

船 体 焊 接 变 形

陈 楚 主 编

國防工業出版社

力的规律，从而在实际生产中找出控制焊接变形与应力的措施。

本书主要介绍：产生焊接变形与应力的基本因素；船体焊接变形的种类及简要估算方法；船体焊接变形的控制和矫正的原理及方法；焊接残余应力的分布及其对裂缝与强度的影响；同时为了更好的掌握上述内容还介绍了一些和焊接变形与应力有关的基础知识。

近几年来，造船工业增加了许多青年工人。为了加快我国造船工业的发展，不断提高青年工人的科学技术水平，我们编写了这本船体焊接变形的基础知识读物，希望对青年工人有所帮助，同时也可作为工程技术人员的参考。

本书由上海交通大学焊接教研室陈楚同志主编，汪建华和张文珺两位同志参加了编写工作。全书的描图工作由王栋恒同志完成。由于编者水平所限，因此，在本书中错误和遗漏在所难免，请读者给予指正。

内 容 简 介

本书主要介绍产生焊接变形与应力的基本原因，船体焊接变形的种类及简要估算方法；船体焊接变形的控制和矫正的原理及方法；焊接残余应力的分布及其对焊缝与强度的影响等。同时还介绍了一些与焊接变形及应力有关的基础知识。

本书的主要阅读对象是从事造船、修船的广大工人和干部，同时也可作为从事焊接工作的工程技术人员以及各类学校船体专业或焊接专业师生的参考书。

船体焊接变形

陈 楚 主编

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

787×1092¹/₃₂ 印张 4¹/₂ 97千字

1985年4月第一版 1985年4月第一次印刷 印数：0,001—2,180册

统一书号：15034·2749 定价：0.50元

前 言

焊接广泛应用于工农业的各个生产部门，焊接结构遍布于国民经济各个领域；从日常生活用品到各种基础工业，从民间交通到火箭导弹等运载工具，从农业机械到各种精密机械和重型机器处处皆有。

船体结构就是一种典型的焊接结构。造船从铆接过渡到焊接，不但简化了船体结构，而且提高结构的强度和致密性，在保证必要的强度条件下可减轻船体重量约达20%。据统计，现代造船中焊接工作量在整个船体建造总工作量中占相当大的比例，因此焊接的质量和生产效率直接影响船体的建造周期、成本和使用性能。

在生产实践中，我们熟知电弧焊是一个不均匀的、快速地加热和冷却的过程，焊接过程中及焊后结构都将产生变形和应力。生产实践告诉我们：当部件和分段因焊接而产生变形时，会给船体装配和焊接带来很大的困难。在船体大合拢时，为了矫正分段的变形，有时要消耗数倍于焊接的工时和许多物资，甚至因无法矫正而导致整个结构的报废。焊接变形还将引起甲板失稳以及舱壁、外（壳）板的凹凸变形，使船体结构强度降低。此外，焊接应力也是造成焊接裂缝的重要原因之一。因此，焊接变形与应力是焊接施工中最麻烦也是最难处理的问题之一。但是焊接变形与应力，又是焊接过程中必然会出现的，所以我们应对变形与应力产生的原因和影响因素有所了解的基础上，深入地研究分析焊接变形与应

目 录

第一章 焊接变形与应力的基础知识	1
第一节 焊接热过程	1
第二节 金属加热时性能的变化	9
第三节 内应力概述	12
第四节 讨论和研究焊接变形与应力的一些假定	16
第二章 产生焊接变形与应力的基本原因	19
第一节 均匀加热时杆件的变形与应力	19
第二节 长板条在不均匀加热时的变形与应力	24
第三节 焊接引起的变形与应力	28
第三章 船体结构及其焊接变形	33
第一节 焊接变形的种类	33
第二节 船体结构概述	46
第三节 船体结构的装配焊接和变形	52
第四章 船体焊接变形的简要计算	65
第一节 焊接线能量的计算	66
第二节 纵向焊接变形的计算	67
第三节 横向收缩的计算	70
第四节 角变形的计算	73
第五节 船体分段焊接变形的计算	77
第六节 船体焊接变形的经验数据	79
第五章 船体焊接变形的控制	85
第一节 控制焊接变形原则	85
第二节 刚性固定法	89
第三节 反变形法	94

