



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)

第2版

王云鹏 主编



 机械工业出版社



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

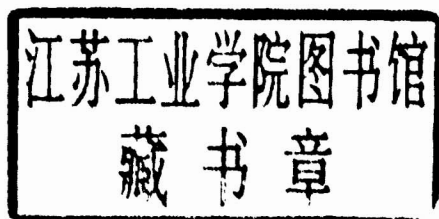
# 焊 接 结 构 生 产

## (焊 接 专 业)

第 2 版

主 编 王云鹏

参 编 邓洪军 李 莉 董俊慧 高千红



机 械 工 业 出 版 社

本书是经全国中等职业教育教材审定委员会审定,依据教育部 2001 年颁布的重点专业主干课程教学大纲,在第 1 版教材的基础上,根据“教育部关于制定‘2004—2007 年职业教育教材开发编写计划’的通知”等文件的精神修订再版的。

本教材的主要内容有焊接应力与变形、焊接接头的应力分布及静载强度、焊接结构概述、焊接结构备料及成形加工、焊接结构的装配与焊接工艺、装配—焊接工艺装备、焊接结构工艺性分析、焊接工艺的制定、典型焊接结构的生产工艺,焊接结构的生产组织与安全技术、焊接变形的观测实验等。全书通俗易懂,实用性强,便于组织教学。

全书通俗易懂、实用性强,便于组织教学。本书是三年制中等职业教育焊接专业使用的国家规划教材,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(焊接专业)/王云鹏主编.—2 版.—北京:机械工业出版社,2007.4(2008.1 重印)

中等职业教育国家规划教材

ISBN 978-7-111-10400-1

I. 焊… II. 王… III. 焊接结构—焊接工艺—专业学校—教材  
IV. TG44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 026849 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:张祖凤 崔占军

责任编辑:张祖凤 版式设计:霍永明 责任校对:陈延翔

封面设计:姚毅 责任印制:洪汉军

北京汇林印务有限公司印刷

2008 年 1 月第 2 版第 3 次印刷

184mm×260mm·14.25 印张·349 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-10400-1

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

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379182

封面无防伪标均为盗版

## 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“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，教育部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）编写而成的，并经全国中等职业教育教材审定委员会审定通过。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

## 第2版前言

本书是经全国中等职业教育教材审定委员会审定，依据教育部2001年颁布的重点专业主干课程教学大纲，在第1版教材的基础上，根据“教育部关于制定‘2004—2007年职业教育教材开发编写计划’的通知”等文件精神修订再版的。

此次修订保留了原教材的主要编写特点，即立足于基本知识、基本工艺、基本技能的传授与训练；立足于掌握操作要领和安全技术。修订中注意到以下几方面：其一，正视中职教育的培养目标和生源的特点，在突出应用性、实践性的基础上重组课程结构、更新教学内容体系，教材结构向“理论浅、内容新、应用多和学得活”的方向转变；其二，当今高新技术的迅速发展，增加了与职业能力培养相关的新技术、新工艺、新设备、新材料，具有一定的超前性和先进性；其三，课程内容紧紧围绕培养学生生产现场所要求实施的职业能力来阐述，溶入国家职业技能鉴定中的理论知识点，注重实践教学，注重操作技能培养。

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

本教材由北京市机械工业学校王云鹏（绪论，第二、三、五、六、十章）、高千红（第七、八章），渤海船舶职业学院李莉（第一章）、董俊慧（第四章）、邓洪军（第九章）共同修订。

本书在编写过程中，得到了各参编参审单位及许多学校和工厂有关人员的大力支持和热情帮助，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

