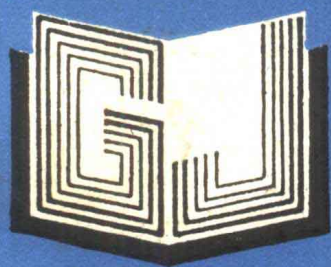


982970



高等学校教材

焊接结构工程

武汉水利电力大学 章应霖 主编



内 容 提 要

全书共分六章。主要包括：焊接应力变形的基本理论，焊接接头的静载强度计算，焊接结构用钢材，焊接接头的强度和破坏，典型金属结构件的焊接生产，焊接结构的质量控制及安全性评定。

本书为高等院校非焊接专业本、专科的焊接教材，也为焊接专业本科的焊接结构教学充实结构生产和接头断裂控制方面的内容。

高 等 学 校 教 材

焊 接 结 构 工 程

武汉水利电力大学 章应霖 主编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

北京市京东印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 14印张 316千字

1995年11月第一版 1995年11月北京第一次印刷

印数0001—1350册

ISBN7-120-02385-3/TH·46

定价10.00元

前 言

世界钢产量的50%以上需要进行焊接形成产品。随着合金结构钢成为钢结构的主要材料,在钢结构的设计、制作、使用 and 维修各方面都涉及不少焊接问题,迫使从事这方面工作的技术人员必须具备相当的焊接专业知识。由此,近年来许多高等学校的金属结构专业和与此相近的专业都开设了焊接或与焊接相关的课程。但至今尚缺乏适应高等学校非焊接专业本、专科学生的焊接教材。编写本教材的出发点是适应上述教学需要,提供给学生在自己专业领域内正确和有效地运用焊接技术的基本原则,同时给焊接专业本科的焊接结构教学增加焊接结构生产、焊接接头断裂控制以及电力建设工程中实用规范等方面的知识。

本教材从工程角度出发着重说明焊接过程中变形和应力的变化规律,焊接结构的承载行为和材料选择,扼要介绍焊接典型结构的生产过程和焊接结构质量控制和评定方法,并提供正确处理设计、制造、使用和维护中所遇焊接问题的基本原则。

本书的绪论和第一章以及第五章的第二、第三节由武汉水利电力大学厉雷钧编写;第二章和第五章的第一、四、五、六、七节由葛洲坝水电工程学院游敏编写;第三、四、六章由武汉水利电力大学章应霖编写。全书由章应霖主编,哈尔滨工业大学田锡唐教授主审。限于水平和编写时间,恐有不足之处,恳请读者批评指正。

1995年1月

Ac65/03

目 录

前 言	
绪 论	1
一、焊接结构的主要优点 二、焊接结构的典型破坏事例 三、焊接所带来的问题 四、本课程的主要内容	
五、学习本课程的目的和要求	
复习题	6
第一章 焊接应力变形的基本理论	7
第一节 焊接热应力及变形的形成	7
一、焊接温度场和焊接热过程 二、热应力及焊接应力和变形的形成	
第二节 结构的焊接残余变形	17
一、焊接残余变形的类型及危害 二、纵向收缩变形 三、横向收缩变形 四、弯曲变形 五、角变形	
六、波浪变形和扭曲变形 七、焊接变形的控制原则和方法	
第三节 焊接残余应力	26
一、焊接残余应力的分布 二、焊接残余应力的影响 三、焊接残余应力的控制	
复习题	41
第二章 焊接接头的静载强度计算	43
第一节 焊接接头的基本形式	43
一、电弧焊焊接接头的基本形式 二、电阻焊焊接接头的基本形式 三、钎焊联合接头 四、胶焊联合接头	
五、焊接接头的标注	
第二节 焊接接头的力学不均匀性	50
一、焊接接头 二、焊接接头力学性能不均匀性 三、应力集中	
第三节 焊接接头的工作应力分布	56
一、电弧焊焊接接头的工作应力分布 二、电阻点焊接头的工作应力分布	
第四节 焊接接头的静载强度计算	62
一、工作焊缝和联系焊缝 二、焊接接头的许用应力设计法 三、焊接接头的极限状态设计法	
复习题	82
第三章 焊接结构用钢材	84
第一节 概述	84
第二节 钢材的焊接性	85
一、焊接裂纹 二、导致焊接裂纹的因素 三、焊接裂纹的形成机理 四、焊接裂纹的防治措施	
第三节 结构用钢材的韧性	93
一、结构用钢材韧性的度量 二、影响钢材韧性的因素	
第四节 结构用钢材的选择	105
一、结构用钢材的选择原则 二、结构用钢材韧性储备的选择	
复习题	109
第四章 焊接接头的强度和破坏	110
第一节 焊接接头的静载强度	110
一、钢材的静载强度特性 二、焊接接头的静载强度特性 三、防止结构脆性断裂的措施	

