

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.04.018

## 上游高水位下黏土坝爆破拆除技术研究应用\*

杨帆<sup>1</sup>,高鹏飞<sup>1,2</sup>,马国强<sup>1</sup>,肖健<sup>1</sup>,王峰<sup>1</sup>,陈欢<sup>1</sup>,胡坤伦<sup>2</sup>,韩体飞<sup>2</sup>

(1.安徽江南爆破工程有限公司,宣城 242300;2.安徽理工大学,淮南 232001)

**摘要:**近年来,我国暴雨洪涝、台风等自然灾害频发,各地应急抢险工程都广泛应用到了爆破技术。针对汛期黏性土质堤坝爆破拆除泄洪施工的危险性,以2020年滁河堤坝爆破拆除工程为例,通过设计具有吸泥排土性能的钻机钻孔,解决长时间高水位下黏性土质堤坝挖掘过程中湿陷性塌陷问题;通过对现有的土体中爆炸四种模型分析,选取适合应用于土质建筑物爆破拆除工程的爆腔体积计算模型,即球形药包爆炸相似理论模型,通过试爆并结合工程操作的方便性,以超出强抛掷爆破药量体积的60%计算所需爆腔体积,结合加强抛掷爆破漏斗理论及黏性土质堤坝尺寸确定孔深为3.6 m,根据以往爆破压实土的经验单耗和试爆效果确定单耗为0.83 kg/m<sup>3</sup>、孔距为2.5 m、强抛掷爆破药量为84 kg/腔,从而计算出扩腔药量为0.40 kg。结果表明,依据球形药包爆炸相似理论确定的半经验公式能满足土质建筑物爆破拆除工程应用需求,证明了以吸泥排土钻机为基础的扩腔+强抛掷爆破技术施工方法应用于防汛抢险中土质建筑物拆除的可行性和有效性。

**关键词:**黏性土质堤坝;上游高水位;湿陷性塌陷;吸泥排土钻机;土中扩腔爆破;强抛掷爆破

**中图分类号:** TU746.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2022)04-0132-06

## Research and Application of Blasting Demolition Technology of Cohesive Soil Dam under Unilateral High Water Level

YANG Fan<sup>1</sup>, GAO Peng-fei<sup>1,2</sup>, MA Guo-qiang<sup>1</sup>, XIAO Jian<sup>1</sup>,  
WANG Feng<sup>1</sup>, CHEN Huan<sup>1</sup>, HU Kun-lun<sup>2</sup>, HAN Ti-fei<sup>2</sup>

(1. Anhui JiangNan Blasting Engineering CO., LTD., XuanCheng 242300, China;

2. Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** Natural disasters such as rainstorm, flood and typhoon occur frequently in China in recent years. Blasting technology has been widely used in emergency rescue projects all over the country. In view of the risk of blasting demolition and flood discharge construction of cohesive soil dams in flood season, Chuhe dam blasting demolition project in 2020 it taken as the analysis example. The problem of collapsible collapse in the excavation of cohesive soil embankment under high water level for a long time can be solved by designing a drilling rig with mud suction and soil discharge performance. Through the analysis of four existing models of explosion in soil, the calculation model of blasting cavity volume, i. e. the spherical charge explosion similarity theory model, is suitable for blasting demolition of soil buildings. Based on this model, the blasting cavity volume required for the project is calculated as 160% of the volume of strong throwing blasting charge by blasting tests and the convenience of engineering operation. Combined with the theory of enhanced throwing blasting cavity and the size of the cohesive soil dam, the hole depth is determined as 3.6 m. According to the previous experience of blasting compacted soil, the powder factor, hole spacing and

收稿日期:2022-06-02

作者简介:杨帆(1990-),男,工程师、硕士研究生,主要从事爆炸技术的应用研究,(E-mail)754699061@qq.com。

通讯作者:高鹏飞(1989-),男,高级工程师、硕士生导师、在读博士研究生,主要从事爆炸技术的应用研究,(E-mail)568662152@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(51604009)

charge amount of enhanced throwing blasting are determined as 0.83 kg/m<sup>3</sup>, 2.5 m and 84 kg/cavity, respectively. Thus the charge amount of cavity expanding is calculated as 0.40 kg. The results show that the semi empirical formula based on the similarity theory of spherical charge explosion can meet the application needs of blasting demolition of soil buildings. It is proved that the construction method of cavity expansion and strong throwing blasting technology based on mud suction and dumping drill is feasible and effective in the demolition of soil buildings in flood control and rescue.

