

航道疏浚水下炸礁施工关键技术

赵玉春 王 印 安东升

中国电建集团港航建设有限公司 天津 300467

【摘要】：本文探讨了水下深孔爆破的钻孔布设、装药技术及爆破网络设计，重点分析了钻孔参数的合理性、爆破能量分布及孔内处理技术对工程效果的影响。首先，合理的孔距、孔深和孔径设计是确保爆破效果和底床平整度的关键，并且需结合工程地质和设备能力综合考虑。其次，装填炸药时需要遵循严格的安全和技术标准，以确保爆破能量有效作用于岩体。最后，通过对起爆顺序、延时策略和爆破规模的优化，本文提出了一系列措施，以提高水下爆破作业的通畅性和安全性。

【关键词】：航道疏浚；水下炸礁；爆破；关键技术

DOI:10.12417/2811-0528.26.05.077

水下深孔爆破在水下工程施工中起着至关重要的作用，其效果直接影响到岩体的破碎和航道底床的平整度，进而关系到后续作业的顺利进行。因此，合理的钻孔布设和炸药装填是实现高效、安全爆破的基础。本文将从钻孔工艺、装药原则及爆破网络设计进行系统分析，以期为实际工程提供参考和借鉴。

1 钻孔布孔与定位技术

水下深孔爆破钻孔布设参数（孔距、排距、孔深、孔径）的合理性决定爆破能量分布，是控制岩体破碎、大块率和航道底床平整度的关键，设计需兼顾爆破理论要求与工程地质、装备能力及爆后清理的技术经济可行性。

(1) 布孔原则与孔网参数确定：水下钻孔爆破孔径取决于钻船设备能力，需兼顾钻具导管性能保作业稳定，本工程选用水下深孔爆破常用的 115mm 孔径，兼顾成孔效率与爆破效果。

孔网参数设计的目标是在保证孔底不残留“岩埂”、孔顶不过分产生大块的前提下，实现爆破作用范围的合理重叠，以减少水下二次破碎工作量。按照工程实践中广泛采用的经验关系，水下深孔爆破的孔距 a 和排距 b 与最小抵抗线 W 之间大致满足：

对于坚硬完整岩石：

$$a = (1.0 \sim 1.25) W$$

$$b = (0.8 \sim 1.2) W$$

对于裂隙发育或中等硬度岩层：

$$a = (1.25 \sim 1.5) W$$

$$b = (1.2 \sim 1.5) W$$

依托工程爆区岩性为中风化砂岩、泥岩，中等硬度且裂隙中等发育，经验取最小抵抗线 2.0m，孔距、排距理论值分别

为 2.5~ 3.0m、2.4~ 3.0m；设计平衡爆破效果与孔数，孔距排距均取 2.5m，梅花形布孔保障破碎均匀及底床平整。

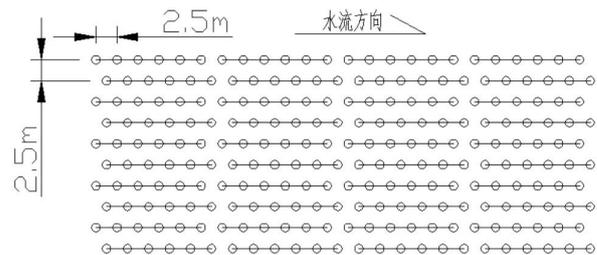


图1 水下爆破布孔示意图

(2) 钻孔工艺与关键参数控制：孔网参数既定，严控钻孔工艺保成孔质量，流程为：核算总孔深，下套管护孔防塌漏，气动钻进同步风压排渣。钻进控制核心参数：软/中硬/坚硬岩钻进速度对应 3~ 5、2~ 3、1~ 2m/h；钻压 150~ 200kN，转速 40~ 60r/min，冲击频率 1500~ 2000 次/min；排渣风压 0.5~ 0.7MPa，保障钻进效率与排渣效果。

(3) 孔深计算与修正方法：水下孔深受设计底标高、超深值、实时水位波动及地形起伏影响，需动态计算并予以修正。钻孔总深度与岩体爆破厚度分别按如下公式计算：

$$H = A - C + D$$

$$h = B - C + D$$

其中， H 为自水面至孔底的钻孔总深度， h 为岩体范围内的有效爆破厚度； A 为钻孔时的实时水位标高， B 为实测岩面标高， C 为设计底标高， D 为预定超深值。通过对实时水位和岩面高程的准确获取，可以动态调整钻孔目标深度，避免因潮位变化或岩面起伏导致的“欠深”或“超深”。

