

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.01.001

## 水下爆破技术发展\*

赵 根,黎卫超

(长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室,武汉 430010)

**摘 要:** 为梳理水下爆破技术的发展脉络,总结水下爆破技术的最新成果,在查阅大量文献资料的基础上,结合参与的大型工程实践经验和研究成果,从水下爆破机理、水下爆破器材、水下爆破设计及优化等方面详细介绍了水下爆破技术的最新研究进展。重点介绍了各时期水下爆破新技术在水下炸礁爆破、水下岩塞爆破、围堰拆除爆破等工程中应用的典型案例。可为水下爆破新技术在港口码头建设、水运航道疏浚、水利水电水下爆破拆除、交通桥梁水下爆破施工等工程领域的应用提供参考。

**关键词:** 水下爆破;爆破器材;水下炸礁;围堰拆除爆破;岩塞爆破

**中图分类号:** TD235 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2020)01-0001-12

## Development of Underwater Blasting Technology

ZHAO Gen, LI Wei-chao

(Changjiang River Scientific Research Institute, Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of MWR, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** This paper sorts out the development of underwater blasting technology and summarizes the latest achievements based on a large amount of literature, large-scale engineering practice experiences and research results. The latest research progress of underwater blasting technology is introduced in detail from the aspects of underwater blasting mechanism, underwater explosive materials, underwater blasting design and optimization, with emphasis on the underwater reef blasting, underwater rock-plug blasting, cofferdam demolition blasting and other typical cases in various periods. This paper can provide reference for the application of new underwater blasting technology on port construction, waterway dredging, underwater blasting demolition of water conservancy and hydropower, underwater blasting construction of traffic bridge and other fields.

**Key words:** underwater blasting; explosive materials; underwater reef blasting; cofferdam demolition blasting; underwater rock-plug blasting

爆破介质有一个及以上的临空面在水面以下的爆破施工称之为水下爆破。水下爆破是爆破工程中的一个重要分支,按装药形式与水域条件的差异,水下爆破可分为深水爆破、浅水爆破、近水面爆

破、水底裸露爆破、水下钻孔爆破、水下硐室爆破以及挡水体爆破<sup>[1-3]</sup>。水下爆破起源于军事领域的水下爆炸研究,美国人 R. H. Cole 根据大量的水下爆炸试验,对水下爆炸的物理现象、化学变化特性、爆炸机理和 underwater 爆炸载荷的传播及分布特点进行了研究和总结,形成了比较系统的理论,并于 1948 年出版了《水下爆炸》一书<sup>[4]</sup>。之后几十年,人们在水下爆炸基础理论研究方面仅限于局部的修正或补充,基本上未突破《水下爆炸》一书所奠定的理论框架,其总结的半理论半经验公式至今仍被广泛使用。第二次世界大战以后,英、美、瑞典、日本等国

收稿日期:2020-02-03

**作者简介:** 赵 根(1965-),男,江苏海门人,长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室,教授级高级工程师、博士,主要从事工程爆破设计、科研、安全评估及技术咨询等工作,(E-mail)wuh\_zhaogen@126.com。

**通讯作者:** 黎卫超(1987-),男,湖北荆门人,长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室,工程师、硕士,主要从事工程爆破设计、爆破安全监测、安全评估等工作。

**基金项目:** 中央基本科研业务费一类项目(CKSF2019193/YT)、中央基本科研业务费二类项目(CKSF2019477/YT)

将水下爆破技术广泛地应用于港口码头、航道清礁疏浚和水利水电工程等建设过程中,同时积极开展水下爆破技术研究。

1962年7月,我国山西长治的漳泽水库上游突降暴雨,库水位急升至距坝顶1.74 m处,水利部门联合部队首次采用水下爆破技术成功拆除进水塔底部钢筋混凝土结构,进行应急抢险<sup>[5]</sup>,从此拉开了我国水下爆破技术发展的序幕。1968–1972年,广东航道局等单位组织了专业水下爆破炸礁队,对黄埔航道长约2 km、49.6万m<sup>3</sup>的水中礁石首次采用水下爆破技术进行炸除,并创造了一套全新的水下深孔爆破水上作业设计、施工工艺,被誉为“黄埔水下爆破法”<sup>[6]</sup>。1971年在辽宁省开原县清河水库,采用洞室与钻孔相结合的方案,成功实施了我国首例水下岩塞爆破工程,岩塞厚度12 m、直径6.0 m,总装药量1190.4 kg<sup>[6]</sup>。1986年在葛洲坝水电站上游围堰防渗墙水下爆破拆除中,炮孔多达3548个,总装药量47.78 t,最大单段药量为282 kg,毫秒微分段总数达324段,总延时8.1 s,是我国最早的典型围堰拆除爆破工程,创当时多项国内爆破史上新记录<sup>[7]</sup>。虽然我国水下爆破技术的应用起步较晚,但随着综合国力和经济的发展,很多学者从大量的水下爆破工程实践中进行了研究和总结,从而促进了水下爆破技术的快速发展,出现了水上钻孔爆破平台及漂浮式钻爆船等施工装备,耐压防水雷管与防水炸药等新型爆破器材,以及气泡帷幕防护技术等,使深水、大流速复杂海况以及紧邻建筑物的水下工程爆破实施成为可能。近年来,随着计算机技术和计算方法的发展进步,水下爆炸数值模拟研究得到了快速发展,数值模拟计算结果可指导或应用于工程实践<sup>[8,9]</sup>。水下爆炸能量释放及传播规律、水下爆炸毁伤机理与效应评估、水下爆炸测试技术、水下爆炸数值仿真技术等方面的研究成果促进了水下爆破理论研究的快速发展。

## 1 水下爆破理论

长期以来,水下爆破的复杂环境导致了实验模拟观测的可操作性差,严重阻碍着实验技术的发展,造成了目前水下爆破理论和实验研究远远落后于工程应用技术发展的局面<sup>[10]</sup>。由于水下爆炸炸药爆炸的瞬时性,装药结构、起爆方式的差异,水下环境与水深变化的影响,水底界面和自由表面对冲击波的反射、折射作用等多种因素影响,水下爆破比陆地爆破具有更加复杂的作用机理。但水下爆

破与陆地爆破在爆破方法和爆破原理方面是相似的,因此,众多学者从研究水中爆炸、陆地爆破的作用机理入手,通过比较水下爆破与陆地爆破的差异,对水下爆破的作用机理进行研究。目前对水下爆破水中冲击波、地震波的理论研究还比较少,所能参考的资料大多是水下爆破工程实例的中远区水中冲击波、地面地震波监测数据的分析和归纳,或是通过数值仿真对某些单一影响因素进行探索性的研究,得到的结果可能有一定的偶然性和随机性,还不能得出精准的理论模型,但可为降低水下爆破的负面效应提供依据。

### 1.1 水下爆破冲击波传播理论

忽略水介质的粘滞性和热传导性,基于质量守恒、动量守恒和能量守恒三大定律,可得到能描述水下爆炸现象的流体动力学基本方程组<sup>[11]</sup>。但水下爆炸极为复杂,想要得到符合实际情况的精确解十分困难。目前,国内外学者均对水下爆破进行大量简化,采用理论分析、实验研究和数值计算三种方法对水下爆破冲击波传播理论进行综合性探索<sup>[9]</sup>。钱胜国对自由水面中冲击波及其反射的变化规律进行实验研究,利用爆炸深度与爆炸能量逸出的关系修正了库尔公式<sup>[12]</sup>。孙远征和陶明分别采用试验和数值计算研究了水下钻孔爆破水中冲击波的传播特性和衰减规律<sup>[13,14]</sup>;刘志利用高速摄影技术研究了水下爆炸冲击波波阵面传播规律,得出了小药量水下爆炸冲击波压力计算经验公式<sup>[15]</sup>;司剑锋<sup>[16]</sup>通过对静水、动水、水下裸爆、水下钻孔等不同条件下的爆破水击波进行现场测试,研究了水下炸礁工程爆破水击波特性及衰减规律;柴修伟<sup>[3,17]</sup>采用数值模拟方法对水下爆破在单自由面、双自由面条件下,炸药在水下岩石中爆炸后产生的水中冲击波的传播特性和衰减规律进行研究,得出水中冲击波的衰减规律具有方向性。曲艳东<sup>[18]</sup>采用数值模拟方法研究了冰体覆盖的相对封闭条件下,水下爆破冲击波传播规律,认为冰盖的存在可以削弱水下爆炸冲击波能量的耗散,和常规水下爆炸相比,峰值压力较小,衰减速度较慢。

