

· 施 工 ·



# 微差爆破技术在湄洲湾航道三期(Ⅱ阶段) 炸礁施工中的应用

陈 建<sup>1</sup>, 汪 越<sup>1</sup>, 谢见开<sup>2</sup>

(1. 华北水利水电大学, 河南 郑州 450045; 2. 中交广州航道局有限公司, 广东 广州 510290)

**摘要:** 针对福建省湄洲湾航道三期炸礁施工中强风化岩石地质条件、礁石覆盖面积超过 16.9 万 m<sup>2</sup>、施工空间有限、通航管制、爆破地点距离最近构筑物仅 470 m 等问题, 进行单段炸药量、振动波强度、孔网布置、潮汐变化等方面的研究。采取  $\phi 115$  mm 炮孔、2.0 m $\times$ 2.5 m 的孔网布置和排间微差爆破技术, 并利用潮汐作用进一步削减爆破带来的负面影响, 顺利完成施工任务。结果表明: 单段炸药量不大于 300 kg 时, 爆破施工产生的振动波未对周边生产生活区域造成不良影响, 利用潮水可一定程度上削减振动波。

**关键词:** 湄洲湾航道; 水下炸礁; 微差爆破; 振动波

**中图分类号:** U 615.6

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2021)09-0201-05

## Application of millisecond priming technology in reef blasting construction of Meizhou Bay channel third phase (stage II)

CHEN Jian<sup>1</sup>, WANG Yue<sup>1</sup>, XIE Jian-kai<sup>2</sup>

(1. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China;

2. CCCC Guangzhou Waterway Bureau Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of strong weathered rock geological condition, reef cover area more than 169,000 m<sup>2</sup>, limited construction space, navigable control, and blasting site only 470 m away from the nearest structure in the third phase of reef blasting construction of Meizhou Bay waterway in Fujian Province, we study the single-stage explosive quantity, vibration wave intensity, hole network layout, and tidal change. We apply  $\phi 115$  mm blast hole, 2.0 m $\times$ 2.5 m hole network layout and inter-row millisecond blasting technology, use the tidal effect to further reduce the negative impact of blasting, and successfully complete the construction task. The results show that when the single-stage explosive quantity is not more than 300 kg, the vibration wave generated by blasting construction does not adversely affect the surrounding production and living areas, and the use of tidal water can reduce the vibration wave to a certain extent.

**Keywords:** Meizhou Bay channel; underwater reef blasting; millisecond priming; vibration wave

随着全球经济的不断发展, 港口航运业务日益繁忙, 为了满足社会发展和人们生活水平的需要, 船舶的吨位也在不断增加、吃水不断加深, 这对航道的水深提出更高的要求。但受福建沿海地质条件的限制, 海岸曲折、礁石众多, 仅依靠疏浚施工已无法满足航道加宽挖深的要求, 因此,

对礁石进行爆破排除是东南沿海地区航道施工的重要组成部分。

水下炸礁技术的发展起源于军事领域的水下爆破研究, 至今已有几十年的发展历程。该技术在港口建设、内河航道疏浚、海底输油管道沟槽开挖、航道整治等工程中的应用日益广泛<sup>[1]</sup>。其

收稿日期: 2021-01-05

作者简介: 陈建(1979—), 男, 博士, 副教授, 从事河流水沙水环境数值模拟研究、航道规划论证方面的教学及科研。

中使用微差爆破技术进行分段延时爆破可大幅降低爆破振动波对周边环境的影响,在水下炸礁领域得到充分应用。由于湄洲湾主航道施工所在环境具有一定的特殊性,存在施工空间有限、礁石覆盖面积大、通航避让和距离周边居民区较近等一系列问题,加上水下爆破技术的不同方法具有不同的适用性,须根据实际情况对爆破技术和爆破参数的选取进行分析。

通过参考《爆破安全规程》<sup>[2]</sup>及其他相关文献,本文采用排间微差爆破技术和梅花型孔网布置,并对相关爆破参数进行选取和计算。因为湄洲湾海域具有潮差较大的特点,利用静水压强可以削减振动波的特性<sup>[3]</sup>,尽可能在中高潮位时爆破,避开低潮位,最大程度降低爆破振动波对周边环境的影响,从而为类似的沿海地区航道炸礁施工提供参考。

