的晶粒长大特点 四、焊接冷却过程的组织转变特点 五、焊接热影响区的组织 六、焊接热影响区的性能	
参考文献	116
第5章 金属的焊接性	117
§5-1 金属焊接性及其试验方法	117
一、焊接性的概念 二、金属焊接性试验的内容及选定原则 三、常用的焊接性试验方法	
§5-2 焊接裂纹	125
一、焊接裂纹的危害及分类 二、焊接裂纹形成的一般条件 三、焊接热裂纹 四、再热裂纹 五、焊接冷裂纹 六、层状撕裂 七、应力腐蚀开裂(SCC)	
§5-3 气孔	148
一、气孔的形态及分布特征 二、气孔的形成机理 三、几种典型气孔的成因 四、气孔的影响因素及控制措施	
§5-4 影响焊接接头使用性能的其他缺陷	153
一、固体夹杂 二、未熔合或未焊透 三、成型缺陷	
参考文献	156
第6章 合金结构钢的焊接	157
§6-1 合金结构钢的分类及性能特点	157
一、高强钢的分类 二、热轧钢的特性 三、正火钢的特性 四、低碳调质钢的特性 五、中碳调质钢的特性	
§6-2 热轧及正火钢的焊接	161
一、热轧及正火钢的焊接性分析 二、热轧及正火钢的焊接工艺 三、典型钢种的焊接	
§6-3 低碳调质钢的焊接	168
一、低碳调质钢的焊接性分析 二、低碳调质钢的焊接工艺 三、典型钢种的焊接	
§6-4 中碳调质钢的焊接	174
一、中碳调质钢的焊接性分析 二、中碳调质钢的焊接工艺	
参考文献	176
第7章 耐热钢、不锈钢及异种钢的焊接	177
§7-1 概述	177
一、关于耐热钢及不锈钢的概念 二、钢的耐热性能的获得 三、钢的耐蚀性能的获得 四、耐热钢及不锈钢的分类与性能特点	
§7-2 珠光体耐热钢的焊接	184
一、珠光体耐热钢的焊接性特点 二、珠光体耐热钢的焊接工艺 三、典型钢种的焊接	
§7-3 马氏体钢的焊接	189
一、马氏体钢的焊接性分析 二、马氏体钢的焊接工艺特点 三、典型钢种的焊接	
§7-4 奥氏体钢的焊接	193
一、奥氏体钢的焊接性 二、奥氏体钢的焊接工艺	
§7-5 铁素体钢的焊接	208

一、铁素体钢的焊接性 二、铁素体钢的焊接工艺特点	
§ 7-6 异种钢的焊接	210
一、概述 二、珠光体钢与奥氏体钢的焊接性 三、异种钢的焊接工艺 四、不锈复合钢板的焊接	
参考文献	222
第 8 章 其他金属材料的焊接	223
§ 8-1 铸铁的焊接	223
一、铸铁的种类及性能简介 二、灰口铸铁的焊接 三、球墨铸铁的焊接	
§ 8-2 铝及铝合金的焊接	233
一、铝及铝合金的分类与性能 二、铝和铝合金的焊接性 三、铝及铝合金的焊接工艺	
§ 8-3 铜及铜合金的焊接	240
一、铜及铜合金的性能与分类 二、铜及铜合金的焊接性 三、紫铜的焊接工艺 四、黄铜的焊接工艺	
§ 8-4 金属堆焊	246
一、概述 二、堆焊材料 三、堆焊方法	
参考文献	249

绪 论

在金属加工工艺中,焊接是一种不可缺少的加工工艺方法。目前,焊接技术已在航空、航天、能源、交通、机械制造及建筑等工业部门中得到了广泛的应用并已发展成为一门独立的学科。在未来的工业领域,焊接技术更有着不可限量的发展前景。

一、焊接的实质

焊接是实现金属永久性连接的一种加工方法。它是通过加热或加压,或两者并用,并且用或不用填充材料,使被焊工件达到原子间的结合。可见,它与其他传统的连接方法,如铆接、螺栓连接、键连接等有着本质上的差异。

对被焊金属加热,可使其熔化或达到塑性状态,同时产生结晶、扩散及化学冶金过程。可见,加热是使金属实现原子间结合的主要手段之一。如果对焊件不施加压力,仅通过被焊金属受热源作用而熔化来完成焊接,通常把这种焊接方法称为熔焊。而熔焊方法又由于热源的种类不同而分为电弧焊、电渣焊、电子束焊、激光焊等很多种。本书所研究的对象是熔焊的原理与熔焊工艺。如果焊接过程中必须对工件施加压力(加热或不加热)才能完成焊接,这种方法称为压焊,电阻焊、摩擦焊即属压焊范畴。而利用低熔点材料对被焊工件的浸润作用来完成焊接的方法称为钎焊。目前,焊接方法主要包括熔焊、压焊、钎焊三大类。本书内容不涉及后两类焊接方法。