## 第1版前言

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

|                   |    |                    |    |
|-------------------|----|--------------------|----|
| 出版说明              |    | 第四节 焊接接头的脆性断裂与疲劳破坏 | 47 |
| 第2版前言             |    | 一、焊接结构的脆性断裂        | 47 |
| 第1版前言             |    | 二、疲劳破坏             | 48 |
| 绪论                | 1  | 复习思考题              | 50 |
| 第一章 焊接应力与变形       | 4  | 第三章 焊接结构概述         | 51 |
| 第一节 焊接应力与变形的产生    | 4  | 第一节 焊接结构的基本构件      | 51 |
| 一、焊接应力与变形的基本知识    | 4  | 一、焊接梁、柱、桁架结构       | 51 |
| 二、焊接应力与变形产生的原因    | 4  | 二、焊接容器结构           | 55 |
| 第二节 焊接变形          | 6  | 三、机械零部件焊接结构        | 57 |
| 一、焊接变形的种类及其影响因素   | 6  | 四、薄板焊接结构           | 59 |
| 二、控制焊接变形的措施       | 9  | 第二节 焊接结构生产工艺过程     | 61 |
| 三、矫正焊接变形的办法       | 14 | 一、生产组织与准备          | 61 |
| 第三节 焊接残余应力        | 16 | 二、备料加工             | 61 |
| 一、焊接残余应力的分类       | 16 | 三、装配与焊接            | 61 |
| 二、焊接残余应力的分布       | 16 | 四、结构质量检验           | 61 |
| 三、焊接残余应力对焊接结构的影响  | 17 | 复习思考题              | 62 |
| 四、控制焊接残余应力的措施     | 18 | 第四章 焊接结构备料及成形加工    | 63 |
| 五、消除或减小焊接残余应力的方法  | 20 | 第一节 钢材的矫正及预处理      | 63 |
| 六、焊接残余应力的测定       | 21 | 一、钢材变形的原因          | 63 |
| 复习思考题             | 22 | 二、钢材的矫正原理          | 64 |
| 实验 焊接变形的观测实验      | 22 | 三、钢材的矫正方法          | 64 |
| 第二章 焊接接头的应力分布及    |    | 四、钢材的预处理           | 73 |
| 静载强度              | 25 | 第二节 划线、放样与下料       | 74 |
| 第一节 焊接接头的基本知识     | 25 | 一、识图与划线            | 74 |
| 一、焊接接头的组成         | 25 | 二、放样               | 76 |
| 二、焊接接头基本形式        | 25 | 三、下料               | 82 |
| 三、电弧焊焊缝基本形式       | 29 | 四、坯料的边缘加工          | 85 |
| 第二节 常用焊接接头的工作应力分布 | 30 | 第三节 弯曲与成形          | 87 |
| 一、应力集中            | 30 | 一、弯曲成形             | 87 |
| 二、电弧焊接头的工作应力分布    | 30 | 二、机械压弯成形           | 88 |
| 三、电阻焊接头的工作应力分布    | 33 | 三、板材、型材展开长度计算      | 89 |
| 第三节 焊接接头的静载强度     | 34 | 四、卷板               | 91 |
| 一、焊接接头的设计         | 34 | 第四节 拉延和旋压          | 93 |
| 二、焊接接头静载强度计算的假设   | 36 | 一、拉延               | 93 |
| 三、焊缝许用应力          | 36 | 二、旋压               | 94 |
| 四、电弧焊接头的静载强度计算    | 38 | 三、爆炸成形             | 94 |
| 五、点焊接头静载强度计算      | 45 | 复习思考题              | 95 |