### 1 工程概况

湄洲湾航道三期工程(Ⅱ阶段)02标段工程是位于福建省莆田市与泉州市之间的航道施工工程。湄洲湾内海岸线曲折、岛屿众多,湾口内段礁石岩性为强风化花岗岩和中风化花岗岩,岩体基本质量等级为Ⅴ级和Ⅳ级<sup>[4]</sup>。由于岩体层理、节理和断层呈现出不同特征,因此这些特征都将直接影响爆破的效果。湄洲湾潮汐属正规半日潮,属于强潮海湾,平均潮差 4.65 m 以上,最大潮差可达 6 m 以上,并且潮汐年内分布不均匀现象明显。湾内潮流动力强劲,常浪向为 NNE~ENE 向,多发生在秋、冬、春季;强浪向为 SE 向。同时,炸礁施工区域多集中于罗屿岛与惠屿岛之间的主航道内,两座海岛之间过水面积急剧减少,导致其间的水流较其他海域更加湍急。且罗屿岛和惠屿岛两座较大岛屿距离主航道施工区较近,罗屿岛作为港口作业区,岛上居民已全部搬迁,而惠屿岛上有大约 1 500 名居民。

施工主要分为两部分:主航道疏浚及炸清礁工程、会船区疏浚及炸清礁工程。主航道和会船区工程设计底高程均为-21.5 m,疏浚边坡 1:5,炸礁边坡 1:1.5。工程建成后将满足 30 万吨级散

货船乘潮单向通航,且可同时满足 40 万 t 散货船乘潮单向通航要求和 Q-MAX 型 LNG(液化天然气)船不乘潮单向通航要求。施工区平面布置见图 1。

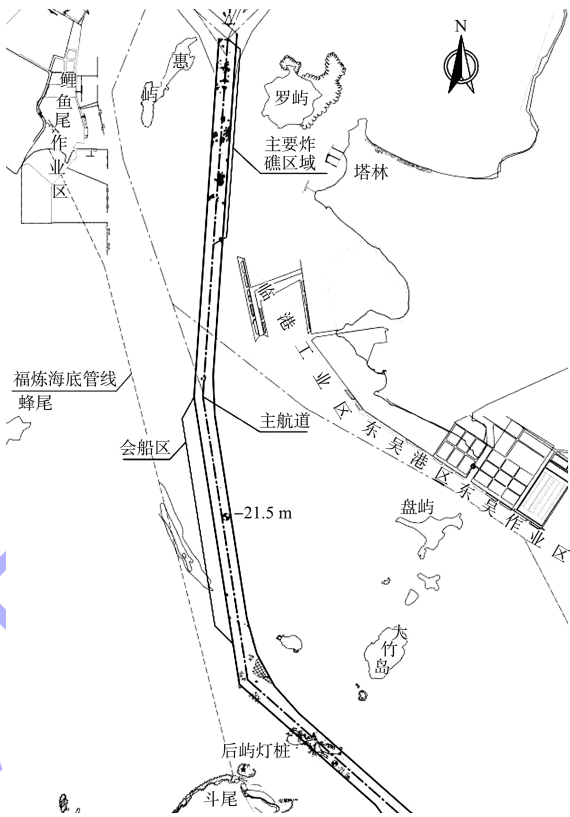


图 1 施工区平面布置

湄洲湾主航道为船舶进出湄洲湾各港区的主要通道,随着进出湄洲湾海域船舶大型化以及大型船舶到港船次明显增加等因素,对本工程施工将产生较大影响,尤其是 LNG 船舶进出港时须对航道全程封闭,施工船舶须撤离施工水域 300 m 以上。通航对施工的影响由海事局统一调度,错开施工时间和通航时间,减少相互干扰。

此外,施工区范围外的海产养殖区对施工产生不可避免的干扰,为了保证湄洲湾主航道工程的顺利实施,对当地渔民进行了拆迁补偿。

### 2 施工影响因素及设备投入

#### 2.1 施工影响因素

##### 2.1.1 施工时间限制

湄洲湾主航道工程受通航管制和季节性台风影响,海事局会根据潮汐情况安排第 2 天通航时间,通航时间集中在白天中高潮位时间段,施工

时间集中在夜晚和凌晨,炸礁船必须在通航前完成爆破并撤出航道保持 300 m 以上距离。通航管制和季节性台风属于不可抗力因素,因此必须减少爆破和移船频数,保证施工时间。

2.1.2 地质条件复杂

水下地形地质条件,尤其是岩石性能对炸礁产生浅点起着决定影响。当岩石坚硬、节理及层理明显、软硬不均时,在爆破中就容易留石坎,产生浅点<sup>[5]</sup>。施工区的礁石层厚度差异比较大,礁石厚度 0.44~4.20 m,需要填装的炸药量也有较大差异。炸礁施工尤其是岩层较厚的礁石如果不能一次性爆破到位,进行二次补爆难度会很大。因为一次爆破产生的岩石裂隙以及孤点会严重影响二次爆破的质量。因此炸礁施工对钻孔的排距、孔距和超深有严格要求。