**Key words:** cohesive soil dam; upstream high water level; collapsible collapse; mud suction and soil discharge drilling rig; explosion cavity in soil; enhanced throwing blasting

自2019年以来,我国自然灾害以洪涝、台风灾害为主,特别是2020年主汛期南方地区遭遇1998年以来最重汛情。2021年进入第三季度后,7月份相继发生河南、四川、山西、河北等地严重暴雨洪涝和“烟花”台风灾害,其中,7月中下旬河南特大暴雨洪涝灾害影响范围广、造成损失重;8月份湖北、陕西局地发生严重暴雨洪涝灾害;9月份发生四川雅安天全县山洪泥石流灾害,造成较大损失。对于洪涝、台风以及山洪泥石流等都应用到了爆破技术来进行抢险救灾<sup>[1,2]</sup>。

土作为一种最普遍的基础材料,广泛应用于各类民用和国防工程建设。黏土分布广泛,是一种力学性质极为复杂的材料,爆炸作用下的土结构物的耦合机制影响因素多而复杂<sup>[3,4]</sup>。《爆炸动力学及其应用》<sup>[5]</sup>、《岩土中的冲击爆炸效应》<sup>[6]</sup>等书中讨论了土中爆炸效应实验和理论研究方面的成果。其中爆腔主要从四个方面来阐述,第一种是依据模型相似理论确定爆腔体积,但该方法不能鉴别、区分土体各组分的影响。

$$R_{\text{爆腔}} = KR_w; R_{\text{爆腔}} = K' \sqrt[3]{Q} \quad (1)$$

式中: $R_{\text{爆腔}}$ 为爆腔半径,m; $R_w$ 为炸药半径,m; $Q$ 为装药量,kg; $K$ 、 $K'$ 为经验系数。

第二种是将土体看成流体,爆生气体不能渗透进土体孔隙中的准静态理论,爆腔体积只与周围介质压力有关。

$$R_{\text{爆腔}} = 2.39 \rho_w^{1/9} D^{2/9} \frac{R_w}{P_{\text{atm}} + \sigma_s + \gamma_0 \omega} \quad (2)$$

式中: $R_{\text{爆腔}}$ 为爆腔半径,m; $R_w$ 为炸药半径,m; $D$ 为炸药爆速,m/s; $\rho_w$ 为炸药密度; $P_{\text{atm}}$ 为大气压力,Pa; $\gamma_0$ 为土壤容重,m; $\sigma_s$ 为土中内力达到平衡极限时的爆腔压力,Pa; $\omega$ 为炸深,m; $g$ 为重力加速度,m/s<sup>2</sup>。

第三种是将土介质作为弹-粘-塑性介质处理,其动力变形曲线呈非线性压实,介于静态曲线和极限动态曲线之间,利用爆轰波参数计算,但是该方法有一定的局限性,即爆破介质必须是弹-粘-塑性介

质且加荷载速度近似一维线性加速、卸载与变形速度无关。

$$R_{\text{爆腔}} = \sqrt[3]{\int_{R_w}^{R_{pl}} \Theta_{pl}(R) R^2 dR} \quad (3)$$

式中: $\Theta = \frac{\Delta V}{V}$ ,即土体变形; $R_{pl}$ 为塑性区外边界;