利用熔焊来实现连接的整个工艺过程包括热过程、冶金过程、相变过程和应力过程等多个复杂的变化过程,这些过程都将直接影响到最终的焊接质量。所谓熔焊原理,所涉及的正是这些过程的一些基本规律;所谓熔焊工艺,是指焊接过程中的一整套工艺程序及技术规定,其中包括焊接方法、焊接顺序、焊接操作方法、焊接工艺参数及焊后热处理规范等。焊接工艺是焊接过程能否顺利实现及获得优质焊接接头的关键所在。

二、焊接科学技术的发展

焊接技术由19世纪末叶发展至今不过百年。目前已发展为一门独立的学科,并在理论上涉及现代科学的众多学科。焊接方法已由最初的几种发展到目前的近百种,焊接工艺水平也达到了新的高度。同时,焊接自动化也得以迅速的发展,自动控制、信息处理及计算机等高技术已广泛应用于焊接领域。随着现代工业和科学技术的发展,焊接技术也将不断进步。今后几年,焊接技术将着重发展以下方面^[1]:①进一步提高焊接生产力;②提高焊接准备车间的机械化、自动化水平;③焊接过程自动化、智能化的广泛应用;④新型热源的研究和开发;⑤节能技术在焊接中的应用;⑥对新兴工业技术的消化、吸收等。

我国的焊接工业从新中国成立以来,随着经济与科学技术的不断发展,也得到了长足的进步。目前,我国已拥有大批优秀的焊接专门人材,较广泛地采用了现代各种常用的焊接技术,焊接材料和设备的制造已建立了完整的体系,某些焊接理论研究水平也已达到了国际先进水平。但是,与工业发达国家相比,我国的焊接技术整体上水平还有待提高,尚

须焊接工作者不断努力。

三、学习本课程的目的及任务

通过学习本课程，应掌握金属材料在熔焊条件下的一些普遍性规律，并能以此为理论基础来分析各种金属材料的焊接性，制定相应的焊接工艺，最终获得满意的焊接质量。

本课程的具体任务是：

- (1) 了解焊接过程的实质；
- (2) 了解焊接热过程，掌握焊接热循环的控制方法；
- (3) 掌握焊接化学冶金过程和结晶过程的基本规律；
- (4) 了解焊接材料（焊条、焊剂）的基本特征；
- (5) 掌握常见焊接缺陷的成因及防止措施；
- (6) 掌握金属焊接性的意义，能够正确分析常用金属材料的焊接性，并能够制定合理的焊接工艺。

本课程具有较强的理论性和应用性，学习中应注意对基本理论的理解和运用，注意密切联系生产实际，重视实验、实习环节，以增强独立工作的能力。

参 考 文 献

- [1] 中国机械工程学会焊接学会编，焊接手册，第1册焊接方法及设备，北京：机械工业出版社，1992年

第1章 焊接热过程

§1-1 焊接热源

熔焊时,是通过具有一定能量的热源在待焊部位的局部区域进行加热,使其熔化和冷却凝固来形成焊缝的。因此一个热量高度集中并且加热范围小的热源是形成优质焊缝的重要条件。

一、焊接热源的种类及其特性

(1) 电弧热:利用气体介质在两电极之间产生的强烈而持久的放电过程所产生的热能来作为焊接热源。这种焊接称为电弧焊,包括手工电弧焊、埋弧焊、气体保护电弧焊等多种焊接方法。因此,电弧热是目前应用最广泛的焊接热源。

(2) 电阻热:利用电流通过导体(工件、熔渣)时所产生的电阻热来作为焊接能源,如电阻焊和电渣焊用热源。

(3) 等离子弧:利用在焊炬上产生的具有高温、高能量密度的等离子弧(即接近完全电离的拘束电弧)来作为焊接热源。这种焊接方法称等离子弧焊接。

(4) 摩擦热:利用机械摩擦所产生的热量进行焊接,如摩擦焊。

(5) 电子束:利用真空中被电场加速的集束电子轰击被焊工件表面所产生的热能作为焊接热源,如真空电子束焊。

(6) 激光束:利用经加强和聚焦后的激光束在焊件上所产生的热量作为焊接热源,如激光束焊接。

(7) 化学热:利用可燃性气体的燃烧热和铝、镁热剂的反应热来作为焊接热源,如气焊、热剂焊。

每种焊接热源都具有不同的特性,如最小加热面积、最大功率密度和正常焊接规范条件下的温度等。这些特性不同,所得到的焊缝质量也不相同。理想的焊接热源应具有加热面积小、功率密度高、加热温度高等特点。表1-1列出了各种焊接热源的主要特性,从中可见,等离子弧、电子束和激光束都是较满意的焊接热源。