VI

第四节	选择合理的装配和焊接程序	98
第五节	合理选择焊接方法和焊接规范	103
第六节	薄板焊接变形的控制	103
第六章	船体焊接变形的矫正	107
第一节	机械矫正法(冷加工法)	107
第二节	火焰矫正法(热加工法)	109
第七章	焊接残余应力	116
第一节	焊接残余应力的分布	116
第二节	焊接应力和焊接裂缝	122
第三节	焊接残余应力对结构强度的影响	128
第四节	焊接时调节和减少焊接应力的措施	131
第五节	焊接残余应力的消除	134
参考文献		137

第一章 焊接变形与应力的 基础知识

第一节 焊接热过程

在船体建造中基本上都是采用电弧焊。电弧焊是利用热能高度集中的电弧作为热源进行焊接，所以电弧焊是一个不均匀加热和冷却的过程，因此带来了许多问题，其中主要有：

(1) 金属材料局部加热熔化，熔池金属会和气体反应，改变了金属的化学成分，冷却后得到不同的显微组织，这将使焊缝金属产生缺陷或对焊缝金属的性能有很大的影响。

(2) 金属材料局部加热和快速冷却过程，使焊缝附近的基本金属（通常称为热影响区）发生组织和性能变化，在多数情况下热影响区的性能是变坏的。

(3) 金属材料局部加热时，邻近焊缝区的金属膨胀，相邻的未被加热区的金属则阻止其膨胀，此种相互作用引起热应力，并将产生塑性变形。冷却后由于塑性变形分布的不均匀性，焊件中将出现残余应力和残余变形。

(4) 电弧焊的生产效率取决于基本金属及焊条（或焊丝）的熔化效率，不同的焊接规范也将影响电弧焊的生产效率。

因此为了保证焊接质量，提高生产效率和深入研究焊接变形与应力，需要了解焊接时材料的加热和冷却过程，也就是焊接热过程的特点。

一、电弧

在电弧中电能转变成热能，实验指出弧柱的温度在中心部分可达到8000°C以上，电弧的热进入焊件是高度集中的，极大部分热是通过所谓电弧辉点进入的。带电质点在弧柱中心以很大速度运动，不断的轰击电弧辉点区的金属表面，这些质点的动能转变为热能后，在很短时间内将电弧辉点区的金属加热到很高温度。考虑到电弧中发生的化学反应有的是吸热、有的是放热，但这些热目前还无法计算，因此电弧的热功率通常用下式表达：

$$q = 0.24\eta IU \quad (1-1)$$

式中 q —— 电弧有效热功率卡/秒；

η —— 电弧加热焊件的实际效率（根据实验确定），手工焊时， $\eta = 0.7 \sim 0.75$ ，埋弧焊时， $\eta = 0.8 \sim 0.95$ ；

I —— 焊接电流，安培；

U —— 电弧电压，伏特。

由于焊接热源是移动的，因此通常用线能量 q_0 —— 单位长度内加入到材料中的热量来表示，其公式为：

$$q_0 = \frac{q}{v} = \frac{0.24\eta IU}{v} \text{ (卡/厘米)} \quad (1-2)$$

式中 v —— 热源移动速度，即焊接速度，厘米/秒。

二、焊接热场（或称焊接温度场）

金属材料受到热源加热时，如果在一定时间内加入材料中的热量多于传导、辐射和对流损失的热量，则温度就会升高；如果加入的热量少于传导、辐射和对流损失的热量，则温度将降低；如加入和损失的热量平衡，则温度就稳定在某一个水平上。电弧焊是局部加热，同时热源是移动的，因此

