



# 深水条件下钻孔爆破合理堵塞长度的数值研究

李启佳, 邹永胜

(长江重庆航道工程局, 重庆 400010)

**摘要:** 合理的堵塞长度在深水条件下钻孔爆破时, 不仅可以提高爆破效果, 还能节约施工成本。为研究深水条件下钻孔爆破在不同水深时合理的堵塞长度取值, 采用单一变量法, 仅改变堵塞长度, 结合三峡—葛洲坝两坝间莲沱段航道整治炸礁工程, 运用 ANSYS/LS-DYN 软件对水下钻孔爆破过程进行数值模拟研究。结果表明: 随着水深的增大, 岩体所受的水压力也相应增大, 同时水压力可以替代部分堵塞, 因此合理堵塞值应随着水深的增大而减小; 在 4 种典型水深 20、25、30、35 m 条件下所对应的合理堵塞长度为 140、120、100、80 cm; 同一装药结构在不同水深处爆破时, 合理堵塞值与水深成近似线性关系。

**关键词:** 深水条件; 水下钻孔爆破; ANSYS/LS-DYN 软件; 合理堵塞长度

中图分类号: U617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)11-0241-05

## Numerical study on reasonable plugging length for drilling blasting under deep water

LI Qijia, ZOU Yongsheng

(Changjiang Chongqing Waterway Engineering Bureau, Chongqing 400010, China)

**Abstract:** When drilling blasting under deep water, a reasonable plugging length cannot only improve the blasting effect but also save construction cost. In order to study the reasonable value of plugging length for deep water drilling blasting under deep water conditions, we use a single variable method to only change the plugging length, and apply ANSYS/LS-DYN software to conduct numerical simulation research on underwater drilling blasting combining with waterway regulation project of Liantuo River between the Three Gorges Dam and Gezhouba Dam. The results show that as the water depth increases, the water pressure on the rock mass also increases accordingly. The water pressure can replace part of the blockage. As a result, the reasonable plugging length should decrease with the increase of the water depth. Under the four typical deep water conditions of 20 m, 25 m, 30 m, and 35 m, the corresponding reasonable plugging lengths are 140 cm, 120 cm, 100 cm and 80 cm. When the same charge structure of the explosive drilling blasts at different water depths, the reasonable plugging length and water depth are approximately linearly related.

**Keywords:** deep water; underwater drilling blasting; ANSYS/LS-DYN software; reasonable plugging length

三峡—葛洲坝两坝间莲沱段航道整治炸礁工程的主要内容为炸除下岸溪—丁头镇河道两侧 6 处水下碍航岩嘴和晒经坪河段左侧水下河床, 将爆破石碴抛填于莲沱弯道深沱心的左侧用以平顺水下崎岖地形。炸礁工程量约 75.2 万 m<sup>3</sup>, 施工区域为水下 10~40 m, 水情复杂, 国内罕有类似工况的

水下钻孔爆破施工经验可供参考<sup>[1-4]</sup>。

水下钻孔爆破中, 炮孔堵塞是至关重要的一环, 堵塞的长度对于改善爆破效果和减少爆破的不良影响起着关键作用。在深水条件下, 爆破所产生的能量不仅要破碎岩石, 还有一部分能量须克服水的压力, 因此深水条件下钻孔爆破时, 炮

收稿日期: 2024-01-05

作者简介: 李启佳 (1988—), 女, 硕士, 工程师, 从事航道整治工程及水利水电工程的施工管理。

孔堵塞对炸药在炮孔内的爆炸及岩石破碎的影响十分复杂,目前对炮孔堵塞的作用关系和原理仍然没有明确的定论<sup>[5-8]</sup>。

本文根据三峡—葛洲坝两坝间莲沱段航道整治炸礁工程具体情况,采用 ANSYS/LS-DYN 模拟软件研究深水条件下水下钻孔爆破特点<sup>[9]</sup>,采用单一变量法,仅改变堵塞长度,创建典型水深条件下的不同堵塞长度的水下钻孔爆破模型,并进行详细的对比分析。

### 1 水下钻孔爆破合理堵塞长度的数值模拟

#### 1.1 材料模型及参数

##### 1.1.1 水下岩石模型及参数

选用塑性动力学模型模拟水下岩石变形以及破坏规律<sup>[10]</sup>。

岩石的材料参数设为密度 2.31 g/cm<sup>3</sup>,弹性模量 15 GPa,泊松比 0.16,屈服应力 30 GPa,切线模量 1.1 GPa,硬化参数 0.5。

