

学校编码: 10384

分类号 _____ 密级 _____

学号: 200327008

UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

厦门海域水下工程爆破中的冲击波

监测与分析

Shockwave Monitoring and Analysis of Underwater Engineering

Explosion at Xiamen Harbor

于金花

指导教师姓名: 许肖梅教授

专业名称: 海洋物理

论文提交日期: 2006年7月

论文答辩时间: 2006年 月

学位授予日期: 2006年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2006年 7月

厦门大学学位论文原创性声明

兹提交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

2006年7月 日

摘要

随着海洋资源的开发利用和海洋经济的迅猛发展，水下爆破技术已越来越广泛地应用于港口建设、航道整治和水下建筑物拆除等水下工程项目中。同时水下爆破也会对海洋生态环境和海洋生物资源造成严重影响，近年来水下爆破冲击波对海洋哺乳动物的影响已引起世界范围内海洋生态环境保护界的广泛关注。厦门港是海洋哺乳动物中华白海豚的国家级自然保护区，随着厦门港口建设项目的增多，水下炸礁接连不断，对活动于该海域中的中华白海豚造成严重伤害，仅2004年下半年以来就在该海域发现6只死亡的中华白海豚，初步分析推测水下爆破冲击波可能是造成其死亡的主要原因。

本文构建了一套实用的水下爆破冲击波声学监测系统，对厦门港水下爆夯和水下钻孔爆破进行现场监测，并用2套数据分析软件对监测到的冲击波进行详细分析，为最大限度地降低水下爆破的负面效应，保护厦门海域中的中华白海豚做出积极的贡献。论文主要包括以下几个方面的内容：

- 1、简要介绍水下爆破的研究历史，以及水下爆破声学监测的国内外研究进展。
- 2、阐述水下爆破冲击波的能量传播特点，分析其对海洋生态环境的影响。
- 3、构建水下爆破冲击波声学监测系统并对其进行性能测试分析。
- 4、运用水下爆破冲击波声学监测系统对厦门海沧1号泊位和嵩屿1号泊位的水下爆夯及水下钻孔爆破进行海上现场监测。
- 5、运用PULSE声学振动分析软件及Matlab软件对监测结果进行分析，初步推算出厦门海沧港区水下爆夯冲击波峰压值估算公式及中华白海豚的最小安全距离。
- 6、针对水下爆破对中华白海豚的影响，本文还分析了中华白海豚和瓶鼻海豚的一些声学特性，为中华白海豚声学驱逐方式的研究提供依据。

本论文的创新之处在于构建了一套实用的水下爆破冲击波声学监测系统，用2套数据分析软件对监测到的冲击波进行分析，初步推算出厦门海沧港区水下爆夯冲击波峰压值估算公式及中华白海豚的最小安全距离，为渔业管理部门在厦门中华白海豚保护区内制定相关保护措施提供科学依据。

关键词：水下爆破；冲击波；声学监测

Abstract

With the exploitation of marine resources and the development of marine economy, underwater explosion have been widely used in ocean port construction, navigation channel dredging and removal of underwater construction. At the same time, underwater explosion can affect marine ecological environment and organisms seriously. In recent years impact of underwater explosion shockwave on marine mammals have attracted the attention of the world. Xiamen harbor is the national nature reserve of marine mammal---Chinese White Dolphin. With the increasement of Xiamen ocean port construction, rock blasting occurs continually, it makes serious effect on Chinese White Dolphin. Since the latter half of 2004, there have been 6 Chinese White Dolphins died in Xiamen sea area. It's presumed that underwater explosion shockwave maybe one of the immediate causes of death.

The paper focuses on designing an applied underwater explosion shockwave monitoring system, and analysis the data results of underwater explosion.. The main research contents are as follows:

1. Introduces the history of underwater explosion research and the development of underwater explosion monitoring at home and abroad.
2. Expatiates the characteristics of energy transmission of underwater explosion shockwave, and analyzes the effect on marine ecological environment.
3. Designs an underwater explosion shockwave acoustic monitoring system, and tests its property.
4. Monitors underwater explosion shockwave at Xiamen Haicang NO.1 berth and Songyu No.1 berth by the acoustic monitoring system.
5. Analyzes the recorded data of underwater explosion by software PULSE and Matlab, and primarily caculates the empirical formula of shockwave peak pressure and the minimum safe distance of Chinese White Dolphin in Xiamen sea area.
6. Analyzes acoustic characteristics of the Chinese White Dolphin and the Bottlenose

Dolphin.

