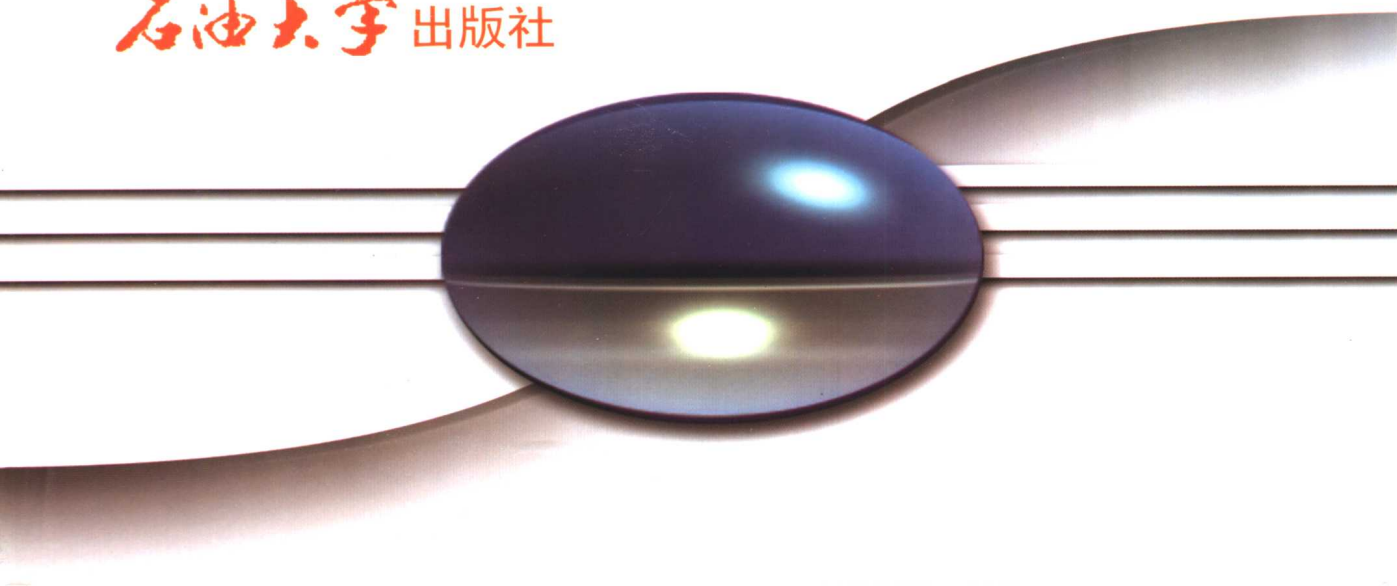


材料冶金学 与成型工艺

主编 王 勇 王引真 张德勤



石油大学出版社



材料冶金学与成型工艺

主 编 王 勇 王引真 张德勤

石油大学出版社

内容简介

全书共分八章:第1章重点介绍焊接成型和凝固成型温度场及热循环特点;第2、3、4章重点论述金属材料在凝固过程中有关化学、物理冶金方面的普遍规律,论述焊接冶金过程中气相和熔渣与金属相互作用、氧化与还原、焊缝金属的合金化、焊接气孔与裂纹分析等。第5、6、7、8章论述了材料成型工艺。主要对典型金属材料及塑料的焊接性进行分析,选择制定优化的焊接工艺。分析了凝固成型和塑性成型的设备、方法、原理,制定合理的成型工艺。

图书在版编目(CIP)数据

材料冶金学与成型工艺/王勇主编.-东营:石油大学出版社,2005.7
高校教材
ISBN 7-5636-1969-0

I.材… II.王… III.①冶金-工艺学-高等学校-教材②金属材料-成型-工艺学-高等学校-教材
IV.①TF②TG39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 063213 号

书 名:材料冶金学与成型工艺
作 者:王 勇

责任编辑:周洁韶 沈玉英(电话 0546-8393003)

封面设计:傅荣治 (电话 0546-8391805)

出版者:石油大学出版社(山东 东营,邮编 257061)

网 址: <http://sunctr.hdpu.edu.cn>

电子信箱: upcpres@mail.hdpu.edu.cn

排 版 者:石油大学出版社照排中心

印 刷 者:石油大学出版社印刷厂

发 行 者:石油大学出版社(电话 0546-8391797)

开 本:185×260 印张:14 字数:358千字

版 次:2005年7月第1版第1次印刷

印 数:1-1000册

定 价:19.50元

前言

Foreword

能源、信息和材料被认为是现代国民经济的三大支柱。其中材料更是各行各业的基础。可以说,没有先进的材料,就没有先进的工业、农业和科学技术。材料作为文明社会进化的标志,如石器时代、陶器时代、青铜器时代、铁器时代等等。重大的技术革新往往起始于材料的革新。

材料学:是研究材料的成分和制备工艺、组织结构、材料性能和使用性能以及它们之间相互关系的科学。材料的结构、性能、加工和使用状况这四个因素称为材料科学与工程的四要素。

任何机器或设备,大至船舶、飞机、车辆,小至仪器、仪表,都是由相应的零件装配而成的。这些零件所用材料有金属材料也有非金属材料。零件或材料的加工方法多种多样,归纳起来有以下几类:

(1)成型加工。用来改变材料的形状尺寸,并一般兼有改变材料的性能。主要有凝固成型、塑性成型、焊接成型、塑料成型和粉末压制等。

(2)切除加工。用来改变材料的形状尺寸,主要有车、铣、刨、钻、磨等传统的切削加工,以及直接利用电能、化学能、声能、光能进行的特殊加工,如电火花加工、电解加工、超声波加工、激光加工等。

(3)表面加工。用来改变零件的表面状态或(和)性能,如表面形变及淬火强化、化学热处理、表面涂(镀)层、气相沉积镀膜等。

(4)热处理加工。用来改变材料或零件的性能,如退火、正火、淬火、回火等。

选择零件的加工方法,需要综合考虑零件的形状尺寸特征、工作条件及性能要求、生产批量和制造成本等多种因素,以达到技术上可行和经济上合理。零件制成后再经过检验、装配、调试,最终得到整机产品。

材料的成型加工涵盖了凝固成型、塑性成型、焊接成型、塑料成型及表面工程等诸多方面,它们相互在理论和生产实践上都有着密切的联系。本教材《材料冶金学与成型工艺》将材料成型作为有机整体,从材料成型的热过程、金属的凝固、焊接冶金、各种材料成型技术以及有关冶金和成型质量问题进行全面综合的阐述。在内容上力求做到加强基础理论和突出基本概念,注重系统性和科学性,着重阐明各种材料成型的基本方法和本质问题。为便于学生自学和深入钻研,各章附有思考与练习题。

本教材是由石油大学材料科学与工程系三位教师在他们从事熔化焊原理、熔化焊工艺、现代材料学等课程教学的基础上编写而成。全书共分八章。王勇教授主编第4,5,8章;王引真副教授主编第1,2,3章;张德勤副教授主编第6,7章。

本教材可作为材料科学与工程系各专业学生的教科书,也可作为从事材料加工工程的科技工作者的参考书。

限于编者水平,书中的内容和体系难免有不足和欠妥之处,请批评指正。

编 者

2005 年 6 月

目 录

Contents

第 1 章 材料成型热过程	1
1.1 焊接热过程的特点	1
1.2 焊接温度场	1
1.3 焊接热循环	9
1.4 焊接热影响区	16
1.5 凝固成型中的温度场	21
习 题	23
第 2 章 金属的凝固	24
2.1 纯金属的结晶	24
2.2 凝固中的溶质再分配	28
2.3 焊条熔化及熔池的形成	31
2.4 熔池凝固和焊缝的组织与性能	35
习 题	40
第 3 章 焊接冶金	41
3.1 焊接冶金过程的特点	41
3.2 焊接熔渣	45
3.3 氮、氢对金属的作用	48
3.4 焊接时的氧化还原	56
3.5 焊缝金属的合金化	63
3.6 焊缝金属中硫和磷的控制	66
习 题	68
第 4 章 焊接气孔和裂纹	70
4.1 焊接气孔	70
4.2 焊接裂纹	74
4.3 焊接裂纹的综合分析	92
习 题	97
第 5 章 焊接成型	99
5.1 概述	99
5.2 金属材料的焊接性及其试验方法	101
5.3 碳钢的焊接	107

5.4	合金结构钢的焊接	114
5.5	不锈钢和耐热钢的焊接	127
5.6	异种钢的焊接	133
5.7	铸铁的焊接	136
	习 题	141
第 6 章	凝固成型	144
6.1	凝固成型基础	144
6.2	砂型铸造	150
6.3	特种铸造	155
6.4	凝固成型工艺设计	166
	习 题	172
第 7 章	塑性成型	173
7.1	塑性成型的基本理论	173
7.2	锻造的热规范	176
7.3	锻造工艺及模具设计	178
7.4	冲压工艺及模具设计	192
	习 题	200
第 8 章	塑料成型	202
8.1	塑料的种类	202
8.2	塑料焊接接头的形成	205
8.3	塑料的焊接方法	205
	习 题	216
	参考文献	217

第 1 章 材料成型热过程

1.1 焊接热过程的特点

熔焊时,为了实现优质连接,必须有一定能量的热源在待焊部位局部区域作用;通过加热、熔化和随后的冷却凝固而形成焊缝。因此,焊接传热过程具有两大特点:

1. 热作用的集中性 焊接热源集中作用于焊件(又称母材)的接口部位,必然使焊件存在温度梯度,从而不可避免地要产生热传导过程。焊件上各点在某一瞬时的温度分布称为温度场。焊接过程中,焊件上形成的不均匀的温度场,势必引起不均匀的应力场或应变场、不均匀的组织 and 性能变化以及焊接变形等问题。

2. 热作用的瞬时性 焊接热源始终处于以一定速度运动的状态之中,因而对焊件上受到热作用的任一点而言,瞬时所能得到的热能是有限的。在这种情况下,当焊接热源接近焊件上某一点时,传导来的热量将使该点迅速加热升温,随着热源的逐渐远离,则又迅速地从该点导出热量将使该点冷却降温。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度的。实际上,焊件上的传热过程是一种准稳态的过程。可想而知,在这种条件下所发生的各种冶金学的变化,是不容易达到平衡状态的。