2 炸药装填与孔内处理技术

2.1 装填原则与装药量计算

(1) 药包加工、下装与填塞原则：药包在专用加工房制作，需满足防潮、防静电、防火要求，地面铺木板、用非金属材料防火花。装药时套管慢下药包，吊炮绳控速控姿，竹质杆推送就位；装药后测药包顶标高，必须低于设计岩面标高。标高不合格即刻回收炸药雷管，调孔深/药量重装药，残留孔洞用泥砂回填，严禁留带药残孔。

(2) 装药量计算：水下爆破单位耗药量高于陆上，因水压限制爆轰气体膨胀、岩体破碎需克服水阻力。水下钻孔爆破每孔装药量一般采用体积法进行计算：

$$Q=q_0 \times a \times b \times H_0$$

其中， Q 为单孔装药量 (kg)， q_0 为单位耗药量 (kg/m^3)， a 、 b 分别为孔距和排距 (m)， H_0 为设计爆层厚度 (含超深值的钻孔深度，m)。结合依托工程岩性及既有实践经验，水下爆破单位耗药量取 $q_0 \approx 1.0 \text{kg}/\text{m}^3$ 。考虑水压、水阻和爆破效果要求，常规装药量应使药柱长度达到钻孔深度的 60%~80% 左右，以保证足够的爆破能量作用于设计爆破层。

以上述原则为基础，结合岩层实际厚度、超深要求和药卷规格，制定水下钻孔爆破孔深与炸药用量对照表，表 1 给出不同岩层厚度对应的超深、孔深、装药量、药卷数量、药柱长度及堵塞长度，供现场爆破人员直观参考配药。

表 1 水下钻孔爆破孔深和炸药用量汇总表

岩层厚度 (m)	超深 (m)	孔深 (m)	实际用量 (kg)	药卷数量 (卷)	药柱长度 (m)	堵塞长度 (m)
0.5	1.5	2.0	12	4	1.6	0.4
1.0	1.5	2.5	15	5	2.0	0.5
1.5	1.5	3.0	18	6	2.4	0.6
2	1.5	3.5	18	6	2.4	1.1
2.5	1.5	4	21	7	2.8	1.2
3	1.5	4.5	24	8	3.2	1.3
3.5	1.5	5	27	9	3.6	1.4

4	1.5	5.5	30	10	4	1.5
4.5	1.5	6	33	11	4.4	1.6
5	1.5	6.5	39	13	5.2	1.3
5.5	1.5	7	42	14	5.6	1.4
6	1.5	7.5	45	15	6	1.5
6.5	1.5	8	51	17	6.8	1.2
7	1.5	8.5	54	18	7.2	1.3

(3) 装药结构及起爆方式：装药结构设计需兼顾竖向爆破能量、起爆波传播及水下封口可靠性，钻孔后应快速装药封口，避免孔口堵塞回淤；装药前需检查孔壁孔底，合格后方可下药。起爆体参数依爆破厚度 (含超深) 和孔深确定：药柱 < 3m 设单起爆体于下部 1/3，配 1~2 发数码雷管；药柱 $\geq 3\text{m}$ 设双起爆体于底部 1/4、3/4 处，每处配 1~3 发雷管，保障起爆可靠，提升爆层破碎均匀性。

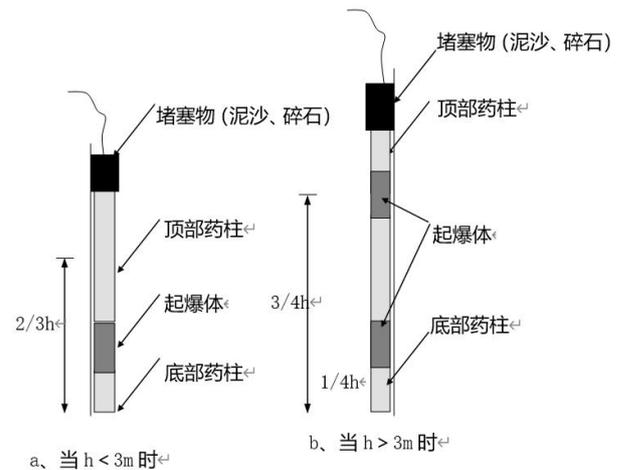


图 2 装药结构示意图

2.2 孔内封堵与防护技术

孔内封堵技术是保障爆炸能量有效作用于目标岩体、防止能量沿孔道提前泄放并降低水下冲击波和飞石危害的关键技术环节。

(1) 封堵材料选择与结构形式：采用“下柔上刚”的多层封堵结构。在药包顶部紧接着设置细砂缓冲层，厚度一般为 0.5~1.0m，砂粒粒径控制在 0.5~2mm 范围内，并要求无棱角尖锐颗粒。