##### 1.1.2 炸药模型及参数

在数值模拟中,采用高能炸药材料 MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN 和 JWL (Jones-Wilkens-Lee) 状态方程描述整个爆腔内的动力膨胀过程。JWL 方程定义了压力为相对体积和内能的关系,能精确描述爆轰产物在爆炸过程中的压力、体积、能量特性<sup>[11]</sup>。

在数值模拟中,采用 2# 岩石乳化炸药,具体参数为密度  $\rho = 1.61 \text{ g/cm}^3$ ,爆速  $D = 4\ 500 \text{ m/s}$ ,参数  $A = 371.2 \text{ GPa}$ 、 $B = 0.323\ 1 \text{ GPa}$ 、 $R_1 = 4.15$ 、 $R_2 = 0.95$ 、 $\Omega = 0.206\ 9$ ,炸药内能  $E_0 = 3.14 \text{ GPa}$ 。

##### 1.1.3 水介质状态方程及参数

水介质用 EOS\_GRUNEISEN 状态方程<sup>[12]</sup>描述。

各项参数的具体取值为密度  $\rho = 1.00 \text{ g/cm}^3$ ,曲线截距  $C = 0.1647$ 、 $S_1 = 2.56$ 、 $S_2 = 1.986$ 、 $S_3 = 1.226\ 8$ ,Gruneisen 常数项  $\gamma_0 = 0.5$ ,初始内能  $E_0 = 0 \text{ Pa}$ 。

##### 1.1.4 空气材料状态方程及参数

空气材料状态方程用 LS-DYNA 提供的 MAT\_NULL 模型模拟。

材料参数为密度  $1.18 \text{ kg/m}^3$ ,系数  $C_0 = -1.00 \text{ Pa}$ 、 $C_1 = 0$ 、 $C_2 = 0$ 、 $C_3 = 0$ 、 $C_4 = 0.4$ 、 $C_5 = 0.4$ 、 $C_6 = 0$ ,内能  $E = 2.50 \text{ MPa}$ ,体积  $V_0 = 1.0 \text{ m}^3$ 。

#### 1.2 基本计算模型

该模型的尺寸为  $2.5 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 36 \text{ m}$  (长×宽×高),其中上部水域的厚度为 20 m,下部岩体厚度为 11 m。炮孔半径为 50 mm,装药高度为 8 m,装药中部采用 0.2 m 的堵塞隔开,装药上段和下段均为 4 m,炮孔的间距为 2.2 m,炮孔的排距为 2.0 m,炮孔与炸药之间采用水耦合。模型中使用 2# 岩石乳化炸药,模型的建立过程中保持装药长度及装药密度不变。首先建立 20 m 水深下不同堵塞的模型,各模型参数见表 1。

表 1 20 m 水深条件下不同堵塞模型参数

模型序号	炸药单耗/(kg·m <sup>-3</sup> )	堵塞长度/cm
1	1.48	20
2	1.48	40
3	1.48	60
4	1.48	80
5	1.48	100
6	1.48	120
7	1.48	140
8	1.48	160

设  $x = 0$  平面和  $y = 0$  平面为对称面边界,  $z = 3\ 600 \text{ cm}$  平面为自由边界,除了以上 3 个平面外,其余各个面都设定为无反射边界,意味着在这些边界上不会发生任何反射现象,反射波会被完全吸收。

#### 1.3 模拟结果

根据理论分析可知:当堵塞长度增加时,炸药爆炸产生的能量被气体堵住,能量从炮孔溢出得越少,爆破岩层中底部破碎效果越好,然而不断增加堵塞长度,岩层上部破碎效果将会降低,大块率也会变高。为便于模型在坐标系上的分析,在堵塞层中部平面处 ( $z$  等于一个常数的平面) 设置 1 根时间记录线  $L(x, 0)$ 。在  $L$  上依次选取与点 1(70 cm, 0), 点 2(80 cm, 0), 点 3(90 cm, 0), 点 4(100 cm, 0) 和点 5(110 cm, 0) 相近的 5 个点 (Node), 紧绕这 5 个点选取 5 个单元 (Element)。

