



水介质爆炸容器 动力响应分析与优化设计

钟冬望 李琳娜 编著



科学出版社

水介质爆炸容器 动力响应分析与优化设计

钟冬望 李琳娜 编著



科学出版社

北京

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

内 容 简 介

本书在全面总结水介质爆炸容器动力响应研究的基础上,归纳了作者近年来从事相关研究的成果,包括水介质爆炸容器的强度分析、优化设计、动力响应实验及数值模拟等内容;结合实验室和现场实验,分别进行了水下爆炸冲击波实验、容器动力响应实验和水下爆炸高速摄影实验研究,提出了基于能量吸收法的水介质爆炸容器壁厚设计方法和水介质爆炸容器结构可靠性分析方法,为优化水介质爆炸容器的设计方法、合理预估容器的承载能力、提高容器的使用寿命以及改善容器的安全运行条件提供了科学依据。

本书可作为工程力学、爆炸力学、机械工程、岩土工程、采矿工程、土木工程、水利工程等专业的研究生教材,也可供相关科研人员和机械、兵器、水利等部门从事爆破工程的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水介质爆炸容器动力响应分析与优化设计/钟冬望,李琳娜编著. —北京:科学出版社,2016.1

ISBN 978-7-03-046983-0

I. ①水… II. ①钟… ②李… III. ①水—介质—爆炸—容器—爆炸力学—研究 IV. ①O382

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 315329 号

责任编辑:吉正霞 王迎春/责任校对:肖 婷

责任印制:高 嵘/封面设计:蓝 正

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

武汉市首壹印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本:B5(720×1000)

2016年1月第 一 版 印张:10 1/2

2016年1月第一次印刷 字数:209 000

定价:45.00

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

水介质爆炸容器是进行水下爆炸研究的重要实验设备,也是资源开发、国防、交通及工程建设等领域的重点研究平台之一。近年来有关水介质爆炸容器的研究受到国内外学者的重视,在基础理论、实验方法和数值模拟方面都取得了一定突破。但由于水下爆炸过程十分复杂,涉及水下爆炸冲击波、气泡脉动、空化二次加载等多种载荷,其作用机理尚有很多不清楚的地方,数值计算上也有一些不确定之处。而实际水域中的水下爆炸实验耗费大,可观测性差,能够采集到的测试数据非常有限,仍有很多问题有待于深入探索,尤其是对模拟深水环境爆炸容器的研究。

为了进行不同水深环境中的水下爆炸实验研究,需要在不同的加载静压下进行不同药量的爆炸实验,准确确定爆炸容器内部载荷;同时为了在水介质爆炸容器中能进行各种结构的冲击效应研究以及便于在容器中布置各种装药、测试装置,通常需要在容器上设计大的开口和各种装药、测试电缆转接法兰,因此水介质爆炸容器结构复杂,很多位置的应力及动力学参数很难确定。为了在确保水介质爆炸容器使用安全的同时,充分发挥实验设备的效能,必须通过对水介质爆炸容器动力响应的研究,较为准确地确定容器壁部弹性范围内的应变与水下爆炸药量、容器直径和壁厚之间的关系,以提高它的承载能力。

本书是在国家自然科学基金“水介质爆炸容器动力响应及可靠性研究”(No. 51404175)和湖北省十二五科技支撑项目“200 m 级水介质爆炸容器研发”(No. 2014BEC058)资助下完成的,归纳了作者近年来从事相关研究的成果,包括水介质爆炸容器的强度分析、优化设计、动力响应实验及数值模拟等内容。书中涉及针对水介质爆炸容器内部爆炸载荷特性和传播规律的壁厚设计方法,为获取水介质爆炸容器动力响应规律的水下爆炸冲击波实验、容器动力响应测试和高速摄影实验,以及水介质爆炸容器动力响应和可靠性的数值模拟研究,为优化水介质爆炸容器的设计方法、合理预估容器的承载能力、提高容器的使用寿命以及改善容器的安全运行条件提供科学依据。