为了分析焊接时的受热和冷却，就需要有一个热场的概念，所谓热场就是指在某一瞬时，材料空间各点的温度分布情况，一般可用下式表示：

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

若用图形来表示，最方便的方式是用等温面（立体内）或等温线（平面内）来表示（见图1-1）。等温面或等温线是指材料在立体或平面内同一温度水平的各点轨迹。

在各个等温面或等温线之间存在一定的温度差（ $T_1 - T_2$ ），这个温度差与等温面或等温线沿法线方向的距离（ ΔS ）之比称为温度梯度： $\frac{T_1 - T_2}{\Delta S}$ 。金属材料内某一部位上的温度梯度，是指沿着等温面或等温线的法线方向的温度变化，正值表示温度增加，负值表示温度下降。

在整个加热和冷却过程中，材料上各点在不同时间内温度都不相同，也就是在不同瞬时热场是不同的，这个热场变化过程又称为热过程，一般以下式表示：

$$T = f(x, y, z, t) \quad (1-4)$$

式中 x, y, z ——材料上某一点的坐标位置。

焊接热场比较复杂，我们现在来分析在一块大平板上进行直线焊接的热场。如果把被焊接平面作为基面，用垂直于基面的坐标代表温度，平板上各点的温度可用不同高度的点来表示，这样整个热场可以用一个曲面来表示，这个曲面象座山（见图1-1（a））。它的顶峰位于热源上方，这座山的前坡也就是热源的前进方向，比较峻陡，后坡比较平坦。这座山的等高线就代表热场的等温线（见图1-1（c））。在焊缝方向和垂直焊缝方面取截面，就可以得出两个方面（纵向和横向）的温度分布曲线（见图1-1（b）（d））。

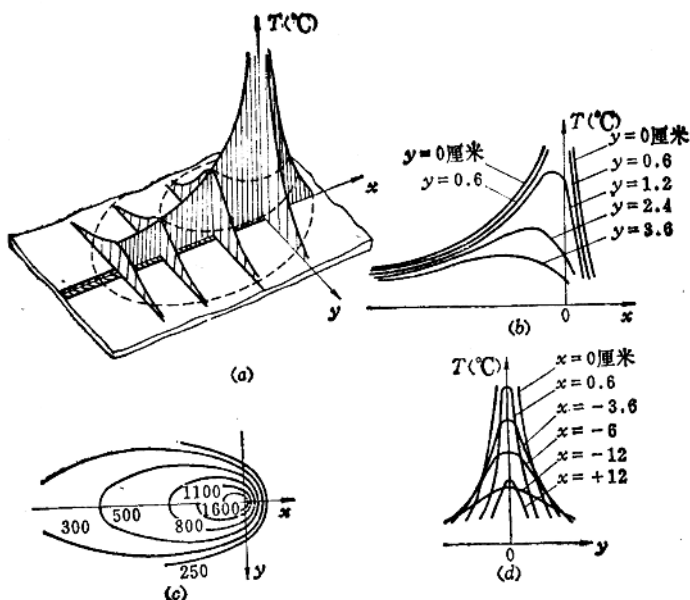


图1-1 焊接热场

影响温度分布的因素较复杂，但应有一个基本的概念，以便分析问题时能抓住主要矛盾。影响温度分布的因素可归纳为以下几个主要方面。

1. 热源的影响

焊接时加热所用的热源主要有内热源和外热源二类：外热源是指从材料表面加入热量的热源，如电弧、气体火焰、等离子弧、电渣热和电子束等；内热源是指利用材料的电阻和外加的电流（或涡流）在金属材料内部产生热量，如高频感应热源、接触焊的电阻热源等。

