

史光远 主编

焊接结构 设计与制造

HANJIE JIEGOU

SHEJI YU ZHIZAO



黄河水利出版社

焊接结构与制造

史光远 主 编

穆云超 郭 建 樊 平 副主编

黄河水利出版社

内 容 提 要

本书全面分析了焊接结构设计和制造的相关问题。主要内容包括焊接应力与变形产生的机理和演变过程,焊接接头、焊接结构特点对结构强度和断裂影响的基本理论。

全书共分六章。第一章介绍了焊接结构发展概况及焊接结构特点。第二章讲述了有关焊接应力和变形的基础理论及其测试原理。第三章介绍了焊接接头的一般性能、焊接接头的工作应力分布和工作性能、焊接接头静载强度计算、焊缝许用应力、焊缝代号。第四章从金属材料断裂基本理论出发,分析了焊接结构的脆性断裂。第五章讨论了焊接接头和结构的疲劳强度。第六章研究了机器焊接结构的设计和工艺特点。

本书对焊接结构进行了理论分析,并与实践密切结合,重点突出,逻辑性强,图文并茂,对生产中已出现的各类问题进行了准确分析,并提出防止的措施,对生产实际有较高的参考价值。本书可作为本专科院校相关专业的教科书,同时也可供相关工程技术人员参考借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

焊接结构设计与制造 / 史光远主编. — 郑州:黄河水利出版社, 2006.8
ISBN 7-80734-097-5

I. 焊… II. 史… III. ①焊接结构-结构设计
②焊接工艺 IV. ① TG404 ②TG44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 087509 号

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路 11 号 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话: 0371-66026940 传真: 0371-66022620

E-mail: hhs1cbs@126.com

承印单位:河南第二新华印刷厂

开本:787 mm × 1 092 mm 1 / 16

印张:18

字数:496 千字

版次:2006 年 8 月第 1 版

印数:1—1 500

印次:2006 年 8 月第 1 次印刷

书号:ISBN 7-80734-097-5 / TG · 5

定价:29.80 元

前 言

随着科学技术的进步和工业的发展，焊接已成为共性制造技术中的基本方法，在现代化工业生产中有广泛的应用。焊接结构作为焊接这种方法实现的最终载体，应用于船体、压力容器、水电设备、工程机械、石油开采设备制造等多个领域。本书在突出焊接结构理论的同时，特别注重与生产实际的结合，主要讲述了焊接结构的特点、焊接应力与变形、焊接接头设计、焊接结构的脆性断裂与疲劳强度、焊接机器制造等内容。书中采用了大量图表，数据齐全、准确。

本书由中原工学院史光远任主编，由中原工学院穆云超、郭建、樊平任副主编，参加编写的还有中原工学院的卢金斌、黄小婷，郑州大学材料科学与工程学院任晨星和水利部水工金属结构质量检验检测中心毋新房。同时，本书的编写得到了有关大专院校、科研单位和厂矿企业的大力支持，提供了大量的数据资料，我们也参阅并引用了有关文献中的大量数据资料。在本书的编写过程中，许多同行、专家提出了不少合理化建议和修改意见，在此一并表示感谢。

本书适用于大专院校作为教材，也适合于相关工程技术人员自学、指导生产之用。

由于编者经验不足，水平有限，难免存在错漏不妥之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

2006年7月

目 录

前 言	
第一章 绪 论	(1)
第二章 焊接应力与变形	(5)
第一节 内应力及变形的一些基本概念	(5)
第二节 焊接残余变形	(19)
第三节 焊接残余应力	(53)
第三章 焊接接头形式及静载强度计算	(82)
第一节 焊接接头的基本类型	(82)
第二节 焊接接头的一般性能	(89)
第三节 常用手弧焊接接头的工作应力分布	(96)
第四节 其他焊接接头的工作应力分布	(105)
第五节 焊接接头的选择	(109)
第六节 焊接接头静载强度计算	(116)
第四章 焊接结构的脆性断裂	(124)
第一节 金属断裂的基本概念	(125)
第二节 材料断裂的评定方法	(151)
第三节 影响焊接结构脆断的因素	(166)
第四节 焊件脆性断裂的理论分析研究	(177)
第五节 预防焊接结构脆性断裂的措施	(184)
第五章 焊接接头和结构的疲劳强度	(191)
第一节 金属材料的疲劳破坏及其影响因素	(191)
第二节 断裂力学在疲劳裂纹扩展研究中的应用	(201)
第三节 影响焊接接头疲劳强度的因素	(211)
第四节 焊接接头疲劳强度计算	(225)
第五节 提高焊接接头疲劳强度的措施	(231)
第六章 焊接结构构件	(240)
第一节 构件焊接结构的选择	(240)
第二节 机身焊接	(245)
第三节 焊接容器	(254)
第四节 焊接旋转体	(268)
第五节 薄板结构	(271)
第六节 厚板结构	(276)
参考文献	(281)