表 1-1 各种焊接热源的主要特性^[1]

热 源	最小加热面积 (cm ²)	最大功率密度 (W/cm ²)	正常焊接规范下温度 (℃)
乙炔火焰	10 ⁻²	2 × 10 ³	3200
金属极电弧	10 ⁻³	10 ⁴	6000 K
钨极氩弧	10 ⁻³	1.5 × 10 ⁴	8000 K
埋弧自动焊热源	10 ⁻³	2 × 10 ⁴	6400 K
电渣焊热源	10 ⁻³	10 ⁴	2000

续表 1-1

热 源	最小加热面积 (cm ²)	最大功率密度 (W/cm ²)	正常焊接规范下温度 (℃)
熔化极氩弧	10 ⁻⁴	10 ⁴ ~10 ⁵	
CO ₂ 气体保护焊热源			
等离子弧	10 ⁻⁵	1.5×10 ⁵	18000~24000K
电子束焊热源	10 ⁻⁷	10 ⁷ ~10 ⁹	
激光束焊热源	10 ⁻⁸		

二、焊接热源的热效率

焊接时，焊接热源所产生的热量会因向周围介质散热和飞溅等原因而不能被工件全部吸收，因此我们把焊件所吸热的热量叫作热源的有效热功率。

如果以电弧焊为例，则电弧总功率为：

$$P_0 = UI \tag{1-1}$$

式中 U ——电弧电压；
 I ——焊接电流；
 P_0 ——电弧功率，即电弧在单位时间内所析出的能量。
那么电弧的有效功率 P 则为：

$$P = \eta_u P_0 \tag{1-2}$$

式中 η_u ——加热过程功率有效系数或称热效率。

η_u 可根据实验测定，其数据主要取决于焊接方法、焊接规范和焊接材料及母材的种类，见表1-2和表1-3。

表 1-2 不同焊接方法的 η_u 值^[1]

焊接方法	碳 弧 焊	手 工 电 弧 焊	埋 弧 焊	钨极 氩弧焊		熔化极氩弧焊	
				交 流	直 流	钢	铝
η_u	0.5~0.65	0.77~0.87	0.77~0.99	0.68~0.85	0.78~0.85	0.66~0.89	0.70~0.85

表 1-3 焊剂和电流对 η_u (%) 的影响^[1]

焊 剂	电流与焊丝直径之比 (A·mm ⁻¹)				含 氟 量 (%, CoF ₂)
	70~100	100~200	200~300	300~400	
AH-3(苏)	0.78~0.85	0.84~0.87	0.87~0.92	0.92~0.97	0.2~0.35
HJ430	—	0.70~0.85	0.85	—	5.0~8.0

需要说明的是有效热功率仅仅反映了分配到焊接接头上的热能，而未能反映热能在焊缝和热影响区上的分配，即热能分配的合理性。因为母材吸收的热量中只有一部分用于熔化金属形成焊缝，其余部分则使母材近缝区的温度升高以致发生组织变化从而形成组织和性能都有别于母材的热影响区。从保证焊接质量角度看，形成热影响区的热量越小越好。

§1-2 焊 接 温 度 场

一、焊接时的热作用特点

1. 热作用的集中性

焊接热源集中作用在被焊工件的焊口局部，因此必然造成在焊件上存在较大的温度梯度。由于温度差的存在，就会引起热的流动。

2. 热作用的瞬时性

焊接热源在工作时始终以一定的速度运动，因而对焊件上受到热作用的任一点来说瞬时得到的能量是有限的。这时，当焊件上某点接近焊接热源时，该点温度迅速升高，而随着焊件热源的离去，该点温度迅速下降。可见，焊件上受到热影响的任一点可能达到的峰值温度必然是有限的。

同一般热处理过程相比，焊接的传热过程要复杂得多。焊接热作用的集中性所引起的不均匀组织、性能变化及焊接变形和焊接热作用的瞬时性所引起的焊接化学冶金变化的不平衡性等都将使接头的焊接质量受到影响。

二、焊接传热的基本方式

根据物理过程的不同，热量有三种基本传递方式，即导热、热对流及热辐射。

1. 导热（热传导）

是指在物体内部或相互接触物体之间热量传递的现象。热传导是靠粒子（电子、原子和离子）间的移动碰撞来完成热能传递的。对于金属，热传导主要靠自由电子的移动来完成。因此，良好的导体也是好的导热体。

