

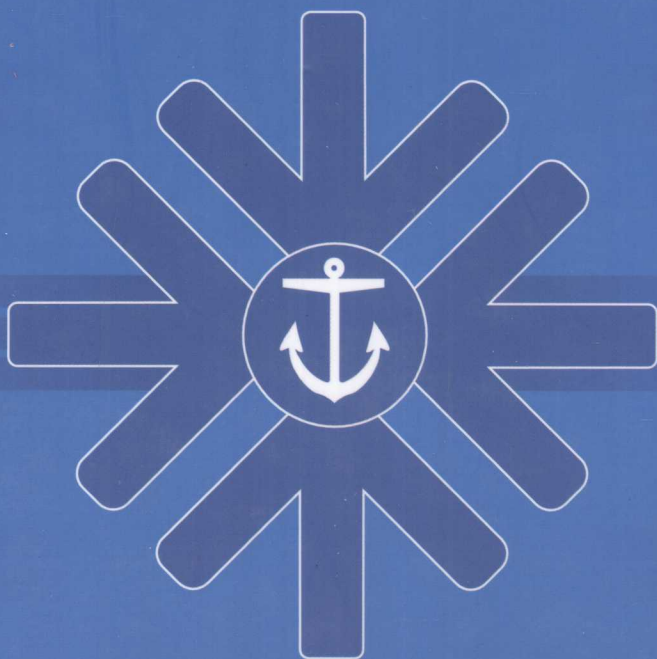
h t t p : / / w w w . n d i p . c n

《现代船舶力学》丛书

Theory and Experiments on Modern Submarine Structure Strength

现代潜艇结构强度的理论与试验

徐秉汉 朱邦俊 欧阳吕伟 裴俊厚 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

U674
1017



NUAA2013049955

U674
10174

《现代船舶力学》丛书

现代潜艇结构强度的 理论与试验

Theory and Experiments on Modern
Submarine Structure Strength

徐秉汉 朱邦俊 欧阳吕伟 裴俊厚 著



国防工业出版社

· 北京 ·

2013049955

图书在版编目(CIP)数据

现代潜艇结构强度的理论与试验 / 徐秉汉等编著. —北京:国防工业出版社, 2007. 6
(现代船舶力学丛书)

ISBN 978-7-118-05036-3

I. 现... II. 徐... III. 潜艇—结构强度—研究 IV. U674.76

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 024333 号



※

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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 22 $\frac{3}{4}$ 字数 407 千字

2007 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 80.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

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。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,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,原国防科工委于 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. 在国防科学技术领域中,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,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,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,由总装备部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,原国防科工委先设立出版基金,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和武器装备建设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 第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员	陈达植			
顾问	黄宁			
主任委员	刘成海			
副主任委员	王峰	张涵信	张又栋	
秘书长	张又栋			
副秘书长	彭华良	蔡镛		
委员	于景元	王小谟	甘茂治	冯允成
(按姓氏笔画排序)	刘世参	杨星豪	李德毅	吴有生
	何新贵	佟玉民	宋家树	张立同
	张鸿元	陈火旺	侯正明	常显奇
	崔尔杰	韩祖南	舒长胜	

《现代船舶力学》丛书

编辑委员会

名誉主任委员 黄平涛

顾问 姜来根

主任委员 吴有生

(按姓氏笔画排序)

副主任委员 王国强 吴德铭 翁长俭 盛振邦

委员 尤子平 石仲堃 冯丹宇 许西安

刘应中 纪卓尚 杨士莪 吴秀恒

何友声 张圣坤 陈铁云 耿广生

徐秉汉 郭日修 崔维成 董世汤

彭华良 戴仰山 戴遗山

秘书 陈燮麟 赵德会 康伯霖

总 序

历史上蒸汽动力装置在船舶推进中的应用,改变了船舶在波浪中的航速与航线,也促进了 19 世纪中期船舶运动理论的诞生。从此,在牛顿力学的基础上,开始了船舶力学漫长的发展历程。于 20 世纪上半叶形成了自身较为系统的专业格局,并且在 20 世纪下半叶取得了突飞猛进的发展。

