

焊接结构生产



孙庭秀 主 编

孙文茂 副主编

彭 辉 主 审



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

高等职业教育精品工程规划教材

内容简介

本书可作为高职院校焊接专业及相关专业的教材，也可供从事焊接工作的工程技术人员参考。

本书可作为高职院校焊接专业及相关专业的教材，也可供从事焊接工作的工程技术人员参考。

本书可作为高职院校焊接专业及相关专业的教材，也可供从事焊接工作的工程技术人员参考。

本书可作为高职院校焊接专业及相关专业的教材，也可供从事焊接工作的工程技术人员参考。

本书可作为高职院校焊接专业及相关专业的教材，也可供从事焊接工作的工程技术人员参考。

本书可作为高职院校焊接专业及相关专业的教材，也可供从事焊接工作的工程技术人员参考。

本书可作为高职院校焊接专业及相关专业的教材，也可供从事焊接工作的工程技术人员参考。

本书可作为高职院校焊接专业及相关专业的教材，也可供从事焊接工作的工程技术人员参考。

本书可作为高职院校焊接专业及相关专业的教材，也可供从事焊接工作的工程技术人员参考。

本书可作为高职院校焊接专业及相关专业的教材，也可供从事焊接工作的工程技术人员参考。

本书可作为高职院校焊接专业及相关专业的教材，也可供从事焊接工作的工程技术人员参考。

本书可作为高职院校焊接专业及相关专业的教材，也可供从事焊接工作的工程技术人员参考。

本书可作为高职院校焊接专业及相关专业的教材，也可供从事焊接工作的工程技术人员参考。

本书可作为高职院校焊接专业及相关专业的教材，也可供从事焊接工作的工程技术人员参考。

本书可作为高职院校焊接专业及相关专业的教材，也可供从事焊接工作的工程技术人员参考。

本书可作为高职院校焊接专业及相关专业的教材，也可供从事焊接工作的工程技术人员参考。

本书可作为高职院校焊接专业及相关专业的教材，也可供从事焊接工作的工程技术人员参考。

本书可作为高职院校焊接专业及相关专业的教材，也可供从事焊接工作的工程技术人员参考。

本书可作为高职院校焊接专业及相关专业的教材，也可供从事焊接工作的工程技术人员参考。

本书可作为高职院校焊接专业及相关专业的教材，也可供从事焊接工作的工程技术人员参考。

本书可作为高职院校焊接专业及相关专业的教材，也可供从事焊接工作的工程技术人员参考。

本书可作为高职院校焊接专业及相关专业的教材，也可供从事焊接工作的工程技术人员参考。

焊接结构生产

主 编 孙庭秀

副主编 孙文茂

主 审 彭 辉

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

《焊接结构生产》的内容结合焊接专业的岗位技术特点,贴近生产实际。注重对学生的创新精神和实践能力的培养。

全书共分九章,主要内容包括:焊接应力与变形及其控制;焊接结构力学性能及其强度计算;焊接结构备料及成型加工;焊接工艺的制定;焊接结构装配;焊接结构装配及工艺装备;典型焊接结构的生产工艺;焊接质量检验及安全生产等有关知识,实用性强。

本书是高职院校焊接技术专业使用的规划教材,同时,也可作为相关技术人员参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

焊接结构生产 / 孙庭秀主编. —北京:电子工业出版社, 2014.5
高等职业教育精品工程规划教材

ISBN 978-7-121-23156-8

I. ①焊… II. ①孙… III. ①焊接结构—焊接工艺—高等职业教育—教材 IV. ①TG44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 092911 号

责任编辑:郭乃明 特约编辑:范 丽

印 刷:北京京师印务有限公司

装 订:北京京师印务有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1 092 1/16 印张:19.75 字数:506 千字

版 次:2014 年 5 月第 1 版

印 次:2014 年 5 月第 1 次印刷

定 价:41.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。



随着冶金和钢铁工业的发展,一些新工艺、新材料、新技术不断地涌现。焊接技术和理论的发展,大大地推动了焊接结构及焊接生产的迅猛发展。

焊接结构是用板材、型材、管材以及铸、锻件经加工后再焊接而成的能承受载荷的钢结构。

因为具有重量轻、气密性和水密性好、节省工时的优点,焊接结构得到了进一步的推广和广泛的应用。焊接结构在重型机械中的比例约占70%,并已经运用于建筑业、造船业、汽车业、石油化工业、国防工业等国民经济的各个领域。

焊接结构的发展,必然推动以先进的焊接工艺为基础的焊接生产的发展。焊接生产是指采用焊接的工艺方法把毛坯、零件和部件连接起来制成焊接结构的生产过程。焊接结构是焊接生产的产品。近几年来,在焊接生产中先进的高质量气体保护焊的广泛应用;焊接的机械化和自动化推广;数控自动切割机的采用使画线、下料实现了自动化,使整个生产工艺实现机械化和自动化。因此,焊接生产的效率得到提高,缩短了产品制造周期,提高了产品质量,提升了焊接生产在工业生产中的重要地位。但焊接结构中也存在着一些问题,如焊接残余应力和变形、焊接缺陷等。这些问题本书也将讨论。

