

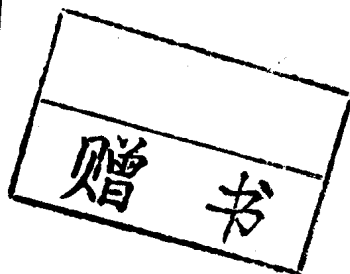
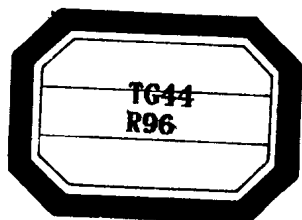
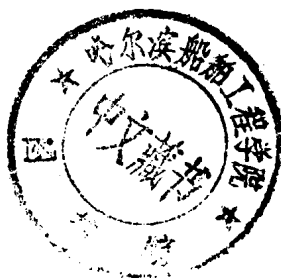
419826

焊接工工艺学

芮树祥 忻鼎乾 编



00419826



哈尔滨工程大学出版社

出版说明

随着造船工业与科学技术的飞速发展,先进造船方法、造船技术得到越来越广泛的应用。为了提高船舶建造质量,缩短造船周期,必须全面提高劳动者素质,通过岗位培训培养一大批高级技术工人是迎接船舶工业更大发展的需要。船舶总公司为了推动船厂高级工培训的开展,组织了船厂五大工种(船体装配工、船舶钳工、船舶管铜工、船舶电工、电焊工)高级工培训教学计划与教学大纲的制订工作,并根据教学计划、教学大纲组织了教材的编写工作。在教育先进、生产效益好的三大船厂(沪东造船厂、大连造船厂和江南造船厂)聘请主编开展教材编写工作,这套教材从现在起将陆续出版。

这套高级工教材在内容上具有以下特点:

1. 教材内容与中级工培训相衔接,并能满足《中华人民共和国工人技术等级标准(船舶行业)》的要求;
2. 教材内容体现先进性,已经在我国采用的先进的造船方法、造船技术和造船工艺充实教材;
3. 贯彻理论联系实际的原则,教材内容紧密联系船厂设计、生产、管理实际,具有较好实用性;
4. 为了满足各厂培训的不同需求,增加选学内容,供各厂培训时选用。

本套高级工教材可供船厂有关工种高级工培训时使用,也可供船厂干部、工人自学时参考,有些先进内容或资料可供高校、中专有关专业的学生参考。

中国船舶工业总公司教材编审室

一九九八年六月十日

编者的话

本书是根据中国船舶工业总公司人事教育局审定的“焊接工艺学”(高级)教学大纲,在船舶总公司教材编审室领导下组织编写的,作为船舶工业系统高级焊工培训教材。

本书在编写过程中,按照教学大纲的教学内容和教学要求,注重了理论联系实际的原则,紧密结合船舶工业生产实际与教学实际,使教材尽量体现先进性与超前性。书中大部分内容系编者40余年来,在从事船舶建造焊接工艺的工作中,对各种高效焊接工艺进行研究和试验所取得的科研成果、对大桥和高层建筑大型钢结构的焊接工艺研究成果及对焊工培训教育中所积累的资料进行整理编写而成的。

本书的第五章、第七章和第八章由沪东造船厂芮树祥同志编写;第一章至第四章、第六章和第九章由沪东造船厂忻鼎乾同志编写。最后由上海船厂高级工程师吕文坤审定。

本书在编写过程中参阅了众多的文献资料,在此,向被借鉴的参考书作者表示诚挚的谢意。

由于编者学识水平和生产实践经验的局限,书中难免有错误和取舍不当之处,恳请广大读者给予批评和指正。

编者

目 录

第一章 焊接电弧的热传导和温度场	1
第一节 焊接热过程概述.....	1
第二节 焊接温度场及其分类.....	8
第三节 焊接热循环	13
第二章 焊接接头的金相组织和性能	16
第一节 焊接接头的宏观组织	16
第二节 焊接时加热过程的组织转变	19
第三节 焊接时冷却过程的组织转变	22
第四节 焊接热循环对焊接热影响区的组织和性能的影响	25
第五节 焊前预热、层间温度和焊后热处理	33
第三章 焊接性试验和工艺认可试验	37
第一节 金属焊接性	37
第二节 热裂纹的特征、形成条件及其控制	39
第三节 冷裂纹的特征、形成条件及其控制	42
第四节 再热裂纹的特征、形成条件及其控制	48
第五节 层状撕裂的特征、形成条件及其控制	50
第六节 金属焊接性试验	53
第七节 焊接工艺认可试验	67
第四章 焊接设备	75
第一节 对弧焊电源的要求	75
第二节 弧焊电源的选择	83
第三节 弧焊逆变器	89
第四节 CO ₂ 半自动焊机	95
第五节 交直流两用多头组装式弧焊整流器.....	106
第六节 气电垂直自动焊机.....	109
第七节 双丝埋弧自动焊机.....	115
第五章 金属材料的焊接	120
第一节 低合金结构钢的焊接.....	120
第二节 耐热钢的焊接.....	141
第三节 不锈钢的焊接.....	148
第四节 异种钢的焊接.....	160
第五节 铜及铜合金的焊接.....	174
第六节 铝及铝合金的焊接.....	192