在 20 世纪后 40 年,随着世界经济大循环模式的形成,船舶的产量、品种大幅增长,船舶设计制造技术频频更新,改变着船舶与海上运输的面貌。21 世纪将是海洋的世纪,海洋经济、海洋开发与海洋军民装备的发展需求更将给海洋运载器技术的进步以前所未有的巨大动力。船舶力学是一个与船舶工程紧密结合的力学领域。船舶类型的每一步更新与发展,都包含着在船舶力学的领域中认识与把握船舶所遭受的随机、复杂、险恶的环境载荷,改进航行性能,保证船体安全可靠等方面的科学与技术的进步。凡是船舶力学研究最活跃的地方,往往就是需求最明确、船舶新技术出现最快的地方。可以说,现代船舶发展的历史,也就是船舶力学发展的历史,船舶力学是船舶技术创新的重要源泉之一,而船舶的工程需求又是船舶力学发展的基石,两者紧密结合,与时俱进。因此,可以预见,进入 21 世纪以后,不用太长的时间,船舶力学发展的历史必将翻到崭新的一页。

面对这样的历史机遇,有必要对世纪之交船舶力学若干主要领域的前沿内容,以及我国船舶科技工作者希望有更多了解的新内容作一些归纳与介绍。这不仅是我国广大船舶科技工作者的愿望,也有助于为进一步发展船舶力学打好基础。

20 世纪 80 年代初以来,我国的船舶工业与船舶技术取得了迅速的发展,船舶总产量在 20 世纪末已稳居世界第三位。为奠定我国船舶技术与船舶工业发展的基础,我国的船舶力学工作者含辛茹苦,摩胼胝地工作,取得了丰硕成果,有的领域接近和达到了国际先进水平。本世纪初是我国船舶工业和船舶技术跨越式发展的重要历史时期,为进一步振兴我国的船舶技术与船舶工业,有必要把所取得的成果与国际动向结合起来,作必要的提炼与总结,供我国船舶与海洋工程界科技人员和高等学校师生参考。

本着上述目的,中国造船工程学会船舶力学学术委员会及部分船舶力学工作者倡议,在世纪之交,组织国内船舶力学的专家们,集体编著一套现代船舶力学丛书。这个倡议很快得到了原国防科工委和国防科技图书出版基金委员会的赞同。

1996 年成立了编委会。编委会的日常工作挂靠在中国造船工程学会船舶力学学术委员会,并在中国船舶科学研究中心的大力支持和国防科技图书出版基金委员会与国防工业出版社的指导下开展工作。

现代船舶力学丛书包括船舶水动力学、船舶结构力学、船舶设计和制造工艺中的力学问题等方面的专著。丛书注重理论与应用相结合,着眼于选题内容相对新颖与先进,并不追求覆盖范围全面与广泛。丛书内容难免会有缺陷与不足,但编委会希望在我国船舶科技界各有关院所、高校与造船企业的关怀和参加编著的专家学者的共同努力下,它的出版能够对推动我国船舶与海洋工程技术的发展,促进我国船舶工业的技术创新,以及加强中外船舶工程界的学术交流有所贡献。

吴有生

2002 年 9 月 8 日

前 言

潜艇作为海军的主要水下作战平台,其最大特点就是隐身性能好,机动能力强,突袭威力大。现代海军使命的需求和科技的发展,对现代潜艇,特别是 21 世纪现代新型潜艇提出了更高的要求,其发展趋势概括起来是:航速更快更机动;下潜更深、更安静;对舰攻击能力更强、更远;航行活动能力不断扩展。

