

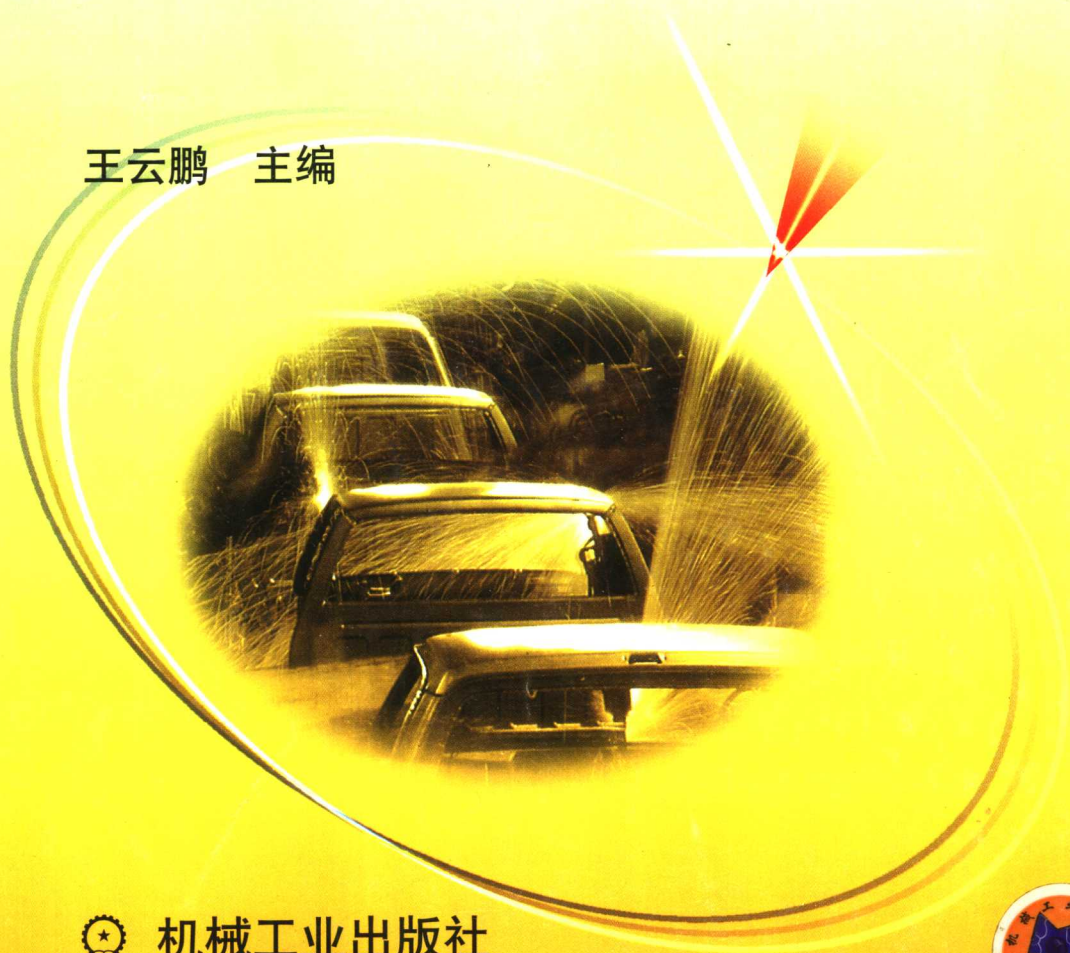


中等职业教育国家规划教材  
全国中等职业教育教材审定委员会审定

# 焊接结构生产

## (焊接专业)

王云鹏 主编



 机械工业出版社



本书是根据教育部 2000 年 8 月颁发的中等职业学校“焊接结构生产”课程教学大纲编写的,适用于三年制中等职业教育焊接专业使用的国家规划教材。

本教材主要内容包括焊接结构理论知识,焊接结构零件加工工艺,焊接结构装配与焊接工艺,焊接结构生产工艺规程的编制,焊接结构生产的组织与安全技术及典型产品的装配—焊接工艺六个部分共十章。

全书通俗易懂,实用性强,便于组织教学。同时,也可作为有关技术人员、管理人员的参考书。

#### 图书在版编目 (CIP) 数据

焊接结构生产/王云鹏主编. —北京:机械工业出版社, 2002.7

中等职业教育国家规划教材·焊接专业

ISBN 7-111-10400-5

I. 焊... II. 王... III. 焊接结构—专业学校—教材

IV. TG403

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 039492 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:何月秋 张祖凤 版式设计:张世琴 责任校对:韩晶

封面设计:姚毅 责任印制:闫焱

北京中加印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 1 月第 1 版·第 2 次印刷

787mm×1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·16 印张·392 千字

定价:21.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

## 中等职业教育国家规划教材出版说明

为了贯彻《中共中央国务院关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》精神，落实“面向 21 世纪教育振兴行动计划”中提出的职业教育课程改革和教材建设规划，根据教育部关于“中等职业教育国家规划教材申报、立项及管理意见”（教职成〔2001〕1 号）的精神，我们组织力量对实现中等职业教育培养目标和保证基本教学规格起保障作用的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教材进行了规划和编写，从 2001 年秋季开学起，国家规划教材将陆续提供给各类中等职业学校选用。

国家规划教材是根据教育部最新颁布的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教学大纲（课程教学基本要求）编写，并经全国中等职业教育教材审定委员会审定。新教材全面贯彻素质教育思想，从社会发展对高素质劳动者和中初级专门人才需要的实际出发，注重对学生的创新精神和实践能力的培养。新教材在理论体系、组织结构和阐述方法等方面均作了一些新的尝试。新教材实行一纲多本，努力为教材选用提供比较和选择，满足不同学制、不同专业和不同办学条件的教学需要。

希望各地、各部门积极推广和选用国家规划教材，并在使用过程中，注意总结经验，及时提出修改意见和建议，使之不断完善和提高。

教育部职业教育与成人教育司

# 前 言

本书是根据2000年8月国家教育部颁布的中等职业学校“焊接结构生产”课程教学大纲编写的，适于三年制焊接专业使用的国家规划教材。遵循新大纲规定的内容和学时要求，全书分为：基础模块，包括焊接结构理论知识、焊接结构零件加工工艺、焊接结构装配与焊接工艺、焊接结构生产工艺规程的编制、焊接结构生产的组织与安全技术等内容；选用模块，包括焊接车间设计、梁及压力容器焊接工艺、船体及舾装件焊接工艺；实践性教学模块，包括基本实验和实训环节。