	第六章 高效焊接技术	213
	第一节 高效焊接.....	213
	第二节 手工衬垫单面焊.....	219
	第三节 CO ₂ 气体保护半自动单面焊.....	222
	第四节 气电垂直自动焊.....	230
	第五节 多丝埋弧自动单面焊.....	235
	第七章 金属结构的焊接	254
	第一节 梁、柱的焊接.....	254
	第二节 压力容器的焊接.....	269
	第三节 海洋工程管结构焊接.....	276
	第四节 高效焊接技术在船体结构中的应用.....	279
	第八章 焊接接头质量	287
	第一节 焊缝的焊前检验.....	287
第	二节 焊缝缺陷特征.....	289
	第三节 焊接接头表面质量要求和检验方法.....	295
	第四节 焊缝内部质量要求.....	301
	第九章 焊接接头的强度计算和破坏	310
	第一节 焊接接头的静载强度和性能.....	310
	第二节 焊接结构的脆性断裂.....	318
	第三节 焊接结构的疲劳断裂.....	325
	附录 常用电焊机型号代表字母	331

第一章 焊接电弧的热传导和温度场

第一节 焊接热过程概述

焊接过程的实现必须从外界提供足够的热能（或机械能等）。由于焊接时所采用的能源的方式不同，导致各种焊接方法所经历的过程有很大的差别。如对于钢铁材料的熔化焊来讲，一般都要经历加热、熔化、冶金反应、结晶、固态相变及形成接头等过程。可见熔化焊时其过程是很复杂的。它可归纳为三个互相交错进行，而彼此联系着的局部过程，即焊接热过程、焊接冶金化学过程及焊接时金属的结晶和相变过程。焊接过程示意图见图 1-1 所示。

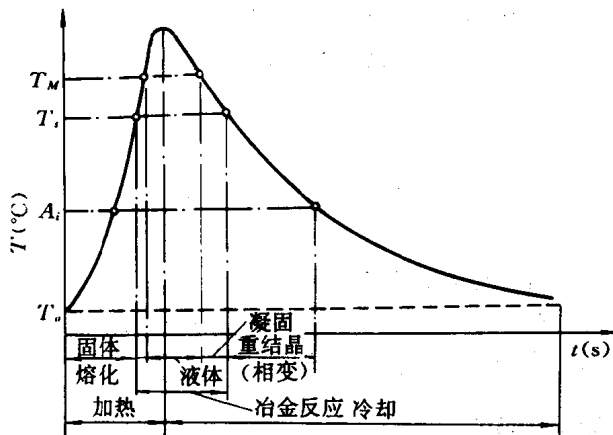


图 1-1 焊接过程示意图

T_M —金属熔化温度（液相线）； A_1 —钢的 A_1 变态点；

T_s —金属凝固温度（固相线）； T_0 —初始温度

一、焊接热过程

熔化焊时，被焊金属在热源作用下，将产生加热和局部熔化的过程，这样在被焊金属中，必然存在着热量的传播和分布问题，这一过程则称为焊接热过程。它贯穿着整个焊接过程的始终，也就是说，一切焊接物理化学过程都是在热过程中发生和发展的，它直接决定着焊接质量和焊接生产效率。

（一）焊接热过程的特点

焊接过程的传热问题现正处在研究之中。其特点主要表现在以下三个方面。

1. 焊接热过程的局部性

焊接热过程的局部性即工件在焊接时的加热只是在热源直接作用下的区域，加热极

不均匀，显然要比工件整体热处理条件下的均匀受热复杂得多。

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，也即要在很短时间内，由热源把热能传递给工件。

3. 焊接传热过程的不稳定性

由于焊接传热过程中的热源是相对运动的，焊接时工件的受热区域在不断变化，就使得这种传热过程呈不稳定状态。

(二) 焊接热过程的影响因素

1. 从焊接的全过程来看

工件被加热的特征，首先决定于热源的性质、功率和作用时间；其次是金属熔池处在高温时，进行一系列物理化学反应的程度与加热的温度、熔池存在时间有密切的关系。也即除了成分对冶金反应有直接影响外，还有热的作用。另外，焊后焊接接头热影响区的组织及其分布特征也都与热源的性质有关。