### 1.2 水下爆破地震波传播理论

水下爆破的地震效应主要来自三个方面:一是炸药爆炸直接作用形成的地震波;二是水击波冲击水底边界所产生的冲击地震波;三是爆生气体在水中作胀缩上浮运动形成的脉动水压力引起地震效应<sup>[19–21]</sup>。詹发民<sup>[22]</sup>对水底岩石的振动信号进行监测,通过小波分析得出大部分能量集中在100 Hz以

下,振动强度与测点的位置有关:爆心距相同时,随着药量增大,能量更多集中在低频部分;爆区水越深,振动能量的低频部分越大,沟槽效应的影响与陆地爆破地震波的传播规律一致的结论。邵蔚<sup>[23]</sup>通过现场实测爆破振动速度数据分析,认为水下爆破具有明显的滤频效应,具有主频小、频带窄和能量小等特点。王振雄<sup>[24]</sup>对不同水深条件下的质点振速进行数值模拟分析,认为初次振速基本一致,但二次峰值出现的时间及峰值大小均有较大区别。彭亚雄<sup>[25]</sup>认为水下钻孔爆破随单段最大药量的增加,地震波低频带能量比增大,地震波能量随爆心距呈指数衰减,同时地震波能量向低频带富集。胡春红<sup>[26]</sup>通过数值仿真分析,认为水下炸礁产生的爆破地震加速度时程可作为工程结构响应计算时的激励。钟东望<sup>[27]</sup>以长江太子矶航道疏浚爆破工程为例,通过对水下爆破地震波的测试与分析,认为地面振动的主振频率应是低频波和高频波的叠加,低频波占主要部分,而水冲击波引起的地面振动高频波的冲击作用并不明显。沈蔚等人<sup>[28,29]</sup>运用灰色关联理论,结合工程实践经验,分析指出:最大段药量对爆破地震波的振动峰值和主频有着主要的影响作用。

### 1.3 水下爆破破岩机理

水下爆破孔内一般都有水,装药后孔内炸药处于水耦合状态,当炸药爆炸时,由于水的耦合作用,削减了爆轰波的初始冲击压力,使孔内爆轰波的压力处于比较均匀的状态,炮孔内壁一般不会出现粉碎性的压缩圈。通常认为在炸药爆炸应力波传播到岩石与水的分界面前,岩石的破碎作用机理与陆地爆破的作用机理是相同的,一旦爆炸应力波传播到岩石与水的分界面时,应力波将在二种介质的界面处出现反射和透射现象,此时既会出现透射到水中的压缩波,也会出现反射至固体介质中的拉伸波,这与陆地岩石爆破时入射波几乎全部反射形成拉伸波不同。同时,由于水压力的作用,相当于给岩石临水自由面增加了一个预应力,也会抵消一部分反射拉应力的作用,因此,水下岩石爆破临水自由面的反射破坏作用没有陆地爆破的明显,并随着水深的增加,爆破漏斗半径将变小。

破碎后的岩块运动由于受到水的阻力,其运动距离将大大缩小,这也是水下爆破当达到一定的水深,一般不会产生爆破飞石的原因。炸药能量在破碎岩石的同时,有部分炸药能量通过破碎岩石的缝隙作用到水体中,产生水击波或动水压力,并产生

涌浪,出现炸药水中爆炸的很多物理现象<sup>[30]</sup>。李春军<sup>[31]</sup>认为水越深,炸药要抵抗水压越大,导致破岩岩体的体积越小,破坏范围越小。时立国<sup>[32]</sup>说明了爆炸冲击波到达水面时反射生成的拉伸波能量比在空气中的反射拉伸波能量小得多,这极大减弱了自由面的反射拉伸波对岩石的破坏效应。此外,由于被爆岩体表面产生变形需克服静水压力,水的阻力也会影响破碎岩体的抛掷运动,从而导致水下钻孔爆破的炸药单耗比陆地爆破的炸药单耗大。殷秀红<sup>[33]</sup>运用数值仿真技术研究水下钻孔爆破岩石各区的应力响应,认为水介质的存在增加了爆炸应力波与爆生气体的作用时间,当炸药性能不变时,与陆地爆破相比,爆炸初始阶段在冲击波作用下形成的粉碎区范围相近,而裂隙区的范围更广。唐玉成<sup>[34]</sup>、白杨<sup>[35]</sup>在爆炸罐内施加不同压强,模拟不同水深梯度,发现随着水深增大岩石的大块率增加,且水深是主要影响因素。

由于水介质的压力作用,改变了岩石中的轴向压力作用,受到水的围压作用,炸药爆炸后需分配一部分能量用于克服水压作用,而且水深越大,岩石外部围压越大,因此破碎程度远不如同条件下的陆地爆破,得到相同破碎程度,需要更大的单耗,水深越大所需单耗越大。李伦<sup>[36]</sup>认为由于水介质的存在,水下爆破冲击波作用时间更长、应力峰值更高,这也使得水下爆破冲击波对岩石的损伤破坏作用更强。刘美山<sup>[37]</sup>采用混凝土试件进行陆地和 underwater 爆破效果的对比试验,认为水深 25 m 左右时,水下爆破要达到陆地爆破的效果其单耗应增加 2~4 倍。

综上所述,由于水压力的作用,减小了爆破的破裂半径,降低了破碎效果,削短了抛掷距离,水深影响越大,因此,水下爆破欲取得与陆地爆破同样的破岩效果,水下爆破炸药单耗约是陆地炸药单耗的 2 倍以上。

## 2 水下爆破器材

现如今,工业炸药的技术水平主要表现在粉状乳化炸药、无梯炸药和现场混装炸药三个方面;工业雷管发展最迅速的是塑料导爆管雷管和数码电子雷管<sup>[38]</sup>。但在水下爆破工程中,特别是深水(水深超过 20 m)环境爆破时常出现爆轰性能下降,甚至出现半爆或拒爆现象,严重影响水下爆破工程的效果。因此,水下爆破应采用具有抗水抗压性能的爆破器材。

## 2.1 起爆器材

水下爆破起爆网路随起爆器材的发展而发展,最初多采用导爆索结合继爆管进行小规模的水下爆破;随着电雷管的应用,水下爆破逐步开始使用电雷管起爆网路,但分段较少,一次爆破规模也不大;后来导爆管雷管,特别是高精度导爆管雷管的应用,水下爆破开始采用微差起爆技术,一次爆破规模基本不受起爆网路的限制;目前,随着电子雷管的普及应用,水下爆破逐步走向精细化。

对于水下爆破起爆器材最重要指标是雷管的抗水抗压性能,一般而言,工业雷管金属外壳具有很好的抗水抗压能力,而雷管脚线卡扣处的塑料塞则是抗水薄弱部位。钟帅在自己设计的高压容器中,对工业8号雷管进行了80.65~150.65 m模拟水深试验,结果表明,在该水深范围内随着水深的增加,雷管能够完全爆轰,冲击波峰值压力和能量并不发生明显变化<sup>[39]</sup>。徐圆圆通过试验发现单发导爆管雷管在200 m以内的水深中可以正常起爆,比冲击波能总体上是微量下降,比气泡能在总体上是微量上升<sup>[40]</sup>。在实际水下爆破工程应用中,工业雷管均正常起爆<sup>[41-43]</sup>,因此,在水下爆破工程中只需从起爆网路可靠性方面进行雷管的选择,但不管采用何种起爆网路,都需要考虑雷管卡扣的薄弱处,其能承受的拉力较小,特别是在深水环境中,更是要避免拉扯雷管脚线,要对起爆网路进行加固,要保证起爆网路不受力,以防被风浪、水流拉断破坏。

## 2.2 抗水性炸药

水下爆破最初多采用TNT等单质军用炸药、胶质炸药以及铵梯炸药,或者在药卷上涂沥青、石蜡、焦油、松香等防水剂,或者将炸药装在防水容器内,随着炸药技术发展以及安全、环保的要求,逐步开始使用乳化炸药、水胶炸药等抗水性炸药,或是直接将炸药装入塑料壳体内形成震源药柱类防水炸药,而目前胶质炸药、含梯炸药已逐渐停产。