## 第五章 焊接结构的装配与

### 焊接工艺 ..... 96

#### 第一节 焊接结构的装配 ..... 96

##### 一、装配基本条件及装配基准 ..... 96

##### 二、装配用工夹具与设备 ..... 97

##### 三、装配中的测量 ..... 100

##### 四、焊接结构的装配工艺 ..... 104

##### 五、装配基本方法 ..... 106

##### 六、典型结构的装配工艺 ..... 110

#### 第二节 焊接结构的焊接工艺 ..... 114

##### 一、焊接工艺制定的原则和内容 ..... 114

##### 二、焊接工艺方法的选择 ..... 115

##### 三、焊接工艺参数的选定 ..... 115

##### 四、确定合理的焊接热参数 ..... 115

##### 五、焊接工艺评定 ..... 116

#### 复习思考题 ..... 118

## 第六章 装配—焊接工艺装备 ..... 119

#### 第一节 概述 ..... 119

##### 一、焊接工装的作用 ..... 119

##### 二、焊接工装的分类 ..... 119

##### 三、焊接工装的基本组成 ..... 121

#### 第二节 装配—焊接夹具 ..... 121

##### 一、焊件的定位及定位器 ..... 121

##### 二、焊件在夹紧机构中夹紧 ..... 125

#### 第三节 装配—焊接夹具设计的基本

##### 知识 ..... 137

##### 一、夹具设计的基本要求与依据 ..... 137

##### 二、夹具设计的内容与步骤 ..... 138

##### 三、夹具制造精度 ..... 139

##### 四、夹具结构工艺性 ..... 140

##### 五、夹具结构实例分析 ..... 142

#### 第四节 焊接变位机械 ..... 143

##### 一、焊件变位机械 ..... 143

##### 二、焊机变位机械 ..... 150

##### 三、焊工变位机械 ..... 153

##### 四、焊接变位机械的组合应用 ..... 154

#### 第五节 其他装置与装备 ..... 155

##### 一、装焊吊具 ..... 155

##### 二、焊接机器人简介 ..... 156

#### 复习思考题 ..... 158

## 第七章 焊接结构工艺性分析 ..... 159

#### 第一节 焊接结构工艺性分析的目

##### 的与步骤 ..... 159

##### 一、焊接结构工艺性分析的目的 ..... 159

##### 二、焊接结构工艺性分析的步骤 ..... 160

#### 第二节 焊接结构工艺性分析的内容 ..... 161

##### 一、从减小焊接应力与变形的角度分析

##### 结构的合理性 ..... 161

##### 二、从降低应力集中的角度分析结构的

##### 合理性 ..... 161

##### 三、从焊接生产工艺性角度分析结构的

##### 合理性 ..... 162

##### 四、从焊接生产经济性角度分析结构的

##### 合理性 ..... 163

#### 第三节 典型焊接结构工艺性分析 ..... 164

##### 一、轮的结构工艺性分析 ..... 164

##### 二、型钢桁架的结构工艺性分析 ..... 166

#### 复习思考题 ..... 167

## 第八章 焊接工艺的制定 ..... 169

#### 第一节 焊接结构生产工艺规程

##### 的基本知识 ..... 169

##### 一、生产过程和工艺过程 ..... 169

##### 二、工艺过程的组成 ..... 169

#### 第二节 焊接结构工艺规程的编制 ..... 170

##### 一、焊接工艺规程的作用 ..... 170

##### 二、编制工艺规程的依据 ..... 170

##### 三、编制工艺规程的步骤 ..... 172

##### 四、焊接工艺规程的编制内容 with 要求 ..... 178

#### 复习思考题 ..... 180

## 第九章 典型焊接结构的生产工艺 ..... 181

#### 第一节 桥式起重机桥架的生产工艺 ..... 181

##### 一、桥式起重机的组成、主要部件的

##### 结构特点及技术标准 ..... 181

##### 二、主梁及端梁的制造工艺 ..... 184

##### 三、桥架的装配与焊接工艺 ..... 187

#### 第二节 压力容器的生产工艺 ..... 189

##### 一、压力容器的基本知识 ..... 189

##### 二、中、低压压力容器的制造工艺 ..... 193

##### 三、高压容器的制造工艺特点 ..... 196

#### 第三节 船舶及舾装件的焊接工艺 ..... 197

##### 一、船体结构的类型及特点 ..... 197

##### 二、船舶结构焊接的基本原则 ..... 198

##### 三、整体造船中的焊接工艺 ..... 199

##### 四、分段造船中的焊接工艺 ..... 200



|                       |     |                         |     |
|-----------------------|-----|-------------------------|-----|
| 复习思考题 .....           | 203 | 第二节 焊接车间的组织与管理 .....    | 210 |
| <b>第十章 焊接结构生产的组织与</b> |     | 一、焊接车间的组织 .....         | 210 |
| <b>安全技术</b> .....     | 204 | 二、焊接车间的管理 .....         | 213 |
| 第一节 焊接结构车间及平面布置 ..... | 204 | 第三节 焊接生产中的劳动保护与安全 ..... | 214 |
| 一、焊接结构车间的厂房建筑 .....   | 204 | 一、焊接生产中的劳动保护 .....      | 214 |
| 二、焊接车间的类型与组成 .....    | 204 | 二、焊接生产中的安全 .....        | 216 |
| 三、焊接车间平面布置基本知识 .....  | 205 | 复习思考题 .....             | 217 |
| 四、车间平面布置举例 .....      | 207 | <b>参考文献</b> .....       | 218 |