2. 从焊接的质量来看

焊缝和近缝区金属组织的变化，除金属本身的冶金因素之外，还决定于热的分布、加热时间和冷却速度。由于焊接接头受到不均匀的加热和冷却，也必将产生不均匀的应力状态，并与冶金因素的共同作用，甚至可以产生各种形态的裂纹，所以对焊接接头的质量影响很大。

3. 从焊接生产率来看

若要提高焊接生产率，就必须设法提高基本金属和焊条金属的熔化速度，而熔化速度又取决于热的作用。

从上述分析可以看出，焊接过程的传热问题是十分复杂的。但尽管如此，长期以来人们在焊接生产实践中，总是希望更多地认识和掌握传热过程的基本规律。这是因为焊接热过程对焊接质量和焊接生产率具有重要的影响。

二、焊接能源的种类及其特征

焊接过程必须由外界提供相应的能源才能实现，也即有能源存在是实现焊接的基本条件。按焊接过程中所采用的能源性质，可分为电能、机械能、化学能、光能及超声波能等。

(一) 电能

电能是金属联接技术中用得最广的能源，其利用形式包括：电弧、电阻、热辐射、感应及能束等。

1. 电弧

电弧是一种气体放电现象。利用在气体介质中放电过程所产生的热能作为焊接热源，是目前应用较广泛的一种。

2. 电阻

利用电流通过导体时（金属或液态熔渣）产生的电阻热作为焊接热源。包括：电阻焊及电渣焊等。

3. 热辐射

利用电流通过电热丝时所产生的热辐射来加热工件。包括：烙铁焊及炉焊。

4. 感应

利用高频电流通过感应线圈时，所产生的高频电磁场，在工件中产生感应电流而被加热。包括：高频电阻焊及高频钎焊等。

5. 能束

在真空中利用高压高速运动的电子猛烈轰击被焊金属，使电子的动能变成熔化金属的热能作为焊接热源。如电子束焊。

(二) 机械能

用机械能联接金属时，是通过锤击、顶压和摩擦等主要手段，使接头金属发生塑性变形，有效地破坏结合面上的金属氧化膜，并在外力作用下实现金属间的联接。如锻焊、冷压焊、扩散焊和摩擦焊等。

锻焊、冷压焊是在室温条件下，对工件金属间施加很大的压力，使其产生相当大的塑性变形后得到牢固的联接。

扩散焊是把两个接触的金属件，加热到低于固相线的温度 $T_{\text{焊}} = (0.7 \sim 0.8) T_{\text{熔}}$ ，并施加一定压力，使工件产生一定的显微变形，经过较长时间后，由于金属接触面原子相互扩散而使之牢固的联接。

摩擦焊是在两个工件的焊接端面上，施加一定的轴向压力。并通过机械摩擦产生的热，使接触面加热到一定的温度时，急速停止运动，并施加适当的顶锻压力，使工件间产生一定的塑性变形，从而把两工件牢固地联接。

(三) 化学能

化学能是利用两种或两种以上物质化学反应所产生的能量作为焊接热源来实现金属的联接。如气焊、热剂焊和爆炸焊等。

1. 气焊

气焊是利用可燃气体与氧气混合燃烧的火焰所产生的高热熔化工件和焊丝进行金属的联接。常用的可燃气体有乙炔、氢、丙烷和丁烷等。其中乙炔在纯氧中燃烧时放出有效热量最多，火焰温度也最高，

2. 热剂焊

热剂焊是利用两种或两种以上物质化学反应所产生的热量作为焊接热源，同时又利用反应金属生成物作为填充材料进行金属间的联接，如铝热焊。

3. 爆炸焊

爆炸焊主要是利用炸药爆炸释放的化学能作为焊接热源。当炸药爆炸瞬间，将产生剧烈的化学反应，并产生大量的气体和高温（约 3000°C 以上），且局部压力达 $27 \times 10^3 \text{MPa}$ 。这种高温高压气体在周围介质中迅速膨胀，压缩其周围的介质，形成冲击波。为此，爆炸焊就是利用爆炸形成的冲击波和化学能，实现金属间的联接。

(四) 光能

用作焊接热源的光能包括：激光、红外光、白炽光及太阳光等。

1. 激光

激光焊是利用经聚焦产生能量高度集中的激光束，作为热源加热工件使其熔化，然后冷却、凝固达到金属间的的联接。

2. 红外光

红外光具有较强的穿透能力，红外线钎焊的热源就是利用大功率石英灯作红外线辐射器，所发出的红外线经抛物面反射镜聚光，将红外线束投向工件钎焊面进行金属间联接。

3. 白炽光

用氙弧灯发出的白炽光，也可用作焊接热源。即在椭圆形反射器的第一焦点位置放氙弧灯光源，发出的强烈光线经反射镜聚光，在第二焦点形成高能密度的光束，工件放在第二焦点上，利用光辐射能转变成的热能加热工件，进行金属间的联接。