我国工业类抗水炸药的抗水标准一般为0.2 MPa,也就是说常规工业抗水炸药只能适用于小于20 m水深条件下爆破。当水下爆破工程的水深大于20 m时需设计采用深水爆破专用炸药。金鹏刚<sup>[44]</sup>采用密封容器注水加压的方法模拟一定水深的工况,对某型号的乳化炸药和水胶炸药在1.0 Mpa水压力(模拟100 m水深)下放置7天后,在水中1.0 Mpa水压力下进行爆轰试验,试验结果表明这两种炸药在1.0 Mpa水压力下全部正常爆轰。适合于深水条件下(水深大于20 m)的炸药主要为非常规

抗水类工业炸药,主要包括乳化炸药、水胶炸药等。

(1)乳化型深水爆破专用炸药。乳化炸药的敏化方式有物理敏化、化学敏化和物理化学联合敏化三种方式,主要依靠小气泡或微气泡的“敏化热点”起爆机理形成爆轰。在深水条件下,常规乳化炸药受先起爆炸药的水击波“减敏”作用影响,容易导致“压死”,产生拒爆现象。刘磊<sup>[45]</sup>研究发现,在深水压力长时间作用下,化学敏化的乳化炸药爆炸性能下降主要是渗透溶胀和气泡逃逸引起“敏化热点”减少造成的,珍珠岩敏化的乳化炸药爆炸性能下降主要是渗透溶胀和珍珠岩破碎与失效引起“敏化热点”减少造成的,玻璃微球敏化的乳化炸药爆炸性能下降主要是渗透溶胀引起的。乳化炸药的密度需控制在合理范围,其爆炸性能才能达到最佳,但化学敏化、珍珠岩敏化的乳化炸药密度随水深增加而增大,其爆炸性能随水深的增加而逐步降低,达到一定水深时甚至出现拒爆;而玻璃微球敏化的乳化炸药,由于单位体积的“敏化热点”相对较多,在一定的压力作用下,炸药密度即使增大,其炸药爆轰性能依然下降不明显。徐乾<sup>[46]</sup>、侯志明<sup>[47]</sup>对乳化炸药的配方进行了研究,均获得了以玻璃微球作为敏化剂的深水抗压型乳化炸药。因此,采用玻璃微球为主的敏化方式制备的乳化炸药更适用于深水爆破。

(2)水胶型深水爆破专用炸药。水胶炸药通常采用硝酸甲胺为主的水溶性敏化剂和密度调节剂,同时采用膨胀珍珠岩作为次要敏化剂并辅助调节密度。硝酸甲胺是一种爆炸性敏化剂,以液态形式存在,其物理状态与水相似,可近似看作不可压缩的物质,在体系内硝酸甲胺以分子状态与硝酸铵、硝酸钠等氧化剂分子在溶液中进行充分接触,与水胶炸药本身的水凝胶体系具有良好的匹配相容性。通过提高硝酸甲胺和铝粉的含量比例,适当降低膨胀珍珠岩的含量,可有效减少深水静压力和渗透作用的影响,提高激发爆轰的灼热核,改善整体爆炸性能,解决常规抗水工业炸药在深水爆破作业中不耐压、拒爆、半爆或炸药威力小等问题。因此,硝酸甲胺、铝粉含量高,膨胀珍珠岩含量低的水胶炸药更适用于深水爆破。马亚<sup>[48]</sup>以2号岩石型水胶炸药为模型,在提高硝酸甲胺和铝粉的含量比例的同时,对有机添加物的比例进行调整以改善深水中的起爆感度,通过试验获得了深水爆破用水胶炸药的配方,如福建港航局在水深达40 m的海上航道清理时,使用该产品爆破后岩石块度小,清运方便;安徽

繁昌县在水深达30 m的长江中夯实桥墩基桩时使用该产品,大大提高了工程进度,缩短了工期。

汪齐<sup>[49]</sup>通过改变静水表面的压力模拟深水装药环境,对化学敏化的乳化炸药和煤矿许用水胶炸药进行试验,试验结果表明:这两种含水炸药的爆速随着水深的增大而降低;乳化炸药受静态压力的影响较大,在静压力为0.3 MPa下会发生拒爆,水胶炸药爆速下降率比较平缓稳定。因此,在深水区进行爆破作业时,需对炸药进行试爆,测试炸药在深水区的起爆性能,保证炸药在水中安全准爆。

### 3 水下爆破设计方法

水下爆破设计方法、装药量计算所用的基础理论与陆地爆破相同,只是深水影响了炸药的性能指标,减弱了水下破岩能力,致使水下爆破炸药单耗选取与陆地爆破有差异。而炸药单耗是爆破设计的核心,因为孔径、孔距、孔深以及堵塞长度等爆破参数设计都与单耗有关。我国爆破学者在长期理论工作和实践中结合国外已有成果,总结了一些行之有效的有效的水下爆破参数计算公式,近年来,也有不少学者采用数值仿真进行水下爆破参数优化设计。

#### 3.1 经验公式法

国内外关于水下爆破装药量计算的经验公式有很多,但大都只适用于特定的水下爆破环境和施工条件,且不同公式间的计算结果差异很大,无法得到任何情况都适合的计算方法。日本炸药协会公式、瑞典公式、《工程爆破实用手册》计算公式和我国水利系统常用的计算公式是目前常用的经验公式<sup>[36]</sup>,其中我国水利系统常用的计算公式、瑞典公式和日本炸药协会公式三者比较相似,均考虑了水深、覆盖层的影响,前两者还考虑了梯段高度的影响,应该说涉及到影响水下爆破效果的各种因素,比较全面,但在确定基本炸药单耗时存在一定的差异。

此外,由于这些经验公式没有考虑炸药性能受水深影响而降低的因素,2008年长江科学院基于我国水利系统常用的计算公式,引入受水深影响的炸药爆速降低系数,提出了如下修正公式<sup>[50]</sup>

$$q_{\text{水}} = \frac{q_{\text{陆}}}{k_D^2} + 0.01H_{\text{水}} + 0.02H_{\text{覆}} + 0.03H_{\text{梯}} \quad (1)$$

式中: $q_{\text{水}}$ 为水下钻孔爆破的炸药单耗, $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $q_{\text{陆}}$ 为相同介质的陆地爆炸药单耗, $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $H_{\text{水}}$ 为覆盖层以上的水深, $\text{m}$ ;  $H_{\text{覆}}$ 为覆盖层厚度, $\text{m}$ ;  $H_{\text{梯}}$ 为钻孔爆破的梯段高度, $\text{m}$ ;  $k_D$ 为水下炸药爆速降低系

数,即爆破介质所处水深条件下实测炸药爆速与陆地上实测炸药爆速之比。

该公式考虑比较全面,解决了实际施工所遇到的大部分问题,该公式也因此成为我国水利系统水下和半水下爆破常用的计算公式,在国内外多个水电站的围堰拆除爆破和岩塞爆破中获得了成功应用。

此外,近年来也有学者对水下爆破的单耗确定做了一定的研究。李泉<sup>[51]</sup>对国内外的几种水下钻孔爆破炸药单耗计算公式进行了分析比较,结合工程实际,在长江科学院水下爆破公式的基础上,提出了基于清渣设备能力的水下爆破炸药单耗计算公式:

$$q_{\text{水}} = f(n) \left( \frac{q_{\text{陆}}}{k_D^2} + 0.01H_{\text{水}} + 0.02H_{\text{覆}} + 0.03H_{\text{梯}} \right) \quad (2)$$

式中: $f(n)$ 为爆破作用指数的函数,其表达式为 $f(n) = 0.4 + 0.6n^3$ ;  $n$ 值可根据挖泥船的类型及大小选取,根据多个类似工程的经验,铲斗挖泥船的 $n$ 值可取1左右,抓斗挖泥船的 $n$ 值应在1~3之间;其余符号同前。

#### 3.2 数值仿真分析法

水下爆破装药量计算经验公式是在工程实践基础上归纳总结所得,实践经验的成分更浓。利用计算仿真技术可对水下爆破工程中的具体问题进行分析,对水下爆破参数进行优化,从而指导实际施工,加快施工进度、降低成本、提高爆破质量。

