

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

高等学校教材



压力容器残余应力

——成因、影响、调控与检测

YALIRONGQI CANYUYINGLI

CHENGYIN YINGXIANG TIAOKONG YU JIANCE

钟汉通 傅玉华 吴家声 编著

华中理工大学出版社

压力容器残余应力

——成因、影响、调控与检测

钟汉通 傅玉华 吴家声 编著

华中理工大学出版社

内 容 简 介

本书介绍压力容器各种残余应力的产生、影响、控制及其检测技术。第一篇介绍压力容器各种残余应力的形成机理、分布规律、特点及其对压力容器的影响,残余应力的控制与调整以及计算方法等。第二篇为残余应力的检测技术及工程实例。主要介绍了机械法(半破坏及破坏性应力释放法)和物理法(X射线法、磁性法、光弹贴片钻孔法、超声波法等),并简要地介绍了近年来使用的其它检测方法。

本书可作为高等院校有关专业的教师、本科生和研究生的教学参考书,亦可供从事压力容器设计、制造、检验和技术管理的工程技术人员参考。

压力容器残余应力

——成因、影响、调控与检测

钟汉通 傅玉华 吴家声 编著

责任编辑 姜菱

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社印刷厂印刷

*

开本:850×1168 1/32 印张:8.875 字数:216 000

1993年5月第1版 1993年5月第1次印刷

印数:1—1 000

ISBN 7-5609-0769-5/TG·27

定价:2.34元

(鄂)新登字第10号

前 言

压力容器是近代工业生产过程中不可缺少的一种设备。在石油化学工业中,炼油、化肥、农药、无机化工和有机化工等行业或部门都离不开压力容器,它们有的用于输送与贮存流体,有的用于热力过程和反应过程中的传热传质。在能源工业中,太阳能的利用、核动力发电、人造石油、煤的液化等都采用了大量的在条件苛刻的环境中工作的大型压力容器,例如,核动力装置中的反应堆压力容器是在长期辐照条件下的大型厚壁高温高压容器;煤液化反应器、航天工业中的各类动力火箭、飞机上的各种专用气瓶、作为武器用的大炮都是高压容器;在海洋探测中使用的深海探测容器是承受 $1 \times 10^4 \text{MPa}$ 以上的外压容器。压力容器在民用上也获得广泛应用,例如,城市里用的煤气、液化气瓶、液化气体贮罐及槽车;食品工业制冷装置中的蒸发器、冷凝器、液体冷冻剂贮罐等都是压力容器;还有医疗、卫生、地质勘探、文教体育等国民经济各部门也大量使用各种压力容器。一旦这些设备发生爆炸事故,就会危及人身安全、造成财产损失、带来灾难性恶果。因此,安全可靠性是压力容器的首要问题。压力容器大多数是由焊接组装而成的。随着压力容器的大型化和操作压力的提高,容器的结构形式向着多层化发展,这类容器采用热套、包扎等制造工艺,并伴随产生了制造预应力。随着超高压技术的发展,自增强容器也逐步推广使用。这种容器采用自增强处理技术,使容器具有自增强预应力。可以说,各种压力容器都存在残余应力。

压力容器的残余应力是怎样产生的?其分布有什么样的规律性?残余应力对各种压力容器的性能和安全性有何影响?有什么办法对它们加以调整或控制?在工程上如何定量地计算和检

测残余应力?这一系列问题,引起了压力容器的设计、制造、使用和技术监察部门的工程技术界极大的关注。多年来,国内外许多学者对上述问题做了大量的研究工作,取得了卓有成效的进展,并在有关文献中作了报导。但迄今为止,尚未见到汇集成册的关于压力容器残余应力的专著。为推动我国压力容器残余应力的研究及其检测技术的发展,促进压力容器设计、制造、使用和技术管理水平的提高,作者撰写了这本书,希望对从事压力容器工程技术工作的人员能有所裨益,也希望能对我国压力容器的残余应力容限标准的制订和检测技术规范的制订有所帮助。

