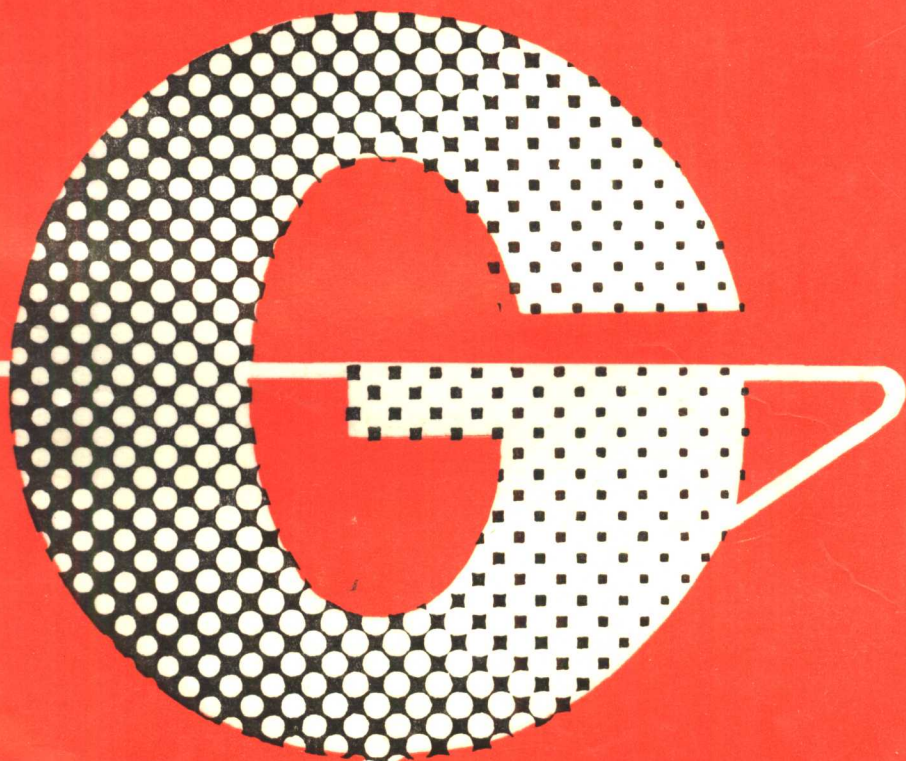


普通高等专科学校教育机电类规划教材

熔 焊 原 理



沈阳工业高等专科学校
承德石油高等专科学校

吴晓清
张连生

主编

机械工业出版社

前 言

熔焊原理是焊接专业的主干课程之一,它不仅需要论述金属材料在熔焊条件下的有关化学、物理冶金的基础知识,而且应当密切联系焊接生产实际,具有直接为工程应用服务的性质。

作为统编教材,本书根据高等工程专科学校培养目标及1991年10月全国高等工程专科学校焊接专业教学研讨会所制定的计划和教学大纲编写,依次讨论了熔焊热过程、金属与气体及熔渣的液相冶金、焊丝与焊条及焊剂等焊接材料、熔池的凝固冶金、热影响区组织和性能的控制,诸焊接裂纹的生成机理与倾向评估及防治等。编写时注意了教学原则和教学实践方面的要求。同时力图突出高等工程专科的特点,尤其是工程应用性。论述中不追求旁证博引,不作过多纯理论学术的探讨。仅力求重点清晰,阐明必要的物理实质及客观规律,并能以之指导实际,与焊接实践密切联系。更希冀能使读者提高具体工作能力和解决现场工程问题能力,于涉及焊接领域工作的同志有所裨益,诸如工艺拟定、规范选取、缺陷防治、性能改善等。

本书由沈阳工业高等专科学校吴晓清同志任主编,承德石油高等专科学校张连生同志任副主编。其中第二章由沈阳工业高等专科学校张桂兰同志和哈尔滨机电高等专科学校胡琨同志合写;第三章由承德石油高等专科学校张连生同志编写;第五章由沈阳大学张宁同志编写;第六章由沈阳工业高等专科学校吴晓清同志和段志刚同志合写,其余由沈阳工业高等专科学校吴晓清同志编写。由辽阳石油化工高等专科学校张德生同志主审。

