

中等专业学校试用教材

焊接结构生产

武汉市机械工业学校 黄正阔 主编

ZHONGDENG
ZHUANYE
XUEXIAO
JIAOCAI



机械工业出版社

中等专业学校试用教材

焊接结构生产

武汉市机械工业学校 黄正圆 主编

12/14/20



机械工业出版社



B

763267

前 言

本书是根据 1986 年 8 月机械中专焊接专业协作组扩大会议所制定的《焊接结构生产》教学大纲编写的。全书比较全面、系统地介绍了焊接应力与变形和焊接结构生产过程的一系列问题,深入浅出,力求理论联系实际。

本书由武汉市机械工业学校黄正阔主编。其中第一章由新疆机电工业学校明树宏编写,第二章、第三章由沈阳市机电工业学校汪显声编写,第七章由河北承德石油专科学校刘长绪编写,第九章由四川省机械工业学校杨跃编写,其余各章由武汉市机械工业学校黄正阔编写,全书由华中理工大学李志远主审。

《焊接结构生产》是机械制造类中等专业学校焊接专业的教材,可供中等专业学校热加工专业使用,也可作为从事焊接工作的工程技术人员参考。

本书在编写过程中得到兰州石油学校王建勋同志以及有关学校、工厂的指导与帮助,并提供有关资料,在此一并表示感谢!由于编者水平有限,加上时间短促,书中难免有缺点和错误,希望广大读者批评指正。

编者 1990.4.

目 录

绪论	1
----------	---

第一章 焊接应力与变形

§ 1-1 焊接应力与变形及其产生原因	4	§ 1-3 控制和矫正焊接变形的措施	30
一、应力和变形的一般概念	4	一、控制焊接变形的措施	30
二、研究焊接应力与变形时的几个假定	6	二、矫正焊接变形的措施	38
三、焊接应力与变形产生的原因	6	§ 1-4 焊接结构的残余应力	41
§ 1-2 焊接残余变形及其影响因素	14	一、焊接残余应力的分类	41
一、收缩变形	15	二、焊接残余应力的分布规律	42
二、弯曲变形	22	三、焊接残余应力的测定	47
三、角变形	24	§ 1-5 降低和消除焊接残余应力的措施	49
四、波浪变形	26	一、减小焊接残余应力的措施	50
五、错边变形	28	二、消除焊接残余应力的方法	54
六、扭曲变形	28	复习思考题	55

第二章 焊接结构生产中的备料及成形加工

§ 2-1 钢材的分类、性能、规格和用途	57	四、下料	81
一、钢材的分类和轧制	57	五、坯料的边缘加工	89
二、钢板	57	§ 2-4 弯曲成形	93
三、型钢	59	一、卷板	93
§ 2-2 钢材的矫正	60	二、型钢弯曲	97
一、钢材变形的原因	61	三、管子弯曲	102
二、钢材矫正原理	61	四、钢材展开长度计算	106
三、钢材的矫正	61	§ 2-5 压制成形	108
§ 2-3 放样与下料	65	一、弯曲	108
一、钢结构施工图	65	二、拉延	112
二、放样	67	三、压制设备	118
三、号料	79	复习思考题	121

第三章 焊接结构的装配

§ 3-1 装配概论	123	二、装配用设备	128
一、装配的基本条件	123	§ 3-3 装配方法	130
二、装配基准的选择	123	一、焊接结构的装配特点	130
三、定位焊	124	二、装配前的准备	130
§ 3-2 装配用工具及设备	124	三、零件的定位方法	131
一、装配用工具	124	四、常用装配方法	131

§ 3-4 典型焊接结构的装配.....132	四、钢屋架装配136
一、钢板拼接132	五、塔式起重机立柱的装配139
二、容器的装配133	六、装配的质量检验140
三、底座与机架的装配133	复习思考题142