$\Theta_{pl}(R)$ 为爆炸的塑性区全部的体积变形。

第四种是在封闭爆炸中将土介质作为流体,内部虚拟静水压力 $P_0$ 等于动力屈服值和真实静水压力之和。建立一种土在爆炸波通过后密度由 $\rho_0$ 增加到 $\rho_1$ 后不可压缩介质的模型,该方法适用于自由孔隙率高的塑性岩土。

$$R_{\text{爆腔}} = R_w \left[ \frac{\left( \frac{\mu w}{D} \right)^2 + \frac{a-3}{4(\rho-a)} \frac{\rho_w}{\rho_0 \beta^{1/3}}}{\frac{2(a-3)}{a \beta^{1/3}} \frac{P_0}{\rho_0 D^2}} \right]^{1/a} \quad (4)$$

$$\beta = \left( 1 - \frac{\rho_0}{\rho} \right) \quad (5)$$

$$a = 3 + \beta^{1/3} (1 + \beta^{1/3} + \rho^{2/3}) \quad (6)$$

式中: $\mu_w$ 为 $R_{\text{爆腔}} = R_w$ 时的岩土质点速度。

D Ambrosini<sup>[7]</sup>、王海亮和万晓智<sup>[8-10]</sup>、李海超、魏连雨等人通过实验<sup>[11-13]</sup>,针对爆腔半径计算的公式进行了推导,并通过数值模拟进行了相关验证,但探索的范围均在上述四种模型内。王海亮依据第一种球形药包爆炸相似理论的模型,通过试验爆破的炸药量和爆炸后形成的爆腔体积能确定一个与炸药和土壤性质有关的无量纲常数,依据文献[8]中可得出含水黏性土取证范围为0.56~0.71,试爆得出的半经验公式在同等条件下计算的爆腔体积都较准确。通过对上述四种模型给出的爆腔体积计算方法比较,结合爆破试验测试结果,可以看出大体积土质建筑物拆除工程中并不需要十分精确的爆腔体积,实际上为了施工操作的方便性和连续性,我们的爆腔体积要大于需装药量的体积。

但抗洪抢险过程中仍需要解决两个问题:一是在汛期上游洪水上涨,水压力不断增加,土质堤坝挡水时间越长堤身含水率及渗漏量增大,容易发生散

浸、漏洞等危险,若使用大型挖掘机械施工,会造成湿陷性塌陷危险,有机毁人亡的风险;二是如何确定快速爆破拆除的方案及参数,使施工时间短、爆破可控、拆除有效。

针对上游高水位下黏性土堤坝爆破拆除抢险工程需要,通过设计具有吸泥排土功能的钻机进行钻孔作业,通过选取合适品种爆破器材和爆破参数配套新的施工工艺解决长时间高水压下大体积土体快速爆破难题。

## 1 工程概况

荒草二圩和荒草三圩位于全椒县武岗镇滁河干流与襄河交汇处,已列入国家蓄滞洪区名册,总蓄洪面积超过  $10 \text{ km}^2$ ,设计总蓄洪量为  $6071 \text{ 万 m}^3$ 。为应对滁河防洪的压力,保证滁河流域其他圩口内人员生命和财产免受威胁,荒草二圩和荒草三圩曾分别于1991年、2003年、2008年、2015年和2020年5次运用。

2020年7月18日安徽省抗洪指挥部决定对滁河下游土质堤坝进行爆破泄洪,安徽江南爆破工程有限公司承担此次爆破泄洪任务。土质大坝纵向剖面形状为梯形,上边长  $5.0 \text{ m}$ ,迎水面侧边长约  $2.0 \text{ m}$ ,背水面侧边长  $7.0 \text{ m}$ ,堤坝高出水面  $1.0 \text{ m}$ 。见图1。

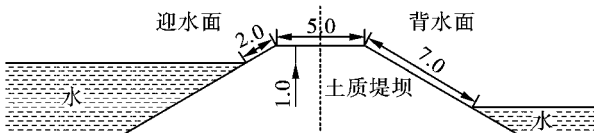


图1 土质堤坝示意图(单位:m)

Fig. 1 Diagram of clayey dyke(unit:m)