本书在编写过程中搜集了众多数据资料,谨向诸作者致以衷心谢意。

尽管编者作了努力,但是限于水平,时间仓促,定多纰缪,敬望读者指正。

编 者

1993年7月

目 录

前言

绪论 1

第一节 本课程的意义和任务 1

第二节 焊接的物理实质 2

第三节 金属熔焊的主要方法 4

第一章 电弧焊热过程 8

第一节 焊接接头的温度变化和热源

特征参数 8

一、焊接热循环 8

二、焊接热源特征参数 9

第二节 焊接温度场 11

一、焊接温度场的一般特征 11

二、影响温度场的因素 14

三、热影响区的宽度 16

第三节 焊条的加热和熔化 18

一、焊条的加热热源和温度 18

二、焊条的熔化率和熔敷截面 19

第二章 熔焊液相冶金 22

第一节 熔焊液相冶金概述 22

一、熔焊液相冶金的特点 22

二、对焊接区金属的保护 25

三、液相冶金过程的主要阶段和反

应区 27

四、熔合比和焊缝金属成分的估算 30

第二节 气体与金属的作用 32

一、概述 32

二、氮对金属的作用 36

三、氢对金属的作用 39

四、氧对金属的作用 43

第三节 焊接熔渣 46

一、熔渣的作用 46

二、熔渣的种类及成分 46

三、熔渣的结构 48

四、熔渣的性质 50

第四节 焊接时的氧化还原反应 53

一、元素氧化物的分解压——元素

对氧亲和力的判据 53

二、焊接时的氧化反应 53

三、焊接时的脱氧 59

第五节 焊缝金属的合金化 62

一、焊缝金属合金化的途径 62

二、合金元素的过渡系数 63

三、对过渡系数的影响因素 64

第六节 焊缝中硫和磷的控制 65

一、焊缝中硫的危害和控制 65

二、焊缝中磷的危害和控制 67

第三章 焊丝、焊条和焊剂 68

第一节 钢焊丝 68

一、实芯焊丝 68

二、药芯焊丝 70

第二节 钢焊条 71

一、焊条的组成 71

二、焊条的牌号及型号 75

三、焊条的工艺性能 78

四、典型药皮焊条的性能分析 82

五、焊条的配制 87

六、焊条的选用与管理 90

第三节 焊剂 92

一、焊剂的分类、型号与牌号 92

二、焊剂的成分、性能和选用 96

第四章 焊接凝固冶金 100

第一节 熔池金属结晶的特点、一般

规律及结晶组织形态 100

一、熔池金属结晶的特点 100

二、熔池金属结晶的一般规律和结

晶组织形态 101

第二节 焊缝金属的偏析 112

一、树枝晶偏析 112

二、区域偏析 113

三、层状偏析 114

四、熔合区的化学成分不均匀性 115

第三节 焊缝中的夹杂 116

一、夹杂的存在形式及危害 116

二、夹杂的产生及消除 116

第四节 焊缝中的气孔	118	一、焊接裂纹的种类及其主要特征	157
一、气孔的基本成因及危害	118	二、焊接裂纹试验方法	160
二、能生成气孔的气体	118	第二节 焊接热裂纹	161
三、气孔的生成过程	121	一、结晶裂纹的一般特征和生成机理	161
四、防治气孔的措施	123	二、结晶裂纹的防治	165
第五章 焊接热影响区	127	三、其它热裂纹	171
第一节 焊接热循环	127	第三节 焊接冷裂纹	173
一、焊接热循环的主要参数	128	一、冷裂纹的一般特征和生成机理	173
二、多层焊接热循环的特点及控制	129	二、冷裂纹的防治	180
第二节 焊接热影响区冷却速度和冷却时间的计算	131	第四节 层状撕裂	191
一、冷却速度的计算式及其应用	131	一、层状撕裂的一般特征及生成机理	191
二、冷却速度和冷却时间的线算图	133	二、层状撕裂的防治	195
三、冷却速度或冷却时间的影响因素	135	第五节 再热裂纹(应力消除裂纹)	197
第三节 焊接热循环条件下金属的组织转变特点	136	一、再热裂纹的一般特征和生成机理	197
一、焊接加热过程的相变特点	137	二、再热裂纹的防治	198
二、焊接冷却过程的相变特点	137	第六节 应力腐蚀裂纹	199
三、焊接条件下SHCCT图及其应用	139	一、应力腐蚀裂纹的一般特征及生成机理	199
第四节 焊接热影响区的组织和性能	142	二、应力腐蚀裂纹的防治	200
一、焊接热影响区的组织分布	142	附录	203
二、不同钢种的焊接热影响区组织特征举例	146	附录一、焊接钢丝标准(GB1300—77)	203
三、焊接热影响区的性能	149	附录二、二氧化碳气体保护焊用焊丝(GB8100—87)	204
第六章 焊接裂纹	157	附录三、焊条药皮材料技术条件	205
第一节 概说	157	附录四、国内外焊条标准对照表	208
		主要参考文献	210

绪 论

第一节 本课程的意义和任务

焊接是现代工业生产中最重要加工工艺之一，它已经广泛用于制造和修理各种结构和设备。焊接作为一种降低成本、提高生产效率的有效手段，用它不仅可以得到优质、可靠的工件，而且可以创制出原则上完全新颖的产品。大如航空航天和核动力装置，小至微电子以及超精密器件，如果没有焊接技术，很难想像将会遇到多少困难，甚至无法制造出来。因此完全可以说，没有焊接就没有今天这样的现代工业，焊接为今天这样的现代文明起到了它应有的作用。

焊接的加工对象不仅有各种各样的金属，而且还可以是诸如塑料、碳纤维、工程陶瓷、半导体等等的非金属材料，但是应用最多的还是各种金属结构的焊接。

本课程——熔焊原理，是焊接专业的专业基础课程之一。金属熔化焊接的目的，是将金属零件通过加热熔化形成永久性的接头，并且具有符合使用要求的各种性能。焊接过程中的加热熔化，必然会对被焊金属(所谓“母材”)和填充金属产生一系列冶金和热应力作用，包括导致它们的成分变化、组织改变和膨胀收缩等，并从而可能产生像气孔、裂纹、夹渣之类的缺陷，或者使接头的力学性能和理化性能等达不到要求。因此不难理解，一个焊接接头的性能质量如何，不仅涉及母材和填充金属等原始材料，而且还在极大程度上取决于焊接过程中的物理化学反应或者冶金反应。以手弧焊为例，所用的填充金属即焊条，其焊芯成分不一定与母材成分相互一致。对于不同的母材材料，例如钢、铝、铜等，焊接它们所用焊条的焊芯以及药皮彼此可截然不同。即使是同样的母材，如果所用焊条的药皮类型不同，得到的焊接接头性能也不会一样。而且在同样的母材用同样的焊条焊芯和药皮来施焊的情况下，如果焊接工艺条件不同，例如工件处理、周围气氛、规范参数等有异，所获焊接接头的性能质量仍不相同。由此可见，要掌握和应用焊接这项技术，就必须懂得焊接过程中的诸相应基本冶金规律。

所谓焊接接头，实际上包括焊缝、熔合区和热影响区几个部分。有人把毗邻热影响区的母材也包括其中(图0-1)。电弧焊时，焊缝通常由填充金属(焊条、焊丝等)和母材共同组成。熔合区是焊缝与热影响区相交接的过渡地区，又称半熔化区。熔合区的宽度很窄，但其成分可与两侧的焊缝和热影响区各有差别，并可存在较大的化学和物理不均匀性。热影响区是受到焊接热作用而使组织性能发生变化的母材部分。由于热影响区各点所受的热作用视地区而异，因此其性能也将因所在部位而不同。

从材质角度，金属焊接接头的性能最终取决于其化学成分和组织情况。本课程的主要任

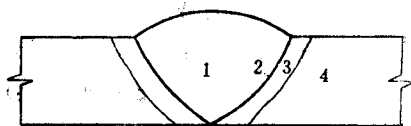


图0-1 焊接接头组成示意

1—焊缝 2—熔合区 3—热影响区
4—母材

务就是研究金属材料在熔焊条件下其成分和组织性能变化的普遍规律，并在此基础上阐述常用的焊接材料和气孔、裂纹等主要焊接缺陷。其中热过程是共性基础。焊接材料的知识更多是基于焊缝金属的液相冶金和凝固冶金。谈到整个焊接接头的性能质量时，热影响区是不可缺的。本课程一方面是为其它专业课奠定基础；另一方面也为制定合理焊接工艺、提高焊接质量，解决有关工程实际问题提供依据。学习过程中应着重在应用。

为了便于讨论，本课程中一般以手弧焊接低碳钢或低合金高强钢为主要讨论对象，但在需要时也将涉及其它焊接方法和待焊材料。

第二节 焊接的物理实质

以第一次世界大战和第二次世界大战为契机，焊接技术得到了飞跃发展。焊接的内在规律，也经历了一个不断深入认识的过程。但对于焊接的定义，各家说法仍不尽相同。按我国国家标准GB3375—82《焊接名词术语》，焊接是“通过加热或加压，或者两者并用，并且用或不用填充材料，使焊件达到原子结合的一种加工方法。”

众所周知，金属无论是固态或液态，都是通过金属键使其原子牢固地结合在一起的。以双原子作用模型为例，如图0-2所示，促使原子相互接近的作用来源于金属正离子与周围电子气之间的静电吸引；而促使原子彼此离开的作用则是来源于正离子相互之间和电子相互之间的排斥。见图0-2横坐标上下的二条虚线，其合成如图中的实线。由图可见，当原子之间处于某一距离 r_0 时，综合后的能位最低，属于最稳定状态。这时的原子既不会自动靠近，也不会自动离开。或者准确点说，这时的原子将围绕该平衡位置作无序热运动。

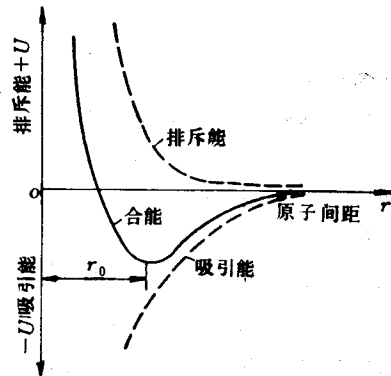


图0-2 双原子作用模型

如果所讨论的不是双原子作用模型，而是多原子系统，则每一个原子显然也必将处于周围原子共同构成的势能谷中。上述 r_0 值大小，应决定物体（金属）在一定温度下的晶格常数。对于绝大多数金属来说，晶格参数为 $(3 \sim 5) \times 10^{-8} \text{cm} = 3 \sim 5 \text{\AA}$ 。这里我们不拟进一步探讨这个 r_0 或者晶格参数和原子热运动的关系，也不拟讨论原子处于表面以及在金属中的情况。只想强调说明，如果能把两块金属的接触表面，相互靠近到距离相当于其晶格参数，也就是 $(3 \sim 5) \times 10^{-8} \text{cm}$ 的级别时，那就能够在这两块金属之间形成金属键，达到焊接的目的。但是，就目前情况而言，在其金属表面上加工所能达到的最高精度仍还有 $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{cm}$ 的凹凸不平。因此把两块金属一般地靠近时，只有极少数几点能达到上述距离，不可能获得强度。此外，金属表面通常还附着吸附的气体、氧化膜、油脂、脏垢等，这些杂质势必也要妨碍金属表面间的接合。

为使金属表面真正紧密接触，建立金属键，从而形成一体，焊接技术采用如下原则措施：

⊖ $1 \text{\AA} = 10^{-10} \text{m}$.