第四章 焊接结构生产工艺规程的编制

§ 4-1 工艺规程的概念.....143	三、从采用先进工艺的可能性进行分析161
一、工艺规程143	§ 4-5 焊接结构生产的备料、成形加工与 装配.....163
二、工艺规程的作用143	一、备料及成形加工163
§ 4-2 焊接结构的工艺性审查.....144	二、装配164
一、图纸审查145	§ 4-6 焊接工艺的制定.....166
二、工艺性审查150	一、焊接工艺制定的内容与原则166
§ 4-3 编制焊接结构工艺规程的原则、内 容及步骤.....157	二、焊接方法的选择167
一、编制工艺规程的原则157	三、焊接工艺参数的选定167
二、工艺规程的主要内容157	四、焊接工艺评定试验173
三、编制工艺规程的步骤158	§ 4-7 焊接结构生产中的热处理.....176
§ 4-4 焊接结构生产工艺过程分析.....159	一、焊前热处理及预热177
一、工艺过程分析方法159	二、后热和焊后热处理177
二、从保证技术条件的要求进行工艺 分析160	复习思考题178

第五章 装配—焊接夹具

§ 5-1 装配—焊接夹具概论.....180	四、夹紧的动力源197
一、装配—焊接夹具的地位与作用180	五、拉紧机构和推撑机构203
二、装配—焊接夹具的分类181	§ 5-4 夹具的设计方法.....204
三、装配—焊接夹具的组成181	一、夹具设计的基本要求204
§ 5-2 零件在夹具中的定位.....181	二、夹具设计的方法与步骤205
一、定位原理182	三、夹具总图上尺寸、公差配合及技术条 件的标注206
二、平面的定位183	四、夹具结构的工艺性207
三、圆孔的定位184	§ 5-5 夹具结构实例分析.....209
四、外圆的定位185	一、装配—焊接夹具的设计要求209
五、边缘的定位186	二、装配—焊接夹具结构分析210
六、关于定位基准187	§ 5-6 焊机移动装置和焊件翻转装置.....212
§ 5-3 零件在夹具中的夹紧.....188	一、焊机移动装置212
一、夹紧装置的组成、基本要求和选用原 则188	二、焊件翻转装置217
二、典型夹紧机构189	复习思考题227
三、机械增力机构195	

第六章 典型焊接结构的生产工艺

§ 6-1 桥式起重机金属结构的生产工艺.....228	二、箱形梁的备料工艺230
一、桥式起重机的结构及技术要求228	三、箱形梁的装配焊接工艺231

§ 6-2 压力容器的生产工艺.....235	五、压力容器焊接的质量管理243
一、压力容器的结构特点235	§ 6-3 工艺规程格式及使用要求.....243
二、压力容器的分类236	一、工艺规程格式及填写规则243
三、压力容器制造的技术条件237	二、工艺规程的会签、审批和修改253
四、中低压单层筒形容器的生产工艺237	复习思考题254

第七章 焊接接头及其静载强度

§ 7-1 焊接接头的力学性能.....255	性能262
一、焊接接头的组成255	§ 7-3 焊接接头静载强度计算.....267
二、焊接接头力学性能的不均匀性255	一、工作焊缝和联系焊缝267
三、焊缝及焊接接头的基本形式258	二、焊接接头强度计算的假设267
§ 7-2 电弧焊接头的工作应力分布.....261	三、电弧焊接头的静载强度计算268
一、应力集中的概念262	复习思考题275
二、焊接接头的工作应力分布和工作	

第八章 装配—焊接车间平面布置的基本知识

§ 8-1 装配—焊接车间设计的基本知识.....276	略图..... 280
一、装配—焊接车间的分类与组成276	二、厂房参数与车间布置..... 284
二、车间设计的一般方法277	三、起重—运输设备..... 286
§ 8-2 装配—焊接车间的平面布置.....280	四、车间其他面积..... 287
一、装配—焊接车间一般常用平面布置	复习思考题..... 287

第九章 焊接结构生产中的安全与卫生

§ 9-1 备料及成形加工过程中的安全技术.....288	§ 9-4 焊接劳动保护.....295
一、备料的安全技术288	一、焊接烟尘和有害气体的危害及其防
二、成形加工的安全技术289	护295
§ 9-2 装配中的安全技术.....289	二、弧光辐射的危害及防护297
§ 9-3 焊接安全技术.....290	三、噪声及防护297
一、气焊与气割的安全技术290	四、个人防护298
二、焊接安全用电293	复习思考题298
	参考文献298