2. 热对流

是由于流体内部不同温度的质点密度不同而发生质点相对位移所引起的热量转移现象。

3. 热辐射

是指物体受热而产生的由物体表面向外界发射的电磁波来传递热量的现象。热辐射在传热体和吸收体之间的辐射交换是彼此往复的，但由于辐射能力与物体的绝对温度（K）的四次方成正比，因此热能是由高温物体向低温物体转移的。

焊接时，上述三种热传递形式都存在，但因焊接方法不同而使其主次有别。除电阻焊和摩擦焊外，大多数焊接方法的热源是以热辐射和对流的形式传递能量的，而在母材与焊缝内部则是以热传导的方式传递热量。由于我们下面的讨论是以焊件的温度分布作为讨论对象，因此主要研究焊接热传导过程。

三、焊接温度场的概念

物体上的温度分布、导热面积、导热时间及物体本身的物理性质等是影响导热过程中热传递量的主要因素，而其中温度分布的影响更显著。

由于焊接时焊件上各点的温度都在随时间发生变化，因此我们把某一瞬时焊件上各点的温度分布称为焊接温度场。温度场以某一时间在某一空间内所有点的温度值来描述，在直角坐标系内为：

$$T = f(x, y, z, \tau) \quad (1-3)$$

式中 T ——工件上某点在某一瞬时的温度；

x, y, z ——工件上某点的空间坐标；

τ ——时间坐标。

温度场的分布情况可用等温线或等温面来表达。等温线或等温面就是把焊件上同一瞬时相同温度各点连接成的线或面。由于温度场一定时任何一点不能同时具有不同的温度，所以等温线（面）不能彼此相交，即等温线（面）之间存在着温差。温度梯度可用来反映这个温差的大小。

导热过程中，热量由高温到低温的传递是沿着等温面的法线方向进行的，由图1-1中可见，沿法线方向两相邻等温线间的温度差为 $(T_1 - T_2)$ ，这时温度梯度 G 为 $\frac{T_1 - T_2}{\Delta S}$ ，如 ΔS 很小，则有：

$$G = \lim \left| \frac{T_1 - T_2}{\Delta S} \right|_{\Delta S \rightarrow 0} = \frac{\partial T}{\partial S} \quad (1-4)$$

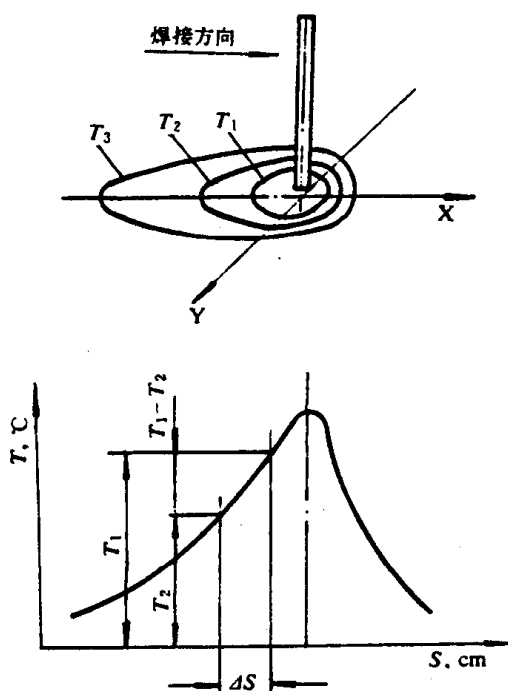


图 1-1 温度场中的等温线和温度梯度

温度梯度是个矢量，其正值为温度增加，负值为温度减小。温度梯度反映了温度场中任意点温度沿法线方向的增加率。

当焊件上温度场各点温度不随时间变化时，称之为稳定温度场；而随时间变化的温度场，称为不稳定温度场。绝大多数焊接温度场都属于不稳定温度场。但当恒定功率的热源作用在一定尺寸的焊件上并做匀速直线运动时，经过一段时间后，温度场会达到暂时稳定状态，并可以随着热源以同样速度移动，这样的温度场我们称其为准稳定温度场。这时，如果采用移动坐标系，坐标的原点始终与热源中心重合，各点的温度也不随时间而变化，即把不稳定温度场转换为稳定温度场。这样，焊接时某一瞬时温度场也可反映整个焊接区的温度变化规律。因此，在计算焊接温度场时都是采用这种

动坐标。

四、焊接温度场的表达式^[1,3,4]

焊接温度场的确定有许多种方法，如数学解析法、实测法、数值分析法、图解法和模拟法等，但每种方法都各有优缺点。

数学解析法是以数学分析为基础，求解导热微分方程的定解。其优点是求解过程中物理概念与逻辑推理清晰，解的结果能清楚地表示各因素（边界条件、物性条件、时间条件等）对温度分布的影响。不足之处是只能用于求解较简单的问题，对形状不规则及材料物