本书第 1、2、9 章由钟冬望撰写,第 3~8 章由李琳娜撰写,全书由钟冬望统一审定,在本书出版之际,谨向西北核技术研究所、陕西应用物理化学研究所和中铁

港航工程局集团有限公司提供的大力支持表示衷心感谢,向书中所有参考文献的作者以及支持和参与本课题研究的同事和研究生表示衷心的感谢。

由于作者水平所限,书中不足之处在所难免,尚希读者见谅并提出宝贵意见。

作者

2015年7月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 水下爆炸研究进展	2
1.2.1 水下爆炸冲击波	2
1.2.2 气泡运动规律及效应	4
1.3 爆炸容器研究进展	5
1.3.1 爆炸容器概况	5
1.3.2 壳体动力响应	6
1.3.3 应变增长现象	8
1.3.4 尺寸效应	9
1.4 水介质爆炸容器研究进展	11
1.5 水介质爆炸容器研究存在的主要问题	14
参考文献	14
第 2 章 水下爆炸基础理论	24
2.1 水下爆炸现象	24
2.2 水下爆炸冲击波	24
2.2.1 冲击波的初始参数	26
2.2.2 冲击波基本方程	26
2.2.3 冲击波的计算	27
2.2.4 冲击波的传播理论	29
2.3 水下爆炸气泡脉动	32
2.3.1 气泡脉动基本现象	32
2.3.2 气泡脉动半径经验公式	34
2.3.3 二次压力波经验公式	35
参考文献	35
第 3 章 爆炸容器动力学	37
3.1 爆炸容器内部载荷	37
3.1.1 瞬态载荷	38

3.1.2 爆炸准静态气压·····	40
3.2 爆炸容器动力响应·····	41
3.2.1 爆炸容器应力分析·····	42
3.2.2 爆炸容器弹性动力响应·····	45
3.2.3 爆炸容器塑性动力响应·····	46
3.3 爆炸容器设计方法·····	47
3.3.1 美国 ASME 设计方法 ·····	47
3.3.2 英国 AWE 设计方法 ·····	48
3.3.3 动力系数法·····	49
3.3.4 解析法·····	51
3.3.5 有限元法·····	52
3.4 爆炸容器失效机制·····	53
3.4.1 塑性拉伸失稳失效机制·····	53
3.4.2 延性撕裂失效机制·····	56
3.4.3 绝热剪切失效机制·····	56
参考文献 ·····	57
第 4 章 水介质爆炸容器相似性理论 ·····	62
4.1 相似理论·····	62
4.1.1 基本相似量·····	62
4.1.2 相似理论基本定理·····	63
4.1.3 量纲分析法·····	66
4.2 水下爆炸冲击波相似律·····	67
4.3 水下爆炸气泡脉动相似律·····	71
4.4 水介质爆炸容器结构相似律·····	74
4.4.1 结构动力学模型的相似条件·····	74
4.4.2 水介质爆炸容器的完全几何相似准则·····	76
参考文献 ·····	78
第 5 章 水介质爆炸容器强度分析与壁厚优化设计 ·····	80
5.1 爆炸容器设计准则·····	80
5.2 水介质爆炸容器内部载荷·····	81
5.3 强度计算公式推导·····	82
5.4 基于能量吸收法的水介质爆炸容器壁厚设计·····	83
5.5 水介质爆炸容器壁厚设计工程应用·····	85
5.5.1 设计要求·····	85
5.5.2 容器壁主体材料·····	85

5.5.3 内部载荷计算	86
5.5.4 常规方法计算容器壁厚	87
5.5.5 基于能量吸收法的壁厚优化设计	87
参考文献	88
第6章 水介质爆炸容器动力响应实验研究	89
6.1 实验方案	89
6.1.1 总体方案设计	89
6.1.2 测试系统组成	90
6.1.3 测试仪器及其性能指标	91
6.1.4 系统标定	93
6.1.5 测点布局	94
6.2 实验装药与仪器安装	94
6.2.1 实验装药与起爆	94
6.2.2 冲击波压力传感器的安装	95
6.2.3 应变计的粘贴	95
6.2.4 加速度传感器的安装	95
6.2.5 高速摄影仪测点选定	96
6.3 主要实验结果与分析	96
6.3.1 内壁超压测试的主要结果及分析	96
6.3.2 加速度测试的主要结果及分析	100
6.3.3 外壁应变测试的主要结果及分析	103
6.3.4 冲击波压力测试的主要结果及分析	106
6.3.5 气泡脉动高速摄影的主要结果及分析	113
6.4 水介质爆炸容器动力响应实验结论	116
参考文献	117
第7章 水介质爆炸容器振动特性及动力响应分析	118
7.1 水介质爆炸容器模态分析	118
7.1.1 水介质爆炸容器的实测频谱特征	118
7.1.2 爆炸容器振动特性的有限元模态分析	121
7.1.3 结果分析	123
7.2 水介质爆炸容器动力响应的有限元计算	124
7.2.1 计算模型	124
7.2.2 材料模型及状态方程	124
7.2.3 计算结果	125
7.2.4 结果分析	132