4. 太阳光

利用抛物镜来聚焦太阳光，也可以将太阳光辐射能转变为热能加热工件，进行金属间联接。

(五) 超声波能

超声波能是一种高频的弹性机械振动。超声波焊是利用超声换能器（磁致伸缩型和压电型），通以高频交流电时，它就能将高频的电振动转变成同频率的机械振动，使工件间发生超声频率摩擦，消除金属接触面的表面氧化膜，同时在接触界面处产生大量热，使工件间发生塑形变形，并在外力作用下，进行金属间的联接。其焊接过程是工件表面在超声波和静压力作用下，经过强烈的摩擦和塑性变形之后，所发生的金属键结合。

三、焊接过程的热效率

焊接过程中由能源所产生的热量，并不是被全部利用，而是有一部分热量损失于周围的介质和飞溅等，即工件吸收到的热量少于能源所提供的热量。

(一) 电弧焊时的热效率

电弧焊过程中，若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：

$$q_0 = UI$$

式中 U ——电弧电压 (V)；

I ——焊接电流 (A)；

q_0 ——电弧功率，即电弧在单位时间内所析出的能量 (J/s)。

由于能量未能完全利用在加热工件上，故有效用于加热工件的功率为

$$q = \eta_e UI$$

式中 η_e ——加热过程功率有效系数或称热效率。

在一定条件下 η_e 是常数，它主要取决于所使用的焊接方法、焊接规范和焊接材料的种类，现将一般情况下，不同焊接方法的 η_e 值，列于表 1-1 中。

表 1-1 不同焊接方法的 η_e 值

焊接方法	药皮焊条手工电弧焊	埋弧自动焊	CO ₂ 气体保护焊	熔化极氩弧焊	钨极氩弧焊
η_e	0.65~0.85	0.80~0.90	0.75~0.90	0.70~0.80	0.65~0.70

同样焊接方法，焊条药皮或焊剂的成分不同、焊接电流的变化，都对 η_e 值会有一些影响。另外，电流种类与极性、焊接速度以及焊接位置等对热效率 η_e 值也有影响，但并不显著，一般可忽略不计。

厚药皮焊条手工电弧焊和埋弧自动焊时热源的热量分配可参见图 1-2。

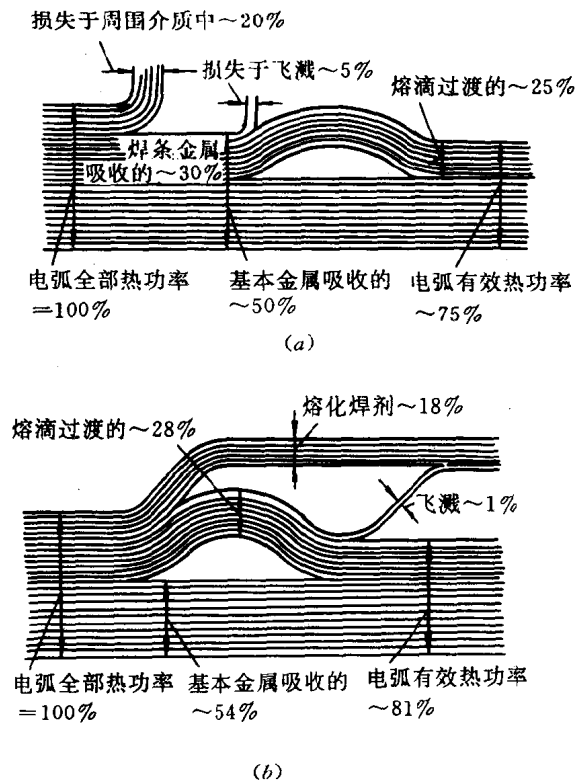


图 1-2 电弧焊时的热量分配

(a) 厚药皮焊条手工电弧焊 ($I=150\sim 250A, U=35V$);

(b) 埋弧自动焊 ($I=1\ 000A, U=36V, v=36m/h$)

(二) 电渣焊时的热效率

电渣焊过程中，由于渣池处于厚大工件的中间，使热能直接向外散失相对很少，而主要损失于强制焊缝成形的冷却滑块，且工件越厚，则被滑块带走的热能比例越小，也即电渣焊时，板厚越大，热效率越高。图 1-3 所示为 90mm 厚板电渣焊时的热量分配情

况,其热效率可高达 80% 以上。由于电渣焊时的焊接速度较慢,在熔化金属的同时,大量的热地向工件传导,因而这些能量不能得到合理的使用,同时导致接头的热影响区过宽,晶粒粗大。