2.1.3 生产生活区较近

施工区距离惠屿岛东侧沿海最近的距离仅 470 m。主航道 29#礁石与两岸岛屿位置见图 2。

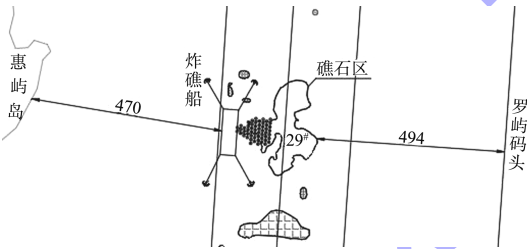


图 2 29#礁石与两岸岛屿位置关系 (单位: m)

根据公安部门对炸药的审批情况,每条炸礁船每天施工所消耗的炸药量为 1 t 左右,部分情况下可使用 1.5~2.0 t 炸药,如此大的炸药量若同时起爆必然会产生很大振动,对周边居民住房建筑物和码头将产生不良影响。

2.1.4 施工空间有限

湄洲湾航道内礁石区具有厚度适中、覆盖面积巨大的特点,仅罗屿岛和惠屿岛之间就有约 15 万 m<sup>2</sup>的礁石需要进行爆破,施工面积之大,仅依靠 1~2 条炸礁船显然难以如期完成任务,因此需要多条炸礁船同时施工,才可保证工程进度,但是两岛屿之间炸礁区相对集中,施工面相对有限,不可避免地会出现交叉施工的情况。为了减

少抛锚互相影响的情况,必须合理安排工程计划,有序进行施工。

为了应对以上影响因素,经综合考虑,投入的炸礁船均使用微差爆破技术进行炸礁施工。

2.2 施工设备

2.2.1 疏浚施工设备

根据地质勘探资料,疏浚区礁石以上土质为淤泥质和砂土,部分区域含软黏土。由于主航道通航时间限制以及抛泥区距离较远,受施工空间和施工时间影响,使用耙吸船进行大面积分层开挖比较符合实际工况。

2.2.2 炸礁施工设备

根据施工进度,投入 3 艘炸礁船,由于施工空间限制,每艘炸礁船为保证一定的效率至少配备 3 台空压机和 5 台钻孔机,并配备锚艇辅助炸礁船移动,方便通航避让。

2.2.3 清礁施工设备

炸礁的质量直接影响清礁的效果,清礁使用 13 m<sup>3</sup> 以上抓斗船,并且使用破土性能较强的石斗进行清礁,施工时相邻两斗之间保证一定的重叠区域,防止开挖造成周边土质或碎石隆起,以及较大的石块漏挖或抓斗上提时掉落,影响施工质量而造成返工。

3 炸礁施工设计

3.1 单孔装药量

爆破施工使用防水性较好的乳化炸药和 5~10 种不同段的毫秒微差雷管<sup>[6]</sup>,起爆延时 50 ms 左右。单孔装药量根据《爆破安全规程》规定的公式进行计算:

$$Q=q_0abH_0$$

(1)

式中:  $Q$  为单孔装药量(kg);  $q_0$  为水下钻孔爆破单位炸药消耗量(kg/m<sup>3</sup>);  $a$  为炮孔间距(m);  $b$  为炮孔排距(m);  $H_0$  为设计爆层厚度(m),即开挖岩层厚度与计算超深值之和。

根据水下钻孔爆破单位炸药消耗量标准,选取中等硬度岩石的  $q_0=2.09$  kg/m<sup>3</sup>。通过计算,单孔药量需要 4.6~43.9 kg 炸药,每节炸药 4 kg,

长约 50 cm，实际单孔装药量为 8~44 kg。

表 1 水下钻孔爆破单位炸药消耗量

底质类别	软岩石或 风化石	中等硬度 岩石	坚硬岩石
单位炸药消耗量/(kg·m <sup>-3</sup> )	1.72	2.09	2.47

3.2 起爆网路布置

水下布孔须与采用的钻爆平台相适应，原则上尽量简单和规则<sup>[7]</sup>。施工区域内采用 2.0 m×2.5 m (宽×长)的孔网布置，钻孔直径为 115 mm，堵塞长度 0.6~1.3 m，钻孔超深 1.5 m 及以上，各排爆破孔交错布置(梅花形布置)。以其中 1 艘炸礁船为例，该炸礁船有 5 根钻杆可以同时进行钻孔，每个船位的轨道长度刚好可以排 7 个孔，起爆网路见图 3。