## 2 施工方案与关键参数设计

### 2.1 钻孔机械的设计

针对黏性土较软,可选用转速慢的手持钻机作为空心钻杆的动力,将空心钻杆通过软管与活塞相

连,人工用锹在炮孔位置挖一个近似长方体的小坑,钻孔前往小坑和活塞装置内注满水,这样小坑、钻杆和活塞通过水产生了密闭空间,利用活塞往复运动将钻头破碎的泥土和小坑内的水沿空心钻杆吸到活塞内,并排出。钻孔的同时将钻出的泥巴吸走,既可以对爆破孔进行清理,又避免了爆破孔容易塌陷、堵塞的情况。见图2。

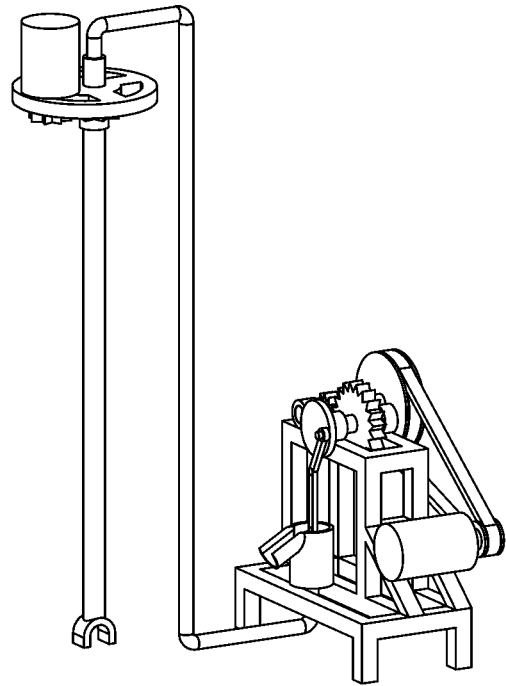


图2 吸泥清孔钻机示意图

Fig. 2 Mud suction and soil discharge drilling rig

### 2.2 施工工艺

土质堤坝爆破拆除方法由球状药包的扩腔爆破方法和空腔大药量强抛掷爆破方法组成,主要流程为布孔→钻孔→装扩腔药→爆破扩腔→检查扩腔质量→插管装药→装起爆药包→填塞炮孔→连接网路→警戒→起爆→检查,其具体工艺流程如下:

(1)爆破前准备:确定孔网参数、强抛掷爆破的大药量、爆腔体积和扩腔所需药量四个关键参数,孔网参数包括孔距、孔深。见图3。

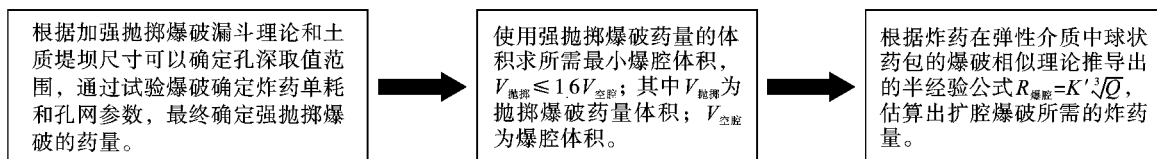


图3 关键参数确定流程图

Fig. 3 Flow chart for determining key parameters

(2)布孔和钻孔:人工用锹按照设计的孔网参数在堤坝顶相应的位置挖一个小坑,使用钻孔设备

移动至小坑长边的一端进行钻孔,钻好孔后使用直径小于孔径的一端堵塞的空心塑料管或竹竿检查钻

孔质量。

(3) 扩腔爆破:在钻好的孔内装入扩腔药包,爆破扩腔,并检查扩腔质量。

(4) 插管装药:

1) 在爆腔上部插入空心塑料管,使用空心塑料管快速装入炸药,避免因泥孔粗糙、粘性大导致装药过程中发生堵孔的现象,装药完成后,拔掉空心塑料管。

2) 装入起爆药包:在装入一半药量时,装入一个起爆药包,如果药量较大,则分两次装入两个起爆药包。

(5) 堤坝爆破。

1) 堵塞炮孔:使用钻孔出来的泥巴进行堵塞。

2) 连接网路:沿着堤坝放爆破主线,将每个孔的起爆雷管接入主线;一般所有孔一次起爆,如果药量太大,也可延期一次,延期时间间隔不超过25 ms。

3) 警戒:警戒安全距离为500 m。

4) 起爆:待警戒完成后,爆破拆除土质堤坝。

(6) 注意事项:

1) 检查扩腔质量是在扩腔爆破完成后观察炮孔处堤坝外观,如果堤坝顶未出现明显裂纹、塌陷,再使用竹竿或一头堵塞、直径略小于孔径的空心塑料管进行孔深测量,通过钻孔孔深和扩腔后的深度进行比较,当扩腔的孔深大于或等于钻孔孔深,即可确认爆破扩腔质量合格。

2) 警戒距离设置为500 m,警戒完成后起爆,结束爆破15 min后至现场检查是否有盲炮。如果有盲炮按《爆破安全工程》(GB 6722—2014)相关规定处理。

3) 安全技术措施执行《爆破安全工程》(GB 6722—2014)以及其他相关的规程。

### 2.3 参数选取与设计

为了达到泄洪要求,爆破形成加强抛掷爆破漏斗效果最佳。根据堤坝尺寸,为降低洪水水位 $r$ 必须大于 $r_1$ ,一般情况下 $r/w_1$ 取值1.2~2.5,同时根据相似三角形可以得出 $r_1/r = (w_1 - 1)/w_1$ ,计算得 $3.09 \leq w_1 \leq 4.53$ ,同时结合钻机设备和人员操作的

方便些选取钻孔深度为3.6 m。其中 $r$ 为爆破漏斗半径, $r_1$ 为距坝顶1 m处堤坝横截面长度一半,本工程 $r_1$ 为4.23 m, $w_1$ 为最小抵抗线。见图4。

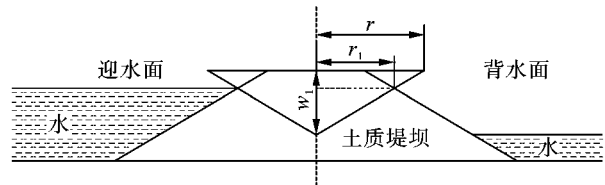


图4 加强抛掷爆破漏斗示意图  
Fig. 4 Schematic diagram of enhanced throwing blasting funnel

一般压实土的抛掷爆破单耗取 $0.4 \sim 0.5 \text{ kg/m}^3$ ,考虑到上游高水压作用,本次施工取 $0.8 \text{ kg/m}^3$ 以上。按照孔间距2.5 m计算,单孔负担坝体体积 $101 \text{ m}^3$ ,即单次强抛掷爆破装药量要达到80.8 kg,按照直径32 mm小药卷装箱标准约3.5箱,其体积约为 $0.27 \text{ m}^3$ 。

为了保证装药的连续性,工程应用中按照超出强抛掷药量体积的60%来计算扩腔爆破药量,按照半经验公式 $R_{\text{爆腔}} = (0.56 \sim 0.71) \sqrt[3]{Q}$ 计算得出扩腔药量 $Q$ 为 $0.29 \sim 0.59 \text{ kg}$ 。本工程选取扩腔药量 $0.40 \text{ kg}$ 进行试验爆破,装入干燥的沙子确定爆腔体积约 $0.45 \text{ m}^3$ ,对应的 $K'$ 值为0.65,能满足施工需要。

本次施工选用的钻孔设备的钻头直径为45 mm,孔径不宜过大,过大的孔径易造成爆生气体快速溢出,不利于爆腔形成。布孔的方式为根据堤坝顶宽度沿堤坝长边在堤坝顶中心位置布置一排孔。

爆破所采用的炸药为直径32 mm、长度200 mm、重量200 g的乳化炸药或直径35 mm、长度300 mm、重量200 g的水胶炸药。本次施工选用的是水胶炸药。雷管选用高精度毫秒延期导爆管雷管。