为适应中等职业教育教学改革和发展的需要，贯彻以素质教育为基础、以能力为本位的教学指导思想，突出职业教育特色，在认真总结同类教材建设经验的基础上，本书在编写时着重考虑了以下几个方面：

1) 立足于基本知识、基本工艺、基本技能的传授与训练，重点介绍焊接结构生产过程的工艺操作技术，淡化工艺设计的原理和计算等理论部分。

2) 吸纳一定量的新工艺、新技术，扩展学生的知识结构；对基本加工的实质和操作方法进行阐述与指导，指出不同焊接加工方法的来龙去脉、所用设备与工具、操作要领及安全技术。

3) 语言通俗易懂，简明扼要，图文并茂。

4) 每章后均附有复习思考题，便于巩固和加深对教学内容的理解和掌握。

5) 采用最新国家标准和工艺规范，并介绍了典型结构图例和有关工艺参数图表。

本教材由北京机械工业学校王云鹏（绪论，第二、三、五、六、十章），渤海船舶职业学院李莉（第一章）、孙庭秀（第四章）、邓洪军（第九章），河北省机电学校王现荣（第七章）、赵强（第八章）共同编写。王云鹏任主编，由董芳审阅。

本书由全国中等职业教育教材审定委员会审定通过，崔占全教授任责任主审，由徐瑞教授、回书利副教授审稿。他们对提高书稿质量起到了重要作用，在此表示衷心感谢。

本书编写过程中得到广西机电职业技术学院戴建树以及一些学校和工厂的有关人员的帮助与指导，他们还为本书提供了资料，在此一并表示衷心感谢。

由于编者水平有限，编写时间仓促，书中一定存在错误和不妥之处，恳请使用本书的教师和广大读者批评指正。

编 者

# 目 录

前言		
绪论	1	
第一章 焊接应力与变形	3	
第一节 焊接应力与变形的产生	3	
一、应力与变形的基本知识	3	
二、研究焊接应力与变形的基本假定	4	
三、焊接应力与变形产生的原因	4	
第二节 焊接变形	7	
一、焊接残余变形的种类及其影响因素	7	
二、预防焊接变形的措施	15	
三、矫正焊接残余变形的的方法	21	
第三节 焊接残余应力	23	
一、焊接残余应力的分布	23	
二、焊接残余应力对焊接结构的影响	26	
三、减小焊接残余应力的措施	27	
四、消除焊接残余应力的方法	29	
五、焊接残余应力的测定	31	
复习思考题	31	
实验 焊接变形的观测实验	32	
第二章 焊接接头的静载强度	35	
第一节 焊接接头的类型	35	
一、焊接接头基本形式	35	
二、电弧焊焊缝的基本形式	38	
第二节 常用焊接接头的工作应力分布	39	
一、应力集中	39	
二、电弧焊接头的工作应力分布	39	
三、电阻焊接头的工作应力分布	43	
第三节 焊接接头的设计与静载强度		
计算	43	
一、焊接接头的设计	43	
二、电弧焊接头静载强度计算	45	
三、点焊接头静载强度计算	52	
第四节 焊接接头的脆性断裂与疲劳		
破坏	53	
一、焊接结构的脆性断裂	53	
二、疲劳破坏	54	
复习思考题	56	
第三章 焊接结构概述	57	
第一节 焊接结构的基本构件	57	
一、焊接梁、柱、桁架	57	
二、焊接容器结构	62	
三、机械零部件焊接结构	64	
四、薄板焊接结构	67	
第二节 焊接结构生产工艺过程	68	
一、生产组织与准备	69	
二、备料加工	69	
三、装配与焊接	69	
四、结构质量检验	69	
五、焊接结构安全评定	69	
复习思考题	70	
第四章 焊接结构备料及成形加工	71	
第一节 钢材的矫正及预处理	71	
一、钢材变形的原因	71	
二、钢材的矫正原理	72	
三、钢材的矫正方法	72	
四、钢材的预处理	82	
第二节 划线、放样与下料	83	
一、划线	83	
二、放样	85	
三、下料	89	
四、坯料的边缘加工	95	
第三节 弯曲与成形	96	
一、弯曲成形	96	
二、机械压弯成形	98	
三、板材、型材的长度计算	98	
四、卷板	100	
第四节 拉深和旋压	102	
一、拉深	102	
二、旋压	104	
复习思考题	104	
第五章 焊接结构的装配与 焊接工艺	105	
第一节 焊接结构的装配	105	
一、装配基本条件及装配基准	105	

