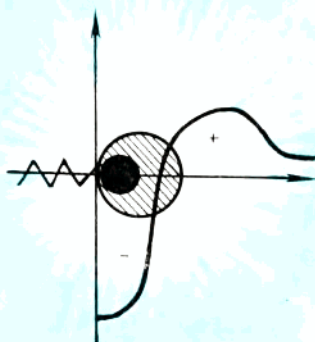


焊接结构 安全评定技术

张宝昌 编 著



机械工业出版社

内 容 简 介

本书从不同角度阐述了焊接结构安全评定方法。本书力求深入浅出,所阐述的评定方法力求通俗易懂,尽量不作复杂公式推导。同时,也概述了各种评定方法的背景。

本书共分八章,分别介绍了焊接结构安全评定要点、焊接结构特点及失效方式;静强度、应力和变形、断裂力学基础,用断裂方法估算寿命;裂纹形成寿命和疲劳疲劳;缺陷评定以及在环境介质中的疲劳与断裂。

本书的读者对象为从事设计、制造、检验、试验等工程技术人员以及工人技师,也可作为力学、金属材料、焊接等专业研究人员及大专院校师生的参考书。

焊接结构安全评定技术

张宝昌 编著

责任编辑:董连仁

封面设计:田淑文

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

黑龙江省教委印刷厂印刷

机械工业出版社发行

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ ·印张 $7\frac{1}{2}$ ·字数 196 千字
1990年12月哈尔滨第一版·1990年12月哈尔滨第一次印刷
印数 0,001—1500·定价:7.00元

ISBN7-111-02650-0/TG·595(X)

序

随着科学技术的进步和工业生产的发展,焊接结构的应用范围日益扩大,目前焊接结构已经广泛地应用于机械、电力、石化、冶金、原子能、宇航、海洋工程、轻工、纺织、食品、城建等各个部门。这些焊接结构能否安全工作,如何防止破坏事故,不仅影响国民经济的发展,而且关系到人民群众的生命安全。因此,国内外都十分重视焊接结构安全评定技术的发展。

焊接结构安全评定是焊接结构和安全评定两门学科相结合的产物。焊接结构是焊接领域的重要组成部分,安全评定技术对工程结构的设计、使用有着重大的指导作用。因此,发展并完善焊接结构安全评定技术已经成为国民经济发展的迫切需要。本书的作者长期从事安全评定工作,积累了丰富的解决实际问题的经验,在此将《焊接结构安全评定技术》一书献给读者,希望能够为推动焊接结构安全评定技术的发展和焊接结构的推广应用尽一份力。

《焊接结构安全评定技术》一书涉及到评价工程结构安全性的绝大部分问题。书中重点阐述了结构失效形式及焊接结构特点,静强度计算、焊接应力和变形、结构寿命和裂纹形成寿命的估算、低周疲劳、焊接缺陷评定等问题。也用一定的篇幅讨论了腐蚀介质和高、低温等因素对焊接结构的断裂和疲劳的影响。作者以解决实际问题为出发点,书中大部分内容曾作为哈尔滨焊接研究所举办的焊接结构安全评定研讨班的讲义,经多次与有关人员进行研讨并加以应用,收到了良好的效果。本书在写法上深入浅出,每一部分都有具体的例证,介绍如何应用安全评定技术,便于读者在实际工作中应用。

本书作者在哈尔滨焊接研究所从事焊接结构安全评定技术研

究多年。近几年来还对焊接接头的强度、断裂、疲劳等问题进行了较深入的工作。该书吸收了这些研究成果的思路，大部分例证均取自于进行过的来源于生产实际的科研项目，对指导工程应用很有意义。

本书可供从事设计、工艺、检验及有关实验人员使用，也可供大专院校焊接、力学、金属材料等专业的师生参考。

周 昭 伟

前 言

焊接结构安全评定技术是人们极为关心的问题，特别是近年来由于焊接技术的发展和广泛应用，对焊接结构的安全评定、可靠性及失效分析的研究，日趋重要。本书从普及评定方法出发，力求解决实际问题。“焊接结构安全评定”理论，涉及到力学、金属材料、焊接等学科领域，把这些内容融为一体撰写成一书，对作者来说是一次大胆的尝试。