空心PVC塑料管的长度大于孔深、内径大于炸药直径、外径小于炮孔直径,空心塑料管外径为40 mm,内径为36~39 mm。见表1。

表1 爆破参数表

Table 1 Blasting parameter

孔径/mm	孔深/m	孔距/m	单孔扩腔药量/kg	扩腔雷管/发	单空腔装药量/kg	单耗/( $\text{kg/m}^3$ )
45	3.6	2.5	0.40	1	84.0	0.83

在堤坝顶中间位置布置小坑,即长50 cm、宽30 cm、深40 cm的长方体小坑,间隔2.5 m一个,共12个;钻孔深度为3.6 m;装入扩腔药包,药包包括:两卷规格为 $\phi 32 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 200 \text{ g}$ 的水胶炸药,

一发7 m MS3段高精度毫秒延期导爆管雷管。网路为导爆管连接,所有孔同时起爆。扩腔爆破后仔细检查扩腔质量,质量合格才能进行下一步空腔大药量强抛掷爆破。

插入 PVC 管装入一箱半 (36 kg) 的规格为  $\phi 32 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 200 \text{ g}$  的水胶炸药后, 抽出 PVC 管, 装入两个起爆药包, 雷管为 7 m 长导爆管的 MS3 段导爆管雷管, 每个孔雷管段别统一为 MS3 段导爆管雷管, 再插入 PVC 管装入两箱 (48 kg) 规格为  $\phi 32 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 200 \text{ g}$  的水胶炸药。

空腔强抛掷爆破网路设计: 孔内雷管导爆管直接搭接到爆破主导爆管上, 前 6 个孔和后 6 个孔采用孔外延期, 延期雷管段别为 MS2 导爆管雷管。

本段共 12 个孔, 扩腔爆破共使用炸药量 4.8 kg, 使用雷管 MS3 共 12 发; 空腔大药量强抛掷爆破使用总药量为 1008 kg, 使用雷管 MS3 共 24 发、MS2 共 2 发。见图 5。

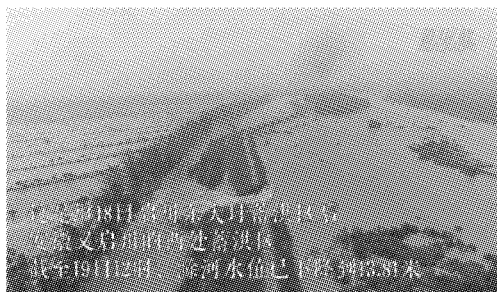


图 5 爆破效果图

Fig. 5 Blasting effect

### 3 结语

(1) 通过对现有土体中爆炸的四种模型爆腔体积计算方法比较, 以球形药包爆炸相似理论为基础的模型计算爆腔体积能满足一般工程需要。通过试验爆破较便捷地确定本工程计算爆腔体积的半经验公式为  $R_{\text{爆腔}} = 0.65 \sqrt[3]{Q}$ 。运用加强抛掷爆破漏斗理论和堤坝尺寸计算出孔深范围并确定孔深为 3.6 m。使用爆腔体积的半经验公式和试爆效果分析, 确定土质堤坝爆破孔距 2.5 m、单耗  $0.83 \text{ kg/m}^3$ 、强抛掷爆破的大药量  $84 \text{ kg/腔}$ 、扩腔药量  $0.4 \text{ kg/次}$ 。

(2) 通过设计手持钻机带动钻杆作为压实土介质钻孔装置, 配合通过活塞装置的运动产生吸力将钻孔时产生的泥由空心钻杆吸出的吸泥清孔装置, 在能钻孔的同时将钻出的泥巴吸走, 对爆破孔内部进行清理, 解决了爆破孔容易堵塞的困难, 避免了大型挖掘机械在长时间高水位下的挡水土堤坝工作时塌陷风险。

(3) 2020 年 7 月 19 日凌晨滁河土质堤坝爆破拆除工程的圆满成功, 验证了以吸泥排土钻机为基础的扩腔 + 强抛掷爆破拆除技术应用于防汛抢险中土介质建筑物拆除的可行性和有效性。