本书内容分两篇共十章。第一篇第一章简明扼要地介绍了各种压力容器残余应力的产生机理及分布规律。重点叙述较复杂的焊接残余应力,也介绍了封头制造新工艺旋压法产生的残余应力的最新试验资料以及整体多层包扎预应力的分析。第二章主要叙述焊接残余应力的有害影响。对其它容器残余应力的有利影响只作一般分析介绍。尽管自增强残余应力的影响及计算已有专著论述,为完整起见,在本书的有关章节中仍作了综合的扼要介绍。第三章叙述残余应力的调整与控制,这对于压力容器的设计和制造很重要,因为作为最终影响压力容器性能的是经过调整和控制后的残余应力。本章阐明了常用的热作用法和机械法减小或消除焊接残余应力的原理和方法。对多层热套、多层包扎式容器的制造预应力控制与调整的原理和方法作了扼要分析,提出了一些新见解。第四章重点介绍了焊接残余应力的计算和整体多层包扎预应力的计算,关于自增强残余应力的计算,除按理想塑性体经典的方法计算外,还提出了按实际材料加压卸载塑性区幂函数硬化的力学模型,用全量理论计算公式进行计算的方法。本书第二篇介绍压力容器残余应力的检测技术,重点介绍测量残余应力的原理、方法、检测技术、误差分析以及应用实例等。第五章简要介绍了破坏性应力释放法,第六章重点介绍了目前应用最广的钻小盲孔法,第七章介绍光弹贴片钻盲孔法,第八章介绍比较成熟的X射线衍射法,第

九章介绍磁性法,第十章对超声波法、加载再屈服法、压痕法等测量残余应力方法作了扼要介绍。在自增强残余应力测量中,作者提出了利用厚壁圆筒承受内压的两向标定法和加载再屈服法两种新方法。

本书编著分工如下:华南理工大学钟汉通编写§1-5至§1-8、§3-3至§3-5、§4-2、§4-3、§8-5、§10-2、§10-3;武汉化工学院傅玉华编写第五章、第六章(其中§6-1至§6-3由钟汉通与傅玉华共同编写)、第七章、第八章、第九章;武汉化工学院吴家声编写§1-1至§1-4、第二章、§3-1、§3-2、§4-1、§10-1、§10-4。

参加编写工作的还有华中理工大学汉口分院的吴昊,湖北化工厂潘汉泽,湖北荆州地区煤气管理站黄德清等同志。

本书由华南理工大学陈国理教授主审。

在编著本书的过程中,承蒙华南理工大学钱颂文教授、华中理工大学张祖枢教授、郑州机械研究所冉唐方高工、湖北省化工厂总工胡年继高工等提供了宝贵意见。作者在此一并表示感谢。在此还向被引用文献的各位中外作者表示感谢。

本书作者虽然尽了很大努力,但限于篇幅,不可能对目前国内外压力容器残余应力的理论及其检测技术的发展作全面的更详细的叙述,即或已作叙述的部分也只能有所侧重。限于水平和经验,本书的缺点和错误在所难免,殷切希望读者予以指正。

作 者
1991年12月

目 录

第一篇 压力容器残余应力的产生、影响与调整控制

第一章 各种压力容器中的残余应力	(2)
§ 1-1 残余应力的概念及分类	(2)
§ 1-2 焊接残余应力的成因、分布规律及影响因素	(6)
§ 1-3 各种典型焊件中的残余应力	(19)
§ 1-4 高强度钢焊件中的残余应力	(40)
§ 1-5 热套式压力容器的残余应力	(42)
§ 1-6 自增强容器的残余应力	(46)
§ 1-7 多层包扎式压力容器残余应力	(50)
§ 1-8 旋压法封头的残余应力	(53)
第二章 压力容器残余应力对使用性能的影响	(61)
§ 2-1 焊接残余应力对容器静载强度的影响	(61)
§ 2-2 焊接残余应力对容器脆性断裂的影响	(63)
§ 2-3 焊接残余应力的概率分布对容器可靠寿命的影响	(72)
§ 2-4 焊接残余应力对容器疲劳强度的影响	(79)
§ 2-5 焊接残余应力对容器应力腐蚀开裂的影响	(85)
第三章 压力容器残余应力的调整与控制	(87)
§ 3-1 热作用对残余应力的调整与降低	(87)
§ 3-2 机械作用对焊接残余应力的调整	(91)
§ 3-3 超载法对焊接残余应力的调整	(96)
§ 3-4 多层压力容器残余应力的调整与控制	(98)