潜艇结构是潜艇水下安全的基础。随着现代潜艇下潜深度的不断增大和各种特殊使用要求的不断提出,潜艇结构力学问题变得更为突出。为了新型现代潜艇水下的安全,必须建立新的工程上适用可靠的耐压船体结构设计计算方法;设计适合于现代潜艇各种特殊使用要求的合理结构形式;同时为了减少艇体结构自身的质量,必须采用新的高屈强比材料,甚至用密度更轻的高强度钛合金材料。

新材料的运用,虽然可解决增加潜艇的下潜深度,又不使潜艇的质量与排水量之比过大,同时还可使潜艇的磁和声学特性有大的改变;但同一类型材料屈服极限的提高,实际上总是伴随着出现这样或那样不利于结构承载能力的特性。譬如,降低了塑性性能;提高了设计制造过程中的缺陷偏差敏感度;断裂韧性下降,易产生裂纹;降低了形变强化系数;相对地降低了疲劳强度。

因此,必须采用结构力学与工艺力学、损伤力学相结合的理论和方法,对高屈强比材料的不利因素加以控制和限制,并在设计计算方法中建立相应的强度标准安全体系。

为了及时总结我国现代潜艇在结构强度理论研究、设计计算方法、高强度材料的应用及模型试验、实船试验等方面的成果和有利于我国新型现代潜艇的研制,为了促进潜艇结构力学专业的发展和有利于培养人材,作者根据长期从事潜艇结构强度研究和试验(包括各类实船试验)研究的成果以及相关单位的研究成果撰写了《现代潜艇结构强度的理论与试验》一书。

全书共分 10 章。第一章针对应用高屈强比材料建造大深度潜艇所产生的诸多不利于结构承载能力的特性,阐明了在大深度潜艇和潜水器的结构选材及强度分析中应用变形物体的损伤力学理论的必要性,并结合近代物理的金属变形理论和损伤力学理论,对大深度潜艇结构设计中高屈强比材料选取应考虑的力学问题,如结构的破坏形式、韧性破坏与脆性破坏的物理模型及其主要影响参数、防断设计中材料与结构的有关特性指标的确定与选取等,作了较为系统的分析与论述。

第二章论述了潜艇外载荷及其安全系数确定的一般方法。通过对作用在艇体上外载荷的量值及其特征的研究,以及对我国已进行过的不同缩尺比的各类潜艇结构模型破坏试验数据、实艇试水试验和深潜试验测得的应变数据与我国船厂建造潜艇的工艺及精度水平的分析,在此基础上,提出了大深度潜艇结构设计载荷安全裕度的选取原则。

第三章阐述了潜艇耐压圆柱壳的强度和稳定性的设计计算方法。由于肋骨的存在,破坏了圆柱壳的无矩状态,按周向中面力 T_2 近似为 pR 而导出的局部失稳或总体失稳临界压力的计算公式,显然不够精确,因此,本章导出了计及周向中面力 T_2 沿肋距分布不均匀性的环肋圆柱壳失稳临界压力的计算公式。为考虑内外肋骨的布置和肋骨偏心对圆柱壳板和肋骨应力的影响程度,本章中提出了能解决上述问题的环肋圆柱壳应力分析的一种新解法。除此之外,本章还较为详尽地介绍了潜艇耐压圆柱壳小挠度弹塑性失稳临界压力的理论计算方法,以及计及初始挠度的潜艇耐压圆柱壳大挠度弹塑性失稳临界压力的理论计算方法,这样便可借助薄壳弹塑性理论和系列的模型试验数据来确定大深度潜艇的几何修正系数 C_g 和物理修正系数 C_s 。

在质量相等的条件下,改变肋骨的几何形式是提高潜艇下潜深度的重要措施之一。本章中详细介绍了近期国内完成的半圆环壳型肋骨加强的潜艇圆柱壳强度和稳定性的理论计算方法和试验研究成果。