二、装配用工夹量具与设备 .....	106	合理性 .....	182
三、装配中的测量 .....	109	三、从降低应力集中角度分析结构的 合理性 .....	184
四、结构的装配工艺 .....	112	四、从焊接生产工艺性分析结构的合 理性 .....	185
五、装配基本方式与方法 .....	114	五、从焊接生产的经济性分析结构的 合理性 .....	186
六、典型结构的装配工艺 .....	119	第三节 焊接结构件工艺性审查实例 .....	188
第二节 焊接结构的焊接工艺 .....	122	一、轮的结构工艺性审查 .....	188
一、焊接工艺制订的内容和原则 .....	122	二、型钢桁架的结构工艺性审查 .....	189
二、焊接方法、焊接材料及焊接设备的 选择 .....	123	三、重型汽车桥壳的结构工艺性审查 .....	191
三、焊接参数的选定 .....	123	复习思考题 .....	193
四、确定合理的焊接热参数 .....	124	<b>第八章 焊接工艺的制订</b> .....	195
五、焊接工艺评定 .....	124	第一节 焊接结构生产工艺规程的基本 知识 .....	195
复习思考题 .....	127	一、生产过程和工艺过程 .....	195
<b>第六章 装配—焊接工艺装备</b> .....	128	二、工艺过程的组成 .....	195
第一节 装配—焊接工艺装备的作用及 特点 .....	128	第二节 焊接结构加工工艺规程的编制 .....	197
一、焊接工装的地位和作用 .....	128	一、焊接工艺规程的作用 .....	197
二、焊接工装的分类 .....	128	二、编制工艺规程的依据 .....	197
三、焊接工装的特点 .....	130	三、编制工艺规程的步骤 .....	199
第二节 装配—焊接夹具 .....	130	四、焊接工艺规程的编制内容与要求 .....	205
一、焊件的定位及定位器 .....	130	第三节 焊接结构生产工艺过程分析 .....	207
二、焊件在夹紧机构中夹紧 .....	136	一、从保证焊接结构的技术要求方面 进行工艺过程分析 .....	207
三、工装夹具设计的基本知识 .....	150	二、从采用先进的技术措施方面进行 工艺过程分析 .....	208
四、夹具结构实例分析 .....	157	复习思考题 .....	210
第三节 焊接变位机械装置与设备 .....	158	<b>第九章 典型焊接结构的生产工艺</b> .....	211
一、焊件变位机 .....	158	第一节 桥式起重机桥架的生产工艺 .....	211
二、焊机变位机 .....	167	一、桥式起重机的组成、主要部件的 结构特点及技术标准 .....	211
三、焊工变位机 .....	171	二、主梁及端梁的制造工艺 .....	214
四、变位机械装备的组合应用 .....	173	三、桥架的装配与焊接工艺 .....	218
第四节 其他装置与装备 .....	173	第二节 压力容器的生产工艺 .....	220
一、装焊吊具 .....	173	一、压力容器的基本知识 .....	220
二、焊接机器人简介 .....	175	二、中、低压容器的制造工艺 .....	224
复习思考题 .....	178	三、高压容器的制造工艺 .....	227
<b>第七章 焊接结构工艺性审查</b> .....	179	四、球形容器的制造工艺 .....	227
第一节 焊接结构工艺性审查的目的与 步骤 .....	179	第三节 船舶及舰装件的焊接工艺 .....	230
一、焊接结构工艺性的概念及审查的 目的 .....	179	一、船体结构的类型及特点 .....	230
二、焊接结构工艺性审查的步骤 .....	180	二、船体结构焊接的工艺原则 .....	231
第二节 焊接结构工艺性审查的内容 .....	181	三、整体造船中的焊接工艺 .....	234
一、从焊接结构强度的可行性分析结构的 合理性 .....	181		
二、从焊接应力和变形分析结构的			

复习思考题 .....	234	第二节 焊接结构生产的组织 .....	239
<b>第十章 焊接结构生产的组织与安全</b>		一、焊接生产的空间组织 .....	239
<b>技术</b> .....	235	二、焊接生产的时间组织 .....	240
<b>第一节 焊接车间的组成与平面布置</b> .....	235	<b>第三节 焊接生产中的劳动保护</b> .....	242
一、焊接车间的类型 .....	235	一、焊接生产中的危害与防护 .....	242
二、焊接车间的组成 .....	235	二、焊接生产安全管理 .....	244
三、焊接车间平面布置 .....	235	复习思考题 .....	245
四、车间平面布置举例 .....	237	<b>参考文献</b> .....	246

## 绪 论

焊接是金属连接的一种工艺方法。焊接结构是将各种经过轧制的金属材料及铸、锻件等毛坯采用焊接方法制造成能承受载荷的金属结构。

(1) 焊接结构的应用与发展 焊接技术是机械制造业中的关键技术之一。焊接作为一门独立的学科,随着现代工业的高速发展而不断进步。焊接结构的应用几乎涉及到国民经济的各个领域,如石油与化工工业、冶金矿山与重型机械、起重与运输设备、车辆与船舶制造、航空与航天技术、建筑结构与机器结构等。根据预测,目前世界钢产量的50%将应用于焊接结构。可以说,当今焊接结构的用钢量占总用钢量的百分比,已成为衡量一个国家工业技术发展水平的主要标志之一。

近十几年来,我国在引进国外先进技术和设备的同时,许多专门从事焊接结构制造的工厂和车间还进行了大规模的设备更新和改造。高效节能的焊接技术、自动化跟踪技术、计算机控制以及焊接机器人的推广和采用,对提高焊接机械化和自动化生产,对拓宽焊接结构在我国的应用领域起到了重要作用。至今,已经能制造年处理250万t原油的炼油设备、30万t乙烯成套设备、30万kW锅炉机组、15~22万kW水轮机、5万t远洋轮船、海洋采油平台等大型工业设备和工程中的焊接结构,也能制造运载火箭及核潜艇中各种重要焊接结构,而且焊接结构生产技术和产量都有较大的发展。这些焊接结构的成功制造,标志着我国在焊接技术的开发与应用方面进入了一个崭新的阶段。然而,与工业发达的国家相比,我国在传统技术的改造与电子技术的普及应用上,在焊接机械化和自动化生产的研制与开发方面都还存在着一定的差距。

(2) 焊接结构的特点 焊接结构具有一系列优点,主要表现在以下几个方面:

1) 通过焊接可将多种不同形状与厚度的钢材(或其他金属材料)连接起来,也可将不同种类金属材料(铸钢件、锻压件等)连接起来,从而使焊接结构的材料分布、性能的匹配更合理。需要指出,选择焊接结构的金属材料应尽可能采用焊接性良好的材料,当 $w_c$ 超过0.30%或某些合金钢为了获得优质接头时,必须采用特殊的工艺措施。

2) 焊接是一种金属原子间的连接,刚性大、整体性好。焊接接头的强度一般可与母材相等,能够承受基体金属所能承受的各种载荷的作用。

3) 用焊接方法制造各种零件或结构可节省大量的金属材料。焊接结构中各个零件间是直接连接,不需要附加的连接件。将铸造、锻造结构改为焊接结构或铸—焊、锻—焊联合结构,是合理利用材料和节约能源的重要途径。

4) 用焊接(切割)加工的零件(毛坯)或部件,加工量少,甚至不经机械加工就可投入使用。劳动量少,生产率高,加工周期短。

5) 与其他加工方法相比,生产焊接结构一般不需要大型、贵重的设备,因而兴建焊接结构制造厂(车间)时设备投资较少,投产快,对产品的生产规模适应性强,而且更换产品规格、品种也较方便。