本书初稿是中国焊接协会、中国焊接学会以及哈尔滨焊接研究所培训部所共同主办的焊接结构安全评定技术研究班讲义，参加研究讨论的同志有工业企业中从事设计、制造、检验的工程技术人员；有从事断裂力学、金属疲劳、金属材料、焊接、热处理等专业研究人员及大学教师。

本书是在原讲义的基础上，经过十余次研究讨论与实践验证，吸收了很多同志的宝贵意见，经过了内容上的删改与充实后编著成册。

本书共分八章，各章内容基本各自独立，大部分章节都列举了实际工程例证。这些例证多是作者近年来同其他同志合作的科研成果。

本书在编写过程中，先后得到孙训芳、田锡唐、郑修麟等专家教授的指点，得到周昭伟、郭寿汾、邵耀永、刘天佑、蔡宏彬、赵廷衡、张金铎、李树生、邵泽安、王敏、温延盛、王守业等同志的支持和帮助。

《焊接》杂志编辑部的任大成、何瑞芳、葛文梅同志对本书做了初步审校。杨慧文、王伯玲、吕殿恒等也做了一定工作。此外，陈佩寅、焦伟同志参加了全书的修改和插图绘制工作。

在此，对上述有关同志，表示衷心的感谢。

编 者

主要符号表

σ_b	—强度极限
σ_s	—屈服极限
σ_e	—弹性极限
σ_p	—比例极限
σ_0	—流变极限
$\sigma_{\parallel}$	—平行于焊缝轴线的正应力分量
$\sigma_{\perp}$	—垂直于焊缝轴线的正应力分量
$\tau_{\parallel}$	—平行于焊缝轴线的切应力分量
$\tau_{\perp}$	—垂直于焊缝轴线的切应力分量
σ_c	—临界应力
$[\sigma]$	—许用应力
$\bar{\sigma}_p$	—母材的平均应力
$\bar{\sigma}_w$	—焊缝的平均应力
σ_m	—平均应力
σ_r	—残余应力
E	—弹性模量
G	—切变模量
δ	—厚度；伸长率；裂纹尖端张开位移
D_i	—管道内径
D_o	—管道外径
L_0	—原拉棒长度
L	—拉伸后拉棒长度
a	—原断面面积
A	—拉伸后断面面积
V	—体积
v	—热源速度
Q	—热源密度
k	—热导率
σ_1	—冲击韧性