本书比较全面、系统地介绍了焊接应力和变形产生的原因、控制措施及其消除方法,焊接结构生产中的下料及成型加工,焊接结构的装配及工艺装备,焊接工艺的编制,焊接缺陷及其检验,焊接安全生产管理等相关内容。本书理论联系实际、言简意赅、深入浅出、实用性强。

本书由渤海船舶职业学院孙庭秀担任主编;由广州市广利船舶人力资源服务有限公司孙文茂担任副主编,由刘一诺、包套图参编。

本书第一、三、六章由渤海船舶职业学院孙庭秀编写;第二、四章由广州市广利船舶人力资源服务有限公司孙文茂编写;第五、九章由渤海船舶职业学院包套图编写;第七、八章由渤海船舶职业学院刘一诺编写。

本书由渤海船舶职业学院彭辉担任主审,在此表示衷心感谢!

由于编者水平有限,书中疏漏甚至错误之处在所难免,敬请读者批评指正,以便在今后的教学和再版时改正。

编者

2013年12月

目录

第一章 焊接应力与变形	1
第一节 焊接应力与变形及其产生原因	1
一、应力和变形的概念	1
二、研究焊接应力与变形时的几个假定	3
三、焊接应力与变形产生的原因	4
第二节 焊接残余变形及其影响因素	11
一、收缩变形	12
二、弯曲变形	16
三、角变形	18
四、波浪变形	22
五、扭曲变形	22
第三节 控制和矫正焊接变形的措施	24
一、控制焊接变形的措施	24
二、矫正焊接变形的措施	32
第四节 焊接结构的残余应力	35
一、焊接残余应力的分类	36
二、焊接残余应力的分布规律	37
三、焊接残余应力的测定	43
第五节 降低和消除焊接残余应力的措施	45
一、焊接残余应力的危害	45
二、减小焊接残余应力的措施	46
三、消除焊接残余应力的方法	50
复习思考题	51
第二章 焊接结构力学性能及其强度计算	53
第一节 焊接接头的力学性能	53
一、焊接接头的组成	53
二、焊接接头力学性能的不均匀性	54
三、焊缝及焊接接头的基本形式	56

第二节 焊接接头的工作应力分布	60
一、应力集中的概念	61
二、焊接接头的工作应力分布和工作性能	61
第三节 焊接接头静载强度计算	66
一、工作焊缝和联系焊缝	66
二、焊接接头强度计算的假设	66
三、电弧焊接头的静载强度计算	67
复习思考题	75
第三章 焊接结构备料及成型加工	76
第一节 钢材的矫正	76
一、钢材变形的原因	76
二、钢材矫正原理	77
三、钢材的矫正	77
第二节 画线、放样	82
一、焊接结构施工图	82
二、画线、放样	83
第三节 号料、下料、板料的边缘加工	90
一、号料	90
二、下料	92
三、板料的边缘加工	112
第四节 弯曲成型	115
一、钢材展开长度计算	116
二、卷板	118
三、型钢弯曲	123
第五节 冲压成型	127
一、冲压成型	127
二、拉延	131
三、旋压	132
四、爆炸成型	133
第六节 水火弯板	134
一、水火弯板原理	134
二、水火弯板优点	135
三、水火弯板工艺	135
复习思考题	137
第四章 焊接结构生产工艺规程的编制	139
第一节 工艺规程的概念	139
一、工艺规程	139



二、工艺规程的作用	140
第二节 焊接结构的工艺性审查	140
一、焊接结构的工艺性审查目的	140
二、焊接结构的工艺性审查步骤	141
三、焊接结构的工艺性审查的内容	142
第三节 编制焊接结构工艺规程的原则、内容及步骤	150
一、编制工艺规程的原则	150
二、工艺规程的主要内容	151
三、编制工艺规程的步骤	151
第四节 焊接结构生产工艺过程分析	153
一、工艺过程分析方法	153
二、从保证技术条件的要求进行工艺分析	153
三、从采用先进工艺的可能性进行分析	154
第五节 焊接工艺的制定	157
一、焊接工艺制定的内容与原则	157
二、焊接方法的选择	158
三、焊接工艺参数的选定	158
四、焊接结构生产中的热处理	158
复习思考题	160
第五章 焊接结构装配	161
第一节 装配概论	161
一、装配的基本条件	161
二、装配基准的分类及其选择	161
*三、船体工艺基准线和构件理论线	162
四、定位焊	167
第二节 焊接结构装配常用的测量工具及其用法	167
一、测量工具	167
二、水平度的测量	171
三、垂直度的测量	174
四、尺寸的测量	177
第三节 焊接结构的装配方法	183
一、焊接结构的装配特点	183
二、装配前的准备	184
三、零件的定位方法	184
四、常用装配方法	185
第四节 典型焊接结构的装配	187
复习思考题	191