The innovation of the paper is that it designs an applied underwater explosion shockwave acoustic monitoring system and primarily calculates the empirical formula of shockwave peak pressure and the minimum safe distance of Chinese White Dolphin in Xiamen sea area.

Key Words: Underwater Explosion; Shockwave; Acoustic Monitoring.

厦门大学博硕士论文摘要库

目 录

摘 要	I
Abstract	II
目 录	IV
Catalog	VI
第一章 绪论	1
1. 研究背景和意义	1
2. 水下爆破研究的国内外进展	2
第二章 水下爆破及其能量传播特点	5
1. 水下爆破及其分类	5
2. 水下爆破的能量传播特点	8
2.1 地震波	8
2.2 冲击波	10
2.3 气泡脉动	16
3. 浅海边界条件对水下爆破冲击波传播的影响	17
4. 水下爆破冲击波对周围环境的影响	19
第三章 水下工程爆破冲击波声学监测系统	23
1. 水下爆破冲击波声学监测系统工作原理	23
2. 水下爆破冲击波声学监测系统组成	24
3. 声学监测系统性能测试	30
第四章 爆破冲击波声学监测结果与分析	33
1. 工程概况	33
2. 水下爆破冲击波声学监测结果	36
3. 药包与测点之间的位置关系对爆夯冲击波的影响	39
4. 两个典型水下爆夯冲击波的比较	41

5. 不同测点所测的水下爆夯冲击波的比较	45
6. 水下爆夯和钻孔爆破的冲击波的比较	48
第五章 水下爆破安全距离及防护措施	50
1. 厦门海沧港区水下爆夯冲击波峰值估算	51
2. 水下爆破安全距离	52
3. 减轻水下爆破冲击波破坏效应的措施	56
第六章 中华白海豚声学保护初探	59
1. 海豚声信号的分类及特点	60
2. 厦门海底世界瓶鼻海豚声信号记录与分析	63
3. 厦门中华白海豚声信号记录与分析	69
附 录	74
参考文献	76
致 谢	78

Catalog

Abstract	II
Catalog	VI
Chapter One Introduction	1
1. Research Background	1
2. Research Status at Home and Abroad	2
Chapter Two Classification and Characteristics	5
1. Underwater Explosion and Classification	5
2. Energy Transmission Characteristics.....	8
2.1 Earthquake Wave.....	8
2.2 Shock Wave.....	10
2.3 Gas Bubble Pulsation.....	16
3. Impact of Shallow Sea Boundary Condition on Shockwave Transmission..	17
4. Impact of Underwater Explosion Shockwave on Environment	19
Chapter Three Acoustic Monitoring System	23
1. Principle.....	23
2. System Composition	24
3. Property Testing.....	30
Chapter Four Results and Analysis	33
1. Project General Situation.....	33
2. Acoustic Monitoring Results.....	36
3. Impact of Ubiety on Shockwave.....	39
4. Shockwave Comparison of Detonation in Open Water.....	41
5. Shockwave Comparison at different distance.....	45
6. Comparison of Detonation in Open Water and Contained Detonation.....	48

Chapter Five Safe Distance and Protective Measures	50
1. Empirical Formula	51
2. Safe Distance	52
3. Protective Measures.....	56
Chapter Six Protection Research of Chinese White Dolphin.....	59
1. Classification and Characteristics of Dolphin Acoustic Signal	60
2. Acoustic Signal Analysis of Bottlenose Dolphin	63
3. Acoustic Signal Analysis of Chinese White Dolphin	69
Appendix.....	74
References.....	76
Acknowledgement.....	78

第一章 绪论

1. 研究背景和意义

随着海洋资源的开发利用和海洋经济的迅猛发展，水下爆破技术已越来越广泛地应用于港口建设、航道整治和水下建筑物拆除等水下工程项目中。同时水下爆破也会对海洋生态环境和海洋生物资源造成严重影响。水下爆破时，由于水下动物体的密度和水的密度接近，冲击波在到达动物体与水交界面时一般会直接通过动物体向前传播。当动物体内有空气腔时，由于空气的可压缩性，冲击波通过时会导致空腔壁的撕裂或破碎，从而致使动物体受伤或死亡。