(三) 电子束焊时的热效率

电子束焊是在真空中进行,由于热源的特点是能量十分集中,因此它的能量损失很少,其热效率可达 90% 以上,其大部分电子的动能都转变成热能。

(四) 激光束焊时的热效率

激光束焊时工件加热的机理不同于电子束焊。它照射工件表面时,一部分被吸收,另一部分被工件表面反射,其吸收与反射的比例与材料种类及其表面状态有关。一般只要能量被吸收就能被充分利用,所以能量的损失极少。

四、工件上加热区的热能分布

热源把热能传递给工件是作用于一定的面积上。对于焊接电弧来讲,这个面积称为加热斑点。它又可分为活性斑点区和加热斑点区(见图 1-4)。

(一) 活性斑点区

活性斑点的直径为 d_A , 带电质点集中轰击该斑点的面积,而把电能转为热能。电流密度 J 的变化,见图 1-4 虚线所示。

(二) 加热斑点区

加热斑点的直径为 d_H , 该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 1-4 中可以看出,焊接时加热区的热量分布是不均匀的,中心多而边缘少。在电流密度不变的情况下,电弧电压越高,则中心与边缘的热量相差得越小;若电弧电压不变,当电流密度越大时,则加热斑点中心与边缘热量分布的差别就越大。根据研究证明,在加热斑点上的比热流,即单位时间内通过单位面积进入工件的热量分布,可近似地用高斯数学模型来描述,如图 1-5 所示。

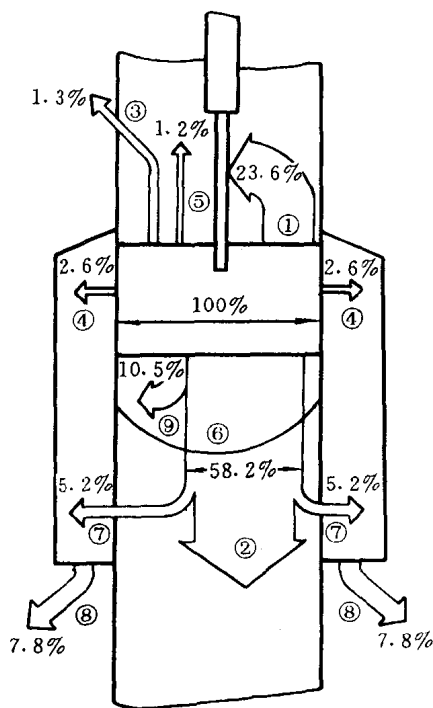


图 1-3 90mm 厚板电渣焊时的热量分配
1—消耗于焊丝熔化的热量; 2—向工件传导的热量; 3—辐射于工件边缘的热量; 4—渣池损失于滑块的热量; 5—辐射损失于周围介质的热量; 6—用于熔化工件的热量; 7—熔池损失于滑块的热量; 8—冷却水带走的热量; 9—用于熔池过热的热能

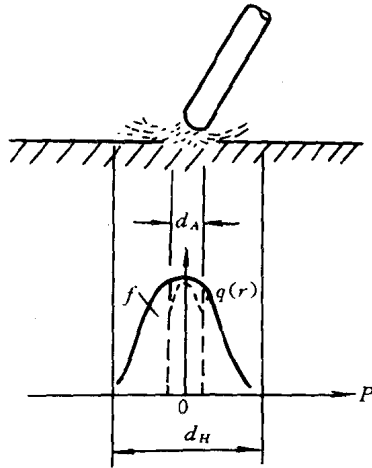


图 1-4 焊接电弧作用下的加热斑点

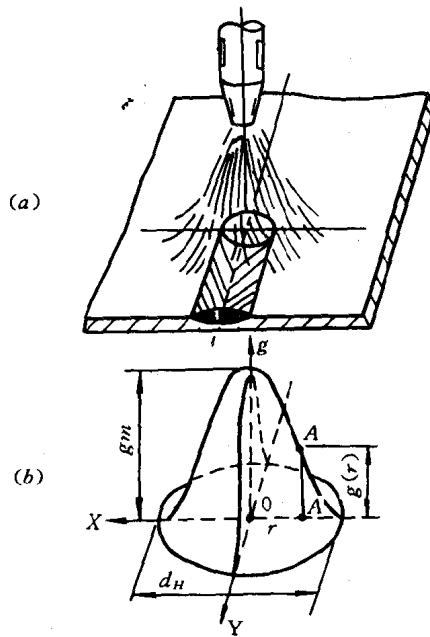


图 1-5 加热斑点上比热流的分布
 (a) 热源在工件上的作用；(b) 比热流分布模型
 $q(r)$ — A 是的比热流 (W/cm^2)；
 q_m —加热斑点中心的最大比热流 (W/cm^2)；
 r — A 点距加热斑点中心的距离 (cm)；
 d_H —加热斑点的直径 (cm)