第二节 焊接接头的疲劳.....	121
一、疲劳断裂特征 二、焊接接头的疲劳强度特性 三、焊接接头的疲劳强度计算 四、疲劳寿命估计	
复习题.....	139
第五章 典型金属结构件的焊接生产.....	140
第一节 金属结构焊接生产的一般过程.....	140
一、备料工艺 二、装配工艺 三、焊接工艺 四、焊前预热及焊后热处理 五、检验和修整 六、涂漆	
第二节 压力容器的焊接生产.....	145
一、压力容器概述 二、压力容器焊接生产工艺分析 三、典型压力容器的焊接生产	
第三节 梁柱的焊接生产.....	155
一、焊接梁柱的用途及其结构特点 二、焊接梁、柱的设计 三、梁柱焊接生产中的主要工艺问题 四、典型梁柱结构件的焊接生产 五、梁柱结构的安装焊接	
第四节 轴类、齿轮零件的焊接制造.....	168
一、焊接机械零部件的设计要点 二、轴类零件的焊接制造 三、齿轮的焊接制造	
第五节 水工钢闸门的焊接制造.....	175
一、水工钢闸门的用途和分类 二、对水工钢闸门的焊接质量要求 三、平面钢闸门的焊接制造 四、弧形钢闸门的焊接制造	
第六节 管道系统的安装焊接.....	183
一、管道的作用及分类 二、引水压力钢管的制造与安装焊接 三、火力发电厂热力管道系统的安装焊接	
第七节 水轮机的安装焊接.....	188
一、主要的焊接安装部件的结构 二、水轮机的一般安装过程 三、分瓣式转轮的安装焊接 四、座环、基础环的安装焊接 五、蜗壳的安装焊接	
复习题.....	198
第六章 焊接结构的质量控制及其安全性评定.....	200
第一节 焊接结构的质量控制.....	200
一、确定质量目标 二、设计及其管理 三、工艺设计及管理 四、施工管理 五、焊接质量检验	
第二节 焊接结构的质量评定.....	203
第三节 焊接结构的安全性评定.....	204
一、安全性评定的基本方法 二、CVDA—1984规范的简介 三、安全性评定的发展	
第四节 焊接接头的可靠性评定.....	213
一、可靠性的度量 二、失效的干涉模型 三、干涉型失效概率的确定	
复习题.....	217
参考文献.....	218

绪 论

焊接经过约100年的迅速发展,已从一种手工技艺成长为一门技术科学,成为现代建筑、机械、车辆、船舶、压力容器、飞机、航天器制造中的最主要工艺。目前在整个工业体系中,已很难找到不采用焊接结构的行业。据统计,在先进的工业化国家中,焊接结构的用钢量已占钢产量的50%以上。我国在新中国成立以后,很快建立了焊接材料和设备的生产基地,并建立了焊接教学体系,使焊接技术迅速发展,为国民经济建设提供了各种关键设备,如600MW发电机组、12000t锻造水压机、运载火箭及核潜艇中的各种焊接结构等。但我国焊接结构的应用面还有待扩大,随着我国社会主义建设事业的飞速发展,将有越来越多的重要焊接结构工程问题急需得到解决。因此,对焊接结构的学习、研究,有着重要的意义。

一、焊接结构的主要优点

焊接结构得到人们重视,获得迅速发展是因为它具有一系列的优点:

(1) 型式简洁、承载力强。焊接接头的接头系数高达100%,这是铆接接头不可能达到的。接头系数的定义为:

$$\frac{\text{接头断裂强度}}{\text{母材断裂强度}} \times 100\%$$

(2) 整体性强、水密性与气密性好。焊接接头不象机械连接那样会产生间隙。能保证诸如深水潜艇及高压容器的水密性、气密性要求。

(3) 重量轻。焊接接头不需要附加连接件,材料的裕量小,接头受力较明确,与其他结构相比,重量轻。例如比铆接结构轻10%~20%,比铸钢件轻20%~30%。

(4) 对产品的尺寸和材料适应性强。焊接接头可以将不同形状和尺寸的轧材、铸件、锻件连接起来,也能将不同种类的材料连接起来,从而使结构材料的分布更合理,充分发挥材料的性能潜力。焊接结构既适用于几何尺寸较大的产品,如梁、桁架、容器,也适用于形状复杂及单件或小批量产品,如专用机床的床身、航天器结构等。

(5) 技术效益和经济效益好。与其他加工方法相比,焊接结构的制造设备投资少,投产快,容易适应不同批量焊接结构的生产和,而且可以方便迅速地更换焊接结构产品的型号和种类。

二、焊接结构的典型破坏事例

焊接结构的应用发展过程是一个技术不断成熟、可靠性不断提高的过程。在这个过程中,发生过一些焊接结构破坏事故。人身和财产的损失促使人们仔细寻找事故原因,深入研究焊接结构的特性,并改进结构的设计和制造工艺。

表1中列出的是焊接结构破坏的典型事例。表2中列出了焊接结构失效的常见原因。

通过对大量焊接结构失效事故的分析,归纳出焊接结构破坏的主要因素:

表 1

结构的典型破坏事例

破坏时间	结构类别、地点	破坏简况和主要原因等
1938	鲁得道夫桥（焊接桁梁） 德国	原因是焊接热影响区产生硬化和残余应力。不合理的加筋板使残余应力增高
1938~1940	威林迪桁架桥 比利时	横跨阿贝特运河上的威林迪全焊拱形桁架桥。焊接造成严重的残余应力，从焊接区发生裂纹
1942~1946	EC2货船，T2油轮等 美国	美国战争时期标准船的脆性破坏。在5000艘中约有500艘有很大的破坏，根据详细的事故调查，得出对于结构设计和材料要有足够韧性的原则
1943.3	贮氨球罐 美国，宾夕法尼亚州（直径14m）	从局部存在焊瘤和气孔的焊接区因锤击试验而发生裂纹。裂纹与焊缝中心线成垂直方向扩展，造成局部破坏
1952	油罐，二个 英国，富利	从施工不良的穿孔处补修焊接区发生裂纹，说明补修焊接管理的重要性。后来废除了穿孔检查
1954	“世界和谐”号油轮 英国	当时最大的油轮，在北大西洋折为两半。鉴于美国战时船舶用沸腾钢的经验，采用了只有15英尺·磅却贝值的半镇静钢。开始对于确定必要的韧性值作详细研究
1962.7	金斯桥（跨度30.5m） 澳大利亚墨尔本	桥在45.8吨卡车通过时坠落。钢材含碳量高，可焊性差。在断面急剧变化部位的应力集中区发生破坏
1962	原子能容器（核电站） 法国茨诺	Mn-Mo钢，从板厚100mm压力容器环形焊接区发生破坏。由于消除残余应力退火，使材料性能恶化
1965.12	贮氨罐 英国	使用厚度为150mm的Mn-Cr-Mo-V钢板和锻钢。从一侧的10mm三角形裂纹处引起破坏。应力退火温度管理不好造成脆化及锻钢件的偏析带是产生破坏的原因
1966.5	锅炉封头 英国	使用板厚140mm的Mn-Cr-Mo-V钢。在贯通式接管焊接接头内部焊趾区发生裂纹。原因是设计上的毛病和消除应力退火初期的急速加热
1968.4	球形罐（丙烯） 日本	使用板厚29mm的80kg级高强度钢。原因是补修焊接时使用80kJ/cm的大热输入焊接，造成熔合区脆化。产生全破坏，脆性裂纹长6.2m

表 2

焊接结构失效原因

结构种类	常见失效原因
桥梁	疲劳，脆性断裂，弯曲变形，大气腐蚀，角焊缝热影响区脆化
船舶	低周疲劳，脆性断裂，腐蚀及应力腐蚀，变形，冷裂纹
海洋结构	腐蚀疲劳，低温脆断，节点部位层状撕裂，焊接缺陷（特别是冷裂纹）
一般压力容器	脆性断裂，泄漏，腐蚀及应力腐蚀，焊接缺陷（特别是冷裂纹，再热裂纹）
化工工艺流程设备	腐蚀和应力腐蚀，蠕变，焊接缺陷
电站锅炉	应力腐蚀，蠕变，泄漏，低周疲劳，再热裂纹
原子能核电站设备	中子辐照引起的脆化，蠕变，应力腐蚀，低周疲劳，再热裂纹

1. 材料因素

- (1) 材料选择不适合于焊接或不适合所设计的焊接结构;
- (2) 材料验收不合格, 或错用了材料;
- (3) 焊接材料选择不当, 与母材不匹配或含扩散氢量过高;
- (4) 焊接接头韧性不足。

2. 设计因素

- (1) 力学模型选择不当, 计算方法不当或错误, 安全系数过小而超载;
- (2) 结构和接头构造形式不合理, 引起严重的应力集中、附加应力、焊接变形和残余应力;

- (3) 结构或接头形式不合理, 不便于制造和施焊, 从而容易产生缺陷。

3. 焊接生产因素

- (1) 焊接热输入量太大或热循环过程不恰当, 引起熔合区或热影响区脆化;
- (2) 焊接接头中产生缺陷, 包括裂纹、未熔合、未焊透、咬边、夹杂及气孔等;
- (3) 消除应力退火规范不当, 使材料性能恶化;
- (4) 补焊不当, 产生熔合区、热影响区或热应变区脆化。

4. 质量管理与控制因素

- (1) 质量管理和质量保证体系不健全、或运行不善;
- (2) 工序间质量检查不严或缺乏检查;
- (3) 无损检测精度不高, 存在超标缺陷;
- (4) 质量检验标准不当, 或检验方法选择不当。

5. 服役条件因素

- (1) 超载或载荷性质变化, 结构疲劳;
- (2) 环境介质腐蚀或应力腐蚀;
- (3) 温度变化引起低温脆化或高温蠕变;

- (4) 结构变化引起附加应力。

实际破坏往往是由几方面的原因共同引起的。例如: 1962年澳大利亚墨尔本金斯桥的倒塌就是由于焊接制造过程中的氢致裂纹在随后的使用中疲劳载荷使其扩展, 导致主承载梁的脆性断裂。引起断裂的盖板的细部见图1。裂纹源处的焊缝位于拉伸应力最大的点, 横向角焊缝垂直于工作载荷, 也垂直于盖板纵向焊缝的残余拉应力场。此外, 制造者对碳当量、预热和除氢处理没有给予足够的重视,

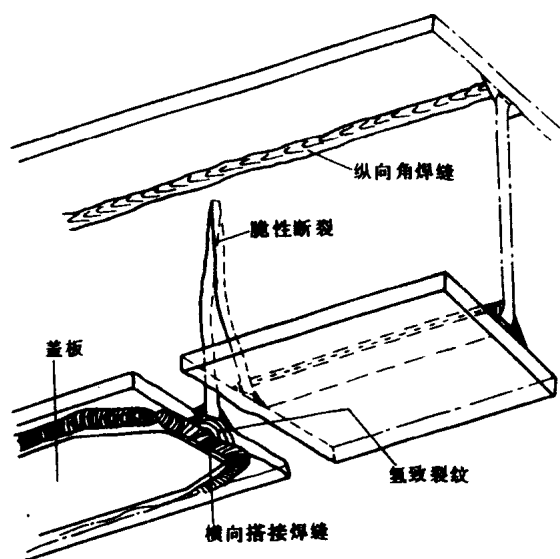


图1 金斯桥工字梁盖板细部

导致横向焊缝的焊根和焊趾处产生相当大的裂纹。

检查时还发现HAZ的韧性不足,母材的冲击韧性也没有达到最低的标准值。这诸多隐患,使得大桥的脆断在很小的诱因(稍大的外载——一辆大拖车;较低的气温——约4℃)下就发生了。