## 绪 论

焊接是金属连接的一种工艺方法，也是一门综合性应用技术。

焊接结构是将各种经过轧制的金属材料及铸、锻件等坯料采用焊接方法制成能承受一定载荷的金属结构。

### 1. 焊接结构的应用与发展

焊接结构的应用几乎渗透到国民经济的各个领域，如工业中的石油与化工机械、重型与矿山机械、起重与吊装设备、冶金建筑、各类锻压机械等；交通运输业中的汽车、船舶、车辆、拖拉机的制造；兵器工业中的常规兵器、火箭、深潜设备；航空航天技术中的人造卫星和载人飞船等。甚至对于许多产品，为了确保加工质量和后期使用的可靠性，除了采用焊接结构外，难以找到比焊接更好的制造技术，也难以找到比只有通过焊接工艺才能保证这些机械结构满足其使用性能要求的更好的其他方法。例如核电站的工业设备以及开发海洋资源所必需的海上平台、海底作业机械或潜水装置等。

焊接技术历来都是随着科学技术的整体进步而发展和变革的。在 19 世纪初的电气产业革命中，电弧用于焊接，开始了电弧焊的新纪元。20 世纪前期发明和推广了焊条电弧焊，中期发明和推广了埋弧焊和气体保护焊；随着现代科学的发展和进步，各种高能束（电子束、激光束）也在焊接上得到应用。到了 20 世纪 70 年代，在世界范围内，焊接技术已经成为机械制造业中的关键技术之一。特别是 20 世纪后期，随着电子技术及自动控制技术的进步，焊接产业开始向高新技术方向发展，焊接技术更加突出地反映了整个国家的工业生产水平和机械制造水平。目前各国的焊接结构用钢量，均已占其钢材消费量的 40%~60%。当今焊接结构产量和用钢量在总用钢量中的百分比已成为衡量一个国家工业技术发展水平的重要标志。

### 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。

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、刚度一般可达到与母材相等或相近，能够承受基体金属所能承受的各种载荷的作用。同时，焊接能保证产品的气密性和水密性要求，这是压力容器在正常工作时不可缺少的重要条件。

3) 焊接结构的零件或部件可以直接通过焊接方法进行连接，不需要附加的连接件，与铆接结构相比，具有相同结构的质量可减轻 10%~20%。以焊代铸或以焊代锻，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) 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。

5) 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, 主要有以下几方面:

1) 焊接过程是一个不均匀的加热和冷却过程, 焊接结构必然存在焊接残余应力和变形, 这不仅影响焊接结构的外形尺寸和外观质量, 同时给焊后的继续加工带来很多麻烦, 甚至直接影响焊接结构的强度。

2) 由于焊接接头要经历冶炼、凝固和热处理三个阶段, 所以焊缝中难免产生各类焊接缺陷, 虽然大多焊接缺陷可以修复, 但修复不当或缺陷漏检则可能带来严重的问题, 最终形成过大的应力集中, 从而降低整个焊接结构的承载能力。

3) 焊接会改变材料的部分性能, 使焊接接头附近变为一个不均匀体。即具有几何不均匀性 (包括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焊接残余应力); 化学的不均匀性 (成分不均匀) 以及金属组织的不均匀性 (即金相组织结构不均匀)。

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) 合理的结构设计, 正确的选择材料。
- 2) 采用适宜的焊接设备和制定正确的焊接工艺。
- 3) 良好的焊接技艺以及严格的质量控制。