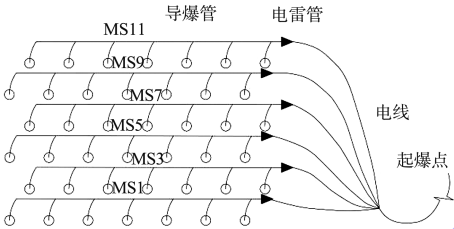


图 3 起爆网路

通过查看水深图，大部分岩层厚度为 2~3 m，厚度 4 m 左右的岩层比较少，因此最大单段炸药使用量为 300 kg 左右。岩层较薄的情况下，每排设置 7 孔，施工完 6~7 排进行起爆，爆破面积约 210~245 m<sup>2</sup>，岩层较厚的情况下对单段炸药量进行控制，施工完 4~5 排进行起爆，爆破面积约 140~175 m<sup>2</sup>，布孔时，在礁石的边界外 1~3 m 应补钻一些起爆孔，防止在礁石边缘区产生石坎或孤立的礁石区域不利于抓斗船清礁施工。

3.3 爆破时间

爆破时间严禁选择在夜晚，并且尽量避开低潮位，因为航道炸礁工程产生的振动波在传播过程中有水介质，加之水本身近似不可压缩的性质，静水压力的增加对声音和振动波有一定的削减作用。通过观察湄洲湾海域某月上、下旬 48 h 潮汐曲线，该月上旬潮差较大，通航前为退潮，并且在 8 时左右达到最低潮，因此要在凌晨退潮时完成爆破，预留足够的时间撤出航道；下旬潮差较月上旬小很多，通航时间较长，通航前虽然退潮，

但是因为处于高潮位，可以选择通航前 1~2 h 进行爆破，尽可能利用高潮位延长声音和振动波在海水中的传播距离，进一步削减爆破产生的声音和振动波，潮汐曲线与施工安排见图 4。

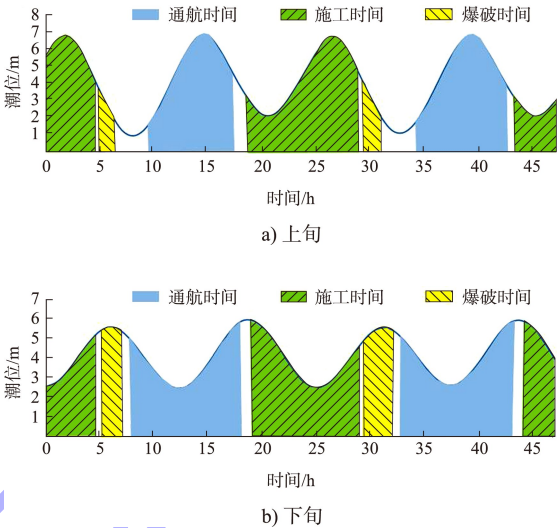


图 4 潮汐曲线与施工安排

3.4 爆破振动

爆区水深超过 15 m，个别飞石的影响可不予考虑。因此，爆破产生的振动为爆破有害效应的主要考虑对象。根据《水运工程爆破技术规范》<sup>[8]</sup>的规定，爆破地震波安全距离按以下公式计算：

$$R=\left(\frac{K}{v}\right)^{\frac{1}{\alpha}}Q^{\frac{1}{3}}$$

(2)

式中： $Q$  为一次起爆炸药量(kg)，微差起爆时取最大一段的装药量； $R$  为爆破与被保护建(构)筑物的距离(m)； $v$  为保护对象所在地质点振动安全允许速度(cm/s)，安全起见，因岛上有少量砖砌平房，允许爆破地震速度可取  $v=2.0$  cm/s； $K$ 、 $\alpha$  为与爆破点地形、地质等条件有关的系数和衰减指数，不同岩性的系数和衰减系数取值见表 2。