性量不是常数等复杂情况要求必须简化处理, 否则往往无法求解。

实测法是在进行大量的实测、积累大量的不同材料、不同板厚及不同焊接规范下的温度测量数据的基础上, 再从物理概念出发, 经过整理、归纳, 最后建立一系列的传热计算公式。但其数学基础仍是建立在热传导微分方程式上。这种方法比较准确, 但实验工作量大, 测试手段的精度决定着实验的可靠性。

数值分析法是用数值法求解微分方程。它是将方程离散化后得到代数方程组, 然后利用计算机进行求解, 对于实际问题有很大的适应性。如对于复杂的几何形状、变化的热物性量等情况, 用数值分析法都可以较好地解决。主要采用有限差分法和有限元素法。

图解法是利用作图法求解有限差分方程。

模拟法则是把难以分析求解的导热问题, 模拟成相似的电路问题去替代。具体讲就是把求导温度场的问题通过求解与导热问题相模拟的一个电路中的电位分布问题来解决, 即所谓电热模拟法。由于电路实验容易实现和易于准确测量, 所以实验结果可以解答所模拟的导热问题。

本章只讨论解析法。

(一) 热传导的基础方程

1. 傅里叶定律

热总是从物体的高温部位向低温部位流动, 同时服从傅里叶定律。即在沿法线方向单位面积、单位时间内所流过的热量与温度梯度成正比, 其数学表达式为:

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial S} \quad (1-5)$$

式中 q ——热流, 即单位时间单位面积上传递的热量。热流是矢量, 矢量方向是最大热流方向;

λ ——导热系数, $J/(cm \cdot s \cdot ^\circ C)$, 决定于材料的性质, 表示一定物质的导热能力, 其值可因温度而异, 且不同材料的 λ 值随温度变化的特性也不相同。

在均质材料中热流矢量与温度梯度是“共线”的, 但方向相反, 因此在式(1-5)中加以负号。

傅里叶定律揭示了物体中某点温度梯度与热流向量间的关系, 它是研究传热过程的基础, 对于最简单的传热情况, 如单向(线性)传热是有效的。但它未回答出物体中某点的温度与邻近点的温度有何联系, 更未回答一个点的温度是如何随时间变化的, 同时对焊接时的复杂传热情况也不适用。

2. Laplace热传导微分方程式

热传导微分方程式是根据能量守恒定律(热力学第一定律)和傅里叶定律推导得出的。它揭示了连续温度场在空间与时间领域里的内在联系。其适用条件是: ①物体是物质的; ②物性量 λ 、 c 、 ρ 是常数; ③无附加热源(如物体相变潜热), 不发生温度突变。那么, 对于固体导热, 最通用的形式为:

$$\frac{\partial T}{\partial S} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = a \nabla^2 T \quad (1-6)$$

式中 a ——导热系数或热扩散率, cm^2/s , $a = \frac{\lambda}{c\rho}$;

c ——比热容, $\text{J}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$;

ρ ——密度, g/cm^3 ;

T ——温度, $^\circ\text{C}$;

τ ——时间, s 。

式 (1-6) 从理论上得出了物体上坐标、温度和时间三者的关系, 它表示给定点温度变化速度同拉普拉斯运算符号成正比, 换言之, 在某时刻 τ 、物体上给定点 $P(x, y, z)$ 邻近的温度分布越不均匀, 则该点的温度变化也越快。导热的结果, 温度不均匀性将逐渐减小, 温度变化速度也要降低。

式 (1-6) 是焊接传热计算的最基本公式, 在不同的焊接条件下, 由它可推出不同公式。如薄板焊接时, 没有 Z 方向的传热, 这时

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (1-7)$$

(二) 数学解析的假定条件

在实际生产中, 焊件的形状和尺寸是多种多样的, 而焊接热源的作用情况也差异很大, 这时确定焊接传热计算的求解条件是相当困难的。为方便计算, 需做如下假定条件:

- (1) 焊接过程中, 焊件热物理常数不变。
- (2) 焊件初始温度分布均匀, 无其他热源。
- (3) 三维或二维传热时, 各方向传热互不影响。

(4) 焊件尺寸概括为三种典型: ①无限大物体 [图1-2(a)] —— X 、 Y 、 Z 三个方向导热, 即三维导热, 可称“厚板”; ②无限薄物体 [图1-2(b)] ——在 X 、 Y 方向导热无限即二维导热, 可称“薄板”; ③无限长物体 [图1-2(c)] ——仅在 X 方向导热无限, 即一维导热, 可称“细杆”。

(5) 焊接热源均视为瞬时集中作用热源, 瞬时热源是指热源作用时间 $\Delta\tau$ 与热传播持续时间 τ 相比极为微小, $\Delta\tau/\tau \rightarrow 0$ 。并可分为以下三种: ①点热源——三维导热 [图1-2