6) 焊接特别适用于几何尺寸大而材料分散的制品,可将大型、复杂的结构分解为许多



小零件或部件分期加工,然后通过焊接连成整个结构,“以小拼大”,解决其他加工方法难于制造乃至无法加工的机器结构,这是解决大型、复杂结构件加工的一个重要途径。

焊接结构的不足之处大多反映在焊接接头上的问题,主要有以下几个方面:

1) 由于接头外形尺寸突变及可能存在的各种焊接缺陷,造成构件几何上的不连续性,从而引起应力集中、承载面积减小,形成断裂源,裂纹的扩展难于控制。

2) 焊接接头中可能存在脆化区、软化区、各种劣质区,显示出力学性能上的不均匀性。这是由于焊接工艺特点,接头部分的成分和组织与母材的差异所致。

3) 焊接过程中,局部不均匀加热会产生复杂的热应力,导致焊接变形与残余应力的产生。

焊接接头是焊接结构的基本要素,同时在许多情况下它又是焊接结构上的薄弱环节。为了设计和制造出优质的焊接接头,关键要做到以下几点:

1) 合理地设计,正确地选择材料。

2) 采用适宜的焊接设备和制订正确的焊接工艺。

3) 有良好的焊接技艺以及严格的质量控制。

(3) 《焊接结构生产》讲授的主要内容 “焊接结构生产”是焊接专业的主要专业课程之一。根据中等职业教育的培养目标和学生的知识水平,教材的编写内容包括焊接结构基本理论(焊接应力与变形、接头静载强度等)以及焊接结构生产工艺过程等内容。本教材从分析焊接结构产生应力与变形的原因入手,较为全面系统地介绍了焊接接头的基本概念与静载强度、焊接结构的工艺性、产品结构的零件加工工艺、装配与焊接工艺及其所用工艺装备、产品制造工艺规程的制订,以及典型焊接结构的生产工艺、焊接车间的组织管理、安全生产及车间平面布置等方面的基本知识,这是从事焊接结构生产的工艺人员必备的专业理论知识。

(4) 学习本教材的目的与方法 通过本课程的学习应使学生达到以下目的和要求:

1) 初步掌握焊接应力与变形产生的原因以及控制、减小和消除焊接应力与变形的工艺要点。

2) 初步掌握焊接接头的种类、应力分布的规律、焊接接头静载强度的验算方法以及结构疲劳断裂和脆断的基本知识。

3) 初步掌握焊接结构制造的一般工艺流程,能够根据产品图样、技术要求和生产性质,合理地制订一般焊接结构的零件加工、装配、焊接工艺规程。

4) 初步学会分析一般焊接结构的工艺性,能对中等复杂的焊接结构图样进行工艺性审查,熟悉生产过程各环节对产品质量的影响和保证质量的措施。

5) 了解焊接结构生产中常用工艺装备的功用、结构特点、适用范围和使用要求,并初步具有选用和设计一般装配—焊接夹具的能力。

6) 了解焊接生产车间的平面布置、生产组织管理及安全生产方面的基本知识,初步学会绘制焊接车间或工段的简单平面布置图。

学习本教材时应注意掌握学习方法,“焊接结构生产”是一门实践性较强的专业课程,要注意理论联系实际,善于综合运用基础课及专业课程多方面的知识去认识和分析焊接结构的生产实际问题。学习本课程前,应使学生对焊接结构生产的全过程有一定程度的感性认识。通过组织学生进行现场教学和参观,加深理论与实际关系的正确认识,还可结合电化教学的方式开阔学生的视野,培养学生分析问题和解决问题的能力。

# 第一章 焊接应力与变形

焊接应力是引起脆性断裂、疲劳断裂、应力腐蚀断裂和失稳破坏的主要原因；焊接变形也使结构的形状和尺寸精度难以达到技术要求，直接影响结构的制造质量和使用性能。本章主要讨论焊接应力与变形的基本概念及产生原因，焊接变形的种类，控制焊接变形的工艺措施及焊接变形的矫正，焊接应力的分布规律，降低焊接应力的工艺措施和焊后如何消除焊接残余应力。

## 第一节 焊接应力与变形的产生

### 一、应力与变形的基本知识

#### 1. 变形

在外力或温度等因素作用下所引起物体的形状和尺寸的改变称为变形。一般情况下，物体的变形可分为弹性变形和塑性变形。当外力或其他因素去除后变形也随之消失，物体恢复原状，这种变形称为弹性变形；当外力或其他因素去除后变形仍然存在，物体不能恢复原状，这种变形称为塑性变形。物体的变形还可按拘束条件分为自由变形和非自由变形。

以一根金属杆的变形为例，当温度为  $T_0$  时，其长度为  $L_0$ 。均匀加热，温度上升到  $T$  时，如果金属杆不受阻，杆的长度会伸长至  $L$ ，其自由变形伸长量  $\Delta L_T = L - L_0$ ，见图 1-1a；如果金属杆件的伸长受阻，则变形量不能完全表现出来，就是非自由变形。非自由变形中，把能表现出来的变形称为外观变形，用  $\Delta L_e$  表示；而未表现出的变形称为内部变形，用  $\Delta L$  表示。在数值上， $\Delta L = \Delta L_T - \Delta L_e$ ，见图 1-1b。

单位长度的变形量称为变形率，自由变形率用  $\epsilon_T$  表示，其数学表达式为

$$\epsilon_T = \frac{\Delta L_T}{L_0} = \alpha_l (T - T_0) \quad (1-1)$$

式中  $\alpha_l$ ——金属线膨胀系数，它的数值随材料及温度而变化。

外观变形率  $\epsilon_e$ ，可用下式表示：

$$\epsilon_e = \frac{\Delta L_e}{L_0} \quad (1-2)$$

同样，内部变形率  $\epsilon$  用下式表示：

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (1-3)$$

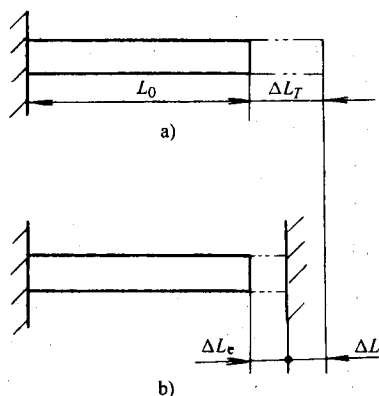


图 1-1 金属杆件的变形

a) 自由变形 b) 非自由变形

#### 2. 应力

物体在外力作用或其他因素引起物体内部之间的相互作用力，叫做内力。物体单位截面积上的内力叫做应力。

根据引起内力原因的不同,可将应力分为工作应力和内应力。工作应力是由外力作用于物体而引起的应力;内应力是由物体的化学成分不均匀、金相组织或温度等因素的变化,造成物体内部的不均匀性变形而引起的应力。内应力的显著特点是:自成平衡力系。