王宏<sup>[52]</sup>对影响水下钻孔爆破效能的因素进行数值仿真研究,得到了不同堵塞长度、不同起爆位置、不同装药条件对水下爆破冲击波参数的变化影响。齐世福<sup>[53]</sup>通过数值仿真分析发现,水层消耗了部分炸药能量,但水介质提高了炸药能量利用率使水下钻孔爆破岩石块度更均匀,得出的压力时程曲线可作为水下钻孔爆破单耗设计的计算依据。郭强<sup>[54]</sup>、殷秀红<sup>[55]</sup>均采用数值仿真技术对水下钻孔爆破的孔网参数优化进行了研究,获得了优化设计后的炸药单耗及孔网参数,降低了施工成本。梁禹<sup>[56]</sup>以长江太子矶航道炸礁工程为例,对不同堵塞长度进行数值仿真分析,得到了破碎均匀、块度适中、方便清淤等爆破效果好的合理堵塞长度。

通过数值仿真,可以更加细致地描述水下爆破各物理参量的变化过程,得到大量的动态数据及分布曲线;将爆破过程中的物理现象以图像的形式直观地展现出来,克服了以往研究方法“只闻其声,难见其貌”的不足;作为一种很好的辅助手段,科研人

员通过计算机即可对实际工程进行指导。

## 4 水下爆破技术

水下爆破技术已被广泛应用于码头与船坞建设、航道疏浚、水下石方开挖、挤淤筑堤、水下爆夯、水下爆破拆除等工程领域。从爆破效果来看,钻孔爆破法的炸药利用率高、安全性好、爆破有害效应易于控制、开挖形状与爆破块度容易得到保证,且随着安全环保意识的增强和钻孔机械设备的不断改进,水下钻孔爆破以爆破负面效应小的优势逐渐代替水中爆炸和水下裸露爆破,成为水下爆破工程的主要施工方法。下文将从水下炸礁爆破、水下岩塞爆破、围堰拆除爆破三个方面重点介绍水下钻孔爆破技术的应用与发展。

### 4.1 水下炸礁爆破技术

自1968年广州黄浦港航道整治水下炸礁爆破以来,水下炸礁爆破技术在港口建设、内河航道疏浚、海底输油管道沟槽开挖、海港航道整治等工程中运用日益广泛。水下炸礁爆破技术的新发展主要表现在以下几个方面:

(1)严寒季节水下深孔爆破技术的应用<sup>[57]</sup>。在引松(松花江)入长(长春)工程中,对水下基岩1万余 $\text{m}^3$ 的开挖,分别于1997年2月14日和3月22日,成功地进行了两次大规模水下深孔爆破。采用钢管脚手架钻孔平台,孔距为3.6~5.0 m,排距为1.0 m,两次爆破的炮孔分别为360个、504个,药量为6.1 t、10.7 t。

(2)复杂海况条件深水炸礁技术的应用<sup>[58]</sup>。上海洋山深水港炸礁工程所在水域水文条件复杂,爆破厚度达21 m、施工水深25 m,该工程是当时国内难度最大的炸礁工程。施工中采用了自升式炸礁平台船,钻孔直径115 mm和165 mm两种,孔距2.3~3.5 m,排距2.0~2.8 m,钻孔超深3 m,采用高能乳化炸药,单耗1.8~1.95 $\text{kg}/\text{m}^3$ ,采用粒径小于3 cm的石子进行堵孔,堵塞长度0.5~1.0 m,防止药柱拉出孔外。洋山港水下炸礁爆破的成功为我国深水港的水下炸礁积累了经验。

(3)深水管沟爆破技术的应用<sup>[59]</sup>。福炼深水管沟爆破工程为线型管沟式炸礁,炸礁沟底宽度为6 m,长度2588 m。施工区域处于湄洲湾风口区,风大浪高,涌浪高达2~3 m,流速2 m/s,爆破施工最大水深达51 m。每个船位设计爆破面积为12 m $\times$ 9 m,每船位布置4排孔,每排布3个孔,孔距3.0 m,排距3.0 m,超深3.5 m。采用高密度系列震源药柱,单耗2.0 $\text{kg}/\text{m}^3$ 。该

工程的成功标志着我国在深水礁石区进行管沟施工实现突破。

(4)复杂环境内河航道疏浚水下炸礁技术的应用<sup>[60]</sup>。长湖申线湖州段航道疏浚工程周围环境复杂,水深2.0~3.5 m,不能用钢管架搭建作业平台,大型钻爆船也不适用,只能采用自制的浮筒式水上钻孔平台。采用2.0 m $\times$ 2.0 m的小孔网参数减少单孔装药量来控制爆破振动,超深2.0 m 孔内MS12导爆管雷管,孔间MS2 MS3导爆管雷管接力,排间MS5导爆管雷管,从中间以V型逐孔起爆,起爆方向朝向原河道,成功地将爆破有害效应控制在安全允许范围之内。

(5)现场混装炸药技术在海上炸礁工程中的应用<sup>[61]</sup>。斯里兰卡汉班托塔港项目,是国际影响力比较大的一项大型海外基建项目。由于斯里兰卡国内没有自己的工业炸药生产厂,所需炸药全部依赖进口,不仅综合使用成本高,对施工进度也会有很大影响。将采矿工程中广泛应用的露天炸药现场混装技术,移植到了海上炸礁作业中,在钻爆施工船上实现了水下钻孔、炸药生产、机械化装药、爆破等一体化功能。

(6)数码电子雷管在水下炸礁工程中的应用<sup>[42]</sup>。陆丰核电厂北导流堤基槽水下炸礁,爆破振动控制要求严,非电导爆管起爆网路不能满足要求。该工程采用矩形布孔,孔距 排距取1.5~1.8 m,超深2.0 m,每孔装2发数码电子雷管,孔间延时设为30 ms 首次爆破共钻孔207个,由3台起爆器连接并通过主机及起爆控制软件进行起爆。通过合理地控制延时时间,设计合理的爆破参数和起爆网路,以毫秒延时爆破的方式,逐孔、逐排进行起爆,成功地实现大规模单孔单段的水下炸礁微差爆破。

### 4.2 水下岩塞爆破技术

我国从1971年在清河“211”工程取水口采用岩塞爆破技术之后,到目前已成功实施了30多个规模较大的岩塞爆破工程。岩塞爆破方法主要有:集中药包爆破法、钻孔爆破法、集中药包与钻孔爆破结合法。岩塞爆破实施前,一般需在实际岩塞部位附近进行1:1或1:2的岩塞爆破原型模拟试验,不仅成本高、施工难度大,而且风险高。2012年长江科学院开创性地提出了隧洞环境下进行岩塞爆破模拟试验的方法,即利用工程本身的水工隧洞开挖,在大断面隧洞环境下,模拟岩塞条件,开展钻孔岩塞爆破试验,此种试验方法与传统的原型模拟试验方法相比具有如下优势:①成本低:结合输水隧洞正常钻爆开挖施工进行试验,无需专门开挖试验

洞;②风险小:可预先对岩塞爆破关键技术分解模拟;③可进行多次试验。该试验方法已成功推广应用<sup>[62,63]</sup>。随着钻爆设备更新换代以及起爆器材的不断创新,采用数码电子雷管可以实现任意分段,近年来国内实施的岩塞爆破多采用深孔钻孔爆破。水下岩塞爆破技术的进展如下:

(1)丰满水电站泄洪洞进水口是我国规模最大的水下岩塞爆破工程<sup>[64]</sup>,于1979年5月28日爆破成功。该岩塞轴线倾角 $60^\circ$ ,设计直径为11 m,厚度为18.5 m(包括3.5 m厚的覆盖层),岩石厚度与直径比为1.36,岩塞爆破方量为 $3794 \text{ m}^3$ ,其中岩石方量 $2690 \text{ m}^3$ ,覆盖层 $1104 \text{ m}^3$ 。采用开启闸门集渣爆破方式,岩塞分三层布置8个集中药室,形成“王”字形,选用胶质炸药,总装药量4075.6 kg,最大一段药量1979 kg。为有效控制岩塞轮廓及减小振动,轮廓面上布置104个预裂孔,孔径40 mm,孔距30 cm,孔深8.0 m,线装药密度 $270 \text{ g/m}$ ,预裂孔装药量为201.4 kg。采用毫秒电雷管微差起爆网路,预裂孔、1~2号药室和3~8号药室的起爆时间分别为0 ms、25 ms、75 ms。