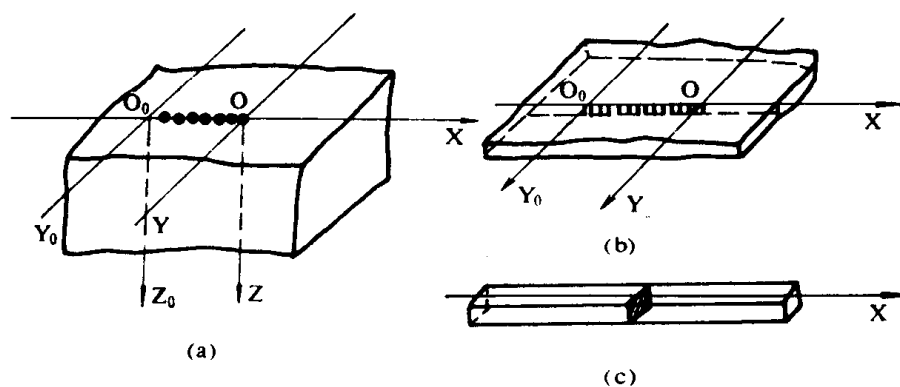


图 1-2 焊件及热源形式

(a) 半无限大物体, 点热源; (b) 无限薄物体, 线热源; (c) 无限大物体, 面热源

(a)]。“厚板”表面焊道或堆焊最为典型。②线热源——二维导热 [图1-2(b)]。“薄板”全熔透对接焊最典型。③面热源——一维导热 [图1-2(c)]。钢筋对焊最为典型。

(6) 边界条件: 厚板焊件热能只向焊件内部传播, 即无限大物体表面为绝热面。薄板或细杆表面与介质间的换热虽然存在但可忽略不计。

(7) 焊接热源在单位时间内输出的能量在整个焊接过程中恒定不变, 并应保持直线等速运动 (固定位置的补焊、点焊除外)。

(8) 热源运动过程中所产生的热作用效果, 可以视为相继作用于各不同点的无数集中热源作用的总和 (叠加原理), 而多个瞬时热源之间互不影响。

需要指出的是, 所谓焊件的“无限大 (薄细)”概念只是一种为便于对问题进行数学处理的理想化条件。它是从传热角度出发的, 是物理概念而不是几何概念。

由于实际焊接中的一些情况与假定条件间有很大出入, 因此计算结果与实际情况存在偏差, 这是数学解析法的不足之处。

(三) 单道焊温度场

1. 瞬时热源的温度场

(1) 瞬时热源特解的一般表达式: 设在某瞬时 $\Delta\tau$ 作用于焊件的热源能量为 Q , 则距热源为 r 的某点经 τ s后该点的温度可利用热传导微分方程式 (1-6) 求出特解:

$$T(r, \tau) = \frac{Q}{c\rho(4\pi a\tau)^{\frac{n}{2}}} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{4a\tau}\right) \quad (1-8)$$

式中 Q ——焊件某瞬时获得的热能, J;

r ——所研究的给定点P距热源的坐标距离, $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$ (cm);

τ ——传热时间, s;

$c\rho$ ——被焊材料的容积比热, J/(cm³·°C);

a ——被焊材料的导温系数, cm²/s;

n ——常数, 点热源为3, 线热源为2, 面热源为1。

(2) 点热源时的特解: 在无限大物体内部作用一点热源时, 显然热能是以热源作用点为中心均等地向四周传导, 即热量的传播是一个球面。这时任意半径 $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ 的球面上各点的温度是相等的。如果假设其初始温度 $T_0 = 0$, 则下式即为其特解:

$$T(r, \tau) = \frac{Q}{c\rho(4\pi a\tau)^{3/2}} \exp\left(-\frac{r^2}{4a\tau}\right) \quad (1-9)$$

但厚板焊接时热源是通过焊件表面传播热能的, 因此这时热能在被焊金属中的传播是半球状, 我们可称其为半无限大物体。这时, 如图1-3所示, 在厚板(半无限大物体)表面(abcd)上的一点O, 如把此表面看成是绝热面, 则点P能受到的热作用强度必然为无限大物体内部热源时的一倍, 这时式 (1-9) 应改为:

$$T(r, \tau) = \frac{2Q}{c\rho(4\pi a\tau)^{3/2}} \exp\left(-\frac{r^2}{4a\tau}\right) \quad (1-10)$$