对一些突发的、悲剧性事故的记忆曾经引发人们对焊接产生一些不信任的看法,即认为出于无法了解的原因,焊接使结构产生了奇怪的无法预料的变化。但是,现代焊接科学认为,焊接结构的任何失效行为都可归结于一些可以确定的因素,其中焊接因素主要有:几何形状、材料物理性质的改变或残余应力场等。这些因素也是焊接所带来的主要问题。

三、焊接所带来的问题

1. 焊接接头性能的不均匀性

从焊缝中心到没有受到热影响的母材,接头的性能如屈服强度、塑性、韧性、疲劳和蠕变强度的变化可能很大。焊接过程在接头的不同部位会产生脆化区、软化区、敏化区等性能劣化的区域。在没有几何缺口的情况下,焊接区性能的不均匀性也可能形成所谓的“冶金学缺口”。不均匀的焊接接头的性能需要专门的方法来衡量,标准试验数据只能作参考。因为大多数力学性能指标是通过标准的拉伸、弯曲或缺口冲击试验得到的,这些性能指标基本上对试样局部性能的不均匀性不敏感。

在温度波动的服役条件下相邻的材料热膨胀系数的差别也可能导致失效。例如很厚的奥氏体堆焊层可能从铁素体基体上剥离,尤其当两者的界面较脆时更是如此。此外即使焊缝与母材化学成分匹配较好,其显微组织的差别也会引起接头耐腐蚀性能不均匀。

2. 焊接残余应力和残余变形

熔化焊过程都会在焊接结构中产生不同数值的残余应力。未经消除应力的焊接结构在与应力有关的破坏机制的作用下,一般比没有残余应力的结构更容易被破坏。有的失效形式如脆性断裂、疲劳裂纹和应力腐蚀等,受残余应力的影响较大。

结构的焊接残余变形会使结构的形状、尺寸精度降低,达不到设计标准;此外残余变形可能会降低结构的承载能力。例如,圆筒体在焊接以后会产生下凹或突起,在内压作用下,焊缝处会产生附加的弯曲应力。在薄的受压结构中,焊接区的波浪变形会引起附加的压屈应力。

3. 焊接结构的整体性和大刚度

焊接结构通过不可拆卸的刚性接头连接而成,与铆接和螺栓联接相比具有较大的刚度和整体性,因此焊接结构难以阻止断裂。结构中一旦出现局部裂纹,就往往会在结构中连续扩展,直至整个结构破坏。

四、本课程的主要内容

优质、高效地生产出满足设计要求的可靠的焊接结构,是焊接结构工程的中心任务。结构设计人员应掌握焊接结构及其生产的基本原则,以便设计出的结构能充分地利用和发挥焊接的优点。焊接技术人员应该能根据具体结构的设计、制造要求,正确地运用焊接基本理论分析结构的焊接工艺性;从复杂的因素中抓住主要矛盾,提出解决问题的基本原则,并制定出相应的工艺措施。

为达到这一目的,本课程将讨论焊接结构工程的各方面问题,内容包括结构的强度设计、工艺设计;结构的制造安装技术;质量检测和评定等等。以使读者对焊接结构工程有较全面的了解。

焊接应力和变形是形成各种焊接裂纹的重要因素,又是造成焊接接头热应变脆化的根源,并且影响结构的尺寸精度和稳定性。因此它是本课程的重要理论基础,与焊接结构工程的各方面问题都有重要关系。故将其放在第一章加以介绍。具体内容包括焊接应力和变形的产生原因、规律及影响因素;焊接结构的各种残余变形情况及变形的控制方法;焊接残余应力在结构中的分布特点、对焊接结构性能的影响以及焊接残余应力的控制方法。

第二章讨论焊接接头的型式、工作应力分布和静载强度计算。介绍各种焊接接头的应力集中规律、接头型式的特点及焊接接头的设计要点。该章内容是焊接接头设计的理论基础,也是焊接结构工程的首要环节。其意义在于:合理的接头构造不但使结构在服役时传力均匀,不产生高的应力集中,而且在工艺上便于焊接施工和检验;不仅保证结构安全可靠,同时在经济上也省时省料。

材料的焊接性是决定结构是否宜于焊接的先决条件,也是焊后及使用时结构能否达到性能要求的条件。本书第三章讨论焊接结构用钢的选择问题。内容是介绍焊接性的概念、各种焊接裂纹的产生原因和防治措施、钢材抗脆断能力的评定方法及材料的选用。其中重点是选用母材时必须遵循的基本原则。过去选材只从强度指标出发,不考虑其焊接性,导致结构失效的教训是很深刻的。

第四章围绕影响焊接结构的静载强度和疲劳强度的因素及提高静载强度和疲劳强度的措施,讨论焊接接头的静载强度和疲劳强度问题,讨论工程结构的疲劳强度计算及疲劳寿命的估计问题。