根据模拟结果得出 20 m 水深下模型 1~8 的 L 上各单元切向拉应力峰值与堵塞长度的变化关系见图 1。

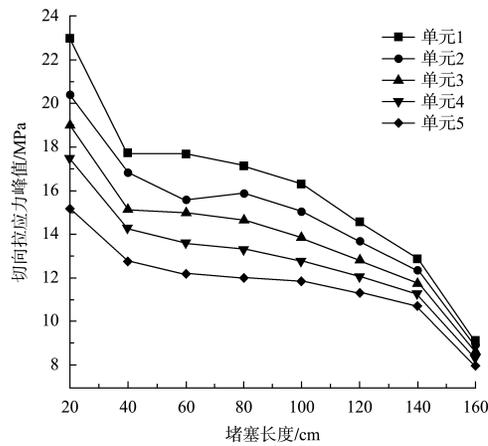


图 1 20 m 水深条件下各单元的切向拉应力峰值和堵塞长度的变化关系

#### 1.4 结果分析

随着堵塞长度的增大, 炮孔口堵塞越严密, 炸药爆炸产生的能量从炮孔溢出得越少, 爆破岩层中底部破碎效果越好。但是随着堵塞长度的增大, 堵塞层中部的岩石单元切向拉应力峰值逐渐减小, 当减小到某一程度时, 就会开始产生较大的破碎块度。该模拟结果显示与药柱水平距离( $x$ ) 110 cm 的单元 5 切向拉应力最大值为临界点, 当单元 5 的临界值小于岩石的动态抗拉强度时, 则上部岩层爆破产生的破碎块度增大。

由图 1 可看出, 当水深为 20 m、堵塞长度为 160 cm 时, 单元 5 的切向拉应力最大值为 8.013 MPa, 小于岩石的动态抗拉强度。所以堵塞长度为 160 cm 时, 容易产生较大的破碎块度, 因此, 当水深为 20 m 时, 选择 140 cm 的堵塞长度较为合理。

## 2 其他水深条件下水下钻孔爆破合理堵塞的研究

基于 20 m 水深的模拟结果, 保持其他参数不变, 改变水深, 分别建立 25、30、35 m 水深下的堵塞模型。其中 25 m 水深条件下不同堵塞模型参数中炸药单耗为  $1.58 \text{ kg/m}^3$ , 30 m 水深条件下不同堵塞模型参数中炸药单耗为  $1.67 \text{ kg/m}^3$ , 35 m 水深条件下不同堵塞模型参数中单耗为  $1.80 \text{ kg/m}^3$ ,

其余数值与表 1 一致。根据模拟结果得出 25 m 水深下模型 1~8 的 L 上各单元切向拉应力峰值与堵塞长度的变化关系见图 2。

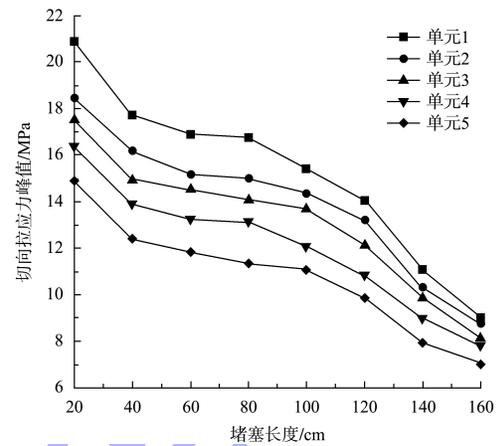


图 2 25 m 水深条件下各单元的切向拉应力峰值随堵塞长度的变化关系

由图 2 可知, 当水深为 25 m、堵塞长度为 140 cm 时, 单元 5 的切向拉应力峰值为 7.909 MPa, 小于岩石的动态抗拉强度。所以堵塞长度为 140 cm 时, 容易产生较大的破碎块度, 因此, 当水深为 25 m 时, 选择 120 cm 的堵塞长度较为合理。