不同热源由于它们的热强度（单位时间内供给的热量）和热量分布特征（集中程度）不同，影响热场分布的特点。电弧的热强度大，气体火焰的热强度较小。在焊透同一厚度的同一材料时，热源的热强度大，则整个热场小，但温度梯度大；气体火焰热量分布较分散，热场大而温度梯度小。热场小，温度梯度大时，说明受热作用的区域小，也就是焊接热影响区小。在一般情况下，热影响区小对焊接接头的性能有利，同时对焊接变形与应力也是有利的。因此热强度愈大，热量分布愈集中的热源在焊接工艺中愈有发展前途（如电子束、等离子弧等）。

2. 基本金属的热物理性能的影响

金属材料中的导热情况和材料的热物理性能有关。金属材料的热物理性能主要有：

(1) 导热系数 λ 它是在单位温度梯度下，单位时间内，由单位面积所传导的热量，表示材料传导热量的能力，其度量的因次是卡/厘米·秒· $^{\circ}\text{C}$ 。不同的金属材料，导热系数 λ 相差很大，也就是导热能力相差很大（见图1-2）。

从图中可看出，在常用的金属材料中，铜和铝的导热能力比碳素结构钢大得多，而铬镍不锈钢的导热能力比一般的碳素结构钢又差得多。以室温时的导热系数来比较：铜和铝较0.1%碳的钢分别大4~8倍，而低碳钢又比铬镍不锈钢大5倍左右。同一材料其导热系数随温度的变化而变化。

(2) 比热(或称热容量) C 它就是单位重量的物质，温度升高1 $^{\circ}\text{C}$ 所需的热量。不同的材料比热不同（见图1-3），同一材料的比热也随温度的变化而变化。

由于材料的热物理性质不同（主要是导热系数、比热），使热场的分布相差很大，例如在10毫米厚的不同金属板上，

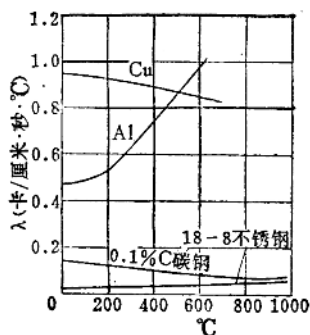


图1-2 几种金属的导热系数与温度的关系

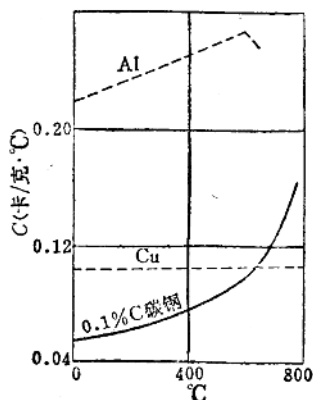


图1-3 几种金属的比热与温度的关系

采用热源(电弧)功率为 1000 卡/秒, 热源移动速度为 2 毫米/秒的相同条件, 而热场分布却很不相同(见图1-4)。以受热达 600°C 的范围来说: 导热系数最差的铬镍钢受热区域最大, 而

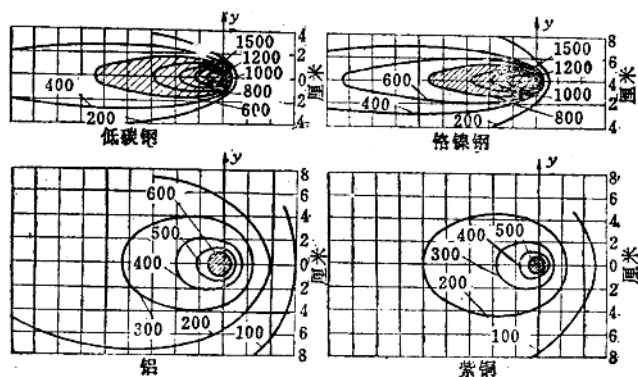


图1-4 不同金属对热场分布的影响

铜和铝由于导热能力很大，使高温受热区域很小，因此导热能力愈差的材料其高温受热区域愈大，也就是引起组织和性能变化的热影响区愈大，往往由此而引起的问题愈多和愈严重。但从另一角度来讲，导热差的材料，对热源的利用率高，生产率高。