第一章 绪 论

焊接技术在工业中应用的历史并不长，但它的发展却是非常迅速的。在短短的几十年中，焊接技术已应用于许多工业部门的金属结构中，如建筑钢结构、船体、铁道车辆、冶金机械、航空航天、压力容器等几乎全部取代了铆接。不仅如此，在机器制造业中，不少过去一直用整铸整锻方法生产的大型毛坯改成了焊接结构，大大简化了生产工艺，降低了成本。在这方面，我国在新中国成立后的几十年中已经取得了很大的进展。在现代工业中，焊接结构的应用，更是得到了突飞猛进的发展。据统计，目前世界钢产量的 45% 是用于焊接结构。1976 年，全世界焊接结构的用钢量占总钢产量的 43.3%，1980 年上升到 45%，到 20 世纪末已达到 50%。在一些工业发达的国家，焊接结构产量明显地逐年增加。苏联 1977 年焊接结构产量与 1958 年相比，增加了 10 倍，1977 年焊接结构用钢量占全苏联总钢产量的 47.7%，1980 年达到 50.4%。在日本的钢铁制造业中，板焊结构所占比例，由 1964 年的 10% 上升到 1980 年 43.7%。目前，我国焊接结构产量较低，焊接结构的用钢量仅为美国 1970 年的 50%。

当前，世界各国都广泛采用了焊接技术，不论是小型零件，还是大型结构，都在不断地扩大焊接结构的比重。近年来，随着焊接结构的大型化，大量采用了板焊结构。联邦德国和日本为我国制造的 1700 t 冷轧机和热轧机，其焊接结构的重量占整个设备总重量的 50%。苏联为法国制造的 65 000 t 多向模锻水压机，其中的梁、柱、工作台和缸体等部件都采用了焊接结构，其重量占设备总重量的 80%。日本日立公司制造的大型电站设备中，用钢板、铸锻件焊成的零部件，占水轮机总重量的 90%，在汽轮机中，这些焊接部件占总重量的 77%。近几年来，在国外的机床行业中，焊接结构被广泛采用。在日本，不仅大型机床，就是一些小型机床的生产，也大量采用了拼焊结构。

当今焊接结构的应用范围，已从原来的工业生产领域中迅速地扩大到建筑行业，如今的高层建筑，已由焊接钢结构代替了原来的全钢筋水泥结构。

焊接结构的应用范围得到如此快速的发展，其根本原因在于它比其他结构具有明显的优点。

一、焊接结构的优点

(一) 焊接结构优于铆接结构

1. 焊接接头系数高

所谓接头系数是指：

$$\frac{\text{接头强度}}{\text{母材强度}} \times 100\%$$

与多数的铆接接头相比，焊接接头系数高。例如，一般优质焊接对接接头系数高达 100%，对铆接接头而言，虽然接头系数随铆钉直径和间距的不同而变化，但其接头系数始终小于 100%。

2. 水密性和气密性好

在水密性和气密性方面,焊接结构明显优于铆接结构。正因为铆接结构在使用中难以保证可靠的水密性和气密性,所以像密封容器、潜艇和贮罐等密封结构,只能采用焊接结构,而不能采用铆接结构。

3. 重量轻

焊接结构不需要铆接结构中的铆钉和盖板,从而使焊接结构比铆接结构轻 10%~20%。

4. 焊接结构的厚度基本上不受限制

对于铆接结构,当连接厚度超过 50 mm 时,就很难铆接了,而焊接结构厚度基本上不受限制。因此,当重型和超重型特大结构的部件连接时,只能采用焊接连接。

5. 结构设计简单

在焊接结构设计中,一般选用简单的对接焊或角焊,就可制造出各种各样的接头型式,而铆接设计需要计算盖板、铆钉和铆钉孔,接头型式要比焊接接头复杂。

6. 生产周期短,成本低

焊接接头不需要铆接接头中铆钉孔的机加工。例如在现代化的造船厂里,一艘 200 000 t 的焊接油船,可以在 3 个月的时间内下水,而同样的油船如采用铆接,需要一年多的时间才能下水。

(二)焊接结构优于铸造结构

1. 焊接结构用料少

采用不同的工艺方法制造相同技术条件要求的零件,其重量测定表明,板焊结构比铸造结构轻 30%。

2. 基本建设投资少

在一般情况下,焊接车间的基本建设投资比铸造车间投资平均低 $1/3 \sim 1/2$,基建周期也可明显缩短。所以从 20 世纪 60 年代以来,国外对重型和超重型(100 t 以上)毛坯生产车间,已不再投资建设铸造车间,而改为投资焊接车间。这不仅可缩减基建投资,而且也有利于减少对环境的污染。

3. 节约能源

科学技术的迅速发展,使不少国家出现了能源短缺、原材料供应不足、价格上涨、公害严重等社会问题,因此合理利用和节约能源已成为各国国民经济建设中非常关注的重大课题。实践证明,以焊代铸是合理利用和节约能源的重要途径。机械制造业中的能源消耗测定表明,每吨铸件的消耗能量为 0.786 t 标准煤,而每吨焊件耗能量为 0.506 t 标准煤,可节能 35%。

4. 生产工艺简单,生产周期短

焊接结构生产不需要制造木模、造型和浇注,故大大地简化了生产工序。例如,在生产 T6916 型落地镗床的立柱时,若采用铸件,仅木模制造工时就高达 6 000 h,若采用焊接立柱,就其成品工时也只需要 3 112 h,仅相当于木模制造工时的 52%,同时还节省了近 40 m³ 的优质木材,减少了 33% 的金属材料,使生产成本降低了 19.76%。

在科学技术飞速发展的今天,计算机的广泛应用,加速了工业产品老化速度,尤其在机床工业生产中,一个新产品从开始设计到试制成功,一般需要大约 5 年的时间,一种新产品的投产,意味着下一代新系列基型设计的开始。由此看来,缩短生产周期,对于发展