7.3 水介质爆炸容器振动特性及动力响应数值模拟结论	132
参考文献	133
第8章 水介质爆炸容器结构可靠性分析	134
8.1 结构可靠性基本概念	134
8.2 结构可靠性指标计算方法	135
8.2.1 一次二阶矩法	135
8.2.2 改进一次二阶矩法	137
8.2.3 二次二阶矩法	138
8.2.4 蒙特卡罗法	140
8.3 基于一次二阶矩法的实际爆炸容器可靠性分析	141
8.3.1 应力-强度干涉模型	141
8.3.2 可靠性分析	142
8.4 基于蒙特卡罗法的实际爆炸容器可靠性分析	143
8.4.1 计算参数	143
8.4.2 分析过程	143
8.4.3 分析结果	146
8.5 可靠性分析对比	146
参考文献	147
第9章 水介质爆炸容器结构优化设计及应用	148
9.1 模拟深水环境爆炸容器设计要求	148
9.2 模拟深水环境爆炸容器总体结构	148
9.3 主体结构设计	149
9.3.1 主体材料	149
9.3.2 内压圆筒	150
9.3.3 标准椭圆封头	150
9.4 法兰结构设计	150
9.4.1 人孔法兰	150
9.4.2 光学窗口安装法兰	151
9.4.3 主要接口连接法兰	152
9.5 底座设计	156
9.6 辅助与控制系统设计	157
9.7 模拟深水环境爆炸容器工程应用	157

第1章 绪 论

1.1 引言

水下爆炸的早期研究主要是围绕军事目的进行的。随着第二次世界大战后世界经济的复苏,水下爆炸广泛应用于工业和民用领域,如新建的港口、桥梁以及水工建筑物的岩石基础爆破开挖;为便于通航增加港湾、湖泊、运河的水深;整治港口、清理航道、修建大坝和围堰;水下爆炸加工成型等。众多实际工程表明,水下爆炸在军事、经济建设中具有越来越重要的地位,并且具有非常广阔的应用前景。

随着水下爆炸的广泛应用,合理利用水下爆炸能量对目标进行有效破坏,在复杂的水下爆炸环境中对水工设施和建筑物采取有效防护,最大限度地降低爆炸负效应等问题,已经成为爆破工程应用和学术研究普遍关心的课题。只有对水下爆炸产生的冲击波和气泡脉动规律进行深入研究,才能有效控制爆炸负效应,获得最佳爆破效果。由于水下爆炸比空中爆炸的作用机理更为复杂,只有少数问题存在解析解,所以实验研究和数值计算是目前水下爆炸的主要研究方法。但水下爆炸的复杂环境导致水下爆炸实验研究周期长、耗费多、成功率低、可操作性差,且水下爆炸实验大多属于破坏性实验,测试所获得的数据非常有限。因此,迫切需要一种能够在方便的实验环境中安全可靠、高频度地进行水下爆炸实验的设备,水介质爆炸容器就在这一背景下应运而生。

爆炸容器是一种主要用来进行各种爆炸实验研究,可承载内部爆炸冲击载荷的特殊压力容器,通过容器的不同结构、不同填充介质和不同的静态压力环境可以模拟各种不同的爆炸环境^[1-4]。水介质爆炸容器就是一种为了进行水下爆破工程技术研究,在爆炸容器中填充水介质,通过加载一定静压来模拟各种不同的水深条件,根据爆炸相似原理,利用小药量实验进行炸药水下爆炸作用规律研究的实验设备。它能够限制水下爆炸冲击波和爆轰产物的作用范围,并对实验人员和设备进行有效的近距离保护,与野外自然水域实验条件相比,它具有实验仪器便于安放、实验数据便于采集、实验外部条件可控性强的优点。为了确保水介质爆炸容器安全使用,同时能充分发挥实验设备的效能,必须通过对水介质爆炸容器动力响应的研究,较为准确地确定水下爆炸的药量、容器的直径和壁厚与容器壁部弹性范围内的