第二节 焊接温度场及其分类

焊接过程中，热的传递可分为三种基本形式，即传导、对流和辐射。而根据研究结果认为，由热源传递给工件（除电阻焊和摩擦焊以外）主要是以辐射和对流为主，而工件和焊条获得热能之后，热的传播是以热传导为主。由于焊接热过程所研究的内容，主要是工件和焊条上热量分布的规律性，因此，研究焊接传热过程是以热传导为主，但也适当考虑对流和辐射的作用。

一、焊接温度场的特征

焊接时，被焊工件中各点的温度每一瞬时都在变化着，但这种变化是有规律的。我们把某一瞬时工件上各点温度的分布称为焊接温度场。它与磁场和电场有类似的概念，可以用数学的关系把它表示出来，即

$$T = f(X, Y, Z, t)$$

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；

t ——时间坐标。

焊接传热理论主要就是研究温度场的分布特征及其规律性，焊接温度场的分布情况可用等温线或等温面来研究。所谓等温线或等温面就是把工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。而各个等温线或等温面不能彼此相交，而它们彼此间存在着温度差，其大小可用温度梯度来表示，如图 1-6 所示。与 X 轴线相交的各个等温线彼此温度不同，如沿法线方向两相邻的温度为 T_1 和 T_2 ，而温度梯度为 $(T_1 - T_2) / \Delta s$ 。应该指出，不同的方向可能有不同的温度梯度。

当工件上温度场各点的温度不随时间而变化时，则称它为稳定温度场；随时间而变化的温度场称为不稳定温度场。在绝大多数情况下，工件上的温度场是随时间而变化的，因而工件上的温度场是属不稳定温度场。

当恒定热功率的热源作用在工件上时，开始一段时间内的温度场是变化的，但经过相当一段时间后，便呈饱和状态，形成暂时稳定的温度场。我们把这种情况称为准稳定温度场。这也是在正常焊接过程中，必然产生的一种现象。当一个具有恒定功率的焊接热源，在一定的尺寸工件上做匀速直线移动时，经过一定时间后，工件上就会形成准稳定温度场。此时，工件上每一点的温度，虽然都随时间而改变，若各点温度能跟随热源一起移动时，则发现这个温度场是与热源以同样的速度移动的。如果采用移动的坐标系，坐标的原点与热源的中心相重合，则各点的温度就取决于这个系统的空间坐标，而与时间无关。

二、焊接温度场的分类

根据工件的形状和尺寸，温度场可分为三维的（三向传热）、二维的（两向传热）和一维的（单向传热），如图 1-7 所示。对于厚大工件在其表面进行堆焊，就把它的温度场

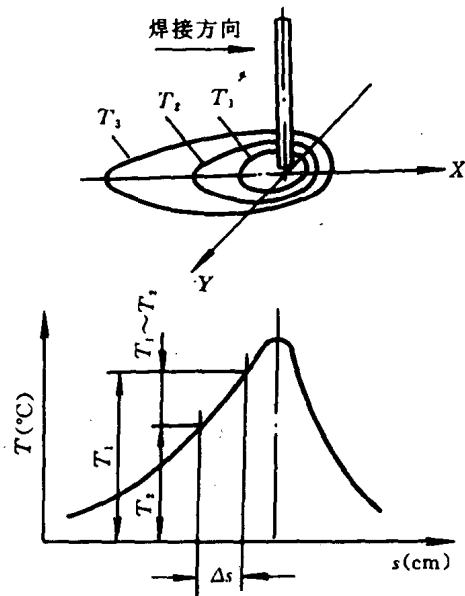


图 1-6 温度场中的等温线和温度梯度

看作是三维的 (图 1-7 (a)), 这时可把热源看成是一个点热源, 热的传播是呈三个方向 (X、Y、Z)。

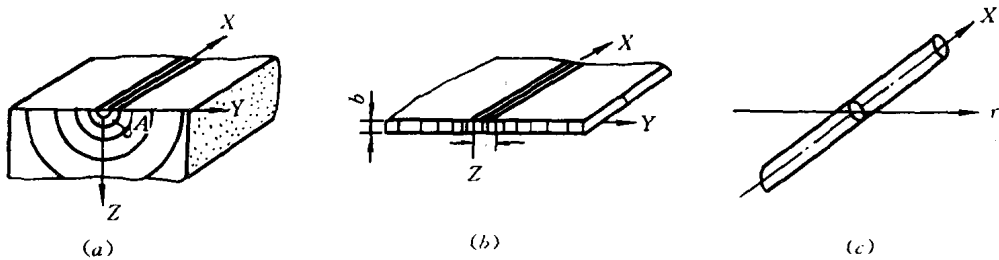


图 1-7 温度场的分类

(a) 三维温度场; (b) 二维温度场; (c) 一维温度场

对于一次焊透的薄板其温度场可看成是二维的 (图 1-7 (b))。这时认为热能均匀分布在板的厚度上, 即板厚方向没有温差, 把热源看成是沿板厚的一条线热源, 热的传播是呈两个方向 (X、Y), 沿平面进行。