新产品，提高产品在市场中的竞争能力，具有特别重要意义。

尽管焊接结构有许多优点，但绝不等于说它没有缺点。长期的实践证明，焊接结构存在着许多特殊的问题，这些问题与焊接结构的特点密切相关，因此有必要对焊接结构的特点进行讨论。

二、焊接结构的特点

与其他结构相比，焊接结构具有许多特点，只有正确认识并掌握了这些特点，才能设计并制造出性能优良、技术经济指标高的焊接结构。历史上许多焊接结构失效的事例，追其根源，多数在于设计者和制造者未能充分考虑到焊接结构的特点。现将焊接结构的主要特点叙述如下。

(一)焊接结构的止裂性能差

在焊接结构工作过程中，如果裂纹一旦开始扩展，裂纹就难以被止住。而在铆接结构中，如果有裂纹产生并发生扩展时，裂纹将会扩展到板材边缘或铆钉孔处而终止。正是由于这种原因，常常在一些重要的焊接结构中，把铆接接头作为止裂件。

(二)在焊接生产中易产生缺陷

由于在焊接接头处要经历冶炼、铸造和热处理三个过程，并且在短时间内完成这些过程，所以在焊缝中常常会产生气孔、裂纹和夹渣等焊接缺陷。

(三)对材料敏感

各种材料的可焊性存在着较大的差异，有些材料可焊性极差，很难获得优质的焊接接头。例如，一些高强度钢，在焊接时容易产生裂纹，并且对微小的缺陷也比较敏感。再如在焊接铝合金时，在焊缝中容易产生气孔。

(四)在焊接结构中存有残余应力和变形

由于焊接属局部高温加热，在焊接热循环中，必然引起较复杂的热应力和金属瞬时移动，最终导致焊接残余应力和变形的产生。在某些情况下，焊缝及其近区的拉伸残余应力高达材料的屈服极限，这对结构的疲劳和抗脆断性能有影响。残余压应力和变形将会降低结构的压曲强度。残余应力对结构尺寸稳定性也有影响。

(五)焊接接头是一个不均匀体

这里所指不均匀性(不连续性)包括：几何的不均匀性(截面的改变和焊接变形)、力学的不均匀性(接头形式引起的应力集中和存在的焊接残余应力)、化学的不均匀性(成分不均匀)、金属组织的不均匀性(金相组织结构不均匀)。

根据以上这些特点，不难看出，如果获得优质的焊接结构，必须要做到合理的结构设计，正确的选材，采用合适的焊接设备以及制定正确的焊接工艺和严格的质量控制。显然，这就要求每个焊接结构的设计者和制造者必须对焊接结构的特点要有全面和深入的了解，只有这样，才能使设计者和制造者做到既能提高产品的性能，又能顾及材料和制造成本的经济性。换言之，优质焊接结构的可焊性、经济性及其技术特性的好坏，在很大程度上取决于设计者和制造者对焊接结构特点的理解水平。

本书将从基础理论出发，本课程的第二章着重阐明产生焊接残余应力和变形的机理及其规律，通过一些实例、试验数据和图表，提供实用资料。本课程的第三、四、五章将从几个方面来系统分析影响焊接接头和焊接结构的静载强度、脆性断裂和疲劳寿命的各种因

素。本课程第六章介绍典型焊接结构的实例，通过这些实例使学生更好地掌握焊接结构的特点，为正确分析焊接结构的工艺性和构造合理性，解决有关设计和工艺问题打好基础。

第二章 焊接应力与变形

第一节 内应力及变形的一些基本概念

一、内应力及其产生原因

内应力是在没有外力的条件下平衡于物体内部的应力。这种应力存在于许多工程结构中，如铆接结构、铸造结构、焊接结构等。

内应力按其分布范围可分为三类：第一类内应力，它在较大的范围内平衡，这个范围大小可以与物体尺寸来比量，故称之为宏观内应力；第二类内应力，它的平衡范围大小可以与晶粒尺寸来比量；第三类内应力，它的平衡范围更小，其大小可与品格尺寸来比量。在这三类内应力中对第一类内应力研究得比较多。

内应力按其产生原因可分为温度应力和残余应力等几种。

(一)温度应力(热应力)

温度应力是由于构件受热不均匀引起的。举一个简单例子来说明。图 2-1 是一个金属框架，如果只让框架的中心杆件受热，而两侧杆件的温度保持不变，则前者由于温度上升而伸长，但是这种伸长的趋势受到两侧杆件的阻碍，不能自由地进行，因此中心杆件就受到压缩，产生压应力。而两侧杆件在阻碍中心杆件膨胀伸长的同时受到中心杆件的反作用而产生拉应力。这种应力是在没有外力作用下出现的，且拉应力与压应力在框架中互相平衡，就构成了内应力。因为这是由于不均匀温度造成的，所以称之为温度应力或热应力。如果温度应力不高(低于材料的屈服极限)，在框架里不产生塑性变形，那么，当框架的温度均匀化以后，热应力亦随之消失。

