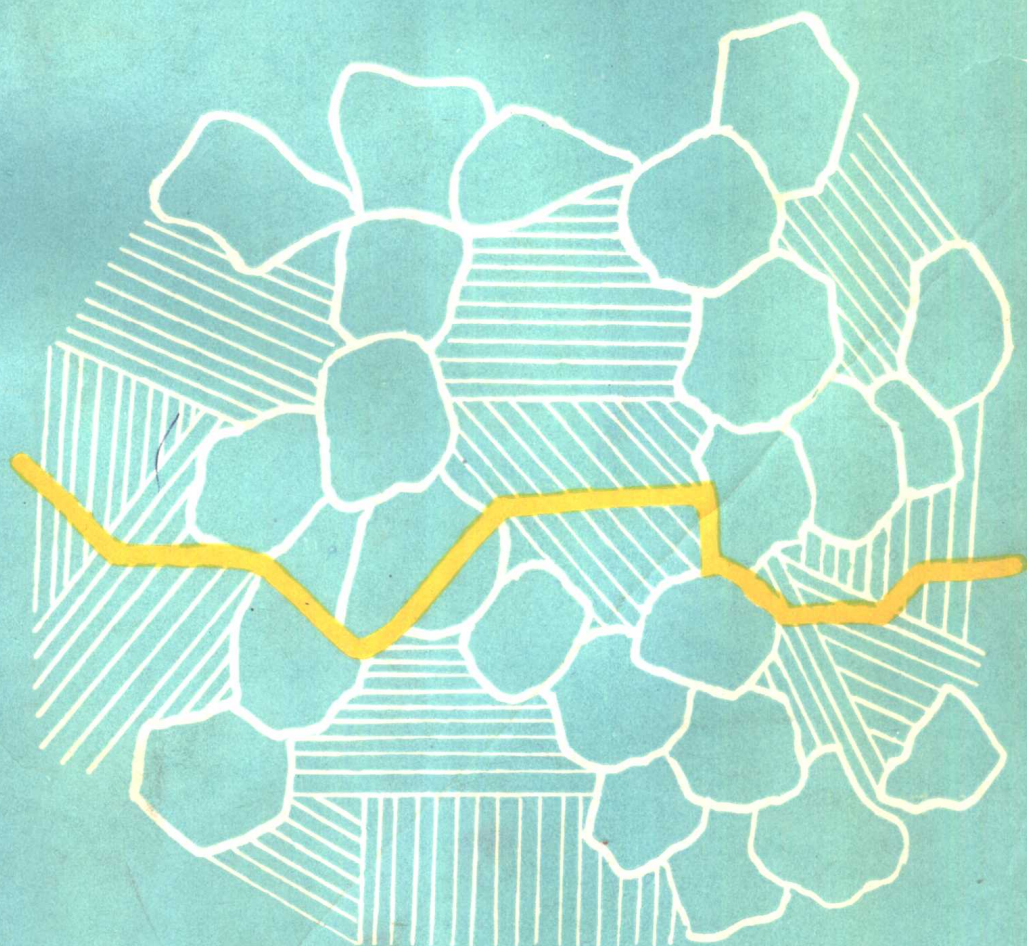


金属焊接性基础

清华大学 陈伯蠡 编



机械工业出版社

金属焊接性基础

清华大学 陈伯鑫 编



机械工业出版社

金属焊接性基础

清华大学 陈伯鑫 编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $21 \frac{1}{2}$ · 插页 18 · 字数 580 千字

1982 年 12 月北京第一版 · 1984 年 11 月北京第三次印刷

印数 14,501—19,400 · 定价 2.60 元

*

统一书号: 15033 · 5182

前 言

本书是根据一九七八年四月“高等学校一机部对口专业教材编写会议”精神决定编写的焊接专业教学参考书。金属的焊接性(可焊性)可理解为金属材料对焊接加工的适应性。主要指在一定的焊接工艺条件下,一定的金属材料获得优质焊接接头的难易程度。总的说来应包括两方面的内容:其一是接合性能,就是一定的金属在给定的焊接工艺条件下,形成焊接缺陷的敏感性;其二是使用性能,就是一定的金属在给定的焊接工艺条件下,所形成的焊接接头适应使用要求的程度。焊接性是一个相对的概念。对于一定的金属,在简单的焊接工艺条件下,就能保证不产生焊接缺陷,且具有优异的使用性能(或满足技术条件要求),则认为焊接性优良;必须采用复杂的焊接工艺条件方能实现优质焊接时,应认为焊接性相对较差。金属的焊接性,既与金属本身的材质有关,也与焊接工艺条件有密切联系。

分析研究金属焊接性的目的,在于查明一定的金属材料,在给定的焊接工艺条件下可能产生的问题及其原因,以确定焊接工艺的合理性及金属材质的改进方向。为此,必须对整个焊接过程中金属的化学成分、组织和性能的变化规律,各种焊接缺陷的形成本质及其影响因素,要加以详尽的研究。金属焊接性的研究是焊接生产中极为重要的课题之一,有着非常重要的理论意义和实际意义。

本书是作为焊接专业“金属熔焊原理及工艺”的教学参考书而编写的,所以也是以熔焊为讨论的对象。本书的目的是企图为金属焊接性的分析研究提供必要的理论基础,而不是个别的焊接性试验方法。为避免与“金属熔焊原理及工艺”一书不必要的重复,凡该书已作了详尽论述的内容,本书均从简或完全略去。本书的着眼点在于通过对所援引的一些典型实验资料的分析论述,加强对基本概念的理解,希望尽可能反映国内外的研究现状,以有助于在生产实践和科学研究中能主动地从事金属焊接性的改进工作。本书分为两大部分,第一部分为总论,概括了熔焊过程中加热、熔化、凝固和固态下相变诸过程的特点;第二部分则着重讨论了接头脆化与焊接工艺的关系,以及各类裂纹缺陷的形成条件和控制方向。