第六章 焊接结构装配—焊接工艺装备	192
第一节 装配—焊接工艺装备概述	192
一、装配—焊接工艺装备的作用	192
二、装配—焊接工艺装备的分类(表 6-1)	193
第二节 装配—焊接工艺装备——夹具	194
一、装配—焊接夹具的分类	194
二、夹紧装置的组成、基本要求和选用原则	194
三、常用夹具及其结构	196
四、拉紧机构和推撑机构	203
第三节 装配—焊接工艺装备——定位器	205
第四节 装配—焊接工艺装备——平台	211
第五节 装配—焊接工艺装备——胎架	214
一、胎架	214
二、胎架种类	215
复习思考题	230
第七章 典型焊接结构的生产工艺	232
第一节 桥式起重机金属结构的生产工艺	232
一、桥式起重机的结构及技术要求	232
二、箱形梁的备料	235
三、箱形梁的装配焊接工艺	236
第二节 压力容器的生产工艺	239
一、压力容器的分类	239
二、压力容器的结构特点	240
三、中低压容器的生产工艺	241
*第三节 船舶结构的生产工艺	245
一、船体装配的概念	245
二、船体装配过程	247
三、分段建造方法	247
四、船台装配方式	249
五、船体工艺余量	251
六、船体结构焊接特点及焊接工艺基本原则	254
复习思考题	266
第八章 焊接质量检验	267
第一节 焊接缺陷及其对焊接质量的影响	267
第二节 焊接质量的检验方法	272
第三节 无损探伤	274

一、渗透探伤	274
二、磁粉探伤	276
三、超声波探伤	279
四、射线探伤	285
复习思考题	293
第九章 安全技术、劳动保护与安全管理	294
第一节 焊接结构生产的安全技术	294
一、备料的安全技术	294
二、成型加工的安全技术	295
三、装备中的安全技术	296
四、焊接安全技术	296
第二节 焊接劳动保护与安全管理	302
复习思考题	305
参考文献	306

随着现代工业的发展,焊接结构的应用已经十分广泛,由于各种原因造成的焊接结构事故的发生,具有低频率、高危害性的特点。

第二次世界大战期间,美国在1942年2月至1946年4月,共生产了4694艘“自由”型货船,其中有570艘共造成1443条人命损失,其中127艘船体完全报废。

1939年12月18日,美国克林顿天然气公司发生了一起煤气爆炸引起的罐体破裂事件,造成6个400m³储罐、4个30m³储罐和7千多个液化和燃气瓶被摧毁,造成36人,损失427万元。

除以上的事件,国内外还有很多,这些焊接结构的破坏事故,大都是由焊接应力引起的脆性断裂、疲劳断裂、应力腐蚀断裂和失稳破坏所致。另外,焊后变形使结构的形状和尺寸精度难以达到技术要求,影响了焊接结构的使用,甚至引起焊接结构的破坏。总之,防止焊接结构发生破坏事故和变形,对于焊接结构的性能有很大的影响。

什么是焊接应力?什么是焊接应力?为什么焊接应力有残余应力和应力松弛?如何防止焊接应力与变形?这些问题是本章要解决的主要问题。

第一节 焊接应力与变形及其产生原因

一、应力和变形的概念

1. 变形

物体在外力或温度等载荷的作用下,其形状和尺寸会发生变化,这种变化称为物体的变形。一般情况下,物体的变形可分为两种,即弹性变形和塑性变形。

物体在外力或其他因素作用下发生变形,当外力或其他因素消失后,变形也随之消失。



第一章 焊接应力与变形



知识目标

1. 了解并掌握焊接应力与变形的概念及其产生规律;
2. 了解并掌握焊接残余变形的概念及其影响因素;
3. 了解并掌握焊接结构残余应力的概念及其消除措施。



能力目标

1. 在实际生产过程中,掌握控制和矫正焊接变形的工艺措施和方法;
2. 掌握降低和消除焊接残余应力的措施。

随着现代化工业的发展,焊接结构的应用已经十分广泛,由于各种难以预见的因素,使得焊接结构不时发生一些破坏性事故,甚至有些是灾难性的。

第二次世界大战期间,美国在1942年2月至1946年4月,共生产了4694艘“自由”型货轮,其中有970艘共出现1442条大裂纹,其中127艘甲板完全断裂。

1979年12月18日,我国吉林省某煤气公司发生了一起煤气罐泄漏引起的球罐连锁性爆炸事故,6个400m³球罐、4个50m³卧罐和5千多个液化石油气钢瓶被炸毁,死伤86人,损失627万元。

类似以上的事故,国内外还有多起,这些焊接结构的破坏事故,大多数是由于焊接应力引起的脆性断裂、疲劳断裂、应力腐蚀断裂和失稳破坏所致。另外,焊接变形也使结构的形状和尺寸精度难以达到技术要求,影响了焊接结构的使用,甚至引起焊接结构的破坏。总之,结构在焊接后会出现焊接变形和焊接应力,而它们对结构的性能有极大的影响。