应变之间的关系,以提高它的承载能力,并对其安全性进行可靠评估。

1.2 水下爆炸研究进展

早在 20 世纪 30 ~ 60 年代,以美国、苏联为首的一些军事强国就进行了多次水下爆炸实验以及水下核实验,尤其是对中低压区域进行了大量的水下爆炸测试,其研究成果为水下冲击波传播理论的形成奠定了坚实的基础。Kirkwood 等通过不懈努力,建立了以声学理论和流体力学为基础的水中冲击波传播理论和气泡脉动理论。在 1949 年 Cole 将水下爆炸早期研究的最全面和最有价值的成果^[5]进行了分析和整理,出版了《水下爆炸》。20 世纪 60 年代以后,美国原子能委员会洛斯阿拉莫斯实验室基于二维不定常流体和流体弹塑性模型编制了许多实用程序,进行了大量的爆炸力学数值计算工作,开创了爆炸力学数值计算工作的先河^[6]。随后,水下爆炸的数值计算工作取得了很大进展,近年来,随着计算理论和计算方法的逐步完善,采用数值计算方法已经解决了水下爆炸研究过程中的很多问题,数值模拟结果与实际情况也有很好的一致性。目前,水下爆炸的研究方法不断趋于将理论分析、实验研究和数值计算三种方法有机结合^[7,8]。

1.2.1 水下爆炸冲击波

以 Bridgman、Cole 为代表的水下爆炸研究实验室和 Woods-Hole 实验室在 20 世纪 30 ~ 50 年代进行了大量的水下爆炸实验,通过系统的实验研究,测试分析了 TNT、特屈儿和偏托里特等理想炸药球形药包产生的爆炸冲击波,发现在 10 ~ 100 倍药包半径范围内,实验结果与 Kirkwood 提出的冲击波衰减规律非常吻合,由此较好地验证了 Kirkwood 的冲击波传播理论^[9-13]。Cole 等还通过实验确定了,当 $P \geq P_m/e$ 时,水下爆炸场中任意点压力与峰值压力满足指数衰减,即 $P_i = P_m e^{-i/\theta}$ 。他们还进行了不同炸药品种、药包形状和密度的水下爆炸的对比实验和统计分析,在此基础上提出了库尔公式,至今仍被广泛应用。随后,国内外很多研究者基于库尔公式的形式,又通过实验确定了在不同爆炸方式和药包形状下多种炸药的衰减系数和指数。

苏联和捷克的研究者雅科夫列夫、斯坦纽科维奇、萨道夫斯基、鲍姆等在早期的水下爆炸研究中也对水中冲击波的传播、界面反射、折射作用等爆炸流体动力学问题进行了系统研究,并取得了许多成果^[14]。其中,鲍姆结合实验研究提出了适用于自装药表面直至很远距离的球形药包水下爆炸冲击波衰减经验表示式

$$\Delta P = \frac{355}{R} + \frac{115}{R^2} - \frac{2.44}{R^3}, \quad 0.05 \leq \bar{R} \leq 10 \quad (1.2.1)$$

$$\Delta P = \frac{294}{R} + \frac{1387}{R^2} - \frac{1783}{R^3}, \quad 10 \leq \bar{R} \leq 50 \quad (1.2.2)$$

式中, $\bar{R}$ 为折合距离, 也称为比例距离, $\bar{R} = R/\sqrt[3]{Q}$ (Q 表示炸药爆炸的 TNT 当量)。

Henrych 将 Kirkwood 的理论计算以及 Woods-Hole 的实验与以上公式计算的结果进行比较表明, 与 Kirkwood 的理论计算曲线在 $0.05 \leq \bar{R} \leq 10$ 范围内吻合良好, 在 $10 \leq \bar{R} \leq 10^3$ 范围内比 Woods-Hole 的实验结果稍低。Bethe、Kirkwood、Dasgupta、Penny 和 Brinkley 等借助质量守恒、动量守恒和能量守恒定律, 忽略介质的热传导效应和黏性, 对方程组在不同的近似和假设条件下进行求解, 形成了三种具有代表性的冲击波传播理论, 并一直沿用至今。

随着计算机技术的迅速发展, 水下爆炸的研究重点逐步过渡到基于已有实验数据的理论分析和数值模拟工作中。在假设炸药水下爆炸过程中温度仅随时间变化的前提下, Kot^[15] 采用特征线法对炸药瞬时爆轰到初始气泡形成这一过程中的冲击波传播进行了计算, 准确定义了气泡和冲击波阵面的边界范围, 在低压状态下得到的计算结果与实验数据相吻合。Hsiang 和 Collins^[16] 用同样的方法将曲线坐标固定在冲击波阵面上, 研究了半圆形刚性结构表面的二维冲击波传播问题。Huang 和 Kiddy^[17] 将有限差分方法用于耦合欧拉-拉格朗日 PISCES 2DELK 程序中, 同时求解质量、动量和能量方程, 分析了水下爆炸冲击波和气泡脉动与球形壳体的瞬时作用效应。Chapman 等^[18,19] 用耦合欧拉-拉格朗日和欧拉多物质有限元分析方法计算了多种曲面刚性边界附近装药爆轰后的入射冲击波压力变化, 并模拟了无限球形壳体和圆柱壳体对水下爆炸载荷的弹性响应。以 Itoh^[20-23] 为代表的日本学者将高速纹影和阴影照相技术用于水下爆炸的研究中, 观测到了在炸药中的爆轰波阵面发展以及冲击波在炸药-水界面处的折射过程。通过对爆轰产物膨胀产生的发散波与入射冲击波在界面处的作用对入射角影响的研究, 用特征线法较好地解释了冲击波的衰减过程; 利用光学观测确定的炸药 JWL 参数模拟了初始冲击波的传播, 发现靠近炸药边界的冲击波特性不同于远离炸药边界的冲击波; 结合水下爆炸加工研究的冲击波实验观测, 用 ALE 方法模拟了平面炸药水下爆炸驱动的二维爆炸场。

