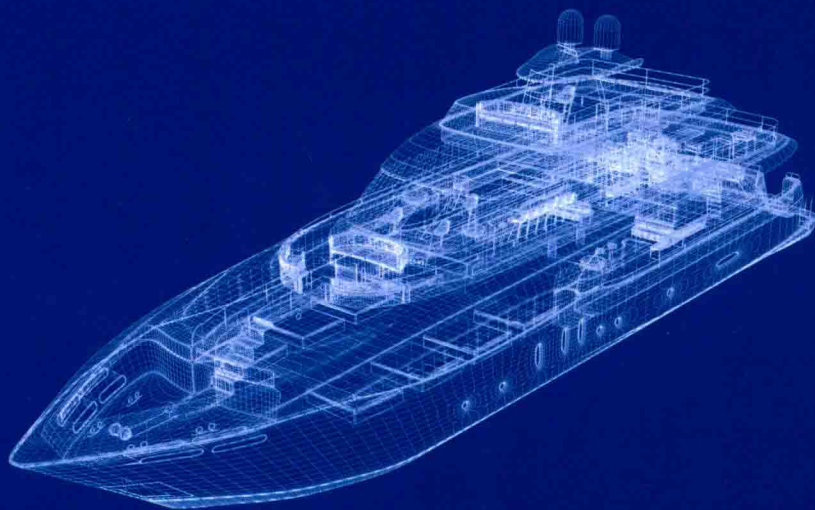


“十二五”国家重点图书
船舶与海洋出版工程

船舶结构疲劳强度与 焊接残余应力

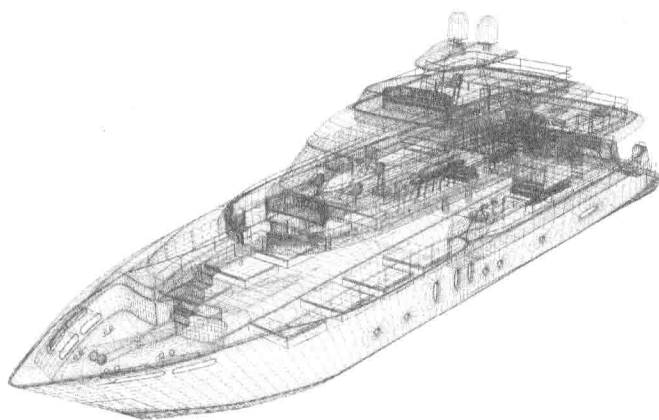
李良碧 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

船舶结构疲劳强度与 焊接残余应力

李良碧 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书主要介绍船舶结构疲劳强度与焊接残余应力及之间的关系以及相关分析方法,并辅以实例计算说明。主要内容包括绪论,船舶结构疲劳强度研究方法,焊接结构残余应力形成、调整及测量,船舶焊接结构残余应力分析方法,高强度钢耐压焊接结构残余应力的参数分析和船舶残余应力释放及对疲劳失效影响。

本书可作为高等院校船舶与海洋工程本科专业教材和研究生的教学参考书,也可供船舶设计开发部门、船厂和相关研究单位从事船舶工程结构的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

船舶结构疲劳强度与焊接残余应力 / 李良碧编著

—上海:上海交通大学出版社,2014

ISBN 978-7-313-12687-0

I. ①船… II. ①李… III. ①船舶结构-疲劳强度②
船舶结构-焊接结构-残余应力 IV. ①U661.43
② U671.83

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 037728 号

船舶结构疲劳强度与焊接残余应力

编 著:李良碧

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

出 版 人:韩建民

印 制:凤凰数码印务有限公司

开 本:787 mm×960 mm 1/16

字 数:180千字

版 次:2014年12月第1版

书 号:ISBN 978-7-313-12687-0/U

定 价:68.00元

地 址:上海市番禺路951号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:11.25

印 次:2014年12月第1次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:025-83657309

前 言

目前在船舶结构制造上使用高强度钢的几率在不断增加,高强度钢在屈服强度提高的同时,其塑性特征和韧性指标均相对下降,因此其疲劳特性也越来越受到关注。船舶是大型焊接结构,高强度钢对焊接残余应力的敏感程度增加,因此如何分析焊接残余应力对船舶结构的疲劳影响也越来越重要。船舶结构在服役期间会遭受到波浪及上浮下潜等疲劳载荷作用,焊接残余应力是否会释放,其释放程度对结构的疲劳强度是否会有影响也是一个非常值得关注的问题。在进行理论分析的同时也需要进行试验研究。残余应力属于结构内应力,其测试方法和技术还有待完善和提高。目前可分为有损检测方法和无损检测方法两大类,无损检测后的结构可后续进行疲劳强度等力学特性试验分析。因此,如何定量且相对合理地分析焊接残余应力及释放对结构疲劳强度的影响也是目前亟须解决的问题之一。

本书的编写,结合了多年船舶疲劳强度和焊接残余应力的研究经验,同时也参阅了大量中外文献和科研成果。本书的研究内容得到中国船舶科学研究中心万正权研究员、卞如冈高级工程师的指导和江苏科技大学严铿教授、罗广恩副教授和刘川副教授的帮助及国家自然科学基金委青年科学基金项目(51109100)的资助。研究生李树胜、潘广善、张小飞、朱德钦、蒋文进和张沛心等协助整理书稿和校验算例等。作者谨向支持本书出版的所有单位和个人表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限,书中错误和不当之处在所难免,恳请读者提出宝贵的意见。

李良碧

2014年11月于江苏科技大学

目 录

1 绪 论	1
1.1 概 述	1
1.2 国内外研究现状	1
1.2.1 残余应力对焊接结构力学性能的影响	1
1.2.2 水下耐压结构焊接残余应力及对疲劳强度的影响	6
1.2.3 FPSO 结构焊接残余应力及对疲劳失效的影响	9
1.3 本章小结	15
2 船舶结构疲劳强度研究方法	16
2.1 引 言	16
2.2 S-N 曲线方法	16
2.2.1 S-N 曲线	16
2.2.2 疲劳累积损伤理论	17
2.3 断裂力学法	18
2.3.1 概 论	18
2.3.2 Paris 公式	18
2.3.3 Paris 参数 C 和 m 的确定	19
2.3.4 循环次数与裂纹扩展深度的关系	19
2.3.5 形状系数的确定	19
2.4 基于 S-N 曲线的船舶焊接结构疲劳强度分析方法	19
2.5 基于 JTP 规范的疲劳累积损伤分析方法	21

2.6	基于断裂力学方法的船舶结构疲劳失效分析	23
2.7	船舶焊接结构疲劳强度分析实例	24
2.7.1	FPSO 主尺度	24
2.7.2	FPSO 舱段模型	24
2.7.3	建立有限元模型	25
2.7.4	边界条件	25
2.7.5	计算工况及计算载荷	25
2.7.6	典型节点的选取	26
2.7.7	精细网格有限元模型	28
2.7.8	疲劳热点应力计算	29
2.7.9	S-N 曲线的选取	30
2.7.10	疲劳累积损伤及寿命分析	31
2.8	本章小结	31
3	焊接结构残余应力形成、调整及测量	32
3.1	焊接残余应力的形成及影响因素	32
3.1.1	残余应力的定义与分类	32
3.1.2	焊接残余应力的产生及其影响因素	32
3.2	残余应力消除工艺技术	34
3.3	残余应力的试验测试方法和实例	36
3.3.1	残余应力测量方法介绍	36
3.3.2	基于 X 射线无损检测法及实例介绍	36
3.3.3	超声冲击消除高强度钢平板结构焊接残余应力试验研究	48
3.4	本章小结	53
4	船舶焊接结构残余应力分析方法	54
4.1	焊接热力学过程的分析方法	54
4.1.1	解析法	54
4.1.2	固有应变法	54
4.1.3	有限元法	55
4.2	焊接残余应力和变形数值预报方法及其理论基础	55

4.2.1	焊接热力学过程及其特点	55
4.2.2	焊接温度场数值仿真	57
4.2.3	焊接应力应变场数值仿真	62
4.2.4	基于 ANSYS/APDL 二次开发技术的焊接热力学分析	65
4.3	基于 ANSYS 二次开发技术的焊接数值模拟实例	74
4.3.1	高强度钢平板对接焊	74
4.3.2	高强度钢耐压锥柱结合壳焊接残余应力分析	81
4.3.3	环肋圆柱壳结构的焊接残余应力和变形	88
4.3.4	深海耐压壳开孔结构	92
4.3.5	高强度钢锥柱结构试件	95
4.3.6	FPSO 典型焊接接头模型	101
4.4	本章小结	105
5	高强度钢耐压结构焊接残余应力的参数分析	106
5.1	焊接残余应力预报系统应用软件开发	106
5.2	高强度钢平板对焊接残余应力的参数分析	106
5.2.1	焊接输入能量对焊接熔池最高温度的影响	106
5.2.2	热源输入	109
5.2.3	边界条件	110
5.2.4	板厚	112
5.2.5	板宽	113
5.2.6	焊接加热时间(焊接速度)	113
5.2.7	焊接顺序	114
5.2.8	结果分析	115
5.3	高强度钢锥柱焊接接头残余应力的工艺影响	115
5.3.1	几何模型	115
5.3.2	研究方案	116
5.3.3	温度场模拟结果	116
5.4	高强度钢锥柱结合壳焊接残余应力的参数分析	123
5.4.1	模型的几何参数和有限元模型	123
5.4.2	模型的其他参数	123

5.4.3	不同计算模型对焊接残余应力的影响	123
5.4.4	参数分析	124
5.5	本章小结	131
6	船舶残余应力释放及对疲劳失效的影响	133
6.1	残余应力释放对船舶焊接结构疲劳失效的影响	133
6.1.1	JBP	133
6.1.2	II W	134
6.1.3	改进过的疲劳强度分析公式	134
6.2	残余应力释放对 FPSO 焊接接头疲劳失效影响的实例研究	135
6.2.1	FPSO 焊接接头	135
6.2.2	模 型	136
6.2.3	数值模拟循环载荷下残余应力释放的试验验证	138
6.2.4	循环次数不同的循环载荷对残余应力释放的影响	140
6.2.5	简单变幅循环载荷对残余应力释放的影响	141
6.2.6	变幅循环载荷对残余应力释放的影响	144
6.2.7	残余应力释放对结构疲劳强度影响的讨论	145
6.2.8	结 论	147
6.3	水压试验对深海耐压锥柱结合壳焊接残余应力的影响	147
6.3.1	几何和有限元模型	148
6.3.2	内压试验的水压力选取	148
6.3.3	位移边界条件	148
6.3.4	力的边界条件	148
6.3.5	内压试验对焊接残余应力的影响分析	149
6.4	潜浮对深海耐压锥柱结合壳焊接残余应力的影响	151
6.4.1	首次潜浮运动	152
6.4.2	连续多次潜浮运动	153
6.5	本章小结	159
	参考文献	160

1 绪 论

1.1 概 述

船舶结构一般为大型焊接钢结构。焊接残余应力的存在会直接影响到结构的力学性能,从而导致承载能力的变化。并且在其下水服役过程中还会受到波浪等载荷的交变作用,极易引起结构的疲劳失效。大多数船舶结构的疲劳热点部位是在结构相互连接的焊缝焊趾处。在疲劳载荷作用下,一方面焊缝焊趾处易萌生裂纹;另一方面已存在的裂纹缺陷也可能会在循环载荷的作用下不断增长,从而导致裂纹扩展至临界裂纹尺寸后使结构发生断裂失效。因此,研究船舶焊接结构力学性能,特别是疲劳失效问题具有非常重要的工程应用价值。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 残余应力对焊接结构力学性能的影响

焊接残余应力会对结构的强度、疲劳寿命、抗应力腐蚀和结构稳定性等造成不利的影晌。国内外学者对该方向做了一些研究。

1) 对结构稳定性的影响

当焊接结构承受压应力时,残余应力是否对结构的屈曲和稳定性产生影响是个值得关注的问题。Nyashin^[1]对残余应力影响梁结构的稳定性做了理论研究,认为在某些情况下能降低 1/3 的承载能力;Lars 和 Ryan 等人^[2,3]用有限元与试验相结合的方法,对残余应力影响 HY-80 高强度钢球壳结构的屈曲行为做了研究,Lars 的数值模拟结果显示,考虑了焊接残余应力影响之后的 HY-80

高强度钢球壳的屈曲强度,当半径与厚度比为 100 时 ($R/t = 100$),焊接残余应力的影响较小。Kim^[12]等人用数值模拟方法研究了在焊接残余应力影响下薄壳圆柱的屈曲行为,结论表明残余应力对对称模型的屈曲影响很小。Hübner^[5]等人对残余应力影响焊接筒体结构的稳定性进行了数值分析,认为残余应力的影响较小。Graham^[6]用有限元方法模拟了有残余应力情况下环肋加强圆柱壳结构在静水载荷作用下的失稳行为,认为残余应力与其他影响因素相比较小,在 6% 以内。

2) 对结构静载强度的影响

Degtyarev^[7]对有无残余应力的焊接接头在一次循环下的极限强度进行了理论分析。Cui 等人^[8]对残余应力影响船板的极限强度做了研究。Therdphithakvanij^[9]研究了考虑残余应力的不锈钢极限强度。总的看来,在一定条件下,残余应力对一些结构的稳定性和极限强度影响比其他因素小。

3) 对结构疲劳强度的影响

在进行疲劳寿命计算时,往往是利用残余应力试验统计分析的初始残余应力结果,这会导致在很大程度上疲劳寿命只能进行保守设计或发生不可预测的失效行为。已有的研究成果大都只是建立在试验基础上所得到的定性结论,疲劳载荷在多大程度上影响残余应力的分布,或者说疲劳载荷参数与残余应力场参数之间存在着什么样的确定关系等问题还犹未可知;如果它们之间存在着定量关系,那么找到这个关系对于正确评估焊接残余应力的影响和疲劳寿命极其重要,这也是目前工程界有待解决的问题之一。

若要了解残余应力对结构疲劳强度的影响,残余应力在交变载荷下的响应研究是必不可少的,它为残余应力对疲劳强度的影响奠定了基础。实际上,残余应力对疲劳的影响是相当复杂的。焊接残余应力与外载荷相叠加,常常会使应力超过材料的屈服强度,一部分与残余应力相关的弹性应变就转化为塑性变形,残余应力在循环载荷作用下发生了释放^[10],即残余应力发生了演变。Yuan 和 Ueda^[11]对焊接残余应力在循环载荷作用下的演变规律进行了研究。Kim 和 Lotsberg^[12]用试验的方法得到了由较大初始外载荷引起焊接结构残余应力的降低和导致结构疲劳强度增加的行为,对于不同的焊接接头,残余应力释放的效果不同,这依赖于残余应力大小等因素的结论。Han 和 Tak 等^[13~17]将一类焊接接头残余应力释放的试验数据归纳成公式,并对疲劳寿命计算公式进行了修

正。Zhang, Huang 和 Moan^[18,19]用数值模拟方法对焊接残余应力释放规律进行了研究,并将残余应力释放对疲劳强度的影响考虑到平均应力中去。Li 和 Moan 等^[20]采用 3D 有限元方法对 Kim 论文^[12]中提到的焊接接头模型在不同循环外载荷作用下的残余应力释放规律进行了数值模拟研究,归纳出残余应力随外载荷和初始残余应力变化的关系公式,并对受残余应力重分布影响的疲劳寿命公式进行了修正,疲劳计算结果与论文中的试验结果相吻合;并得到较大外载荷引起初始残余应力的降低会导致结构疲劳强度明显增加、残余应力释放效果依赖初始残余应力和外载大小等结论^[21~23]。

Lachmann 等人^[24~28]用试验方法研究了残余应力释放对疲劳强度的影响,发现残余应力对其影响较大。Lutes^[29]等人用试验方法研究了受残余应力影响,在随机疲劳载荷下 T 型焊接接头的疲劳强度,并在疲劳寿命预报公式中加以体现。Lu^[30]对环焊缝残余应力影响疲劳失效做了数值模拟和试验研究,并且对棘轮效应做了详细研究。Williams^[31]等人对残余应力影响低合金钢的疲劳行为进行了研究,得出压缩残余应力对疲劳寿命没有明显提高的结论。Rivas^[32]从微观角度分析了残余应力释放对疲劳强度的影响。Xin 等人^[33,34]用有限元方法分析了点焊残余应力释放及对疲劳强度的影响。Holzapfel 等人^[35]研究了在锤击载荷作用下,残余应力释放对准静态循环载荷的疲劳强度问题。Cheng^[36]等人研究了焊后热处理对焊接结构疲劳强度的影响。文献[37~41]讨论了压力容器自增强残余应力松弛的理论和试验研究。顾晓波等人^[42]对用超声冲击处理技术提高耐压结构重要构件的疲劳寿命工艺措施进行了试验研究。

疲劳强度与初始残余应力、外加载荷和残余应力释放之间的关系还不是很清楚,常有一些焊接结构的疲劳试验结果不能得到合理的解释^[12,43],目前国内外许多船级社已投入了不少人力和物力来研究此类问题,因此急需对该问题进行进一步的研究和探讨。

4) 对结构疲劳裂纹扩展的影响

基于断裂力学理论的疲劳裂纹扩展模型已经由最开始 Paris 公式发展至多种形式。稳定扩展阶段中的疲劳裂纹扩展速率 da/dN 对裂纹疲劳寿命的评估来说是非常重要的。在此阶段, da/dN 与应力强度因子幅值 ΔK 在对数坐标系上反映为直线关系。因此,研究疲劳裂纹扩展最关键的步骤是应力强度因子 K

的计算。目前,考虑残余应力影响的疲劳裂纹扩展应力强度因子采用经验公式法和有限元法来进行分析的比较多。经验公式法中使用较多的公式有权函数法和格林函数法等。

在评估已知残余应力场的裂纹扩展时,大都认为残余应力是通过改变平均应力而影响疲劳裂纹扩展的,所以通常使用叠加法,即将未出现裂纹之前的初始残余应力引起的应力强度因子 K_{res} 和外荷载引起的应力强度因子 K_{app} 相叠加,得出总的最大强度因子 $K_{app} + K_{res}$ 与总的最小应力强度因子 $K_{app} - K_{res}$,进而采用传统的裂纹扩展方法估算裂纹扩展寿命,也就是采用所谓的权函数法或格林函数法。国外学者 Al - Mukhtar^[44,45] 用权函数法分析了考虑焊接初始残余应力影响的 T 型厚板焊接接头的疲劳裂纹扩展行为,焊接初始残余应力由中子衍射测量得到,计算结果发现横向残余应力对沿厚度方向扩展的焊接接头影响较大。国内学者黄小平在研究海洋钢结构疲劳裂纹扩展时,引入沿板厚方向初始焊接残余应力解析公式,采用格林函数法计算 K_{res} ^[46]。

以上方法考虑了在结构未出现裂纹之前的初始残余应力场分布。初始残余应力在疲劳裂纹扩展中是否会发生变化,进而影响结构的裂纹扩展行为是非常值得关注的问题。

现有研究表明,基于焊接残余应力影响的结构疲劳裂纹扩展评估是相当复杂的,主要是由于焊接残余应力场在疲劳裂纹扩展过程中发生了重分布^[47,48]。Edwards^[47] 指出焊接疲劳裂纹扩展与试验或实际不相符合,被低估或高估很有可能是在裂纹扩展过程中,残余拉应力的释放减小了残余应力引起的应力强度因子,从而导致应力比的改变,并影响到了裂纹的扩展速率。这表明,残余应力重分布对疲劳裂纹扩展速率具有一定程度的影响,在分析结构疲劳裂纹扩展寿命时考虑残余应力的影响将更符合实际情况。Miyazaki 等人^[49] 采用固有应变法分析了初始残余应力在裂纹扩展中的重分布行为,而后用影响函数法分析了对接焊平板表面裂纹的残余应力强度因子和裂纹扩展疲劳寿命,并与试验进行了对比研究。Terada^[50] 采用由试验获得的平板焊接残余应力重分布公式,用权函数法分析了残余应力强度因子。Sérgio^[51] 用有限元方法计算了考虑残余应力重分布影响的焊接板裂纹的应力强度因子,得到残余应力对结构疲劳寿命降低有很大影响,应该在制造阶段就加以考虑等结论。

残余应力场在裂纹扩展过程中的重分布行为是考虑残余应力场对疲劳寿命

影响的重点和难点。然而,大多数经验公式法计算应力强度因子只能限制在应用简单的几何体。而且,一些经验公式法有着复杂的计算公式,需要求解非常复杂的积分公式。若采用试验方法则成本较高。所以,从另一方面来说,采用有限元方法分析复杂几何体和多工况结构的应力强度因子是一个更普遍、更有效的方法。Sutton^[52]将初始焊接残余应力导入到平板焊接试件的模型中,采用有限元法获得了考虑焊接残余应力重分布的应力强度因子。Servetti 等人^[53]将采用中子衍射测得的焊接初始残余应力导入到焊接紧凑试件的二维有限元结构模型中去,分析了考虑残余应力重分布下的应力强度因子。Barsoum 等人^[54]用二维有限元模型分析了受残余应力重分布影响的 T 型焊接接头有效应力强度因子,结果发现考虑残余应力重分布的计算结果与试验结果相符合。Lee^[55]采用固有应变法分析了 T 型焊接接头的残余应力,然后用有限元法分析残余应力在疲劳裂纹扩展中的行为和变化,进而进行寿命预测和损伤容限尺寸分析。结果表明,考虑了残余应力重分布后的结果更加符合实际。

当裂纹扩展或者外载荷和残余应力之间的相互作用可能引起残余应力释放或松弛时,基于线弹性断裂力学原理对应力强度因子简单叠加的权函数法将不再适用。对断裂力学的研究已由线弹性断裂力学扩展到弹塑性断裂力学领域。Lee^[56]和 Tavares^[57]等人采用三维热力学方法计算了对接焊平板和 T 型焊接板的初始焊接残余应力,并导入到疲劳裂纹扩展模型中去,采用 J 积分法来分析疲劳裂纹扩展寿命。计算结果表明,焊接残余应力严重地影响了疲劳裂纹扩展速率,极大地降低了结构的疲劳寿命;对于具有相同几何尺寸、并受相同外载荷的结构,具有残余应力的结构可以导致疲劳寿命降低 70% 以上,拉伸残余应力和压缩残余应力对裂纹扩展起着不同的作用。Liljedahl^[58~60]等人采用二维有限元法分析了紧凑拉伸试件残余应力释放和重分布现象,发现有较小范围的塑性释放,这表明在焊接残余应力场中采用弹性权函数法或格林函数法是不合适的。Mahmoud^[61]应用有限元法并结合大尺度模型试验分析了焊接残余应力重分布对船舶典型结构疲劳裂纹扩展的影响。

因此,从以上文献可看出,对焊接残余应力及重分布对疲劳裂纹扩展影响是非常复杂的。残余应力场的存在及重分布会使疲劳裂纹扩展呈现出与在非残余应力场中扩展不同的特性^[27]。所以在应用断裂力学方法评估焊接残余应力场中的疲劳裂纹扩展时必须做到对以下几点进行合理评估: ① 初始焊接残余应力

场;② 焊接残余应力对疲劳裂纹扩展的影响;③ 裂纹产生和扩展过程中焊接残余应力重新分布和释放机理^[52]。

国内已有部分学者开始研究焊接残余应力重分布及释放对疲劳裂纹扩展的影响。北京航空航天大学鲍蕊^[62,63]以航空航天领域薄板焊接结构作为研究背景,考虑了裂纹出现后和裂纹扩展中焊接残余应力场的重分布,采用二维有限元和权函数相结合的方法研究了紧凑拉伸 CT 小试件焊接残余应力强度因子及对疲劳裂纹扩展的贡献。

5) 对结构加工精度的影响

残余应力场会在结构的冷热处理等过程中产生。在切削等冷加工的处理过程中,结构内部的残余应力会得到释放,从而使得残余应力重新分布,导致了结构变形。并且结构在受到外力和温度等因素的情况下残余应力也将会发生释放或重分布,这样就极易破坏结构尺寸的稳定性。Wang 等人^[64~66]用有限元软件对铝合金预拉伸板材料去除对加工变形的影响进行了仿真研究,并分析了加工变形的成因,结果表明仿真结果与实验结果一致,残余应力的释放与重分布是薄壁零件变形的主要原因。

6) 对结构腐蚀开裂的影响

应力腐蚀开裂是由于在腐蚀性介质中的结构受到静载作用后,材料在一定时间后易发生开裂而最后导致整个结构破坏的现象。这时残余应力的作用与载荷应力相同,并且残余拉应力使得腐蚀速度加速。Bertini^[67]研究了 C-Mn 钢焊接接头在海水和残余应力共同影响下的疲劳裂纹扩展情况。Kitsunai^[68]等人分析了残余应力和加载频率对焊接接头疲劳腐蚀裂纹扩展的影响。

1.2.2 水下耐压结构焊接残余应力及对疲劳强度的影响

海洋资源开发高技术的不断发展,使得海洋资源可利用的深度也不断加大。我国更是将深海资源开发和利用作为今后国家持续发展的一项重要国策。潜器是海洋资源开发必不可少的工具之一,广泛应用于海洋矿产和生物资源调查,建立海中立体牧场、渔场和海洋空间利用等研究中,力争将来实现人类居于海底的设想。同时,潜器也具有突出的军事应用潜力。耐压壳是潜器最为重要的结构之一,大多为柱形、锥形或球形结构焊接而成,在承受巨大海水压力的同时,必须保障潜器内人员及设备工作环境的安全。潜器下潜深度的增大必然带来耐压壳

体承受海水压力成比例的增加。美国“海狼”核潜艇耐压壳体采用 HY100 和 HY130 等材料,极限下潜深度达到 610 m;法国“凯旋”核潜艇采用 Hells100 新型合金钢做耐压壳体材料,最大下潜深度达到 500 m;“阿尔文”和“新阿尔文”深海载人潜水器采用钛合金耐压球壳,其最大工作深度分别达到 4 500 m 和 6 000 m;“俄罗斯号”深海载人潜水器采用钛合金耐压球壳,其最大工作深度 6 000 m;“深海 6500”深海载人潜水器采用钛合金耐压球壳,最大工作深度达到 6 500 m。中国“蛟龙号”深海载人潜水器采用钛合金耐压球壳,最大工作深度达到 7 000 m。

为保证耐压壳体具有足够的强度和稳定性,在不改变基本结构形式的情况下,必须采用新材料——高强度钢。然而,高强度钢在屈服强度提高的同时,其塑性特性和韧性指标等均相对下降,对焊接残余应力的敏感程度增加,极易导致结构在低应力阶段就过早发生疲劳破坏。所以焊接残余应力是关系到水下耐压结构安全的重要指标^[69]。

深海耐压结构为大型焊接结构,其直径为 5~10 m,材料通常为高强度低合金钢,板厚 20~60 mm,其焊接残余应力同时具有厚板和壳体焊接残余应力的特征,易产生较大的焊接残余应力。深海耐压壳在服役过程中承受不断变化的海水压力,其锥柱结合部位(见图 1-1)是典型的低周疲劳破坏结构。同时该部位存在首尾相接的焊缝,疲劳热点也正位于焊接热影响区,耐压壳轴向残余应力对结构疲劳强度有较大影响。国内侯海量等^[70]对某船厂废弃耐压壳圈环焊缝残余应力采用盲孔法进行了测试,由于内壳应变片损坏,只测得耐压外壳的轴向残余压应力。由于全尺度模型疲劳试验昂贵,国内大都采用缩尺比模型进行疲劳试验。由于残余应力检测设备的限制,疲劳试验前的残余应力分布往往不能及

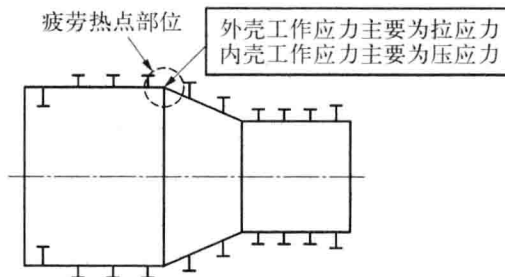


图 1-1 耐压结构典型低周疲劳部位

时、较准确地获得。所以,在进行耐压结构疲劳强度评估时,无论采用 $S-N$ 曲线方法还是 Paris 公式,普遍采用两种方法来处理焊接残余应力的影响:一种方法为略去残余应力的影响;另一种方法为只考虑焊接初始残余应力的影响。由于耐压内壳在服役期间的主要工作应力为压应力,而外壳会承受较大的拉应力,所以通常只对耐压外壳进行疲劳强度评估。但将这些计算结果与疲劳试验结果对比后发现,实际结构的疲劳寿命往往会远低于计算结果。

Dunham^[71] 早期做过水下耐压结构全尺度模型的疲劳试验,试验中发现多个裂纹都始发于内壳表面与过渡环的交接处,而且试验中的疲劳破坏通常在低于估算寿命时就发生,该论文当时未能说明其产生的原因。Lu^[72] 对承受弯曲作用的壳体结构,采用试验和数值方法研究了残余应力对焊接接头疲劳失效的影响;论文指出,传统的 $S-N$ 曲线不总是保守的,实际上残余应力会随着外加载荷的变化而产生不同的响应和疲劳强度,这与用试验方法进行 $S-N$ 曲线研究中的情况可能不一致。通常认为压缩残余应力可降低结构的疲劳破坏,然而,在压缩的循环应力场中,当叠加了残余拉应力后,其对结构的疲劳破坏作用不亚于在循环拉应力场中的情况。McGregor^[73] 用较先进的中子衍射无损测量方法,对经过服役后的高强度钢实尺度耐压壳焊缝附近的残余应力进行测量,结果表明内壳表面仍存在较大的残余拉应力。石德新等人^[74] 根据焊接残余应力的试验结果,对耐压结构材料低周疲劳的损伤进行了分析。侯维廉^[75] 运用弹性迭加原理,根据残余应力的试验值,分析了焊接残余应力场中的应力强度因子幅值及残余应力对此幅值的影响关系,引入了有效应力强度因子幅值 ΔK_{eff} 的概念,并分析了耐压结构凸锥柱结合壳折角焊缝焊趾的裂纹开裂与扩展情况。

作者^[110] 曾对高强度钢耐压结构缩尺比模型进行过残余应力数值模拟和试验研究,结果均表明在耐压内壳表面存在较大的焊接轴向残余拉应力(见图 1-2)。深海耐压结构在服役前一般要进行水压试验,不同试验水压以及服役期间不同深度的下潜、上浮都可能会对焊接初始残余应力产生影响。作者认为虽然耐压内壳表面在服役状态时承受的工作应力是压应力,但由于存在残余拉应力,可能成为诱发耐压内壳表面裂纹、促使结构提早发生疲劳破坏的主要原因。但目前缺少对深海耐压结构残余应力演变规律及疲劳失效影响机理开展系统和深入的研究。

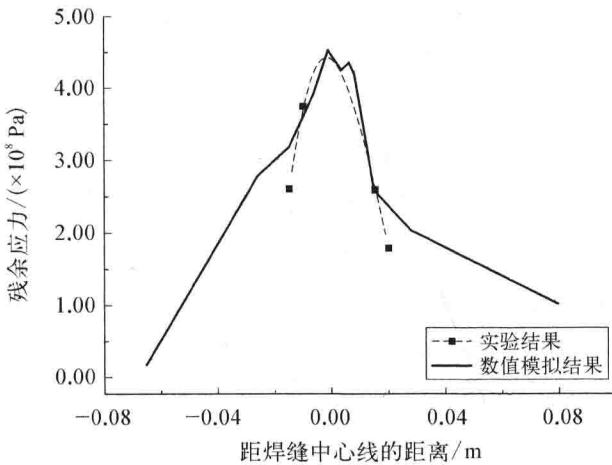


图 1-2 耐压内壳表面轴向焊接残余应力数值模拟和试验测量结果

近年来,焊接残余应力演变对疲劳失效影响的重要性已越来越受到关注。大连理工大学黄一教授等^[76]和武汉理工大学严仁军教授等^[77]对在交变载荷作用下的残余应力变化进行了研究,严仁军教授还对残余应力释放对疲劳的影响作了初步探讨。以上的研究对象均为对接焊平板模型,但由于焊接残余应力及其演变过程是一个涉及热、力、冶金等多学科极为复杂的过程,要对其进行准确预测比较困难。当前的研究成果大都是建立在试验基础上所得到的定性结论,而未能揭示出疲劳寿命、疲劳载荷参数和焊接残余应力参数之间的内在关系,但这个关系对于正确评估焊接结构的疲劳寿命是极其重要的,这也是目前工程界亟待解决的问题之一。

因此,在已有对残余应力释放研究和深海耐压结构疲劳强度研究的工作基础上,对深海耐压结构残余应力随载荷变化的规律进行研究,建立深海耐压结构疲劳寿命与残余应力演变之间的内在联系,给出考虑残余应力演变的深海耐压结构疲劳强度评估方法,揭示深海耐压结构残余应力演变规律及对疲劳失效影响的内在机理是非常必要的。研究成果可为其他高强度钢船舶与海洋结构物的疲劳强度评估提供新的思路。

1.2.3 FPSO 结构焊接残余应力及对疲劳失效的影响

深水油气勘探开发近年来保持着不断增长的强劲趋势。随着水深的不断增