第四章介绍了环肋锥柱结合壳舱段总体失稳临界压力的理论计算方法:基于半弯矩理论和锥柱结合壳交接处附近的边界效应理论的“相当柱壳”法;基于半解析解的分区样条等参元法;基于直母线壳体的环肋锥柱结合壳总体失稳临界压力的近似简化计算方法。环肋锥柱结合壳还可能发生转折区的塑性轴对称破坏,因此,本章介绍了运用求解薄壳结构极限承载能力问题的能量法所导出的环肋凸锥柱结合壳转折区塑性极限压力的计算公式;环肋凹锥柱结合壳转折区塑性极限压力的计算公式;凹转折区壳板和加强肋骨共同屈服时的塑性极限压力的计算公式;环肋锥柱结合壳转折区塑性极限压力的计算公式。

第五章论及了潜艇结构疲劳寿命的估算方法。随着同一材料静强度的增加,可观测到其疲劳强度(循环强度)相对地下降;由于大深度潜艇使命的要求,其下潜、上浮的次数较之常规深度潜艇有明显增加,因此,大深度潜艇的结构疲劳问题显得尤为突出。本章在总结国内外已进行过的潜艇结构低周疲劳研究工作的基础上,提出了潜艇结构工艺疲劳寿命和使用疲劳寿命的评估方法;论述了为提高潜艇的疲劳寿命而采取的新的工艺措施——焊缝表面的超声冲击振动技术在耐压壳建造中的实际应用。

第六章论述的是壳体开圆孔的应力集中系数和孔口区域承载能力的计算方法问题。作者分别导出了围壁加强的圆柱壳和球壳开孔以及围壁、嵌入厚板组合加

强的圆柱壳和球壳开孔应力集中系数的近似计算公式及相应的设计计算图谱。鉴于围壁加强的圆形开孔的环肋圆柱壳在静水外压力作用下的承载能力,即破坏压力的确定是一个颇为复杂的力学问题,至今尚未见到可供实际应用的理论研究成果,因此作者根据试验中观测到的塑性区扩展情况,分别假定沿壳体的和沿围壁的塑性扩展区长度,然后利用静力平衡法导出了围壁加强的单开孔和双排连续开孔环肋圆柱壳在静水外压力作用下的破坏压力的计算公式。

第七章阐述了外置实肋板式耐压液舱结构应力、液舱壳体稳定性和耐压船体壳体承载能力的计算方法。与传统的将液舱壳体孤立成单层圆柱壳的求解方法不同,作者通过引入轴对称假定和实肋板平面应力假定,分别将无加强的耐压液舱结构简化成轴对称的双层闭合圆柱壳;将密集纵骨加强的液舱壳体简化成正交各向异性圆柱壳;将中间支骨加强的液舱壳体简化成弹性基础梁的复杂弯曲,视中间支骨为一柔性系数为 A 的弹性支座;将液舱壳体和耐压船体壳体均采用纵骨加强的耐压液舱视作轴对称双层正交各向异性圆柱壳进行整体求解,从而导出了液舱壳体应力、耐压船体壳体应力、跨端纵骨应力、中间支骨横剖面的正应力的计算公式。

液舱壳体稳定性的计算乃是基于能量法。由于无加强耐压液舱、密集纵骨加强耐压液舱、中间支骨加强耐压液舱的结构形式不同,总位能的表达式亦不同,因此分别导出上述诸情形的液舱壳体的理论失稳临界压力的计算公式,而实际失稳临界压力可通过计及几何修正系数 C_g 和物理修正系数 C_s 后求得。

试验表明,实肋板式耐压液舱模型的破坏多为液舱内的耐压船体壳体呈外凸波形轴对称破坏,考虑到纵向弯曲应力乃是耐压液舱的主要力学特性,因此,耐压船体壳体跨中剖面弯矩达到塑性弯矩时的应力,将被视作耐压船体壳体发生外凸波形轴对称屈服破坏的压力,即耐压船体壳体的承载能力。据此导出了耐压船体壳体承载能力的计算公式。

本章还给出了实肋板板格及加强筋失稳临界压力的计算公式,以及耐压液舱端部横舱壁的板边缘弯曲应力、径向加强筋自由翼缘上的弯曲应力、径向加强筋端部剖面腹板上剪应力的计算公式。

