



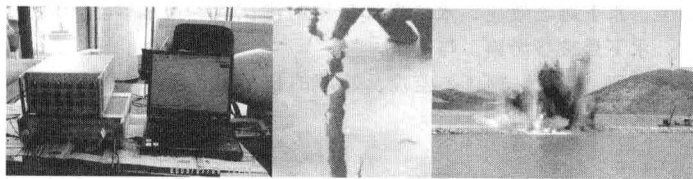
SHUIXIA BAOPO JISHU

水下爆破技术

梁向前 编著



化学工业出版社



SHUIXIA BAOPO JISHU

水下爆破技术

梁向前 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书系统阐述了水下爆破技术的理论研究、科研成果和工程实践经验,主要包括:水下爆破理论、水下爆破施工、水下爆破效应、水下爆炸压密防渗试验、饱和砂土的爆炸液化试验、黄河大堤安全试验、水下爆破挤淤施工与安全。

本书可供工程爆破的科研、设计、施工、监理及管理的技术人员使用,也可作为高等院校有关爆破专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

水下爆破技术/梁向前编著. —北京:化学工业出版社, 2013.11

ISBN 978-7-122-18921-9

I. ①水… II. ①梁… III. ①水下爆破 IV. ①TB41

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第263645号

责任编辑:袁海燕

文字编辑:徐雪华

责任校对:蒋宇

装帧设计:刘丽华

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:北京云浩印刷有限责任公司

710mm×1000mm 1/16 印张11½ 字数214千字 2013年11月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686)

售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:58.00元

版权所有 违者必究

前言

在水利水电工程建设中常应用水下爆破技术实施水下岩石基础开挖、岩塞、围堰爆破等，在港口码头建设中多应用于河道整治、航道扩建、水下软弱地基处理等，在国防工程中水下爆破技术除应用于国防工程建设外，还利用水中爆炸能量来研究水下军事设施及大型舰船的抗爆与防护研究。因此，随大型基础设施及国防建设的发展，水下爆破理论与技术日趋成熟，应用领域越加广阔。

中国水利水电科学研究院多年从事爆炸与防护科学研究、工程爆破技术服务。建造了爆炸模拟试验室，有 1.0kg TNT 当量的爆炸洞和水中爆炸小型钢板水池等。先后承担了三峡工程安全防护、定向爆破筑高坝、水中爆炸相似率试验、海军水面爆炸专项试验、核试验场模型水坝抗爆试验，丰满水库岩塞爆破、葛洲坝大江围堰混凝土心墙爆破拆除、南水北调穿黄隧洞爆破试验、砂土爆炸液化现场试验，宝钢马迹山港扩建工程等众多科研、试验、工程项目，积累了宝贵的水下爆破科研数据资料和工程实践经验。

本书以中国水利水电科学研究院历年来的水下爆破科学研究成果为基础，结合水下爆破技术应用发展成果，完成全书的编写工作。本书前三章较为详细地阐述了水中爆炸相似率、水面爆炸冲击波特性，水下爆破器材与起爆网路、水下爆破各类型的适用特点和设计施工，水中冲击波效应、水下爆破地震效应的特点、安全控制、测试分析，并重点归纳总结了水中冲击波压力实测成果，对水下爆破的其他效应及生态环境保护作了简要论述。后四章以中国水利水电科学研究院的科研成果为重点，论述了水下爆炸压密防渗试验、饱和砂土的爆炸液化试验、南水北调穿黄隧洞爆破对大堤安全试验、水下爆破挤淤施工与安全，突出了科研试验和工程应用成果。

在本书的编写过程中，参考了有关专著、论文的内容，谨向文献资料的作者表示诚挚的谢意！引用到的中国水利水电科学研究院的文献资料，为爆炸模拟试验室有关同仁的辛勤付出和科学提炼，谨向文献资料的作者表示深切感谢！编写中得到陆遐龄教授、张永哲教授的热心指导，在此表示诚挚的感谢！