(2)长甸水电站改造工程取水口是我国目前最大的全排孔岩塞爆破工程<sup>[65,66]</sup>,于2014年6月16日爆破成功,它的成功从工程层面填补了我国大直径全排孔岩塞爆破的技术空白,使我国的岩塞爆破技术达到国际领先水平。该岩塞位于水库正常蓄水位以下63.3 m,岩塞中心轴线与水平夹角 $43^\circ$ ,岩塞段厚度为12.5 m,岩塞外口直径为14.6 m,岩塞内口直径为10 m,扩散角 $10^\circ$ ,岩塞厚度与直径比为1.25,岩塞体设计方量 $1419 \text{ m}^3$ 。采用“气垫式”闭门集渣、“中导洞”全排孔爆破方案,分为中导洞区、扩大区、轮廓区三个区域,共布置9圈炮孔:钻孔直径均为90 mm,中导洞区布置5圈炮孔,共计6个空孔和32个爆破(掏槽、辅助掏槽)孔;扩大区布置3圈炮孔,共计69个爆破孔;轮廓区布置1圈炮孔,共计48个光爆孔。孔底抵抗线按1.5 m进行设计,由于漏水或地质缺陷等原因部分炮孔不能继续钻进,实际孔底抵抗线在1.1~4.5 m范围内,80%炮孔的孔底抵抗线小于2.5 m。中导洞区和扩大区的爆破孔采用 $\Phi 60 \text{ mm}$ 乳化炸药连续装药,轮廓区光爆孔采用 $\Phi 32 \text{ mm}$ 乳化炸药间隔装药,总装药量2839.8 kg。采用数码电子雷管与高精度导爆管雷管复复式微差起爆网路,圈间延时100 ms,段间延时17 ms。

(3)刘家峡洮河口排沙洞进水口是我国淤泥最厚的岩塞爆破工程<sup>[67]</sup>,于2015年9月6日爆破成功。该岩塞位于刘家峡水库正常蓄水位以下70 m处,淤泥的厚度达27 m,岩塞轴线倾角 $45^\circ$ ,设计内口直径10.0 m,厚度12.3 m,厚度与直径比为1.23。采用开

启闸门集渣爆破方式,岩塞共布置7个药室,呈“王”字形,在岩塞周边布置121个预裂孔,钻孔直径为76 mm。为避免厚淤泥影响爆破效果,在岩塞口上部的淤泥层中布置12个淤泥扰动孔,分布在进水口轴线上和左右两侧,呈菱形布置,钻孔直径110 mm,孔间距1.8 m,岩塞合计装药量为7373.25 kg。采用数码电子雷管复式微差起爆网路,淤泥扰动孔、预裂孔、4号药室、1-3及5号药室和6、7号药室的起爆时间分别为0 ms、25 ms、75 ms、100 ms、125 ms。

(4)某省重点输水工程取水口是进口段最长的岩塞爆破工程,于2018年9月30日成功爆破。该岩塞位于水库正常蓄水位以下45 m处,进口段长4376 m,岩塞轴线倾角 $55^\circ$ ,岩塞外口直径为14.02 m,内口直径为7.55 m,发散角 $15^\circ$ ,厚度12.8 m,岩塞厚度与直径比为1.56,岩塞体方量 $1163 \text{ m}^3$ 。采用闭门集渣、“中心掏槽、圆周扩展、光面成型”的全排孔爆破方案,共布置8圈炮孔,钻孔直径均为90 mm,布置6个空孔、9个掏槽孔、10个辅助掏槽孔、49个主爆孔以及40个光爆孔,共计114个炮孔,爆破孔采用 $\Phi 60 \text{ mm}$ 乳化炸药连续装药,光爆孔采用直径 $\Phi 32 \text{ mm}$ 乳化炸药装药,总装药量2112.2 kg。采用数码电子雷管与高精度导爆管雷管复复式微差起爆网路,圈间延时100 ms,段间延时17 ms。

### 4.3 围堰拆除爆破技术

继1986年在葛洲坝水电站上游围堰防渗墙水下爆破拆除中,首次使用接力微差起爆技术以来,我国已成功进行了上百次大型围堰拆除爆破,各类型的围堰拆除爆破技术均得到推广应用,毫秒微差起爆技术、气泡帷幕防护技术等已成为围堰拆除爆破的常规技术。

(1)水平钻孔深度最大的围堰爆破<sup>[68]</sup>。“2458”工程船坞围堰是当时(1992年)国内外最大的岩坎爆破工程,岩坎和围堰高16 m,爆破方量 $69000 \text{ m}^3$ ,孔距3.0 m,排距2.3 m,最大水平孔深51 m。采用梯恩梯与硝酸铵熔铸成的铵梯炸药柱,掏槽孔、两侧一、二、五排和梅花孔用 $\Phi 80 \text{ mm}$ 药柱,每米孔装药量6.0 kg;两侧三、四排孔采用 $\Phi 74 \text{ mm}$ 药柱,每米孔装药量5.0 kg;最大一段药量为1363 kg,总装药量40.29 t。起爆采用中间掏槽、两侧依次起爆的顺序,按不同距离进行分段控制药量,共分98段,孔外延时共计2075 ms。

(2)首次实现“即时过流”的围堰爆破<sup>[69]</sup>。大朝山水电站导流洞要求于1996年6月过水分流。进口Ⅲ区一次性爆破拆除的混凝土及岩埂方量 $4400 \text{ m}^3$ 。拆除爆破区

域环境复杂,爆区距闸室门槽等建筑物为10.8 m,围堰两侧与混凝土翼墙紧邻,进口段底线距导流洞混凝土底板仅1.5 m。设计布置七排炮孔,其中垂直孔164个,水平孔45个,预裂孔22个,垂直孔间排距为1.2 m×1.5 m,水平孔间排距为1.0 m×1.0 m,孔底距岩埂上游坡面0.5~0.8 m。将7.85 t的总装药量分为86段起爆,最大单段药量187 kg。爆后约20分钟,导流洞进口附近石渣已基本冲尽,达到分流水目的。

(3)首次采用数码电子雷管定向倾倒法拆除的围堰<sup>[70]</sup>。2006年6月6日成功地实施了长江三峡水利枢纽三期上游碾压混凝土围堰拆除爆破工程。该工程爆破拆除围堰总长度为480 m,拆除方量18.6万m<sup>3</sup>,最大爆破水深达38 m,设计爆破炮孔(药室)总数达1022个,采用现场混装的乳化炸药总装药量191.3 t,使用数码雷管2506发,爆破总延时12.888 s。该项工程不仅满足了三峡三期工程建设的需要,而且在理论上有所发展创新,在施工技术上创造了多项世界第一,是首次实现“建拆结合”理念的工程,是首次采用“定向倾倒”爆破法拆除的围堰,也是国内首次使用电子雷管的爆破工程。

(4)首次实现关门冲渣的围堰拆除爆破<sup>[71]</sup>。溪洛渡水电站1#~5#导流洞进出口围堰需要同期拆除,共拆除围堰10座,拆除总方量44.4万m<sup>3</sup>。采用水平孔加垂直孔的组合爆破方案,底部水平孔孔排距为:底板预裂孔上部第1排取1.0 m×1.0 m,第2~5排取1.25 m×1.25 m,第6排以上取1.5 m×1.5 m;上部垂直孔孔排距为:浆砌石取2.0 m×2.5 m,岩埂堰前孔取(1.0~1.25) m×1.0 m,两端孔取1.5 m×1.5 m。采用Orica高精度塑料导爆管雷管组成非电接力式起爆网路:孔间传爆选择17 ms雷管,局部采用9 ms雷管,排间传爆选择42 ms雷管,孔内选择1025 ms雷管。该围堰爆破拆除是国内首个关门冲渣的实例,解决了围堰群紧邻的建(构)筑物爆破安全控制难度大、围堰结构体形及周边条件复杂等难题。

(5)特大型船坞复合围堰的拆除爆破<sup>[72]</sup>。金海湾50万t级船坞坞口由钻孔嵌岩排桩板式支护体系与天然岩坎构成复合型围堰,围堰全长137 m,高14.5 m,嵌岩桩56根,拆除方量55000 m<sup>3</sup>。围堰中部岩坎布置缓倾斜水平炮孔,炮孔直径140 mm,孔内放置直径110 mm PVC塑料套管,孔排距为2.5 m×2.0 m,孔深8~37 m,嵌岩排桩钻倾斜孔,倾斜角度根据现场实际情况而定,对嵌岩排桩底部进行人工切断预处理。采用逐孔毫秒延时起爆技术,总装药

52 t,使用高精度毫秒延时雷管1700发,分为265段,爆破总延时1640 ms。解决了钻孔排桩加钢支撑围护体系预处理技术、临水破碎岩层钻孔技术、淤泥对爆破施工影响及对策等方面的难题。