什么是焊接变形?什么是焊接应力?为什么焊后会有变形和应力存在?如何防止或消除焊接应力与变形?这些就是本章要解决的问题。

第一节 焊接应力与变形及其产生原因

一、应力和变形的概念

1. 变形

物体在外力或温度等因素的作用下,其形状和尺寸会发生变化,这种变化称为物体的变形。一般情况下,物体的变形可分为两种,即塑性变形和弹性变形。

物体在外力或其他因素作用下发生变形,当外力或其他因素消失后,变形也随之消失,



物体恢复原状，这种变形就称为弹性变形。如果物体处于弹性变形状态下，物体内部就有应力存在。

物体在外力或其他因素作用下发生变形，当外力或其他因素消失后，变形仍存在，物体不恢复原状，这种变形称为塑性变形（又称永久变形）。如果物体在力的作用下发生塑性变形，且变形后物体内部不存在应力，我们就说物体处于塑性状态。钢在 $600\sim 650^{\circ}\text{C}$ 以上就处于塑性状态。物体的变形还可分为自由变形与非自由变形。在非自由变形中，有外观变形和内部变形两种。

以一根金属杆的变形为例，如图 1-1 所示，当温度为 θ_0 时，其长度为 L_0 ，温度上升到 θ 时，如果金属杆不受任何阻碍，杆的长度将会增加 ΔL_0 如图 1-1 (a) 所示，这段增加的长度就称为自由变形。如果杆的伸长受阻，则杆不能完全自由地伸长，变形只能部分地表现出来，这部分能表现出来的伸长称为外观变形，用 ΔL_e 表示。而未表现出来的那部分伸长称为内部变形，用 ΔL 表示，如图 1-1 (b) 所示，在数值上， $\Delta L = \Delta L_0 - \Delta L_e$ 。

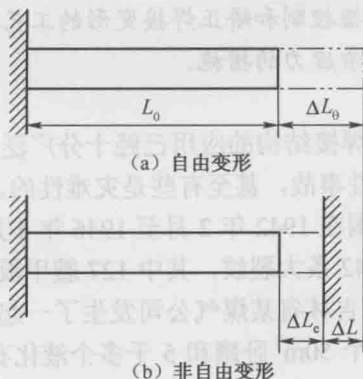


图 1-1 金属杆的变形

2. 内应力

物体受外力或其他因素作用时会发生变形，此时，物体仍有恢复原来形状的趋势，即物体内部具有抵抗变形的能力。这种存在于物体内部的、对外力作用或其他因素引起物体变形所产生的抵抗力，称为内力。

由此可知，外力作用引起物体变形时，物体内部就会出现内力与之平衡。当外力除去后，物体如果恢复原状或处于另一种平衡稳定状态，则内力随之消失。

另外，在物理、化学或物理化学变化过程中，如温度、金属组织或化学成分变化等，只要引起物体内部的不均匀性变形，物体就会产生内力。这种内力是由于变形物体为保持其完整性，对其内部各部分不均匀的变形产生阻碍作用而引起的。

物体单位面积上的内力称为应力。

根据引起内力的原因不同，可将应力分为两类：一类是工作应力，它是由外力作用于物体而引起的应力，另一类是内应力，它是由物体化学成分、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。或者说，内应力是在没有外力条件下平衡于物体内部的应力。

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。焊接应力就是一种内应力。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. 焊接应力和焊接变形的概念

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。按应力作用时间的不同,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,它随时间而变化。焊件冷却后,残留于焊件内的应力,称为焊接残余应力。本章主要讨论焊接残余应力。

焊接变形,即由于焊接而引起的焊件变形。焊接变形包括焊接过程中的变形和焊接残余变形。焊后焊件不能消失的变形,称为焊接残余变形,本章重点讨论焊接残余变形。

二、研究焊接应力与变形时的几个假定

焊接过程中,影响焊接应力与变形的因素很多,为简化讨论,我们设置如下假定。

1. 平截面假定

如果构件较长而截面较小,则在考虑构件变形时,可以认为构件变形后,其横截面仍为一个平面,即可以认为,构件变形时其横截面是平行移动或转动的,截面本身不变形。

这一假定在构件截面较大的情况下会产生一定的误差,但它可以简化我们的研究方法。

2. 金属性质不变假定

金属的热物理性质是随温度的不同而改变的。为了便于分析讨论假定:金属的线胀系数 α 、热容 C 、热导率 λ 等都是常量,不随温度而变化。

3. 屈服强度与温度的关系假定

低碳钢材料的屈服强度 σ_s 与温度 θ 的实际关系如图 1-2 中实线所示,我们将它简化成图中虚线所示。由此图可知,材料的屈服强度随温度的升高而逐渐降低。低碳钢材料的屈服强度在 600°C 时可视为零。也就是说,低碳钢加热到 600°C 时便完全处于塑性状态,稍有外力作用,就会引起低碳钢构件的塑性变形,并且无论怎样变形,构件中都不会产生应力。我们把材料的屈服强度为零(或很小)时的温度称为塑性温度。