本书得到了国家科技支撑计划（2011BAK09B00）和国家自然科学基金重点项目（51339006）的资助，在此表示感谢！

限于编者水平，书中难免有不妥之处，敬请读者指正！

编者
2013 年 9 月

目录

第1章 水下爆破理论

»»»»»»»»»»

1.1 水下爆破概述

- 1.1.1 水的物理力学特性 2
- 1.1.2 水下爆破类型 3

»»»»»»»»»»

1.2 水中爆炸相似律

- 1.2.1 水中冲击波的特性 4
- 1.2.2 气泡的运动及二次压力脉动 8
- 1.2.3 水中冲击波的反射 11
- 1.2.4 水中爆炸相似律研究 13

»»»»»»»»»»

1.3 水面爆炸

- 1.3.1 一般描述 17
- 1.3.2 水面爆炸的冲击波特性 20
- 1.3.3 水面爆炸对水工结构及舰船的影响 28

第2章 水下爆破施工

»»»»»»»»»»

2.1 抗水性炸药

- 2.1.1 概述 32
- 2.1.2 乳化炸药 32
- 2.1.3 铵梯炸药 36

2.2 水下起爆网路

- 2.2.1 导爆管起爆网路..... 38
- 2.2.2 数码电子雷管起爆网路..... 41
- 2.2.3 高精度导爆管起爆网路..... 43
- 2.2.4 水下起爆网路注意事项..... 44

2.3 水下裸露爆破

- 2.3.1 适用特点..... 45
- 2.3.2 爆破设计..... 45
- 2.3.3 爆破施工..... 46

2.4 水下钻孔爆破

- 2.4.1 适用特点..... 48
- 2.4.2 爆破设计..... 48
- 2.4.3 爆破施工..... 51
- 2.4.4 典型工程实例..... 52

2.5 水下软基爆破

- 2.5.1 水下爆破挤淤..... 55
- 2.5.2 水下爆破夯实..... 59
- 2.5.3 典型工程实例..... 61

2.6 水下岩塞爆破

- 2.6.1 概述..... 63
- 2.6.2 爆破设计..... 64
- 2.6.3 爆破施工..... 67
- 2.6.4 典型工程实例..... 68

第3章 水下爆破效应

3.1 水中冲击波效应

- 3.1.1 水中冲击波特点..... 74

3.1.2	水中冲击波安全控制·····	74
3.1.3	水中冲击波测试·····	76
3.1.4	水中冲击波压力实测·····	79

>>>>>>>>

3.2 水下爆破地震效应

3.2.1	水下爆破地震特点·····	82
3.2.2	水下爆破振动安全控制·····	82
3.2.3	爆破振动测试·····	83
3.2.4	爆破振动数据处理·····	85

>>>>>>>>

3.3 水下爆破其他效应

3.3.1	爆破振动液化·····	87
3.3.2	爆破涌浪·····	88
3.3.3	爆破飞散物·····	89
3.3.4	空气冲击波与噪声·····	90