### 3. 焊接应力与焊接变形

焊接应力是焊接过程中及焊接过程结束后,存在于焊件中的内应力。按应力作用时间不同,焊接应力可分为焊接瞬时应力和焊接残余应力。焊接瞬时应力,是指焊接过程中某一瞬时的焊接应力,它随时间变化。焊件冷却后,残留于焊件内的应力,称为焊接残余应力。

由焊接而引起的焊件尺寸和形状的改变称为焊接变形。其中,焊接过程中的变形称为焊接瞬时变形;焊后残留于焊件中的变形称为焊接残余变形。

## 二、研究焊接应力与变形的基本假定

焊接过程中产生焊接应力与变形的原因比较复杂。为了研究问题方便,常作以下假定:

(1) 平截面假定 假定构件在焊前所取的横截面,焊后仍保持为平面,即可以认为,构件变形时其横截面是平行移动或转动的,截面本身并不变形。

(2) 金属性能不变的假定 假定在焊接过程中材料的某些热物理性能,如线膨胀系数( $\alpha_l$ )、比热容( $c$ )、热导率( $\lambda$ )等均不随温度而变化。

(3) 金属屈服点与温度关系的假定 低碳钢屈服点与温度的实际关系如图 1-2 实线所示。为了讨论问题的方便,我们将它简化为图中虚线所示,即在 500℃ 以下,屈服点与常温下相同,不随温度而变化;在 500~600℃ 之间,屈服点值迅速下降;600℃ 以上时呈全塑性状态,即屈服点为零。我们把材料的屈服点为零时的温度称为塑性温度。

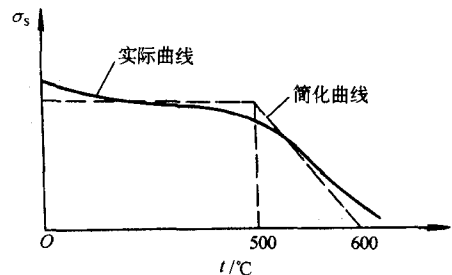


图 1-2 低碳钢的屈服点与温度的关系

## 三、焊接应力与变形产生的原因

影响焊接应力与变形的因素很多,其中最根本的原因是焊件受热不均匀,其次是由于焊缝金属的收缩、金相组织的变化及焊件的刚性不同所致。另外,焊缝在焊接结构中的位置、装配焊接顺序、焊接方法、焊接电流及焊接方向等对焊接应力与变形也有一定的影响。下面着重介绍几个主要因素。

### 1. 焊件的不均匀受热

焊接是一个局部的加热过程,焊件上的温度分布极不均匀。为了便于了解不均匀受热时应力与变形的产生,首先对均匀加热时的应力与变形进行讨论。

(1) 不受约束的杆件在均匀加热时的应力与变形 根据前面对变形知识的讨论,不受约束的杆件在均匀加热与冷却时,其变形属于自由变形,因此在杆件加热过程中不会产生任何内应力,冷却后也不会有任何残余应力和残余变形。

(2) 受约束的杆件在均匀加热时的应力与变形 根据前面对非自由变形情况的讨论,受约束的杆件的变形属于非自由变形,既存在外观变形,也存在内部变形。我们把压应力达到屈服点  $\sigma_s$  时的温度称为屈服点温度  $t_s$  (对于低碳钢来说,就是 100℃)。如果加热温度较低 ( $t < t_s$ ),材料处于弹性范围内,则在加热过程中杆件的变形全部为弹性变形。根据虎克定律,应力与应变(内部变形率)符合线性关系,即

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1-4)$$

式中  $E$ ——弹性模量。

当温度恢复到原始温度时，杆件自由收缩到原来的长度，压应力全部消失，既不存在残余变形也不存在残余应力。

当加热温度较高，达到或超过材料屈服点温度时 ( $t > t_s$ )，则杆件中产生压缩塑性变形，内部变形由弹性变形和塑性变形两部分组成，甚至全部由塑性变形组成 ( $t > 600^\circ\text{C}$  时)。当温度恢复到原始温度时，弹性变形恢复，塑性变形不可恢复，可能出现以下三种情况：

- 1) 如果杆件能充分自由收缩，那么杆件中只出现残余变形而无残余应力。
- 2) 如果杆件受绝对拘束，那么杆件中没有残余变形而存在较大的残余应力。
- 3) 如果杆件收缩不充分，那么杆件中既有残余应力又有残余变形。