第五章介绍典型金属结构件的焊接生产。通过对压力容器、梁柱结构、轴类、齿轮及水工结构焊接制造及安装的实例分析,介绍焊接结构生产工艺设计、实施、质量控制的基本原则和方法。该章重点是如何进行焊接结构产品工艺分析,具有较强的综合性和实践性。

合理的质量检验标准和质量控制方式对于保证焊接产品质量是必不可少的。焊接结构应比其他结构有更严格的检验和评定制度,因此第六章讨论质量控制和安全性能评定问题。其中包括焊接结构的可靠性评定。

总之,焊接结构工程是一门综合性的课程,实用性较强。它能为焊接工程结构的现代化提供系统的概念,以使整个结构的质量不断提高。它综合了设计、制造、安装及使用中的经验和研究成果,以具体的结构作为讨论对象,使学生更好地掌握焊接结构的特点,为解决有关设计和工艺问题打下基础。

五、学习本课程的目的和要求

通过本课程的学习,同学们应了解焊接过程中变形和应力的变化规律,焊接结构的承载行为、焊接接头的强度设计方法及焊接结构质量检测、控制和评定的方法,了解在设计、制造、使用和维修中所遇焊接问题的基本处理原则。因此对学生提出以下要求:

(1) 了解焊接结构的特点,能正确地设计基本焊接接头,并了解焊接结构的工艺性能以及可能出现的工艺问题,从而改进设计。

(2) 掌握典型焊接结构的生产工艺流程, 能正确编制焊接工艺, 领会焊接产品的设计意图和使用条件, 组织实施焊接施工, 以达到产品设计要求。

(3) 正确理解、使用有关的设计、施工、验收规范及有关手册, 能对焊接结构的生产过程进行基本的质量控制, 并能对焊接接头和结构的安全性、可靠性进行初步的评价。

复 习 题

1. 焊接结构的主要优缺点有哪些?
2. 导致焊接结构失效的主要因素是什么?

第一章 焊接应力变形的基本理论

焊接过程中的应力——应变循环，对焊接构件的质量起着重要的作用。它不仅影响结构的外形质量，对结构的强度等内在质量也有重要影响。因此掌握其规律并藉以对它们进行控制是焊接结构工程中的首要任务。

焊接应力和变形的特殊规律，究其根源，是由焊接部位不均匀的快速高温加热所导致的。可见为了研究掌握焊接应力——应变循环的规律，首先应该了解焊接的加热特点。本章将从焊接的不均匀加热的基本特点出发，讨论热应力、焊接应力和变形的形成过程及其基本规律，介绍估算和控制焊接变形及应力的工程方法。

第一节 焊接热应力及变形的形成

一、焊接温度场和焊接热过程

熔化焊接时，必须有一定能量的热源作用于待焊部位的局部区域。通过加热、熔化和随后的冷却凝固形成焊缝。由此，焊接热过程就有以下特点：

(1) 加热区域小，加热温度高。焊接热源能量密度大，在极短的时间内可使焊件被加热的小区域升至很高的温度。它造成焊件上的温度分布得极不均匀，焊件上各点间出现很大的温度梯度。

(2) 加热时间短，温度分布不稳定。电弧焊接情况下，焊接热源与焊件之间始终处于相对运动状态中。因而对于焊件上某一点而言，受到加热作用的时间极短，可视为仅是一个瞬间。即当焊接热源接近焊件上某一点时，热源的热量将使该点迅速加热升温，随着热源的离去，热量将从该点导出而使其降温。可见焊件上各点温度的分布是随着时间的推进而在不断变化着的。焊件上的传热过程是一种非稳定状态的传热过程。

1. 焊接温度场

将焊件上温度相同的各个点连接起来，可画成等温线。把若干个不同温度的等温线组合在一起就可以清楚地描述焊件上的温度分布。这种描述温度分布的等温线群称为温度场。描述焊接过程的温度场是焊接温度场。根据前述焊接热过程的特点，不难看出，焊接温度场随着时间的推移在不断变化着的。揭示热传导和温度场内规律的数学工具是Laplace热传导方程：

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \partial \nabla^2 T$$
$$a = \frac{\lambda}{c\rho}$$

式中 λ ——材料的导热系数 $[\text{J}/(\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})]$ ；

a ——导温系数或热扩散率 (cm^2/s);

c ——比热容 [$\text{J}/(\text{g}\cdot^\circ\text{C})$];

ρ ——密度 (g/cm^3)。

热传导方程表示给定点温度变化速度同拉普拉斯运算符号 $\nabla^2 T$ 成正比例,即在某一时刻 t ,物体上给定点 $P(x, y, z)$ 附近的温度分布越不均匀,则 P 点的温度变化越快。导热的结果,将使温度分布趋于均匀。

可以通过设定边界条件、热源类型来求解一些特定条件下的焊接温度场。也可以运用有限单元法或差分法来计算,当然还可以通过实验来测定温度场。

图1-1是计算得到的厚板表面运动热源的温度场。图中在虚线后方区域已处于降温阶段,在虚线前方区域则处在迅速升温阶段。升温区域的温度梯度大于降温区域的温度梯度,而在热源移动轴线两侧(即 x 轴两侧)的温度分布是对称的。