焊接热过程的以上特点,决定了焊接传热问题的复杂性。到目前为止,还难以控制焊接热的多变因素,对于某些传热过程的数学计算还缺少简便、可靠的方法。但是,焊接热过程将影响焊接时的物理化学冶金反应、焊接接头的固态相变、焊接接头的应力应变和焊接接头的质量。所以,深入研究和掌握焊接传热过程的特点及其变化规律,对于制订正确的焊接工艺,保证焊接质量和提高生产效率具有重要意义。

1.2 焊接温度场

1.2.1 焊接传热的基本方式

焊接时,由于焊件局部受热致使焊件本身出现很大的温度差。因此,在焊件内部以及焊件与周围介质之间必然发生热能的流动。根据传热学的理论,热能传递的基本方式是传导、对流和辐射。

焊接传热学的研究结果认为,热能由热源传给焊件,主要是以辐射和对流为主;而母材和焊条获得热能之后,则以传导为主向金属内部传递热能。

焊接传热过程所研究的内容主要是焊件上的温度分布及温度随时间的变化问题,因此,研究焊接温度场,是以热传导为主,适当考虑辐射和对流的作用。

1.2.2 焊接温度场的一般特征及类型

焊接温度场是指焊件上(包括内部)各点在某一瞬时温度的分布,其数学表达式为

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

式中 T ——焊件上某一点在某一瞬时的温度；

x, y, z ——焊件上某点的空间坐标；

t ——时间。

即温度场中各点的温度是其空间坐标(x, y, z)和时间 t 的函数。只要求出相应的函数关系式,即可通过理论计算来确定焊接温度场的形状和它的变化规律。

一、温度场的一般特征

温度场可以用等温线或等温面来表示。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接在一起,成为一条线或一个面。等温线或等温面具有以下特征:

(1) 各等温线或等温面彼此不能相交,即它们是一单值函数;

(2) 在致密的连续物体中,等温线或等温面也是连续的;

(3) 各等温线或等温面之间存在温度差。单位距离间的温度差称为温度梯度;

(4) 温度场的迭加原理。当有两个以上温度场同时作用于同一物体时,由于温度场是一标量场,故可以用简单迭加原理得到各个温度场的综合作用结果。温度场的迭加性对于分析焊接温度场特别有用。例如对于连续移动热源所形成的温度场(这是焊接时的一般情况),可以看作是许多瞬时固定热源在不同位置、不同时间形成的温度场综合作用的结果,从而使问题得以简化。此外,在分析多层焊和焊前预热的焊接温度场时也要用叠加原理。

二、温度场的类型

根据焊件上各点温度与时间的关系,温度场可以分为如下三种类型:

(1) 稳定温度场 焊件上各点的温度不随时间而变化,即温度场只与焊件各点的位置有关。例如,将一个恒定功率的热源作用于工件上某一点固定不移动,经过一段时间后,就形成了稳定温度场,这在焊接中相当于定位点固焊或补焊时的情况。

(2) 非稳定温度场 焊件上各点的温度随时间而变化。大多数焊接温度场均属于非稳定温度场。当一恒定功率的固定热源作用于焊件上,在开始的一段时间之内,由于热传播尚未达到饱和状态,焊件上各点温度在不断升高,此时就是非稳定温度场。另外,恒定功率的连续移动热源形成的温度场也是非稳定温度场。

(3) 准稳定温度场 它是指以下两种情况:一种是当热源功率不变,在焊接过程进行了一个阶段之后,焊件传热达到了饱和状态,就形成了暂时稳定的温度场。例如固定热源在补焊缺陷时就会出现这种情况;另一种是指对于正常焊接条件下的移动热源,在经过一定时间以后,焊件上也会形成准稳定温度场。这时焊件上各点的温度虽然随时间而变化,但各点温度能跟随热源一起移动,也就是这个温度场与热源以同样的速度向前移动着。如果采用移动的坐标系,坐标原点与热源中心相重合,则各点的温度只取决于这个系统的空间坐标,而与热源的移动速度和距离无关。焊接温度场绝大多数均属于这种准稳定温度场。在计算焊接温度场时都是采用这种动坐标。

1.2.3 热传导的基础方程

一、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

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial S} \quad (1-2)$$

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, $\text{J}/(\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

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(1-2)中加一负号。

傅里叶定律揭示了物体中某点温度梯度与热量的关系,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。

二、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 物体是均质的;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

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = a \nabla^2 T \quad (1-3)$$

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 ;

∇^2 ——拉普拉斯运算符号。

式(1-3)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(1-3)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。

1.2.4 焊接温度场的数学表达式

一、求解导热问题的一般方法

通常求解热传导方程的方法有两类:一是精确解法,即数学分析求解;另一类是近似解法,如数值解法等。

分析解的优点是: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。缺点是只能用于求解比较简单的方程。对于几何形状不规则及材料物性量不是常数等复杂情况,往往无法分析求解。

数值解法是将方程离散化后得到代数方程组,可以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、变化的热物理参量等情况,用数值解法都能较好地加以解决。所采用的离散化方法主要有:有限差分法和有限元素法。