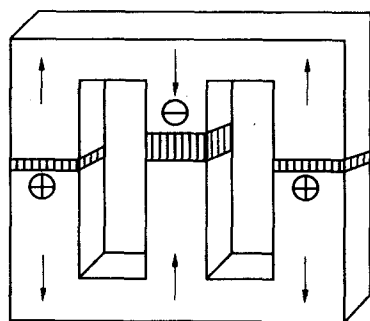


图 2-1 金属框架

热应力比较广泛地出现在各种温度不均匀的工程结构中，如飞行器等。

(二)残余应力

如果不均匀温度场所造成的内应力达到材料的屈服极限，使局部区域产生塑性变形，当温度恢复到原始的均匀状态后，就产生新的内应力。这种内应力是温度均匀后残存在物体中的，故称之为残余应力。以图 2-1 的金属框架为例，如果中心杆件加热产生的压应力达到材料的屈服极限，杆件中将出现压缩塑性变形。当杆件温度恢复到原始状态时，若任其自由收缩，那么它的长度必然要比原来的短，这个差值就是中心杆件的压缩塑性变形量。实际上，框架两侧杆件阻碍着中心杆件自由收缩，使它受到拉应力，而两侧杆件本身则由于中心杆件的反作用而产生压应力。这样，就在框架中形成了一个新的内应力体系，即残

余应力。

我们知道，金属在相变时其比容也有所变化，也就是说其尺寸有所变化。如果温度升高，使局部金属发生相变，伴随这种相变所出现的体积变化将产生新的内应力。当温度恢复到原始状态后，如果相变的产物还保留下来，那么这个金属框架里就产生相变应力。它也是残余应力的一种。

二、自由变形、外观变形和内部变形

物体在某些外界条件(如应力、温度等)的影响下，其形状和尺寸可能发生变化，这种变化都有一定的规律性。

当某一金属物体的温度有了改变，或发生了相变，它的尺寸和形状就要发生变化，如果这种变化没有受到外界的任何阻碍而自由地进行，这种变形称之为自由变形。以图 2-2 中的一根金属杆件为例，当温度为 T_0 时，其长度为 L_0 ，当温度由 T_0 升至 T_1 时，如不受阻碍，其长度将由 L_0 增长至 L_1 ，这段长度的改变就是自由变形，其大小可用下列公式来表示：

$$\Delta L_T = \alpha \cdot L_0 (T_1 - T_0)$$

式中 α ——金属的热膨胀系数，它的数值随材料而异，在不同温度情况下，其数值也有一定程度的变化。

而自由变形率即单位长度上的自由变形量，用 ε_T 来表示：

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta L_T}{L_0} = \alpha (T_1 - T_0)$$

当金属物体在温度变化过程中受到阻碍，使它不能完全自由地变形，只能够部分地表现出来(见图 2-2b)，我们把能够表现出来的这部分变形，称之为外观变形，用 ΔL_e 表示，其变形率则为 ε_e ，可用下式表达：

$$\varepsilon_e = \frac{\Delta L_e}{L_0}$$

而未表现出来的那部分变形，我们称之为内部变形。它们的数值是自由变形和外观变形之差，因为是受压，故为负值，可用下列公式表示：

$$\Delta L = -(\Delta L_T - \Delta L_e) = \Delta L_e - \Delta L_T$$

同样，内部变形率用下式来表示：

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

应力和应变之间的关系可以从材料试验的应力—应变图中得知。以低碳钢为例，当应变弹性范围以内时，应力与应变是直线关系，可以用虎克定律来表示：

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = E(\varepsilon_e - \varepsilon_T) \quad (2-1)$$

对于低碳钢一类材料，应力—应变曲线可以简化为图 2-3 中 OST 线，即当试棒中的应力达到材料的屈服极限 σ_s 后不再升高。

当金属杆件在加热过程中受到阻碍，其长度不能自由增长，则在杆件中将产生内部变形，如果内部变形的绝对值小于金属屈服时的变形率 ($|\varepsilon_i| < \varepsilon_s$)，说明杆件中受到小于 σ_s 的应力 ($\sigma_i = E\varepsilon$)。当杆件温度从 T_1 恢复到 T_0 时，如果允许杆件自由收缩，则杆件将恢复到原

来长度 L_0 ，杆件中也不存在应力。假如杆件温度升得较高，达到 $T_2(T_2 > T_1)$ ，使杆件中的内部变形率大于金属屈服时的变形率，即 $|\varepsilon_2| > \varepsilon_s$ ，在这种情况下，杆件中不但产生达到屈服极限的应力，同时还产生压缩塑性变形，其数值为 $|\varepsilon_p| = |\varepsilon_e - \varepsilon_T| - \varepsilon_s$ 。在杆件温度由 T_2 恢复到 T_0 的过程中，若允许其自由收缩，最后杆件比原来长度缩短 ΔL_p ，杆件中也不存在内应力。

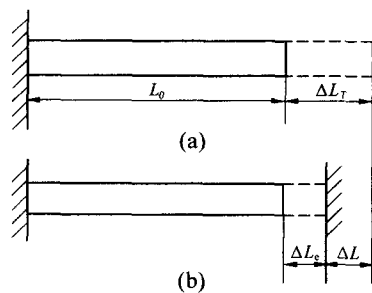


图 2-2 金属杆件的变形
(a)自由变形量 (b)可见变形量

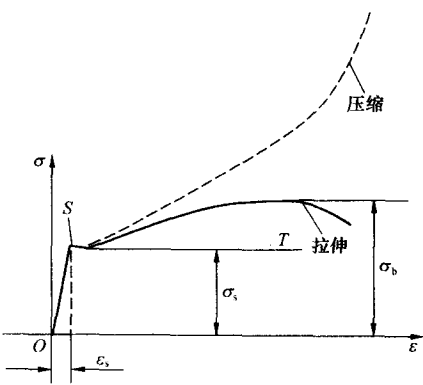


图 2-3 低碳钢的 $\sigma-\varepsilon$ 图

三、长板条在不均匀温度场作用下的变形和应力

前面分析的是一根金属杆件在均匀加热过程中，受到约束而发生应力和变形的情况。现在再来分析一个金属长板条受不均匀温度场作用时，其变形和应力的情况。我们分析一个长度比宽度大得多的板条，这样除了两个端部以外，可根据材料力学中的平面假设原理（即当构件受纵向力或弯矩作用而变形时，在构件中的平截面始终保持是平面）来进行分析。