>>>>>>>>

3.4 水下爆破生态环境保护

3.4.1	水下爆破对水生物的危害·····	91
3.4.2	水下爆破对水质影响·····	92
3.4.3	对水生物的保护·····	93

第 4 章 水下爆炸压密防渗试验研究

>>>>>>>>

4.1 概述

>>>>>>>>

4.2 水下爆炸压密防渗机理

4.2.1	爆破堆石坝的渗流特性·····	96
4.2.2	水下爆炸压密防渗的机理·····	97

>>>>>>>>

4.3 水下爆炸压密防渗试验

4.3.1	红黏土爆炸压密试验·····	98
4.3.2	二次压密效果试验·····	100
4.3.3	红黏土压密后的渗透试验·····	101

4.3.4 水下爆夯处理上游面堆石坝与铺盖 103

4.3.5 压力波在爆夯介质中的传递特性 104

4.3.6 水中爆夯的能量利用及药包布置 105

>>>>>>>>

4.4 小结

第 5 章 饱和砂土的爆炸液化试验研究

>>>>>>>>

5.1 概述

>>>>>>>>

5.2 饱和砂土的爆炸波压力

>>>>>>>>

5.3 饱和砂土的爆破振动

>>>>>>>>

5.4 饱和砂土的爆炸液化

>>>>>>>>

5.5 爆炸夯实

>>>>>>>>

5.6 小结

第 6 章 黄河大堤安全试验研究

>>>>>>>>

6.1 概述

6.1.1 工程概况 122

6.1.2 爆破试验参数 122

>>>>>>>>

6.2 爆破振动监测

6.2.1 监测仪器布置 123

6.2.2 振动监测成果分析 124

6.2.3 黄河大堤振动安全评价 133

>>>>>>>>

6.3 砂土孔隙水压力监测

6.3.1 仪器布置及埋设 134

6.3.2 压力测试成果分析 135

>>>>>>>>

6.4 黄河大堤位移变形监测

6.4.1 仪器安装及埋设 138

6.4.2 位移变形安全分析 139

>>>>>>>>

6.5 小结

第 7 章 水下爆破挤淤施工与安全

>>>>>>>>

7.1 概述

7.1.1 工程概况 148

7.1.2 工程地质特征 148

>>>>>>>>

7.2 爆破挤淤设计施工

7.2.1 爆破参数设计 149