近年来水下爆破冲击波对海洋哺乳动物的影响已引起世界范围内海洋生态环境保护界的广泛关注。厦门港是海洋哺乳动物中华白海豚的国家级自然保护区，但由于厦门的中华白海豚保护区实行半封闭管理，随着厦门港口建设项目的增多，该海域内水下炸礁接连不断，对海洋生物，特别是海洋哺乳动物中华白海豚造成严重影响。仅 2004 年下半年以来，在该海域内就发现 6 只死亡的中华白海豚，初步分析推测水下爆破冲击波可能是造成死亡的主要原因。



图 1.1 死亡的中华白海豚

为最大限度地降低水下爆破的负面效应，减少水下爆破对海洋生物资源，特别是对海洋哺乳动物中华白海豚的影响，非常有必要对水下爆破冲击波的能量传播特点等进行深入的分析。为此本文构建了一套实用的水下爆破冲击波声学监测

系统，对厦门海沧 1 号泊位和嵩屿 1 号泊位等海域的水下爆夯及水下钻孔爆破进行海上现场监测，并运用 PULSE 声学振动分析软件及 Matlab 软件等对监测结果进行数据分析，初步推算出厦门海沧港区水下爆夯冲击波峰压值估算公式以及中华白海豚的最小安全距离，为渔业管理部门在厦门中华白海豚保护区内制定相关保护措施提供科学依据。

2. 水下爆破研究的国内外进展

水下爆破的应用已有悠久的历史。第二次世界大战结束前，水下爆破主要用于军事目的以及零星的水下炸礁工程，二战后随着世界各国经济的复苏，水下爆破技术开始广泛应用于民用建设。水下爆破在民用建设中的应用主要有港口码头建设，围堰、大坝的修建，港湾、运河、湖泊、航道的整治，水下建筑物的拆除等。

上世纪五十年代末，瑞典在开挖林多运河时，首次采用水下钻孔爆破法 (Overburden Drilling Method)，这种方法促进了水下爆破技术的发展，同时也为水下爆破的应用开辟了一个新的方向。随后前苏联、美国、英国、加拿大、意大利、日本等国纷纷将水下爆破技术应用于港口建设、河道整治以及跨海大桥建设等工程项目中。我国在广东黄浦港建设、葛州坝水电站大江上游围堰防渗墙拆除以及三峡大坝建设中也广泛采用水下爆破技术。由于水下工程爆破是直接在水环境中进行，省去了昂贵的围堰、基础防渗及基坑排水费用，降低了工程造价、缩短了总工期。众多的工程实践表明，水下爆破在国民经济建设中起着越来越重要的作用，并具有广阔的应用前景。

随着水下爆破在经济建设中的广泛应用，其中的许多问题引起工程应用部门、爆破学术界以及环境保护部门的普遍关注。诸如如何利用爆破能量对目标进行有效破坏；如何在复杂的水下爆破环境中对水工设施和建筑物采取有效的防护；如何最大限度地降低爆破负效应，减少水下爆破对海洋生物资源的影响。

上个世纪水下爆破的研究取得了丰硕的实验成果。其中，以 Bridgman, Cole^[1] 为代表的水下爆破研究实验室和 Woods-Hole 海洋地质学院的 Woods-Hole 实验室进行了系统的水下爆破冲击波的实验研究，其成果被广泛用来与水中冲击波传播理论计算相比较，或作为 Kirkwood-brinkley 理论近似计算的依据。Cole 还将研究成

果进行分析和整理，成为早期水下爆破研究最全面和最有价值的成果^[1]。

前苏联和捷克的研究者在水下爆破研究方面也取得了相当多的成果。鲍姆、萨多夫斯基、斯坦纽科维奇、雅可夫列夫等^[2]对水下爆破冲击波的传播、界面反射、折射作用等爆破流体动力学问题进行了系统的研究。