(一)在长板条中心加热

图 2-4 所示厚度为 δ 、宽度为 B 的长板条，在中间沿长度上用电阻丝进行间接加热，则在板条横截面上将出现一个中间高两边低的不均匀温度场，而沿板条长度方向的温度分布可视为均匀的。关于这个板条的变形和应力的情况，我们可以从板条中切出一单位长度的小段来进行分析。

假设这个金属板条是由若干互不相连的小窄条组成，则每根小窄条都可以按着自己被加热到的温度自由变形，其结果使单位长度板条端面出现图 2-5a 所示的曲面 $\varepsilon_T = \alpha T$ 。实际上，组成板条的小窄条之间是互相牵连和约束的整体，截面必须保持平齐。由于温度场在板条上的分布是对称的，故端面只作平移。移动距离为 ε_e 。曲线 ε_T 与 ε_e 之间的差距为应变。平行线以上的为负值，产生压应力，平行线以下的为正值，产生拉应力。在这种情况下，板条中间受压两侧受拉。这三个区域的应力相互平衡，即平行线以上的面积和平行线以下的面积相等，见图 2-5b。如果已知温度分布是 x 的函数 $T=f(x)$ ，则应力的平衡条件可以用数学方程式来表达，其平衡条件是：

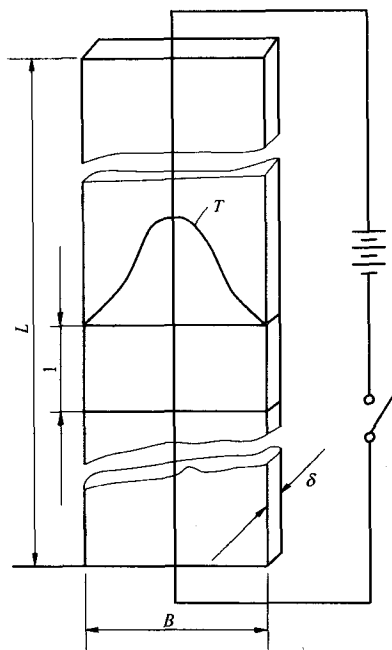


图 2-4 长板中心受热

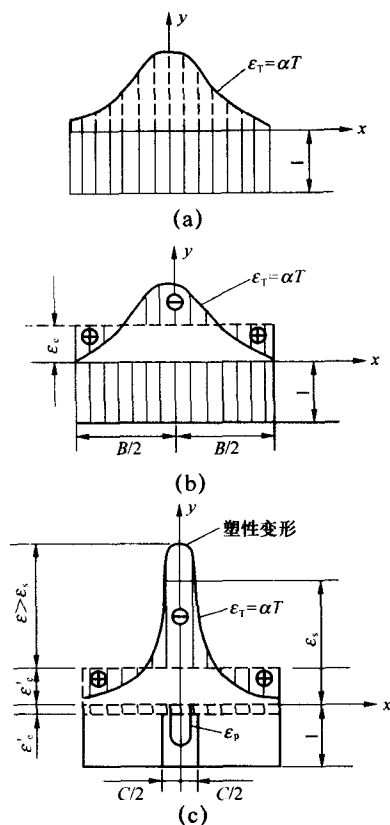


图 2-5 板条中心加热的应力与变形

$$\begin{aligned}\Sigma Y &= \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \sigma \cdot \delta \cdot dx = \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} E (\epsilon_e - \epsilon_T) \cdot \delta dx \\ &= E \cdot \delta \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \left[\epsilon_e - \alpha f(x) \right] dx = 0\end{aligned}\quad (2-2)$$

因为温度场对称于中心轴, 故 $\epsilon_e = \text{const}$, 截面只作平移, 外观应变 ϵ_e 可以从方程式(2-2)求出, 代入式(2-1)则可求出各点的内应力值。

由上述可知, 加在板条上的不均匀温度场, 将使板条产生内应力和变形。如果上述温度场在金属板条中所引起的内应力 σ 小于金属的屈服极限 σ_s , 当加热电源断开以后, 板条逐渐冷却, 恢复到原来的温度, 此时板条亦将恢复到原来长度, 应力和变形均将消失。

如果加在板条上的不均匀温度场使板条中心部分受热较高, 则在板条中心“C”区内产生较大的内部变形, 使“C”区中的内部变形率 ϵ 大于金属屈服极限时的变形率 ϵ_s 。这种情况可在图 2-5c 中看出。则在“C”区中将产生塑性变形。塑性变形区的宽度 C 的大小和塑性变形的分布可按公式(2-2)稍加修正来求得。内应力在 $-B/2 \sim -C/2$ 和 $C/2 \sim B/2$ 区中为 $\sigma = E(\epsilon_e - \epsilon_T)$, 在 $-C/2 \sim C/2$ 区中, $\sigma = E \left[\epsilon_e - \alpha f\left(\frac{C}{2}\right) \right] = -\sigma_s$ 。此时, 我们把加热电源