本书由清华大学陈伯蠡主编,清华大学包芳涵同志参加编写第九章及附录,主审为冶金部北京钢铁研究总院彭日辉同志,责任编辑为一机部教编室方淑卿同志。

在编写过程中得到北京钢铁研究总院等单位的大力支持,提供了许多难得的图片和资料,清华大学魏淑香同志代为制备了全书大部分图片,主审及责任编辑更作了详尽的审阅和校订加工,这些都是本书得以顺利出版的重要因素,谨向他们致以深深的谢意。此外,编写时援引了许多国内外文献资料,也在此向原作者表示谢忱。

限于编写者的水平,在全书的编写上,无论是系统的安排,内容的取舍,或观点的分析论述,肯定都有不少问题,希望读者给以指正。

本书所用名词术语代号

SMAW—手弧焊	M_f —马氏体转变终了温度
SAW—埋弧焊	B_s —贝氏体转变开始温度
MIG—熔化极氩弧焊	B_f —贝氏体转变终了温度
TIG—钨极氩弧焊	W_s —魏氏组织开始形成温度
GMAW—熔化极气体保护焊	σ_b —强度极限
GTAW—钨极气体保护焊	σ_s —屈服应力
ESW—电渣焊	δ_b —延伸率
EB—电子束焊	φ —断面收缩率
B. M. —母材	δ —裂纹张开位移(COD)
W. M. —焊缝	δ_c —临界COD
HAZ—热影响区	K_I —应力强度因子
WI—焊缝边界(熔合线)	K_{Ic} —断裂韧性
E —焊接线能量	vT_r —V形缺口冲击试验时的脆性转变温度
T_0 —预热温度	vT_{rs} —50%纤维断口的脆性转变温度, V形缺口
T_p —后热温度	vT_{r15} —15ft-lb 的脆性转变温度, V形缺口冲击
T_{max} —加热峰值温度	σ —应力
T_{ks} —晶粒急剧粗化温度	σ_{cr} —临界应力
T_R —再结晶温度	ε —应变
t_A —800°C→500°C冷却时间	T_{uc} —产生冷裂纹的上限温度
ω_c —冷却速度	SCC—应力腐蚀开裂
q —电弧热能	σ_{th} —应力腐蚀开裂的临界应力
η —热效率	E —弹性模量
I —焊接电流	vE —V形缺口却贝冲击值
U —电弧电压	vE_T —在温度 T 时的V形缺口冲击值
v —焊接速度	uE —U形缺口时的冲击值, 即 a_K
HV—维氏硬度	uE_T —在温度 T 时的U形缺口冲击值
HV _{max} —最高硬度	D —扩散系数
h —板厚	d —熔合比
λ —导热系数	d —晶粒直径
c —比热	H_0 —焊缝的初始扩散氢浓度(刚凝固完了时)
ρ —密度或比重	H_R —焊缝的残留扩散氢(焊后经过一定时间时)
A —奥氏体	H_L —接头局部地点的残留扩散氢
M —马氏体	K_0 —溶质分配系数
B_L —下贝氏体	K_e —溶质偏析度
B_U —上贝氏体	l —距离
F —铁素体	C_R —裂纹率
P —珠光体	L_c —裂纹总长度
γ — γ -Fe, 奥氏体	N —裂纹数
α — α -Fe, 二次铁素体	C_{eq} —碳当量
δ — δ -Fe, 一次铁素体	Ni_{eq} —镍当量
M_s —马氏体转变开始温度	Cr_{eq} —铬当量

目 录

第一部分 金属熔焊过程总论

第一章 焊接区的温度变化特点	1
§ 1-1 热传导的基础方程	1
§ 1-2 焊接时的温度场	3
一、数学解析的假定条件	3
二、瞬时热源的热传导过程	4
三、单道焊温度场的解析	6
§ 1-3 焊接热循环特性	11
一、焊接热循环的意义	11
二、影响热循环特性的因素	13
三、多道焊的焊接热循环	21
第二章 焊缝金属的化学组成变化	25
§ 2-1 焊缝金属的构成	25
一、焊条金属熔滴的特征	25
二、焊接熔池的特征	27
三、焊缝金属的熔合比	33
§ 2-2 焊接冶金过程特点	36
一、药皮反应区的特点	36
二、熔滴反应区的特点	37
三、熔池反应区的特点	40
四、焊接工艺条件的作用	44
§ 2-3 焊缝中的气体杂质	46
一、焊缝金属中的氧	46
二、焊缝金属中的氮	49
三、焊缝金属中的氢	57
第三章 焊缝金属的凝固	68
§ 3-1 焊缝的凝固过程特点	68
一、焊缝金属的联生结晶	68
二、焊缝树状晶的成长	70
§ 3-2 焊缝凝固组织的形态	73
一、组分过冷现象	73
二、焊缝凝固组织的形态变化	75
三、焊缝树状晶的形貌特征	78
§ 3-3 焊缝的凝固偏析	79
一、晶间偏析	79
二、层状偏析	84

§ 3-4 焊缝金属组织的控制	86
一、焊接工艺的调整	87
二、变质处理的应用	89
三、振荡结晶的效应	91
第四章 焊接接头熔合区的特性	94
§ 4-1 熔合区的构成及特征	94
一、熔合区的构成	94
二、熔合区的特征	96
§ 4-2 凝固过渡层的特性	100
一、熔合比的影响	100
二、焊条金属成分的影响	102
三、熔池存在时间的影响	103
§ 4-3 碳迁移过渡层的特性	104
一、固液相间碳分配的影响	106
二、固态相间碳的活度差的影响	107
第五章 焊接热影响区的特性	111
§ 5-1 焊接热影响区的形成	111
一、有重结晶的金属的热影响区特征	111
二、无重结晶的金属的热影响区特征	113
§ 5-2 焊接时相及组织转变的特点	116
一、钢中过冷奥氏体转变产物的 一般特点	116
二、影响过冷奥氏体转变的因素	121
三、焊接时的晶粒粗化倾向	124
四、近缝区的硬化性	129
五、焊接热影响区的软化现象	139
§ 5-3 焊件中热应力应变的影响	144
一、焊件中不均匀应力场的形成	144
二、焊接时瞬时热应力应变的特性	148
三、塑性形变对奥氏体转变的影响	155
四、焊接热影响区的热应变脆化	159