二、分析解的简化条件

由于焊件尺寸形状多种多样,焊接热源的作用情况也有很大差异,如何确定求解条件是相当困难的,需要再给出一些假定:

(1) 焊件尺寸形状概括为三种模型

① 半无限大物体(图 1-1(a))。 x, y, z 三个方向导热无限,即三维导热,可称为“厚板”。厚板表面的堆焊可视为这种情况;

② 无限大薄板(图 1-1(b))。 x, y 两个方向导热无限,即二维导热,可称为“薄板”。薄板对接焊接属于此种情况;

③ 无限长细杆(图 1-1(c))。只在 x 方向导热无限,即一维导热,可简称“细杆”。钢筋及棒类焊件端接属于此种情况。

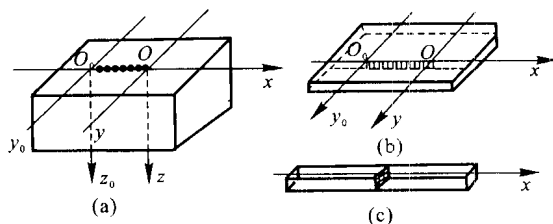


图 1-1 焊件及热源形式

(a) 半无限大物体,点热源;(b) 无限大薄板,线热源;
(c) 无限长细杆,面热源

(2) 焊接热源均视为瞬时集中作用热源

① 点热源。在半无限大物体中的三维导热的热源(图 1-1(a)), $T = f(x, y, z, t)$;

② 线热源。在无限大薄板中的二维导热的热源(图 1-1(b)), $T = f(x, y, t)$;

③ 面热源。在无限长细杆中的一维导热的热源(图 1-1(c)), $T = f(x, t)$ 。

(3) 边界条件 半无限大物体上表面为绝热面,即热源的能量全部向物体内部传导;无限大薄板的上下表面及无限长细杆的周围均与介质发生热交换,即表面散热。

(4) 相变潜热 假定在相变时无潜热产生,也就是除焊接热源以外,再无其他任何热的来源。

(5) 热源能量 假定焊接热源在单位时间内放出的能量在整个焊接过程中保持恒定;除固定位置的补焊或点焊外,热源应保持直线等速运动。

(6) 热源作用效果 假定热源在运动过程中所产生热作用的效果,可认为是相继瞬时作用于各不同点的无数集中热源连续作用的总和,而多个瞬时热源相互之间并不发生影响。瞬时热源是指热源作用时间 Δt 与热的传播持续时间 t 相比为极其微小的情况,即 $\Delta t/t \rightarrow 0$ 。

(7) 材料热物理参量 假定金属材料的热物理参量,如 λ, c 等与温度无关,为常数。

三、瞬时热源的热传导方程

根据上述假定,以瞬时集中热源为基础,求解热传导微分方程特解。只考虑工程上实用的“厚板”点热源与“薄板”线热源两种情况。

1. 点热源时的特解

设在 Δt 瞬时作用于焊件内部某点的热源强度为 Q ,则距热源为 r 的某点经 t 秒后该点的温度,可用热传导微分方程式(1-3)求解。并且假设焊件的初始温度 $T_0 = 0$,边界条件不考虑散热问题,则求得的特解为

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

式中 r ——距热源坐标距离, $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, cm;

Q ——焊件瞬时获得的热能, J;

t ——传热时间, s。

由式(1-4)可以看出,在这种情况下所形成的温度场是以 r 为半径的等温球面。

在一般的熔焊条件下,热源的热能传给焊件是通过焊件的表面,因此热源在被焊金属中的传播是半球状,故常称为半无限体。为此必须对公式(1-4)进行修正,即认为全部的热能被半无限体获得

$$T(r, t) = \frac{2Q}{c\rho(4\pi at)^{3/2}} \exp\left(-\frac{r^2}{4at}\right) \quad (1-5)$$

由式(1-5)可看出,焊件上某点(r)的温度是时间(t)的函数。同时,距热源中心越远的点温度越低,相反则温度越高,当 $r=0$ 时,即为热源作用点的温度。

2. 线热源时的特解

线热源可看成是无数点热源同时沿 z 轴作用的情况。如果单位长度的热能为 Q_1 (J/cm), 则 $Q = Q_1 dz$, 于是沿 z 轴对式(1-5)进行积分,即可求得线热源的特解。因为在有限厚度为 δ (cm)时, $Q_1 = Q/\delta$, 则

$$T(r, t) = \frac{Q/\delta}{c\rho(4\pi at)^{1/2}} \exp\left(-\frac{r^2}{4at}\right) \quad (1-6)$$

式中, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 。

由式(1-6)可看出,薄板的温度场分布是平面的,是以 r 为半径的圆环。

1.2.5 单道焊温度场的解析

一、“厚板”的温度场表达式

分以下两种情况予以解析:

1. 正常速度运动情况

如图 1-2 所示,假定热源的移动方向和 x 轴的正方向相同,移动速度为 v (cm/s),热源能量为 q (J/s),焊件初始温度为 T_0 , O_0 为热源