### 参考文献 (References)

- [1] 吕浩铭. 应急管理部发布 2020 年全国自然灾害基本情况[J]. 中国减灾, 2021(3):60.
- [1] LU Hao-ming. The emergency management department issued the basic situation of national natural disasters in 2020[J]. China Disaster Reduction, 2021(3):60. (in Chinese)
- [2] 田心. 应急管理部发布 2021 年 7 月全国自然灾害情况[J]. 中国减灾, 2021(17):7.
- [2] TIAN Xin. The emergency management department issued the national natural disasters in July 2021[J]. China Disaster Reduction, 2021(17):7. (in Chinese)
- [3] 陈仲颐, 周景星, 王洪瑾. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996:13-157.
- [4] 丁育青. 非饱和黏土动态力学特性及其本构关系研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
- [4] DING Yu-qing. Study on dynamic mechanical properties and constitutive relationship of unsaturated clay[D]. Changsha: University of National Defense Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [5] [捷克]J 亨利奇. 爆炸动力学及其应用[M]. 熊建国, 等, 译. 北京: 科学出版社, 1987:161-324.
- [6] 钱七虎, 王明洋. 岩土中的冲击爆炸效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [7] D Ambrosini, B Luccioni. Craters produced by large-scale explosions[J]. Computational Mechanics, 2008, Vol XX-VI:1801-1822.
- [8] 王海亮, 冯长根, 王丽琼. 土中爆炸成腔的现场实验研究[J]. 火炸药学报, 2001, 24(2):12-15.
- [8] WANG Hai-liang, FENG Chang-gen, WANG Li-qiong. Field experimental study on cavity formation by explosion in soil[J]. Journal of fire and explosives, 2001, 24(2):12-15. (in Chinese)
- [9] 王海亮, 叶朝良. 爆炸成腔后土体物理力学性能的变化规律[J]. 岩土力学, 2011, 32(9):2617-2622.
- [9] WANG Hai-liang, YE Chao-liang. Variation law of physical and mechanical properties of soil after explosion cavity[J]. Geotechnical Mechanics, 2011, 32(9):2617-2622. (in Chinese)
- [10] 万晓智. 新型含铝炸药爆轰特性及其在土壤中爆炸效应研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
- [10] WAN Xiao-zhi. Study on detonation characteristics of new aluminized explosive and its explosion effect in soil[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015. (in Chinese)
- [11] 李海超, 魏连雨, 常春伟. 黄土中爆炸挤密实验与数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(2):289-294.
- [11] LI Hai-chao, WEI Lian-yu, CHANG Chun-wei. Experi-

- ment and numerical simulation of explosion compaction in loess[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(2): 289-294. (in Chinese)
- [12] 李海超,魏连雨,常春伟,等. 黄土湿密度对爆炸挤密规律的影响研究[J]. *爆破*, 2018, 35(3): 60-67.
- [12] LI Hai-chao, WEI Lian-yu, CHANG Chun-wei, et al. Influence research of moist density of loess on explosive compaction laws[J]. *Blasting*, 2018, 35(3): 60-67. (in Chinese)
- [13] 魏连雨,李海超,刘艳竹. 条形药包爆炸挤密黄土路堤横向影响规律[J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(1): 233-240.
- [13] WEI Lian-yu, LI Hai-chao, LIU Yan-zhu. Lateral influence rules on explosion-compacted loess embankment by linear explosive bars[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(1): 233-240. (in Chinese)

英文编辑:黄刚

(上接第124页)