第二部分 金属焊接性若干问题

第六章 高强钢接头的脆化	165
§ 6-1 金属断裂的一般概念	165
一、断裂类型及特征	165
二、断裂韧性的概念	171

§ 6-2 焊接接头韧性的控制.....175	二、层状撕裂的形成条件279
一、接头韧性的一般特征175	§ 9-2 层状撕裂的控制.....280
二、近缝区的韧性177	一、主要影响因素280
三、焊缝金属的韧性191	二、层状撕裂的防止途径281
§ 6-3 焊接接头的韧性要求.....200	第十章 再热裂纹284
一、冲击试验的韧性要求200	§ 10-1 再热裂纹的特征及形成条件284
二、断裂力学的判据201	一、再热裂纹的特征284
三、焊缝金属与母材的适应性207	二、再热裂纹的形成条件285
第七章 焊接热裂纹210	§ 10-2 再热裂纹的控制291
§ 7-1 焊接热裂纹的特征及形成条件.....210	一、控制焊接工艺291
一、焊接热裂纹的一般特征210	二、应用低强焊缝294
二、焊接热裂纹的形成条件210	三、减缓残余应力294
§ 7-2 焊接热裂纹的控制.....216	第十一章 应力腐蚀裂纹295
一、冶金因素的作用216	§ 11-1 应力腐蚀裂纹的特征及
二、工艺条件的影响229	形成条件295
§ 7-3 近缝区热裂纹的控制.....234	一、应力腐蚀裂纹的特征296
第八章 焊接冷裂纹237	二、应力腐蚀裂纹的形成条件299
§ 8-1 焊接冷裂纹的特征及形成条件.....237	§ 11-2 应力腐蚀裂纹的控制302
一、焊接冷裂纹的特征237	一、设计与管理302
二、焊接冷裂纹的形成条件242	二、组装与焊接305
三、关于冷裂纹的形成机理259	附录 金属材料焊接性主要试验方法314
§ 8-2 焊接冷裂纹的控制.....266	一、冷裂敏感性试验方法314
一、焊接工艺的作用266	二、热裂敏感性试验方法319
二、焊接材料的选用270	三、层状撕裂敏感性试验方法321
三、紧急后热的应用274	四、再热裂纹敏感性试验方法324
第九章 层状撕裂278	五、应力腐蚀裂纹敏感性试验方法326
§ 9-1 层状撕裂的特征及形成条件.....278	六、脆性断裂试验328
一、层状撕裂的特征278	参考文献330

第一部分 金属熔焊过程总论

第一章 焊接区的温度变化特点

熔焊时,为了实现优质联接,必须有一定能量的热源在待焊接口的局部区域作用,通过加热、熔化和随后的冷却、凝固而形成焊缝。这样,焊接传热过程显然有两点特征:

热作用的集中性:焊接热源集中作用于焊件接口部位,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,一般称为温度场。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、不均匀的组织性能变化以及焊接变形等问题。

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而使该点冷却降温。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 (Quasi-Stationary State) 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。

焊接和整体均匀而又缓慢加热的一般热处理过程比较,传热过程显然要复杂得多。

实践表明,焊接接头的质量与焊接传热过程有密切联系。所以,深入研究和掌握焊接传热过程的特点及其变化规律,有很重要的意义。

§ 1-1 热传导的基础方程

确切地说明热传导的物理本质是比较困难的,但从现象上看还是易于理解的,热总是从物体的高温部位向低温部位移动,并服从傅立叶 (Fourier) 定律。

热流方向设为 n , 在与 n 垂直的单位面积的截面上在单位时间内流出或流入的热量 q_n , 应与热流方面的温度梯度 $\frac{dT}{dn}$ 成比例 (图 1-1), 以式表示之, 即为傅立叶定律;

$$q_n = -\lambda \frac{dT}{dn} \quad (1-1)$$

式中的 λ 为导热系数, 其单位为 $J/cm \cdot s \cdot ^\circ C$ 或 $cal/cm \cdot s \cdot ^\circ C$, 表示一定物质的导热能力。

一般, 物质的导热系数 λ 的数值因温度而异, 而且材料不同时, 其值随温度变化的特性也不相同, 如图 1-2 所示。

根据傅立叶定律及能量守恒定律, 可以导出任一无限大物体内部的热传导方程。设在物

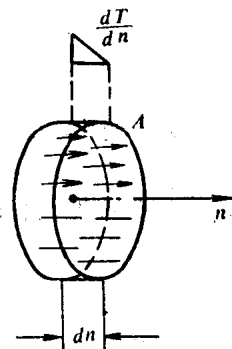


图1-1 傅立叶定律的热流

体内部取一微元体 $dV = dx dy dz$, 则在 X 、 Y 、 Z 三个方向的热流量的变化 dq_x 、 dq_y 、 dq_z , 在 dt 时间内必使微元体 dV 的热量发生变化为:

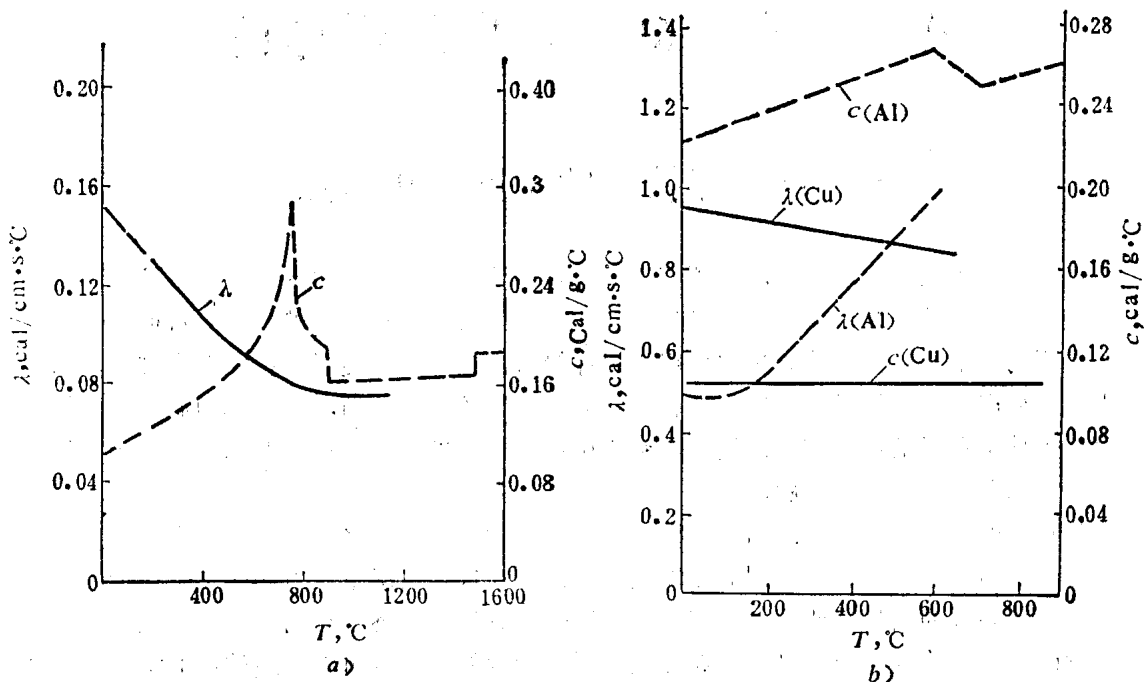


图1-2 导热系数 λ 和比热 c 与温度的关系[1]

a) 低碳钢 b) 铝及铜

$$\left. \begin{aligned} dQ_x &= -\frac{\partial q_x}{\partial x} dx dy dz dt \\ dQ_y &= -\frac{\partial q_y}{\partial y} dx dy dz dt \\ dQ_z &= -\frac{\partial q_z}{\partial z} dx dy dz dt \end{aligned} \right\}$$

则总的热量变化 dQ 为:

$$dQ = dQ_x + dQ_y + dQ_z = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) dx dy dz dt \quad (1-2)$$

而由于 dQ 的变化, 在 dt 时间内必使微元体 $dx dy dz$ 的温度发生相应变化, 其值为 $dT = \frac{\partial T}{\partial t}$

$\times dt$, $\frac{\partial T}{\partial t}$ 为温度变化的瞬时速度。已知体积热容量为 $c\rho$ 时则可得:

$$dQ = c\rho \frac{\partial T}{\partial t} dt dx dy dz \quad (1-3)$$

式中 c 为比热, 单位为 $J/g \cdot ^\circ C$ 或 $cal/g \cdot ^\circ C$; ρ 为密度, 单位为 g/cm^3 。

由傅立叶定律确定 q_x 、 q_y 、 q_z 后, 则合并式 (1-2) 及式 (1-3) 即得:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

显然, 此时只有假定 λ 为常数才能成为线性方程, 于是得到热传导基础方程:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = a \nabla^2 T \quad (1-4)$$

式中的 $a = \frac{\lambda}{c\rho}$, 称为导温系数, 单位为 cm^2/s ; ∇ 为拉普拉斯运算符号。而 $\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$ 代表了沿 X 、 Y 、 Z 轴三个二次偏导函数 $T(x, y, z)$ 之和。

$\nabla^2 T$ 表示给定点 $P(x, y, z)$ 的温度 T 对于附近点的平均温度的偏差。 $\nabla^2 T$ 具有正号时, 意味着在给定时间 t 内热是从邻近点进入给定点的; 若是负号则意味着热从给定点离开。方程 (1-4) 表示给定点的温度变化速度同拉普拉斯运算符号成比例, 换言之, 在某时刻 t , 物体上给定点 $P(x, y, z)$ 附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。

§ 1-2 焊接时的温度场

一、数学解析的假定条件

温度场以数学关系式表达之为:

$$T = f(x, y, z, t)$$

因此, 要想研究焊接时的温度场, 就应当对热传导基础方程求解。而由于焊件的尺寸形状多种多样, 焊接热源的作用情况也不尽相同等等, 如何确定边界条件来求解热传导基础方程, 存在着明显的困难, 为此不得不作出若干假定。

(一) 焊件尺寸形状概括为三种典型:

1. 半无限大物体 (图 1-3 a)—— X 、 Y 、 Z 三个方向导热无限, 厚板表面堆焊就可视为此种情况。
2. 无限大薄板 (图 1-3 b)—— X 、 Y 二个方向导热无限, 薄板对接焊接属于此种情况。
3. 无限长细杆 (图 1-3 c)——只在 X 一个方向导热无限, 钢筋之类条棒端接属于此种情况。

(二) 焊接热源一律视为瞬时作用于微元体上的集中热源, 对应于焊件形式可有三种典型的热源:

1. 点状热源——在半无限大物体中的三维导热的热源 (图 1-3 a), $T = f(x, y, z, t)$;
2. 线状热源——在无限大薄板中的二维导热的热源 (图 1-3 b), $T = f(x, y, t)$;
3. 面状热源——在无限长细杆中的一维导热的热源 (图 1-3 c), $T = f(x, t)$ 。