## 5 展望

水下爆破技术的发展呈现螺旋形上升过程,各时期出现的每一项新技术均代表了当时先进生产力,各时期的典型工程均是当时先进技术的应用成果,随着科学技术的发展,有些当时先进的技术通过升级换代变成了更先进的技术,有的则已变成了常规技术,有的甚至已被淘汰,但仍不失王者风范,不能用现在的眼光简单粗暴地否定过去的成果,毕竟科学技术本身没有最好只有更好。

国内的水下炸礁钻孔爆破、大直径全排孔岩塞爆破、大型围堰拆除爆破等水下爆破应用技术已达到了国际先进甚至领先水平,但在水下爆破理论研究等方面则大多是对工程实例的分析和归纳,仍停留在过去的经验范畴,明显暴露出水下爆破理论滞后于实践的事实。高压水罐、高清水下摄像、高频水击波测量等水下爆破试验装置建设可促进水下爆破理论研究模型试验的进步;云计算、物联网技术等为水下爆破理论研究的大型计算提供了技术支持。通过开展更进一步的试验、测试以及数值仿真分析,得出更精准的理论计算公式;考虑水流速度、水体阻力等环境因素,建立流-固耦合复杂载荷形式、岩体材料本构等更加符合实际的数值仿真模型,使水下爆破数值模拟更为精细化。此外,随着高抗水抗压水下爆破专用炸药、数码电子雷管与无线起爆技术、新型水下钻孔装备以及水下机器人的应用,水下爆破技术必将得到进一步的发展。

## 参考文献(References)

- [1] 冯叔瑜,马乃耀. 现代海港建设与水下爆破[J]. 力学与实践, 1979(01):71-74,64.
- [1] FENG Shu-yu, MA Nai-yao. Modern seaport construction and underwater blasting[J]. Mechanics in Engineering, 1979(01):71-74,64. (in Chinese)
- [2] 杨光照. 水下工程爆破[M]. 北京:海洋出版社,1992.
- [2] YANG Guang-xu. Underwater engineering blasting[M]. Beijing: China Ocean Press, 1992.
- [3] 柴修伟. 水下炮孔爆破水中冲击波传播特性[D]. 武汉:武汉理工大学,2009.
- [3] CHAI Xiu-wei. Propagation characteristic of water shock in underwater borehole blasting[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009. (in Chinese)

- [4] 库尔 P. 水下爆炸[M]. 罗耀杰,等,译. 北京:国防工业出版社,1960.
- [5] 山西省水利勘测设计院. 漳泽水库进水口水下爆破经验介绍[J]. 水利水电技术,1964(12):25-28,50.
- [5] ShanXi Hydroelectric Investigation & Design Institute. Experience of underwater blasting in the inlet of Zhangze Reservoir [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,1964(12):25-28,50. (in Chinese)
- [6] 汪旭光. 中国典型爆破工程与技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2006.
- [6] WANG Xu-guang. Typical blasting engineering and technology in China [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006.
- [7] 张正宇. 葛洲坝大江围堰混凝土防渗墙拆除的爆破技术[J]. 中国水利,1986(11):25-26.
- [7] ZHANG Zheng-yu. Demolition blasting technology for Gezhouba cofferdam concrete cutoff wall [J]. China Water Resources,1986(11):25-26. (in Chinese)
- [8] 蒋国岩,金辉,李兵,等. 水下爆炸研究现状及发展方向展望[J]. 科技导报,2009,27(9):87-91.
- [8] JIANG Guo-yan, JIN Hui, LI Bing, et al. Review of studies on underwater explosion[J]. Science & Technology Review,2009,27(9):87-91. (in Chinese)
- [9] 罗松林,叶序双,顾文彬,等. 水下爆炸研究现状[J]. 工程爆破,1999(1):84-87,83.
- [9] LUO Song-lin, YE Xu-shuang, GU Wen-bin, et al. Summary of present research situation of underwater explosion[J]. Engineering Blasting,1999(1):84-87,83. (in Chinese)
- [10] 胡春红. 邻近栈桥在水下爆破地震作用下的动力响应及安全性评价[D]. 大连:大连理工大学,2006.
- [10] HU Chun-hong. Dynamic response and safety evaluation of vicinal pier subjected to underwater blasting vibration [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [11] 于亚伦. 工程爆破理论与技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2004.
- [12] 钱胜国,张伟林,徐光耀. 近自由水面下爆炸时水中激波特性[J]. 爆炸与冲击,1983,3(4):53-63.
- [12] QIAN Sheng-guo, ZHANG Wei-lin, XU Guang-yao. Characteristics of shock waves in water during explosion near free water surface [J]. Explosion and Shock Waves,1983,3(4):53-63. (in Chinese)
- [13] 孙远征,龙源,邵鲁中,等. 水下钻孔爆破水中冲击波试验研究[J]. 工程爆破,2007(4):15-19.
- [13] SUN Yuan-zheng, LONG Yuan, SHAO Lu-zhong, et al. Experimental investigation of shock wave in water of underwater drilling blasting [J]. Engineering Blasting, 2007(4):15-19. (in Chinese)
- [14] 陶明. 水下钻孔爆破水击波衰减规律的研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2009.
- [14] TAO Ming. Research of the attenuation rule of the water shock wave effect for underwater drilling blasting[D]. Wuhan:Wuhan University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [15] 刘志. 水下爆炸冲击波的传播特性试验研究[D]. 成都:西南交通大学,2010.
- [15] LIU Zhi. Research on transmission property of shock wave test underwater explosion [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
- [16] 司剑峰. 水下爆破冲击波理论分析及试验研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2013.
- [16] SI Jian-feng. Theoretical analysis and test research on shock wave of underwater explosion [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [17] 柴修伟,梁开水. 水下炮孔爆破不同方向的水中冲击波传播特性研究[J]. 爆破,2012,29(1):19-22.
- [17] CHAI Xiu-Wei, LIANG Kai-shui. Research on propagation characteristic of water shock wave induced by underwater drilling blasting in different direction [J]. Blasting, 2012,29(1):19-22. (in Chinese)
- [17] 曲艳东,刘万里,翟诚,等. 水下爆破破冰爆炸冲击波传播规律数值分析[J]. 爆破,2017,34(2):100-104.
- [18] QU Yan-dong, LIU Wan-li, ZHAI Cheng, et al. Numerical simulation of propagation law of shock waves in process of breaking ice by underwater blasting [J]. Blasting, 2017,34(2):100-104. (in Chinese)
- [19] 石教往,佟锦岳,张正宇. 水下爆破地震效应的试验研究[J]. 水利水电快报,1997(18):24-28.
- [19] SHI Jiao-wang, TONG Jin-yue, ZHANG Zheng-yu. Experimental study on seismic effect of underwater blasting [J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 1997(18):24-28. (in Chinese)
- [20] 佟锦岳,石教往,熊长汉,等. 水下工程爆破对环境的影响规律研究(下)[J]. 爆破,2000(4):1-4.
- [20] TONG Jin-yue, SHI Jiao-wang, XIONG Chang-han. Study on the law of influence of underwater engineering blasting on environment(II) [J]. Blasting, 2000(4):1-4. (in Chinese)
- [21] 刘临雄,吴绪权,王建宙,等. 水下爆破地震效应对公路桥影响的测试与分析[J]. 水运工程,2002(3):21-24.
- [21] LIU Lin-xiong, WU Xu-quan, WANG Jian-zhou, et al. Measurement and analysis of the influence to highway bridge brought by underwater blasting vibration [J]. Port & Waterway Engineering, 2002(3):21-24. (in Chinese)
- [22] 詹发民,王振雄,赵守田,等. 水下钻孔爆破水底振动信号的频带能量分布研究[J]. 兵器装备工程学报,2019,40(8):111-118.
- [22] ZHAN Fa-min, WANG Zhen-xiong, ZHAO Shou-tian,