实际生产中的焊件，就与上述的第三种情况相似，焊后既有残余应力存在，又有残余变形产生。

(3) 长板条中心加热（类似于堆焊）引起的应力与变形 如图 1-3a 所示的长度为  $L_0$ 、

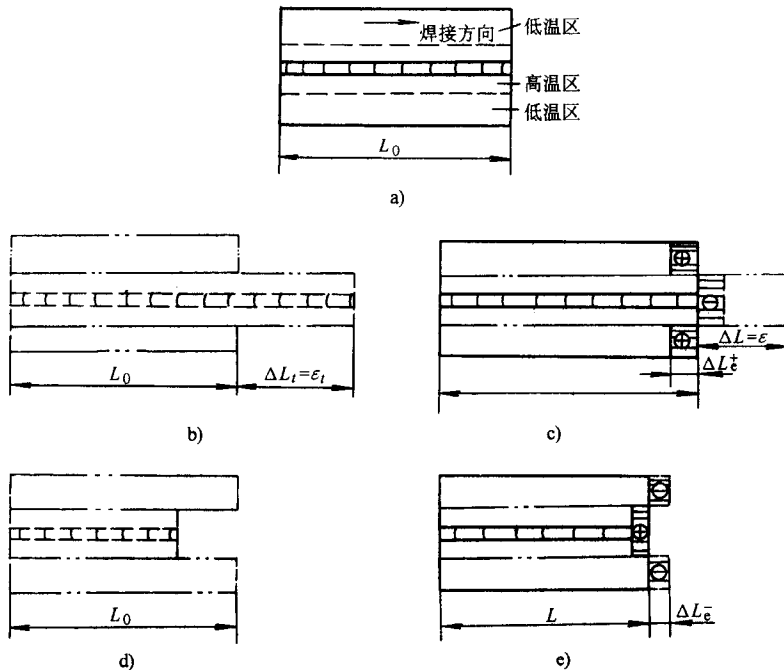


图 1-3 钢板条中心加热和冷却时的应力与变形

a) 原始状态 b)、c) 加热过程 d)、e) 冷却以后

厚度为  $\delta$  的长板条，材料为低碳钢，在其中间沿长度方向上进行加热。为简化讨论，我们将板条上的温度分为两种，中间为高温区，其温度均匀一致；两边为低温区，其温度也均匀一致。

加热时，如果板条的高温区与低温区是可分离的，高温区将伸长，低温区不变，如图 1-3b。实际上板条是一个整体，所以板条将整体伸长，此时高温区内产生较大的压缩塑性变形和压缩弹性变形，如图 1-3c。

冷却时，由于压缩塑性变形不可恢复，所以，如果高温区与低温区是可分离的，高温区应缩短，低温区应恢复原长，如图 1-3d。但实际上板条是一个整体，所以板条将整体缩短，这就是板条的残余变形，如图 1-3e。同时在板条内部也产生了残余应力，中间高温区为拉应力，两侧低温区为压应力

(4) 长板条一侧加热（相当于板边堆焊）引起的应力与变形 如图 1-4a 所示的材质均匀的钢板，在其边缘快速加热。假设钢板由许多互不相连的窄条组成，则各窄条在加热时将按温度高低而有不同伸长，如图 1-4b 所示。但实际上，板条是一整体，各板条之间是互相牵连、互相影响的，上一部分金属因受下一部分金属的阻碍作用而不能自由伸长，因此产生了压缩塑性变形。由于钢板上的温度分布是自上而下逐渐降低，因此，钢板产生了向下的弯曲变形，如图 1-4c 所示。

钢板冷却后，各窄条的收缩应如图 1-4d 所示。但实际上钢板是一个整体，上一部分金属要受到下一部分的阻碍而不能自由收缩，所以钢板产生了与加热时相反的残余弯曲变形，如图 1-4e 所示。同时在钢板内产生了如图 1-4e 所示的残余应力，即钢板中部为压应力，钢板两侧为拉应力。

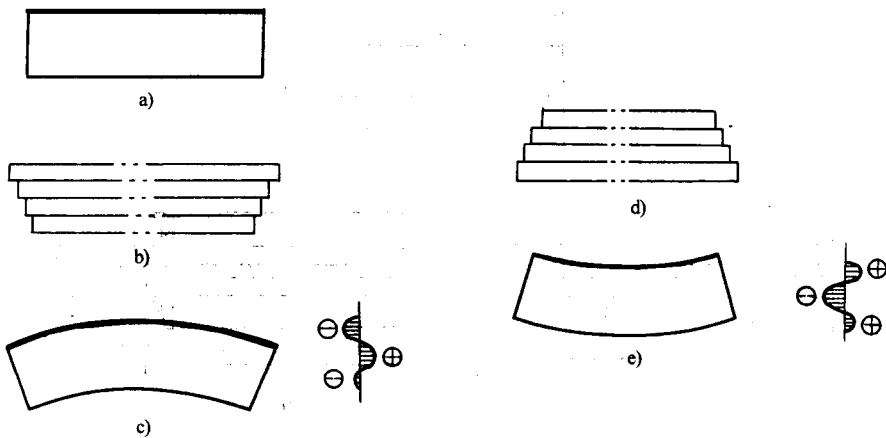


图 1-4 钢板边缘一侧加热和冷却时的应力与变形

a) 原始状态 b) 假设各板条的伸长 c) 加热后的变形及应力  
d) 假设各板条的收缩 e) 冷却以后的变形及应力

由前面 (3)、(4) 讨论可知，对构件进行不均匀加热，在加热过程中，只要温度高于材料屈服点的温度，构件就会产生压缩塑性变形，冷却后，构件必然有残余应力和残余变形。焊接是极不均匀的加热过程，且温度远远高于材料屈服点温度，所以，焊后焊件必然有残余应力和残余变形。

## 2. 焊缝金属的收缩

焊缝金属冷却过程中，当由液态凝固为固态时，其体积要收缩。由于焊缝金属与母材是紧密联系的，因此，焊缝金属并不能自由收缩。这将引起整个焊件的变形，同时在焊缝中引起残余应力。另外，一条焊缝是逐步形成的，焊缝中先结晶的部分要阻止后结晶部分的收缩，由此也会产生焊接应力与变形。

## 3. 金属组织的变化

钢在加热及冷却过程中发生相变，可得到不同的组织。这些组织的比体积也不一样，由

此也会造成焊接应力与变形。钢中常见组织的比体积见表 1-1。

表 1-1 钢中常见组织的比体积

(单位:  $\text{cm}^3/\text{g}$ )

组 织	奥 氏 体	铁 素 体	珠 光 体	渗 碳 体	马 氏 体
比体积	0.123~0.125	0.127	0.1286	0.130	0.127~0.131

#### 4. 焊件的刚性和拘束

焊件的刚性和拘束对焊接应力和变形也有较大的影响。刚性是指焊件抵抗变形的能力；而拘束是焊件周围物体对焊件变形的约束。刚性是焊件本身的性能，它与焊件材质、焊件截面形状和尺寸等有关；而拘束是一种外部条件。焊件自身的刚性及受周围的拘束程度越大，焊接变形越小，焊接应力越大；反之，焊件自身的刚性及受周围的拘束程度越小，则焊接变形越大，而焊接应力越小。