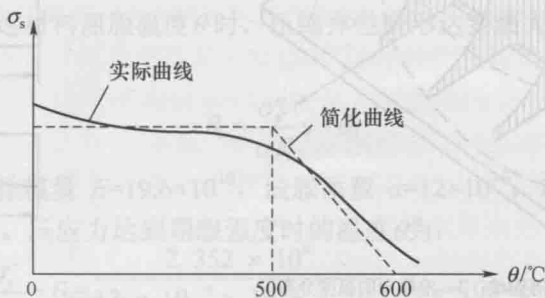


图 1-2 低碳钢的屈服极限与温度的关系



4. 应力应变关系的假设

材料呈理想弹-塑性状态, 即材料屈服后不发生强化。

三、焊接应力与变形产生的原因

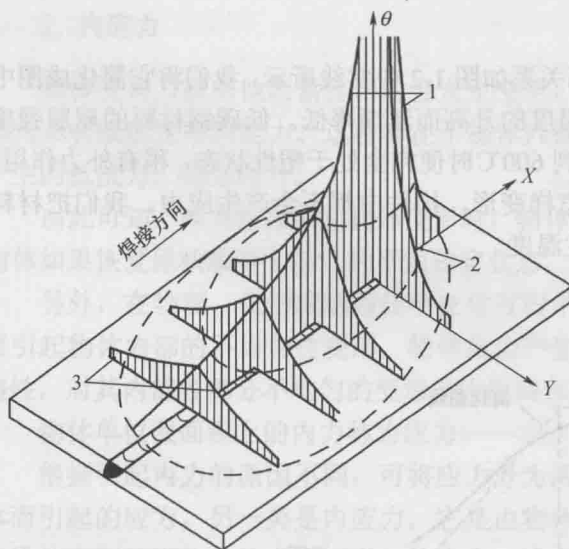
影响焊接应力与变形的因素很多, 最根本的原因是焊件受热不均匀, 其次是由于焊缝金属的收缩、金相组织的变化及焊件刚性的不同所致。另外, 焊缝在焊接结构中的位置、装配焊接顺序、焊接方法、焊接电流及焊接方向等对焊接应力与变形的大小、方向、分布等也都有影响。下面着重介绍几个主要因素:

1. 焊件的不均匀受热

焊件的焊接是一种局部加热过程。平板沿中心线堆焊时, 其温度场如图 1-3 所示。焊接时, 焊件上的温度分布极不均匀, 焊缝及其附近区域被加热到熔化状态或接近熔点, 而远离焊缝的区域温度却较低。因此, 焊件上各点的受热膨胀与冷却收缩不一致, 故出现了复杂的应力与变形。在整个加热和冷却过程中焊件上各处的温度是变化的, 这种温度变化又称为热过程。

为什么对焊件进行不均匀加热就会引起焊接应力与变形呢? 要弄清这个问题, 就要先来分析均匀加热时构件应力与变形的规律。

(1) 对两端可以自由伸缩的金属短柱体进行均匀加热与冷却过程的讨论。设有一根长度为 L_0 的可自由伸缩的金属短柱体如图 1-4 (a) 所示, 原始温度为 θ_0 , 均匀加热后升高到 θ , 设 $\theta_0=0$, 这样杆件加热升高的温度就是杆件的温度, 即 $\Delta\theta=\theta-\theta_0=\theta$, 金属短柱体均匀加热到 θ 以后, 其长度为 L_θ , 它比原始长度 L_0 伸长了 $\Delta L_\theta=L_\theta-L_0$, 如图 1-4 (b) 所示, 由于短柱体均匀受热自由伸长, 因此, 加热过程中柱体内无任何应力。柱体由 θ 冷却到原始温度 θ_0 过程中, 柱体自由收缩, 恢复到原始状态, 即冷却后柱体的长度为 $L=L_0$ 如图 1-4 (c) 所示, 冷却后的柱体内仍无任何应力。



1—沿纵向的温度分布; 2—等温线; 3—沿横向的温度分布

图 1-3 焊接温度场

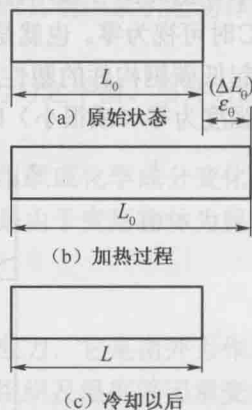


图 1-4 自由短柱体的加热与冷却

通过上述讨论可知：对可以自由伸缩的构件进行均匀加热，待其自然冷却到原来温度后，构件将会完全恢复到原来状态，构件内不存在残余应力，也无残余变形。

这一结论对于生产具有重要意义。例如，有的焊件采用整体预热的办法来达到减小残余应力和残余变形的目的，就是根据上述结论。预热焊法和“冷焊”法也是上述结论的具体应用。

(2) 对两端不能自由伸长，但可以自由收缩的金属短柱体进行均匀加热和冷却过程的讨论。设有一根长 L_0 的金属短柱体，置于两个不能移动的刚性支座之间，并且两端紧靠支座，如图 1-5 (a) 所示。柱体的原始温度为 θ_0 ，均匀加热后温度升高到 θ 。对柱体均匀加热使温度升高到 θ 以后，根据前述柱体本应伸长 ΔL_0 ，但是，柱体由于两端有刚性支座的阻碍而不能伸长，此时 $L_0=L_0$ ，如图 1-5 (b) 所示，这种情况好似柱体从 $L_0+\Delta L_0$ 长度被“锻压”到 L_0 长度，被“压缩”了的变形 ε 为内部变形。在数值上 $\varepsilon=\Delta L=\Delta L_0$ ，即 $\varepsilon=\varepsilon_0$ 。