- et al. Study on band energy distribution of underwater blasting vibration in underwater drilling blasting [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2019, 40(8):111-118. (in Chinese)
- [23] 邵蔚,王长柏. 水下爆破振动特征及衰减规律研究[J]. *工程爆破*, 2018, 24(5):15-22.
- [23] SHAO Wei, WANG Chang-bo. Study on vibration characteristics and attenuation law of underwater blasting [J]. *Engineering Blasting*, 2018, 24(5):15-22. (in Chinese)
- [24] 王振雄,顾文彬,陈学平. 水深对水下钻孔爆破水中冲击波和地震波传播规律影响的数值模拟研究[C]//第十六届中国科协年会——分9含能材料及绿色民爆产业发展论坛论文集, 2014:440-447.
- [24] WANG Zhen-xiong, GU Wen-bin, CHEN Xue-ping. Numerical simulation study on the impact of water depth on the propagation of shock waves and seismic waves in underwater borehole blasting [C]// The 16th Annual Meeting of China Association for Science and Technology, 2014:440-447. (in Chinese)
- [25] 彭亚雄. 水下钻孔爆破地震波与水击波协同作用下桥墩动力响应特征研究[D]. 武汉:中国地质大学, 2018.
- [25] PENG Ya-xiong. Study on the dynamic responses of bridge piers under the synergistic effects of seismic wave and water shock wave induced by the underwater drilling and blasting [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018. (in Chinese)
- [26] 胡春红,周晶. 炸药量和场地条件对水下爆炸地震波影响的数值模拟[J]. *爆破*, 2007(3):11-15, 32.
- [26] HU Chun-hong, ZHOU Jing. Numerical simulation of the effect of underwater blasting seismic waves under different explosions and ground conditions [J]. *Blasting*, 2007(3):11-15, 32. (in Chinese)
- [27] 钟冬望. 太子矶航道水下钻孔爆破地震波测试与分析[J]. *武汉科技大学学报*, 2011, 34(5):350-353.
- [27] ZHONG Dong-wang. Seismic test and analysis of underwater drilling blasting for Taiziji Waterway [J]. *Journal of Wuhan University of Science and Technology*, 2011, 34(5):350-353. (in Chinese)
- [28] 杨溢,张智宇,庙延钢,等. 灰色关联分析在预裂爆破震动分析中的应用[J]. *云南冶金*, 2001, 30(5):1-3
- [28] YANG Yi, ZHANG Zhi-yu, MIAO Yan-gang, et al. Application of gray association analysis for analysing vibration in presplitting blasting [J]. *Yunnan Metallurgy*, 2001, 30(5):1-3. (in Chinese)
- [29] 沈蔚,徐全军,黄文华,等. 用灰色关联分析法确定爆破震动参数的主要影响因素[J]. *工程爆破*, 2002, 6(4):6-13.
- [29] SHEN Wei, XU Quan-jun, HUANG Wen-hua, et al. Determination of main influencing factors on blasting vibration parameters by grey correlation analysis [J]. *Engineering Blasting*, 2002, 6(4):6-13. (in Chinese)
- [30] 赵根. 水工围堰拆除爆破[M]. 北京:水利水电出版社, 2009.
- [31] 李春军,吴立,李红勇,等. 不同水深条件下水下钻孔爆破破岩机理研究[J]. *爆破*, 2015, 32(4):123-127.
- [31] LI Chun-jun, WU Li, LI Hong-yong, et al. Rock breaking mechanism of underwater drilling blasting on different depths [J]. *Blasting*, 2015, 32(4):123-127. (in Chinese)
- [32] 时立国. 炸药爆轰及水下爆炸的SPH数值模拟研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2007.
- [32] SHI Li-guo. Numerical simulation using SPH method on the detonation and underwater explosion of explosive [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007. (in Chinese)
- [33] 殷秀红,钟冬望,黄小武,等. 水下钻孔爆破岩石各区应力的数值模拟[J]. *爆破*, 2014, 31(4):11-15, 53.
- [33] YIN Xiu-hong, ZHONG Dong-wang, HUANG Xiaowu, et al. Numerical simulation of rock stress of underwater drilling blasting [J]. *Blasting*, 2014, 31(4):11-15, 53. (in Chinese)
- [34] 唐玉成,段卫东,乔泽霖,等. 水下爆破岩石破碎块度的实验研究[J]. *爆破*, 2016, 33(4):102-106.
- [34] TANG Yu-cheng, DUAN Wei-dong, QIAO Ze-lin, et al. Experimental study on rock fragmentation of underwater blasting [J]. *Blasting*, 2016, 33(4):102-106. (in Chinese)
- [35] 白杨. 水深对岩石爆破炸药量影响的研究[D]. 武汉:武汉科技大学, 2015.
- [35] BAI Yang. Study on water depth effect on rock blasting explosive [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [36] 李伦. 水下爆炸冲击波作用下岩石裂纹发展机理的实验研究[D]. 武汉:武汉科技大学, 2019.
- [36] LI Lun. Experimental research on the development mechanism of rock crack under shock wave of underwater explosion [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [37] 刘美山,吴新霞,张恒伟. 混凝土水下爆破炸药单耗试验分析[J]. *爆破*, 2007(1):10-13, 20.
- [37] LIU Mei-shan, WU Xin-xia, ZHANG Heng-wei. Experimental analysis on specific charge of underwater explosion of concrete [J]. *Blasting*, 2007(1):10-13, 20. (in Chinese)
- [38] 汪旭光. 中国工程爆破与爆破器材的现状与展望[J]. *工程爆破*, 2007, 13(4):1-8.
- [38] WANG Xu-guang. Current status and future prospect of engineering blasting and explosive materials in China [J]. *Engineering Blasting*, 2007, 13(4):1-8. (in Chinese)
- [39] 钟帅,张立. 深水下8号雷管爆炸冲击波参数的

- 研究[J]. 煤矿爆破,2007(1):4-6.
- [39] ZHONG Shuai, ZHANG Li. Shock wave parameter study of the 8th detonator explosion under deep water [J]. Coal Mine Blasting,2007(1):4-6. (in Chinese)
- [40] 徐园园. 水压对爆炸器材爆炸性能的影响研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2015.
- [40] XU Yuan-yuan. Study on the effect of water pressure on explosion performance of explosion[D]. Wuhan:Wuhan University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [41] 赵根. 导爆管雷管接力起爆网路在水下控制爆破中的应用[J]. 爆破,1996(2):70-73,87.
- [41] ZHAO Gen. Application of the nonel detonator network to the underwater controlled blasting[J]. Blasting, 1996 (2):70-73,87. (in Chinese)
- [42] 贺早亮,刘建刚. 数码电子雷管在水下炸礁中的应用[J]. 工程爆破,2017,23(6):77-81.
- [42] HE Zao-liang, LIU Jian-gang. The application of digital electronic detonator in underwater reef blasting[J]. Engineering Blasting,2017,23(6):77-81. (in Chinese)
- [43] 赵根,吴新霞,周先平,等. 电子雷管起爆系统及其在岩塞爆破中的应用[J]. 爆破,2015,32(3):91-94,149.
- [43] ZHAO Gen, WU Xin-xia, ZHOU Xian-ping, et al. Electronic detonator initiating system and application in rock plug blasting[J]. Blasting, 2015, 32(3):91-94, 149. (in Chinese)
- [44] 金朋刚,王建灵,任松涛,等. 爆炸危险品深水安全起爆性能研究[C]//第二届全国危险物质与安全应急技术研讨会论文集,2013:330-334.
- [44] JIN Peng-gang, WANG Jian-ling, REN Song-tao, et al. Study on the safety initiation performance of explosives in deep water[C]// Proceedings of the Second National Conference on Hazardous Substances and Safety Emergency Technology, 2013:330-334. (in Chinese)
- [45] 刘磊. 乳化炸药在水下爆破中抗水抗压性能的实验研究与机理分析[D]. 昆明:昆明理工大学,2010.
- [45] LIU Lei. Experimental study and mechanism analysis of water and compression resistance of emulsion explosive in underwater blasting[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [46] 徐乾. 深水抗压型乳化炸药的制备及性能研究[D]. 南京:南京理工大学,2016.
- [46] XU Qian. Study on preparation and property of emulsion explosives with compression resistance in the deep water [D]. Nanjing:Nanjing University of Science & Technology, 2016. (in Chinese)
- [47] 侯志明. 深水耐压型乳化炸药的配方研究[J]. 科技与创新,2017(14):72-74.
- [47] HOU Zhi-ming. Study on the formulation of deep water pressure emulsion explosive[J]. Science and Technology & Innovation,2017(14):72-74. (in Chinese)
- [48] 马亚. 一种深水爆破水胶炸药的实验研究[J]. 煤矿爆破,2018(3):13-16.
- [48] MA Ya. Experimental study on a water gel explosive for deep water blasting[J]. Coal Mine Blasting, 2018(3):13-16. (in Chinese)
- [49] 汪齐,胡坤伦,王猛,等. 深水静压作用下含水炸药爆炸性能的研究[J]. 火工品,2017(3):41-44.
- [49] WANG Qi, HU Kun-lun, WANG Meng, et al. Experimental study on the explosive performance of water-bearing explosives under the static pressure[J]. Initiators & Pyrotechnics,2017(3):41-44. (in Chinese)
- [50] 赵根. 深水条件下围堰拆除爆破技术研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2008.
- [50] ZHAO Gen. Study on technology of the cofferdam demolition blasting in deep water conditions[D]. Hefei:University of Science and Technology of China,2008. (in Chinese)
- [51] 李泉. 几种水下钻孔爆破炸药单耗计算公式的分析与比较[J]. 爆破,2012,29(1):94-97.
- [51] LI Quan. Analysis and comparison of several calculation formulas of specific charge underwater drilling blasting [J]. Blasting,2012,29(1):94-97. (in Chinese)
- [52] 王宏. 水下钻孔爆破数值仿真研究[D]. 长沙:中北大学,2014.
- [52] WANG Hong. Numerical simulation of underwater drilling blasting[D]. Changsha:North University of China, 2014. (in Chinese)
- [53] 齐世福,刘新波,李裕春. 水下钻孔爆破的数值模拟[J]. 工程爆破,2010,16(4):13-17.
- [53] QI Shi-fu, LIU Xin-bo, LI Yu-chun. Numerical simulation of underwater drilling blasting [J]. Engineering Blasting, 2010, 16(4):13-17. (in Chinese)
- [54] 郭强. 水下钻孔爆破孔网参数优化研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2005.
- [54] GUO Qiang. Parameters optimization analysis in underwater blasting [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2005. (in Chinese)
- [55] 殷秀红. 水下钻孔爆破孔网参数优化研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2015.
- [55] YIN Xiu-hong. Optimization research of hole network parameters in underwater drilling blasting[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [56] 梁禹,吴立,左清军,等. 水下钻孔爆破堵塞长度的数值模拟研究[J]. 爆破,2011,28(1):92-94,97.
- [56] LIANG Yu, WU Li, ZUO Qing-jun, et al. Numerical simulation of stemming length in underwater drilling blasting [J]. Blasting, 2011,28(1):92-94,97. (in Chinese)