在水下爆破监测方面，上世纪四十年代中期，华盛顿海军研究实验室在波拖马可河上进行过水下爆破监测实验，研究了水下爆破冲击波的非线性传播特点^[3]。他们采用 0.3g 的雷酸汞和三硝基苯甲硝胺作为爆破源，在水深 1.4m，距离 1 到 0.3m 的近距离范围内，用压力传感器、宽带放大器和阴极射线示波器对水下爆破冲击波进行监测。

七十年代后期，美国马里兰州海军海面武器中心对 453.6kg 炸药的深海爆破进行了监测^[4]。他们采用电气压电传感器和 LC-32 水听器分别在 152.4m 和 304.8m 的深度处对爆破冲击波信号进行接收。接收到的信号最后被带宽 20kHz 的 Ampex FR-1300 磁带记录仪记录到磁带中。海上实验布局如图 1.2 所示。

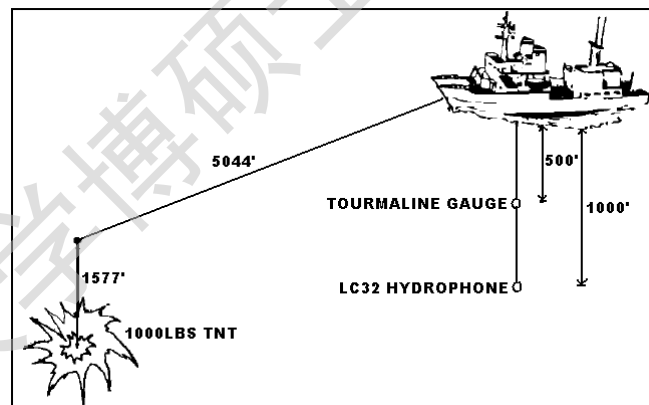


图 1.2 海上实验布局图

八十年代中期加拿大太平洋军事防御研究中心在 18.3m 和 183m 的距离处对 0.82kg SUS 炸药的深海爆破冲击波进行监测，研究了冲击波峰压、最小负压、时间常量、脉冲持续时间、正负冲击等实验参数^[5]。他们在 305m 或 480m 深度处用半径 7mm 的 BC-32 深水水听器接收爆破冲击波信号，接收到的爆破冲击波信号经前置放大，3Hz-20kHz 带通滤波，15bit、采样率 50kHz 的 AD 转换后，被磁带记录仪记录到磁带中。海上实验布局如图 1.3 所示。

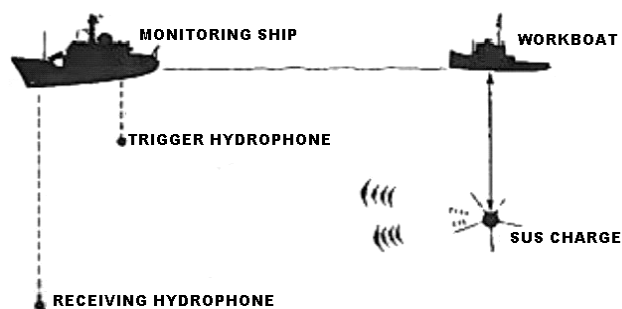


图 1.3 海上实验布局图

我国的研究者在水下爆破和冲击波监测方面也开展了相应的工作，其中长江科学院^[6、7、8]、水利水电科学院^[9]、中科院力学所^[10]、铁道部科学研究院^[11、12]等研究单位结合长江、珠江、黄浦港、三峡工程等水下工程爆破对水下爆破冲击波传播规律及爆破防护等问题进行了研究。

第二章 水下爆破及其能量传播特点

1. 水下爆破及其分类

水下爆破是指爆破目标处于水面以下，爆破作业和爆破效果受到水环境影响的特殊的爆破方式。水下爆破在疏通航道、开挖运河、兴建港口以及修筑堤坝中，具有无可替代的作用。欧美海洋工程的开发速度很快，水下爆破技术起了很大作用。