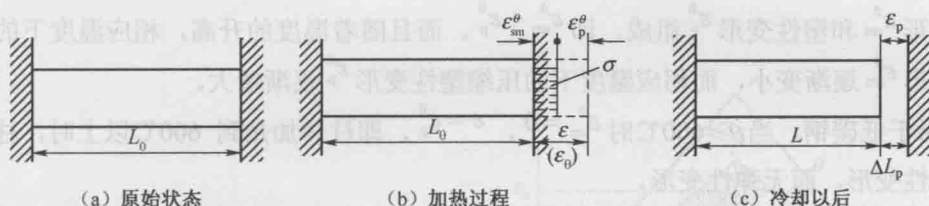


图 1-5 不能自由伸长但可自由收缩的短柱体的加热与冷却

如果加热温度不是很高，使柱体的内部变形在弹性范围内，即 $\varepsilon < \varepsilon_e$ ，(ε_e 为金属材料屈服点的弹性应变)，则根据胡克定律：

$$\varepsilon = \frac{\sigma^-}{E}$$

$$\text{因为 } \varepsilon = \varepsilon_0 = \alpha \Delta \theta = \alpha (\theta - \theta_0)$$

所以

$$\theta = \frac{\sigma^-}{\alpha E} + \theta_0$$

式中 ε ——柱体的内部变形率；

E ——柱体材料的弹性模量；

α ——柱体材料的线胀系数；

σ^- ——柱体内的压应力。

当加热温度较大，达材料屈服温度 θ 时，压缩弹性变形达到最大，压应力达到屈服强度，则有如下关系：

$$\theta_s = \frac{\sigma_s^-}{\alpha E} + \theta_0$$

对低碳钢来说，弹性模量 $E=19.6 \times 10^{10}$ ，线胀系数 $\alpha=12 \times 10^{-6}$ ，屈服强度 $\sigma_s^-=2.352 \times 100 \text{ Pa}$ (对于低碳钢， $\sigma_s^-=\sigma_s^+$)。压应力达到屈服强度时的温度 θ 为：

$$\theta_s = \frac{\sigma_s^-}{\alpha E} + \theta_0 = \frac{2.352 \times 10^8}{12 \times 10^{-6} \times 19.6 \times 10^{10}} + \theta_0 = 100 + \theta_0 \text{ (K)}$$

由上式可知,在我们假定的前提下,对柱体加热到 θ_s (对于低碳钢来说,就是加热到 100°C),柱体内部的压应力就可达到屈服强度。

根据这一估算,下面分两种情况来讨论:

1) 当 $\theta < \theta_s$ 时。加热过程中,柱体因受阻不能自由伸长,柱体内产生了压缩弹性变形 ε_s^- 和压应力 $\sigma^- < \sigma_s$ 。自然冷却过程中,柱体自由收缩,压缩弹性变形逐渐减小,压应力逐渐消失,最后柱体恢复到原来的形状和尺寸。

2) 当 $\theta > \theta_s$ 时。由于 $\theta > \theta_s$,所以在加热过程中,柱体因受阻不能自由伸长而产生压应力 $\sigma^- = \sigma_s^0$,压应力数值保持在相应温度下的屈服强度(金属柱体的屈服强度是随温度的上升而下降的),柱体的压缩变形情况也随温度的升高而不断变化。

3) 在 $600^\circ\text{C} > \theta > \theta_s$ 阶段,随着温度的升高,柱体在最大压缩弹性变形 σ_{sm}^0 的基础上,又将开始产生压缩塑性变形 ε_p^0 ,见图1-5(b)。也就是说,只要 $\theta > \theta_s$,柱体的内部变形就由最大弹性变形 ε_{sm}^0 和塑性变形 ε_p^0 组成,即 $\varepsilon_{sm}^0 + \varepsilon_p^0$ 。而且随着温度的升高,相应温度下的最大压缩弹性变形 ε_{sm}^0 逐渐变小,而相应温度下的压缩塑性变形 ε_p^0 逐渐增大。

4) 对于低碳钢,当 $\theta \geq 600^\circ\text{C}$ 时 $\varepsilon_{sm}^0 = 0$, $\varepsilon = \varepsilon_p^0$,即柱体加热到 600°C 以上时,柱体只产生压缩塑性变形,而无弹性变形。

在自然冷却过程中,随着温度的降低,柱体自由收缩,在 $\theta < 600^\circ\text{C}$ 的情况下,柱体内存在着压缩弹性变形和压应力,它们将随着温度的降低、柱体的收缩而逐渐减小。在压缩弹性变形和压应力减小到零后,柱体的温度还较高,随着温度的继续降低,柱体继续收缩直至温度为 θ_s 止。结果,柱体的长度比原来缩短了,出现了外观变形 ΔL_e , $\Delta L_e = |\varepsilon_p|$,如图1-5(c)所示。