根据模拟结果得出 30 m 水深下模型 1~8 的 L 上各单元切向拉应力峰值与堵塞长度的变化关系见图 3。

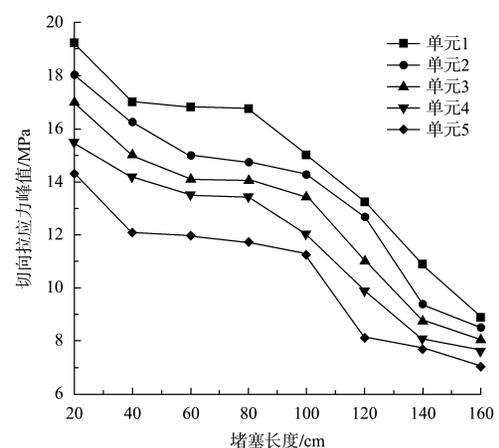


图 3 30 m 水深条件下各单元的切向拉应力峰值随堵塞长度的变化关系

由图 3 可看出, 当水深为 30 m、堵塞长度为 140 cm 时, 单元 5 的切向拉应力峰值为 8.112 MPa, 小于岩石的动态抗拉强度。所以堵塞长度为 120 cm 时, 容易产生较大的破碎块度, 因此, 当水深为

30 m 时，选择 100 cm 的堵塞长度较为合理。根据模拟结果得出 35 m 水深下模型 1~8 的 L 上各单元切向拉应力峰值与堵塞长度的变化关系见图 4。

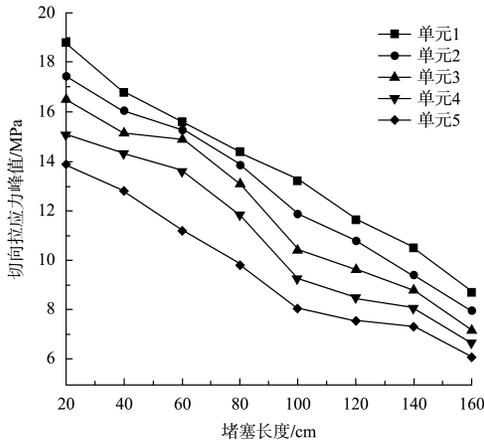


图 4 35 m 水深条件下各单元的切向拉应力峰值随堵塞长度的变化关系

由图 4 可看出，当水深为 35 m、堵塞长度为 100 cm 时，单元 5 的切向拉应力峰值为 8.047 MPa，小于岩石的动态抗拉强度。所以堵塞长度为 100 cm 时，容易产生较大的破碎块度，因此，当水深为 35 m 时，选择 80 cm 的堵塞长度较为合理。

综上，得出水深为 20、25、30、35 m 下的合理堵塞长度分别为 140、120、100、80 cm，由于同一装药在不同水深处爆破时，合理堵塞值与水深均近似线性关系，采用 Origin 软件进行线性拟合，得出施工区域内合理堵塞长度与水深之间的关系见图 5。

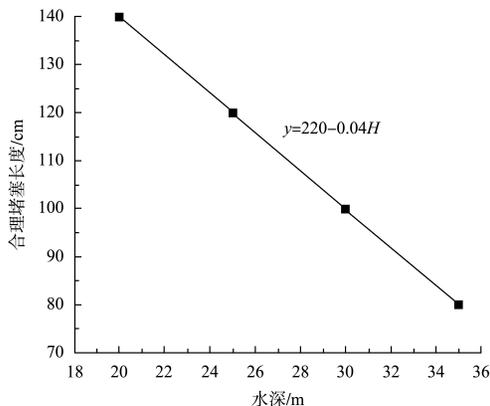


图 5 合理堵塞长度与水深之间的关系

由图 5 可知，合理堵塞长度和水深的关系式为：

$$y = 220 - 0.04H \quad (1)$$

式中：y 为合理堵塞长度，cm；H 为水深，cm。

由式(1)可知，为了达到最优的爆破效果，合理堵塞值随着水深的增大而减小。这是由于随着水深的增大，岩体所受的水压力也相应增大，这样水压力可以替代部分堵塞，阻止炸药爆炸所产生的能量过早溢出，从而加强了对岩石的爆破作用，提高了爆破效果。所以当爆破施工区域水深增加时，钻孔的堵塞长度需要适当减小。