绪 论

焊接结构是用焊接方法制造的金属结构。它是用板材、型材、管材以及铸、锻件经加工以后，再焊接而成能承受载荷的结构。

焊接技术在工业生产中发展很快，在近几十年内已在工业生产各领域，如工业厂房、多层结构、大跨度结构、工业容器和管道、船体及车辆等建筑结构和矿山机械、冶金机械、石油化工机械、机械制造、宇航能源等机器结构中，都得到了广泛的应用。焊接技术之所以能够得到迅速的发展，焊接结构在工业生产各领域之所以得到广泛的应用，是因为它有如下优点：

与铆接结构相比，焊接结构制造中不必加工铆钉孔，不需要用辅料来连接构件，能节省材料，并使结构重量轻；制造铆接结构要钻孔、扩孔、铆接以至捻缝等，而焊接则工序单一，减少了辅助时间，提高了劳动生产率；焊接结构的密封性比铆接结构要好得多，解决了锅炉、压力容器等结构的密封性问题，提高了产品质量；焊接时噪声较小，改善了劳动条件。

与铸件相比，应用焊接方法来制造毛坯，不需要制造木模、造型和浇注，只需将钢材经剪切、成形后，就可焊接成任何形状的结构，简化了毛坯的生产工艺过程，缩短了生产周期，特别对于单件或小批量生产最为明显，焊接结构的截面可按要求来选取，不必像铸件那样因受工艺和形状的限制而加大尺寸，因此焊接毛坯的重量轻；焊接结构常用经轧制的钢材来制造，其材质比铸件好，因此焊接结构质量好。

在重型机器制造中，大型毛坯因受生产设备、车间起重和运输能力等条件的限制，难以制造。若采用分部件制造后再焊接，即“以小拼大”，将铸造或锻造的毛坯部件，用焊接方法加工成铸-焊、锻-焊结构，或改成钢板焊接结构，既能缩短工期、节约材料、降低成本，又是解决大型毛坯制造的唯一途径。

焊接结构的生产过程，就是将各种经过轧制的金属材料及其他毛坯件经过一系列加工，最后制成焊接结构的过程。尽管焊接结构的种类很多，其型式和用途有所不同，不同结构的生产过程和加工工艺、顺序等也有差异，但从宏观来看，焊接结构都有着大致相同的生产步骤和生产过程。按照其生产顺序和完成生产任务的内容，可将焊接结构的全部生产过程分成四个部分，即：生产前的准备，钢材的焊前加工，装配与焊接及成品加工。

1. 生产前的准备

它是指由工厂接受生产任务和用户订货开始，到正式进行生产所做的工作和生产活动。主要工作内容可分为技术准备和物质准备两个方面，另外也包括生产组织的调配和生产人员的培训等。

技术准备的主要内容，包括对产品的分析、了解和掌握产品的技术要求，找出生产中的关键，确定生产方案和技术措施，选择合理的工艺方法，进行必要的工艺试验和评定，编制工艺文件以及根据工艺要求设计相应的工艺装备等。这些工作主要是由工程技术人员来完成的。

物质准备主要内容,包括根据生产任务和技术要求,组织原材料、焊接材料和其他辅助材料、消耗材料和生产用品的供应。另外,还包括生产设备的调配、安置和检修,工夹量具及其他生产用具的购置、制作和维修等。这些工作也都应该在正式生产之前完成。

2. 钢材的焊前加工

钢材的焊前加工,是指对制造焊接结构所用的钢材按照工艺要求所进行的一系列加工。它主要包括钢材矫正、放样号料、切割下料、坡口加工及成形加工等,又称备料及成形加工。通过以上加工,将钢材制成组成焊接结构所需要的各种基本元件,也就是零件,为随后的装配与焊接作好准备。钢材的焊前加工质量,会直接影响装配与焊接的质量和生产率,因此要特别注意。

3. 装配与焊接

装配与焊接是联系密切又有各自加工内容的两个生产工艺,是两个独立的加工工序。装配是将焊前加工好的零件,采用适当的工艺方法,按照生产图纸要求组装成结构的工艺过程。焊接是将已组装好的结构,用规定的焊接方法,按照已确定的焊接工艺参数进行焊接加工,使结构的各零件连接成一个牢固整体的工艺过程。装配与焊接是焊接结构生产过程中最重要的生产环节。