细棒对接焊时, 焊条的加热其温度场均是一维的 (图 1-7 (c))。如果在细棒截面上的分布是均匀的, 如同一个均温的小平面进行热的传播 (面热源), 此时传热方向只有一个方向 (X)。

三、影响焊接温度场特性的因素

影响焊接温度场特性的因素很多，包括热源的性质及焊接规范参数、被焊金属的热物理性质、工件的形态以及热源的作用时间和移动速度等。

(一) 热源的性质及焊接规范参数

不同性质的焊接热源焊接时，如电弧焊、气焊、电渣焊、电子束焊、激光焊等，其温度场的分布也不同。如气焊时，热源的作用面积较大，其温度场的范围也较大；而电子束焊时，热能相当集中，其温度场的范围很少。

同样的焊接热源，当焊接规范（主要是热源的功率 q 和焊接速度 v ）改变时，对温度场的分布也有很大的影响。以低碳钢焊接为例：当 q 为常数时，随着焊接速度的增加，等温线的范围变小，即温度场的宽度和长度都变小；当 v 为常数时，随着热源的功率增大，等温线的范围也增大。另外，若 q/v 保持定值，同比例地改变 q 和 v 时，则此时会使等温线拉长，因而使温度场的范围也相应扩大。

(二) 被焊金属的热物理性质

同样形状和尺寸的工件，在相同热源的作用下，因被焊金属的热物理性质不同，也会产生不同的温度场。各种金属的主要热物理性质包括：导热系数（ λ ）、比热（ c ）、容积比热（ cp ）、导温系数（ a ）、热焓（ s ）以及表面散热系数（ α ）等。

1. 导热系数（ λ ）

导热系数表示金属导热的能力。其物理意义是沿法线方向在单位时间内，单位距离相差 1°C 时，经过单位面积所传过的热能。导热系数并不是一个不变的常数，当金属的化学成分、组织及温度不同时，则导热系数也要改变。对于纯铁、碳钢和低合金钢来讲，导热系数随温度的升高而下降；而高合金钢（不锈钢、耐热钢等）的导热系数，则随温度的增加而增加（见图1-8）。从图中可以看出，在常温时，各种钢的导热系数相差很大，但随着温度的增加，它们几乎趋向一致。当温度在 800°C 以上时，各种钢的导热系数均在 $0.25\sim 0.34\text{W}/(\text{cm}\cdot^\circ\text{C})$ 之间。

2. 比热（ c ）

一克物质每升高 1°C 所需的热能称为比热。各种金属具有不同的比热，而同样金属当温度变化时，比热也发生很大的变化，特别在磁性变态附近（纯铁为 768°C ）变化很大。这是因为钢铁随温度的不同，则组织结构也在改变。为方便起见，一般在应用时常采用平均值。对于低碳钢在焊接条件下选取的平均比热为 $0.652\sim 0.756\text{J}/(\text{g}\cdot^\circ\text{C})$ 。

3. 容积比热（ cp ）

单位体积的物质每升高 1°C 时所需的热能称为容积比热。它同样也是温度的函数，容积比热大的金属温度升高缓慢；一般低碳钢在焊接条件下选取的平均容积比热为 $4.83\sim 5.46\text{J}/(\text{cm}^3\cdot^\circ\text{C})$ 。

4. 导温系数（ a ）

是表示温度传播的速度，它与导热系数和容积比热的关系是 $a = \frac{\lambda}{cp}$ （ cm^2/s ）。导温系数也是随温度的变化而改变的。低碳钢在焊接条件下选取的平均导温系数约为 $0.07\sim$

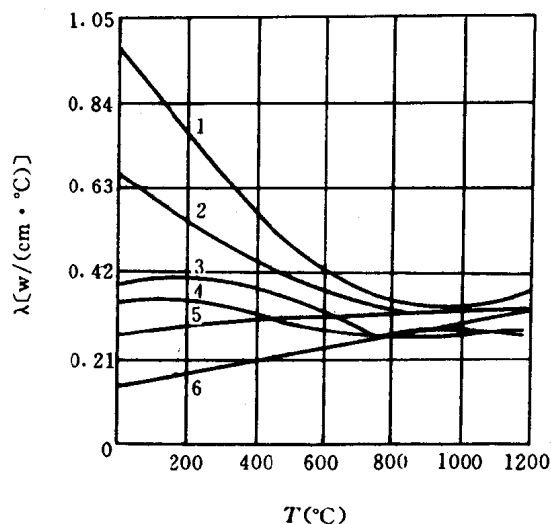


图 1-8 各种钢导热系数与温度的关系

- 1—纯铁；2—低碳钢 ($c=0.1\%$)；3—中碳钢 ($c=0.45\%$)；
 4—低合金钢 ($C_r=4.98\%$)；5—高铬钢 (1Cr13)；
 6—奥氏体不锈钢 (18-8型)