- [4] 任江,汪高龙,王潇. 两座150 m高钢筋混凝土烟囱同时爆破拆除[J]. *爆破*, 2020, 37(4): 94-99.
- [4] REN Jiang, WANG Gao-long, WANG Xiao. Simultaneous blasting demolition of two 150 m reinforced concrete chimneys[J]. *Blasting*, 2020, 37(4): 94-99. (in Chinese)
- [5] 陈德志,丁帮勤,何国敏,等. 复杂环境下210 m烟囱定向爆破拆除[J]. *爆破*, 2012, 29(2): 72-75, 79.
- [5] CHEN De-zhi, DING Bang-qin, HE Guo-min, et al. Directional demolition blast of 210 m high chimney under complex conditions[J]. *Blasting*, 2012, 29(2): 72-75, 79. (in Chinese)
- [6] 程楠. 复杂环境下210 m烟囱定向爆破拆除[J]. *爆破*, 2021, 38(1): 100-104, 158.
- [6] CHENG Nan. Directional blasting demolition of 210 m chimney under complex conditions[J]. *Blasting*, 2021, 38(1): 100-104, 158. (in Chinese)
- [7] 徐顺香,陈德志,李本伟,等. 100 m高钢筋混凝土烟囱爆破拆除及安全措施[J]. *爆破*, 2015, 32(2): 106-108, 126.
- [7] XU Shun-xiang, CHEN De-zhi, LI Ben-wei, et al. Demolition of 100-meter-superheight reinforced concrete chimney by directional blasting and safety measures[J]. *Blasting*, 2015, 32(2): 106-108, 126. (in Chinese)
- [8] 司君婷,吕小师,曹娟. 210 m钢筋混凝土烟囱高位缺口控制爆破拆除实践[J]. *爆破*, 2017, 34(1): 124-128.
- [8] SI Jun-ting, LV Xiao-shi, CAO Juan. Application of controlled explosive demolition of 210 m reinforced concrete chimney with high blast-cut[J]. *Blasting*, 2017, 34(1): 124-128. (in Chinese)
- [9] 林谋金,薛冰,傅建秋,等. 210 m烟囱超高位切口爆破拆除数值模拟与实践[J]. *爆破*, 2018, 35(3): 103-107, 146.
- [9] LIN Mou-jin, XUE Bing, FU Jian-qiu, et al. Application and numerical simulation of blasting demolition for 210 m chimney with super-high incision[J]. *Blasting*, 2018, 35(3): 103-107, 146. (in Chinese)
- [10] 徐鹏飞,刘殿书,张英才,等. 钢筋混凝土烟囱高位切口爆破拆除数值模拟研究[J]. *爆破*, 2016, 33(3): 96-100.
- [10] XU Peng-fei, LIU Dian-shu, ZHANG Ying-cai, et al. Numerical simulation study on explosive demolition of reinforced concrete chimney with high incision[J]. *Blasting*, 2016, 33(3): 96-100. (in Chinese)
- [11] 王希之,吴建源,闫军,等. 高耸烟囱爆破拆除数值模拟及分析[J]. *爆破*, 2013, 30(3): 43-48, 124.
- [11] WANG Xi-zhi, WU Jian-yuan, YAN Jun, et al. Analysis and numerical simulation of explosive demolition of towering chimney[J]. *Blasting*, 2013, 30(3): 43-48, 124. (in Chinese)
- [12] 谢先启,贾永胜,罗启军,等. 双向折叠爆破拆除100 m钢筋混凝土烟囱[J]. *爆破*, 2004(3): 49-51, 55.
- [12] XIE Xian-qi, JIA Yong-sheng, LUO Qi-jun, et al. Demolition of 100 m-high reinforced concrete chimney by bidirection folding blasting[J]. *Blasting*, 2004(3): 49-51, 55. (in Chinese)
- [13] 王斌,梁开水,张建华. 高耸建筑物定向爆破中切口长度安全范围的研究[J]. *中国安全科学学报*, 2004(5): 18-21, 24, 2.
- [13] WANG Bin, LIANG Kai-shui, ZHANG Jian-hua. Study on the safe range of blasting cut length in directionally blasting the towery building[J]. *China Safety Science Journal*, 2004(5): 18-21, 24, 2. (in Chinese)
- [14] 夏军,周明安,丁育青. 烟囱爆破切口角度高度数值模拟研究[J]. *爆破*, 2009, 26(4): 70-73.
- [14] XIA Jun, ZHOU Ming-an, DING Yu-qing. Numerical simulation of precutting's angle and height of chimney blasting[J]. *Blasting*, 2009, 26(4): 70-73. (in Chinese)

英文编辑:黄刚