3. 焊接参数的影响

焊接参数中以电弧功率、焊接速度影响最大。在板厚及焊接速度一定时，电弧功率增大，受热达 600°C 的高温区域就增大。在电弧功率和板厚一定时，增大焊接速度，则 600°C 的高温区域将缩小。因此我们可适当调节焊接参数，以控制热影响区的大小，达到减少焊接变形与应力的目的。

4. 板厚和焊接接头型式的影响

材料厚度对热场的分布影响也很大。厚度大导热快，厚度小导热慢，因此在相同热源功率和工艺规范参数下，厚板的热场分布范围较小，而薄板的热场分布范围较大。



图1-5 各种接头型式的热传导示意图

不同接头型式，热的传导情况不同（见图1-5），热传导最容易的接头，它的热场分布范围最小（热传导的易难相当于材料导热能力的大小）。

三、极限状态和焊接热循环的概念

1. 极限状态

极限状态是指在电弧（不变功率热源）加热开始时，工

件上温度升高的范围逐渐增大，经过一段时间后，温度升高的范围达到一个极限的尺寸（就是不再增大），于是，运动的热场就象被电弧（集中热源）的热所饱和（即输入工件的热量和导出工件的热量相等），此时热场形状不变只是随电弧一起移动，这种情况称为极限状态或稳定状态。因此电弧的加热过程可分为两个时期：

（1）热饱和时期，同热源联系着的加热区域尺寸增大时期。

（2）进入极限状态（或稳定状态），此时热场保持不变。当热源不动时，不动的极限情况下的热场叫做固定热场。当热源运动时（速度和热功率是常数），和它联系着的极限情况的热场叫做伪固定热场，亦称极限状态下的热场。

2. 焊接热循环

焊接时焊接热源（电弧）是移动的，因此对工件上某一

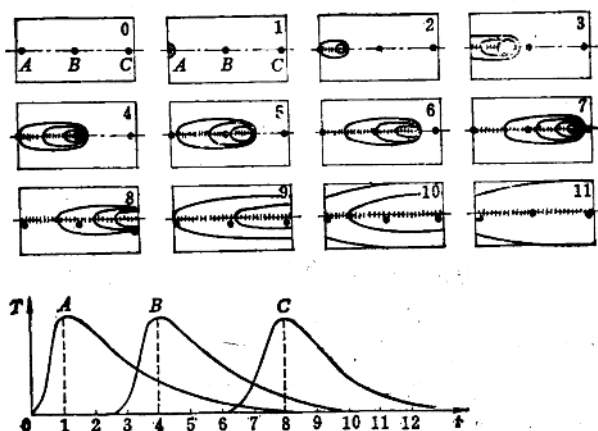


图1-6 平板对接焊时的热传导过程

固定点来说热场是在移动的，也就是说该点受到的热作用是变化的。当热源的热还没有传导到时，该点的温度与周围环境温度相同，随着热源的接近，温度逐渐升高；在热源移动过去后，温度下降（见图1-6）。因此对工件上某一固定点来说，它在整个热源作用时期内，温度随时间由低到高，再由高到低的整个变化过程称为这一点的 **热循环**（见图1-7）。对工件上的某一固定点，在一定的焊接工艺规范参数条件下热循环曲线具有一定的形状。

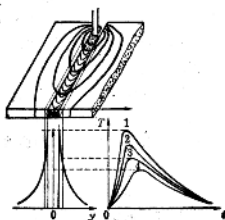


图1-7 焊接热循环

第二节 金属加热时性能的变化

由于焊接是在非常巨大的温度变化下进行的，焊接时熔合线附近的金属从室温加热到接近金属的熔化温度（以碳钢而言为 1450°C 左右），随着这样大的温度变化带来了金属性能非常剧烈的变动。焊接电弧的局部集中加热发生在极有限的空间条件下，受热的体积不大，而温度变化的速度却非常快。随着电弧的移动，金属由开始时，具有弹性的和固体的状态变为塑性状态（即只要经受较小的力就会发生永久性变形——塑性变形），甚至变为液体状态。因此为了便于了解以后讨论焊接变形与应力的形成原因，不能不对金属在受热时的主要机械性能变化过程以及热膨胀性能予以阐明。