X

F —外力

γ —泊松比

R —应力比；裂纹尖端屈服区直径

ϕ_s —焊缝减缩系数

ϵ —应变

ϵ_s —屈服应变

ψ —断面收缩率

W —试件宽度

ω —角变形量

h —熔边量

a —裂纹长度；穿透裂纹半长；

a_0 —初始裂纹长度

a_c —临界裂纹长度

a_N —对应 N 次循环的裂纹长度

$\bar{a}$ —当量裂纹尺寸

c —内部裂纹长度；表面裂纹半长；附加壁厚

c_0 —初始内部裂纹长度；初始表面裂纹长度

c_N —对应 N 次循环的表面裂纹长度

b —表面裂纹深度；内部裂纹深度半长

p —内部缺陷边缘到自由表面的距离；表面缺陷深度方向边缘到另一自由表面距

离；压力

d —两平行缺陷面间最小距离

r —裂纹尖端屈服区半径；裂纹尖端半径；超载比

r_0 —裂纹尖端屈服区半径

σ_s —爆破应力

σ_{op} —张开应力

σ —应力

$\Delta\sigma$ —应力幅

σ_{-1} —旋转弯曲确定持久极限

σ_w —弯曲应力；持久极限

σ_L —拉伸应力

$\Delta\epsilon$ —局部应变幅

$\Delta\epsilon_T$ —总应变幅

$\Delta\epsilon_e$ —弹性应变幅

$\Delta\epsilon_p$ —塑性应变幅

- A_1 —夏比冲击吸收功
- a_1 —冲击断裂功
- a_0 —冲击弹性功
- K_I —张开型应力强度因子
- K_{Ic} —平面应变断裂韧性
- $K_{\max}$ —对应于 $\sigma_{\max}$ 的 K_I
- $K_{\min}$ —对应于 $\sigma_{\min}$ 的 K_I
- $\Delta K - K_{\max} - K_{\min}$ —应力强度因子幅度
- K_{Ic} —平面应力断裂韧性
- K_{Isc} —介质中断裂韧性
- K_{op} —张开型应力强度因子
- ΔK_{eff} —有效应力强度因子幅
- da/dN —单位循环的裂纹扩展量
- δ_c —临界COD
- δ_i —启裂COD
- δ_n —最大COD
- $\delta_{s.s}$ —裂纹稳定扩展量为0.05mm时的COD值
- δ_e —弹性张开位移分量
- δ_p —塑性张开位移分量
- J_e —对应于 δ_e 的 J 积分值
- J_R —阻力曲线确定的 J 积分值
- $J_{s.s}$ —裂纹稳定扩展量为0.05mm所对应的 J 积分值
- N —循环数
- N_i —形成裂纹寿命
- N_f —断裂寿命
- N_c —对应 σ_c 的寿命
- T —温度
- T_i —转变温度
- P_s —摩擦压力
- F_{op} —张开力
- U_B —闭合参数
- C_p —迟滞参数
- c, n —Paris公式 $da/dN = c \Delta K^n$ 中的常数

目 录

第一章 绪论	(1)
§1-1 焊接技术在工业建设中的作用	(1)
§1-2 焊接结构的特点及应用	(3)
§1-3 焊接结构的失效方式	(4)
§1-4 焊接结构安全评定的要点及意义	(11)
第二章 静强度	(14)
§2-1 材料强度及结构的强度计算	(14)
§2-2 强度理论简介	(16)
§2-3 焊接接头强度计算国际标准简介	(18)
§2-4 焊接结构强度匹配	(20)
§2-5 焊接结构强度计算实例	(21)
第三章 焊接应力与焊接变形	(27)
§3-1 内应力及变形的基本概念	(27)
§3-2 焊后残余应力的形成与测试	(33)
§3-3 焊后残余应力对强度的影响	(39)
§3-4 残余应力消除方法	(43)
§3-5 焊接残余变形	(45)
第四章 焊接结构断裂力学基础	(53)
§4-1 基本概念	(53)
§4-2 小范围屈服时应力强度因子的修正	(60)
§4-3 弹塑性断裂力学简介	(63)
§4-4 断裂判据与断裂韧性测试	(68)
§4-5 焊接接头的韧性控制及防止脆断发生的常规方法	(73)
§4-6 应用举例	(84)
第五章 用断裂力学方法估算焊接结构寿命	(87)
§5-1 疲劳断裂的特点	(87)
§5-2 用断裂力学方法估算寿命的思路和程序	(89)
§5-3 疲劳裂纹扩展速率	(91)
§5-4 裂纹扩展速率的测试方法	(99)

§5-5 裂纹扩展速率研究实例	(107)
§5-6 门槛值的测试原理	(116)
§5-7 应用举例	(121)
第六章 裂纹形成寿命和应变疲劳	(125)
§6-1 裂纹形成寿命和应变疲劳的特点	(125)
§6-2 应力与应变间的关系	(127)
§6-3 低周疲劳的 $\Delta\epsilon-N$ 曲线和 裂纹形成寿命的确定方法	(131)
§6-4 缺口应力应变的疲劳裂纹形成寿命估算	(133)
第七章 按脆断原则评定焊接接头缺陷	(137)
§7-1 概述	(137)
§7-2 缺陷尺寸的标准化	(140)
§7-3 缺陷尺寸的疲劳扩大	(150)
§7-4 力学条件	(157)
§7-5 断裂参数的力学计算	(163)
§7-6 材料的断裂韧性及安全判断	(165)
§7-7 应用实例	(166)
§7-8 我国焊接接头缺陷评定标准的要点	(168)
第八章 环境对断裂与疲劳的影响	(171)
§8-1 腐蚀疲劳与断裂	(171)
§8-2 热疲劳断裂及低温疲劳与断裂	(179)
§8-3 疲劳裂纹扩展的超载迟滞	(182)
§8-4 按裂纹闭合理论分析载荷状态对裂纹扩展的影响	(190)
附录	(195)
附录一 缺陷简化	(195)
附录二 焊接接头脉动拉伸疲劳试验方法	(201)
附录三 钢及焊缝 $d\alpha/dN$ 测试中的单试件中心 张开位移法	(208)
附录四 焊接接头裂纹扩展速率测试的侧槽试验法	(214)
附录五 力、压力、应力强度因子和能量释放率标准 国际单位 (SI) 换算表以及英文名称	(220)
参考文献	(222)

第一章 绪 论

§ 1-1 焊接技术在工业建设中的作用

随着我国工业建设、国防建设的发展,焊接技术将成为一种极重要的加工手段而被各方面关注,尤其是在航天技术、原子能电站、海洋工程、微电子及新材料的开发中,焊接技术将起到它独到的作用。

一、在航天技术方面

各种人造卫星、航天飞机和空间站等的主要部件都是采用焊接方法制造的。例如,美国的“水星”号、“双子星座”号以及“阿波罗”号等载人飞船,都是采用钛合金做骨架,大量采用了氩弧焊工艺,某些局部还采用了真空电子束焊和激光焊。一般飞机起落架或发动机架也常常采用电弧焊。运载火箭也是由多个容器组成的,必然也离不开焊接。可见焊接技术在航天工业中是何等重要。随着航天技术的发展,还要实现在无重力的太空中进行焊接,这也是近年来对焊接技术提出的新课题。

二、在海洋开发方面

海洋资源,诸如石油、天然气以及其它稀有金属是十分丰富的。例如,全世界海底石油的储量约占地球总储量的一半,我国海岸线长达18000km,所以开发海洋是十分必要的。在建造开发海洋需要的海上采油平台、钻井船、海底作业机械、潜水装置时焊接是必不可少的工艺。

三、在原子能电站方面

目前全世界共有约250座核发电站,分布在41个国家,占总发电量的20%,还有250座正在建造之中。到2000年核发电量将

会占总发电量的50%左右。

核电站的重要装置有原子锅炉、球形外壳、重水箱、热交换器等。制造这些设备时，对焊接质量要求极高，如发生泄漏将会造成放射性污染，已引起人们极大的注意。

四、在以焊代铸、以焊代锻、以焊代铆工艺的发展方面

以焊代铸、以焊代锻工艺有突出的优点。例如，直升飞机减速器架接头，如能“以焊代锻”，则可节约原材料十倍，而这种原材料又十分昂贵。

以焊代铆是近年来发展起来的先进工艺。铁道桥梁采用以焊代铆的桥梁结构不仅可以节约钢材，还可以解除铆工繁重的体力劳动。所以建造焊接结构的铁道桥梁，在世界上已经作为建桥技术进步的标志。

五、我国焊接技术水平同国外的差距

(1) 焊接机械化方面。国际上焊接自动化和半自动化生产已达到40~50%（按填充金属量计算）。而我国仅占20~30%。

(2) 常规弧焊工艺水平落后。常规弧焊是指手工焊和气电焊。国外为提高手工焊效率，大力发展铁粉焊条、专用立向下焊条、重力焊条等。我国在这方面只做了一些工作，很多项目尚在研究之中。在气电焊方面国外先进国家发展较快，特别是CO₂气体保护焊得到了广泛的应用。例如，1975年苏联CO₂焊丝的产量占焊接材料的17.7%；美国占24.8%；而我国1983年才占3.2%。

(3) 特种焊接工艺发展缓慢，应用不广。

(4) 焊接材料品种少。

(5) 焊接结构应用不够广泛。国外焊接结构用钢量占钢产量的45%，而我国仅为22%（1980年的统计数据）。近20年来，焊接结构的应用范围全世界都在不断地扩大，并且已经成为衡量一个国家工业化水平高低的主要标志之一。

§ 1-2 焊接结构的特点及应用

一、焊接结构的特点

同铆接结构相比具有如下特点:

(1) 应力集中变化范围大。

(2) 有较大的焊接应力和变形。

(3) 有较大的组织、性能不均匀性。

(4) 焊接接头有较好的密封性和较好的刚度,即有很好的整体性。

二、焊接接头的形式及杆系结构

焊接接头的形式有对接、搭接、T形接头、十字接头、角接头等。

杆系焊接结构主要是焊接梁、柱。其断面形状常用的有两种:一种为不封闭形,断面多为工型、 Π 型等;另一种为封闭形,断面多为方型或圆型。杆系的结点是杆系焊接结构的要害部位,有刚架结点、桁架结点、管子刚架结点等。例如,焊接桥梁的节点为桁架结点,海上采油平台的导管架是管子刚架结点。这些结点都是安全评定的主要部分。