7.2.2 爆破挤淤施工 150

>>>>>>>>

7.3 爆破挤淤安全监测

7.3.1 监测对象 153

7.3.2 安全控制标准评估 153

7.3.3 爆破挤淤振动监测 154

7.3.4 爆破挤淤水中冲击波监测 162

>>>>>>>>

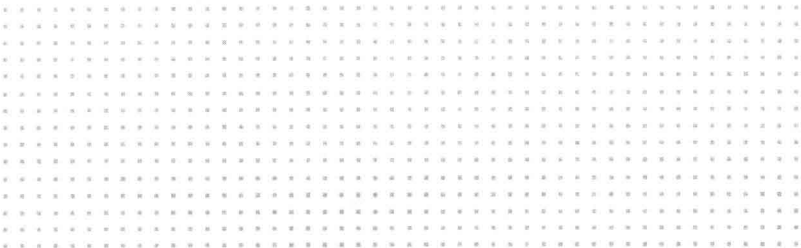
7.4 爆破挤淤质量监控

7.4.1 施工质量控制 170

7.4.2 施工安全控制措施 171

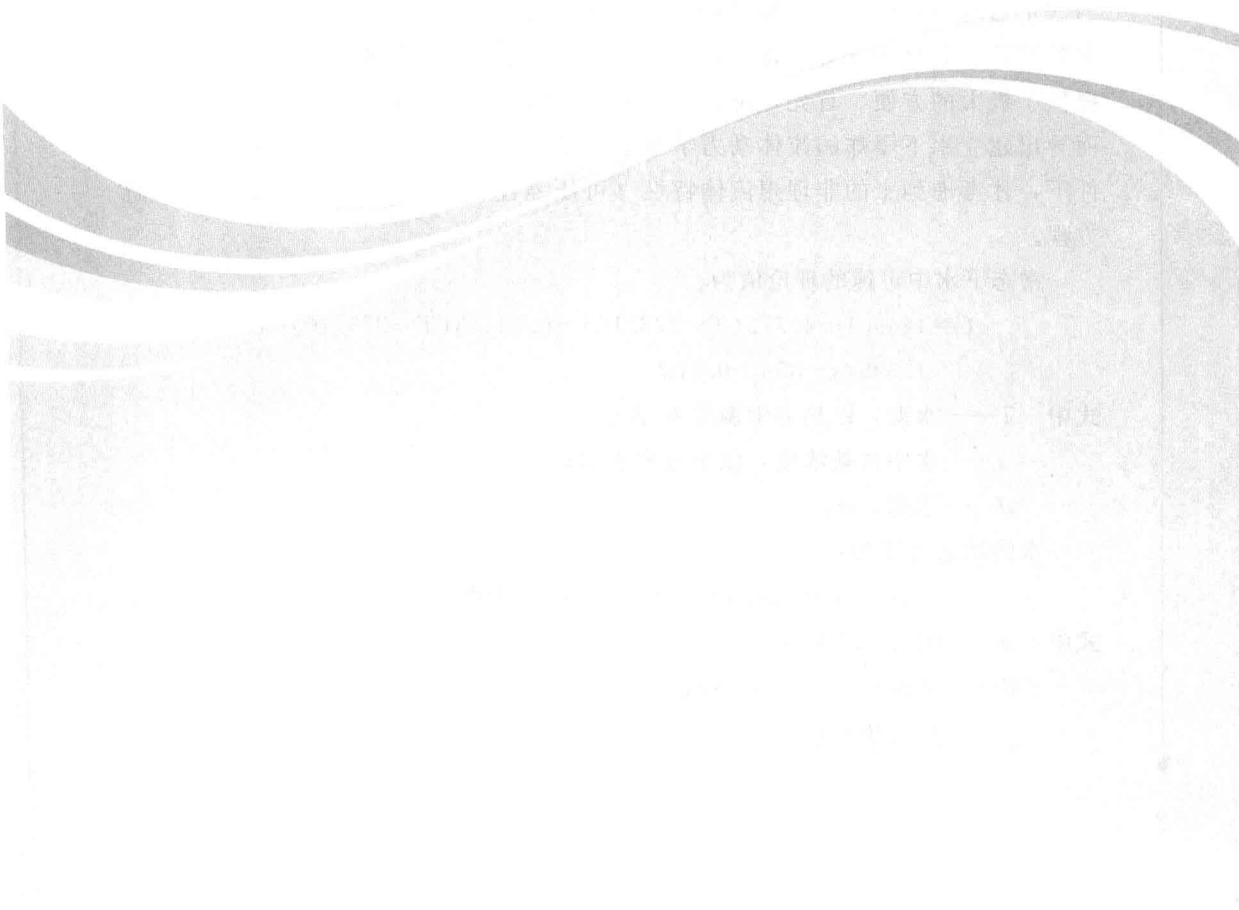
7.4.3 安全管理监控措施 172

参考文献



第1章 <<<<<<<<

水下爆破理论



1.1 水下爆破概述

1.1.1

水的物理力学特性

水通常处于流体状态,具有流体的静力学和动力学的特性,是连续介质,但并不是理想流体,它具有黏性,在高压下也有一定的压缩性,在水温为 4°C 、大气压力为标准大气压时,水的密度为 $1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,比空气的密度要大 800 多倍,因此水中爆炸与空气中爆炸时产生的诸多爆炸特征是有很大差异的。水中声速约为 $1500 \sim 1520 \text{ m/s}$,但在爆炸点周围,由于高温高压,所以波速会增大,甚至高达几倍声速数值。研究表明,由于水的均质连续性及体积压缩系数极小(压缩模量约为 $2.07 \times 10^7 \text{ MPa}$)等特性,在压力小于 180 MPa 的范围,当假定为理想流体时(均质各向同性、连续介质、无压缩性、没有表面张力、无黏滞性、无热传导等)符合声学规律,这为水中爆炸的理论研究和试验验证提供了极大的方便。首先,可以依据质量守恒、动量守恒和能量守恒三大定律而导出建立水下爆炸的流体动力学基本方程及波动分析理论等。而在极特殊条件下,才考虑到水的非理想流体特性(可压缩性、黏性等)而导出其他的求解方程。

常态下水中声速的理论值为:

$$C = 1449.1 + 4.572(T - 273.16) - 0.04453(T - 273.16)^2 + 1.398(s - 35) + 0.17d$$