§ 3-5	自增强容器残余应力的衰减及其恢复	(101)
第四章	压力容器残余应力的理论计算	(111)
§ 4-1	焊接残余应力的有限元法测试计算	(111)
§ 4-2	自增强容器残余应力计算	(121)
§ 4-3	整体多层包扎式容器残余应力计算	(125)
 第二篇 压力容器残余应力检测技术		
第五章	破坏性应力释放法检测残余应力	(135)
§ 5-1	切槽应力释放法检测残余应力	(135)
§ 5-2	套孔应力释放法检测残余应力	(137)
§ 5-3	剥层(逐层剥除)应力释放法检测残余应力	(138)
第六章	钻盲孔法检测残余应力	(150)
§ 6-1	钻盲孔法检测残余应力的原理和计算方法	(150)
§ 6-2	钻盲孔法检测残余应力的技术	(159)
§ 6-3	钻盲孔法检测残余应力的实例	(164)
§ 6-4	钻盲孔法检测残余应力的误差分析	(174)
第七章	光弹贴片钻孔法检测残余应力	(181)
§ 7-1	光弹贴片钻孔法基本原理和应力计算	(181)
§ 7-2	光弹贴片钻孔法误差分析	(185)
§ 7-3	$\sqrt{3}R$ 法和西田正孝法	(190)
§ 7-4	光弹贴片钻孔法实验方法及应用实例	(198)
第八章	X射线衍射法检测残余应力	(204)
§ 8-1	X射线与晶体变形的基本概念	(205)
§ 8-2	X射线衍射法应力测定原理与计算公式	(208)
§ 8-3	X射线衍射法应力测定的测量方法	(212)
§ 8-4	衍射强度校正和定峰方法	(216)
§ 8-5	弹性常数 K_1 的标定	(221)
§ 8-6	X射线应力仪的应用与安全防护	(224)
第九章	磁性法检测残余应力	(226)
§ 9-1	磁性法检测残余应力的基本原理及其传感器	(226)
§ 9-2	磁性法应力计算——剪应力差法	(234)

§ 9-3	测试仪器与方法及标定实验	(235)
§ 9-4	磁性法检测残余应力实例	(240)
§ 9-5	磁性法检测残余应力的特点	(245)
第十章	残余应力的其它检测方法	(247)
§ 10-1	超声波法检测残余应力	(247)
§ 10-2	加载再屈服法检测残余应力	(254)
§ 10-3	压痕法检测残余应力	(263)
§ 10-4	检测残余应力的其它方法简介	(268)
参考文献		(270)

第一篇 压力容器残余应力的产生、影响与调整控制

随着近代工业的发展,化工设备及压力容器越来越大型化和高强度钢的采用,因此,对其安全可靠性的要求也越来越高。要设计和制造出没有残余应力的设备或压力容器是不切实际的,因为在压力容器制造工艺中,大多数压力容器均由若干预制部件或组件(例如筒体、法兰、封头等)通过组对焊接、包扎、热套等工艺而制成。容器上的一些必要的附件(如开孔接管、人孔凸缘等)也是采用焊接工艺使其与容器本体相连。在容器制造过程中,必然会产生各种残余应力。残余应力的存在将对容器的使用性能和结构强度、疲劳强度、应力腐蚀等产生很大影响。因此,了解各种残余应力的产生、分布规律、影响因素及如何调整,将对容器的安全使用是十分重要的。这是容器的设计、制造、使用和技术管理等部门及工程技术人员都非常关注的重要问题。本篇将分四章分别加以叙述。

第一章 各种压力容器中的残余应力

§ 1-1 残余应力的概念及分类

一、残余应力的概念及分类

构件在加工制造过程中,因受各种工艺因素的制约、影响和作用,在外部影响和作用解除后,会残存一种在构件内部自相平衡的内应力,这种内应力称为残余应力。各种文献对残余应力使用过不同的术语,诸如内应力、初始应力、固有应力、制造预应力等。

由于残余应力存在的状态,与材料性能、产生条件等密切相关,因而其分类方法也不尽相同。

按存在的范围,残余应力可分为宏观残余应力和微观残余应力两大类。

按其产生的机理,宏观残余应力可分为热加工残余应力和冷加工残余应力。前者有焊接残余应力、热处理残余应力、热套容器残余应力等;后者有多层包扎残余预应力、多层绕板或绕带残余应力、旋压封头残余应力、自增强处理残余预应力等。

按其对容器或构件使用性能的影响,宏观残余应力可分为有害的残余应力和有利的残余应力。前者有焊接残余应力、热处理残余应力等;后者有自增强处理残余预应力、热套容器残余预应力、多层包扎和多层缠绕容器的残余预应力等。