断开, 让板条渐渐冷却。由于在板条“C”区中产生压缩塑性变形, 当板条温度恢复到原始温度后, 应力和变形就不能像上述情况那样消失。如果允许其自由收缩, 板条“C”区的长度将比原来短, 其缩短量等于温度场存在时所产生的压缩塑性变形量。此时板条端面就成了一个中心凹的曲面。实际上板条是一个整体, “C”区的收缩受到两侧金属的限制, 截面保持为平面, 因此出现了新的变形和应力。板条中心部分受拉, 两侧受压, 这个新的平衡应力系统就是残余应力。而板条端面的位移就是残余变形。如果已知塑性区压缩变形的分布规律 $\varepsilon_p = f_p(x)$, 则残余应力:

$$\sigma = E [\varepsilon'_c - f_p(x)] \quad (2-3)$$

式中 ε'_c ——残余外观应变变量。

残余应力和变形也可用数学方程式来表达。平衡条件为:

$$\begin{aligned} \Sigma Y &= \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \sigma \cdot \delta \cdot dx = E\delta \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} (\varepsilon'_c - \varepsilon_p) dx \\ &= E\delta \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{C}{2}} \varepsilon'_c dx + E\delta \int_{-\frac{C}{2}}^{\frac{C}{2}} [\varepsilon'_c - f_p(x)] dx + E\delta \int_{\frac{C}{2}}^{\frac{B}{2}} \varepsilon'_c dx \\ &= E\delta \varepsilon'_c (B - c) + E\delta \int_{-\frac{C}{2}}^{\frac{C}{2}} [\varepsilon'_c - f_p(x)] dx = 0 \end{aligned} \quad (2-4)$$

由于 ε_p 的分布对称于中心轴, 故截面同样只作平移, $\varepsilon'_c = \text{const.}$ 可从式(2-4)和式(2-3)中求出残余应变和应力。

根据上述两种情况分析, 可以归纳如下: 在板条中心对称加热时, 板条中产生温度应力, 中心受压, 两边受拉, 同时平板端面向外平移(伸长)。如果此时不产生塑性变形, 即 $|\varepsilon| > \varepsilon_s$, 当温度恢复到原始状态后, 内应力消失, 平板端面亦恢复到原来的位置。如果此时产生塑性变形, 即 $|\varepsilon| > \varepsilon_s$, 当温度恢复到原始状态时, 还会出现由于不均匀塑性变形引起的残余应力, 其符号与温度应力大致相反, 同时板条端面向内平移(缩短), 即为残余变形。

(二)非对称加热(一侧加热)

在图 2-6 所示长板条一侧用电阻丝间接加热, 则在长板条中产生对断面中心不对称的不均匀温度场, 它将使板条产生变形和应力。它们也应符合内应力平衡和平面假设原则, 此板条端面亦有一个位移, 位移的大小受内应力必须平衡这一条件所制约, 因而不是任意的。图 2-6 中 b、c 所示情况, 它们只能产生两个符号相反, 而不作用在同一直线上的力, 这样就构成了不平衡力矩, 因此是不可能的。图 2-6d 所示情况, 形成了三个正负相间的应力区, 只有在这种条件下内应力才可能平衡。在这种情况下, 板条的外观变形不仅有端面平移, 还有角位移。板条沿长度上就出现了弯曲变形(图 2-6e)。如果已知温度按 $T=f(x)$ 分布, 则板条的应力与变形可用数学方式来表达。内应力的平衡条件为:

$$\Sigma Y = \int_0^B \sigma \delta dx = E\delta \int_0^B (\varepsilon_c - \varepsilon_T) dx = E\delta \int_0^B [\varepsilon_c - \alpha f(x)] dx = 0 \quad (2-5)$$

$$\begin{aligned} \Sigma M &= \int_0^B \sigma x \delta dx = E\delta \int_0^B (\varepsilon_c - \varepsilon_T) x dx \\ &= E\delta \int_0^B x [\varepsilon_c - \alpha f(x)] dx = 0 \end{aligned} \quad (2-6)$$

由于截面有转动, 因此 ε_c 并非常数, 而是 x 的线性函数:

$$\varepsilon_e = \frac{B\varepsilon_{e0} + (\varepsilon_{eB} - \varepsilon_{e0})x}{B} \quad (2-7)$$