式中 T ——水温,以热力学温度 K 表示;

s ——水中含盐浓度,以千分率表示;

d ——水深, m 。

水的状态方程为:

$$p = (109 - 93.7V)(T - 348) + 5010V^{-5.58} - 4310$$

式中 p ——压力, 10^5 Pa ;

V ——比体积, $10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$;

T ——热力学温度, K 。

这说明水中声速是与水温、含盐浓度及水的深度有关，水的压力是与比容和绝对温度有关。

液态水在温度低于 0°C 时，将凝结为冰转化为固态，其密度为 $0.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，较水轻，所以结冰膨胀会破坏沿岸的堤坝、管道等，河道会出现浮冰运动、冰凌灾害等。液态水在 100°C 时，将会沸腾而转化为气态。

1.1.2

水下爆破类型

爆炸现象依照爆炸的物质区分，最常见的为各种化学炸药的化爆，其他有原子武器的核爆、科学试验及特殊行业的种种爆炸形式，如高电压金属丝水中爆炸、水下爆炸切割、高压氢气炮爆炸等，还有自然界的雷电爆及岩爆等形式。

根据化学爆炸装药的入水深度，从而导致炸药能量的不同分布形式及产生的水中冲击波的不同特性等情况以及接触的介质而划分，水下爆破大致可划分为符合一定条件的典型的水下爆破、浅水爆破、水面爆破、水中接触爆破等。

水下爆破：装药在具有足够水深条件且假设周边无阻碍干扰的水域内爆炸，此时炸药能量全部在水中耗散，产生最强的水中冲击波，而在水表面几乎看不到任何爆炸现象。

浅水爆破：由于水深较浅，炸药爆炸时部分能量冲出水体，在空气中释放，甚至会产生空气冲击波，而在水面上可见由冲击波引起飞溅的羽状水柱，爆炸生成物形成的气泡也会由接近表面而最终突入大气中。此时水中冲击波会随药包距自由表面的距离愈小而强度大大减弱，水中冲击波的传播也会受到水面反射切割的影响而波形畸变，其水中冲击波能量也会大大减少。工程施工中，常见的水下钻孔爆破、挤淤爆破等均属于浅水爆破作业。

水中接触爆破：一般有水下炸礁、清理水下障碍物及沉船等，此时裸露药包直接放置在被炸除物处，除产生水中冲击波外，还有较强的地震波传播，爆炸能量分布视爆破条件而有较大差异并较复杂，除用以破碎介质耗散的能量外，其余能量将以地震波及水中冲击波等形式耗散。

水中接触爆破的另一类型是水面接触爆炸，药包或海战武器在水面附近的一定距离处爆炸将会同时产生空气冲击波和水中冲击波，此时在界面处波的反射、折射极其复杂。当药包在距水面上方的一定距离内爆炸时，仍会产生水中传递的冲击波，所以水面爆炸的波系是极其复杂的，还有爆轰产物及气泡运动对建筑结构、舰船的共同作用等。

1.2 水中爆炸相似律

当装药在无限均匀而静止的水中爆炸时，炸药内高温高压的爆炸生成物以爆轰波的形式急剧的向外推进并产生压力的突跃，在水中，由于水的密度大、可压缩性小，所以其波头的压力可高达 $1.4 \times 10^4 \text{ MPa}$ (TNT 药包)，在药包和水的界面立刻开始转化为水中的强压波和水的扩散运动，这种以压缩波形式在水中做径向传播并具有陡峭波头的压力波，通常称为水中冲击波，所以研究炸药爆轰和在水中产生扰动及水中冲击波传播的过程及特性，是水下爆炸理论研究的基础。

1.2.1

水中冲击波的特性

在水中当炸药爆轰后产生的水中冲击波以压力突跃的形式向外传播时，其特点是压力大、作用时间短（同类炸药比较，约为空中爆炸的 $1/100$ ），而且压力上升前缘一般仅为微秒级范围，突跃后紧接着是近似按指数规律的变化衰减，重 137 kg 的梯恩梯球形药包在水下爆破的压力分布曲线见图 1-1。