(1) 施加压力 该压力应足以使金属表面的凸出处产生塑性变形, 破坏其间的杂质, 增加有效接触面积, 进而克服能栅。

(2) 给予加热 该热量用以降低金属的变形阻力, 加速扩散过程, 促进重结晶或再结晶, 得到可靠的接头, 以至使金属熔化、熔合。

所施加的压力和加热的温度, 实际上就是焊接过程的主要工艺参数。对于不同的金属, 上述两项参数之间的关系是不同的。以表面没有杂质的工业纯铁为例, 这种关系示于图0-3。图中 $ABCDE$ 为焊接所需的最低相应压力—温度关系曲线。因此该曲线上面是焊接区, 能得到性能近于母材的接头; 曲线下面则是非焊区, 不能进行焊接或只能得到性能很低的接头。图中二条垂直虚线把焊接区又分成三个温度区。如果金属的加热温度 $T < T_1$, 实现焊接所需的压力极大, 实际上很难采用, 因此可以称作限焊区; 当所加热的温度处于 T_1 和金属的熔点 T_m 之间时, 为完成焊接需要外加压力 P , 此压力并随温度的升高而减小。这个区称作压焊区, 相应的焊接方法称作压力焊或压焊。在温度超过金属熔点 T_m 的区域, 金属处于熔化状态, 不需要外加压力即可实现焊接 ($P = 0$)。这个区称为熔焊区, 相应的焊接方法即熔化焊或熔焊。

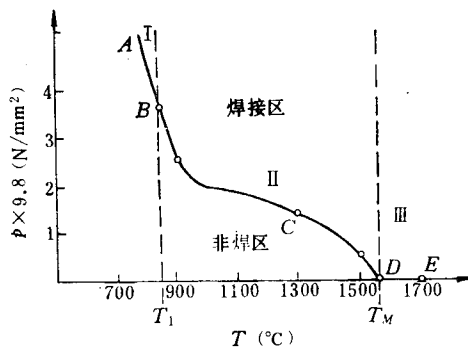


图0-3 焊接工业纯铁时所需温度与压力之间的关系

I—限焊区 II—压焊区 III—熔焊区

熔焊时, 热源将工件待焊端面部分的母材以及填充金属熔化成熔池 (见图0-4a的虚线部分)。同时熔池中的液态金属充分浸润熔池壁的高温固态金属, 两者相互紧密接触。待热源离开, 温度降低, 液态金属进行凝固结晶, 形成焊缝时, 即和熔池壁的固态金属长成共同晶体, 称作联生结晶 (图0-4b和c), 成为原子结合的接头。在高温作用下, 金属中还进行着扩散过程。

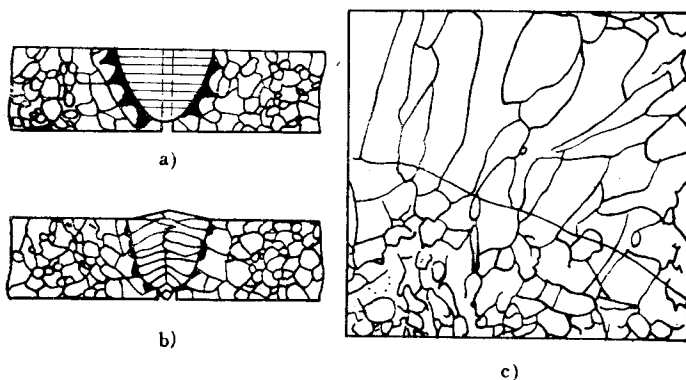


图0-4 熔焊接头示意

a) 形成熔池 b) 形成焊缝和接头 c) 熔合区的联生结晶, 形成共同晶体

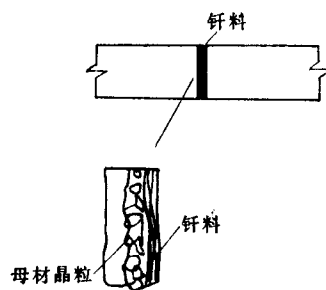


图0-5 钎焊接头示意

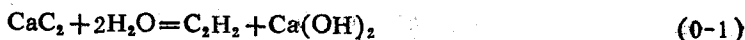
工业上通常也把钎焊作为焊接技术的一个分支。但是, 钎焊和焊接二者的实质并不相同。钎焊时填充接头间隙的金属——钎料, 在钎焊时熔化, 而接合处的母材因加热温度低于

其熔点，故仍保持固态（图0-5）。因此，在一般情况下钎料与母材之间很难生成共生结晶的公共晶粒，只能形成固溶体或者化合物，或者无扩散连接（粘着）。后者类似于粘接。

第三节 金属熔焊的主要方法

焊接方法可以根据不同的特征来分类。例如，可以根据焊接区金属的状态把焊接方法分成熔焊和压焊两大类；也可以根据焊接的机械化程度分成自动焊、半自动焊和手工焊；或根据焊接所用能量分成如图0-6所示的机械能焊、化学能焊、电焊等。几种常用的熔焊方法简述如下：

气焊 气焊是应用较早的一种焊接方法。它利用氧气与可燃气体燃烧所生成的火焰作为热源，使母材和填充金属熔化进行焊接。用于焊接金属的可燃气体中最常用的是乙炔（ C_2H_2 ）。乙炔可由碳化钙加水制取：



氧—乙炔焰的气体构成及不同火焰种类时的温度分布，见图0-7。在其内焰中进行乙炔（或受热分解的碳粒子和氢）的不完全燃烧：

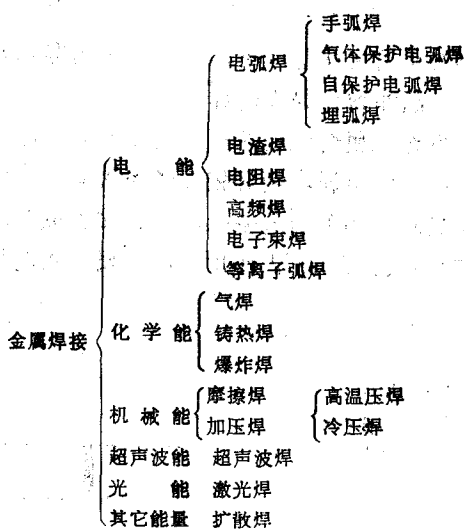


图0-6 根据能量常用焊接方法的分类

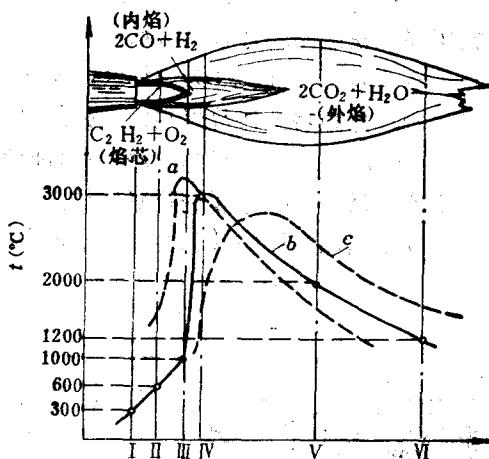
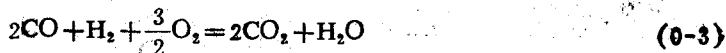