表 2 不同岩性的系数和衰减指数数值

岩性	$K$	$\alpha$
坚硬岩石	50~150	1.3~1.5
中硬岩石	150~250	1.5~1.8
软岩石	250~350	1.8~2.0

根据施工区地质条件分布和炸礁船的参数性能、施工布置，本工程炸礁单段药量可控制在 300 kg 以内，因此验算时取最大值单段用药量为



300 kg。根据工程地质资料本工程爆破施工区地质为散体状强风化花岗岩、碎块状强风化花岗岩和中风化花岗岩,安全起见,取  $K=150$ 、 $\alpha=1.3$ , 岛上有少量民房为普通砖砌房屋,取建筑物所在地质点安全振动速度  $v=2\text{ cm/s}$ 。根据施工现场情况,距离爆破点最近的建筑物约为 470 m,根据爆破地震波允许的安全距离公式,在单段使用最大药量 300 kg 时,经计算产生的振动速度  $v=0.6\text{ cm/s}$ ,小于最小允许安全振动速度 2 cm/s。

通过上述计算,本工程炸礁爆破作业单段用药量在 300 kg 以内时,可满足爆破施工区域周边码头、居民区、航标等构筑物的安全要求。

#### 4 施工过程

炸礁施工区主要集中在罗屿岛和惠屿岛之间,因为工程进度需要 3 艘炸礁船在这一有限的空间内同时施工。由于空间的局限性,炸礁船在邻近的礁石施工时,抛锚会互相干扰,不可避免地形成交叉施工。为了协调此类工况,须由调度人员合理安排、有序进出施工区。

炸礁船使用 RTK-DGPS(实时动态-差分全球定位系统)进行定位并以礁石为单位进行施工,湄洲湾主航道范围内有 24 块礁石,编号分别为 9<sup>#</sup>~32<sup>#</sup>,礁石厚度为 0.44~4.20 m,按照实际情况超深。各礁石区厚度差异较大,对于不同厚度的礁石应当按照规范使用不同的炸药量,本工程采用防水性强、爆炸性好的特制水下专用乳化炸药和不同编号的毫秒级雷管,控制单段起爆的炸药量,降低振动波强度和传播距离,按规范有序进行微差爆破。

为了客观了解爆破产生的振动是否会对周边环境造成影响,选取单段起爆炸药量较大的几天在惠屿岛进行实地监测。结果显示,爆破产生的振动小于计算值,其主要原因为:1)计算时对于参数的选取比较保守;2)一定的潮位增加了航道的水深,静水压力的增加对爆破振动波有一定的削减作用。由于 3 艘炸礁船同时施工,提前沟通错开起爆时间,尽可能避免低潮位起爆,测量值见表 3。

表 3 起爆振动瞬时测量值

日期	振动速度/ ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	距离/m	潮位/m	单段最大 炸药量/kg
6 月 15 日	0.064	495	3.5	276
6 月 22 日	0.035	486	5.1	288
7 月 1 日	0.053	502	3.3	260
7 月 5 日	0.073	481	2.3	268
7 月 23 日	0.042	536	4.2	228

#### 5 结论

1)通过计算,单段爆破炸药量 300 kg 以内时,对最近构筑物产生的最大振动速度为 0.6 cm/s,小于所在地质点安全允许振动速度 2 cm/s,不会对周边环境造成不良影响。

2)通过利用潮汐作用,进一步削减爆破振动波和噪音,通过现场施工监测,3 艘炸礁船单日最大爆破量超过 5 t,没有对周边的居民和设施造成不良影响。微差爆破技术有效降低了爆破振动波,增加单日炸药使用量,减少炸礁船移船时间,提高施工效率,在多种因素限制条件下,在工期内顺利完成炸礁施工任务。

#### 参考文献:

[1] 中国工程爆破协会,广东宏大爆破股份有限公司,浙江省高能爆破工程有限公司.爆破安全规程:GB 6722—2014[S].北京:中国质检出版社,2014.

[2] 赵根,黎卫超.水下爆破技术发展[J].爆破,2020,37(1): 1-12.

[3] 李春军,吴立,李红勇,等.水深和堵塞长度对水下钻孔爆破冲击波传播特性影响的模拟研究[J].爆破,2018,35(4): 47-51,73.

[4] 沈秋池.耙吸式挖泥船施工工艺介绍:以某航道三期工程(Ⅱ阶段)为例[J].福建建材,2018(9): 82-84.

[5] 李博凌,蒋中明.大连港鲇鱼湾港区水下炸礁浅点控制技术研究[J].吉林水利,2017(10): 13-16,19.

[6] 王磊.微差爆破技术在林齿礁炸礁工程中的应用[J].水运工程,2017(S2): 36-39.

[7] 王忠康,杨仕教,王富林,等.港口航道水下炸礁工程实践[J].爆破,2016,33(2): 123-127.

[8] 长江重庆航道工程局.水运工程爆破技术规范:JTS 204—2008[S].北京:人民交通出版社,2008.