一、金属加热时机械性能的变化

焊接生产中应用的金属材料种类很多，性质各不相同。除了低碳结构钢外，还有高强度钢、不锈钢和有色金属等。每一种金属材料在加热时的性能变化是不同的。由于在船体建造中用得最多的是普通低碳结构钢和低合金高强度结构钢，因此主要讨论它们的焊接变形与应力问题。

当低碳结构钢在加热时，其主要性能的变化如图1-8所示。

强度极限 σ_b (见图1-8中曲线1)。加热初期强度极限实际上保持不变，以后逐渐提高，在 $250\sim 300^\circ\text{C}$ 时达最大值 (超过常温时数值的 $20\sim 30\%$)，继续加热，强度极限迅速下降，到 1000°C 时强度极限不超过 $2\sim 4$ 公斤/毫米²。

屈服极限 σ_s (见图1-8中曲线2)。加热时，钢的屈服极限在初期基本不变，以后曲线陡然下降，温度在 $600\sim 650^\circ\text{C}$

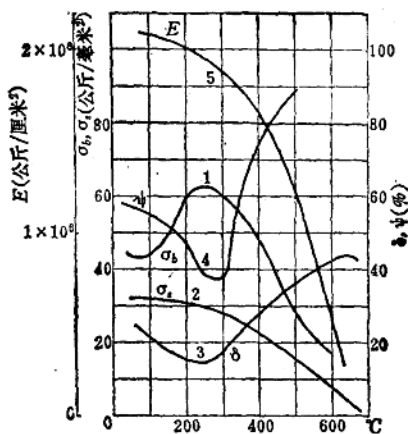


图1-8 低碳结构钢机械性能与温度的关系

时接近于零（注意船用低合金高强度钢加热时，屈服极限的变化与碳钢不同，如 AK-29 在 600°C 时 σ_s 仍达 30 公斤/毫米²（见图 1-9））。

延伸率 δ （见图 1-8 中曲线 3）。开始加热时，延伸率显著下降；温度在 250°C 附近时，延伸率达最小值，约等于常温时碳钢的正常数值的一半（即所谓蓝脆温度）；在 350°C 左右达到常温时数值，然后继续增高，这说明高温时塑性好转。

断面收缩率 ψ （见图 1-8 中曲线 4）。它具有和延伸率类似性质的变化。

弹性模数 E （见图 1-8 中曲线 5）。它在开始加热时，稍微下降；当温度超过 300~400°C 时，曲线下降愈来愈快，这说明加热时钢的弹性性质消耗很快，在 600~650°C 时弹性模数已降到很低数值。弹性模数降到很低数值的现象表明，在很小应力作用下将产生很大的塑性应变，对这种现象称为金属处于塑性状态。

二、金属的热膨胀

金属材料具有热胀冷缩的特性，金属材料在加热时的单位伸长，可由下列公式确定，

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta L}{L} = \alpha \cdot \Delta T \quad (1-5)$$

式中 ε_T ——单位热伸长；
 ΔL ——热伸长的绝对值；
 L ——金属原始长度；
 α ——金属的线膨胀系数；

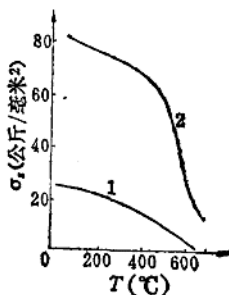


图 1-9 屈服极限
与温度的关系

1—低碳结构钢 σ_s ，2—低
合金高强度钢 σ_s (AK-29)。