4. 成品加工

成品加工是焊接结构生产过程的最后阶段,是对已制成的结构进行最后的检查和试验。在前期加工中,可能会产生一些缺陷和不足,没有达到产品的技术要求,所以对尚未达到产品技术要求的地方和项目应进行修整和补充加工。其主要内容有:焊接变形的矫正、焊后热处理、成品检验和性能试验,以及表面修饰加工、防锈涂漆、包装等加工。

以上是焊接结构的全部生产工艺过程和内容,它基本上反映出焊接结构生产工艺的特点以及它们之间的相互关系,可作为安排生产、划分生产单位和组织劳动力的依据。

当今焊接结构的产量,已成为衡量一个国家焊接技术应用是否广泛与工业技术发展水平的重要标志。按1980年世界钢产量的统计,约45%是用于制造焊接结构,预计本世纪末可达到50%。我国焊接结构的应用比例远低于国外。

随着焊接结构应用范围的扩大和产量的激增,提高焊接结构生产的机械化与自动化程度,是摆在焊接工作者面前的紧迫任务,它不但有利于提高产品质量和生产率,同时也改善了工人的劳动条件。焊接结构生产的机械化与自动化,不能只着眼于焊接工序,而是焊接结构生产的全过程。应该大量采用焊接与其他加工的机械装置和自动装置,开发焊接机器人,组建机械化与自动化的焊接生产线等,努力提高焊接结构生产的技术水平。

《焊接结构生产》是机械中专焊接专业的一门必修专业课,主要讲授焊接应力与变形及焊接结构生产工艺。通过学习使学生掌握焊接结构生产的基本知识,能够编制焊接结构生产的工艺文件 and 设计一般的装配-焊接夹具。

学习焊接结构生产课程的基本要求是:

(1) 了解焊接应力与变形产生的原因及其规律,初步掌握预防、减少和消除焊接应力与变形的工艺措施。

(2) 熟悉焊接结构生产中常用的备料及成形加工方法,能根据产品图纸及生产规模,制定备料及成形加工工艺、选用设备及设计简单的模具。

(3) 能根据现场生产条件,独立编制一般焊接结构的装配-焊接工艺规程、焊接工艺

规程和设计相应的装配-焊接夹具。

(4) 了解焊接接头的应力分布特点及静载强度计算方法,能对中等复杂的焊接结构图纸进行工艺性审查。

(5) 具有车间布置的基本知识,能绘制车间(或工段)的平面布置图。

本课程是专业课中的一门主干课,是以技术基础课和专业课为基础,以专业课和专业实习为前导的课程。在学习本门课程前,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和了解。在本课程的教学应以保证和提高产品质量为中心,全面讲述焊接结构的生产工艺及所用设备,要特别注意理论联系实际,要布置一定数量的课堂和课外作业。本课程安排有课程设计,使学生得到全面的训练,提高分析和解决问题的能力。

第一章 焊接应力与变形

当代焊接结构的应用已经十分广泛，虽然如此，但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，美国一艘新建的“自由”型货轮平稳地停泊在码头上。一天清晨，突然一声巨响，该船断裂成两段。怎么回事？经调查既不是敌方潜水艇偷袭，也不是遇上暗藏的水雷，而是由于轮船本身的焊缝中所存在的焊接应力引起裂纹急速扩展的恶果。美国在1942年2月至1946年4月，共生产了4694艘“自由”型货轮，这里面有970艘共出现1442条大裂纹，其中127艘甲板完全断裂。

1979年12月，我国吉林省某煤气公司也发生了一起煤气罐泄漏引起的恶性爆炸事故，大火烧了23个小时，把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，这个投资六百万元的企业被付之一炬。

类似以上的事故，国内、外还有多起，并且涉及面相当广，除了船舶、压力容器外，还有锅炉、管线、桥梁、采油设备、发电设备、起重运输设备，甚至全焊烟囱等。这些焊接结构的破坏事故中，经验证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。

§ 1-1 焊接应力与变形及其产生原因

一、应力和变形的一般概念

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600~650℃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（见图 1-1），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_θ 。