国内研究者在水下爆炸领域也开展了很多相关的研究工作。基于长江、珠江、黄埔港等水下爆破工程, 以长江科学院^[24,25]、水利水电科学院^[26]、中科院力学所^[27]、铁道部科学研究院^[28,29]、解放军理工大学^[30] 等为代表的研究单位开展了许多水中冲击波传播规律及爆炸防护问题的研究, 取得了大量的理论、计算和实验成果。根据流体力学理论, 颜事龙推导了无限长和有限长条形药包在水下爆炸产生的冲击波比能的计算公式^[30]。周睿等分析了有效装药量和爆炸相似律, 由此得到了条形药包在空气和水中爆炸的冲击波超压峰值的修正计算模型^[31]。2002 年吴成等在此基础上用相同的方法进一步研究了修正模型^[32]。苏华等根据实验结果分析所采用传感器的特点, 得到了一种修正冲击波参数的方法^[33]。李焰等在实验室对直径 20 mm 的微型 PETN 炸药球水中爆炸冲击波压力波形采用 PVDF 和 PCB 两种

压力传感器进行了测试,两者都有较好的波形,但后者的抗干扰能力较好^[34]。李金河等利用 PCB 138 压力传感器测量了水下爆炸冲击波的远场压力,得到冲击波峰值压力和衰减时间常数^[35]。顾文彬等在对实验数据分析处理的基础上,提出了浅层水中爆炸威力参量的计算理论与方法,系统分析了水面和水底对装药爆炸作用和冲击波传播规律的影响,开展了实爆条件下的爆炸作用过程数值分析,从而形成了较完整的浅层水中爆炸理论^[36,37]。张振华等应用有限元软件 DYTRAN 数值模拟了球形装药在无限水域的爆炸冲击波,经过与经验公式计算结果比较证明,只要计算参数和模型选择合理就可以较好地模拟出水下爆炸冲击波的传播过程^[38]。李加贵等利用 LS-DYNA 软件对爆炸冲击波进行了数值模拟,并与实验结果进行对比得到了较好的结果^[39]。余晓菲等利用 DYTRAN 软件比较了 ALE 和一般耦合 (General Coupling) 两种耦合方法,计算了球形药包在近似无限水域中爆炸产生的冲击波,说明数值模拟水下爆炸产生的冲击波是可行的^[40]。

1.2.2 气泡运动规律及效应

气泡的形成和脉动过程实际上表征了水下爆炸的准静态作用变化过程。气泡的脉动持续时间通常达到毫秒或秒量级,所以尽管气泡的最大脉动压力仅为冲击波峰值压力的 10% ~ 20%,但是其冲量和能量与冲击波相比在一个量级,成为可能造成水中目标破坏的又一种爆炸载荷,因此在水下爆炸研究中占有重要地位。

早期研究中,主要有两种基于不可压缩流体假设的水下爆炸气泡动力学理论模型^[41]。其一是以 Willis、Lamb、Cole 为代表提出的模型,该模型与瑞利的气泡理论一致,假设气泡是一个压力为零的空腔,由来自无限小点的水力推动开始气泡的初始运动,由此得到气泡运动方程

$$\dot{R} = - \left(\frac{P_H}{\rho_w} + \frac{3}{2} \cdot \frac{\dot{R}^2}{R} \right) \quad (1.2.3)$$