(三) 边界条件的规定: 半无限大物体的上表面为绝热面, 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边均与介质发生换热 (表面散热)。

(四) 相及组织转变时, 假定无潜热发生, 除焊接热源外再无其他热的来源。

(五) 焊接热源在单位时间内给出的能量 q (J/s 或 cal/s) 在整个焊接过程中保持恒定, 除固定位置的补焊或点焊外, 应保持直线等速运动。

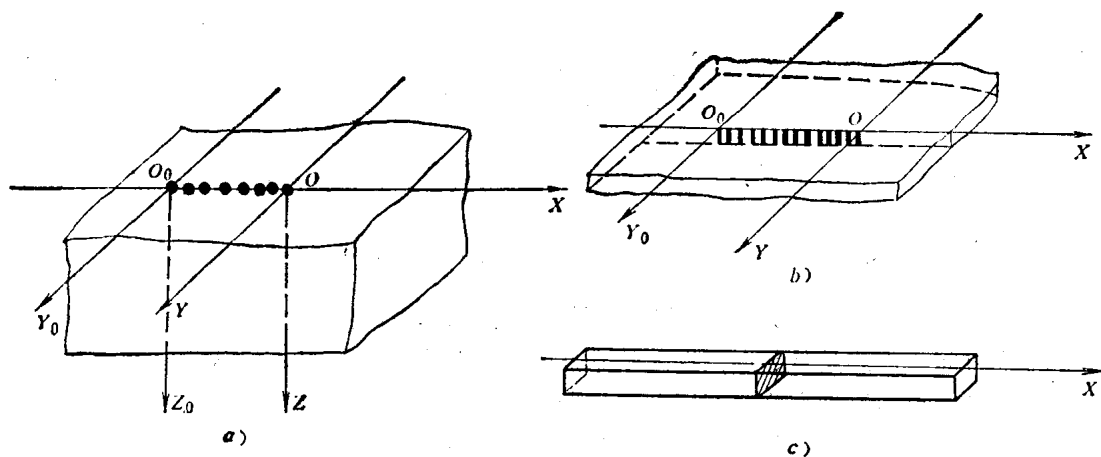


图1-3 焊件及热源形式

a) 半无限大物体, 点状热源 b) 无限大薄板, 线状热源 c) 无限长细杆, 面状热源

(六) 热源运动过程中所产生的热作用效果, 可视为相继瞬时作用于各不同点的无数集中热源作用的总和, 而多个瞬时热源相互间并不发生影响。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 $\Delta t/t \rightarrow 0$ 。

(七) 金属的热物理性质 (λ , c) 假定与温度无关而为常数。

二、瞬时热源的热传导过程

利用瞬时热源法易于求得热传导基础方程的特解。其特解的一般表达式可写成下列形式:

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

式中 r ——所研究的给定点 P 距热源作用点 O 的距离;

n ——常数 (表 1-1);

Q ——焊件瞬时获得的热能 (J 或 cal)。

表1-1 式 (1-5) 中的 r 、 n 、 Q 值

热 源	Q	n	r
点 热 源	$Q = q\Delta t$	3	$\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$
线 热 源	$\frac{Q}{h}$	2	$\sqrt{x^2 + y^2}$
面 热 源	$\frac{Q}{F}$	1	x

注: h ——薄板厚度 F ——细杆横截面积

以下我们将只讨论常见的点热源及线热源的温度场。

(一) 点热源时的特解

设在内部微元体 $dx dy dz$ 上作用一个点热源, 在 $t = 0$ 时瞬时提供有限的热能 $Q = q\Delta t$ (J)。显然, 热能是以热源作用点为中心均等地向周围传导, 则任意半径 $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ 的球面上各点的温度必相等。所以, 该球面上各点在某时刻 t 时的温度分布可

用 r 来表达。假设 $t = 0$ 时物体的初始温度为 $T_0 = 0$ ，则在 $dx dy dz$ 微元体中的热能 Q 可使微元体的温度升高到 T ，其值为：

$$T = \frac{Q}{c\rho dx dy dz} \quad (1-6)$$

在这种初始条件下，下列关系式能满足热传导基础方程，即为其特解：

$$T(r, t) = \frac{Q}{c\rho(4\pi at)^{3/2}} \exp\left(-\frac{r^2}{4at}\right) \quad (1-7)$$

若热源瞬时作用于半无限大物体的上表面（图 1-4 中的 $a b c d$ ）的一点 O ，可把此表面看作绝热面，则点 P 能受到的热作用强度必为无限大物体内部热源时的一倍，因而式 (1-7) 应改为：

$$T(r, t) = \frac{2Q}{c\rho(4\pi at)^{3/2}} \times \exp\left(-\frac{r^2}{4at}\right) \quad (1-8)$$

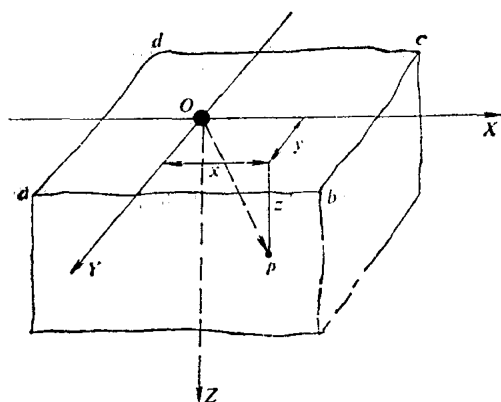


图1-4 半无限大物体的上表面的瞬时热源

利用式 (1-8) 的计算，例如图 1-5 所示。

可见，在 $r = 0$ 的原点， $t = 0$ 时， $T \rightarrow \infty$ ；

$t \neq 0$ 时，其温度 T 是按 $1/t^{3/2}$ 的规律而降

低，开始较快，随后逐步变慢。 $r \neq 0$ 的各点，在 $t = 0$ 时，均为 $T = 0$ ；在随后均温过程中，先是升温，经过最大值后又下降。其峰值温度为 $T_{\max}$ ，由 $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ 来决定，并因 r 值而异，其值为：

$$T_{\max}(r) = \frac{2Q}{c\rho\left(\frac{2}{3}\pi e\right)^{3/2} \cdot r^3} \quad (1-9)$$