### 3. 本教材讲授的主要内容

“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, 本教材根据课程的教学需要, 编入了焊接结构和生产工艺过程的基本理论知识, 并以焊接结构、接头形式、焊接变形和焊接应力为基础, 全面介绍了焊接结构零件的加工工艺、装配与焊接工艺及其所用工艺装备、典型产品加工工艺过程、焊接结构生产组织与安全技术等方面的知识。

### 4. 学习本课程应达到的能力目标

本教材是根据教育部颁布的中等职业学校三年制焊接专业“焊接结构生产”课程的教学大纲编写的, 通过本教材的教学, 学习者应达到以下能力目标要求:

- 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) 了解焊接接头的组成、焊缝的种类以及焊接接头的基本形式, 能够识读焊缝代号和焊接结构图。
- 3) 了解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, 合理选用相应的焊接设备和工艺装备。
- 4) 了解焊接结构生产中常用工装夹具的结构特点、适用范围和使用要求。
- 5) 了解一般焊接生产车间的平面布置、生产组织管理及安全生产方面基本知识。

### 5. 学习方法与教学法建议

“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每一个实际问题。教学过程中, 即要针对基础知识的教学, 组织学生进行现场参观教学, 或通过多媒体教学手段, 让学生对焊

接结构生产的全过程有一定的感性认识；又要根据每一种能力目标要求，精心进行课堂设计，加强对学生实践意识和应用能力的培养。还要结合专业知识的教学，加强与焊接结构有关的新知识、新技术、新工艺和新设备的介绍，以开阔学生的视野和开发学生的创新思维。

# 第一章 焊接应力与变形

由于焊接局部高温加热而造成焊件上温度分布不均匀,导致在焊接结构内部产生了焊接应力与变形。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其产生原因;焊接变形的种类;控制焊接变形的工艺措施和焊后如何矫正焊接变形;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、焊接应力与变形的基本知识

#### 1. 变形

物体在外力或温度等因素的作用下,其形状和尺寸发生变化,这种变化称为物体的变形。当使物体产生变形的外力或其他因素去除后变形也随之消失,物体可恢复原状,这样的变形称为弹性变形。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,这样的变形称为塑性变形。

#### 2. 应力

存在于物体内部的、受外力作用或其他因素引起物体内部之间相互作用力,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、金相组织及温度等因素变化,造成物体内部的不均匀性变形而引起的应力。内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。内应力的显著特点是,在物体内部,内应力是自成平衡的,形成一个平衡力系。

#### 3. 焊接应力与焊接变形

焊接应力是在焊接过程中及焊接过程结束后,存在于焊件中的内应力。由焊接而引起的焊件尺寸的改变称为焊接变形。

### 二、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

焊件的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,下面对不同条件下的应力与变形进行讨论。

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

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，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 1-1b 所示。但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 1-1c 所示。

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 1-1d 所示。因为板条是一个整体，所以板条将整体缩短，这就是板条的残余变形，如图 1-1e 所示。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。

(2) 长板条一侧加热（相当于板边堆焊）引起的应力与变形 如图 1-2a 所示的材质均匀的钢板，在其上边缘快速加热。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伸长，如图 1-2b 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 1-2c 所示。