- [57] 何广沂. 严寒季节水下深孔爆破技术的研究与应用[J]. 工程爆破, 1999(3):46-50.
- [57] HE Guang-yi. Research and application of underwater deephole blasting in severe cold seasons[J]. Engineering Blasting, 1999(3):46-50. (in Chinese)
- [58] 吴金仓, 孙 健, 刘佳政, 等. 复杂海况条件下水下深孔控制炸礁技术[J]. 工程爆破, 2006, 12(1):66-70.
- [58] WU Jin-cang, SUN Jian, LIU Jia-zheng, et al. Technology of underwater deep-hole controlled blasting of marl reef in complicated surroundings[J]. Engineering Blasting, 2006, 12(1):66-70. (in Chinese)
- [59] 于祖康, 吕 远, 王朝军. 福炼深水管沟爆破技术控制[C]//中国爆破新技术II. 2008:287-290.
- [59] YU Zu-kang, LU Yuan, WANG Chao-jun. Blasting technology of fulian deep water pipe trench[C]// China Blasting New Technology II. 2008:287-290. (in Chinese)
- [60] 汪竹平, 张道振, 徐楝杨, 等. 复杂环境内河航道疏浚水下控制爆破[J]. 工程爆破, 2013, 19(6):50-52, 56.
- [60] WANG Zhu-ping, ZHANG Dao-zhen, XU Bing-yang, et al. Underwater controlled blasting of dredging inland waterway in complicated surrounding[J]. Engineering Blasting, 2013, 19(6):50-52, 56. (in Chinese)
- [61] 田 丰, 郑德金, 刘剑跃, 等. 炸药现场混装技术在海上炸礁作业中的应用[J]. 工程爆破, 2010, 16(1):70-73, 77.
- [61] TIAN Feng, ZHENG De-jin, LIU Jian-yue, et al. Application of site sensitized emulsion explosive in reef explosion on the sea[J]. Engineering Blasting, 2010, 16(1):70-73, 77. (in Chinese)
- [62] 杨建喜. 隧洞环境双临空面条件下岩塞爆破试验与成果分析[J]. 人民珠江, 2016, 37(8):53-56.
- [62] YANG Jian-xi. Test and results analysis of rock-plug blasting under the condition of double-free face in tunnel environment[J]. Pearl River, 2016, 37(8):53-56. (in Chinese)
- [63] 胡英国, 吴新霞, 赵 根等. 单、双临空面岩塞爆破的贯穿机制与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016 (a02):3716-3724.
- [63] HU Ying-guo, WU Xin-xia, ZHAO Gen, et al. Through mechanism and experimental study of rock-plug blasting with single and double free faces[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016 (a02):3716-3724. (in Chinese)
- [64] 黄 涛, 朱文琴, 刘汉丞. 丰满泄水洞岩塞爆破的震动冲击效应与水力特性[J]. 水利学报, 1983(11):18-28.
- [64] HUANG Tao, ZHU Wen-qin, LIU Han-zhang. Shock effect and hydraulic characteristics of rock plug blasting in fengman release tunnel[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1983(11):18-28. (in Chinese)
- [65] 赵 根, 吴新霞, 周先平, 等. 深水条件下岩塞钻孔爆破关键技术及应用[J]. 工程爆破, 2016, 22(5):13-17.
- [65] ZHAO Gen, WU Xin-xia, ZHOU Xian-ping, et al. Key technology and application of rock plug drilling blasting under deep water condition[J]. Engineering Blasting, 2016, 22(5):13-17. (in Chinese)
- [66] 梁希林. 水下岩塞爆破有害效应控制措施及效果分析[J]. 爆破, 2019, 36(3):98-103.
- [66] LIANG Xi-lin. Control measurement and results analysis of harmful effects of underwater rock plug blasting[J]. Blasting, 2019, 36(3):98-103. (in Chinese)
- [67] 苏加林. 水下岩塞爆破技术进展[J]. 水利水电技术, 2019, 50(8):110-115.
- [67] SU Jia-lin. Technological development of underwater rock-plug blasting[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(8):110-115. (in Chinese)
- [68] 吴金仓, 王相祝, 宋晓华. 水下岩坎水平深孔控制爆破技术[J]. 工程爆破, 1998(4):55-60, 84.
- [68] WU Jin-cang, WANG Xiang-zhu, SONG Xiao-hua. Controlled blasting technology of horizontal deep holes for demolishing underwater rock bank[J]. Engineering Blasting, 1998(4):55-60, 84. (in Chinese)
- [69] 尹俊宏. 大朝山水电站导流洞进口围堰及岩埂拆除爆破施工[J]. 云南水力发电, 2002, 18(4):50-53, 80.
- [69] YIN Jun-hong. Demolition blasting of cofferdam and rock conduit at diversion tunnel entrance of Dachaoshan Hydropower Station[J]. Yunnan Water Power, 2002, 18(4):50-53, 80. (in Chinese)
- [70] 张正宇, 曹广晶, 钮新强, 等. 中国三峡工程RCC围堰爆破拆除新技术[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2008.
- [70] ZHANG Zheng-yu, CAO Guang-jing, NIU Xin-qiang, et al. New technology of rcc cofferdam blasting demolition for the Three Gorges Project in China [M]. Beijing: Water Conservancy and Hydropower Press, 2008.
- [71] 李金河, 刘美山. 溪洛渡水电站导流洞围堰爆破技术及效果分析[J]. 工程爆破, 2011, 17(3):53-57.
- [71] LI Jin-he, LIU Mei-shan. Blasting demolition technology and effect analysis of the diversion tunnel cofferdam in Xiluodu Hydropower Station [J]. Engineering Blasting, 2011, 17(3):53-57. (in Chinese)
- [72] 管志强, 张中雷, 冯新华, 等. 50万t级船坞复合围堰爆破拆除设计施工技术[C]//中国爆破新技术II, 2008:412-417.
- [72] GUAN Zhi-qiang, ZHANG Zhong-lei, FENG Xin-hua, et al. Design and construction technology for blast ingdemolition of composite cofferdam of 500, 000-ton ship yard [C]// China Blasting New Technology II, 2008:412-417. (in Chinese)