式中, R 为气泡半径, m; P_H 为静水压力, Pa; ρ_w 为水的密度, g/cm³。

这种模型适合描述气泡膨胀阶段的运动,在反映气泡塌缩过程时会发生很大偏差。

其二是以 Sany、Friedman 和 Christian 为代表提出的理想气体模型,该模型将爆炸气体看成一个具有初始体积、压力、动能、位能的球形气泡,由能量守恒定律推出气泡运动方程

$$\dot{R} = \frac{\frac{1}{R} \left[\frac{1}{\rho_w} \left(P_0 \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - P_H \right) - \frac{3}{2} \dot{R}^2 \right]}{\left[1 + \frac{1}{5} \frac{\rho_e}{\rho_w} \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 \right]} \quad (1.2.4)$$

式中, P_0 为气泡的初始压力, Pa; R_0 为气泡的初始半径, m。

Buntzen、Sany、Pritchett 等在该模型基础上,进一步研究发现了爆炸药包的入水深度和气体多方指数对气泡半径有明显的影响。

近年来,Arons^[42]、Herring^[43]等发现了气泡脉动过程中的能量损失现象,并从理论上给予分析和解释的基础上,气泡理论研究和数值计算工作也取得了很大进展。Faruqi^[44]基于无黏、无旋、不可压缩流体假设,模拟了初始球形气泡在刚性结构和自由表面之间的脉动过程,求解速度势的变化。Fujikawa 等^[45]以线性声学理论为基础,研究了流体中的两个球形和非球形气泡所辐射压力波的相互作用,发现两个气泡的初始半径和气泡内部压力以一种特殊方式结合,较小气泡在流体中产生的高压可以达到单个气泡压力的6倍,气泡与冲击波之间的作用引起了气泡的不稳定性。Perdue^[46]对气泡在刚性边界处的三维增长和塌缩过程进行了数值模拟,表明气泡的运动与重力的方向有关,且具有轴对称性。Livemore 国家实验室^[47]用二维流体力学程序 CALE 对水下核爆炸近场的气泡脉动效应进行了模拟,得到了与实测数据基本吻合的计算结果。Swegle 等^[48]用 PRONTO/SPH 分析程序模拟了水下爆炸中的气泡形成与塌缩,以及气泡载荷与薄板结构相互作用产生永久变形特性。新加坡的 Khoo 等一直致力于气泡脉动的数值研究^[49-56],利用边界元法(boundary element method, BEM)模拟自由表面附近的气泡形成及运动过程,分析气泡破灭后产生的射流现象,其数值模拟结果与实验结果吻合,表明边界元可以解决空泡水动力学复杂问题。姚熊亮等采用高阶曲面三角形单元分别模拟了有、无重力场和刚壁时对气泡运动的影响,获得了很好的模拟精度,同时预测了气泡在流场中的各种动力学行为^[57]。上述工作较完整地描述和分析了不可压缩和可压缩流体中的气泡形成、运动过程以及与结构的相互作用。

1.3 爆炸容器研究进展

1.3.1 爆炸容器概况

爆炸容器是一种潜在危险的限域装置,它能限制爆炸冲击波和产物的作用范围,对实验人员和设备实现有效的近距离保护,方便对爆炸和爆轰过程进行观察和测试,回收实验产物,防止环境污染等。爆炸容器的主要应用领域有国防军事、爆炸加工及公共安全等方面。在国防军事部门,爆炸容器主要用于爆炸实验、核武器和化学武器的储存和转移、过期武器弹药的销毁、放射性和有毒废弃物引起的环境污染的防治;在爆炸加工领域,爆炸容器是爆炸焊接、爆炸压实、爆炸成形和爆炸法制备纳米级材料等生产过程所必需的防护设备;在公共安全方面,为防止恐怖分子携带或邮寄的可疑爆炸物品危害社会安全,公安局、车站、机场等公共场所需要用爆炸容器紧急处理可疑爆炸物品^[58-60]。

爆炸容器的形状主要有球形和圆柱形两种,按照使用目的和设计原则可分为重复使用和非重复使用两类,前者由于重复使用的需要,其爆炸当量被严格限制在容器内壁不发生塑性变形的范围内,但实际使用时,当量多在允许当量的一半以下,后者对密封有很高的要求,但允许发生一定程度的塑性变形,因此可使同当量的容器比不允许塑变的重复使用的容器重量大大降低。

1945年,美国 Los Alamos 国家实验室试图在核装置未能按预计反应时利用它来回收可能残留的贵重金属,这是最早的爆炸容器研究。第二次世界大战后,美苏两国开展了爆炸容器的理论和实验研究。随后英国和瑞典等国家的大型爆炸和爆轰实验室也陆续建成了专为各种实验目的而设计的爆炸容器,其容积从几立方米到几十立方米,允许的最大药量从几克到几十千克。最初这些容器主要是单层金属容器,为了提高容器的承载能力逐步演化到多层金属容器。