开始作用点,当热源经 t 时间后运动到 O 点时,工件上任一点 $P(x, y, z)$ 的温度应为 $T(x_0, y_0, z_0, t)$ 。仍然利用瞬时热源法进行解析。取任意一点 O' , 设在 dt' 时间内瞬时作用的热量 $dQ = 2qdt'$, P 点温度升高 dT , 则由式(1-5)得

$$dT(x_0, y_0, z_0, t - t') = \frac{2qdt'}{c\rho[4\pi a(t - t')]^{3/2}} \exp\left[-\frac{r^2}{4a(t - t')}\right] \quad (1-7)$$

$$\text{则} \quad T(x_0, y_0, z_0, t) = \int_{t'=0}^{t'=t} dT(x_0, y_0, z_0, t - t') \quad (1-8)$$

如果以热源当前所在位置 O 点为动坐标的原点,经坐标变换, $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$, $x = x_0 - vt$, $y = y_0$, $z = z_0$ 。并设焊件上的传热过程已达到极限饱和状态,则可求得一般表达式为

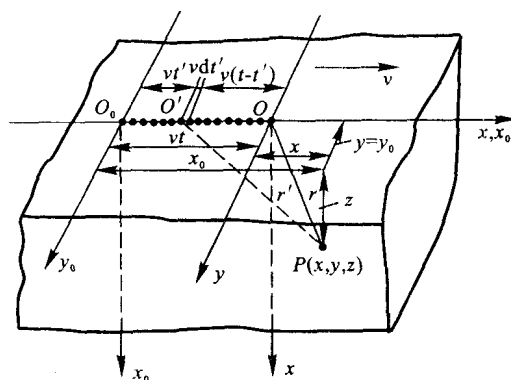


图 1-2 半无限大物体上运动点热源的坐标系

$$T(r) - T_0 = \frac{q}{2\pi\lambda r} \exp\left[-\frac{v}{2a}(x+r)\right] \quad (1-9)$$

利用式(1-9)进行计算,对于“厚板”堆焊的情况,如图 1-3 所示。图 1-3(a)中的虚线为 $z=0$ 表面上各等温线的平行于 x 轴的切线的切点连线,实际上是热源运动到 O 点瞬间处在加热峰值温度的各点的连接曲线。它表明,在虚线后方区域已处于降温阶段,在虚线前方区域则正处在迅速升温阶段。并且升温区域的温度梯度要大于降温区域的温度梯度。而在热源移动轴线(即 x 轴两侧)的温度分布是对称的。

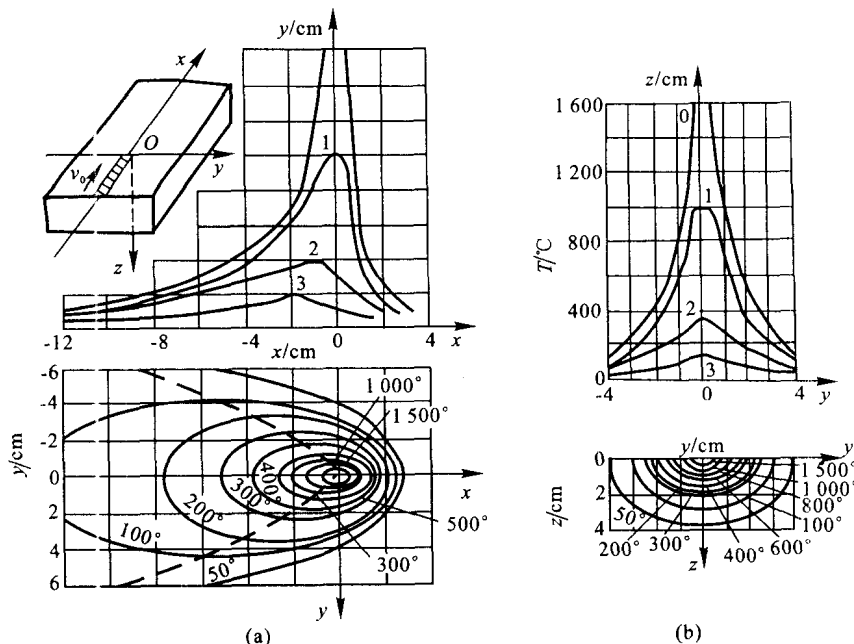


图 1-3 半无限大物体表面上运动点热源的温度场

$q = 1\,000 \text{ cal/s}; v = 0.1 \text{ cm/s}; a = 0.1 \text{ cm}^2/\text{s}; \lambda = 0.1 \text{ cal}/(\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$

2. 高速运动时的近似解

由式(1-9)可以看出,焊接参数对温度场有很大的影响。由图 1-4 可看出,在线能量 E (即热源的功率 q 与焊接速度 v 之比, $E = q/v$)一定的条件下,随着焊接速度 v 的增大, $1\,500^\circ\text{C}$ 的等温线变得伸长起来,换言之,钢的熔化区的宽度几乎保持不变,但其长度则显著增大。这说明,当 v 足够大时,热只能横向传播,因为沿着运动方向(x 方向)已不存在温度梯度。