### 3 实际应用

三峡—葛洲坝两坝间莲沱段航道整治炸礁工程中，最小抵抗线为 2.5 m，按照国内经验公式可知堵塞长度为 80 cm；按照瑞典经验公式可知堵塞长度为 200 cm；当施工水深为 20 m 时，根据数值模拟结果可知堵塞长度为 140 cm。工程实际应用中对这 3 个值均进行了现场检验，结果表明：堵塞长度为 80 cm 时，炮孔底部容易产生“留门坎”现象；堵塞长度为 200 cm 时，炮孔上部岩石破碎的大块率比例最大，需要进行二次爆破，而底部岩石又过度破碎；堵塞长度为 140 cm 时，岩石破碎块度大小均匀且适中，爆破效果更佳。表明本文中的合理堵塞值与水深之间的关系式可直接应用于实际工程中。根据不同水深条件下的水下钻孔爆破模型优化网孔参数后，共节省乳化炸药 460.5 kg，节约工程成本约 37.83 万元。

### 4 结论

1) 在水下钻孔爆破工程中炮孔的堵塞长度不宜过小，也不宜过大。不同水深条件下，选择合理的炮孔堵塞长度，有利于提高爆破的能量利用率和爆破效果。

2) 采用 ANSYS/LS-DYNA 软件对不同水深条件下水下钻孔爆破合理堵塞长度进行数值模拟。

通过分析对比发现, 在 4 种典型水深 20、25、30、35 m 条件下所对应的合理堵塞长度为 140、120、100、80 cm。

3) 经过研究表明, 随着水深的改变, 合理堵塞值与水深成近似线性关系, 采用 Origin 软件对 4 种条件下的水深和其对应的合理堵塞数据进行线性拟合, 得出施工区域内合理堵塞值与水深之间的关系式。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 张志毅, 王中黔. 交通土建工程爆破工程师手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [3] 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: 中国标准出版社, 2015.
- [4] 中交第三航务工程局有限公司, 长江重庆航道工程局.

水运工程爆破技术规范: JTS 204—2023 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2023.

- [5] 杜云贵. 爆破工程设计与施工技术[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2011.
- [6] 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(4): 58-63.
- [7] 张艳军, 陈岩武, 雷美荣, 等. 钻孔爆破炮孔堵塞长度分析[J]. 爆破, 2021, 38(3): 45-49, 129.
- [8] 赵根, 黎卫超. 水下爆破技术发展[J]. 爆破, 2020, 37(1): 1-12.
- [9] 刘兵兵, 季日臣, 吕生玺. 基于 ANSYS/LS-DYNA 水下钻孔爆破数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(27): 11776-11782.
- [10] 时党勇, 李裕春, 张国民. 基于 ANSYS/LS-DYNA8.1 进行显示动力分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [11] 李国徽, 曹棉, 肖山, 等. 水下钻孔爆破炸药单耗取值优化研究[J]. 爆破, 2019, 36(4): 112-118.
- [12] 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.

(本文编辑 王璁)

(上接第 240 页)

#### 参考文献:

- [1] 陈勇, 乔鑫杰, 朱丽丽, 等. 生态型联锁块与铰链排联合护岸形式在沱浚河整治工程中的应用[J]. 中国水运(下半月), 2024, 24(1): 100-102.
- [2] 顾宽海, 周松泽, 宋凡. 平原地区某内河生态航道整治工程设计要点[J]. 水运工程, 2020(12): 147-154.
- [3] 刘丽娟. 基于价值工程的盐河护岸维护方案优选与应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- [4] 陆明丽, 顾建, 夏小娟, 等. 浅谈高强度塑钢板桩在河道护岸工程中的应用[J]. 上海水务, 2020(2): 50-52.
- [5] 徐立强, 戴维, 王逢武, 等. 先张法预应力 U 形板桩在大湾区内河航道堤岸挡墙中的应用[J]. 水运工程, 2022(11): 165-171.

- [6] 姚炳光, 袁亮, 汪磊. 京杭运河航道新型护岸造型技术[J]. 水运工程, 2023(S2): 95-98, 128.
- [7] 王雪红, 袁海霞. 高分子板桩在城市河道护岸工程中的应用[J]. 江苏水利, 2021(8): 10-14.
- [8] 徐西群. 基于有限元的高分子聚合物板桩结构设计与研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2019.
- [9] 韦源源, 杨过, 龚俊杰, 等. 新型高分子聚合物板桩结构分析[J]. 机械工程与自动化, 2020(6): 66-67.
- [10] 于晓沐, 汤阳, 张成雷, 等. 水利工程护岸项目中高分子聚合物板桩施工分析[J]. 工程技术研究, 2023, 8(12): 97-99.
- [11] 中国建筑科学研究院. 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

(本文编辑 王传瑜)