宏观残余应力分布在宏观范围内,它们的大小、方向与性质等,均可用通常的物理方法和机械方法进行测量。图 1-1 所示为几种不同的宏观应力,如图(a)所示的为太阳从一侧照射到构件上所产生的热变形和热应力,图(b)所示的为构件由焊接引起的焊缝

附近的残余应力,图(c)所示的为构件由磨削加工引起的表面薄层内的残余应力。

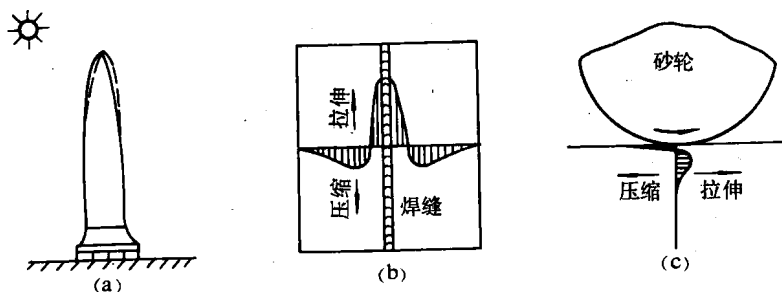


图 1-1 各种情况的宏观残余应力

(a) 太阳热引起的结构热变形; (b) 焊接引起的残余应力; (c) 磨削引起的残余应力

微观残余应力发生在微观范围内,它们属于微观视野范围内的应力。例如在钢内,残余应力产生在有马氏体组织的附近区域,这是由于马氏体转变发生在相对低的温度下,同时引起金属膨胀的缘故。在相当于原子大小范围内的残余应力,多存在于有位错的区域内。

按作用范围,微观残余应力又可细分为微观结构应力与晶体亚结构应力两类。前者分布在晶粒范围内,它的平衡范围可与晶粒尺寸来比量;后者作用在一个晶粒内部,它的平衡范围更小,其大小可以与晶格尺寸来比量。按产生原因,有人将微观残余应力分为如下几种:

- (1) 由于晶粒的各向异性而产生的微观残余应力。
- (2) 由于晶粒内外的塑性变形而产生的微观残余应力。
- (3) 由于夹杂物、沉淀相或相变而出现的第二相所产生的微观残余应力。

二、压力容器残余应力的产生

压力容器残余应力的产生大致可归结为:

1. 不匹配或不协调引起的残余应力

图 1-2 所示的是一个最简单的例子。当把不同长度的杆件两端分别强制地连接在一起时,就产生了残余应力:在较短的杆件 B 中产生拉伸残余应力,在较长的杆件 A 与 A' 中产生压缩残余应力。

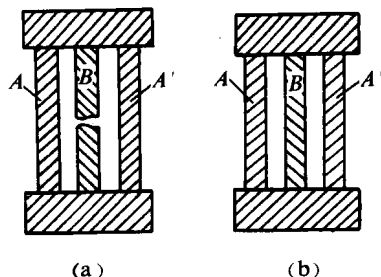


图 1-2 不协调引起的残余应力

(a)自由状态; (b)受力状态

2. 不均匀分布的非弹性应变引起的残余应力

当材料均匀加热时,均匀膨胀,因此不会产生热应力。但是,当材料在非均匀加热时将会产生热应力。当存在不均匀分布的塑性应变时,也将产生残余应力。对于平面应力状态下的残余应力场存在下列基本关系:

(1) 应变由如下弹性应变和非弹性应变组成,即

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x &= \epsilon'_x + \epsilon''_x \\ \epsilon_y &= \epsilon'_y + \epsilon''_y \\ \gamma_{xy} &= \gamma'_{xy} + \gamma''_{xy} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式中, $\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$ 为总应变分量; $\epsilon'_x, \epsilon'_y, \gamma'_{xy}$ 为弹性应变分量; $\epsilon''_x, \epsilon''_y, \gamma''_{xy}$ 为非弹性应变分量。

非弹性应变可以是塑性应变、热应变以及其它形式的应变。

(2) 应力与弹性应变在弹性范围内满足虎克定律,即

$$\left. \begin{aligned} \epsilon'_x &= \frac{1}{E}(\sigma_x - \mu\sigma_y) \\ \epsilon'_y &= \frac{1}{E}(\sigma_y - \mu\sigma_x) \\ \gamma'_{xy} &= \frac{1}{G}\tau_{xy} \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