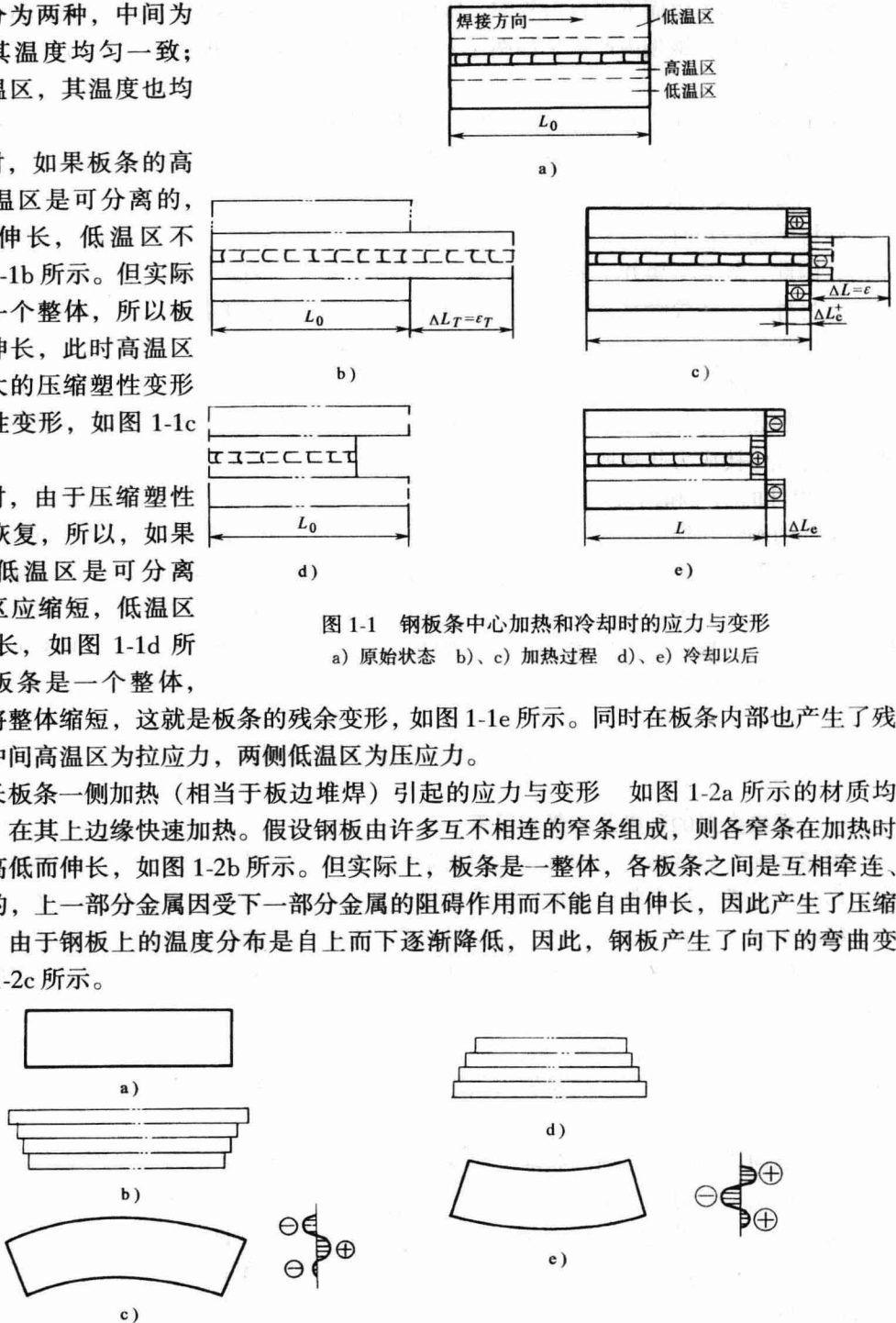


图 1-1 钢板条中心加热和冷却时的应力与变形

a) 原始状态 b)、c) 加热过程 d)、e) 冷却以后

图 1-2 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

钢板冷却时,各板条的收缩应如图 1-2d 所示。因为钢板是一个整体,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 1-2e 所示。同时在钢板内产生了如图 1-2e 所示的残余应力,即钢板中部为压应力,钢板两侧为拉应力。

由上述分析可知,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,冷却后,构件必然有残余应力和残余变形。

## 2. 焊缝金属的收缩

焊缝金属冷却时,当它由液态转为固态,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。

## 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、焊接变形的种类及其影响因素

焊接变形在焊接结构中的分布是很复杂的。按变形对整个焊接结构的影响程度,可将焊接变形分为局部变形和整体变形;按照变形的外观形态来分,可将焊接变形分为图 1-3 所示的 5 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,形成了实际生产中焊件的变形。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 1-4 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  $\Delta x$  取决于焊缝长度、焊件的截面积、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,在受力不大的焊接结构内,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。