与陆地爆破相比，水下爆破需要更加谨慎和更为周密的方案。水下爆破时，由于受水流和波浪等因素影响，钻孔和装药比陆地爆破的要复杂得多。

(1) 水下爆破的基本分类

按爆破作用性质和药包位置，水下工程爆破通常分为水中爆破（爆夯）、水底裸露爆破和水下钻孔爆破三种。

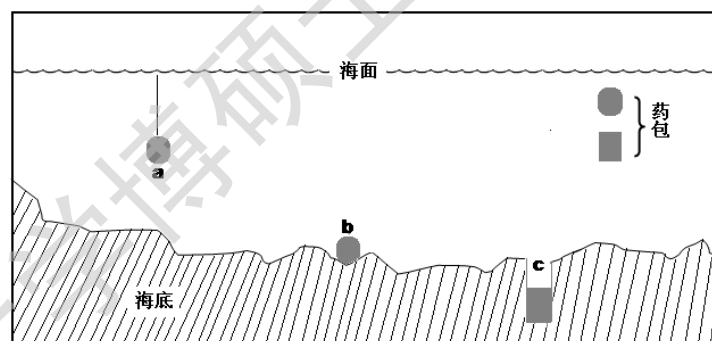


图2.1 水下爆破的基本类型

a-水中爆破 b-水底裸露爆破 c-水下钻孔爆破

① 水中爆破

该爆破方法是将药包悬挂在水面以下，在与水底有一定距离的水中进行爆破。水中爆破是利用药包爆破时产生的强大冲击波及气体膨胀压力，使位于水底的块石或砂卵石孔隙中的水分被强制挤压出来，使得块石或砂卵石被震密实，从而达到增加水深或夯实基床的目的。因此水下爆破又被称为水下挤压爆破。

水中爆破时，药包周围的水将直接受到高温、高压的爆破产物的作用，其压力、密度和温度突跃升高，形成初始冲击波。

当水中爆破冲击波到达水底时，一部分被反射，一部分沿着固体颗粒和孔隙水传到土层中，破坏疏松的、稳定性差的土壤结构。随着较长的颗粒移动过程，水逐渐从土的孔隙中挤出。加上爆破时产生的气泡在向水面运动的过程中形成脉动，从而产生水锤效应，进一步夯实土体。

爆破冲击波产生后，爆破产物仍以低于冲击波的速度向四周运动，在水中以气泡的形式存在并继续膨胀，推动周围的水作径向流动。气泡内的压力随着体积膨胀而不断下降，当降至周围介质的静压后，由于水流的惯性运动，周围的水开始反向运动，向中心聚合压缩气泡，气泡内的压力又逐渐高于周围静压力，直到气体的弹性阻止气泡压缩，达到新的平衡为止。这是气泡脉动的第一次循环。

但是，此时气泡的压力仍比周围水介质的静压力大，产生第二次膨胀和压缩循环过程，形成气泡脉动，产生附加脉动压力。在每次收缩过程中，气泡都要失去能量，在其直径达到最小瞬间进入水中。经过两次压缩后，气泡中的能量就只剩下很小的一部分。由于炸药大部分的有用机械能传播给一次冲击波，所以气泡作用效果一般都很小，不能对炸药附近的结构物做有效功。

在浅水区爆破时，爆破气体迅速突入大气在水面形成喷柱，因此一般不会产生气泡脉动现象。

② 水底裸露爆破

水底裸露爆破又称岩面爆破，是将药包安放到水下爆破的目标物表面进行爆破，主要是利用炸药的猛度去破碎物体。这种方法所需施工设备简单，操作容易，机动灵活，是常用的水下爆破方法。但由于它是表面爆破，能量散失在水中的比例较大，爆破效果较差，往往要进行多次重复爆破才能达到预期目的，因此其应用范围受到限制。水底裸露爆破主要用于爆破零星的、单块体积不大的水底块石、孤石、暗礁，清除沉积障碍物，以及松动紧密胶结的砂卵石层等。

水底裸露爆破时，爆破药包产生的能量大部分（约 60~70%）消耗于破碎和抛掷岩块，小部分（约 30~40%）释放到水中，转变为水中传播的冲击波。

③ 水下钻孔爆破

水下钻孔爆破是通过在岩层中钻孔装炸药进行水下爆破。这种方法能充分利用炸药的爆力和猛度去破碎物体，因此爆破效果好，单体耗药量小，产生冲击波小。随着水下爆破施工技术的日益发展，这种方法在工程量大或深水下的岩层开

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库