## 第二节 焊 接 变 形

### 一、焊接残余变形的种类及其影响因素

按变形对整个焊接结构的影响程度来分，可分为局部变形和整体变形；按焊接残余变形的外观形态来分，有如图 1-5 所示的五种基本变形形式：收缩变形、角变形、弯曲变形、波浪变形和扭曲变形。这些基本变形形式的不同组合，形成了实际生产中复杂的焊件变形。下面将分别讨论各种变形的形成规律和影响因素。

#### 1. 收缩变形

焊件焊后尺寸比焊前缩短的现象称为收缩变形。它分为纵向收缩变形和横向收缩变形，如图 1-6 所示。

(1) 纵向收缩变形 纵向收缩变形即沿焊缝轴线方向尺寸的缩短。这是由于焊缝及其附近区域在焊接高温的作用下产生纵向的压缩塑性变形，焊后，这个区域要收缩，便引起了焊件的纵向收缩变形。

纵向收缩变形量取决于焊缝长度、焊件的横截面积、材料的弹性模量、压缩塑性变形区的面积以及压缩塑性变形率等。

焊件的横截面积越大，焊件的纵向收缩量越小。焊缝的长度越长，纵向收缩量越大。从这个角度考虑，受力不大的焊接结构采用间断焊缝代替连续焊缝，是减小焊件纵向收缩变形的有效措施。

压缩塑性变形区面积与焊接方法、焊接热输入、焊接顺序以及母材的热物理性质有关，其中以热输入影响最大。同样截面形状和大小的焊缝，可以一次焊成，也可以采用多层焊。多层焊每次所用的热输入比单层焊时要小得多。因此，对于横截面相同的焊缝，采用多层焊引起的纵向收缩量比单层焊小，分的层数越多，每层的热输入越小，纵向收缩量就越小。

焊件的原始温度提高，相当于热输入增大，焊后纵向收缩量增大。但是，当原始温度高到某一程度，可能会出现相反的情况。因为随着原始温度的提高，焊件上的温度差减小，温度趋于均匀化，压缩塑性变形率下降，可使压缩塑性变形量减小，从而使纵向收缩量减小。

焊件材料的线膨胀系数对纵向收缩量也有一定的影响，线膨胀系数大的材料，焊后纵向

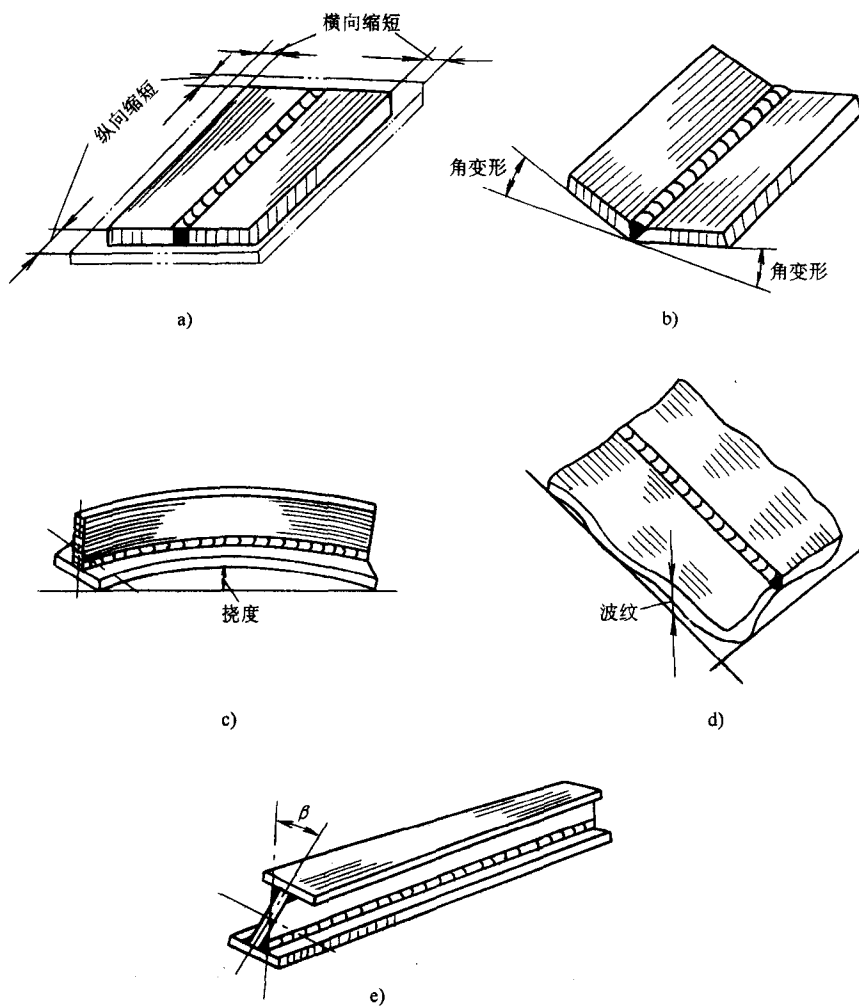


图 1-5 焊接变形的基本形式

a) 收缩变形 b) 角变形 c) 弯曲变形 d) 波浪变形 e) 扭曲变形

收缩量大，如不锈钢和铝比碳钢焊件的收缩量大。

焊缝的纵向收缩可用一些经验公式作初步的估算。

对于单层对接焊缝的纵向收缩量：

$$\Delta x = \frac{k_1 A_H L}{A} \quad (1-5)$$

式中  $A_H$ ——焊缝的横截面积；

$A$ ——焊件横截面积；

$L$ ——焊缝的长度；

$k_1$ ——系数，与焊接方法和材料有关，

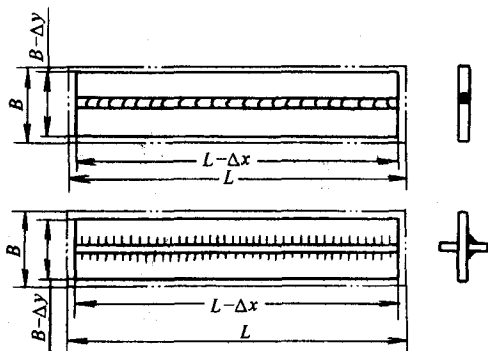


图 1-6 纵向和横向收缩变形

见表 1-2。

表 1-2 系数  $k_1$  值

焊接方法	CO <sub>2</sub> 气体保护焊	埋弧焊	焊条电弧焊	
材料	低碳钢		低碳钢	奥氏体钢
$k_1$	0.043	0.071~0.076	0.048~0.057	0.076