20世纪70年代末,苏联利用战略导弹和宇航工程中取得成功运用的树脂基纤维来制造金属与非金属的复合材料爆炸容器。复合材料爆炸容器具有显著优势:①重量轻,承载相同药量的复合材料爆炸容器重量远小于金属爆炸容器;②无尺寸效应,从而可以将缩比实验的结论外推到原型容器上。此外,纤维缠绕的复合材料爆炸容器还具备抗疲劳、耐腐蚀、比强度高及破损安全性好等优点。经过40多年的发展,俄罗斯已掌握了一定的复合材料爆炸容器设计技术,并成功研制了各种不同当量的纤维复合材料圆柱形、球形爆炸容器。

我国对爆炸容器的研究始于20世纪70年代末,1984年江西洪都机床设备厂的章仕表主持研制了1 kg TNT 当量的可用于爆炸实验研究的爆炸容器。1986年中国工程物理研究院研制了5 kg TNT 当量的球形爆炸容器并通过了鉴定。之后,北京理工大学、武汉安全环保研究院、西北核技术研究所、工程物理研究院、安徽理工大学和南京理工大学等单位先后研制了用于科学实验的大小不等的各种结构类型的爆炸容器。

1.3.2 壳体动力响应

Hodge 分别采用弹塑性本构研究了无限长圆柱壳在矩形脉冲作用下的振动响应^[61]以及带等间距加强环的长圆柱壳在矩形、三角形、指数衰减型轴对称加载下的振动响应^[62]。Baker 于1958年研究了球壳在线性变化的载荷下的一维弹性解析解,1960年又在类似条件下得到了弹塑性振动解,1966年研究了偏心装药下的球壳的轴对称振动,给出了解析解和数值计算结果^[63-65]。这些工作奠定了爆炸容器动力响应分析的基础。Duffey 等得到长圆柱壳在中心点爆载荷下的壳体塑性变形^[66]。Walters 等针对受支撑的一般形状壳体的塑性变形提出了一个近似分析方法^[67],Jones 等用该方法分析了受支撑球壳在均布瞬时速度作用下的塑性变形,并与实验结果进行了对比^[68]。

由于爆炸容器动力响应过程非常复杂,仅仅依靠解析或近似理论的手段是不够的。研究表明,理论分析常常忽略的实际结构的非对称性会引起局部压力载荷到达时间、强度明显变化,从而导致应力-应变状态在较大范围的分布^[69,70]。采用数值模拟方法可以较为真实地模拟实际容器结构在爆炸载荷下的弹性或塑性行为。20世纪70年代以后,随着计算机的应用,数值研究大大推动了爆炸容器的理论及应用方面的发展。可以利用 PETROS、DYNA 等计算机软件进行近似爆炸冲击载荷以及结构响应的振动模式分析,对爆炸容器动力响应进行研究。例如,1983年 Gupta 等用 PETROS 软件计算了 29 kg TNT 爆炸作用下半球形容器的动力响应,得到结构响应以呼吸振动模式为主,同时存在局部弯曲振动模式。正是弯曲振动模式使得容器在某些局部得到应力放大而导致大变形发生^[71]。Karpp 等在 1983 年运用有限差分 and 有限元程序模拟了球壳在中心点爆炸载荷下的动态响应,与实验结果吻合较好^[72]。1989 年, Bachrach 针对带有套管的球形容器在不同偏心度下,计算了 Timoshenko 壳体模型下容器的动力响应。Bultman 在 1992 年得到了双层球形爆炸容器的静力有限元分析结果^[73,74]。Duffey^[75] 和 Lewis^[76] 在 1992 年用 DYNA3D 对带有 5 个窗口和底部 4 个位置受支撑的球形容器进行了实验研究和数值模拟计算,证实了球壳以呼吸振动模式为主,窗口对局部响应的影响很明显。数值模拟结果与实测结果很接近,但实验结果显示容器底部有明显的拍现象,其应变值明显高于理论计算值,说明存在呼吸振动基频以外的其他相近频率的弯曲振动成分,进而导致应变增长现象。除此之外,Duffey、Belov、Moir、Murray 等还先后借助分析软件对对接焊缝、窗口螺栓、封头等在爆炸容器工作过程中的影响和作用进行了研究,但这些工作很少公开发表。