第八章着重介绍内部球面舱壁和端部球面舱壁的应力和稳定性的分析计算方法。对于内部球面舱壁,导出了基于巴泼柯维奇法的舱壁中部应力、舱壁垂直支撑环在支撑点处的应力、耐压船体厚壳圈在支撑点处的应力、厚壳圈与耐压壳厚度突变处的纵向合成应力的计算公式。内部球面舱壁的稳定性的计算,乃是计及了加工制造影响及非弹性失稳等因素的、主要基于球壳局部平均厚度和局部外半径的球壳失稳临界压力的计算公式。

对于端部球面舱壁,分别介绍了基于旋转壳解析法求解端部球面舱壁应力的计算方法与基于弹性基础梁的近似求解端部球面舱壁应力的计算方法。端部球面舱壁的稳定性的计算,除亦可采用内部球面舱壁稳定性的分析方法外,还给出了一个基于

弹塑性修正系数 ψ 的端部球面舱壁的实际失稳临界压力的计算公式。

第九章讲述了潜艇结构模型试验技术。涉及到模型设计原理和方法;模型静强度试验方法,其中包括初挠度的激光电测法;应变测量技术;潜艇结构模型外压疲劳试验方法诸多内容。特别值得提出的是,静强度试验中的应变片粘贴与防潮技术、应变片的压力效应分析、潜艇模型疲劳试验的自动循环加卸载系统以及模型疲劳裂纹检测方法等内容,本章均作了专门论述。

第十章论述了潜艇耐压船体船台液压试验和实船深潜试验的方法和测量技术。潜艇耐压船体船台液压试验,通过按指定的试验加载程序,实施应变测量,评估耐压船体建造的可靠性和焊接的密封性,并检查耐压船体的强度。

实船深潜试验包括应变、位移测量,完成深潜试验实艇下潜过程中的实时监测和安全判断,以及在役潜艇深潜试验结构安全监测。特别涉及到深潜试验技术中的测量站的合理选择;应变位移测量系统;应变片防海水浸蚀措施;测量导线密封;应变片温度漂移分析;应变片自补偿功能的作用;应变片长导线引起的温度漂移分析;导线温度漂移应变实测及比较;消除环境温度对应变测量干扰的主要措施等内容,都作了较为详尽论述。

声发射检测技术作为一种新的无损检测技术,近年来已在国外潜艇结构实船整体安全检测中得到初步应用,为了今后进一步开展潜艇结构模型、实船及船舶行业的各种声发射检测技术,本章介绍了声发射技术的基本概念和检测原理,特别是结合由国外引进的 MAES 多功能、多通道声发射系统,较为详尽地论述了声发射检测技术在我国实船试水试验中的应用。

不言而喻,基于上述较为详尽的章节内容,读者不难看出作者在撰写本书的过程中特别注意了下述特点:

(1)内容新颖,紧密结合我国新型潜艇结构的研究发展方向,特别是采用高屈强比新材料建造我国新一代潜艇的结构设计问题。针对大深度潜艇结构研究设计中必须解决的关键技术,作者从金属物理和变形损伤力学理论,从潜艇结构工艺疲劳寿命和使用疲劳寿命的评估方法,以及潜艇的强度标准和安全裕度诸方面,对新型潜艇因选用高屈强比新材料所引起的不利于结构承载能力的诸多力学问题,作了系统分析与论述,并指出解决问题的途径,这对我国新型现代潜艇的研制无疑具有指导和推动作用。

(2)书中所提出的设计计算方法着重它的实用性和可靠性。须特别指出的是,对一些特殊的较难导出精确解析解的潜艇结构,诸如耐压液舱、壳体开孔、环肋锥柱结合壳等结构,通过引入简化假定,导出了既简便实用、又能被大型钢质模型试验结果所证实为准确、可靠的设计计算公式,甚或给出极其便于设计人员使用的设计计算图谱。