多层对接焊缝的纵向收缩量，也可由式 (1-5) 估算，但注意  $A_H$  应取第一层焊缝的横截面积，然后乘以系数  $k_2$ 。 $k_2$  由下式计算：

$$k_2 = 1 + 85\epsilon_s n \quad (1-6)$$

式中  $\epsilon_s$ ——屈服应变值，且  $\epsilon_s = \frac{\sigma_s}{E}$ ；

$n$ ——焊缝层数。

两面有角焊缝的 T 形接头构件，纵向收缩量也可由式 (1-5) 估算，但注意  $A_H$  应取一条角焊缝的横截面积，然后乘以系数 1.3~1.45。

(2) 横向收缩变形 横向收缩变形是指沿垂直于焊缝轴线方向尺寸的缩短。构件焊接时，不仅产生纵向收缩变形，同时也产生横向收缩变形。产生横向收缩变形的过程比较复杂，影响因素很多，如线能量、接头形式、装配间隙、板厚、焊接方法以及焊件的刚性等，其中以线能量、装配间隙、接头形式等影响最为明显。

不管何种接头形式，其横向收缩量总是随焊接线能量增大而增加。装配间隙对横向收缩量的影响也较大，且情况复杂。一般来说，随着装配间隙的增大，横向收缩量也增加。

图 1-7 是中间留有一定间隙的两块平板对接焊的横向收缩变形过程。焊接时，随着热源对金属的加热，对接边产生膨胀，焊接间隙减小。焊后冷却时，由于焊缝金属很快凝固，阻碍平板两对接边的恢复，则产生横向收缩变形。

如果两板对接焊时不留间隙，如图 1-8 所示，则在加热时，板的膨胀引起板边挤压，使板在厚度方向上增厚，冷却时也会产生横向收缩变形，但其横向收缩量小于有间隙的情况。

另外，横向收缩量沿焊缝长度方向分布不均匀，因为一条焊缝是逐步形成的，先焊的焊缝冷却收缩对后焊的焊缝有一定挤压作用，使后焊的焊缝横向收缩量更大。一般情况，焊缝的横向收缩沿焊接方向是由

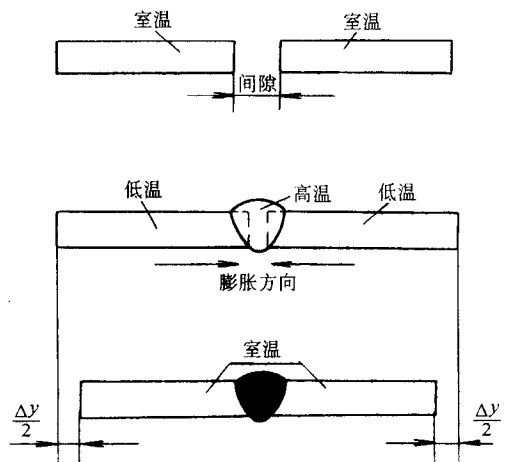


图 1-7 带间隙平板对接焊的横向收缩变形过程

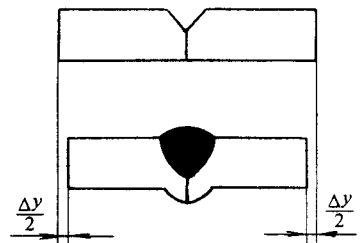


图 1-8 无间隙平板对接焊的横向收缩变形过程



小到大，增大到一定长度后便趋于稳定。由于这个原因，生产中常将一条焊缝的两端头间隙取不同值，后半部分比前半部分要大1~3mm。

横向收缩的大小还与装配后定位焊和装夹情况有关。定位焊焊缝越长，装夹的拘束程度越大，横向收缩量就越小。

对接接头的横向收缩量 $\Delta y$ 可用以下两式估算：

$$\Delta y = 0.18 \frac{A_H}{\delta} \quad (1-7)$$

或

$$\Delta y = 0.2 \frac{A_H}{\delta} + 0.05b \quad (1-8)$$

式中  $A_H$ ——焊缝的横截面积；


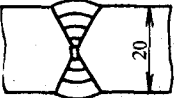




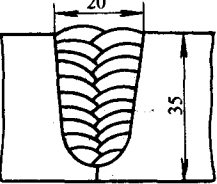

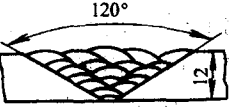
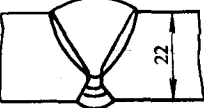
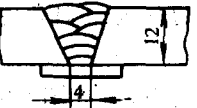
$\delta$ ——板厚；

$b$ ——对接间隙。

表1-3列出了低碳钢对接接头横向收缩量的一些试验数据，可供参考。

表1-3 低碳钢对接横向收缩量

(单位：mm)

接头横截面	焊接方法	$\Delta y$	接头横截面	焊接方法	$\Delta y$
	焊条电弧焊 2层	1.0		焊条电弧焊正反面各焊4层	1.8
	焊条电弧焊 5层	1.6		焊条电弧焊 (深熔焊条)	1.6
	焊条电弧焊正面5层，反面清根后焊2层	1.8		右向气焊	2.3
	焊条电弧焊 20道，反面未焊	3.2		铜垫板上埋弧焊一层	0.6
				焊条电弧焊	3.3
	1/3背面焊条电弧焊，2/3埋弧焊一层	2.4		焊条电弧焊 (加垫板单面焊)	1.5

从表中可以看出，对接接头的横向收缩量随焊缝金属量的增加而增大；热输入、板厚和坡口角度增大，横向收缩量也增加，而板厚的增大使接头的刚度增大，又可以限制焊缝的横向收缩。另外，多层焊时，先焊的焊道引起的横向收缩较明显，后焊焊道引起的横向收缩逐层减小。焊接方法对横向收缩量也有影响，如：相同尺寸的构件采用埋弧焊比采用焊条电弧焊其横向收缩量小；气焊的横向收缩量比电弧焊的大。

角焊缝的横向收缩量要比对接焊缝的横向收缩小得多。表1-4是低碳钢T形接头及搭接接头的横向收缩量的实测数据，可供参考。