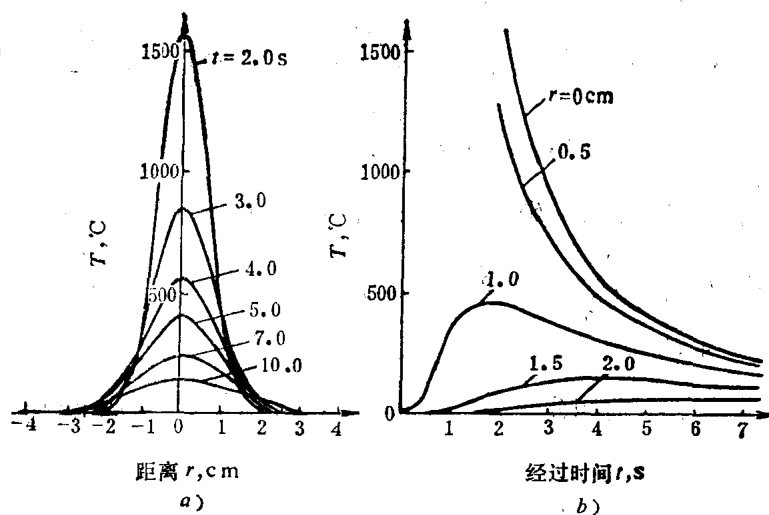


图1-5 半无限大物体表面点热源瞬时作用的温度变化[4]

达到此峰值温度的时间 t_m 为:

$$t_m = \frac{r^2}{6a} \quad (1-10)$$

显然, 离热源越近, 峰值温度越高, 且越较早到达峰值温度。

(二) 线热源时的特解

可以看作是在 Z 轴上存在无数点状热源在同时作用的情况。如单位长度的热能为 Q_1 (J/cm), 则 $Q = Q_1 dz$, 于是沿 Z 轴对式 (1-7) 进行积分, 即可求得线热源的特解。因为在有限厚度为 h cm 时, $Q_1 = \frac{Q}{h}$, 结果即为:

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

式中 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 。由此可求得线热源作用时 $r \neq 0$ 各点可能到达的峰值温度 $T_{\max}$ 及其时间 t_m 为:

$$T_{\max}(r) = \frac{Q/h}{c\rho\pi er^2} \quad (1-12)$$

$$t_m = \frac{r^2}{4a} \quad (1-13)$$

注意, 在上面的推导中均未考虑表面散热的影响。实验表明, 许多情况下忽略表面散热的影响是可以的, 其误差并不显著。

三、单道焊温度场的解析

(一) 厚件堆焊的温度场

1. 正常速度运动的情况 如图 1-6 所示, 热源移动方向与 X 轴正方向一致, 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 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来进行解析。取任一点 O' , 设在 dt' 时间内瞬时作用的热量 $dQ = 2qdt'$, 此 dQ 可使 P 点温度升高 dT , 则由式 (1-8) 可得:

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

则

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

如以热源当前所在位置 O 点为动坐标原点, 经坐标变换后, 可改写成下列形式:

$$T(R, t) = \frac{2q}{c\rho(4\pi a)^{3/2}} \exp\left(-\frac{vx}{2a}\right) \int_0^t \frac{dt''}{t''^{3/2}} \exp\left[-\frac{v^2 t''}{4a} - \frac{R^2}{4at''}\right]$$

式中 $R^2 = x^2 + y^2 + z^2$, $x = x_0 - vt$, $y = y_0$, $z = z_0$, $t'' = t - t'$

这里如设 $\xi = \frac{R}{\sqrt{4at''}}$, 将积分变数 t'' 变换为 ξ , 则上式又可变成下列形式:

$$T(R, t) = \frac{q}{\pi^{3/2}\lambda R} \exp\left(-\frac{vx}{2a}\right) \int_{\frac{R}{\sqrt{4at}}}^{\infty} \exp\left[-\xi^2 - \left(\frac{vR}{4a}\right)^2 \frac{1}{\xi^2}\right] d\xi$$

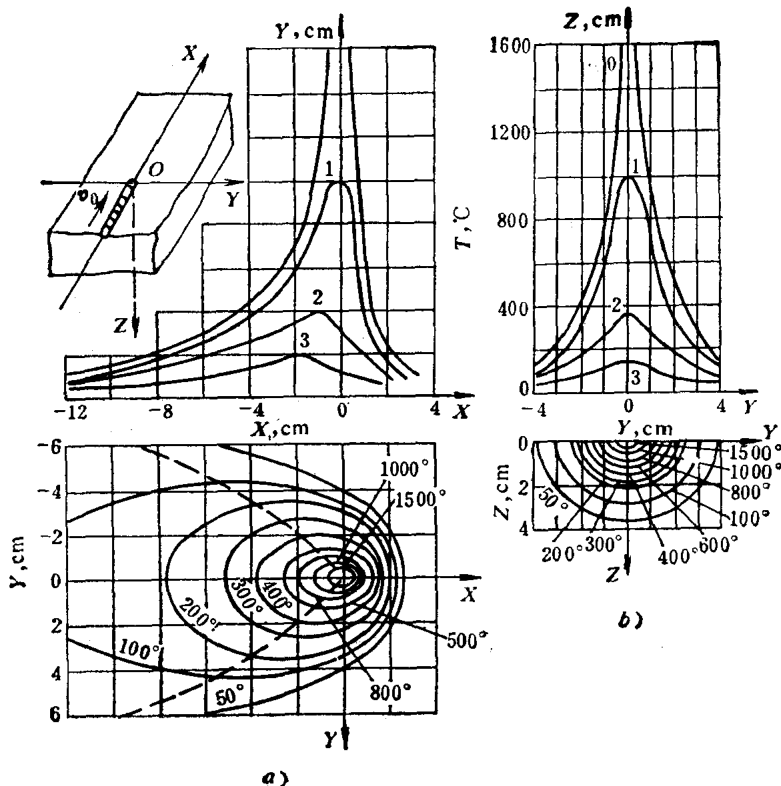


图1-7 半无限大物体表面上运动点热源的温度场[1]

$$q = 1000 \text{ cal/s}, v = 0.1 \text{ cm/s}, a = 0.1 \text{ cm}^2/\text{s}, \lambda = 0.1 \text{ cal/cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$$