(3)详尽介绍了潜艇结构模型试验技术和实船强度测试技术。

作者长期在第一线从事我国潜艇结构模型及潜艇船台试水的试验研究工作,是我国自行研制的国军标《潜艇结构设计计算规则》(从 20 世纪 70 年代至今已出版了三个版本的国军标)的主持人和主要参加者,是我国潜艇深潜试验及援外深潜试验的实际完成者,积累了丰富的潜艇试验研究资料与经验。本书的第九章和第十章对潜艇的试验研究技术及珍贵资料加以详尽地系统总结,对一些新的试验技术,如初挠度的激光电测技术、声发射技术及其在实船试水试验中应用等的总结,这对指导我国现代潜艇的结构设计、建造及未来的大深度潜艇实艇试验都有指导意义。

本书的研究成果,除可供专门从事潜艇结构研究设计的专业技术人员使用外,还可供化工机械、核工业、航空、建筑等专业的研究设计人员使用,亦可用作高等院校有关专业教师和研究生的参考书。

本书的第一章、第二章及第五章由徐秉汉编写;第三章由裴俊厚、徐秉汉、朱邦俊编写;第四章由裴俊厚编写;第六章、第七章及第八章由朱邦俊编写;第九章及第十章由欧阳吕伟编写;全书由裴俊厚编辑修改,最后由徐秉汉审阅定稿。万正权研究员、岳亚霖高级工程师校阅了部分书稿,郭日修教授审阅了全书初稿并提出极其宝贵的修改意见,作者在此表示衷心感谢。

《现代潜艇结构强度的理论与试验》一书的出版,得到国防科技图书出版基金的资助,谨在此深表谢意。

限于作者水平,书中出现错误和不妥之处在所难免,恳请同行专家和读者批评指正。

作者

目 录

第一章 损伤力学在潜艇结构选材及强度分析中的应用	1
1.1 概述	1
1.2 近代物理的金属变形理论	2
1.2.1 材料的微观结构和材料的理论强度	2
1.2.2 金属材料晶体格栅中的缺陷及塑性变形的本质	3
1.2.3 金属材料强化的机理	6
1.3 损伤力学的线性理论和非线性理论	7
1.3.1 物体损伤时的线弹性力学理论	8
1.3.2 损伤力学的非线性理论	17
1.4 损伤力学理论用于潜艇结构设计选材中的考虑	23
1.4.1 结构的破坏形式	23
1.4.2 韧性破坏与脆性破坏的物理模型及其主要的影响参数	24
1.4.3 防断设计中材料与结构的有关特征参数指标的确定与选取	26
参考文献	32
第二章 潜艇外载荷及其安全系数的确定	33
2.1 作用在潜艇耐压壳体上外载荷的量值及其特征	33
2.2 常规深度潜艇耐压壳体强度计算载荷的确定	35
2.2.1 结构设计中安全储备的处理方法	35
2.2.2 影响常规深度潜艇安全储备的因素及其处理方法	36
2.2.3 常规深度潜艇安全系数 K 的确定	38
2.3 确定大深度潜艇安全系数 K 值的基本原则	40
2.3.1 合理确定大深度潜艇计算载荷的意义	40
2.3.2 影响大深度潜艇安全储备的诸因素分析	41
参考文献	44
第三章 潜艇耐压圆柱壳的强度与稳定性	45
3.1 潜艇耐压圆柱壳的强度	45
3.1.1 在静水压力作用下轴对称圆柱壳弯曲的基本微分	

