

水下钻孔爆破技术施工工艺流程及方案研究

姜源^{1,*}

1. 海陆(烟台)环保疏浚有限公司, 山东 烟台, 264001

摘要: 水下钻孔爆破对爆破技术、施工设备和施工工艺等方面的要求较高, 本文以中兴电力蓬莱一期 2×1000MW 级高效超净燃煤电厂示范工程为研究背景, 结合爆破地质条件、周边环境特点等, 对水下钻孔爆破技术施工工艺流程及方案研究。重点对水下钻孔爆破技术施工流程工艺、爆破相关参数设计等进行了研究讨论。研究结果表明工程实践证明本工程单孔药量不超过 48.38kg, 研判了人员和非施工船舶撤离半径, 确保水下爆破施工的安全保证, 具有一定的工程实践价值。

关键词: 水下钻孔爆破技术; 安全; 爆破控制; 施工方案

A Study of Construction Techniques and Schemes for Underwater Drill-and-Blast

Yuan Jiang^{1,*}

1. *Sea&Land(YanTai)Environmental Protection Dredging co.,ltd., Yantai,Shandong, China, 264001*

Abstract: Underwater drill-and-blast operations impose high requirements on blasting techniques, construction equipment, and construction technologies. Based on the Zhongxing Power Penglai Phase I 2×1000MW Ultra-supercritical Coal-fired Power Plant Demonstration Project, this paper investigates the construction process flow and methodology for underwater drill-and-blast technology, taking into account the geological conditions and surrounding environment. It focuses on the construction process flow and the design of blasting-related parameters. Engineering practice has demonstrated that with a maximum charge amount per hole not exceeding 48.38 kg in this project, the evacuation radius for personnel and non-construction vessels was determined, ensuring the safety of the underwater blasting construction. The study offers certain value for engineering practice.

Keywords: Underwater Drill-and-Blast Technology; Safety; Blasting Control; Construction Scheme

随着我国“海洋强国”战略的深入推进与沿海经济带的蓬勃发展, 水下工程建设迎来了前所未有的高潮。港口航道疏浚、跨海大桥基础开挖、海底管线铺设、水下沉船清除等工程活动日益频繁。在这些工程中, 水下岩石是经常遇到的主要障碍物。水下钻孔爆破技术作为破碎水下岩层最直接、最有效的手段, 其技术水平直接关系到工程的成败、工期、成本与安全。

与陆地爆破相比, 水下钻孔爆破是在一个由水体、岩石和空气构成的复杂系统中进行, 作业环境具有不可见、高压、强流动性和难干预等特点。这使得该项技术面临着钻孔定位与成孔困难、装药与堵塞质量难以保障、起爆网络可靠性要求高、爆破有害效应(如水中冲击波、地震波)控制复杂等一系列严峻的技术挑战。任何一个环节的失误, 都可能导致钻孔偏斜、炸药能量利用率低、

甚至发生拒爆等严重事故,不仅造成经济损失,更可能对水生生态环境和周边结构物安全构成威胁。因此,开展系统、科学的水下钻孔爆破技术方案设计研究,对于提升我国水下工程建设能力、保障作业安全、保护生态环境具有极其重要的理论价值和现实意义^[1]。

1 工程案例

本项目为中兴电力蓬莱一期 2×1000MW 级高效超净燃煤电厂示范工程的取排水部分,地处山东省烟台市辖区的蓬莱市境内,烟台港栾家口港区西南侧。厂区东距蓬莱市中心 12 千米,西距龙口市中心 18 千米。建设内容主要包括取排水暗涵、排水口、取水明渠、隔热堤、挡沙堤及护岸工程。

取水明渠断面为倒梯形,底宽约 28 米,开挖边坡为 1:0.5,连接取水口处起点底高程为-5.83 米,岸边终点底高程为-6.04 米,长 876.8 米采用斜坡式结构。取水暗涵及排水暗涵以海岸线作为分界分为陆域段及海域段,陆域段为钢筋混凝土 4 孔、2 孔现浇箱涵,共计 540.31 米,海域段长度约 1890m,为预制 4 孔箱涵,分段长度为 30 米。海域段海上水深 1.5 米以上拟采用的水下钻孔爆破。