（见图 1-1 a），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_i 表示（如图 1-1 b 所示），在数值上， $\Delta L = \Delta L_e + \Delta L_i$ 。为方便研究，通常用变形率（即单位长度上的变形量）来表示。自由变形率用 ϵ_θ 来表示：

$$\epsilon_\theta = \frac{\Delta L_\theta}{L_0}$$

$$= \alpha (\theta - \theta_0)$$

式中 α ——金属的线胀系数，它的数值随材料及温度而异。

外观变形率 ϵ_e ，可用下式表达：

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

同样，内部变形率用下式来表达：

$$\epsilon_i = \frac{\Delta L_i}{L_0}$$

2. 内应力

众所周知，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，叫做内力。

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。

物体单位截面积上的内力叫做应力。

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

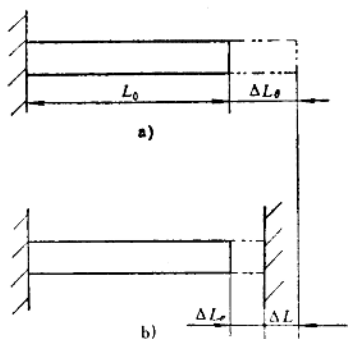


图 1-1 金属杆的变形

a) 自由变形 b) 非自由变形

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, 为抓住主要矛盾, 简化讨论, 常作如下几个假定。

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。

这一假定对截面较大的构件会产生一定的误差, 但它可以大大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, 本章中假定: 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。

根据这一假定, 我们将几种常用金属材料的线胀系数确定如下:

低碳钢

$$\alpha = 12 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$$

16Mn 钢

$$\alpha = 12 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$$

奥氏体不锈钢 (18-8)

$$\alpha = 18.7 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$$

铝合金 (LF2)

$$\alpha = 24 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$$

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。

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、分布等也都有一定影响。下面着重介绍几个主要因素, 其他则作为影响因素在后几节里陆续讨论。

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

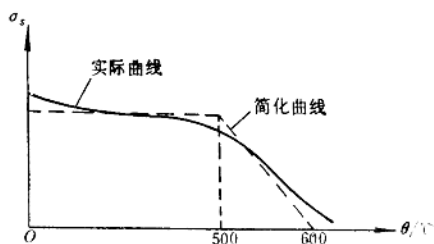


图 1-2 低碳钢的屈服极限与温度的关系

应力与变形。

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。

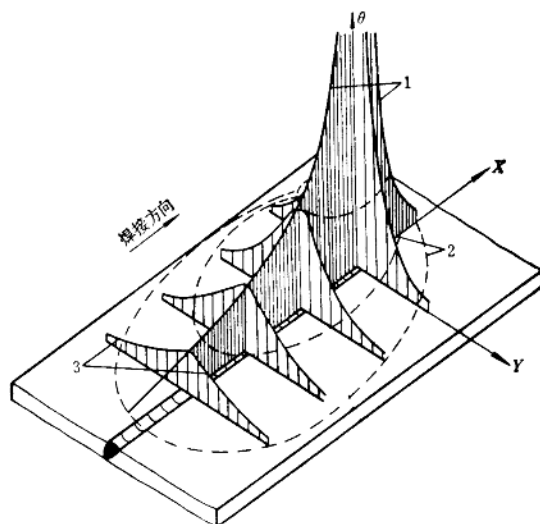


图1-3 焊接温度场

1—沿纵向的温度分布 2—等温线 3—沿横向的温度分布

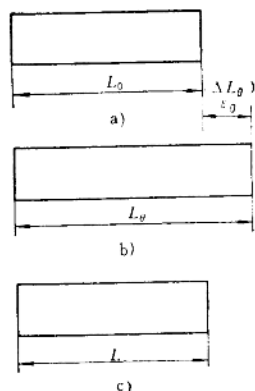


图1-4 自由短柱体的加热与冷却

a) 原始状态 b) 加热过程 c) 冷却以后

(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 $L_0 = 1$ (设 L_0 为一个单位长度) 的可自由伸缩的金属短柱体 (见图 1-4 a), 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

$$L_\theta = L_0(1 + \alpha\Delta\theta) = L_0(1 + \alpha\theta)$$

它比原始长度 L_0 伸长了 $\Delta L_\theta = L_\theta - L_0 = L_0\alpha\theta$ (见图 1-4 b), 因假设 $L_0 = 1$, 故 $\Delta L_\theta = \alpha\theta$, 短柱体的变形率

$$\epsilon_\theta = \frac{\Delta L_\theta}{L_0} = \alpha\theta$$

因为假设 $L_0 = 1$, 故使数值 $\epsilon_\theta = \Delta L_\theta$, 即可用变形率来代表变形的大小, 便可简化研究。