方程式及其解	45
3.1.2 潜艇耐压圆柱壳几个关键部位应力的计算	47
3.1.3 肋骨偏心对圆柱壳壳板和肋骨应力的影响	48
3.2 潜艇耐压圆柱壳的稳定性	53
3.2.1 潜艇耐压圆柱壳稳定性设计计算的基本原理	53
3.2.2 计及肋骨影响的潜艇耐压圆柱壳纵剖面的中面力	53
3.2.3 横向均匀分布载荷和中面力功的计算	55
3.2.4 局部失稳和总体失稳的理论欧拉载荷	56
3.2.5 几何修正系数和物理修正系数	57
3.2.6 结构实际失稳临界压力及其设计准则	58
3.3 潜艇耐压圆柱壳弹塑性失稳的理论计算方法	59
3.3.1 潜艇耐压圆柱壳的弹塑性失稳系数	59
3.3.2 潜艇耐压圆柱壳小挠度弹塑性失稳临界压力的理论 计算方法	61
3.3.3 计及初始挠度的潜艇耐压圆柱壳大挠度弹塑性失稳临界 压力的理论计算方法	67
3.4 半圆环壳型肋骨加强的潜艇耐压圆柱壳的强度与稳定性	75
3.4.1 半圆环壳型肋骨	75
3.4.2 半圆环壳型肋骨加强的耐压圆柱壳应力与稳定性的 简化计算方法	76
3.4.3 模型试验验证	78
参考文献	79
第四章 环肋锥柱结合壳的总体稳定性及其塑性极限分析	81
4.1 环肋锥柱结合壳舱段的总体稳定性	81
4.2 “相当柱壳”法	81
4.3 分区样条等参元法	83
4.3.1 单元刚度阵、载荷阵	83
4.3.2 区域刚度阵、载荷阵	85
4.3.3 结构总刚度阵、载荷阵	86
4.3.4 环肋锥一环一柱结合壳的强度和稳定性分析	86
4.4 环肋锥柱结合壳舱段总体失稳临界压力的近似简化计算方法	87
4.4.1 直母线壳体的定义	87
4.4.2 凸锥柱结合壳舱段总体失稳临界压力的近似简化 计算方法	88
4.4.3 凹锥柱结合壳舱段总体失稳临界压力的近似	

简化计算方法	89
4.4.4 计算结果与试验结果的比较	90
4.5 环肋锥柱结合壳与锥锥结合壳转折区的塑性极限分析	92
4.5.1 求解薄壳结构极限承载能力问题的能量法	93
4.5.2 环肋凸锥柱结合壳转折区的塑性极限分析	96
4.5.3 环肋凹锥柱结合壳转折区的塑性极限分析	104
4.5.4 环肋锥锥结合壳转折区的塑性极限分析	112
参考文献	119
第五章 潜艇结构疲劳寿命的估算方法	120
5.1 现代潜艇结构的疲劳问题	120
5.2 潜艇在不同下潜深度时的当量寿命折算方法	121
5.3 潜艇工艺寿命的评估方法	123
5.3.1 潜艇工艺寿命的定义	123
5.3.2 潜艇工艺寿命的估算方法——局部应力—应变法	123
5.4 潜艇使用寿命的评估方法	128
5.4.1 潜艇使用寿命的定义	128
5.4.2 裂纹扩展寿命的理论计算方法	128
5.4.3 应力强度因子变化值的计算	129
5.5 提高潜艇结构疲劳寿命的设计和工艺措施	132
5.5.1 潜艇结构疲劳损伤产生的原因	132
5.5.2 提高潜艇结构疲劳寿命的途径	132
5.5.3 改变结构中已存在的拉伸残余应力的工艺措施	134
5.5.4 提高结构疲劳使用寿命的超声冲击技术	136
参考文献	140
第六章 潜艇耐压圆柱壳开孔的设计计算方法	142
6.1 圆柱壳开孔问题的基本方程	142
6.2 围壁加强的圆柱壳开孔应力集中系数的近似计算方法	142
6.2.1 近似简化假定	143
6.2.2 变分方程	143
6.2.3 基本方程式的解	144
6.2.4 待定系数的确定	146
6.2.5 围壁加强的圆柱壳开孔应力集中系数的计算	150
6.2.6 加强围壁的应力系数的计算	151
6.3 围壁加强的球壳开孔应力集中系数的计算方法	152
6.3.1 球形扁壳在正交主曲率坐标系中的基本方程	152