2 施工方案与工艺流程

2.1 施工方案

水下爆破施工环境受到水流、水深、水温等多种因素的影响。这些因素会直接影响爆破的效果和安全性。水下爆破作业受到水压、光线、声音等多种因素的制约,施工难度较大。水的比重和浮力使得炸药的固定和定位变得更加复杂。水下爆破涉及炸药的使用,安全风险较高。施工过程中严格遵循爆破操作规程,确保施工安全。水下爆破对爆破技术、施工设备和施工工艺等方面的要求较高。必须选用抗水性能较好的炸药^[2],并且在装药时要确保炸药包的比重足够大,以防止其在水中漂浮或移动。

爆破前需提前做好相关技术保障条件,水深测量获取精确的水深图,用于计算静水压力和炸药用量。流速和潮汐掌握水流速度和潮汐规律,以确定最佳作业窗口和布药策略。海底地质通过钻探和声学探测,了解岩层性质、硬度和厚度,是选择炸药类型和确定单耗(单位体积岩石的炸药消耗量)的关键依据。海底地貌识别障碍物、陡坡等,避免布药时发生意外。炸药量计算采用经验公式和专用软件,综合考虑岩石性质、水深、爆破目标(破碎、松动或抛掷)和允许的振动值,精确计算总药量和单孔药量。布置设计确定孔网参数(孔距、排距)、药包间距和埋深。对于水下钻孔爆破,需设计钻孔深度和角度。起爆方式采用电子雷管起爆网路。

本工程爆破后的标高不能高出设计标高,钻孔留有一定的超深,以保证疏浚施工的开挖深度;布孔设计一定的超宽,以保证清渣施工的开挖宽度。综合考虑本工程的特点、开挖深度及现有施工设备等因素,方案确定为:设计底标高以控制钻孔深度,实施台阶微差爆破。爆破规模小,易防护;工序循环快,施工效率高等特点。技术关键有 4 点:确定合理的单位耗药量 Q 、合理地布置炮孔和药包、严格控制最大单段装药量、设计合理的爆破延时网路和起爆顺序。

2.2 施工工艺流程

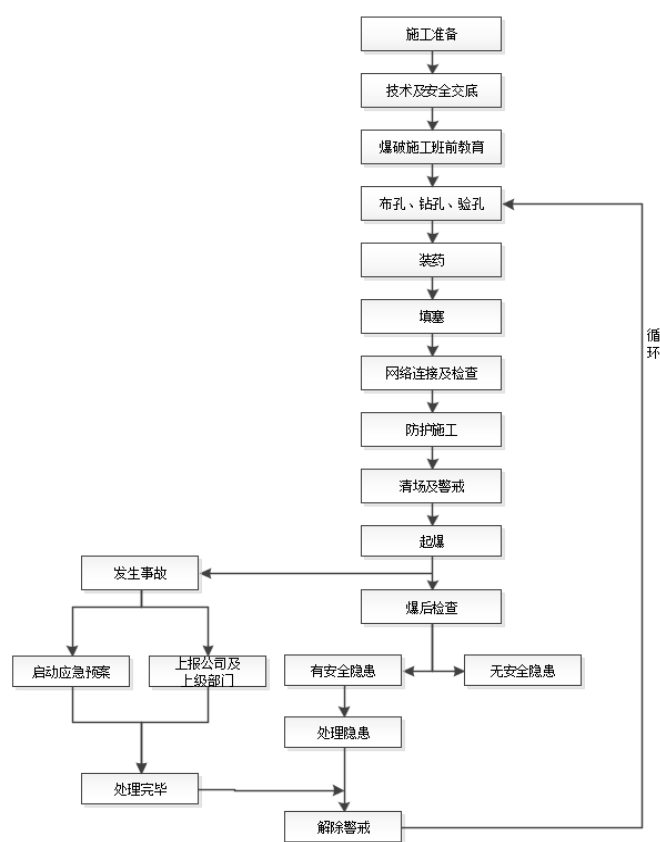


图 1 本工程爆破施工工艺流程
Fig.1 Blasting Process Flow for This Project

3 爆破相关参数设计

3.1 地质地貌及周边环境情况

本地区海洋水文调查主要针对各水深基准面关系、潮汐、波浪、海流、风暴潮等，蓬莱市属低山丘陵区，地势由南向北倾斜，北部沿海地带较为低平，全市大部分地面高程在海拔 200m 以下。施工区域揭露的地层较多，爆破开挖涉及的主要地层有：全风化玄武岩、强中风化玄武岩、中风化玄武岩。水下爆破区域周边无建筑物。周边没有渔业资源，无需要保护的海洋物种。