图0-7 氧—乙炔焰的气体构成及温度分布
a—氧化焰 b—中性焰 c—碳化焰

然后在外焰中气体藉空气中的氧完全氧化：



由此可见，当焊接区处于内焰中时，不仅能获得较高温度，而且还原性的气氛还能对液态金属起保护作用。较之于电弧焊，气焊的火焰温度低（氧—乙炔焰约达3000℃），热源不够集中，因而生产效率低，构件变形大，只能满足一般要求，但是工作机动灵活方便。目前多用于焊接修复和一些薄钢板、有色金属、铸铁等的焊接。

加压气焊 加压气焊也是用气体火焰作热源，是在加压的情况下对待焊端面周围进行均匀加热而进行的焊接，例见图0-8。待焊端面一般在焊前已经过机械加工，焊接时待焊端

面可以熔化，也可以不熔化、后者纯为压焊。加压气焊可用于铁筋、管件、钢轨等的焊接。

手弧焊 手弧焊即手工操纵焊条进行焊接的电弧焊接方法，也是目前应用最广泛的焊接方法。焊条由焊芯和药皮二部分组成。在焊条与工件之间产生的电弧，发出热量使焊条与母材熔化。焊条一方面用作电极；另一方面作为填充金属和熔化的母材共同构成焊缝(图0-9)。药皮经加热熔化后形成的熔渣和产生的气体，能使熔融金属或焊接区得到机械保护和冶金处理，其详情将在以后阐述。手弧焊的最大优点是应用灵活、方便、设备简单；但与自动电弧焊相比，它的生产效率不够高，焊接质量与人(焊工)的因素关系大。

需要说明的是，用焊条进行的电弧焊接并不局限于手弧焊。例如**重力焊接**就是一种用焊条进行的机械电弧焊接方法(图0-10)。

如果用碳(石墨)棒作电极代替焊条来进行电弧焊接，那就是**碳弧焊**。碳电极属于不熔化电极，焊接时仅用以传导电流，产生电弧，本身并不熔化，不能作为填充金属；反之，焊接时熔化，可作为填充金属的电极(例如手弧焊用焊条)，称作熔化极。碳弧焊时，其电弧可以在碳电极与工件之间(直接电弧)或在二碳电极之间(间接电弧)燃烧。它可以是手动焊接，也可以是自动焊接。如需填充金属，可以在焊接过程中通过电弧另行加入，熔敷焊道方法和气焊相类似。

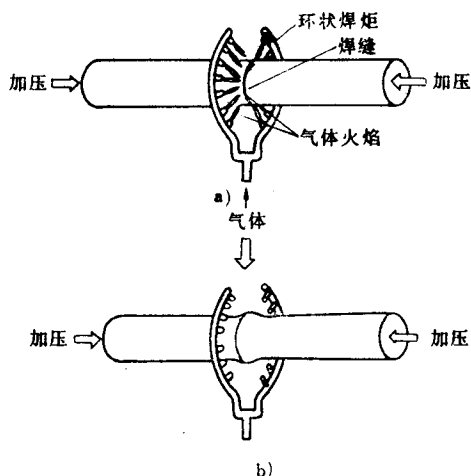


图0-8 闭法加压气焊
a) 加热过程 b) 结束过程

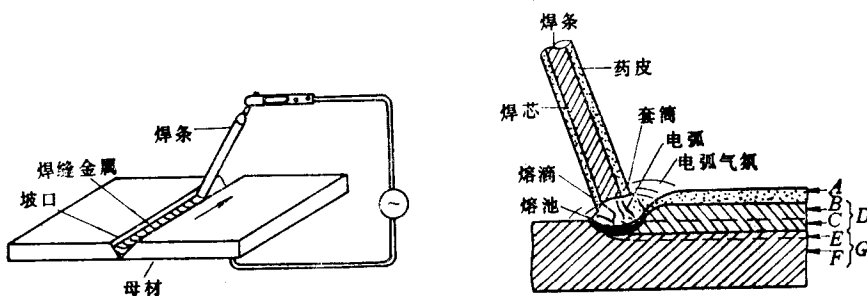


图0-9 手弧焊

A—熔渣(渣壳) B—余高 C—熔深 D—焊缝金属 E—热影响区 F—未受热影响的母材 G—母材

埋弧焊 埋弧焊常被称为焊剂层下自动焊和半自动焊。按其实质，埋弧焊并不一定是自动焊。如图0-11，母材上撒布有一层颗粒状焊剂，在焊剂层下的熔渣与工件之间产生电弧，工件熔化后形成熔池。焊丝兼作填充金属和电极，由焊机自动送入焊接区。焊剂由焊剂斗漏入，未熔部分可重复使用。电弧相对于工件的移动可以依靠机械自动进行，也可以由人工来完成。前者就是自动焊，后者为半自动焊。埋弧焊时空气很难进入焊接区，其焊接电流比用焊条的手弧焊要大得多。因此，在提高生产率的同时，焊接质量和劳动条件也得到了改善。

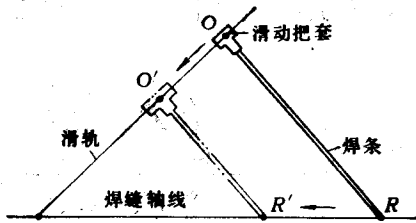


图0-10 重力焊接法

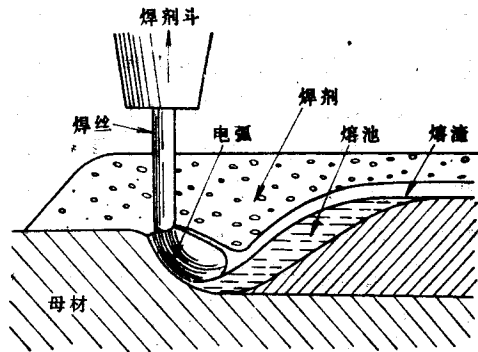


图0-11 埋弧焊

气体保护焊 气体保护焊时利用某种或某些气体作为电弧介质，并用以保护焊接区使之不和外界空气接触。所使用的保护气体种类主要有氩气、氦气、二氧化碳气，以至氢气、氮气等。其中在焊接时不与金属起作用的如氩气、氦气，是惰性气体。二氧化碳具有氧化性，属于活性气体。电极有焊接时熔化，并兼作填充金属的熔化极；和熔接时不熔化，仅有少量烧损的不熔化极两类。使用熔化极的惰性气体保护焊简称MIG焊，其惰性气体中也可以混有少许其它气体。MIG焊时，如图0-12所示，保护气体从喷嘴流入焊接区，焊丝连续不断地自动送入，电弧燃烧在焊丝与母材之间。如果保护气体为混合气体，即保护气体由惰性气体和活性气体在内的两种或两种以上的气体按一定比例混合组成，则叫做混合气体保护焊。也可以仅仅利用二氧化碳作为保护气体来焊接，这种方法叫做二氧化碳气体保护焊，简称CO₂焊。CO₂焊成本较低，近年来得到了广泛的应用与发展。