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 $L = L_0$ (见图 1-4 c), 冷却后的柱体内仍无任何应力。

金属短柱体在加热和冷却过程中的温度、长度、应力和变形情况见表 1-1。

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

表1-1 能自由伸长与收缩的短柱体的加热与冷却

变 化 量	加 热 前	加 热 到 θ 时	冷 却 后
温 度	θ_0	θ	θ_0
长 度	L_0	$L_\theta = L_0(1 + \alpha\theta)$	L_0
应 力	无	无	无
变形(变形率)	无	$\Delta L_\theta = \alpha\theta$ ($\varepsilon_\theta = \alpha\theta$)	无

力和残余变形的目的, 就是根据上述结论。预热焊法和“冷焊”法也就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 $L_0 = 1$ 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 $\Delta L_\theta = \varepsilon_\theta$, 但是, 由于柱体两端有刚性支座的阻碍而不能伸长, 此时 $L_\theta = L_0$ (见图 1-5 b)。这种情况好似柱体从 $L_0 + \varepsilon_\theta$ 的长度被“锻压”到 L_0 长度, 被“压缩”了的变形 ε 为内部变形。在数值上 $\varepsilon = \varepsilon_\theta$, 即 $\Delta L = \Delta L_\theta$ 。

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 $\varepsilon < \varepsilon_s$ (ε_s 为金属材料屈服点的弹性应变), 则根据虎克定律,

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

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

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_s 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 $E = 19.6 \times 10^{10} \text{ Pa}$, 线胀系数 $\alpha = 12 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, 屈服强度 $\sigma_s^- = 2.352 \times 10^8 \text{ Pa}$ (对于低碳钢, $\sigma_s^- = \sigma_s^+$)。压应力达到屈服强度时的温度 θ_s 为:

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

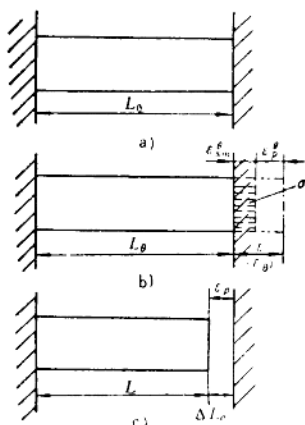


图1-5 不能自由伸长但可自由收缩的短柱体的加热与冷却

a) 原始状态 b) 加热过程 c) 冷却以后

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_e 和压应力 $\sigma = \sigma_e$ 。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 $\sigma = \sigma_s$, 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。

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 ϵ_{em}^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_{em}^0 和塑性变形 ϵ_p^0 组成, 即 $\epsilon = \epsilon_{em}^0 + \epsilon_p^0$ 。而且随着温度的升高, 相应温度下的最大压缩弹性变形 ϵ_{em}^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。

对于低碳钢, 当 $\theta \geq 600^\circ\text{C}$ 时 $\epsilon_{em}^0 = 0$, $\epsilon = \epsilon_p^0$, 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_0 止。结果, 柱体的长度比原来缩短了, 出现了外观变形 ΔL , $\Delta L = |\epsilon_p|$ (如图 1-5 c 所示)。

金属短柱体在假设条件的加热和冷却过程中的温度、长度、应力和变形情况, 见表 1-2。

表 1-2 两端不能自由伸长而可自由收缩柱体的加热与冷却

变 化 量	加 热 前	加 热 到 θ 时		冷 却 后
温 度	θ_0	$\theta_s < \theta < 600^\circ\text{C}$	$\theta > 600^\circ\text{C}$	θ_0
长 度	L_0	$L_\theta = L_0$	$L_\theta = L_0$	$< L_0$
应 力	无	$\sigma = E\epsilon_{em}^0$	无	无
变形(变形率)	无	$\Delta L = \alpha\theta(\epsilon = \epsilon_{em}^0 + \epsilon_p^0)$	$\Delta L = \alpha\theta(\epsilon = \epsilon_p^0)$	$\Delta L_e = \epsilon_p$

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 , ($\Delta L = |\epsilon_p|$)。

上述两点结论对指导生产有很大的实际意义。它告诉我们: 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 $L_0 = 1$ 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联接, 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:

1) $\theta < \theta_s$, $|\epsilon| < \epsilon_s$ 加热及冷却过程中, 柱体中的应力与变形情况见图 1-7。图中横坐标代表时间 (t), 纵坐标代表温度和变形率 (θ 、 ϵ_θ 和 ϵ_s)。由于柱体被刚性固定, ϵ_s 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 $t_1 \sim t_2$ 间温度降低, 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。

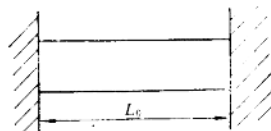


图1-6 不能自由伸缩的短柱体

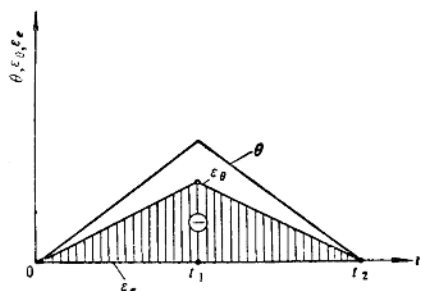


图1-7 受拘束低碳钢柱体在加热与冷却过程中的应力与变形 $|\epsilon| < \epsilon_s$

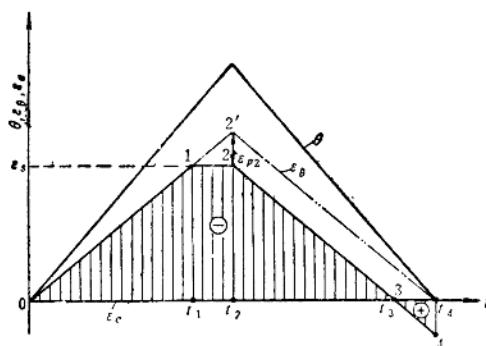


图1-8 受拘束低碳钢柱体在加热与冷却过程中的应力与变形 $|\epsilon| > \epsilon_s$

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 $|\epsilon| = \epsilon_s$, 此时的温度即为 $\theta_s = 100^\circ\text{C}$, 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。

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增加, 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。

柱体在假设条件下的加热和冷却过程中的温度、长度、应力和变形情况见表1-3。

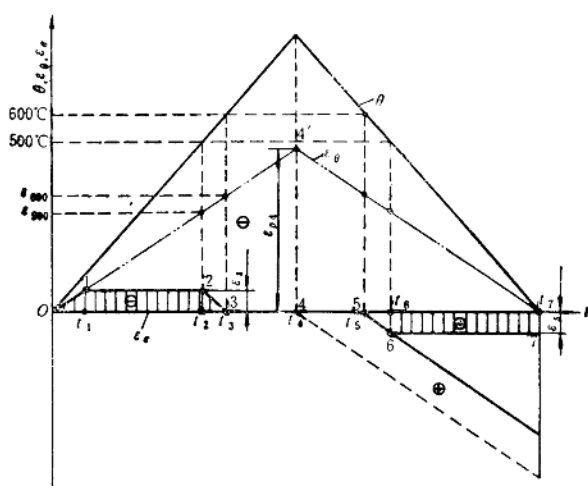


图1-9 受拘束低碳钢柱体在加热与冷却过程中的应力与变形 ($\theta > 600^\circ\text{C}$)

表1-3 两端固定的柱体的加热与冷却

变化量	加热前	加热到 θ 时		冷却后
温度	t_0	$\theta_s < \theta < 600^\circ\text{C}$	$\theta > 600^\circ\text{C}$	θ_0
长度	L_0	$L_\theta = L_0$	$L_\theta = L_0$	L_0
应力	无	$\sigma = -E\epsilon_{sm}^\theta$	无	$\sigma \leq \sigma_s$
变形(变形率)	无	$\Delta L = -\alpha L_0 (\epsilon - \epsilon_{sm}^\theta + \epsilon_p^\theta)$	$\Delta L = \alpha L_0 (\epsilon - \epsilon_p^\theta)$	$\Delta L_s = 0$

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:

a. 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));

b. 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));

c. 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) 对板条正中加热(类似于堆焊)过程的讨论 如图1-10a所示,有长度 $L_0 = 1$,厚度为 δ 的金属板条,在其正中沿长度方向进行加热,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 。

先看看加热过程: