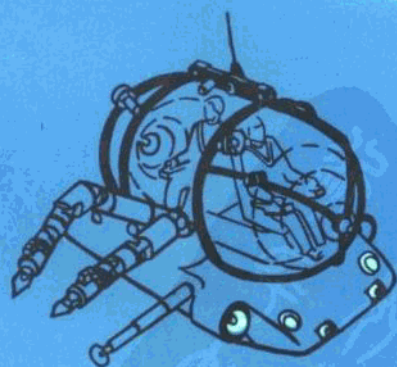


潜 艇 和 潜 水 器 结构的低周疲劳

陈孝渝 编著



国防工业出版社

潜艇和潜水器结构的 低周疲劳

陈孝渝 编著



国防工业出版社

内 容 简 介

本书不同于一般讲述疲劳问题的著作，它紧紧围绕潜艇和潜水器的特殊性来叙述解决这一问题的途径和方法。对水下船舶在结构设计中遇到的低周疲劳问题作了系统、全面的论述。重点放在设计与应用方面。所提出的研究方法和有关结论，原则上也可适用于饱和潜水舱、高压氧舱、水下单人救生装置，甚至化工机械上的卧式再沸器等结构的研究设计。

本书可供水下船舶结构设计师和监造师、海洋工程结构设计研究人员及与此有关的力学工作者和工厂技术人员使用，也可供高等工业院校有关专业的教师、研究生和高年级学生参考。

ER10/28
10

潜艇和潜水器结构的低周疲劳

陈孝愉 编著

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码 100044)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

850×1168 1/32 5印张 125千字

1990年11月第一版 1990年11月北京第一次印刷 印数：001—600 册

ISBN 7-118-00778-1/U·67 定价：5.00元

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分，又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展，加强社会主义物质文明和精神文明建设，培养优秀科技人才，确保国防科技优秀图书的出版，国防科工委于1988年初决定每年拨出专款，设立国防科技图书出版基金，成立评审委员会，扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是

1. 学术水平高，内容有创见，在学科上居领先地位的基础科学理论图书；在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖，内容明确、具体、有突出创见，对国防科技发展具有较大推动作用的专著；密切结合科学技术现代化和国防现代化需要的高科技内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值，密切结合科学技术现代化和国防现代化需要的新技术、新工艺内容的科技图书。

4. 填补目前我国科学技术领域空白的薄弱学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展评审工作，职责是：负责掌握出版基金的使用方向，评审受理的图书选题，决定资助的图书选题和资助金额，以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书，由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就，积累和传播科技知识的使命。在改革

开放的新形势下，国防科工委率先设立出版基金，扶持出版科技图书，这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版，随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物，是对出版工作的一项改革。因而，评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进，这样，才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授，以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来，为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗！

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金

第一届评审委员会组成人员

主任委员：邓佑生

副主任委员：金来德 太史瑞

委 员：（按姓氏笔画排列）

尤子平 朵英贤 刘琯德

何庆芝 何国伟 张汝果

范学虹 金 兰 柯有安

侯 迁 高景德 莫梧生

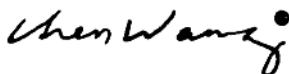
曾 铎

秘 书 长：刘琯德

序

潜艇和潜水器设计中的低周疲劳是一个特殊的问题。虽然在水面船舶设计中也存在类似的问题,但成因是有所区别的。由于现代潜艇和潜水器在使命上要求反复下潜的次数不断上升,以及在世界范围内海上灾难性事故的增加,潜水器压力壳设计中的结构疲劳问题已引起国际上极大的关注。

陈孝渝先生在他于1981~1983年期间作为访问学者应邀在迈阿密大学工作前,便已多年从事潜水器结构设计工作,在美期间,又潜心研究焊接残余应力和低周疲劳问题。此后,他继续在武汉第二船舶研究所致力于该项研究,并发表了多篇研究成果报告。现在,他的关于潜水器设计低周疲劳问题的专门著作得以正式出版。相信本书对潜水器设计师将是一份很有价值的参考资料,并能在这一研究领域引起更广泛的兴趣。



1990年于迈阿密

● 美国迈阿密大学罗森歌尔海洋与大气研究院海洋应用物理系教授(本序由作者译)。

前 言

疲劳问题从本质上来说,是冶金和力学两个学科互相交叉在一起的一门边缘科学,涉及的因素比较复杂。通过造船界十来年的努力,在与潜艇和潜水器结构疲劳作“斗争”方面,无论是在理论还是在试验方法上都取得了不少成果。可是,目前有关这一领域发表的资料较少,专门论述这一研究的专业书籍更是凤毛麟角。作为一种尝试和探索,作者决定在工作之余撰写此书。

本书以下各章将从讲述循环载荷出发,谈及 $\sigma-N$ 曲线的分析,接着介绍焊接对潜艇疲劳所带来的影响,然后谈到载荷谱自动化分析的最新研究成果,并以一定篇幅介绍丙烯酸酯制成的耐压球壳及观察窗的疲劳性能的研究,最后着重论述寿命估算的理论方法和如何通过试验手段对实际的潜艇或潜水器耐压结构的疲劳特性进行研究。当然,就本书所提出的研究方法而论,原则上也可应用到其它类似工程领域,如化工机械中的卧式再沸器,它也有锥柱结合壳的疲劳问题。

笔者力图本书以不太长的篇幅,将这一领域的最新研究成果介绍给读者,重点放在研究方法和应用上。希望它能起到抛砖引玉的作用,能对读者有所启迪,并为今后提高潜艇或潜水器结构的疲劳寿命的研究有所帮助。作为探索,书中难免有缺漏或不足之处,祈请广大读者批评指正,以便不断改进。

作 者

1990年4月于武昌

目 录

绪论	1
第一章 循环载荷	7
§ 1.1 循环加载与迟滞回线	7
§ 1.2 材料的循环特性	10
第二章 疲劳寿命及 $\varepsilon-N$ 曲线的分析	13
§ 2.1 $\varepsilon-N$ 曲线	14
§ 2.2 平均应力对疲劳强度的影响	18
第三章 焊接对疲劳寿命的影响	23
§ 3.1 焊接残余应力的形成机理	24
§ 3.2 水下船舶焊接残余应力的分布规律	26
§ 3.3 焊接残余应力的测量方法	35
§ 3.4 焊接残余应力对潜艇结构的疲劳性能的影响	38
§ 3.5 焊接接头的几何参数对结构的疲劳性能的影响	40
第四章 累积损伤与载荷谱的自动化分析	46
§ 4.1 阶梯加载	46
§ 4.2 曼纳线性累积损伤理论	48
§ 4.3 潜艇或潜水器疲劳载荷谱的特点	54
§ 4.4 潜艇载荷谱的自动化分析	56
第五章 聚甲基丙烯酸甲酯观察窗与耐压球壳的疲劳性能	68
§ 5.1 丙烯酸酯材料的一般特性	69
§ 5.2 丙烯酸酯材料疲劳性能研究的特点和裂纹敏感性	71
§ 5.3 观察窗的疲劳性能	79
§ 5.4 丙烯酸酯球壳的疲劳性能	94
第六章 寿命估算的理论方法	99
§ 6.1 安全寿命校核—— $\varepsilon-N$ 曲线估算法	104

§ 6.2	破损安全校核——断裂力学估算法	109
§ 6.3	寿命估算实例	112
§ 6.4	提高潜艇疲劳寿命的方法	115
第七章	实验研究技术	117
§ 7.1	冶金-力学模拟准则	117
§ 7.2	焊缝缺陷超声波探伤漏检概率试验	124
§ 7.3	人工预制裂纹技术的研究	129
§ 7.4	表面裂纹测深技术的研究	131
§ 7.5	喷砂盲孔法残余应力测量技术的研究	136
§ 7.6	大型钢模疲劳试验技术	140
参考文献		148

绪 论

潜艇的作用在军事方面是显而易见的，而且目前已开始大量应用到海洋开发之中。这种民用潜艇，由于其排水量较小，乘员较少，一般称之为潜水器。

无论是潜艇还是潜水器，它们都有一个共同的特点，即能在海洋中上浮和下潜。由于训练或作战任务的需要，潜艇必须以上浮和下潜作为手段来回避敌人和提高隐蔽性；潜水器则由于所执行的各种科学研究任务的需要而必须频繁地上浮和下潜。东京大学的佐佐木教授曾统计过一个资料^[1]，耐压壳直径为2.05m、工作下潜深度为300m的“读卖”号潜水器，在1964年7月建成后的五年半中，在日本和澳大利亚海岸一共下潜了435次，平均每年下潜80次左右，其中达到250~300m的深潜次数占总下潜次数的23%。潜水器累计总时间达1324h 57min。完成的任务主要有：海底地震研究、日澳海底联合研究计划的实施等。图0-1形象地记录了它的下潜历史。可以看出潜水器上浮下潜的频率之高。

美国的“阿尔文”号潜水器据报导也有较高的上浮下潜的频率^[2]。如1974年下潜次数已高达60次，1975年达58次，对于拥有潜水器数量较少的国家，其使用效率可能比美国、日本的还要高。另外，某些早期的潜水器，如“屈斯特(TRIESTE)”号已使用了二三十年，而且还在继续使用。这是由于它们当初的建造成本，从通货膨胀的今天的眼光来看是极低的，故继续使用它们就会收到较高的经济效益。可以预料，在一定范围内某些国家的经济衰退，将会要求延长现存的和将来的潜水器的使用寿命，这样上浮下潜的累计循环数还会大大增加。

当然，关于各国军用潜艇的上浮下潜档案记录，由于保密上的原因，很少公开发表。但有一点可以肯定，即军用潜艇为了执

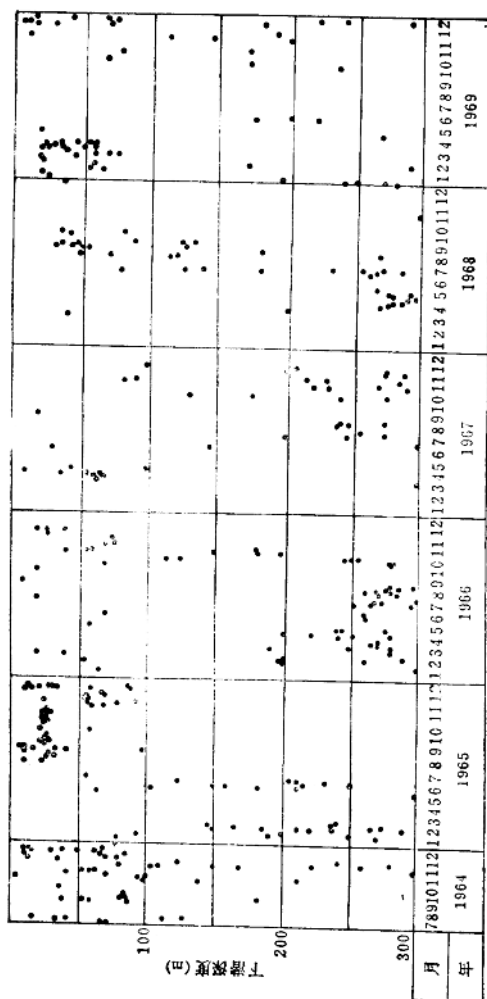


图0-1 “读卖”号的下落历史

行战术战略上的各项任务, 加上战略核潜艇造价太高, 各国不可能象中小型水面舰船那样大批建造, 所以, 已服役的潜艇在航率近年来有大幅度的提高。这样, 军用潜艇上浮下潜的频率也是相当可观的。在战争时期, 频率还会进一步提高, 当然这种频率的高低与各国的训练战术、艇的类别、操艇人员的素质等因素有关。核动力给予潜艇以更长的时间在水下巡航的自由。可以预料, 其上浮下潜的循环周期数, 将大大地高于以水面航行为主所设计的常规动力潜艇的周期数。

潜艇和潜水器的耐压壳体, 在整个服役期间承受着如此反复作用的随机外载荷, 对结构设计师来说, 就面临着低周疲劳破坏模式的挑战。一艘成功地进行过深潜试验的潜艇, 并不能保证它的整个服役期内, 在上浮下潜的过程中, 能成功地承受反复循环的外部水压力所产生的随机载荷。这是因为深潜试验只是一次性承载, 它对结构造成的响应与多次反复承载所造成的响应是完全不同的。后者会引起工程上的疲劳破坏。

最近20年来, 科学和工程上的巨大发展要求放宽疲劳设计中的无限寿命概念的尺寸, 特别是当重量成为决定性因素时(如导弹、高压容器、飞机或潜艇等)更是如此。由于这些要求和弹性理论知识的发展及对弹塑性状态更进一步的了解, 推动了结构设计师去研究某些工程问题的有限寿命设计。

人类对潜艇或潜水器的疲劳问题的认识也是有个过程的。1963年4月10日, 美国“长尾鲨”号核潜艇在科德海角以东 220 n mile 处的威尔金松海沟沉没, 艇员108名、临时上艇的军官4名和有关工厂的非军人17名 随同历史上最强大的核动力潜艇一起丧生, 横卧于2650 m 深的海底。从上午9 h 12min 母船和该潜艇进行一次联络至9 h 时19min 耐压船体破损下沉, 前后只有7 min 时间。事故发生后, 美海军专门组织了调查委员会力图摸清事故原因。最后的结论是, “主机舱内海水管系接头强度不足所造成。此外, 由频繁的大深度潜航引起的耐压材质的疲劳问题也是不能忽略的。”^[8] 为此, 美国当时的作战部长安德森下令对即将服役的同

级后续艇采取了好几项改进措施,其中包括增大耐压壳安全系数和增加艇的储备浮力。另外,在这样的背景下,为了对大型潜艇结构首次暴露出来的疲劳问题进行较为深入的研究,美海军不惜大量的财力和人力,在1965年进行了潜艇结构全尺度模型的大型疲劳试验^[4],它把直径为10m的压力筒改装成可以容纳缩尺比为1:1的大型潜艇结构模型的装置。然后,对如此庞大的模型施加交变载荷,监测由于低周疲劳所造成的高应力区焊接裂纹的产生和扩展。以期从中找出一些规律性的东西来。

在此以后,潜艇和潜水器的疲劳设计研究引起了国际造船界的关注。美国船舶局在1979年颁布了“水下装置和容器的建造与入级规范”。其中9.9节专门提及了疲劳设计问题。我国有关单位也相继开展了这方面的理论与实验研究工作。

潜艇和潜水器的使用要求决定了它必须经常地上浮和下潜。这样,它的耐压壳就会周期性地受到不同压力幅值的静水外压力。壳体的主应力在性质上是受压的,因此,如果耐压壳在某处有裂纹的话,似乎不会象飞机机体上的裂纹那样会明显地扩展下去,机体裂纹在每次飞行中将受到零至最大拉应力的循环载荷。当然,从微观结构来说,裂纹面间的晶粒在压应力较大的情况下会互相挤压造成错位,但由此而引起的显微裂纹情况的严重性将大大小于在拉应力时的情况。这样看来,考虑潜水器或潜艇的疲劳问题似乎是没有必要的。然而,不幸的是,低周疲劳问题仍然是存在的。

那么,造成低周疲劳破坏的主要原因是什么呢?简单地讲,有以下几个方面:

1. 当耐压壳受到外部水压时,某些局部区域确实受到拉伸应力的作用。最典型的部位就是在锥柱结合壳凸角的外表面。静水压力引起的局部弯矩将引起纵向拉伸应力,而且这个纵向拉伸应力随半锥角的增大而急剧增大,常常能接近或达到材料的屈服限,成为结构疲劳破坏的热点。

2. 表面焊接残余拉应力的存在也使情况大为不同。当其和

静水压力引起的循环工作应力相叠加时，它们就会形成从高拉伸应力到低拉伸应力的循环载荷。

3. 从材料性能上来说，由于高强度钢而带来的承载应力水平的增加，并没有引起材料疲劳强度的相应的增加。同时，潜艇用钢多半为Ni Cr Mo V系钢种，如美国的HY-80和HY-100、日本的NS63、苏联的AK-25等钢种，它们为了求得高强度、高韧性、良好的可焊性及抗爆性等综合技术指标的较好匹配，其屈服限与强度限之比（屈服比）已接近甚至超过0.9，而一般压力容器所使用的低碳钢或低合金钢，其屈服比只有0.6~0.7左右。所以，潜艇或潜水器用钢一旦进入屈服状态后，其塑性储备就大大减小，降低了抵抗疲劳破坏的能力。

潜艇和潜水器的疲劳与一般机械所遇到的疲劳在本质上还有些不同，后者的循环周期数可高达 10^6 以上，而应力水平相对较低；前者恰恰相反，它在整个寿命的周期数只有 $10^2 \sim 10^4$ 左右，而应力水平相当高，一般都接近材料的屈服限。所以，我们把具有这种特点的疲劳称之为“低周疲劳”。也有某些学者认为⁽⁶⁾：循环次数的区别对失效的影响不如所涉及的机理那样大。所谓“低周疲劳”即指高塑性应变超过某个微观范围（如几个晶粒直径），而“高周疲劳”则指微观应变是弹性的或只包含有非常小的塑性。就笔者的观点来看，周期数之所以能如此之低，必然是由于塑性应变大而造成的。所以两种定义方法实质上是一样的。而以第一种提法更显得简捷，易于接受。须注意的是低周疲劳指的是循环周期数低，并非指加载频率低，这点不应混淆。

近年来，聚丙烯材料制成的全景式透明耐压球壳已在中浅深度的潜水器上得到了日益广泛的使用，它们甚至可以做成透明的环肋加强的圆柱壳，目前用得最多的还是在钢制压力壳上做成透明的圆型或球型的观察窗。此外，单人常压潜水装具的头盔、各种饱和潜水舱、医用高压氧舱都已开始使用这种材料。这种粘弹性高分子有机材料在循环载荷作用下，也有它的特殊的疲劳特性。当然，它的疲劳的机理、裂纹的成因和扩展的规律都完全不同于

钢的情况。这是因为从微观上来看，钢是由无数原子在品格上有规则的排列而成的集合体，而聚丙烯却是高分子聚台物，微观结构完全不同。目前，由于聚丙烯材料在海洋工程上的应用日趋广泛，它的疲劳破坏造成的后果是瞬时向心爆裂，对于载人容器来说，这种后果同样是灾难性的。为此，各国都在加紧研究，以期取得一些突破性的进展。

第一章 循环载荷

材料对单调静载荷(如单调拉压、单调弯曲等)与循环载荷的响应特性是不一样的,但在疲劳分析中,感兴趣的是材料对循环载荷的响应。所以,我们首先要对循环载荷有个全面的了解;其次还应搞清潜艇用钢之类的金属材料,它们怎样以各自的方式对各种特点的外加循环载荷作出响应。这就是本章要解决的两个主要问题。

§ 1.1 循环加载与迟滞回线

通常所说的材料的拉伸曲线(或称单调 $\sigma-\epsilon$ 曲线)是指由静力拉伸试验所确定的曲线,但是,在交变循环载荷作用下的疲劳寿命分析中,必须计及材料在循环载荷作用下应力-应变间的关系,即需要材料的循环 $\sigma-\epsilon$ 曲线。对大多数材料来说,这两种 $\sigma-\epsilon$ 曲线在形状上是有区别的。当材料的循环 $\sigma-\epsilon$ 曲线高于单调 $\sigma-\epsilon$ 曲线时,称该材料为循环硬化材料;反之称为循环软化材料。循环 $\sigma-\epsilon$ 曲线与单调 $\sigma-\epsilon$ 曲线间的差异程度与循环应力幅值的大小和循环次数这两因素有关。

假定材料的拉伸与压缩 $\sigma-\epsilon$ 曲线如图 1-1 中的 OA 与 OB 所示。 A 与 B 表示应力与应变数值相同但符号相反的两个点。由点 O 至 A 表示拉伸载荷增加,在 A 点开始卸载,并施加反向压缩载荷而达 B 点,再在 B 点卸载,又一次施加拉伸载荷,重新回到 A 点。继续这个过程若干次,就能完整地画出一条封闭曲线 $ADBCA$,此即所谓迟滞回线。迟滞回线最重要的性质在于:通过它能测量出每一次循环中的塑性应变范围 ϵ_p ,用它作为参数来描述疲劳寿命 N 比用出现在疲劳分析中的其它参数更能符合实验曲线。读