3.2 爆破参数设计

综合考虑本工程的特点，结合其它炸礁工程的经验^[3]，依据《水运工程爆破技术规范》（JTS204-2023）^[4]，并考虑到疏浚能力以及设备孔径、炸药的性能等因素，确定爆破参数 Q 常采用经验公式：

$$Q = qabH \tag{1}$$

$$b = a / 1.2 \tag{2}$$

其中 Q 为单孔装药量单位为 kg，q 为单位炸药消耗量，a 为孔距，b 为排距，H 为爆破厚度。排距 b 计算参考类似工程，本爆破工程设计炸药单耗 q 取 1.2kg/m³，钻孔直径 D 取 115mm，钻孔超深 h 取 2m，装药长度 L1 取 6m，堵塞长度 L2>0.5m，孔深 L，堵塞材料为细砂石。项目具体计算参数如表 1 所示，起爆网络与装药示意图如图 2 设计采用垂直钻孔，三角形布孔，以北面为自由面。

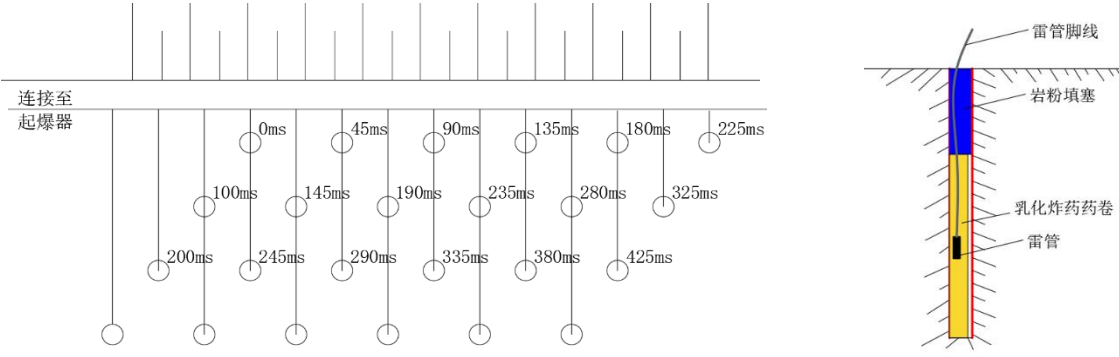


图 2 本工程排孔起爆网络图与装药布置示意图

Fig.2 Schematic of Drill Pattern, Initiation Circuit, and Charge Layout for the Project

表 1 不同深度爆破参数表

Table 1 Blasting Parameter Table for Varying Depths for This Project

q(kg/m ³)	H/m	D/mm	h/m	L/m	L1/m	L2/m	a/m	b/m	Q _单 /kg
1.2	4	115	2	6	3.8	>0.5	2.8	2.4	32
1.2	6	115	2	8	6	>0.5	2.8	2.4	48
1.2	8	115	2	10	9	>0.5	3	2.5	72

3.3 爆破安全监测

选择高潮位时段进行爆破作业，利用最大水深形成天然覆盖层，有效抑制爆炸能量和破碎物向水面的喷射，降低飞石抛掷风险与高度。通过精确计算与现场试验，严格校核并控制单孔与单段起爆药量，从能量源头控制飞散强度。选用粗砂、砾石或专用炮泥等惰性材料进行炮孔填塞，确保填塞长度不小于最小抵抗线，并保证密实度，以有效阻滞高压气体过早冲出形成飞石。采用微差延时起爆技术，设计合理的起爆顺序与间隔时间，使先爆孔为后爆孔创造新的临空面，减少岩石抛掷能量并控制飞石方向。布孔前详细勘察岩体结构，钻孔时避开软弱夹层或裂隙；装药时确保药包置于完整岩层中，防止爆炸燃气顺结构面优先逸散，产生意外飞石。