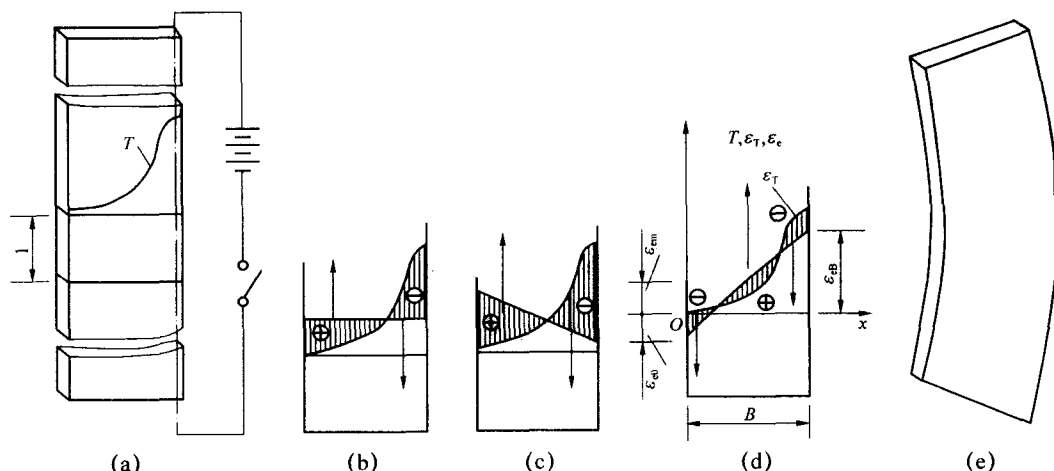


图 2-6 板条一侧受热的应力和变形

将式(2-7)代入式(2-5)、式(2-6)解联立方程即可求出 ε_{e0} 、 ε_{eB} ，进一步求出内应力的分布。从图 2-6 中不难看出板条的平均伸长率为：

$$\varepsilon_{em} = \frac{\varepsilon_{e0} + \varepsilon_{eB}}{2} \quad (2-8)$$

板条的曲率为：

$$c = \frac{1}{\rho} = \frac{\varepsilon_{eB} - \varepsilon_{e0}}{B} \quad (2-9)$$

如果在加热时板条中的内部变形率小于金属屈服极限时的变形率 ε_s ，则当温度恢复到原始温度时，板条中不存在残余应力，也不出现残余变形。如果在加热时，板条中的内部变形率大于金属屈服时的变形率 ε_s ，则板条中将出现压缩塑性变形。冷却时，板条恢复到原始温度，其中将出现残余应力。板条也产生残余弯曲变形和收缩变形，但方向与加热时相反(见图 2-7)。变形位置则由平衡条件来决定。

四、焊接引起的内应力及变形

(一)焊接应力与变形的特殊性

焊接应力和变形与上述不均匀温度场引起的应力和变形的规律是一致的，但是前者更为复杂。其复杂性首先表现在焊接时的温度变化范围比前面分析的情况要大得多，在焊缝上最高温度可高达材料的沸腾点，而离开热源温度急剧下降直至室温。金属在高温下性能随温度发生变化，图 2-8 是低碳钢、铝合金和钛合金的 σ_s 与温度的关系图。由图可以看到低碳钢在 500℃ 左右 σ_s 迅速下降。为了分析方便，通常用一条水平线和一条斜线(图上的虚线)组成的折线来简化。假设在 500℃ 以下低碳钢 σ_s 为一常量，而 500~600℃ 时， σ_s 直线下降到零。而钛合金的 σ_s 则用一条斜线来简化。图中铝合金的 σ_s 曲线未作简化。这些

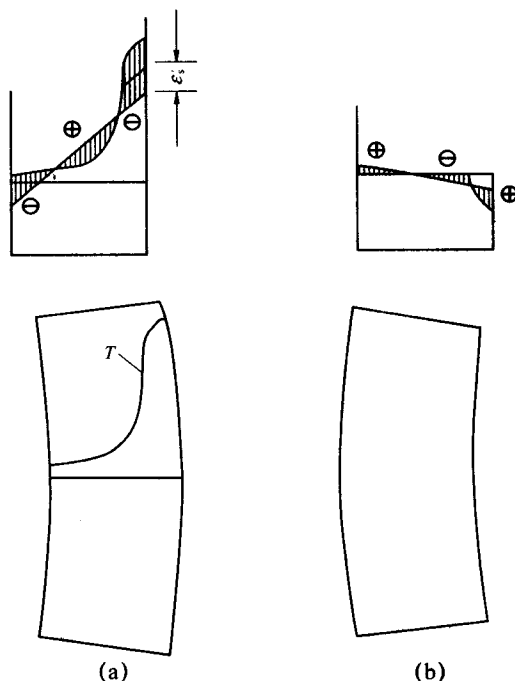


图 2-7 长板条一侧受热后产生的残余应力和变形

变化必然会影响到整个焊接过程中的应力分布，使问题复杂化。下面将举低碳钢作为例子进行分析。

设有一低碳钢平板条，沿中心线进行焊接，在焊接过程中出现一个温度场，在接近热源处取一横截面，该截面上的温度如图 2-9 所示。按照长板条中心加热时的应力和变形分析的基本方法，可找出该截面附近金属单元体的自由变形 ε_f 和外观变形 ε_e 。假设截面从 AA'