$t \neq \infty$, 一定温度的等温线的形状和尺寸是否将随时间增长而增大, 则是一个问题。因为某点的温度能发生改变的条件, 或者是导进热量大于导出热量, 或者是导进热量小于导出热量。若导进的热量等于导出的热量, 即热量平衡, 则该点的温度就不应发生变化。对给定点 P 而言, 在 $t \rightarrow \infty$ 的理想条件下, 其前提是焊件尺寸无限大, 即导出热可以无限, 且各点导热条件相同 (λ 及 c 为常数); 而实际条件是焊件尺寸有限, 因而导出的热量也是有限的, 同时导热条件因 λ 及 c 有变化而发生变化。另外, 由于是运动热源, 可认为是瞬时热源在焊缝不同点相继作用, 并且由于给定点 P 所能获得的热量和距热源距离 R 成反比关系, 当 R 大于某值后, P 点即难以从该瞬时热源获得热能。因此, 热源运动期间, 不论运动时间已经多久, P 点所能得到的热量也应是有限的。在导热有限的实际焊件条件下, 导进到该点的热量在较短时间内即可与导出热量相平衡, 而达到“饱和状态”。于是, 给定点 P 的温度将仅决定于其位置, 而只能达到某一定值, 与热源的运动时间 t 不再发生关系。实践表明, 除了引弧的弧头 (引弧端) 及收弧的弧坑, 正常焊缝本体附近的点 P , 通常在 t 不大的情况下即可达到热饱和状态, 而非常接近于 $t \rightarrow \infty$ 的极限饱和状态, 这时, 其等温线形状及尺寸, 也可认为与 $t \rightarrow \infty$ 时的状态没有差别, 在焊接过程中保持稳定, 而成为准稳态。

若在实际焊接时, 焊接过程进行得很慢, 由于焊件起焊部分和收焊部分的 λ 及 c 有差别, 导出热的条件在焊接后期越来越不利, 等温线尺寸形状就可能发生一定变化。例如, 大厚件的电渣焊, 会看到上部比下部的熔透深度要大一些。

2. 高速运动时的近似解 从式 (1-15) 可以看出, 焊接参数对温度场的影响很大。首先

看一下焊接速度 v 对 1500°C 等温线形状的影响。如图 1-8 所示, 在同样 q 的条件下, 增大 v , 在 $X-Y$ 平面上的等温线形状, 横向明显变窄, 热源前方的长度缩短, 后方的长度则不变 (与 $v = 0$ 时相同)。由此可知, 焊接速度增大时, 处在 1500°C 以上的熔化区宽度将急剧减小, 成为细而短的窄条形状。

若在提高焊接速度 v 的同时, 为保持单位长度焊缝所获得的热能不变, 必须相应地提高热源的能量 q , 即

$$q = Ev \quad (\text{J/s}) \quad (1-16)$$

式中 E 称为线能量 (Energy input 或 Heat input)*, 其度量单位为 J/cm 或 cal/cm , 为作用于单位长

度焊缝的电弧能量。由于 $E = \frac{q}{v}$, 在 E 一定时, 同时增大 v 及 q , 熔化区的宽度几乎保持不变, 但其长度则显著增大, 如图 1-9 所示。可见, 当 v 足够大时, 热只能向横向传播, 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, 如图 1-10 所示, 只有热源运动到达 P 点所在截面 $M'K'L'N'$ 的点 O' 时, 才会有热能传给 P 点而使点 P 的温度发生变化。而一旦热源离开 O' 点向 O 点运动时, P 点就不可能从热源获得热能。因此, 可以把这种情形

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热传导过程。瞬时热源的热能应为 $dQ = 2qdt$ 。当热源离开点 O' 经 t 秒钟后到达点 O 时, 点 P 的温度变化可利用式

(1-11) 求得。以动坐标点 O 为原点, 因 $dQ/dx = \frac{2q}{v}$, 即得:

$$T = \frac{q/v}{2\pi\lambda t} \exp\left(-\frac{r^2}{4\lambda t}\right) = \frac{E}{2\pi\lambda t} \exp\left(-\frac{r^2}{4\lambda t}\right) \quad (1-17)$$

式中 $r = \sqrt{y^2 + z^2}$,

$$t = \frac{x}{v}.$$

式 (1-17) 对于焊缝附近的温度场的计算是适用的。

(二) 薄板熔透对接的温度场

* 直译为“输入能量”或“输入热量”。

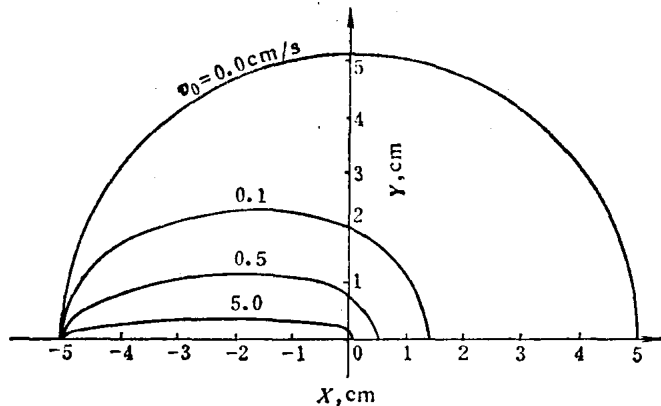


图1-8 焊接速度 v 对 1500°C 等温线形状的影响 [4]
($q = 20000 \text{ J/s}$)