我国对爆炸容器动力响应的研究开始于 20 世纪 80 年代末,1989 年赵士达发表了爆炸容器的综述文章,较为全面地介绍了爆炸容器的研究进展及其动力学研究的一般过程^[77]。林俊德从 1993 年开始结合西北核技术研究所 10 kg TNT 当量爆炸容器的研制对其动力学问题进行了大量的研究工作,对容器的设计背景、功能指标、结构选取和容器内壁载荷特点进行了分析,并对容器强度进行了估算^[78]。1994 年北京理工大学的段卓平等对平板封头的圆柱形爆炸容器中心内爆进行实验研究,并使用有限元程序 NIKE-2D 对圆柱壳的动态响应进行了数值模拟^[79]。1995 年国防科技大学的朱文辉等对爆炸容器的加载规律和动力响应进行了研究^[80]。1998 年胡八一等利用 DYTRAN 模拟了球形爆炸容器中心球状炸药爆炸产生的冲击加载^[81]。1999 年钟方平对带平板封头的双层圆柱形爆炸容器在爆炸载荷作用下的动力响应进行了实验和理论研究^[82],认为降低容器内气压可以减小爆炸冲击载荷。以一维自相似解作为爆炸初场,采用 NND 格式求解轴对称欧拉方程组得到冲击波流场,用 ADINA 软件计算了容器圆柱壳的弹塑性响应和振动模式。2000 年霍宏发以西北核技术研究所的 10 kg TNT 爆炸容器的安全性评估为背景,对带椭球封头

的圆柱形组合式爆炸容器进行了分析和实验研究,采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元程序计算得到爆炸冲击波流场及螺栓、封头极点处的应变时间曲线,并通过有限元模态分析方法,研究了容器壳体的控制振型和主要破坏模式^[83]。2000 年张鹏采用自相似解作为初场,爆炸流场采用 MUSCL 格式和 PPM 格式结合有限体积方法求解轴对称的欧拉方程组,壳体响应采用 HONDO 程序计算得到^[84]。在张鹏工作的基础上,2003 年张亚军等计算了带椭球封头的薄壁圆柱形爆炸容器内爆产生的流固耦合问题^[85],后来又将程序拓展到了三维,并将方程变成 ALE 型^[86]。2009 年马圆圆等采用显式非线性动力有限元软件 LS-DYNA,在不同 TNT 当量下对椭圆封头圆柱形爆炸容器进行了数值模拟。模拟结果表明,爆心环面的应变在初始响应阶段就达到了最大值,并且其值大于筒体上其他点的最大应变,实际结构中法兰对爆炸容器的动力响应有很大的影响,当法兰的质量超过一定值之后,容器爆心环面会产生应变增长现象^[87]。2010 年陈石勇等对一真实结构的球形爆炸容器在内部爆炸加载下的动力响应进行了实验研究,通过监测容器 6 个特征点的动态应变波形,分析了容器壳体的振动特性和动力学强度^[88]。

1.3.3 应变增长现象

应变增长是爆炸容器动力学研究中的一个重要问题,这种现象通常表现为应变不是在第一个振动周期内达到最大值,而是在之后的振动中出现,即应变延时增大。通常,应变增长现象的研究可以分为两大类,第一类研究的对象为光滑的单层圆柱壳体或者单层球形壳体,第二类为主要研究带有开口、接管等结构不连续的单层壳体^[89]。

Buzukov^[90] 最早在研究圆柱形抗爆容器壳体变形的实验中观察到抗爆容器壳体的应变增长现象,他观测到容器在内部爆炸载荷作用下的应变峰值出现在冲击波到达后的 20 ~ 40 ms,也就是说当爆炸载荷停止作用时,壳体中的应变并不是立即降低,而是继续增长到某一最大值后才逐渐减小,而反射波持续时间只有 3 ~ 5 ms,因此他认为应变增长现象并不能解释为冲击波的多次反射作用,而是与结构复杂的振动过程有紧密关系,尤其是当壳体径向和轴向振动频率相近时。Kornev^[91] 等也在圆柱形爆炸容器的法兰附近观测到明显的应变增长现象,他认为该现象来源于包含了频率接近的不同振型合成的复杂振动过程,并认为大的弯曲变形是由容器上的附加质量引起的(如容器上的法兰和接管)。Zhdan^[92] 认为抗爆容器壳体振动周期是内部压力载荷内振周期的整数倍时会引起两者谐振的发生,从而可能导致后续应变大于第一个周期的应变的发生。Karpp 等^[93] 对球形爆炸容器的应变测试结果也显现了明显的应变增长,他们采用 ADINA 软件对考虑法兰影响的球壳动力响应进行了数值模拟,其结果与测试结果吻合,说明法兰产生的弯曲效应是引起应变增长的一个重要原因。Belov 等^[94] 在球形抗爆容器的实验