由此可以设想,只有热源运动到达点 P 所在截面时,才会有热传给 P 点而使 P 点的温度发生变化。一旦热源离开此截面向前运动时, P 点就不可能从热源获得热能。因此,可以把这种情况看作是在厚度为 $dx = vdt$ 的无限大薄板中作用于板边的瞬时线热源的传热过程。以热源当前所在的动坐标点 O 为原点,可推导出高速热源条件下的温度场表达式如下

$$T - T_0 = \frac{E}{2\pi\lambda t} \exp\left(-\frac{r^2}{4at}\right) \quad (1-10)$$

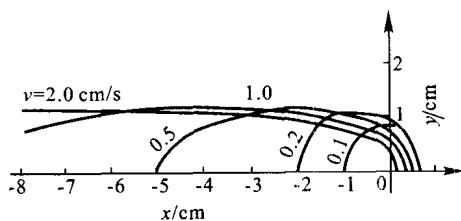


图 1-4 线能量一定($E = 40\,000 \text{ J/cm}$)时,焊接速度 v 对 $1\,500^\circ\text{C}$ 等温线形状的影响

式中 t ——热源到达所求点 P 所在截面算起的时间, 由于移动距离为 x , 所以, $t = x/v$; $r = \sqrt{y^2 + z^2}$;

E ——焊接线能量。

式(1-10)对于焊缝附近的温度场的计算是适用的。

二、“薄板”的温度场表达式

解析过程同“厚板”。从实用的角度出发, 这里仅介绍高速热源的近似解。当焊速相当大时, 由于热能只能横向传播, 因而可以把线状热源看成是面热源在矩形杆件中的瞬时作用, 则其近似解为

$$T - T_0 = \frac{E/\delta}{2(\pi\lambda c\rho t)^{1/2}} \exp\left(-\frac{y^2}{4at}\right) \quad (1-11)$$

式中 t ——热源到达所求点 P 所在截面时开始算起的时间, $t = x/v$;

y ——热源与点 P 位于同一截面时的固定坐标;

δ ——板厚。

1.2.6 温度场的影响因素

影响温度场的因素很多, 其中主要的有以下几个方面:

一、热源性质

焊接热源的种类很多, 如电弧、氧乙炔火焰、电渣、电子束、激光等, 由于焊接热源的性质不同, 焊接时的温度场也不同。按照焊接传热学的理论, 用手工电弧焊焊接厚度大约 25 mm 的钢板, 此时的热源可认为是点状热源, 焊件是三维温度场。而 100 mm 厚的焊件进行电渣焊, 则认为是线状热源, 焊件是平面传热, 属于二维温度场。

电子束和激光焊接时, 热能极其集中, 所以温度场的范围很小, 而气焊时, 热源作用的面积较大, 因此温度场的范围也大。所以用不同的热源焊接时, 焊件的温度场是各不相同的。

二、焊接线能量

同样的焊接热源, 采用的焊接线能量 E 不同, 温度场的分布也不同(见图 1-5)。

以低碳钢的电弧焊接为例:

当 $q =$ 常数时, 随着焊接速度的增大, 等温线的范围变小。即温度场的宽度和长度都变小, 所以温度场的形状变得细长, 如

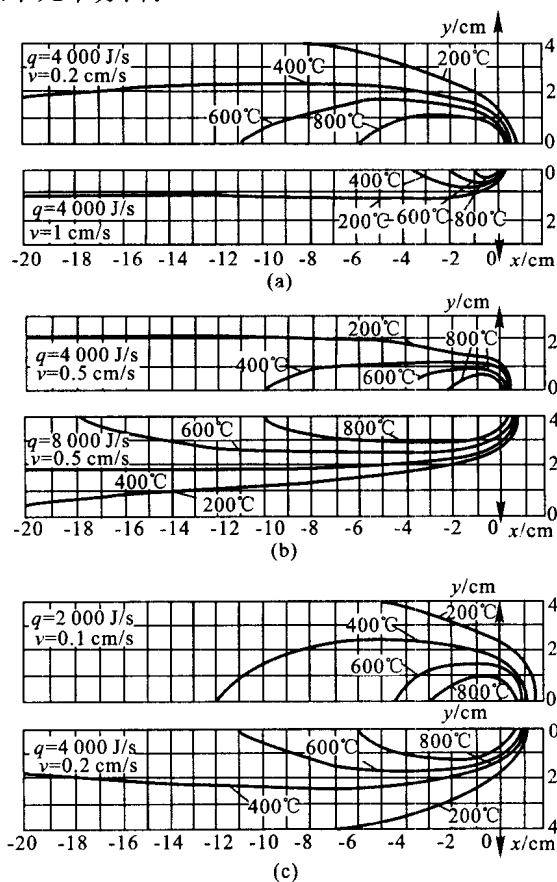


图 1-5 焊接参数对温度场的影响

图 1-5(a)所示。

当 $v = \text{常数}$ 时,随着热源功率的增大,温度场的范围也随之增大,如图 1-5(b)所示。

当 q/v 保持定值,同比例的增大 q 与 v ,则会使等温线拉长,因而使温度场的范围扩大,如图 1-5(c)所示。

三、金属的热物理性质

由于金属材料的热物理性质不同,必然会影响到焊接温度场的分布。对焊接温度场影响较大的热物理性质有以下几种:

(1) 热导率(导热系数, λ) 表示金属材料的导热能力。其物理意义是:单位时间内沿法线方向单位距离温度相差 1°C 时,经过单位面积所传播的热能,单位为 $\text{W}/(\text{cm}\cdot^\circ\text{C})$ 。

热导率 λ 随着金属的化学成分、组织和温度的不同而变化。

(2) 比热容(c) 1 g 物质每升高 1°C 时所需的热能,称为比热容,单位为 $\text{J}/(\text{g}\cdot^\circ\text{C})$

各种材料具有不同的比热容,而同样材料当温度变化时,比热容也随之变化。

(3) 容积比热容(c_p) 单位体积的物质每升高 1°C 所需的热能,单位为 $\text{J}/(\text{cm}^3\cdot^\circ\text{C})$ 。容积比热容是温度的函数。

(4) 热扩散率(a) 表示温度传播的速度, $a = \lambda/c_p$ 单位为 cm^2/s ,这也是温度的函数。

(5) 比热焓(h) 1 g 物质从 0°C 加热到 $T^\circ\text{C}$ 时所吸收的热能,即是在某温度下 1 g 物质所含有的热能,单位为 J/g 。

(6) 表面散热系数(α) 表明金属散热的能力。其物理意义是:散热体表面与周围介质相差 1°C 时,通过单位面积在单位时间内所散失的热能。

总之,被焊金属的热物理性质对温度场有着重要的影响,但是它们又都随温度而变化。然而焊接时温度的变化急剧,这是研究焊接传热学的主要困难。如果作为定性地粗略计算,可采用焊接时焊件温度变化范围内的热物理常数的平均值。常用金属材料热物理常数的平均值见表 1-1。

表 1-1 常用金属材料热物理参量的平均值

热物理常数	单 位	焊接条件下选取的平均值			
		低碳钢、低合金钢	不 锈 钢	铝	紫 铜
λ	$\text{W}\cdot(\text{cm}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$	0.378 ~ 0.504	0.168 ~ 0.336	2.65	3.78
c	$\text{J}\cdot(\text{g}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$	0.625 ~ 0.756	0.42 ~ 0.50	1.0	1.32
c_p	$\text{J}\cdot(\text{cm}^3\cdot^\circ\text{C})^{-1}$	4.83 ~ 5.46	3.36 ~ 4.2	2.63	3.99
$a = \frac{\lambda}{c_p}$	$\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$	0.07 ~ 0.10	0.05 ~ 0.07	1.00	0.95
h	$\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$	(0 ~ 1 530 $^\circ\text{C}$) 1 331.4	-	-	-
α	$\text{J}\cdot(\text{cm}^2\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$	(0 ~ 1 500 $^\circ\text{C}$) (0.63 ~ 37.8) $\times 10^{-3}$	-	-	-

金属热理性质对温度场的影响如图 1-6 所示。由图中可以看出焊接镍铬奥氏体不锈钢时,相同等温线的范围(例如 600°C)比焊接低碳钢时要大。这是因为奥氏体不锈钢的导热性较差引起的(镍铬氏体不锈钢的 $\lambda = 0.252\text{ W}/(\text{cm}\cdot^\circ\text{C})$,而低碳钢的 $\lambda = 0.42\text{ W}/(\text{cm}\cdot^\circ\text{C})$)。因此,当焊接不锈钢和耐热钢时,所选用的焊接线能量应比焊接低碳钢时要小。

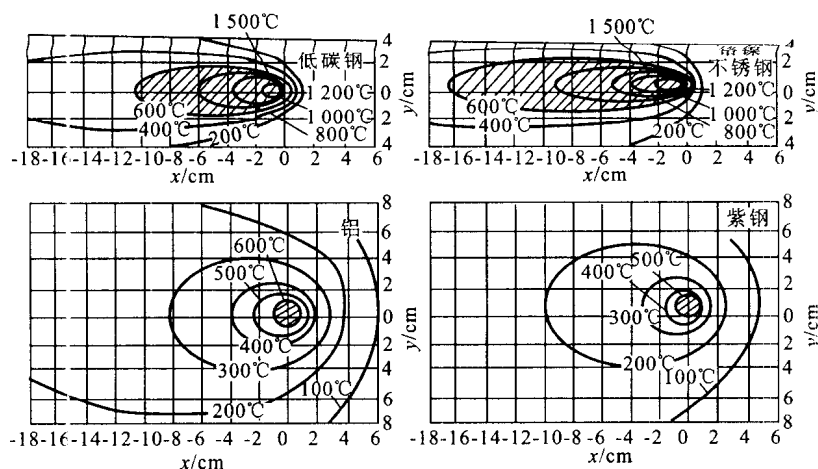


图 1-6 金属热物理性质对温度场的影响 ($E = 21 \text{ kJ/cm}$ ($q = 4200 \text{ J/s}$, $v = 0.2 \text{ cm/s}$), $\delta = 1 \text{ cm}$)