爆破水中的危害主要表现为冲击波对附近涉水作业人员和船舶的影响。对涉水人员和船舶事故预防主要采取：设立爆破警示牌，提前警告；起爆前由警戒人员实施警戒，督促人员、船舶避让，防止误入施工区域。建立完善的起爆联络机制，确保人员和机械设备撤离安全区后方可起爆。爆炸冲击波传递到水面，近岸潮间带部分，通过毫秒延时爆破技术，控制单次起爆药量，减轻爆破涌浪[5]。

监测点布设在爆区与被保护对象之间，尽可能靠近保护对象的基础或关键部位。测点位置需通过 GPS 或全站仪精确定位，确保传感器与地基耦合良好核心监测参数为质点振动速度（PPV），其为判定爆破振动对建筑物影响的核心国际标准。传感器必须能同时记录三个互相垂直方向（垂直向、径向、切向）的振动数据，并取合成向量作为最终判定值，建立实时反馈与预警机制，所有原始波形数据及报告必须长期存档备查，形成完整的可追溯的安全责任档案。

根据《爆破安全规程》（GB6722- 2014）[6]中第 13 节“安全允许距离与对环境影响的控制”计算水下爆破的水中冲击波及涌浪安全允许距离。以本工程为例，由于是在水深不大于 30m 的水域内进行水下爆破,水中冲击波的安全允许距离相关参数按照《爆破安全规程》（GB6722-2014）执行。

对人员和施工船舶的水中冲击波安全允许距离按照下列公式估算：

$$R=K_0(Q)^{1/3}$$

(3)

其中，R 代表水中冲击波的最小安全允许距离,单位为米(m)，K₀ 系数参照规范中选取。

表 2 对人员的水中冲击波安全允许距离

Table 2 Personnel Safety Permissible Range for Underwater Shock Waves

装药及人员状况		装药量/kg		
		Q≤50	50<Q≤200	200<Q≤1000
水中裸露装药/m	游泳	900	1400	2000
	潜水	1200	1800	2600
钻孔或药室装药/m	游泳	500	700	1100
	潜水	600	900	1400

表 3 对施工船舶的水中冲击波安全允许距离

Table 3 Permissible Safety Range for Construction Vessels Against Underwater Shock Waves

装药及船舶类别		装药量/kg		
		Q≤50	50<Q≤200	200<Q≤1000
水中裸露装药/m	木船	200	300	500
	铁船	100	150	250
钻孔或药室装药/m	木船	100	150	250
	铁船	70	100	150

由于是在水深不大于 30 米的水域内进行水下爆破,根据《爆破安全规程》（GB6722-2014）水中冲击波的安全允许距离参照表 2 和表 3 执行，并将计算结果对比后取较大值。根据计算爆破，本项目所有人员必须撤离至距爆炸源 1676.8 米以外的水域，爆破时，所有非施工船舶必须撤离至距爆炸源 157.2 米以外的水域。

4 结论

综上所述，工程实践证明本工程单孔药量不超过 48.38kg，本工程最大一次起爆药量根据实际情况可分开起爆,按现有规范控制在 200<Q≤1000,所有人员必须撤离至距爆源 1676.8 米以外的水域，爆破时，所有非施工船舶必须撤离至距爆源 157.2 米以外的水域，确保爆破施工不对周边建（构）筑物造成影响。该爆破符合相关方案设计科学合理，可为同类型水下爆破施工提供参考意义。

参考文献：

[1] 赵根,黎卫超.水下爆破技术发展[J]. 爆破, 2020, 37(01): 1-12.

[2] 吴伟武.航道整治工程中水下炸礁施工控制探讨[J]. 黑龙江水利科技, 2021, 49(7): 204-206

[3] 曹宏桥.码头工程水下炸礁爆破施工方案优化设计[J]. 工程技术研究, 2023, 8(04): 220-222.

[4] 水运工程爆破技术规范:JTS 204-2008[S], 2008.

[5] 李观正.水下钻孔爆破施工中的安全和质量控制[J]. 珠江水运, 2021, (18): 55-56.

[6] 宋文峰,何平成.《爆破安全规程》(GB 6722—2014)已发布[J]. 工程爆破, 2015, 21(01): 62.

^{1,*}第一作者和通讯作者简介：姜源（1992-）男，学士学位，工程师，主要研究方向：港口航道工程建设。E-mail: jyjc88@163.com。