(3) 应力应同时满足如下平衡条件

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

(4) 总应变应满足如下相容条件

$$\left(\frac{\partial^2 \epsilon'_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \epsilon'_y}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \gamma'_{xy}}{\partial x \partial y} \right) + \left(\frac{\partial^2 \epsilon''_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \epsilon''_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \gamma''_{xy}}{\partial x \partial y} \right) = 0 \quad (1-4)$$

方程式(1-2)及(1-4)表明,当根据非弹性应变按下式所确定的 R 值不为零时,便存在残余应力

$$R = - \left(\frac{\partial^2 \epsilon''_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \epsilon''_y}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \gamma''_{xy}}{\partial x \partial y} \right)$$

R 称为“不相容性”,可以认为它是引起残余应力的原因。

许多研究工作者对残余应力进行了数学分析,已经提出了一些方程以便根据已知的非弹性应变 $\epsilon'_x, \epsilon'_y, \gamma'_{xy}$ 来计算应力分量 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ 。从这些数学分析中得出以下重要结论:

首先,如果非弹性应变分量是位置的线性函数,即 $\epsilon'_x = a + bx + dy, \epsilon'_y = e + fx + gy, \gamma'_{xy} = k + lx + my$, 则 $R = 0$, 即变形在弹性范围内,将不产生残余应力。

其次,物体中的残余应力不可能通过测量该物体承受外载荷时产生的应变变化来确定。因此,为了测定残余应力,必须释放该物体的残余应力,并测量出释放的应变,从而计算出残余应力。

最后,当各弹性应变分量 $\epsilon'_x, \epsilon'_y, \gamma'_{xy}$ 确定后,可以根据公式(1-2)计算出残余应力 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ 。但是,如果不知道残余应力形成的原因,则引起残余应力的非弹性应变分量 $\epsilon'_x, \epsilon'_y, \gamma'_{xy}$ 是无法确定的。

3. 在压力容器制造工艺中产生的残余预应力

压力容器结构向着单层厚壁自增强或多层化方向发展,现已有多种结构形式:多层热套、多层绕板或绕带、多层包扎等。它们已成为高压、超高压容器的主要结构型式而被广泛应用于石油化工、航空航天、核能等各个工业领域。这些多层容器都客观上会有目的

地或无目的地产生残余预应力。

§ 1-2 焊接残余应力的成因、分布规律 及影响因素

一、焊接残余应力的形成机理

金属的焊接过程,不仅是一种局部区域金属的冶炼和金相热处理过程,而且也是局部区域发生力学变化的过程。焊接时,焊件上的温度分布极不均匀,焊缝及其附近区域的金属被加热到熔化高温,然后逐渐冷却而凝固。近缝区的金属也要经过由低温到高温、再降到低温的热循环过程。金属在加热时要膨胀,而在冷却和凝固时要收缩。由于这种热胀冷缩都是在极复杂的局部状态下进行的,且变形往往是不协调的,因而在焊件中会产生复杂的内应力及弹塑性变形,而且都是局部的和不均匀的。此外,焊缝在凝固和冷却过程中,还要发生相变,出现体积的变化,所有这些都能在焊件中产生复杂的内应力和变形。

焊件在局部加热和冷却过程中,若没有外力作用,就会产生复杂的内应力,这个内应力通常称为焊接瞬时应力,或焊接热应力。而焊接終了焊件冷却后残存下来的内应力称为焊接残余应力。二者均为宏观内应力,统称为焊接应力。此外,在焊接时,焊缝的晶体随温度的变化会发生相变,出现体积变化,从而产生所谓组织应力,这种应力属微观内应力。对于低碳钢,一般可以不考虑组织应力,但对于合金钢,就不能不考虑相变引起的组织应力了。焊件产生内应力的同时,将会出现伸长、缩短、弯曲、翘曲与扭转等变形。在一般情况下,当焊件变形受到限制,而不能变形或变形很小时,内应力会很大,因此,当焊件在夹具中施焊,或焊件的刚度很大,使局部焊接变形很小时,应力将更加增大,增加的这个应力称为拘束应力。

对于最普通的周边自由的对接接头,其焊接残余应力分布的

例子如图 1-3 所示,而图 1-4 所示的为拘束焊接接头中残余应力分布的例子。因焊缝金属的热容量通常远小于被连接母材的热容量,故不可避免地会出现急剧的温度梯度,从而冷却后在焊缝区将