惰性气体保护焊也可以使用不熔化电极，这就是不熔化极惰性气体保护焊，简称TIG焊（图0-13）。这时的电极常用纯钨或活化钨（钍钨、铈钨等）制成。需要填充金属时，可另行手动或自动加入焊接区。

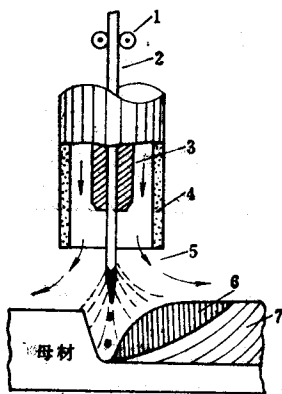


图0-12 熔化极气体保护焊

1—送丝轮 2—焊丝 3—导电咀 4—气体喷嘴
5—保护气体 6—熔池 7—焊缝金属

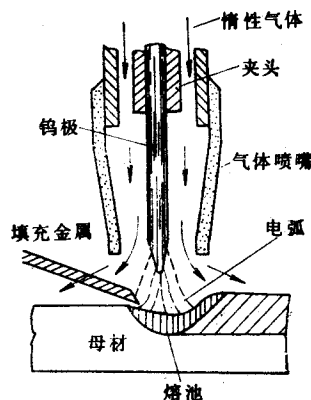


图0-13 不熔化极惰性气体保护焊

自保护电弧焊 自保护电弧焊和上述几种电弧焊接方法的主要区别，在于它在焊接时并不外加药皮、气体或焊剂，仅仅依靠所用焊丝来保证焊接质量。自保护焊丝多为药芯焊丝，

药芯焊丝的截面形状示例如图0-14。其外缘为冷轧低碳钢，内部填充药粉。药芯焊丝不仅用于自保护电弧焊，也多用于其它焊接方法，例如埋弧焊、熔化极气体保护焊等。

等离子弧焊 等离子弧焊是利用等离子弧，而不是利用一般电弧作热源。等离子弧是借助于水冷喷嘴对电弧的拘束作用而获得，其能量密度和温度远高于一般电弧。用于金属焊接和切割的等离子弧类型示例于图0-15。其喷嘴的外层还常通有保护高温区的保护气体。图0-15a为非转移型，依靠电极和拘束喷嘴之间产生的等离子焰加热母材，母材本身并不通电。图0-15b为转移型，借助于辅助电源在电极和喷嘴之间产生的等离子焰，在电极和工件之间引燃等离子弧，母材主要由等离子弧加热。图0-15c则为混合型，亦即等离子焰和等离子弧都对母材的加热起一定作用。



图0-14 药芯焊丝截面形状示例

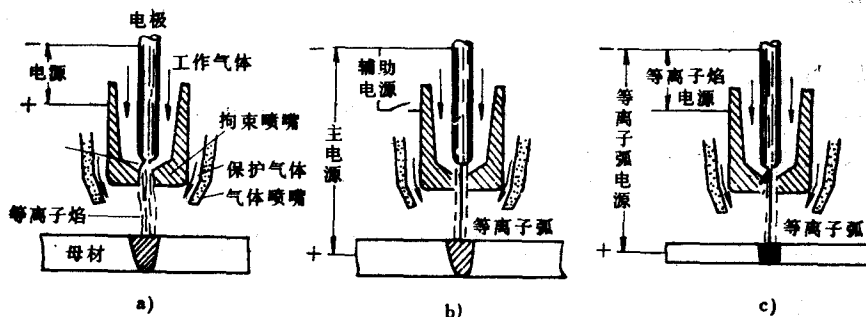


图0-15 等离子弧类型

a) 非转移型 b) 转移型 c) 混合型

电渣焊 电渣焊不属于电弧焊。它不是用电弧，而是利用焊接电流通过液态熔渣所产生的热量作为焊接热源。根据所使用的电极形状，电渣焊可分为丝极电渣焊、板极电渣焊、熔咀电渣焊等。丝极电渣焊示意如图0-16。在垂直放置的工件接口与水冷滑块所围成的空间中形成一个液态熔池。焊丝（丝极）经导电嘴连续进入熔池。当电流通过液态熔渣时，根据楞次—焦耳定律将产生电阻热。此电阻热足以把渣池加热到很高温度，并由之使进入渣池的焊丝和工件的边缘熔化。熔化的金属集聚在渣池的底部，形成金属熔池。随着焊接的进行，渣池和金属池逐渐上升，直至焊接完成。电渣焊用于焊接厚件生产率很高。一般来说，接头质量良好。但由于输入热量大，焊缝和热影响区金属晶粒易于粗大，使韧性降低，为此常需采取一定措施，这将在后续课程中阐述。

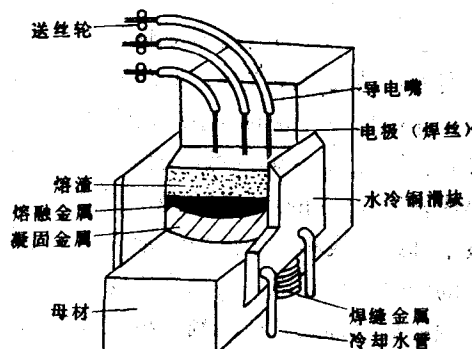


图0-16 丝极电渣焊

第一章 电弧焊热过程

电弧焊是一种热加工方法。其热过程不仅与生产率密切相关,而且在很大程度上决定了焊接接头的冶金性能和力学性能。因此随着科学技术的发展,焊接工作者在这个领域做了很多工作。包括数学解析和实验归纳在内取得了很多成就,积累了大量数据,成为研讨诸如焊接接头的相或组织变化、焊接应力和变形大小及分布,以至热影响区宽度以及某些焊接缺陷等的重要手段,也有助于分析各种工艺因素和冶金因素对生产实际的影响。然而,由于焊接实际中热过程的复杂性,涉及的方面和因素繁多,所以在作数学解析时往往需要忽略掉一些因素和做出一些简化的、又与实际不尽相符的假设,从而给计算结果不可避免地带来一定的误差。就目前情况而言,数学解析一般还不能为具体焊接生产进行十分精确的定量计算。而有些问题,例如温度超过金属熔点的焊缝区的热计算,其尺寸形状的确定及其对传热过程的影响等,尚待深入进行研究。

本章将以电弧焊接为对象,讨论工件上的温度分布和焊条的加热。为此首先将概述焊接区的温度变化和热源特征参数,随后介绍焊条的加热与熔化。本章重点在于基本概念和一些必要的计算,以便能为后叙内容打下基础。

第一节 焊接接头的温度变化和热源特征参数

一、焊接热循环

熔化焊接过程中,热源作用于工件的某一局部区域,同时以某一速度向前运动。当热源接近工件上的某一点时,输入的热量将使该点的温度迅速升高。随着热源的离开,所蓄积的热量又将一部分由于对流和辐射损失于大气,大部分由于热传导向周围相对较冷的金属输入,从而使该点的温度逐渐降低。这种在焊接热源作用下某点(坐标 x 、 y 、 z)的温度 T 随时间 t 变化的过程,叫做该点的焊接热循环,并可用数学关系式表达如下:

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

显然,各点的热循环将随条件而异。这些条件包括该点所在的位置(离焊缝或者热源的距离等)以及焊接方法、工件材质、原始温度、板厚、接头形状、焊接规范及其它工艺条件等。焊接接头各点的典型焊接热循环曲线见图1-1。这是用线能量 3940J/mm ,在原始温度为 27°C 、厚度为 13mm 的低碳钢板上电弧熔敷一条焊道时的实测结果。最上部的曲线相应于离焊缝轴线 10mm 的点的热循环,它在熔敷过程中达到的最高温度,即峰值温度,为 1365°C 。最下部的曲线相应于离焊缝轴线 25mm 的点的热循环,其峰值温度为 515°C 。由图可见,同一点的焊接热循环中,其加热速度要比冷却速度大得多。此外还可看出,随着所讨论点与焊缝轴线距离的加大,所达到的峰值温度急剧降低,而到达峰值温度所需的时间加长,相应的加热速度和冷却速度变小。因此,尽管焊接热过程实质上是一个焊件的自发热处理过程,但是和一般的均匀加热的工业上热处理过程相比,无论是热制度或加热地区都截然不同。例如,焊接区的峰值温度可以很高,而峰值温度达到或超过 1100°C 的诸点,比起通常的工业热处理

来说, 其加热速度和冷却速度要大得很多, 相变温度以上的停留时间则极其短促, 一般只有几秒到十几秒。这些情况势必对焊接冶金和焊接接头质量产生很大影响。关于焊接热循环的更深入探讨, 留待第五章“焊接热影响区”中进行阐述。

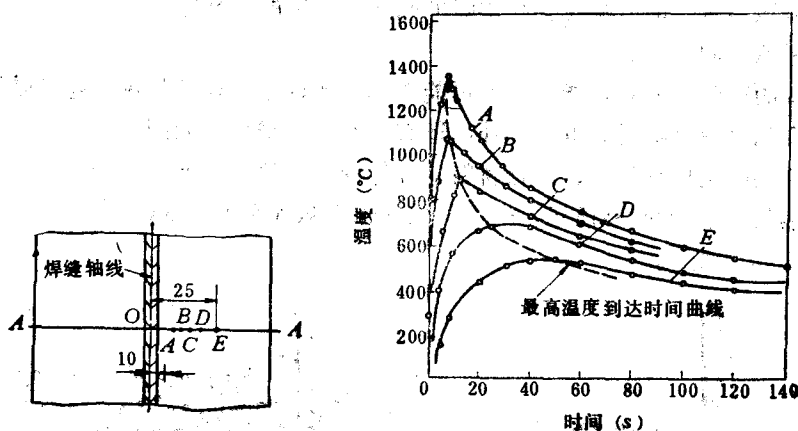


图1-1 焊接接头的典型热循环

A—至焊缝轴线10mm B—至焊缝轴线11mm C—至焊缝轴线14mm
D—至焊缝轴线18mm E—至焊缝轴线25mm

二、焊接热源特征参数

焊接热源的种类很多, 每种热源都有其本身的特点。即使同样都是以电弧为热源, 在不同的焊接方法下其热源特征参数也各不相同。几种熔化焊接热源的主要特性见表1-1。由表可见, 气焊氧—乙炔火焰的功率集中程度最差。一些新能源如等离子、电子束、激光等, 不仅功率集中, 而且加热温度也高。所以当焊接区局部熔化时向周围金属导出的热量不多, 能得到很窄的热影响区。也就是说, 热源的功率密度及温度, 基本上决定了它的有效性。

表1-1 各种热源的主要特性

热 源	最小加热面积(cm^2)	最大功率密度(W/cm^2)	温度(K)
氧—乙炔焰	10^{-2}	2×10^3	3400~3500
手弧焊电弧	10^{-3}	10^4	6000
TIG焊电弧	10^{-3}	1.5×10^4	8000
埋弧自动焊电弧	10^{-3}	2×10^4	6400
MIG焊或 CO_2 焊电弧	10^{-4}	$10^4 \sim 10^5$	—
电渣焊渣池电阻热	10^{-2}	10^4	2300
等离子	10^{-5}	1.5×10^5	18000~24000
电子束	10^{-7}	$10^7 \sim 10^9$	—
激光	10^{-8}	$10^7 \sim 10^9$	—

研究焊接热循环的一个主要目的是为了了解焊接热源对被焊材料的作用。从这个角度, 基本参数之一应当是热源的功率输入, 对于电弧焊就是电弧的功率输入。已经知道, 电弧提供的功率为

$$P = UI \quad (1-2)$$

式中 P ——电弧功率, 即电弧在单位时间内所发出的全部能量(W);
 U ——电弧电压(V);

I ——焊接电流(A)。

在焊接过程中, 电弧所提供的全部能量为

$$Q_0 = UI t \quad (1-3)$$

式中 Q_0 ——电弧能量, 即电弧在整个燃弧期间 t 内发出的全部能量(J);

t ——燃弧时间(s)。

电弧所提供的这些功率或者能量, 不可能全部有效地用于焊接加热。也就是说, 除了大部分用于熔化和加热焊接材料和母材以外, 还有一小部分损失于周围介质和飞溅。而且这些损失将因焊接方法以及母材材质、焊接材料、焊接规范等的不同而异。一般情况下, 手弧焊和埋弧焊时的热量分配如图1-2所示。可见, 较之于埋弧焊手弧焊的热量损失多, 从而说明其热量利用率不如埋弧焊。

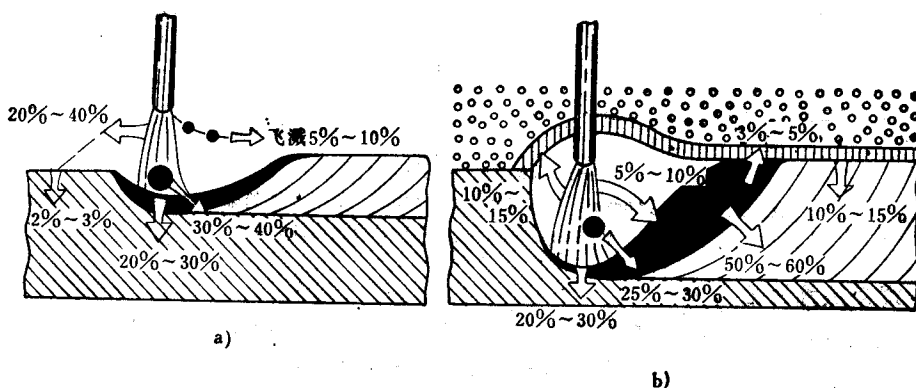


图1-2 电弧焊时的热量分配

a) 功率不大的手弧焊 b) 功率大的埋弧焊

如令母材吸收的全部电弧热功率称作电弧的有效热功率 P' , 则此功率应包括直接用来加热母材的热功率和由熔融焊接材料带入母材的热功率二大部分。它消耗于形成焊缝和加热焊缝以外的母材。显然, 有效热功率 P' 和电弧热功率 P 之间将相差一小于1的系数 η , 即

$$P' = \eta P \quad (1-4)$$

式中 P' ——有效热功率;