(2) 横向收缩变形 横向收缩变形系指沿垂直于焊缝轴线方向尺寸的缩短。构件焊接



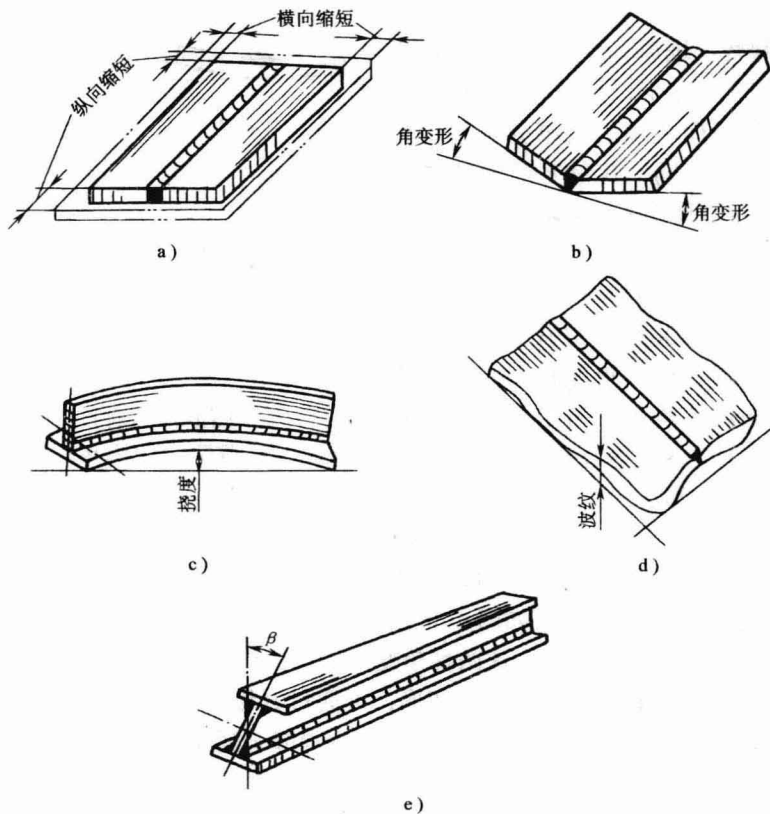


图 1-3 焊接变形的形式

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

时, 不仅产生纵向收缩变形, 同时也产生横向收缩变形, 如图 1-4 中的  $\Delta y$ 。产生横向收缩变形的过程比较复杂, 影响因素很多, 如热输入、接头形式、装配间隙、板厚、焊接方法以及焊件的刚性等, 其中, 以热输入、装配间隙、接头形式等影响最为明显。

不管何种接头形式, 其横向收缩变形量总是随焊接热输入增大而增加。装配间隙对横向收缩变形量的影响也较大, 且情况复杂。一般来说, 随着装配间隙的增大, 横向收缩也增加。

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。一般情况下, 焊缝的横向收缩沿焊接方向是由小到大, 逐渐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, 横向收缩变形量就越小。

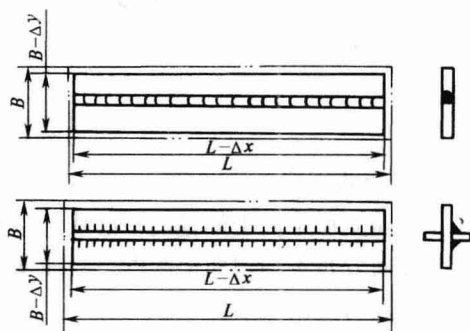


图 1-4 纵向和横向收缩变形

## 2. 角变形

中厚板对接焊、堆焊、搭接焊及 T 形接头焊接时, 都可能产生角变形, 角变形产生的根本原因是由于焊缝的横向收缩沿板厚分布不均匀所致。焊缝接头形式不同, 其角变形的特点也不同。如图 1-5 所示, 是几种焊接接头的角变形。