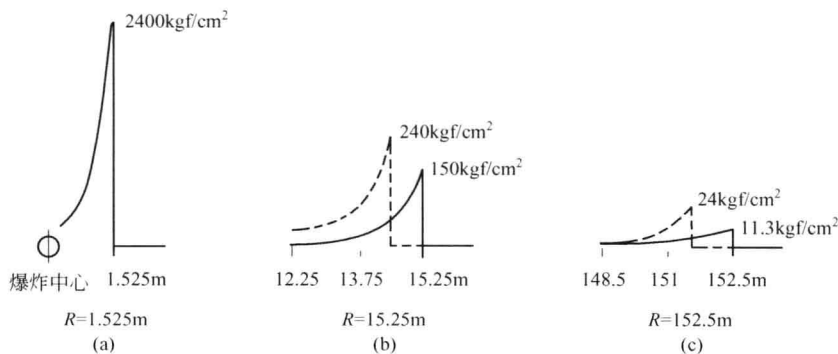


图 1-1 典型的水中冲击波波形

($1 \text{ kgf/cm}^2 \approx 0.1 \text{ MPa}$)

水中冲击波的传播具有以下特点：

- ① 药包附近冲击波的传播速度比水中音速值（约 1520 m/s ）大数倍。随着

波的推进冲击波速迅速下降至音速。

② 球面冲击波的压力幅度随距离的减小，比在声学里的微幅波要快。但是，实际上在较大距离处的压力变化特征接近声学规律。

③ 在药包附近的高压区，波形的钝化特别显著。波形随着传播而逐渐扩展。图 1-1 中图 (b)、(c) 表示距离为 15.25m 和 152.5m 的波形，而虚线表示了声速规律传播的理论曲线。

伦金-苟郭尼欧根据冲击波波头内质量守恒、动量守恒和能量守恒条件推导出了求解波头后压力密度和流速的三个方程式：

$$\rho_0 (U - u_0) = \rho (U - u) \quad (1-1)$$

$$\rho_0 (U - u_0) (u - u_0) = p - p_0 \quad (1-2)$$

$$pu - p_0 u_0 = \rho_0 (U - u_0) \left[E - E_0 + \frac{1}{2} (u^2 - u_0^2) \right] \quad (1-3)$$

以上三式中， p_0 、 ρ_0 、 E_0 、 u_0 分别为未经扰动水介质的压力、密度、内能和质点速度； p 、 ρ 、 E 、 u 则是冲击波阵面通过后瞬间的压力密度、内能和质点速度； U 为水中冲击波波阵面的速度。

当波头前假定水是未受扰动的，则 $u_0 = 0$ 。

$$\rho (U - u) = \rho_0 U \quad (1-4)$$

$$p - p_0 = \rho_0 U u \quad (1-5)$$

$$E - E_0 = \frac{1}{2} (p + p_0) \left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \right) \quad (1-6)$$

以上关系式是在不计冲击波波头厚度的极限条件下导出的，适用于平面波和球面冲击波。

假定波头前未受扰动流体的 p_0 和 ρ_0 值已知时，则由上述方程的第三个方程可确定出紧接波头后的 p 和 ρ 的关系。即压力和密度间的伦金-苟郭尼欧方程式：

$$U = \sqrt{\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) \frac{p - p_0}{\rho - \rho_0}} \quad (1-7)$$

$$u = \frac{p - p_0}{\rho} U \quad (1-8)$$

根据以上方程，当冲击波在未受扰动的流体中移动时，根据压力密度和流速随波头前的相应值而变化，即可求得高压区内任意点处水的特征数值。基尔克乌特和别泽在流体动力学基本方程中又引入流体内能、焓的变量后提出了气球表面条件的水中冲击波传播理论，忽略了熵对热焓的影响，对高压区强冲击波波头进行了计算，曾对温度为 0℃、20℃、40℃，压力在 5000MPa 的纯水和压力在 8000MPa 的海水进行了计算，结果表明其差别不大，这里只给出了对盐水（海水）的计算结果，同时也对弱冲击波波头进行了计算，见表 1-1。