(3) 线热源时的特解: 这时即点状热源集中作用于无限薄板上, 因为可以看作在 z

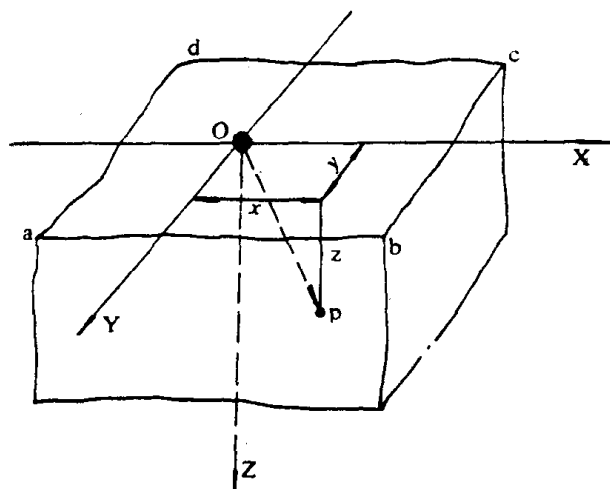


图 1-3 半无限大物体的上表面瞬时热源

轴上有无数点状热源同时作用于物体。如单位长度的热能为 Q_1 (J/cm), 则 $Q = Q_1 dz$, 沿 Z 轴对式 (1-9) 积分, 则有线状热源的特解。当板有限厚度为 h (cm), 则 $Q_1 = Q/h$, 结果即为:

$$T(r, \tau) = \frac{Q/h}{c\rho(4\pi a\tau)} \exp\left(-\frac{r^2}{4a\tau}\right) \quad (1-11)$$

式中 $r^2 = x^2 + y^2$ 。

2. 厚大焊件连续移动热源的温度场

利用式 (1-10), 根据叠加原理, 可求得移动热源单道焊的温度场表达式。

(1) 正常速度运动时的特解: 对于厚板堆焊热源正常速度运动下的温度场, 可由式 (1-10) 推导出。如图1-4所示, 热源沿 X 轴方向移动, 移动速度为 v (cm/s), 热源能量为 q (J/s), 焊件初始温度 $T_0 = 0$, O_0 为热源开始作用点, 当热源经 τ 时间后运动到 O 点时,