三、压力容器焊接结构

压力容器包括塔、换热器、贮罐、管道等。按压力大小(表压)可分为:最高工作压力小于 1.6N/mm^2 (表压)的低压容器;压力为 $1.6\sim 10\text{N/mm}^2$ (表压)的为中压力容器;压力为 $10\sim 100\text{N/mm}^2$ 的为高压容器;压力超过 100N/mm^2 的为超高压容器。压力容器主要采用球形和圆筒形结构^[2]。常用的焊接接头有:(1)筒体和封头的纵焊缝、横焊缝、衬里焊接接头;(2)接管、法兰、补圈、凸缘和管嘴焊接接头;(3)管板与筒体及管子焊接接头。管板与筒体的连接形式由换热器的型式决定。固定管板换热器的管板与筒体的连接,由于多数无人孔,所以有一端或两端需用单面焊接接头;(4)支座与主体的连接接头。

四、其它焊接结构

有机体焊接结构，例如机床的基础件、锻压设备焊接机身等。也有旋转体焊接结构，例如水轮机转子、叶片等。还有重型机械、薄壁结构等。

§ 1 - 3 焊接结构的失效方式

所谓失效是指金属结构失去了工作技能。失效分析是对金属结构失效情况的分析，失效分析推动了安全评定理论的发展。焊接结构是一般金属结构的一部分，一般结构的失效方式在焊接结构中都可能发生。但是，焊接结构根据它自身的特点，其失效方式也有它的特殊性，例如，焊接结构中的缺陷难于避免，那么低应力脆断就是最危险的失效方式，这也是安全评定要重点解决的问题。本节所叙述的焊接结构失效方式，也可作为一般金属结构失效方式的参考。

一、低温脆断

焊接结构易产生低温脆断。低温脆性破坏的事例是很多的。如脆断产生在桥梁、船舶、贮罐、管道及压力容器上等。这种事故的发生往往并无明显征兆，因此造成的损失较大。低温脆断是低应力脆断的主要表现形式。低温脆断的特点是：

(1) 低温脆断破坏的名义应力往往低于设计应力。

(2) 破坏总是从焊接缺陷处或应力集中处开始，破坏时没有或很少有塑性变形。一般说来，脆性断口是平断口，断口的宏观形貌呈人字纹和晶粒状，人字纹的尖端指向裂纹源。

(3) 低温脆断的材料，其韧性均较差，脆性破坏的传播速度极高，一般是声速的1/3左右。

二、疲劳

构件在变载荷下，经过较长时间工作而发生断裂现象称为金属的疲劳。所以焊接结构疲劳必须存在变动的推动力，这推动力的主要来源是应力。其它情况也能促成变动的推动力，例如温

差等。焊接结构的疲劳失效非常重要。有人做过统计,认为金属结构的疲劳断裂可占失效金属结构的50~90%。而对焊接结构来说,这个比例就更大些。对疲劳展开了两方面的研究。

(1) 常规方法 即应用所谓米尼(miner)线性累积损伤法则 $\sum \frac{n_i}{N_i} = 1$,控制指标为持久极限。持久极限用应力循环曲线做出。

持久极限一般由旋转变曲疲劳试验做出,是均质材料指标,对于焊接接头目前尚无这方面的标准方法。本文附录2是研制中的我国国标《焊接接头脉动拉伸疲劳试验方法》,此法可以获得脉动拉伸载荷条件下的持久极限。

(2) 断裂疲劳 是将断裂力学应用于疲劳,它的控制指标为裂纹扩展速率(da/dN)和门槛值。表1-1给出了几种金属疲劳裂纹相对扩展速率。焊接接头疲劳裂纹扩展就更复杂些。

表 1 - 1 疲劳裂纹的相对扩展速率^[3]