表 1-1 盐水中弱冲击波波头的参数

p/MPa	$\frac{U-c_0}{c_0}/\%$	$u/(\text{m/s})$	$\Delta H/(\text{cal/g})$
当压力不超过 150MPa,初温为 15℃,声速为 1500.5m/s 时			
25	2.07	15.1	5.8
50	4.03	31.2	11.5
75	5.93	46.2	17.2
100	7.81	60.5	23.0
125	9.65	74.4	28.5
150	11.44	87.7	34.1
当压力不超过 1400MPa,初温为 25℃,声速为 1528.5m/s 时			
100	8.18	59.2	23.0
200	15.39	110	45.3
300	21.9	158	67
400	27.8	201	89
600	38.6	278	131
800	48.1	346	173
1000	56.7	409	214
1200	64.7	467	255
1400	72.3	511	293

注：1cal=4.18J。

表 1-2 中所列的是当海水的初温为 20℃且压力不超过 8000MPa 时的计算结果，其曲线示于图 1-2。在压力不超过 1500MPa 时，状态各参数值可由表 1-1 和图 1-3 求出。对于大于 2500MPa 的数据多由状态方程外推的，数值是近似的。

表 1-2 盐水中强冲击波波头的参数

p/MPa	$u/(\text{m/s})$	$\sigma/(\text{m/s})$	$U/(\text{m/s})$	$c/(\text{m/s})$	$\Delta T/^\circ\text{C}$	$\Delta S/[\text{cal}/(\text{g}\cdot^\circ\text{C})]$
0	0	0	(1465)	(1465)	0	0
500	251	249	1975	2230	15.7	0.0045
1000	426	416	2335	2755	35.5	0.019
1500	567	549	2630	3175	53	0.038
2000	689	663	2880	3535	69	0.060
2500	798	765	3110	3855	85	0.082
3000	898	859	3320	4140	100	0.102
3500	990	947	3510	4405	114	(0.120)
4000	1075	1030	3690	4650	127	(0.138)
5000	1235	1185	4020	5100	152	(0.174)
6000	1380	1330	4325	5505		
7000	1510	1465	4610	5880		
8000	1625	1600	4885	6240		

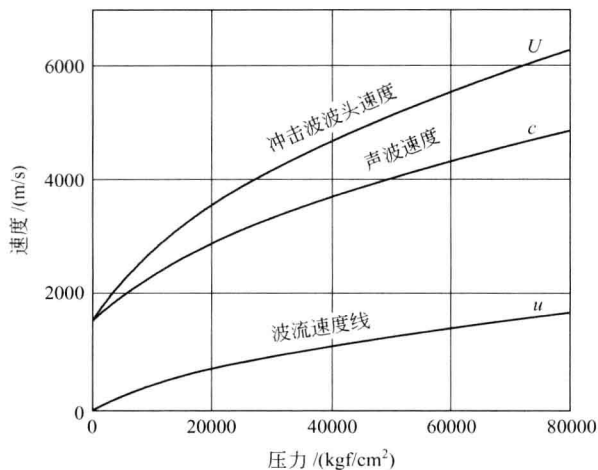


图 1-2 冲击波头速度与压力的函数关系 (高压区)