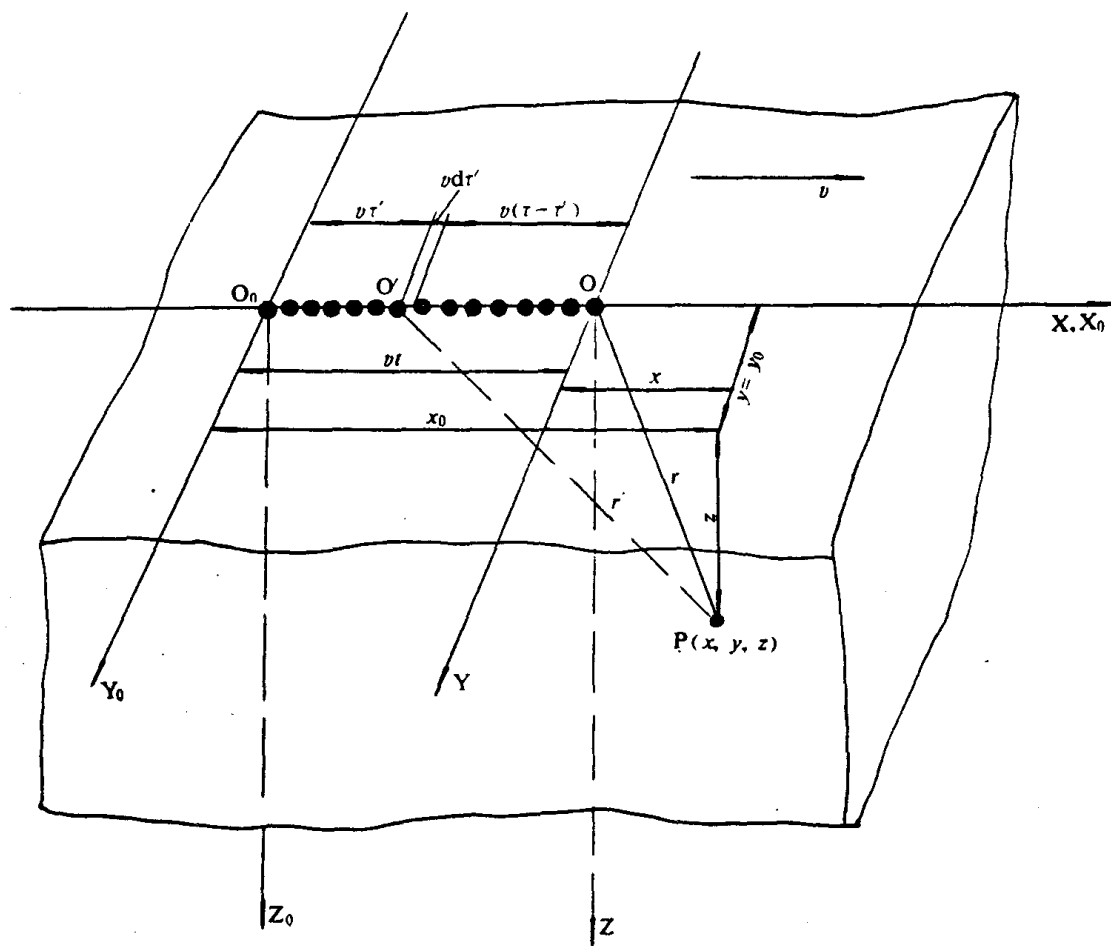


图 1-4 半无限大物体上运动点热源的坐标系

工件上的任一点 $P(x, y, z)$ 的温度为 $T(x, y, z, \tau)$ 。对于焊道上任一点 O' ，如果设在 $d\tau'$ 时间内瞬时作用的热量 $dQ = 2q d\tau'$ ，则此 dQ 可使焊件内的 P 点温度升高 dT ，则式 (1-10) 可得：

$$dT(x_0, y_0, z_0, \tau - \tau') = \frac{2q d\tau'}{c\rho[4\pi a(\tau - \tau')]^{3/2}} \exp\left[-\frac{r^2}{4a(\tau - \tau')}\right]$$

$$\text{则 } T(x_0, y_0, z_0, \tau) = \int_{\tau'=0}^{\tau'= \tau} dT(x_0, y_0, z_0, \tau - \tau')$$

如以热源所在位置 O 点为动坐标原点，经坐标变换后 ($r^2 = x^2 + y^2 + z^2$, $x = x_0 - v\tau$, $y = y_0$, $z = z_0$) 则有以下式：

$$T(r, \tau) = \frac{q}{\pi^{3/2} \lambda r} \exp\left(-\frac{vx}{2a}\right) \varphi\left(\frac{r}{\sqrt{4a\tau}}, \frac{vr}{4a}\right)$$

如果设焊件上传热过程已达到极限饱和状态，在理论上， $\tau \rightarrow \infty$ ，则超越函数 $\varphi\left(\frac{r}{\sqrt{4a\tau}}, \frac{vr}{4a}\right) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \exp\left(-\frac{vr}{2a}\right)$ ，于是可求得一般表达式为：

$$T(r) = \frac{q}{2\pi \lambda r} \exp\left[-\frac{v}{2a}(r+x)\right] \quad (1-12)$$

对于厚板堆焊，图1-5反映了式(1-12)的计算结果，图中虚线是热源运动到 O 点瞬时位置处加热峰值温度各点的连线。虚线后面处于降温阶段，而前方则处于迅速升温阶段，并且升温区域的温度梯度要大于降温区域的温度梯度。同时温度分布对称于热源移动曲线 (X 轴)。

由图1-5可得到一个重要结论，即焊件上的热作用达到极限饱和状态时，则成为准稳定状态。但实际条件 $\tau \neq \infty$ ，是否还可达到准稳定状态呢？这时必须对热量平衡进行分析。当热量导入和导出失衡时，则距热源一定的点 P 的温度必然变化，如果 P 点热量导入导出平衡，则该点温度不变。在运动热源的条件可以认为是多个瞬时热源相继作用在焊缝不同点。而给定点 P 所获得热量与距热源的距离 r 成反比。当 r 大于某值时 P 点难以从瞬时热源获得能量。因此，热源运动时， P 点所获得的热量与时间无关并且是有限的。在导热有限的实际条件下，导进该点的热量很快即与导出的热量平衡，达到“饱和状态”。于是，给定点 P 的温度只取决于其位置而与热源运动时间 τ 无关，即相当于 $\tau \rightarrow \infty$ 状态。因此实际焊接过程中是可以达到准稳定过程的。

(2) 热源高速运动时的近似解：各类机械化焊接方法的热源运动速度可能很快，这时，在线能量 E (作用于单位长度焊缝的电弧能量， J/cm) 一定条件下，随着焊速 v 增加， $1500^\circ C$ 的等温线变长，也就是钢的熔化区宽度基本不变，但长度显著增加，见图1-6所示。可见，当 v 足够大时，热只能横向传播，在沿 X 轴方向可以认为不存在温度梯度。

由此可以认为，只有热源到达 P 点所在截面时，才会把热能传给 P 点使其温度升高。但随着热源的离开， P 点就不能从热源获得热能。这样就可把厚大焊件点状热源的传热过程看作是在厚度为 $dx = v d\tau$ 的侧面绝热“薄板”中有瞬时线状热源作用的传热过程。因瞬