0.10cm²/s。

5. 热焓 (s)

一克物质加热到1°C时所吸收的热能。也即在某温度下，一克物质所含有的热能。对于低碳钢加热到熔化温度时 (1 530°C)，其热焓约为 1 331.4J/g。

6. 表面散热系数 (α)

是指散热体表面与周围介质每相差1°C时，通过单位面积在单位时间内所散失的热能，即表示金属散热的能力。根据实验得知，在焊接过程中所散失的热能，主要是通过辐射，而对流的作用很小。另外，由于散热而损失的热能，不但因温差而增大，且温度越高时，则散热系数也越大。因此，当工件的散热表面较多时 (如薄板焊接)，就必须考虑因表面散热而对温度场分布的影响。

综上所述可以看出，这些热物理常数都是随温度而变化的。在焊接时温度的变化急剧，这是研究焊接热过程的主要困难。但一般作为定性粗略计算，可采用热物理常数的平均值 (见表 1-2)。由于各种金属热物理性质的不同，特别是导热系数和容积比热，会使温度场的分布发生很大的变化。如在薄板焊接时，在同样的焊接规范条件下，只是被焊金属不同，其温度场分布的差异也很大。当焊接导热性较差的铬镍奥氏体钢时，某一温度的等温线范围 (如 600°C) 比低碳钢焊接时，相同等温线的范围要大。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。相反，焊接铜和铝时，由于这些金属的导热性很高，所以必须选用比焊接低碳钢更大的线能量才能保证质量。

表 1-2 某些金属热物理常数的平均值

名称	符号	单位	焊接条件下选取的平均值			
			低碳钢	不锈钢	铝	紫铜
导热系数	λ	W/(cm·°C)	0.378~0.504	0.168~0.336	2.65	3.78
比热	c	J/(g·°C)	0.652~0.756	0.42~0.50	1.0	1.22
容积比热	$c\rho$	J/(cm ³ ·°C)	4.83~5.46	3.36~4.2	2.63	3.99
导温系数	$a = \frac{\lambda}{c\rho}$	cm ² /s	0.07~0.10	0.05~0.07	1.00	0.95
热焓	s	J/g	(0~1 530°C) 1 331.4	—	—	—
表面散热系数	α	J/(cm ² ·s·°C) × 10 ⁻³	(0~1 500°C) (0.63~37.8) × 10 ⁻³	—	—	—

(三) 工件的几何尺寸和状态

工件的几何尺寸和状态(导热及环境温度等),对传热及传热过程有重大影响,因而也就影响温度场的分布。如图 1-9 (a) 所示,对于厚大工件,其热源作用在 $Z=0$ 的表面 O 点上,传热方向为 X 、 Y 、 Z (空间传热)。由于这种情况下热源作用的特征属于点状,故热的传播为半球形。根据大量实验认为,厚度为 25mm 以上的低碳钢,或 20mm 以上的不锈钢工件,在手工电弧焊的条件下,可视为厚大工件。

如图 1-9 (b) 所示,对于薄板其热源的特征为线状,传热方向为 X 、 Y (平面传热)。厚度为 8mm 以下的低碳钢板,或 5mm 以下的不锈钢板,在手工电弧焊条件下,可视为薄板。

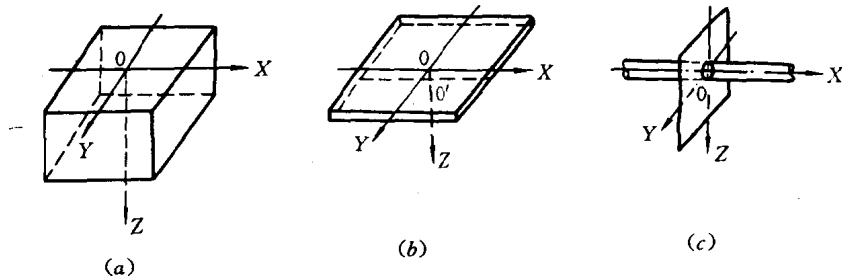


图 1-9 工件的几何尺寸对温度场分布的影响

(a) 厚大工件; (b) 薄板; (c) 细棒

如图 1-9 (c) 所示,对于细棒其热源的特征为面状。传热方向仅 X (线性传热)。在焊接时焊条的加热、接触对焊等均属细棒。

此外,接头型式、坡口形状、间隙大小以及焊接规范和操作工艺等对温度场的分布均有影响。

(四) 热源的作用时间和移动速度

热源的作用时间可分为瞬时作用热源和连续作用热源两类。而在连续作用热源中又