对接接头角变形主要与坡口形式、坡口角度、焊接方式等有关。坡口截面不对称的焊缝, 其角变形大, 因而用 X 形坡口代替 V 形坡口, 有利于减小角变形; 坡口角度越大, 焊缝横向收缩沿板厚分布越不均匀, 角变形越大。同样板厚和坡口形式下, 多层焊比单层焊角变形大, 焊接层数越多, 角变形越大。多层多道焊比多层焊角变形大。

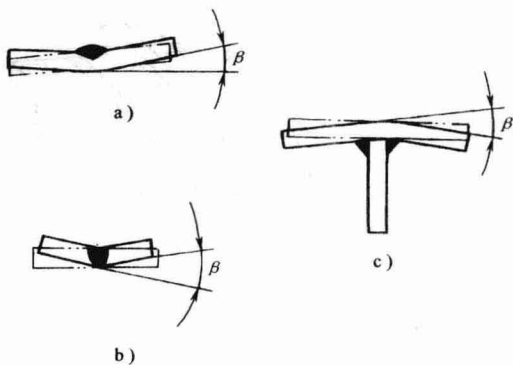


图 1-5 几种接头的角变形  
a) 堆焊 b) 对接接头 c) T 形接头

T 形接头 (如图 1-6a 所示) 角变形可以看成是由立板相对于水平板的回转与水平板本身的角变形两部分组成。T 形接头不开坡口焊接时, 其立板相对于水平板的回转相当于坡口角度为  $90^\circ$  的对接接头角变形  $\beta'$ , 如图 1-6b 所示; 水平板本身的角变形相当于水平板上堆焊引起的角变形  $\beta''$ , 如图 1-6c 所示。这两种角变形综合的结果使 T 形接头两板间的角度发生如图 1-6d 的变化。为了减小 T 形接头角变形, 可通过开坡口来减小立板与水平板间的焊缝夹角, 降低  $\beta'$  值; 还可以通过减小焊脚尺寸来减少焊缝金属量, 降低  $\beta''$  值。

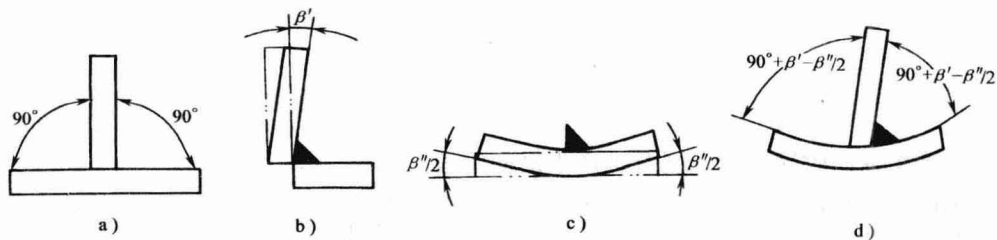


图 1-6 T 形接头的角变形

## 3. 弯曲变形

弯曲变形是由于焊缝的中心线与结构截面的中性轴不重合或不对称、焊缝的收缩沿焊件宽度方向分布不均匀而引起的。弯曲变形分两种: 焊缝纵向收缩引起的弯曲变形和焊缝横向收缩引起的弯曲变形。

(1) 纵向收缩引起的弯曲变形 图 1-7 所示为不对称布置焊缝的纵向收缩所引起的弯曲变形。弯曲变形 (挠度  $f$ ) 的大小与焊缝在结构中的偏心距  $s$  及假想偏心力  $F_p$  成正比, 与焊件的刚度  $EI$  成反比。而假想偏心力又与压缩塑性变形区有关, 凡影响压缩塑性变形区的因素均影响偏心力  $F_p$  的大小。偏心距  $s$  越大, 弯曲变形越严重。焊缝位置对称或接近于截面中性轴, 则弯曲变形就比较小。

(2) 横向收缩引起的弯曲变形 焊缝的横向收缩在结构上分布不对称时, 也会引起焊件的弯曲变形。如工字梁上布置若干短肋板 (如图 1-8 所示), 由于肋板与腹板及肋板与上翼板的角焊缝均分布于结构中性轴的上部, 它们的横向收缩将引起工字梁的下挠变形。