η ——热效率, 或热功率的有效系数。

几种电弧焊接方法的热效率数值见表1-2。显然, 电弧区越是开敞, 其热损失越大。因此, 几种焊接方法中热效率的数值自埋弧焊、手弧焊、气电焊到碳弧焊依次递减。

表1-2 几种焊接方法的热效率

焊接方法 热效率	碳弧焊	手弧焊	埋弧焊	钨极氩弧焊		熔化极氩弧焊	
				直流	交流	钢	铝
η	0.5~0.65	0.77~0.87	0.77~0.99	0.78~0.85	0.68~0.85	0.66~0.69	0.70~0.85

设热源向前移动的速度为 v , 有效热功率为 P' , 则 P' 和 v 之比相当于工件单位加热长度所吸取的热功率, 叫做焊接线能量, 以符号 E 表示。亦即

$$E = \frac{P'}{v} \quad (1-5)$$

在电弧焊时,热源向前移动的速度就是焊接速度。如果焊接速度 v 的单位取cm/s,有效热功率 P' 的单位取J/s,则线能量 E 的单位为J/cm。这时的线能量表示了每厘米长度焊缝的母材所吸取的电弧输入能量的焦耳数,它是焊接过程中的一项极重要工艺参数。

第二节 焊接温度场

一、焊接温度场的一般特征

通过前述已经知道,焊接时工件上焊接区内任何地点的温度将随着时间 t 和该点的位置(坐标 x 、 y 、 z)的不同而变化。其中某点温度随时间的变化 $T(x, y, z) = f(t)$ 就是焊接热循环。而在某个瞬时($t = \text{定值}$)工件上各点的温度分布,则称作焊接温度场,即

$$T_{i..} = f(x, y, z) \quad (1-6)$$

温度场在概念上与电场、磁场等相类似。在讨论电场、磁场时人们可以用电力线、磁力线等来表示它们,在讨论温度场时则通常用等温线或等温面来表示。所谓等温线或等温面,就是温度相等各点的连线或连面。在作图或数学解析取坐标系时,通常是以原点 O 为热源所处位置, X 轴为热源移动方向, Y 轴为宽度方向、 Z 轴为厚度方向。如工件上诸等温线(或等温面)给定,即温度场给定,就可以知道工件上各点的温度。例如,已知某特定瞬时以 XOY 面等温线表示的温度场如图1-3b,则该瞬时 XOY 面任何地点的温度情况就可由之知悉,并可画出诸如 X 轴上和 Y 轴上各点的温度分布曲线如图1-3c和d以及由之得出诸如 X 轴上和 Y 轴上的

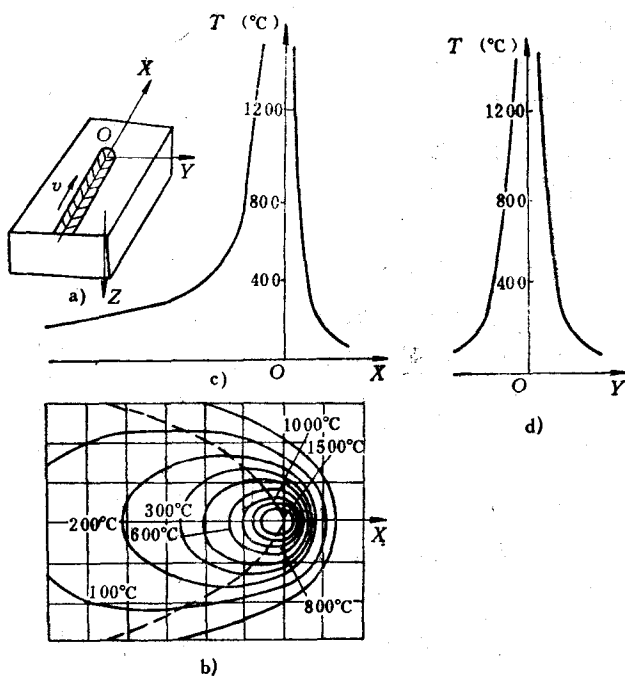


图1-3 温度场示例

a) 焊件上的坐标轴 b) XOY 面的等温线和最高温度点曲线(虚线) c) 沿 X 轴的温度分布曲线 d) 沿 Y 轴的温度分布曲线

温度梯度 $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ 、 $\frac{\Delta T}{\Delta y}$,或者当 $\Delta T \rightarrow 0$ 时的 $\frac{\partial T}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial T}{\partial y}$ 。

如果所讨论的情况是用功率不变的固定热源来加热工件,那末此时的温度分布将和时间无关,也就是温度场中各点的温度始终不变,称为稳定温度场。显然,以固定热源加热厚大焊件时,其温度场可以用以热源为中心的同心圆(图1-4)或同心球表达。而 X 轴上的温度分布也应对称于热源的 O 点。

在实际焊接中,固定热源是极少见的。绝大多数场合的热源(例如电弧)相对于工件具有移动速度(焊接速度) v ,因此温度场各点的温度将随时间和其它因素的变化而变化,也

就是说, 焊接实际的温度场多数应该是非稳定温度场, 这对其研究探讨、确立数学模型等带来诸多不便。为此, 研讨焊接热过程时经常是假定热源的功率不变, 并以恒定的速度在一定尺寸形状的工件上作直线运动, 这与正常的焊接情况出入不大。此时工件上各点的温度虽然仍和时间有关, 但是经过一段时间以后, 以热源为中心的温度场达到饱和状态而趋于不变, 也就是形成了“准稳定温度场”。所谓准稳定温度场, 其特征是: 取以热源为坐标原点的移动坐标系, 该坐标系中各点的温度与时间无关, 只决定于该点所处的位置。由此可见, 准稳定温度场中的温度分布, 实质上相应于热饱和状态下某特定瞬时固定坐标系中的非稳定温度场温度分布。

在准稳定温度场中, 热源的后方已经受到过热源的加热; 热源的前面则是相对冷得多的金属。因此在热源移动方向上, 热源前方的温度梯度 $\frac{\partial T}{\partial x}$ 要比热源后面的大得多。热源两侧的温度分布则应基本对称于热源移动轴。中厚板工件准稳定温度场中 XOY 面、YOZ 面和 XOZ 面的温度分布情况以等温线表示示例于图 1-5。

焊接条件下的热过程是相当复杂的。其影响因素繁多。即使经过上述假定, 着眼于准稳定温度场, 绝大多数场合仍需进一步简化, 限定条件, 以便于求解。例

如, 不同形状尺寸的工件, 用同样功率、同样运动速度的热源加热, 其准稳定温度场也不会相同。因此在探讨焊接热过程时, 常常从热传导角度把它分为空间传热、平面传热和线性传热等来确定数学模型, 从而得到各种热源与工件的配合体系。最常用的三种配合体系如下:

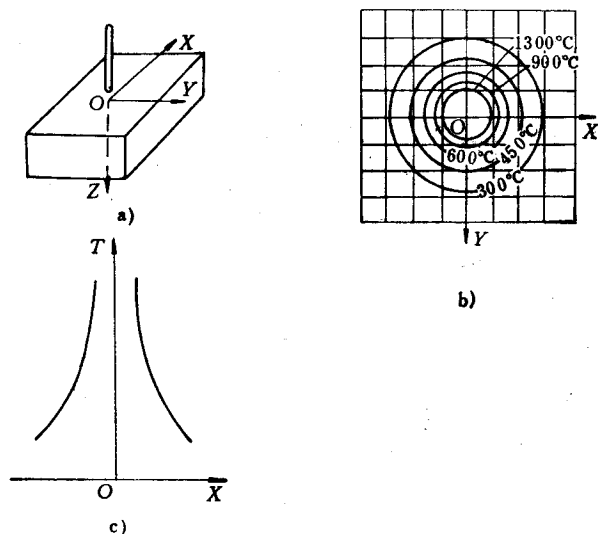


图1-4 以固定热源中心加热厚大工件的温度场示例
a) 焊件上的坐标轴 b) XOY面的等温线 c) 沿X轴的温度分布曲线

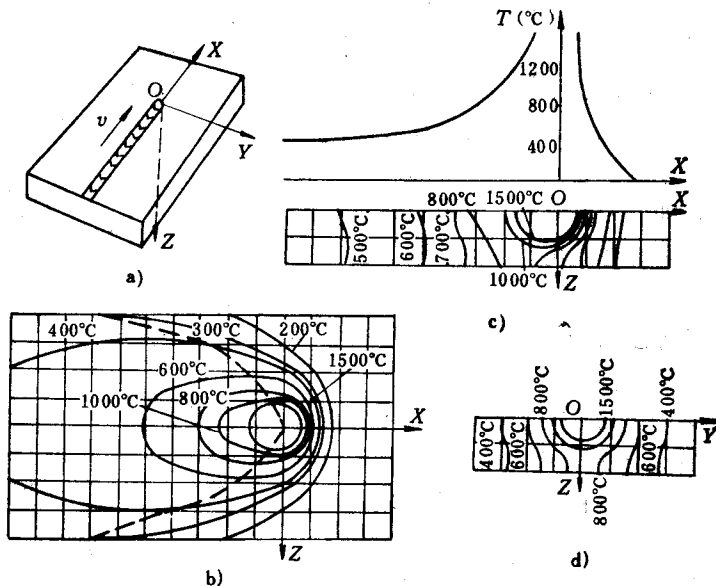


图1-5 移动热源加热中等厚度工件特定瞬时的准温度场

a) 焊件上的坐标轴 b) XOY面的等温线 c) 沿X轴的温度分布
d) XOZ面的等温线 e) YOZ面的等温线

(1) 点热源加热半无限体 (图1-6a) 采用这种模型时, 把热源设想为一个点, 重合于坐标原点。导热是三维的, 也就是 X 轴前后两个方向、 Y 轴左右两个方向、 Z 轴向下一个方向的空间传热、工件在各相应上述方向延伸到无限大, 从而得到半无限体之名。显然, 这时工件上某任意点的温度将不同于其周围任何点的温度。其准稳定温度场的 X 、 Y 轴方向上不同 Z 值的温度分布曲线和 XOY 面、 YOZ 面的等温线示例于图1-7。图1-7b和图1-7c诸曲线上所标数值分别相应于各该点的 Y 坐标值和 Z 坐标值。这种热源与工件配合体系可适用在厚大工件上焊接、堆焊等, 例如手弧焊接厚25mm以上的低碳钢件或厚20mm以上的奥氏体不锈钢件。

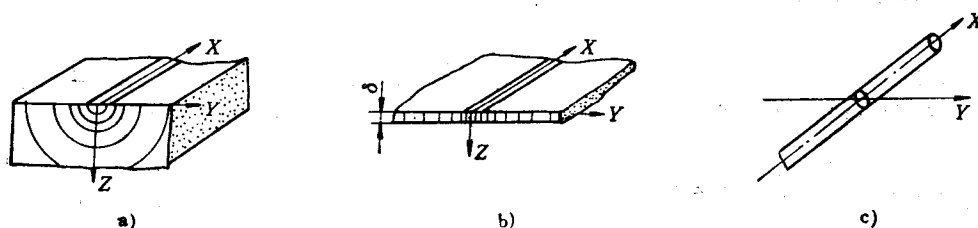


图1-6 热源与工件的配合体系模型

a) 点热源加热半无限体 b) 线热源加热薄板 c) 面热源加热杆件

(2) 线热源加热薄板 (图1-6b) 这种模型的工件 X 轴前后两个方向和 Y 轴左右两个方向仍是延伸到无限大, 但是在 Z 轴上只局限于不大的一定厚度 δ 。因此这时的热源可以设想为自坐标原点向下, 其长度和板厚一致的一条线状热源。导热是 X 方向和 Y 方向的两维平面传热。工件上任意点的温度应和其前后左右不同, 但上下一样。其 YOZ 面的等温线应是一条条的平行直线 (见图1-6b及图1-8)。XOY面的等温线形状则仍类似于鸭蛋形 (图1-8)。和图1-7相类似, 图1-8b和图1-8c诸曲线上所标数值分别相应于 Y 向和 X 向的坐标值(cm)。线热源加热薄板的配合体系可适用于薄板焊接等场合, 例如手弧焊接厚度在8mm以下的低碳钢板或厚度在5mm以下的奥氏体不锈钢板。

(3) 面热源加热杆件 (图1-6c) 这种模型的焊件无论是厚度方向还是宽度方向都局限于不大的一定尺寸, 仅 X 轴的长度方向前后延伸到无限大。这时的热源可设想为一个通过坐标原点并垂直于热源移动方向的面状热源。该面状热源的大小应与工件的截面相同。因此导热是 X 轴方向的一维线性传热。

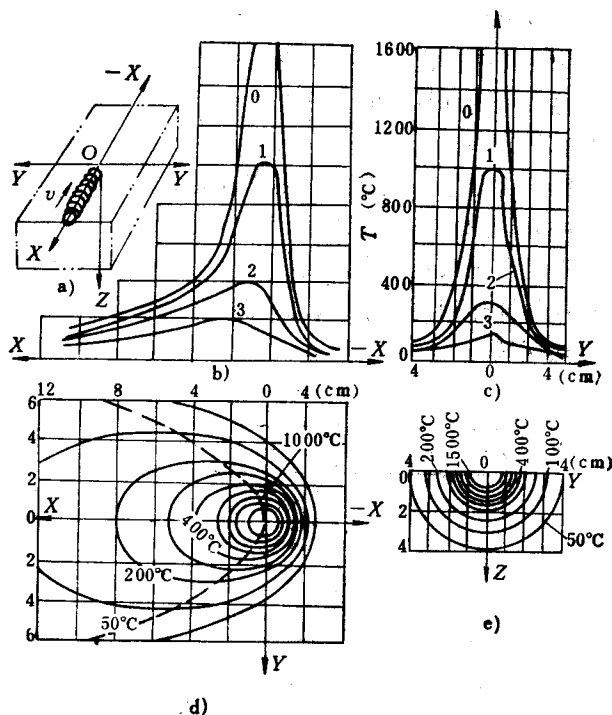


图1-7 点热源加热半无限体的温度场

a) 焊件上的坐标轴 b) 沿 X 轴的温度分布 c) 沿 Y 轴的温度分布 d) XOY 面的等温线 e) YOZ 面的等温线
图中曲线上标数值, 表示 Y 向和 Z 向的坐标值。 $P' = 4200 \text{ J/s}$
 $v = 0.1 \text{ cm/s}$ $a = 0.1 \text{ cm}^2/\text{s}$ $\lambda = 0.42 \text{ J}/(\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$