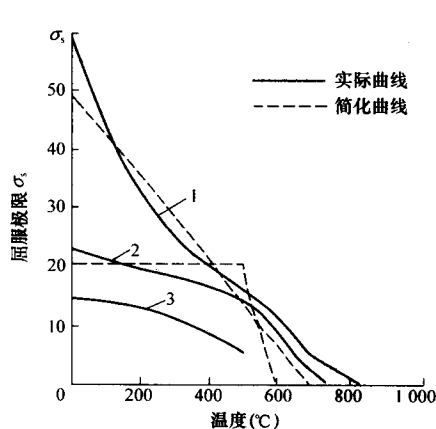


图 2-8 金属屈服极限 σ_s 与温度的关系

1—钛合金；2—低碳钢；3—铝合金

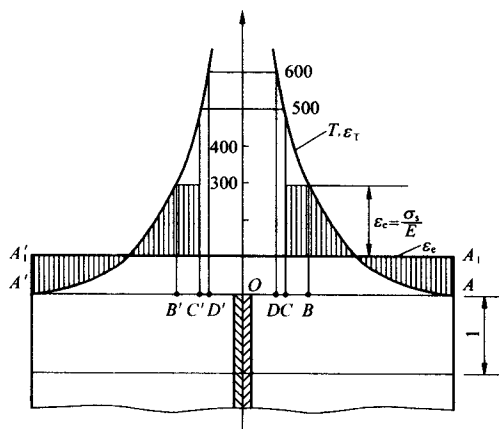


图 2-9 平板中心焊接时的内应力分布

平移到 A_1A_1' ，则 AA_1 即为 ε_e 。在 DD' 区域内，金属的温度超过 600°C ， σ_e 可视为零，不产生应力，因此这个区域不参加内应力的平衡。 DC 和 $D'C'$ 区域，温度从 600°C 降至 500°C ，屈服极限迅从零上升到室温时的数值，因此在这两个区域里内应力的大小是随 σ_s 的增加而增加的。在 CB 和 $C'B'$ 区域内 $|\varepsilon_e - \varepsilon_T| > \varepsilon_s$ ，故内应力为室温时的 σ_s 保持不变， AB 和 $A'B'$ 区域中金属完全处于弹性状态，内应力正比于内部应变值。

焊接时的温度变化范围大的另一个影响是可能出现相变，相变结果将引起许多物理和力学参量的变化，这是前面分析中一直未考虑的。焊接应力变形的复杂性还表现在它的温度场分布上，图 2-10 为薄板在焊接时的一个典型温度场。因此，平面假设的准确性就受到影响。但是，在焊接速度较快，材料导热性较差的情况下(如低碳钢、合金结构钢等)，在焊接温度场的后部，还有一个相当长的区域纵向的温度梯度较小，仍可用平面假设来作近似的分析。

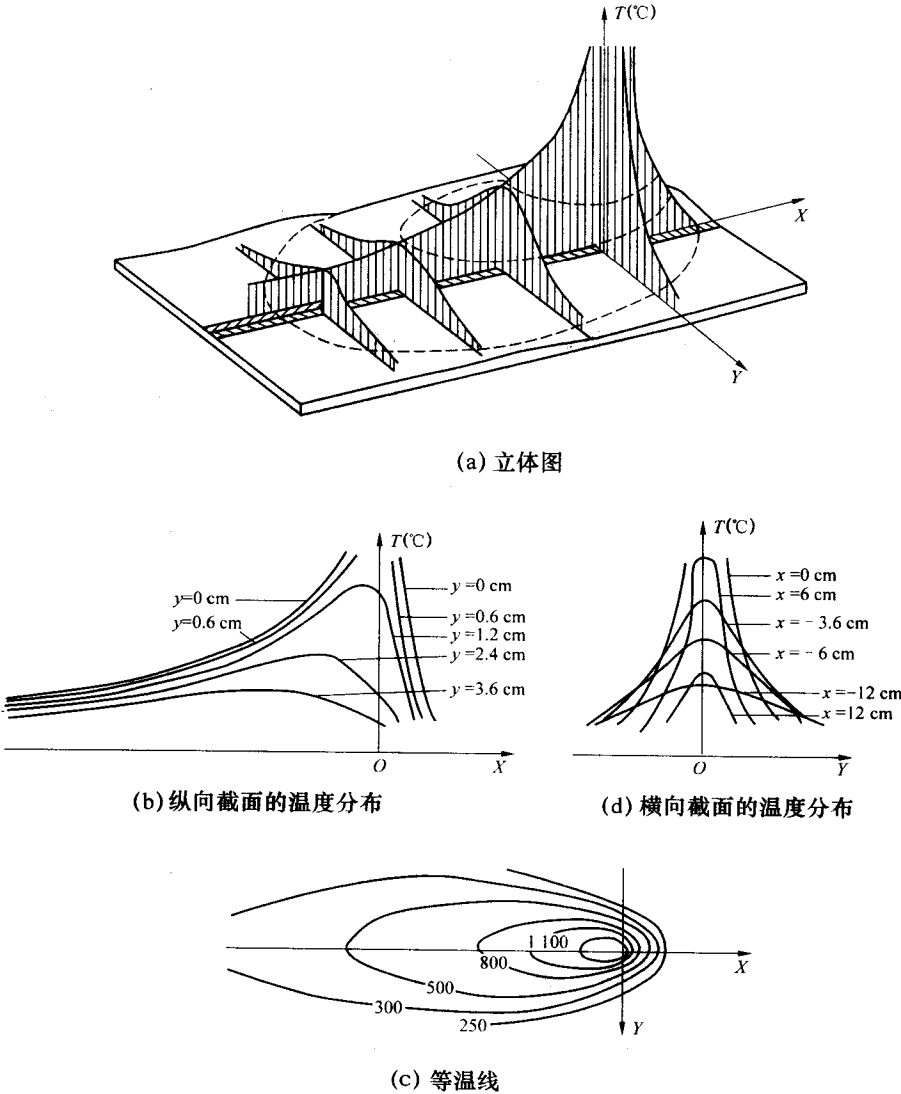


图 2-10 焊接温度场