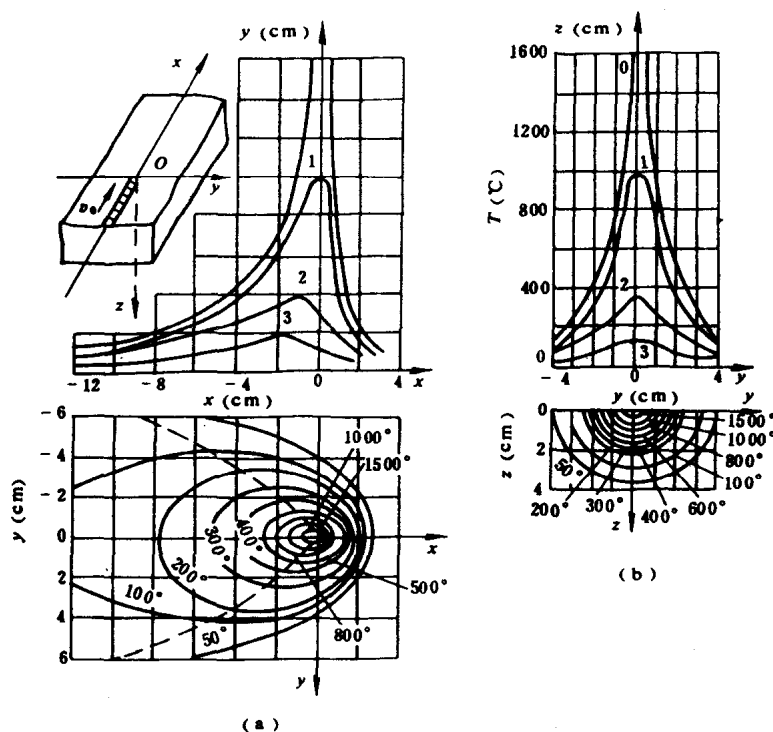


图 1-1 厚板表面运动点热源的温度场

$q = 4000 \text{ J/s}$; $v = 0.1 \text{ cm/s}$; $a = 0.1 \text{ cm}^2/\text{s}$; $\lambda = 0.4 \text{ J}/(\text{cm}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C})$

由图1-1可知:当热源开始移动并经过足够长时间以后,处在移动开始点附近的热源对当前热源附近各点的温度升高将不再起作用。因此,如果此时把温度场的坐标原点设置在运动着的热源上,则温度场与时间无关。这种状态称为准稳定状态。热源开始移动到准稳定状态的时间,从数学上看是无限长的,但实际上,是一个不太长的有限时间。因此,准稳定状态既能代表焊接过程的大部分,又能大大简化问题的研究过程。

2. 焊接热循环

当焊接热源作用时,焊件上某一点的温度随时间的变化过程,叫作焊接热循环。焊接

热循环影响焊缝的化学冶金和物理冶金过程，对焊接接头的质量有决定性的作用。图1-2为低合金钢手弧焊时实测的焊件上不同点的焊接热循环曲线。与普通热处理过程相比，焊接热循环具有以下特征：加热速度大，峰值温度高，高温保温时间（高温持续时间）短，冷却速度较快。

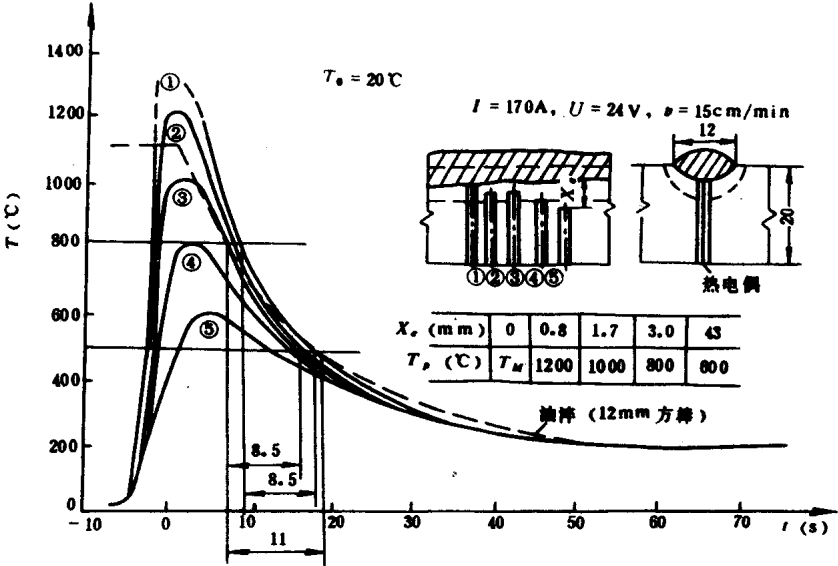


图 1-2 低合金钢堆焊焊缝邻近各点的热循环
(t —电弧通过热电偶正上方时算起的时间)

描述焊接热循环特征的主要参数有：加热速度，峰值温度 T_p ，高温持续时间，在某一温度 T 时的瞬时冷却速度，或在某一温度区间的冷却时间 t_c （例如常用 $t_{8/5}$ 代表某点在500~800°C温度范围内的逗留时间）等。