但是,焊接铝和铜时,由于材料的导热性能很好,因此应选用比焊接低碳钢时更大的线能量才能保证质量。

四、焊件的形状及尺寸

焊件的几何形状、尺寸及板厚、所处的状态(例如环境温度、预热及后热等)对焊接传热有很大的影响,所以不同情况下的温度场不同。

(1) 厚大焊件 属于 x, y, z 三向传热(空间传热),热源为点状,热传播为半球形,所以一般认为是半无限大物体。

试验证明,对于手工电弧焊在正常的焊接工艺参数条件下,板厚大于 25 mm 的低碳钢焊件,或者是 20 mm 以上的不锈钢焊件,都可认为是厚大焊件。

(2) 薄板 属于 x, y 二向传热(平面传热),热源特征为线状。在手工电弧焊时,8 mm 以下的低碳钢以及 5 mm 以下的不锈钢可认为是薄板。

(3) 细棒 属于 x 轴的单向传热(线性传热),热源特征为面状。工程上的棒材电阻对焊以及手工电弧焊时的焊条加热都可认为是细棒的受热问题。

此外,接头形式、坡口形状、间隙尺寸,以及具体的焊接工艺等对焊接温度场都有不同程度的影响。

1.3 焊接热循环

1.3.1 焊接热循环的意义

在焊接热源的作用下,焊件上某一点的温度随时间的变化过程,称为焊接热循环。

在焊接过程中,热源沿焊件的某一方向移动时,在其热量所及的焊件上任一点的温度,都经历由低到高的升温阶段,达到最大值后,又经历由高到低的降温阶段。在距焊缝不同位置的各点所经历的这种热循环是不同的,如图 1-7 所示。从图中可以看出,离焊缝越近的点,其加热速度越大,峰值温度越高,冷却速度也越大,并且加热速度比冷却速度要大得多。也就是说,

焊接是一个不均匀的加热和冷却过程,也可以说是一种特殊的热处理过程。

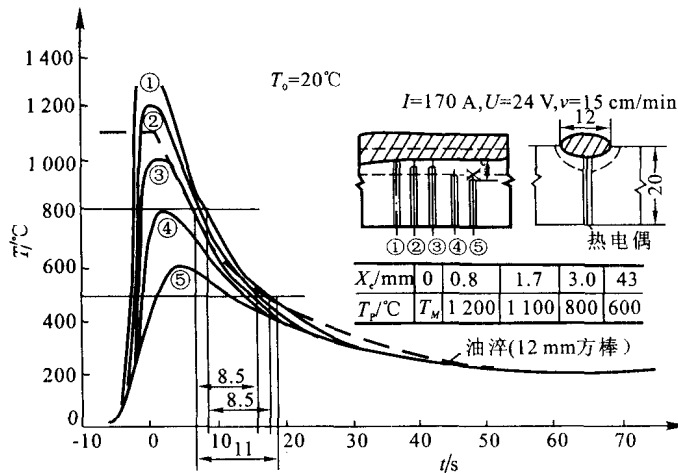


图 1-7 低合金钢堆焊焊缝邻近各点的焊接热循环
(t —电弧通过热电偶正上方时算起的时间)

与一般热处理相比,焊接时的加热速度非常快,但在峰值温度停留的时间(即保温时间)非常短促,只有几秒到十几秒的时间,冷却速度也相当快。这是焊接热循环所具有的重要特征,也是造成焊接接头组织不均匀性和性能不均匀性的重要原因。

1.3.2 焊接热循环的主要参数

根据焊接热循环对组织性能的影响,主要考虑以下四个参数(见图 1-8)。

一、加热速度(ω_H)

焊接条件下的加热速度比热处理条件下要快的多,并随加热速度的提高,则相变温度也随之提高,同时奥氏体的均质化和碳化物的溶解也越不充分。因此,必然会影响到焊接热影响区冷却后的组织与性能。

加热速度与许多因素有关,例如不同的焊接方法、焊接线能量、板厚及几何尺寸,以及被焊金属的热物理性质等。

二、加热的最高温度(峰值温度, T_m)

金属的组织 and 性能除受化学成分的影响之外,主要与加热的最高温度 T_m 和冷却速度 ω_c 有关。例如低碳钢和低合金钢焊接时,在熔合线附近的过热区,由于温度高(1 300 ~ 1 350 $^\circ\text{C}$)、晶粒发生严重长大,从而使韧性严重下降。

三、在相变温度以上的停留时间(t_H)

对于低碳钢、低合金钢,相变温度以上的停留时间是指 A_{c3} 以上的停留时间。在相变温度以上停留的时间越长,越有利于奥氏体的均质化过程和奥氏体晶粒的长大。特别是在加热的

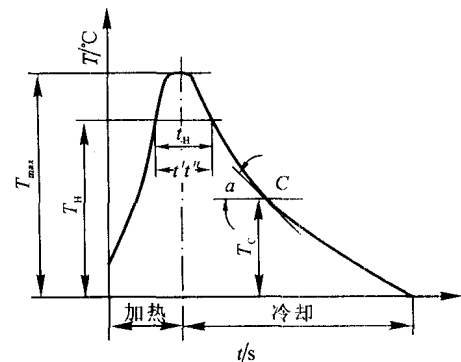


图 1-8 焊接热循环参数(T_H —相变温度)