

普通高校“十一五”规划教材


张彦华 主编


焊接力学与结构 完整性原理



北京航空航天大学出版社

策划编辑：白 航

封面设计：



普通高校“十一五”规划教材

焊接力学与结构完整性原理

张彦华 主编

北京航空航天大学出版社

内容简介

本书以焊接力学与结构完整性分析为主要内容。全书共分8章:第1~3章介绍焊接热力过程分析方法;第4章介绍焊接接头及强度;第5~7章分别介绍焊接结构断裂、疲劳和环境损伤等内容;第8章介绍焊接结构完整性分析及评价的基本原理。

本书可作为材料加工工程学科研究生以及材料成型与控制工程专业高年级本科生的教材,也可供有关科学研究人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

焊接力学与结构完整性原理/张彦华主编. —北京:北京航空航天大学出版社,2007.8
ISBN 978-7-81124-012-2

I. 焊… II. 张… III. ①焊接—力学②焊接结构—完整性 IV. TG40

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第038058号

焊接力学与结构完整性原理

张彦华 主编

责任编辑 韩文礼

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路37号(100083) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail: bhpress@263.net

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:19.75 字数:442千字

2007年8月第1版 2007年8月第1次印刷 印数:3000册

ISBN 978-7-81124-012-2 定价:32.00元

前 言

焊接是实现材料精确、可靠、低成本及高效连接的关键技术。焊接结构在航空、航天、交通、能源、化工和建筑等工程装备与结构中得到广泛的应用。研究焊接力学行为与结构完整性工程分析方法,是现代焊接结构设计与制造、使用与维护、安全评定以及新材料与新结构的应用等方面的重要基础。

焊接是一个包括热力耦合、热流耦合及热冶金耦合的复杂过程。焊接热作用贯穿于整个焊接结构的制造过程中,焊接热力过程决定了与结构完整性有关的接头性能。焊接接头的性能不均匀性、焊接应力与变形、接头细节应力集中及焊接缺陷等因素对焊接结构的完整性都有不同程度的影响,焊接结构完整性分析应充分考虑这些因素的影响。因此,焊接力学与结构完整性的相关性体现了焊接结构完整性分析与评价的特点。

焊接结构的完整性是整个结构的全寿命周期管理的重要内容。从结构的设计到制造以及使用和维护等各个阶段都需要考虑结构完整性问题。研究焊接力学行为、焊接结构强度及断裂力学判据和疲劳及耐久性,建立焊接结构合于使用评定方法,是焊接结构完整性分析的关键。

本书以焊接力学与结构完整性技术基础为主要内容,既包括经典的焊接结构学理论,又引入了焊接力学与结构完整性的研究成果。全书共分8章:第1~3章介绍焊接热力过程分析方法;第4章介绍焊接接头及强度;第5~7章分别介绍焊接结构断裂、疲劳和环境损伤等内容;第8章介绍焊接结构完整性分析及评价的基本原理。

本书是作者在近十多年的焊接力学与结构完整性理论教学与学术研究的基础上完成的。编写过程中参考了大量有关的经典著作和最新

研究成果,部分参考文献已列于书末。作者力求使本书能够全面反映焊接力学与结构完整性的基本理论,但由于相关领域知识水平有限,书中疏漏和错误望读者予以指正。

本书可作为材料加工工程学科研究生以及材料成型与控制工程专业高年级本科生的教材,也可供有关科学研究人员和工程技术人员参考。

作 者

2006年10月

目 录

绪 论	1
0.1 焊接结构的应用	1
0.2 焊接结构的性能和特点	2
0.3 焊接力学与结构完整性的研究内容与方法	5
第 1 章 焊接热过程分析基础	8
1.1 焊接热源与热功率	8
1.1.1 焊接热源	8
1.1.2 焊接热源的热功率	9
1.2 焊接传热分析	14
1.2.1 热传导基本概念	14
1.2.2 焊接温度场的解析分析	17
1.2.3 焊接热循环	22
1.3 焊接热源模型	26
1.3.1 焊接热源性质与建模准则	26
1.3.2 表面热源模型	28
1.3.3 体热源模型	30
1.3.4 组合热源	35
第 2 章 焊接应力与变形	37
2.1 热变形与应力	37
2.1.1 热变形与热应力	37
2.1.2 残余应力	41
2.2 焊接应力	44
2.2.1 焊接热应力	44
2.2.2 焊接残余应力	46
2.3 焊接变形	54
2.3.1 纵向与弯曲变形	54
2.3.2 横向收缩变形	58
2.3.3 角变形与扭曲变形	61
2.3.4 压曲变形	65

2.4	高能束焊接强瞬态热力效应	66
2.4.1	高能束焊接中的强瞬态问题	66
2.4.2	强瞬态热力效应的温度方程与应力方程	67
2.4.3	强瞬态热冲击行为	69
第3章	焊接热力过程数值模拟	71
3.1	焊接热力过程概述	71
3.1.1	焊接瞬态热力过程	71
3.1.2	焊接热力过程中的非线性现象	73
3.1.3	焊接热力过程数值模拟的方法及发展	77
3.1.4	焊接热力过程数值模拟的应用	78
3.2	焊接传热数值模拟	80
3.2.1	传热分析有限元分析	80
3.2.2	焊接温度场数值模拟	83
3.3	焊接应力与变形的数值模拟	89
3.3.1	热弹塑性分析	89
3.3.2	有限元方程	92
3.3.3	求解方法	93
第4章	焊接接头及强度	103
4.1	焊接接头	103
4.1.1	焊接接头	103
4.1.2	焊接接头及焊缝的基本形式	105
4.2	焊接接头的工作应力分布	110
4.2.1	电弧焊接头的工作应力分布	110
4.2.2	点焊接头的工作应力分布	116
4.3	焊接接头的强度非匹配	117
4.3.1	焊接接头强度非匹配	117
4.3.2	对接接头强度非匹配力学行为	119
4.4	焊接接头强度计算	121
4.4.1	对接接头的强度计算	121
4.4.2	角焊缝的强度计算	124
4.4.3	点焊接头的强度计算	134
4.4.4	焊缝的许用应力	137
4.5	异种材料连接界面力学	137
4.5.1	异种材料连接的界面强度	137

4.5.2	界面端部的应力奇异性	138
第5章	焊接结构的断裂与断裂力学	142
5.1	金属材料脆性断裂与延性断裂	142
5.1.1	脆性断裂	142
5.1.2	延性断裂	144
5.1.3	韧性-脆性转变	144
5.2	断裂力学基础	145
5.2.1	含裂纹构件的断裂行为	145
5.2.2	线弹性断裂力学	147
5.2.3	弹塑性断裂力学	154
5.2.4	剩余强度	158
5.3	动态裂纹扩展与止裂	160
5.3.1	动态裂纹扩展	160
5.3.2	裂纹止裂的基本原理	161
5.3.3	天然气管道止裂控制的工程模型	162
5.4	焊接接头的断裂力学分析	164
5.4.1	含裂纹焊接接头的断裂模式	164
5.4.2	失配性对焊缝裂纹驱动力的影响	165
5.5	异种材料连接界面断裂力学分析	167
5.5.1	界面裂纹尖端应力场的奇异性	167
5.5.2	界面断裂行为	168
5.6	焊接结构的断裂控制	169
5.6.1	影响焊接结构脆断的主要因素	169
5.6.2	焊接结构的断裂控制	171
5.6.3	焊接结构抗断裂性能的试验评定方法	174
第6章	焊接结构的疲劳强度	191
6.1	材料的疲劳强度	191
6.1.1	疲劳断裂机理	191
6.1.2	材料的疲劳性能	194
6.2	焊接接头的疲劳及影响因素	206
6.2.1	焊接接头的疲劳	206
6.2.2	影响焊接接头疲劳断裂的主要因素	208
6.2.3	力学失配对疲劳裂纹扩展的影响	214
6.3	焊接接头的疲劳强度分析方法	218

6.3.1	焊接接头疲劳强度分析方法	218
6.3.2	焊接接头的疲劳强度分级	222
6.4	焊接接头应力集中区疲劳裂纹断裂力学分析	229
6.4.1	焊趾表面裂纹应力强度因子	229
6.4.2	焊缝根部裂纹应力强度因子	231
6.4.3	疲劳裂纹扩展参数	232
第7章	焊接结构的环境损伤	235
7.1	应力腐蚀开裂和腐蚀疲劳	235
7.1.1	应力腐蚀开裂	235
7.1.2	腐蚀疲劳	241
7.2	高温损伤	243
7.2.1	材料的高温损伤特点	243
7.2.2	金属蠕变的宏观规律	245
7.2.3	焊接接头的蠕变强度	251
7.3	氢脆与辐射损伤	253
7.3.1	氢脆	253
7.3.2	辐照损伤	261
第8章	焊接结构完整性分析与评定方法	266
8.1	焊接结构完整性基本概念	266
8.1.1	结构可靠性、安全性与完整性	266
8.1.2	结构的工程风险	267
8.1.3	结构完整性管理	268
8.1.4	焊接结构的完整性与合于使用性	270
8.2	焊接结构的合于使用评定方法	272
8.2.1	焊接结构合于使用评定方法概述	272
8.2.2	焊接结构合于使用评定的基本参量	274
8.2.3	焊接结构的合于使用评定规范	278
8.2.4	含缺陷焊接结构失效评定程序	281
8.3	焊接结构的瞬时断裂评定	282
8.3.1	强度非匹配焊接接头断裂分析的工程模型	282
8.3.2	失效评定曲线	289
8.4	焊接结构的疲劳完整性	293
8.4.1	焊接接头的疲劳完整性设计	293
8.4.2	含缺陷焊接接头的疲劳完整性评定	297

8.4.3 焊接结构件或模拟件的疲劳试验	298
8.5 焊接结构完整性的概率分析	299
8.5.1 含缺陷焊接结构的概率断裂力学分析	299
8.5.2 焊接缺陷的分布	300
8.5.3 临界裂纹尺寸的分布	301
8.5.4 基于 R6 曲线的概率安全评定	302
8.5.5 疲劳裂纹扩展的概率分析	302
参考文献	304

绪 论

焊接是实现材料精确、可靠、低成本和高效连接的关键技术,是产品设计与工艺创新的手段。焊接结构完整性与焊接热力过程密切相关。研究焊接力学行为,发展焊接结构完整性工程分析方法,是现代焊接结构设计与制造、使用与维护、安全评定以及新材料与新结构的应用等方面的重要基础。

0.1 焊接结构的应用

焊接结构在航空、航天、交通、能源、化工及建筑等工程装备与结构中得到广泛的应用。现代飞机结构正在不断扩大焊接结构的应用范围。钛合金构件的氩弧焊、电子束与激光焊及等离子弧焊等先进工艺具有减轻质量、提高结构的整体性等优势。新型战斗机的承力框、带筋壁板采用焊接结构可降低加工制造成本。高性能发动机制造大力发展摩擦焊、扩散焊和电子束焊接技术,积极采用整体结构以减少零件数量并减轻结构质量,提高航空发动机的推重比。如美国海军、普惠公司、罗·罗公司、GEAE 均在研究开发用线性摩擦焊制造整体叶盘,风扇叶片则采用了超塑成形-扩散连接方法制造,从而大大减轻了轮盘的质量。

航天器的发展要求不断采用新材料、新结构和先进的制造技术。焊接是运载火箭与导弹、卫星、航天飞机以及空间站等航天结构的主要制造工艺。如长征三号运载火箭推进剂贮箱的焊缝总长近 600 m,螺旋管式喷管焊缝总长约 820 m。马丁公司和马歇尔飞行中心研究用 VPPA(变极性等离子弧焊)焊接厚度 3~26 mm、焊缝长 900 m 的 2195 铝锂合金外贮箱,比起用 GTA(气体保护钨极电弧焊)焊接质量提高,成本降低。近年来,搅拌摩擦焊受到航天工业的关注。英国焊接研究所(TWI)应用搅拌摩擦焊为波音公司制造了铝合金航天飞机燃料贮箱。洛克希德-马丁公司、波音-麦道公司、罗克韦尔集团和爱迪生焊接研究所等多家航空航天公司和研究机构开展了搅拌摩擦焊的研究与应用评估、开发计划。麦道公司的金属与先进连接技术部已进行了数年的将搅拌摩擦焊用于焊接各种铝合金的研究工作,并已于 1996 年将该工艺用于制造德耳塔火箭推进剂的贮箱。

在现代造船技术中,焊接是一项很关键的工艺,它不仅对船舶的建造质量有很大的影响,而且对提高生产率、降低成本和缩短造船周期起着很大的作用。焊接工时在整个船体建造周期中约占 30%~40%。船体结构由板材和型材利用焊接方法连接而成。由于焊接是对船体结构的局部加热过程,加热范围小,温度梯度大,致使结构产生复杂的热应力和变形,冷却后就会出现残余应力和变形。热应力和残余应力容易导致构件在焊接过程中或焊后出现开裂;而

变形使构件的后续装配工作发生困难,同时也影响外表的美观,降低连接构件的承载能力。因此,焊接应力与变形直接影响到船舶结构的连接质量和使用安全,又影响到船体建造工作的顺利进行,必须予以重视。

随着石油天然气工业的发展,长距离、大口径和高压力管道已成为石油天然气输送的重要手段,X56~X70系列高强管线用钢已广泛用于管道建设中,X80、X100钢级管线也处于开发应用阶段。在焊接工艺方面,1970~1990年管线的焊接主要以下向纤维素焊条手工焊和半自动CO₂焊为主,由于这些方法为手工操作,效率低,且焊接质量也受到了人工技能水平的制约。近年来,药芯焊丝的自保护半自动焊、表面张力过渡(STT)型CO₂气体保焊、管道全位置自动焊以及闪光焊、激光焊等得到发展和应用,大大提高了焊接效率和质量。2004年完成的从我国新疆轮南至上海的西气东输管道全长约4 000 km,采用X70钢,直径为1 016 mm,管子对接焊缝35万条,对接焊缝总长约1 100 km。管道焊接质量是长输管道系统安全运行的关键之一,管道焊接过程中不可避免地存在各种各样的焊接缺陷、焊接残余应力、焊接区材料组织性能劣化、外力损伤及接头细节引起的应力应变集中,加之管道输送压力和所用钢级的提高及其运行条件的变化,因此,防止焊接接头的断裂破坏,确保长输管道系统的安全可靠具有重要意义。

为了开采海上油气资源,需要建造海上平台。海上平台是大型焊接结构,工作环境恶劣,对安全性有极高的要求。海上平台应用的日益增多要求先进的焊接技术来焊接这些应用于极端环境中的焊接结构。焊缝的质量和性能是此类工程结构的关键。海上油气的开采,特别需要发展海上平台焊接结构完整性评估技术以及安全标准,降低维修要求并提高焊接结构的成本效益。

核电设备中要求最高的是核反应堆压力容器。核反应堆压力容器一般由高强度低合金钢锻件焊接而成,锻件厚度通常在200 mm以上,长期在高温高压下工作,并承受中子和 γ 射线辐照。核反应堆压力容器内表面均堆焊超低碳不锈钢,压力壳顶盖组合件和筒体的环缝均采用自动埋弧焊。由于壳壁较厚,多层焊时产生的残余应力大,需经多次消除应力热处理。因此,要求核反应堆压力容器用高强度低合金钢必须具有良好的焊接性,以避免裂纹的产生,并保证焊缝和热影响区有较好的塑性和低温冲击韧度。对辐照区的焊缝,则要求具有足够的塑性、韧性储备,以确保核反应堆压力容器长期安全、可靠地运行。

0.2 焊接结构的性能和特点

1. 焊接结构的性能

焊接结构要满足特定的使用要求,是材料选择和焊接工艺制定的重要依据,焊接结构制造工程技术人员必须了解焊接结构的基本性能要求。

(1) 结构效能

效能是在规定的条件下结构达到规定使用目标的能力,即结构完成任务的能力。结构效能就是指结构系统分配给各个构件部分所应具有的能力。

结构效能是结构的作用与其固有性能的综合体现。在结构选材和成型工艺制定时要进行效能分析,以优化制造过程。

(2) 寿命周期费用

寿命周期费用是在预期的焊接结构寿命周期内,结构的论证、研制、生产、使用保障及退役所付出的一切费用之和。

焊接结构效能不仅取决于它的性能,而且有赖于它的可靠性、维修性、保障性和安全性等因素,这些因素同时决定了结构的寿命周期费用。材料和焊接工艺对结构寿命周期费用的影响往往被忽视,在现代焊接结构制造中必须予以重视。

(3) 结构的可靠性与维修性

结构的可靠性是结构在规定的条件下和规定的时间内,完成规定功能的能力。可靠性是要求结构在长期反复使用过程中不出或少出故障,处于可用的时间长。对于材料和焊接件的可靠性而言,最重要的是掌握材料和焊接件性能的可靠性数据及其影响因素,应用统计学方法分析这些数据的分布规律,按照结构的可靠性要求对材料和焊接结构的质量与寿命进行评估。

结构的维修性是结构在规定的条件下和规定的时间内,按规定的程序和方法进行维修时,保持或恢复到规定状态的能力。维修性是研究结构是否容易维修的问题,目的是缩短结构的非可用时间。

(4) 焊接结构的危险与结构完整性

焊接结构在制造和使用过程中都带有一定的危险。危险由两部分组成:一是危险事件出现的概率;二是一旦危险出现,其后果严重程度和损失的大小。危险是可能产生潜在损失的征兆,是风险的前提,没有危险就无所谓风险。危险是客观存在,是无法改变的,而风险却在很大程度上随着人们的意志而改变,亦即按照人们的意志可以改变危险出现或事故发生的概率,以及一旦出现危险由于改进防范措施从而改变损失的程度。

在焊接结构制造和使用过程中,应对风险有足够的认识。工程技术人员要掌握风险分析与控制的方法,提高应对风险的能力。焊接结构的危险性与结构的完整性密切相关,保证结构的完整性是降低技术风险的关键。材料及焊接质量是结构完整性的基础,因此,必须从防范风险的角度来重视材料及焊接技术。

2. 焊接结构的优点

① 与铆接接头相比,焊接接头的承载能力强。例如,一般优质焊接接头可以与母材等强度,而铆接接头由于构造上的原因,很难与母材等强度。

② 焊接结构的水密性和气密性好。铆接结构在使用中难以保证可靠的水密性和气密性,而焊接结构是理想的具有水密性和气密性要求的结构,广泛用于压力容器、船舶和储罐等

结构。

③ 节省材料,减轻结构质量。焊接结构不需要铆接结构中的铆钉和盖板,可减少材料消耗和零件数量,有利于实现结构的轻量化和整体化。

④ 焊接结构的厚度不受限制。铆接结构板厚大于 50 mm 时,铆接很难进行;而焊接结构在厚度上基本没有限制,重型和超重型结构的大厚件连接时,只能采用焊接。

⑤ 焊接结构设计简单,生产效率高。焊接结构设计中一般选用简单的对接和角焊缝连接,选用合适的焊接方法就可以制造出各种结构,生产效率高,制造周期短,成本低,经济效益好。

3. 焊接结构存在的问题

(1) 焊接应力与变形

由于焊接过程是局部加热,不可避免地产生内应力和变形。若加热时产生较大拉伸应力,会导致焊接裂纹或开裂。焊后的残余应力对结构的强度、刚度、稳定性以及尺寸精度都有较大的影响。

(2) 焊接接头性能的不均匀性

焊接接头是一个组织性能不均匀体。焊缝、热影响区和母材之间的强度和韧性存在不同程度的非匹配性,这种非匹配性对整个结构的强度和断裂行为产生显著的影响,是焊接结构“合于使用”评定中需要考虑的重要因素。

(3) 应力集中

焊接结构的应力集中包括接头区焊趾、焊根及焊接缺陷引起的应力集中和结构截面突变造成的结构应力集中。若在结构截面突变处有焊接接头,则其应力集中更为严重。应力集中对结构的脆性断裂和疲劳强度有很大的影响,应采取合理的结构设计和工艺,控制焊接结构的应力集中。

(4) 整体性

整体性使焊接结构具有良好的水密性和气密性,但同时也带来了问题。整体性使结构的刚性增大,增大了对应力集中的敏感性。由于整体性强,一旦有裂纹产生并扩展,裂纹就难以被止住。而在铆接结构中,如果有裂纹产生并扩展时,裂纹扩展到板材边缘和铆钉孔处便终止,铆接接头起到限制裂纹继续扩展的作用。

(5) 焊接缺陷

焊接过程的快速加热和冷却使得局部材料在极不平衡的条件下发生熔化、凝固及固态相变,在焊接区常常会产生裂纹、气孔、未焊透和夹渣等焊接缺陷。焊接缺陷往往是结构破坏的根源,因此,在焊接生产中对焊接缺陷进行检测和判别是保证焊接质量的重要手段。在焊接结构使用过程中,监测缺陷行为并进行评价,对于保证焊接结构的完整性具有重要意义。

0.3 焊接力学与结构完整性的研究内容与方法

1. 研究内容

(1) 焊接热力效应

焊接通常是在材料连接区(焊接区)处于局部塑性或熔化状态下进行的,为使材料达到形成焊接的条件,需要高度集中的热输入。因此,在材料的焊接过程中要利用焊接热源对焊接区进行加热,使其熔化(熔化焊)或进入塑性状态(固相焊接),随后在冷却过程中形成焊缝和焊接接头。这种加热和冷却贯穿于材料焊接过程的始终,称为焊接热过程。

焊接热过程具有集中瞬时的特点,对材料的显微组织状态有很大影响,也使构件产生焊接应力变形。这种热作用称为焊接热效应。

焊接过程中,对焊件进行不均匀的加热和冷却,焊件内部将产生不协调应变,从而引起焊接应力与变形。焊接加热时,焊接区受到周围母材的约束作用无法自由热膨胀,只能随焊件同步变形,因此焊接区因膨胀受阻而产生压应力,当压应力超过材料屈服极限后发生不可逆的压缩塑性变形。冷却过程中,焊接区在约束下收缩,最终在构件内部形成残余应力,同时伴随有焊接变形的产生。

(2) 焊接结构行为

焊接接头是由焊缝、熔合区、热影响区(HAZ)和母材组成的不均匀体,焊接接头的整体强度与母材金属和焊缝金属之间的力学组配有关。焊接接头性能不仅与焊缝金属和母材金属的屈服强度和抗拉强度有关,而且与母材金属和焊缝金属的应变硬化性能有关。焊接接头强度是焊接结构承受外载作用的基本保证。焊接接头强度与接头几何形状及焊缝与母材的强度匹配有关。焊缝与母材强度匹配对焊接接头强度有重要影响,是焊接接头强度设计必须考虑的主要因素之一。

在焊接结构件中由于焊接接头处几何上的不连续性以及焊接过程的复杂性容易在焊接接头处产生缺陷(如未焊透、未熔化、夹渣和气孔等),当焊接结构件承受外载荷作用时,接头缺陷处将会产生应力集中,从而形成断裂源。焊接结构破坏大部分都是由于焊接缺陷存在引起的。

影响焊接接头性能的因素主要有力学和材质两方面。力学方面的影响包括焊接缺陷、接头形状的不连续性、残余应力和焊接变形等。材质方面的影响包括焊接热循环引起的组织变化、热塑性应变循环产生的材质变化、焊后热处理和矫正变形引起的材质变化等。

(3) 焊接结构完整性问题

焊接结构的完整性就是要保证焊接结构在承受外载和环境作用下的整体性要求。焊接结构的整体性要求包括接头的强度、结构的刚度与稳定性、抗断裂性及耐久性等。焊接接头的性能不均匀性、焊接应力与变形、接头细节应力集中及焊接缺陷等因素对焊接结构的完整性都有不同程度的影响,焊接结构完整性分析应充分考虑这些因素的影响。

焊接结构的完整性是整个结构的全寿命周期管理的重要内容。从结构的设计到制造以及使用和维护等各个阶段都需要考虑结构完整性问题。研究焊接力学行为、焊接结构断裂力学判据、损伤容限准则及耐久性,建立焊接结构合于使用评定方法,是焊接结构完整性分析的关键。

2. 研究方法

(1) 解析方法

应用解析方法研究焊接传热及应力和变形问题始于 20 世纪 30 年代。解析方法需对焊接热过程作出与实际情况偏差较大的假设,仅适合于焊件几何形状简单的场合,一般限于简单构件的焊接传热分析及变形预测。

焊接是一个包括热力耦合、热流耦合以及热冶金耦合的复杂过程。焊接热作用贯穿于整个焊接结构的制造过程中,焊接热过程直接决定了接头的显微组织、焊接应力与变形。解析方法是建立焊接工艺模型的主要手段,也是现代数值模拟方法和工程分析的重要基础。现代焊接过程解析分析以连续系统力学理论为基础,通过能量、质量和动量守恒方程建立热平衡方程与力平衡方程求解;但是应用连续统力学直接求解焊接热力问题是非常困难的。

在焊接结构强度与断裂分析方面,采用固体力学理论直接求解焊接接头不均匀性问题也是很困难的,多数情况下要进行简化处理或借助于实验进行分析,而详尽的应力应变分析要采用数值方法进行求解。

(2) 数值模拟方法

随着计算机技术的发展,数值模拟方法越来越受关注并得到迅速发展,已成为焊接过程和结构研究的重要手段,是继采用实验和理论方法解决工程问题的第三个重要研究方法。数值模拟可以得到比实验和理论分析更为全面、深入、容易理解以及实验和理论分析很难获得的结果,其目的是在产品设计阶段,借助建模与仿真技术及时地模拟预测、评价结构性能与可制造性,从而有效缩短产品的研制周期,降低成本,提高质量和生产效率。

多年来,热弹塑性有限元理论和固有应变理论发展成为焊接残余应力分析和焊接变形数值模拟分析的两种主要方法。热弹塑性有限元法是研究焊接应力和焊接变形的最根本的分析方法,能够综合考虑焊接过程的复杂非线性问题,由于热弹塑性分析跟踪了整个焊接热力过程,因此它能够较为准确地预测焊接结构中的应力和变形。尽管如此,热弹塑性分析仍然具有一定的局限性,一方面是因为材料的高温热物理参数和力学参数缺乏;另一方面,由于热弹塑性分析需要较长的计算时间和较大的存储空间,应用受到一定限制,一般只能用于较小的焊接结构,而对于工程实际的大型复杂焊接结构的焊接变形预测往往无能为力。固有应变理论是为适应大型焊接结构变形分析的需要而发展起来的,它不考虑热力耦合关系,主要研究非协调固有应变的形成机理、分布规律及影响因素,是一种研究复杂结构变形的静态纯弹性分析方法。此外,人们还采用收缩体积模型预测焊接角变形,采用特征值屈曲分析方法预测薄板结构的屈曲变形。