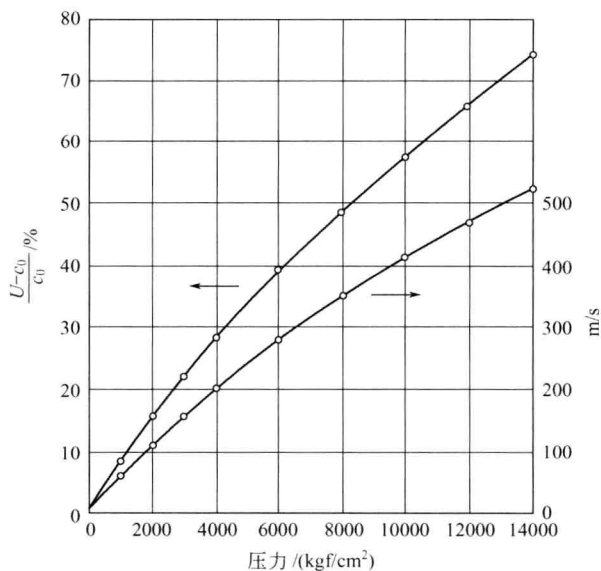


图 1-3 冲击波头速度与压力的函数关系 (低压区)

在以上讨论的水中冲击波波头后的压力、密度和流速的计算中,均为考虑不同条件时的近似计算结果。实际上对于 TNT 炸药,在装药半径的 2 倍距离处,即可产生 2500MPa 的高压力,水在这种情况下实际上是处于一种介稳状态。

而在工程建设、军事理论研究及实际应用、控制等方面,水下爆破讨论最为广泛、最具现实意义并经大量试验和检测的是在低压区范围,基本符合声学近似

规律条件下的诸多参数。

水中冲击波的主要参数值有最大压力值、压力作用时间（时间常数）和表征冲击波功能的比冲量及能流密度等。美国 P. 库尔根据诸多学者对几种不同炸药的相似律研究，其主要参数计算式及计算系数列于式(1-9)~式(1-12) 及表1-3 中，给出了的相关经验计算公式（炸药为 TNT）为：

$$\text{峰值压力} \quad p_m = k \left(\frac{Q^{1/3}}{R} \right)^\alpha \quad (1-9)$$

$$\text{比冲量} \quad i = l Q^{1/3} \left(\frac{Q^{1/3}}{R} \right)^\beta \quad (1-10)$$

$$\text{能流密度} \quad E = m Q^{1/3} \left(\frac{Q^{1/3}}{R} \right)^\gamma \quad (1-11)$$

$$\text{时间常数} \quad \theta = 10^{-4} \cdot Q^{1/3} \left(\frac{Q^{1/3}}{R} \right)^\eta \quad (1-12)$$

式中 Q ——装药质量，kg；

R ——到爆炸中心距离，m；

k 、 α 、 l 、 β 、 m 、 γ 和 η 由试验确定。

上式适用于 $7 < R/r_0 < 900$ 。各种炸药的试验资料见表 1-3。

表 1-3 水中冲击波计算系数

炸 药	压力峰值 p_m		冲量 l		能流密度 E_i		时 间
	k	α	l	β	m	γ	
梯恩梯 (相对密度 1.52)	533 (640)	1.13 (1.21)	0.0588 (0.0604)	0.89 (0.86)	83 (130)	2.05 (2.11)	6.7 θ
粉状特屈儿 (相对密度 0.93)	520 (607)	1.15 (1.22)	0.0643 (0.0558)	0.98 (0.86)	100 (107)	2.10 (2.04)	5.0 θ
偏托里特 (相对密度 1.60)	555 (704)	1.13 (1.33)	0.0926 (0.070)	1.05 (0.88)	106 (137)	2.12 (2.11)	6.7 θ

注：表内括号中的数值是按基尔克乌特-别泽理论计算得出的，其余为同密度球形药包的实验值。

1.2.2

气泡的运动及二次压力脉动

当高速传递的冲击波离开后，爆炸产物气团的压力、温度仍然大大超过周围平衡流体的静压值。因此，它以气泡运动的形式继续膨胀，而气泡直径也在膨胀中急骤增加，推动周围的水体做径向运动。而气泡内的压力随着膨胀而不断下降，当降到周围介质的静压力时，并不停止，由于水流的惯性运动，气泡作过度膨胀，一直到最大半径。这时，气泡内的压力低于周围介质的平衡压力（它是大