通过以上讨论可知:

a. 对两端伸长受阻的柱体,均匀受热温度只要升高到 θ_s ,其内部应力即可达到屈服强度值,并开始产生压缩塑性变形。而焊接区的温度远超过 θ_s ,所以焊接过程中产生应力与变形是不可避免的。

b. 对两端伸长受阻但可自由收缩的柱体,均匀受热,如果加热温度 $\theta > \theta_s$,则加热过程中柱体内会产生压缩塑性变形。自然冷却后,柱体内没有残余应力,但有缩短的残余变形 ΔL_e ($\Delta L_e = |\varepsilon_p|$)。

上述两点结论对指导生产有很大的实际意义。由此可知,加热过程中是否产生压缩塑性变形,是判断冷却后有无残余变形的标志。也可以这样说,焊件产生残余变形的根源是由于高温下压缩塑性变形的出现。所以,凡是减少加热过程中产生压缩塑性变形的一切工艺措施,都是减少残余变形的有效措施。生产中采用“散热法”来减小焊接变形,就是依据这一原理。

(3) 对两端不能自由伸缩的金属短柱体进行均匀加热和冷却过程的讨论,设一长度 L_0 的低碳钢短柱体,置于两个不能移动的刚性支座之间,并且两端与刚性支座牢固连接,如图1-6所示,柱体原始温度为 θ_0 ,均匀加热到 θ ,为了便于分析,下面分三种情况讨论:

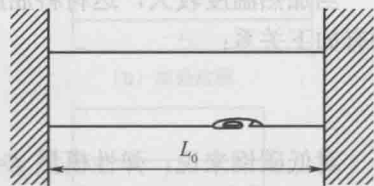


图1-6 不能自由伸缩的短柱体

1) $\theta < \theta_s$, $|\varepsilon| < \varepsilon_s$ 。加热及冷却过程中,柱体中的应力与变形情况,如图1-7所示。图中横坐标代表时间(t),纵坐标代表温度和变形率(θ 、 ε_0 和 ε_e)。由于柱体被刚性固定, ε_e 始

终与横坐标轴重合而为零。在 $0 \sim t_1$ 间温度升高, 随着柱体内的压缩弹性变形不断增加, 使压应力也增大。在 $t_1 \sim t_2$ 温度降低, 内部弹性变形不断减少, 压应力减小, 到 t_2 时压应力减小到零。

2) $\theta \leq 500^\circ\text{C}$, $|\epsilon| > \epsilon_s$ 。从图 1-8 可知, 随着加热过程的进行, 在 $0 \sim t_1$ 间柱体内压缩弹性变形不断增加, 压应力不断增大, 到 t_1 时 $|\epsilon| = \epsilon_s$, 此时的温度 $\theta_s = 100^\circ\text{C}$, 开始出现压缩塑性变形 ϵ_p , 随着温度的升高压应力不变 (参见图中点 1~2), 但压缩塑性变形不断增加。到 t_2 时温度达到最高值 $\theta = 500^\circ\text{C}$, 压缩塑性变形也达到最大。温度从 t_2 开始降低, 由于柱体中已经产生了 ϵ_{p2} 的压缩塑性变形, 因此, 冷却时柱体的端面并不以 $2'$ 点作为收缩的起点, 而是以 2 点为起点开始收缩。在 $t_2 \sim t_3$ 间温度和压应力都下降。由于柱体两端被固定而不能自由收缩, 故从 t_3 开始柱体内出现了拉应力, 到 t_4 时温度降到原始状态, 柱体中出现了残余拉应力。残余拉应力的大小取决于加热的最高温度。加热温度越高, 压缩塑性变形就越大, 残余拉应力也就越大。