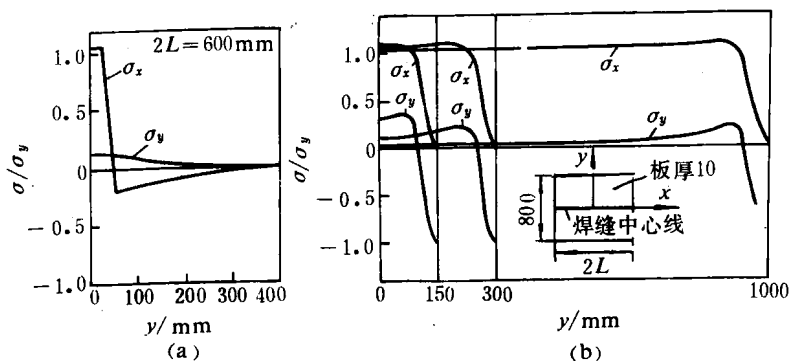


图 1-3 周边自由的对接接头残余应力分布

- (a)在板件中间截面(y 轴)上的残余应力分布(焊缝长度 $2L=600$ mm 的情况);
(b)焊缝中心线(x 轴)上的残余应力分布

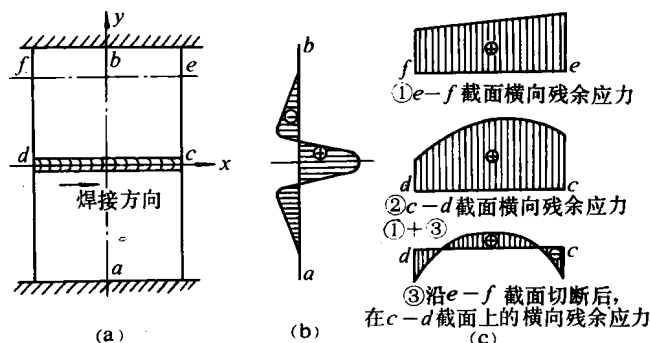


图 1-4 拘束焊接接头中的残余应力分布

- (a)受拘束的焊接接头; (b) $a-b$ 截面上的纵向残余应力;
(c)横向残余应力分布

产生较高的残余拉应力,并被焊缝周围母材中的压缩应力场所平衡,而压缩应力的大小则与焊缝的体积成正比。根据残余应力形成机理的简要分析,在焊接情况下可认为峰值应力大约等于屈服限。

二、焊接残余应力的分布规律及影响因素

从焊接应力与变形的产生和演变过程可以看出,影响焊接残余应力的因素很多而且较复杂,无论是焊件的几何形状与尺寸、材料的性质,还是工艺因素以及原始应力状态等,对焊接残余应力的分布均有很大的影响。尽管在焊接残余应力分析技术方面,已有所谓理论模拟方法、计算机模拟技术以及有限元法等,但目前均不成熟,因此,还只能定性地分析焊接残余应力的分布规律及其影响因素。至于焊接残余应力值的大小,一般是由实验方法直接测定,也有根据有关理论进行计算。不过,理论计算方法有一定的局限性,理论计算值也往往要用实测数值进行验证。

在一般的焊接结构中,当厚度不大时,可以认为残余应力是二维的,厚度方向的应力很小。只有在大厚度结构中,厚度方向上的应力才比较大。在本书中,用 σ_x 表示与焊缝平行的纵向残余应力,用 σ_y 表示与焊缝垂直的横向残余应力。如果要考虑厚度方向的残余应力,则用 σ_z 表示。

1. 纵向残余应力 σ_x

在低碳钢对接焊中,焊缝及热影响区中的纵向残余应力为拉应力,其最大残余应力 σ_m 通常可达到焊缝金属的屈服限 σ_s 。离开焊缝热影响区不远的母材中是压应力。例如,在长板条对接焊中,纵向残余应力 σ_x 的分布情况如图 1-5 所示。对接焊板条的两端存在一个过渡区,在过渡区中 σ_x 比较低,越接近端面,变形的拘束减小, σ_x 越低,在端面可自由变形, $\sigma_x=0$ 。在板条的中段,有一个残余应力稳定区,在稳定区 σ_x 可达到焊接材料的 σ_s 。但是当板条较短时,则不存在应力稳定区,且焊缝上的纵向残余应力 σ_x 小于 σ_s 。

板边堆焊时,板件纵向残余应力的分布情况如图 1-6 所示。其