金 属	疲劳裂纹相对扩展速率	金 属	疲劳裂纹相对扩展速率
低碳钢	1	铝	15
低合金钢	1	5%铝镁合金	50
紫 铜	4	锌铝合金	150
钛	10		

从裂纹体的受力程度和循环次数角度,可分高周疲劳和低周疲劳。高周疲劳是在循环次数多,而名义应力较低情况下的疲劳,宏观断口有较大的疲劳区,较小的瞬断区;而低周疲劳是由反复塑性应变造成的疲劳,它又称塑性疲劳或应变疲劳。与高周疲劳相比,低周疲劳的循环应力很高,它接近或超过材料的屈服极限。在每次循环中,材料都产生一定量的塑性应变。在这种情

况下，加载频率不可能很高，断裂循环周次必然很低，一般循环数在 $10^2 \sim 10^5$ 。

三、过度变形

这分两方面讨论。其一为焊接变形，这将在第三章讨论；其二为负载变形。负载所施加的应力超过了弹性极限，就会造成功能上的失效^[3]。

负载作用于部件上有三种可能形式，即静态、动态及冲击。

静态负载可能是逐渐加载的，因此，在任何时候，所有构件基本上均处于平衡状态。当负载缓慢而逐渐加到限定时间内的最大值时，这种短时间的静负载具有明显地升高，但不足以引起疲劳。静负载可交替施加，而且在长期内保持在最大值。那么，材料的蠕变或流动特性，将对最终的使用寿命起着决定性作用。

动态负载下的主要失效方式是疲劳，将在第五、六章中讨论。

冲击负载分为骤加负载和一般冲击负载。骤加负载所增加的应力，大约为缓慢加载时的两倍（冲力 $=Ft$ ）。一般冲击负载是与运动相联系产生的。当一个物体打击另一物体时，因冲击功能转变成应变能而产生高应力。

以上讨论的是负载形式，若从失效方式角度，还可以分为以下诸方面。

（1）接触应力（赫兹Hertz应力） 关于曲面之间弹性接触方面的理论，没有直接涉及因接触表面互相挤压产生塑性变形的实际故障，但赫兹的应力分析却继续广泛而有效地用在重要失效情况的工程分析上。

在压缩接触情况下，应力加于接触的双表面，应力大小和分类的方程式在假定的常压和静态情况，两个轴线平行的弹性圆筒的接触表面是窄的长方形。长方形宽度两端的压力分布情况是半圆形的。压缩应力随深度而降低，但当表层的剪切应力为零时，压缩应力会在表面下一定距离内增加到最大值。

当圆筒在滚动时，除负载力外，又加上扭力，就会使半椭圆

形的压力分布情况变形。在0.33的摩擦系数时，最大压缩应力会增加39%。而最大疲劳应力增加42%。

表面破损限制了接触面的使用寿命和接触面的负载支承能力，其结果列于表1-2。

表1-2 ASTM A-48型30级热处理后的灰口铸铁

滑 动 率(%)		导致失效的周期数(周)
主动的滚动	50	88.711×10^6
从动的滚动	101.2	51.009×10^6
从动的滚动	303.3	29.204×10^6

(2) 压陷作用 凹坑、坑洞、槽和畸变一般都是由过量应力造成的。但这些问题是否造成失效，要具体分析。

(3) 断裂 这是一种在晶粒组织内沿有轮廓分明的结晶平面产生的失效。这种失效是直接由裂纹扩展造成的。

(4) 延展性失效 这是一种基本上起因于材料的过负载，由所谓“微孔凝集”过程产生的破坏。这意味着，在各种非连续性的杂质、沉淀物等及晶粒边界应力作用下金属被拉开。当应力使这种微孔增加时，最后聚合形成一种连续的断裂面。

(5) 静载下的断裂 这是由于简单负载的作用所引起的应力，超过材料的极限强度而造成的断裂。有时这种“断裂”虽然还未发生，但由于应力作用超过屈服点所引起零件的永久变形，结构也就失效了。

(6) 拉力 这种失效产生局部变形呈“缩颈”，而且断裂面是与负载方向成约45°角的分离平面。杆件的两部分被轴线拉力破坏，呈45°斜面。纯拉力断裂部件在两个断裂面间没有出现任何摩擦痕迹。

(7) 压缩 压缩造成的失效一般表现有两种形式：块状压缩和弯曲性压缩。块状压缩出现在短杆大截面上，该截面和拉力