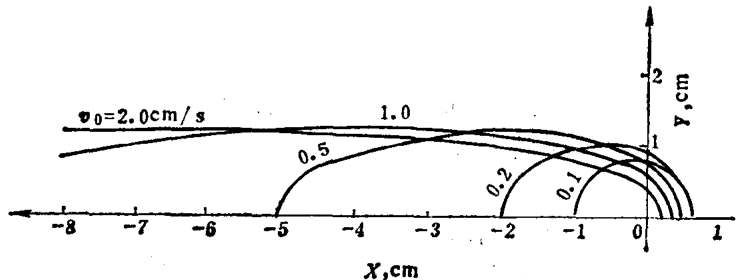


图1-9 线能量一定 ($E = 40000 \text{ J/cm}$) 时, 焊接速度对 1500°C 等温线形状的影响 [4]

解析过程完全同点热源的情况。从实用的角度出发,我们将只列出高速热源的近似解。当焊速相当大时,由于热能只能横向传播,因而可把线状热源看成是面状热源在矩形杆中的瞬时作用,则其近似解为:

$$T = \frac{q/vh}{2(\pi\lambda c\rho t)^{1/2}} \exp\left(-\frac{y^2}{4at}\right)$$

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

(1-18)

同式(1-17)一样,式中的 t 也是从热源到达所求点 P 所在截面时开始算起的时间。

(三) 影响温度场特性的因素

从式(1-17)及式(1-18)可知,焊接参数和金属的热物理性质对温度场特性影响很大。

1. 焊接参数的影响 在点热源时,图1-8及图1-9已反映了焊接速度的影响。图1-11为线热源时焊接参数的影响。

焊接速度 v 的影响,见图1-11 a,随着焊接速度 v 的提高,某一定温度的等温线所包围的范围显著缩小,表明热源作用的集中程度在显著提高。

热源能量 q 的影响,见图1-11 b,与焊接速度的影响相反,随着 q 的增大,一定温度的等温线所包围的范围显著增大,尤其在长度方向。

线能量 E 为常数时,同时

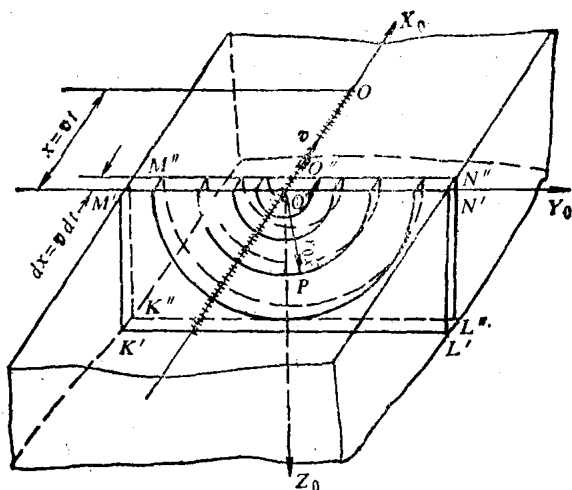


图1-10 高速运动点热源的传热模型

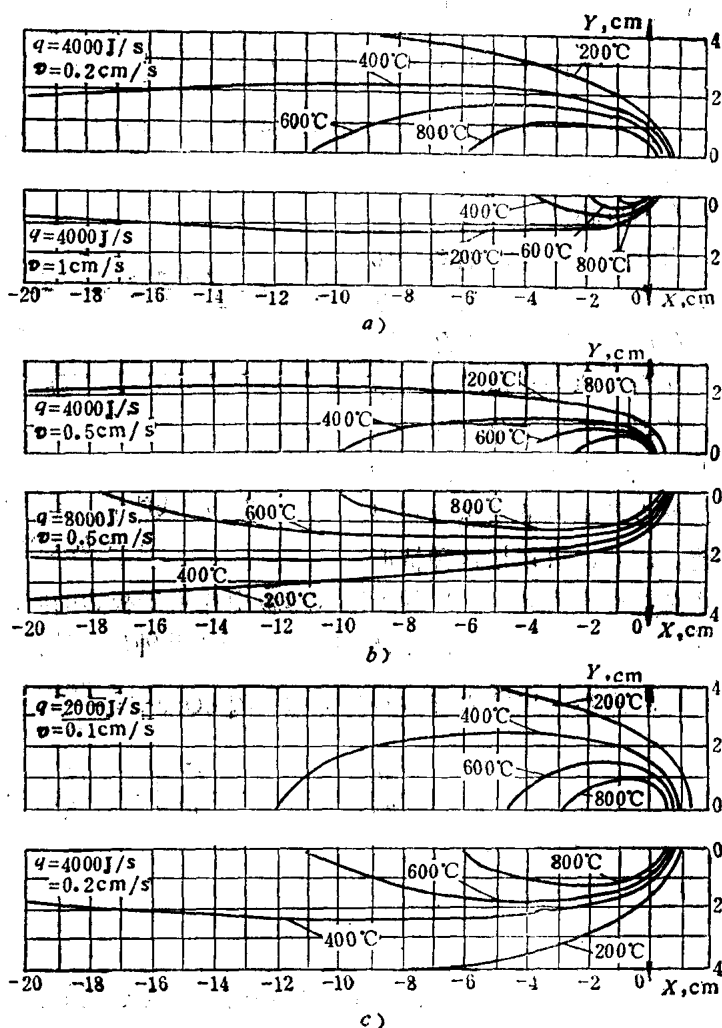


图1-11 焊接参数对温度场的影响[5] (线状热源)