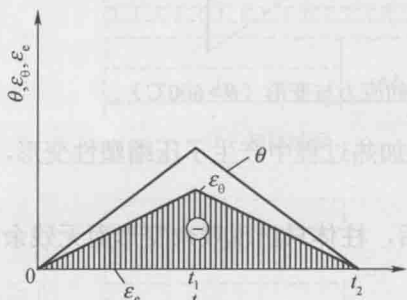


图 1-7 受拘束低碳钢柱体在加热与冷却过程中的应力与变形 $|\epsilon| < \epsilon_s$

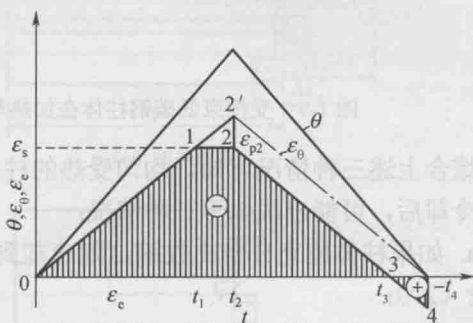


图 1-8 受拘束低碳钢柱体在加热与冷却过程中的应力与变形 $|\epsilon| > \epsilon_s$

3) $\theta > 600^\circ\text{C}$ 。图 1-9 中, 在 $0 \sim t_1$ 间柱体内的压缩弹性变形随着温度的升高而加大, 压应力也随之增大。到 t_1 时 $\theta = \theta_s$, 压应力达到 σ_s , 开始出现压缩塑性变形。在 $t_1 \sim t_2$ 间压缩塑性变形不断增加而压应力保持不变, 到 t_2 时温度达到 500°C , 低碳钢的屈服强度开始下降, 所以在 $t_2 \sim t_3$ 间, 压应力随着温度的上升反而减小, 到 t_3 时温度达到 600°C , 此时屈服强度下降到零, 压应力消失, 内部变形全部为压缩塑性变形。在 $t_3 \sim t_4$ 间压缩塑性变形继续增加, 到 t_4 时温度达到最高值, 压缩塑性变形也达到最大 ϵ_{p4} 。从 t_4 开始温度下降, 柱体的端面将不以 $4'$ 为起点而从 4 点开始收缩。由于柱体被刚性固定, 收缩受到拘束, 故将产生拉伸塑性变形。在 $t_4 \sim t_5$ 间拉伸塑性变形抵消了部分压缩塑性变形, 使柱体内的压缩塑性变形量随着温度的下降不断减少。到 t_5 时温度降低到 600°C , 材料的屈服强度从零开始上升, 使柱体内从 t_5 开始出现拉应力和产生拉伸弹性变形。在 $t_5 \sim t_6$ 间拉应力不断增大, 到 t_6 时拉应力达到 σ_s (此时的温度为 500°C)。在 $t_6 \sim t_7$ 间拉应力保持 σ_s 不变, 而拉伸塑性变形不断增加, 直至 t_7 温度恢复到 θ_0 为止。在冷却下来后, 柱体中有很大的残余拉应力 ($\sigma = \sigma_s$), 但无外观残余变形。

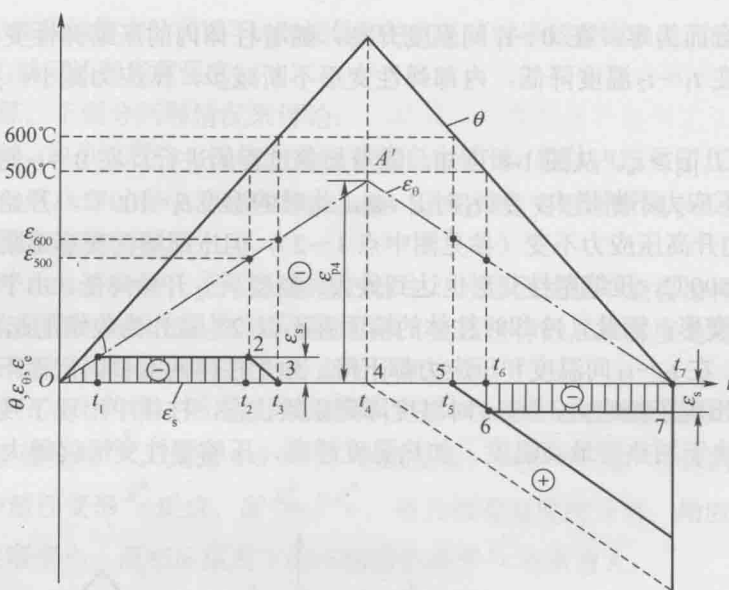


图 1-9 受拘束低碳钢柱体在加热与冷却过程中的应力与变形 ($\theta > 600^\circ\text{C}$)

综合上述三种情况可知，均匀受热的柱体，如果在加热过程中产生了压缩塑性变形，则自然冷却后，可能出现以下三种情况：

- 如果柱体能充分自由收缩，则冷却到原来温度后，柱体只出现残余变形而无残余应力（讨论 (2)）；
- 如果柱体受绝对拘束，其收缩完全不能进行，则冷却到原来温度后，柱体没有残余变形，而存在较大的残余应力（讨论 (3)）；
- 如果柱体的收缩不能充分进行，则冷却后柱体既有残余变形又有残余应力。

实际生产中的焊件，就与上述的第三 (c) 种情况相同，焊后既有焊接应力存在，又有焊接变形产生。

(4) 对板条正中间堆焊过程的讨论。如图 1-10 (a) 所示，有长度 L_0 ，厚度为 δ 的金属板条，在其正中沿长度方向进行（堆焊）加热，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。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，始终保持 θ_0 。

① 先看看加热过程：

如果板条的高温区与低温区是可分离的、当高温区的温度由 θ_0 升高到 θ 时，高温区将自由伸长 ΔL_θ ，见图 1-10 (b)。

但实际上板条是一个整体，高温区不可能自由伸长，低温区对高温区的伸长有阻碍作用，同时，低温区也受到高温区的拉伸作用而伸长。由于加热是对称的，根据“平截面假定”，板条将整体伸长 ΔL_e （外观变形），如图 1-10 (c) 所示。此时高温区有较大的压缩塑性变形 ϵ_p 和压缩弹性变形 ϵ_s （它们均为内部变形）产生。

② 冷却过程：

由于压缩塑性变形 ϵ_p 不能恢复，所以，若高温区与低温区是可分离的，则根据前的结论，