在缓冲层之上至孔口范围内,则采用粗砂或碎石作为主封堵层,粒径一般控制在5~20mm。粗粒材料具有较高的内部摩擦与嵌挤作用,利于形成较高的孔内阻力,从而提高封堵层的抗冲击能力。

(2) 封堵工艺与质量控制要求: 封堵施工按“分层填塞、逐层捣实”执行,每次填料0.3~0.5m,采用无火花炮棍轻捣;封堵长度需≥孔深1/3且>最小抵抗线0.7倍,封堵后检查孔口密实度及沉降漏料情况,必要时检验其稳定性。

3 爆破网络设计

水下炸礁爆破属于高能量、强扰动的工程活动,本节在爆破参数与装药量已确定的基础上,对依托工程的爆破网络设计进行系统论述。

3.1 起爆序列与延时策略

为实现减振、优化块度和控制岩石抛掷方向,采用微差爆破技术,通过数码电子雷管精确控制各炮孔的起爆顺序和时间间隔。

(1) 起爆网络设计: 采用数码电子雷管作为起爆元件,起爆方式为起爆器起爆数码电子雷管,形成逐孔毫秒微差并联起爆网络。

①岩层厚度0.5~4.5m: 岩层厚度0.5~4.5m时、对应孔深为2~6m,每排布置6个炮孔,一次起爆4排,总孔数为24个。根据装药设计,单孔装药量范围为12~33kg,采用逐孔起爆方式,则最大单段药量为33kg。一次起爆总药量为:

$$Q=33\text{kg}/\text{孔} \times 24 \text{个}=792\text{kg}$$

所有炮孔均装设数码电子雷管,孔间延时间统一采用30ms,所有雷管以并联方式接入起爆母线。

②岩层厚度4.5~6m: 岩层厚度4.5~6.0m时,对应孔深为6.0~7.5m,每排布置6个炮孔,一次起爆排数调整为3排,总孔数为18个。单孔装药量范围为33~45kg,采用逐孔起爆方式,最大单段药量为45kg。一次起爆总药量为:

$$Q=45\text{kg}/\text{孔} \times 18 \text{个}=810\text{kg}$$

参考文献:

- [1] 刘宁.平陆运河工程建设关键问题研究与思考[J].水运工程,2024,(06):1-11.
- [2] 喻灿星,覃国杰,曾丽.内河航道水下炸礁钻孔爆破技术研究[J].工程爆破,2021,27(04):58-63.
- [3] 马成帅,吴红波,王尹军,等.不同气流量下气泡帷幕对水下冲击波衰减特性研究[J].振动与冲击,2024,43(07):239-244+265.
- [4] 李启佳,曹福,邹永胜,等.深水条件下水深对炸药性能影响研究[J].爆破,2024,41(03):162-170.

孔内装设数码电子雷管,孔间延时依然为30ms,各发雷管全部并联接入母线。

(2) 最大单段药量及一次起爆药量爆破规模: 为进一步明确不同工况下的爆破规模,水下钻孔爆破孔深与炸药用量的关系综合见表2。

表2 水下钻孔爆破孔深和炸药用量汇总表

岩层厚度(m)	孔深(m)	单孔装药量(kg)	孔数(个)	一次起爆药量Q一次(kg)
0.5~4.5	2~6	12~33	24	792
4.5~6	6.0~7.5	33~45	18	810
6.0~7.0	7.5~8.5	45~54	18	972
说明:①最大一次起爆药量Q最大=972kg;最大单段药量54kg。				

在微差起爆间隔方面,微差起爆间隔应使相邻药包振动波达保护目标时差大于主振周期,间隔≥100ms可有效削弱振动波峰叠加。

(3) 爆破效果优化策略: 满足安全要求前提下,优化起爆网络与孔位结构可提升爆破成效,核心体现在抛掷方向与破碎块度控制: 一是布设75°~85°倾斜孔朝向航道中心线,引导岩块定向抛掷,降低对边坡及构筑物影响,便于清渣和断面成型;二是通过孔网加密、装药结构优化及微差时序精控,提升爆区能量覆盖均匀度与利用率,严控块度。

4 总结

通过对水下深孔爆破技术的深入研究,本文总结出合理的钻孔参数、安装炸药和优化起爆网络能够显著提高爆破的有效性和安全性。实际工程中应根据实时数据动态调整设计参数,以应对水位波动和地形变化带来的挑战。同时,通过微差起爆技术和合理的封堵结构,可以有效降低水下冲击波和飞石风险,从而实现精准控制爆破效果。这些技术措施的综合应用,将为水下深孔爆破作业的成功实施提供保障。