焊接热循环受焊接线能量 E 、预热温度 T_0 、焊件尺寸及焊接接头尺寸和形状的影响。

(1) 焊接线能量 E 的影响。 E 提高时，峰值温度 T_p 、高温持续时间、瞬时冷却速度和冷却时间 t_c 增大，并使焊缝热影响区（HAZ）的宽度增大。

(2) 预热温度的影响。与提高 E 相似，提高原始温度 T_0 也增加HAZ的宽度，不同的是，提高 T_0 可以显著降低冷却速度，而不会明显提高在峰值温度 T_p 附近的停留时间。

(3) 焊件尺寸及焊接接头尺寸和形状的影响。焊接接头尺寸和形状不同，导热情况就有差别。一般T型接头和角接接头的冷却速度是同等板厚的对接接头冷却速度的1.5倍。焊件长度对冷却速度无影响，但在焊件长度一定时，焊道长度小于40mm，冷却速度会急剧增大，因此定位焊接的焊道不能过短。

通过对焊接温度场和焊接热循环参数的计算和实测，可以有目的地控制焊接热过程。

二、热应力及焊接应力和变形的形成

(一) 内应力

内应力是指没有外力作用时，平衡于物体内部的应力。从本质上说，内应力是由于物体内部各个部分力学状态的差别而产生的。这种差别可能是不均匀的加热引起的，也可能由不均匀的变形引起。

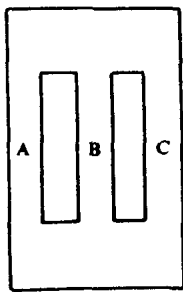


图 1-3 不均匀受热的 A、C 在柱 B 的膨胀作用下，产生拉伸应力。这样，尽管没有外力作用，由于不均匀受热，框架内产生了平衡于内部的应力。

若柱 B 的加热温度不高，B 内的压缩应力处于弹性范围以内，则当柱 B 的温度回到原始温度后，框架的内应力消失。若柱 B 的加热温度足够高，使 B 柱内的压缩应力超过弹性极限，从而在 B 柱内产生塑性压缩变形，则当柱 B 的温度回到原始温度后，框架内还将保留有内应力。在柱 B 的温度变化过程中，框架的内应力也随着变化。一般把每一时刻的内应力称为瞬时内应力；把引起内应力的因素去掉之后，仍不消失而存在于物体内部的应力称为残余应力。

2. 不均匀的塑性变形所产生的内应力

设图 1-4 所示的理想弹塑性体梁受到弯曲。此时梁中性轴两侧 x_0 范围内为弹性变形， x_0 以外部分发生塑性变形，而且一侧受拉伸另一侧受压缩。图 1-5 中 oa 、 ab 表示弯曲梁受拉一侧的情况。若除去载荷，弯曲梁力图回弹，此时中性轴两侧 x_0 部分应从 a 点开始沿弹性变形线 ao 回弹至 o 点。而 x_0 以外部分却只能从 b 点开始沿着与 ao 线平行的 bc 线弹性回复。沿 ao 回弹的 x_0 部分一旦应力回复到零，其应变也回到零。但沿 bc 回复的部分，在其应力回到零时应变不为零。假使这一部分与梁脱离，原来受拉伸侧将比原长长，受压侧比原长短。由于实际上梁是一个整体，不可能让 x_0 以外部分的伸长和缩短表现出来。如图 1-5，原受拉侧残留的伸长 oc 必须由其他部分把它压回去，即应沿着 bc 方向继续变形至 d 。此时伸长应变为零，但产生了压缩应力 od 。同理，原来受压一侧的情况也是如此，只是应力变形的符号与上述拉伸部分的相反。这样，当载荷去除后，为了保持梁内应力的平衡就产生如图 1-6 所示的残余应力分布。

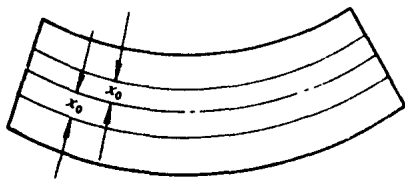


图 1-4 梁的弯曲

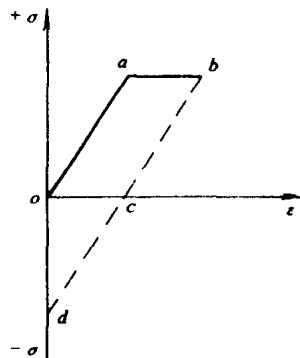


图 1-5 上半梁的应力应变图

除了不均匀温度分布和不均匀变形会引起残余应力外,相变或沉淀析出引起的体积变化以及化学变化也会导致残余应力。由于最常用的熔化焊接总是对材料局部进行剧烈加热和冷却,所以下面将重点讨论由于加热的作用导致的残余应力和变形问题。

(二) 低碳钢杆件的热应力与热变形

1. 自由变形、外观变形和内部变形

(1) 当物体的温度改变,其长度也改变,若此长度的改变不受阻碍地自由进行,则为自由变形。此时自由变形的数值大小等于温度变形,即

$$\Delta L_T = L_1 - L_0 = a (T_1 - T_0) L_0$$

式中 T_0 ——原始温度;

T_1 ——改变后的温度;

L_0 ——物体原长;

L_1 ——变形后的长度;

a ——线膨胀系数。

把单位长度上的自由变形称为自由变形率或自由应变:

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta L_T}{L_0} = a (T_1 - T_0) = a \Delta T$$

(2) 当物体的长度变化受阻,变形只能部分地表现出来时,把能够表现出来的那部分变形称作外观变形,记为 ΔL_e 。

外观变形率: $\varepsilon_e = \Delta L_e / L_0$

(3) 把未表现出来的那部分变形称为内部变形,记为 ΔL 。

内部变形率: $\varepsilon = \Delta L / L_0$

2. 杆件在不同拘束条件下的热应力与变形

(1) 无拘束杆。杆件可以自由变形,如图1-7。其原长为 L_0 ,当对其均匀加热使温度由 T_0 升至 T 时,其温度伸长量为 $\Delta L_T = a (T - T_0) L_0$ 。温度降回 T_0 后,杆件回到原长。这种无拘束杆的热变形具有如下特点:

$\Delta L_T = \Delta L_e$ (外观变形等于温度变形即自由变形)

$\Delta L = 0$ (内部变形为零,内应力为零)

(2) 一端刚性固定,一端单向约束。处于这种拘束条件下的杆件不能实现膨胀,杆件总是为 L_0 原长,所以外观变形 ε_e 为零(图1-8)。

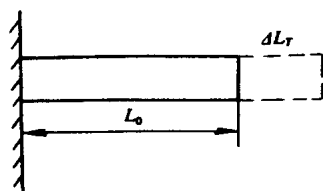


图 1-7 无拘束杆

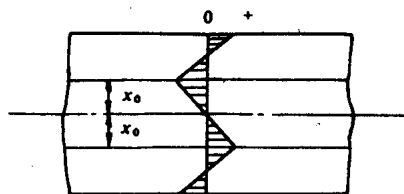


图 1-6 梁内残余应力

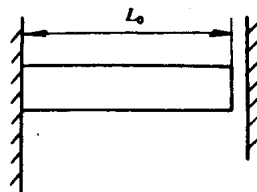


图 1-8 一端刚性固定、一端单向约束的杆

杆件受热产生的温度变形 ε_T 完全被限制了, 转化为内部变形 ε , 即

$$\varepsilon = -\varepsilon_T = -\alpha(T - T_0)$$

杆内的压缩变形伴随着压缩内应力。此压缩内应力 σ 与内部变形率 ε 由虎克定律相联系:

$$\delta = E\varepsilon$$

式中 E ——弹性常数。

故杆中的压缩内应力为:

$$\delta = E\varepsilon = -E\varepsilon_T = -E\alpha(T - T_0)$$

可见杆内的压缩内应力与加热温度 T 成正比。随着加热温度的上升, 压应力值不断上升, 当其达到材料的屈服应力 $(-\sigma_s)$ 时, 杆件将出现压缩塑性变形。使杆内出现塑性变形的临界加热温度 T_s 可以求出如下:

$$-\sigma_s = -E\alpha(T_s - T_0)$$

$$T_s = \sigma_s / (E\alpha) + T_0$$

对于普通低碳钢杆件, 可以将其材料性能常数代入上式, 求出这种拘束条件下的 T_s (设 $T_0 = 0^\circ\text{C}$):

$$T_s = \frac{\sigma_s}{E\alpha} = \frac{2400}{12 \times 10^{-6} \times 2 \times 10^6} \approx 100(^\circ\text{C})$$

所讨论杆的最高加热温度若低于 T_s , 则杆内就只有弹性压缩变形。当杆件冷却时弹性变形回复, 杆内无残余应力和变形。见图1-9表示加热和冷却过程中杆件温度、内应力和各种应变的变化情况。

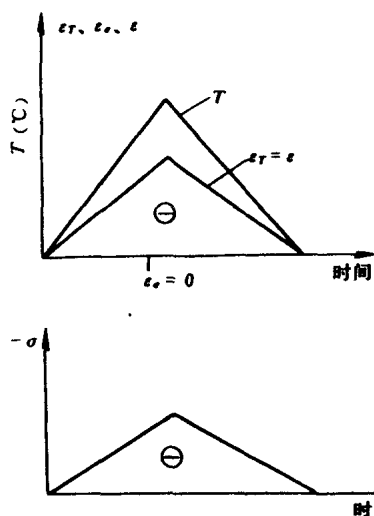


图 1-9 加热温度低于 T_s 时杆内应力应变的变化

若杆的最高加热温度高于 T_s , 则在温度不高时, 杆内先产生弹性压缩变形; 但当温度达到 T_s 后, 压缩弹性变形达到最大值 ε_s 时而出现塑性变形 ε_p 。 ε_p 的大小为:

$$\begin{aligned} \varepsilon_p &= \varepsilon_T - \varepsilon_s \\ &= \alpha(T - T_s) \end{aligned}$$

塑性变形不具有回弹性质, 它只能通过反方向的塑性变形才能抵消。由于所讨论的杆冷却时不受阻而自由收缩, 故塑性变形 ε_p 将保持下来, 杆件将出现缩短, 缩短的量与最大塑性压缩量成正比:

$$\Delta L' = \varepsilon_p L_0 = \alpha(T - T_s)L_0$$

冷却后杆内无残余应力, 但有残余变形 $\Delta L'$ 。应力变形的变化情况示于图1-10。

(3) 杆件两端刚性固定, 且加热温度高于 T_s 。此拘束条件有以下特点: ①任何时候, 外观变形 $\varepsilon_e = 0$ 。②温度变形 ε_T 转化为内部变形 ε , 即 $\varepsilon = \varepsilon_T$; 同时因为温度高于 T_s , 内部变形由弹性变形和塑性变形两部分组成 (图1-11)。