



## 超深厚冲积层千米立井冻土爆破井壁振动响应特性研究

于建新 周廉浩 郭敏 李真珍 张英才

### 引用本文:

于建新, 周廉浩, 郭敏, 等. 超深厚冲积层千米立井冻土爆破井壁振动响应特性研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 109–116.

YU Jianxin, ZHOU Lianhao, GUO min. Study on vibration response characteristics of kilometre deep shaft induced by frozen soil blasting in ultra deep alluvium[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 109–116.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0456>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 深井冻结黏土爆破振动传播规律研究

Study on vibration propagation law of frozen clay blasting in deep mine shaft

煤炭科学技术. 2022, 50(3): 111–114 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/593ad5a6-0aec-4ea7-bedb-3b31a8967aa2>

#### 厚600 m以上冲积层冻结壁厚度设计方法研究

Research on design method for thickness of freezing wall in thick alluvium over 600 m

煤炭科学技术. 2020, 48(1) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/8a16cd6e-c7ea-4750-9d1f-c472083f719f>

#### 深厚冲积层冻结孔布置分类技术对冻结调控的影响

Classified arrangement technology of freezing holes in deep and thick alluvium and its influence on freezing control

煤炭科学技术. 2020, 48(12) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/4657b18e-9424-4ead-95fa-63139675eba7>

#### 深厚冲积层破损井筒修复过程中的控制冻结技术

Controlled freezing technology for repairing damaged shaft in deep alluvium

煤炭科学技术. 2020, 48(1) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/ac5ef087-935b-41c1-b42a-93a79650be9c>

#### 露天煤矿台阶边坡爆破振速的高程放大效应研究

Study on elevation amplification effect of blasting vibration velocity of bench slope in surface mine

煤炭科学技术. 2020, 48(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/94565032-d976-431f-b37d-5d0f493d4540>

#### 深部冻结井筒内壁早期温度-应力场演化特征研究

Research on evolution characteristics of early-age temperature-stress field of inner lining at deep frozen shaft

煤炭科学技术. 2021, 49(2): 69–76 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.02.009>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

于建新,周廉浩,郭敏,等.超深厚冲积层千米立井冻土爆破井壁振动响应特性研究[J].煤炭科学技术,2022,50(12):109-116.

YU Jianxin, ZHOU Lianhao, GUO min, *et al.* Study on vibration response characteristics of kilometre deep shaft induced by frozen soil blasting in ultra deep alluvium[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 109-116.

## 超深厚冲积层千米立井冻土爆破井壁振动响应特性研究

于建新<sup>1</sup>,周廉浩<sup>1</sup>,郭敏<sup>2</sup>,李真珍<sup>1</sup>,张英才<sup>1</sup>

(1. 河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454003; 2. 中建二局第二建筑工程有限公司, 河南 郑州 450000)

**摘要:**随着我国对地下资源需求的不断增大,超深立井施工逐渐普遍化。在立井开挖时为了稳固井壁且减少井壁坍塌,一般会选用冻结法施工,但爆破时产生的振动仍然会对井壁的稳定性造成一定的影响,严重情况下出现的塌方现象,会造成一定的人员伤亡、延缓施工进度等危害。为解决此类问题,以赵固二矿西风井 704.6 m 深厚冲积层冻土爆破掘进工程为研究背景,开展深大立井冻土爆破井壁振动监测,并结合 ANSYS/LS-DYNA 分析软件建立立井多段爆破三维数值模型,深入探索冻结表土段冻土爆破开挖下井壁的振动响应规律。研究结果表明:冻土爆破引起井壁振动的时程曲线各段波形区分明显,段装药量大、炮孔分布密集的 3 段辅助孔爆破对井壁振动影响最大,合速度为 8.39 cm/s,均在安全范围以内;掏槽爆破时,井壁主要受纵波影响产生振动,垂向振速大于径向和切向振速;辅助爆破时,随着自由面增大,爆破产生的作用力逐渐向水平向扩展,井壁径向振速逐渐占优,垂向振速相对减小;运用一维弹性波理论,分析了爆破引起井壁的振动速度对混凝土应力之间的关系,计算结果小于混凝土抗拉强度;对比数值模拟结果与实测振速波形,验证了模型的可靠性和准确性,并通过模拟分析获得离井壁最近质点垂直方向的振动速度为 23 cm/s,在安全范围内。研究思路与方法成果可为同类型立井冻土爆破的施工与振动控制提供一定参考。

**关键词:**深大立井;冻结法;冻土爆破;振动速度

中图分类号:TD235

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2022)12-0109-08

### Study on vibration response characteristics of kilometre deep shaft induced by frozen soil blasting in ultra deep alluvium

YU Jianxin<sup>1</sup>, ZHOU Lianhao<sup>1</sup>, GUO min<sup>2</sup>, LI Zhenzhen<sup>1</sup>, ZHANG Yingcai<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. The Second Construction Company Ltd of China Construction Second Bureau, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** With the increasing demand for underground resources in China, the construction of ultra-deep shafts is becoming more and more popular. In order to stabilize the shaft wall and reduce the collapse of the shaft wall during the shaft excavation, the freezing method is generally used in the construction. However, the vibration generated during blasting will still have a certain impact on the stability of the shaft wall. In severe cases, even collapse will occur, causing certain casualties, delaying the construction progress and increasing the project cost. In order to solve such problems, based on the research background of 704.6 m deep alluvium frozen soil blasting excavation project in the west wind shaft of Zhaogu No. 2 Coal Mine, the vibration monitoring of deep shaft frozen soil blasting shaft wall was carried out, and combined with the ANSYS/LS-DYNA analysis software, the three-dimensional numerical model of shaft multi-stage blasting was established to deeply explore the vibration response law of shaft wall under frozen soil blasting excavation in the frozen topsoil section. The monitoring results show that the waveform of each section of the time-history curve of shaft wall vibration caused by frozen soil blasting is obviously distinguished. The blasting of segment 3 auxiliary holes with large charge and dense blasthole distribution has the greatest impact on shaft lining vibration, but they are all within the safety range which is 8.39 cm/s. For the cutting blasting segment, the shaft wall is mainly affected by longitudinal wave to produce vibration, and the vertical vibration velocity is greater than the radial and tan-

收稿日期:2022-03-11

责任编辑:朱恩光

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2021-0456

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42107200);河南省博士后科研资助项目(202101036)

作者简介:于建新(1986—),男,山东肥城人,副教授,硕士生导师,博士。E-mail: jianxinyu@hpu.edu.cn

gential vibration velocity. During auxiliary blasting, with the increase of free surface, the force generated by blasting gradually extends to the horizontal direction, the radial vibration velocity of the shaft wall gradually dominates, and the vertical vibration velocity decreases relatively. Based on one-dimensional elastic wave theory, the relationship between the vibration velocity of the shaft wall caused by blasting and the concrete stress is analyzed. The calculation results are less than the tensile strength of concrete. The reliability and accuracy of the model are verified by comparing the numerical simulation results with the measured vibration velocity waveform, and the vibration velocity in the vertical direction of the particle closest to the wellbore is 23 cm/s, which is within the safe range. The research ideas and methods can provide certain reference for the construction and vibration control of the same type of shaft blasting in frozen soil.

**Key words:** deep vertical shaft; freezing method; frozen soil blasting; vibration velocity

## 0 引言

随着我国煤炭开采逐渐向深部煤层发展,千米深大直径立井施工逐渐增多。由于立井施工需要穿越深厚黏土层,冻结法在立井施工中普遍采用,但凿井爆破会对井壁产生扰动危害,严重时造成井筒失稳坍塌。因此,深入研究冻结表土段,在爆破作用下井筒的振动响应规律,对于确保井筒工程安全建设、加快井筒施工进度具有非常重要的指导意义。

关于冻土爆破的研究,早期主要针对青藏高原高寒区的冻土爆破,张俊兵等<sup>[1]</sup>依托青藏高原多年冻土区进行了冻土爆破漏斗试验,确定了高含冰量冻土的爆破参数。李志敏等<sup>[2]</sup>探究了冻结砂土的爆破机理,将爆破作用区域划分为空腔、挤压区、破碎区、裂纹区和弹性振动区,细化了冻结砂土爆破破坏形式。在立井基岩爆破方面,单仁亮<sup>[3]</sup>通过相似模型试验,获得了爆破基岩下混凝土井壁轴向应力和环向应力峰值的衰减公式;并对冻结基岩爆破振动信号进行了小波包分析<sup>[4]</sup>,获得了爆破振动信号在高频衰减快,低频部分衰减慢的规律。VAIBHAB<sup>[5]</sup>监测了若干不同装药结构、延迟和距离的爆炸冲击对于地面的振动速度,通过对标度因子与振动速度峰值之间的振动回归,建立了振动预测方程系数。杨仁树等<sup>[6]</sup>通过小波包算法对井壁爆破振动进行了监测及数据分析,分析表明:井壁振动信号主频较地面要高,但随着信号频率的逐渐增高,井壁振动信号振幅和能量都在不断降低。付晓强等<sup>[7]</sup>研究阐述了立井爆破振动信号属于更加高宽频的非平稳随机振动,其能量主要都分布于500 Hz区域内,所占能量为99.02%,随着频率的升高,振速峰值和能量百分比不断降低。夏宇<sup>[8]</sup>通过监测立井混凝土井壁的爆破振动速度特性,阐述了井壁的质点振动速度与爆源的距离呈反比,但非简单的线性关系,炮孔数量、单孔装药量、起爆方式、边界条件等对振动速度的大小也有影响。李廷春等<sup>[9]</sup>基于自由面爆破效应原理对立井掘进掏槽方式进行优化,提出采用不同深度分阶

掏槽方式,确保了施工的顺利进行。在冻土爆破方面,马芹永等<sup>[10]</sup>对冻结黏土的纵、横波速度分别进行了测试试验,结果表明纵波速度与应变能因子密切相关,表现出冻土的可爆性。宗琦等<sup>[11]</sup>研究了立井人工冻土掏槽爆破方法和光面爆破参数的变形机理和计算方法,得出了在人工冻土条件下竖井浅孔多周期的钻孔爆破方法是比较理想的。在相似模型试验方面,马芹永等<sup>[12]</sup>通过立井直眼微差爆破模型试验,研究了不同起爆延期时间下的干扰降噪效应,得到起爆延时25 ms时降噪效果最优。单仁亮<sup>[13-14]</sup>通过制作相似环境下的冻结试验模型,对采集到的试验数据进行分析,确定出速度与主频的拟合公式以及主频与峰值速度的关系,得到了冻结壁的速度衰减特性和频率衰减特性,进而得出冻结岩壁损伤具有明显的累积效应,炮孔附近岩体的损伤因子大于其他部位。谢立栋等<sup>[15]</sup>为了研究空隙高度对井壁震动强度影响,利用有限元建立井筒爆破模型并采集震动信号,得出了空隙高度是影响井壁震动强度重要因素,存在最不利空隙高度。

在立井冻结黏土爆破施工中,目前还没有相关的规范或标准对爆破产生的振动提出规范化的要求。且冻结法施工条件下的冻土,与天然冻土的性质存有一定差距,深厚表土地应力大,爆破自由面少,只有通过现场实测,才能较好地反映冻土爆破后对井壁的影响。通过冻土掘进段爆破的现场试验,分析井壁的爆破振动规律,并结合数值模拟进行补充论证,减少爆破对井壁的影响。根据现场测试和数值模拟,判断爆破对已浇筑混凝土的影响,及时调整爆破参数和爆破方法,为类似工程进行振动控制提供参考。

## 1 工程概况

### 1.1 工程背景

井筒位于河南省辉县市占城镇北小营村,其设计净直径6.0 m,井口设计绝对标高+81.0 m,井筒落底绝对标高-821 m,井筒设计深度914 m(包括井底

水窝),其中井筒穿过表土层厚度为 704.6 m,井壁厚度 800~1 950 mm。井帮温度控制在零下 10℃,地下压强达到 87 kPa。井壁结构设计最高强度等级为 C100 高强混凝土。

1.2 立井冻结表土爆破方案

爆破方案采用直眼掏槽、分段毫秒延时的光面爆破方式,炸药为 T-220nd 岩石水胶炸药,电雷管起爆。依照炸药产品说明,炸药密度为 950~1 200 kg/m<sup>3</sup>,爆速>3 600 m/s,药卷规格为:ø35 mm×300 mm×0.35 kg。由于冻结土层坚硬,钻孔时孔内热融为塑冻状态或融化状态,采用一般冲击钻时孔内碎屑不易吹出<sup>[16]</sup>。自井筒中心依次打孔 7 圈,分别为掏槽孔、辅助掏槽孔、辅助孔和周圈孔等装药类型。掏槽孔孔深 3.2 m,其他辅助掏槽孔和辅助孔深度均为 3 m,炮孔直径 45 mm。掏槽孔距 650 mm,辅助掏槽、三圈、四圈、五圈孔距控制在 500~900 mm,六圈孔控制在 700 mm,掏槽孔至辅助掏槽孔圈距控制在 800 mm。采用反向装药,总装药量为 256.90 kg,炮孔数共 180 个。根据封泥长度,最少封泥长度不能少于 1 m。采用电雷管并联方式起爆,掏槽孔和辅助掏槽孔采用 1 段,辅助孔三和辅助孔四采用 3 段,辅助孔五和六采用 4 段,周边孔采用 5 段,具体爆破参数见表 1。

表 1 爆破参数  
Table 1 Blasting parameters

炮孔类型	孔数/个	圈径/mm	孔深/m	孔距/mm	倾角/(°)	单孔装药量/kg	雷管段别
掏槽孔	8	1 600	3.2	600	90	1.40	1
辅助掏槽	12	3 200	3.0	850	90	1.40	1
辅助孔三	26	4 600	3.0	600	90	1.40	3
辅助孔四	26	6 000	3.0	700	95	1.75	3
辅助孔五	31	7 300	3.0	750	94	1.75	4
辅助孔六	37	8 600	3.0	700	93	1.75	4
周边孔	40	9 400	3.0	700	90	0.70	5

2 监测方案

此次试验在井深 675.95~691.18 m 处的黏土层,开展冻土爆破监测试验。该范围内黏土厚度达到 14.35 m,土壤冻结时间长,冻土温度低。为提高冻土掘进效率,炸药用量较多,导致爆破后引起井壁振动过大。

为监测爆破振动在立井轴线方向上的传播规律,监测仪器采用 TC-4850 爆破测振仪,配合三向振动

速度传感器,垂直 Z 向保持与水平面垂直,X 方向与井壁环向一致,Y 向垂直于井壁。沿轴线方向每 3 m 布置一个测点,测点均布置在井壁混凝土预留孔洞中,沿井壁从上至下,位置分别为 654.7、657.58、660.50、663.84、671.75 m,现场测点方案布置如图 1 所示,测点传感器固定如图 2 所示。爆破工作面在

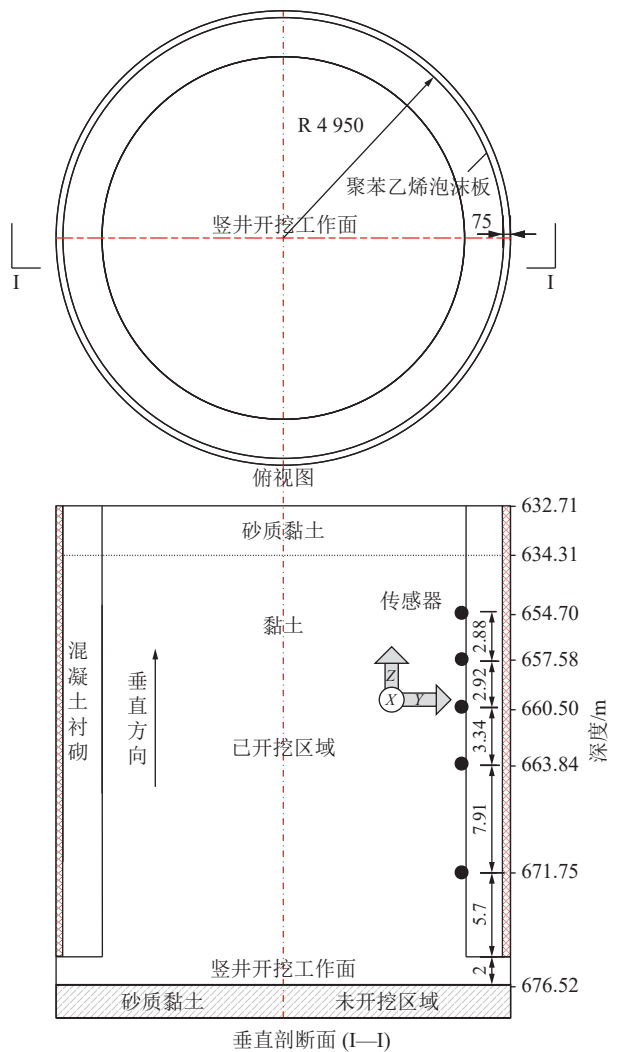


图 1 测点布置方案

Fig.1 Layout scheme of monitoring points



图 2 传感器的固定

Fig.2 Fixing of sensor



井下 676.52 m, 此处地下围压和冻结压力较大, 爆破掘进困难, 井壁在三向受力状态下, 爆破振动易引起井壁混凝土开裂漏水。振动传感器距离井底的距离由实际测量获得, 具体做法为工人移动吊盘到测点布置位置处, 然后从测点处向井底放卷尺测量。

### 3 监测结果分析

炸药在冻土中爆炸时, 会对炮孔周围的冻土产生冲击和扰动, 并以波形式向外传播。由于冻土的完整性和坚硬性, 药包在冻土中爆炸, 应力波在冻土中传播速度快, 在非冻层中波速低, 波阻抗小, 对井壁安全性造成危害。依据 GB 6722—2014《爆破安全规程》<sup>[16]</sup> 研究以爆破振动速度作为主要控制指标, 主要针对振速进行分析。

#### 3.1 冻土爆破井壁波形曲线特征

为研究爆破振动对井壁的影响, 对振动速度波形进行分析, 取立井开挖工作面 677.82、663.84 m 处的监测点, 监测并绘制的三向振速时程曲线如图 3 所示, 测点合速度时程曲线如图 4 所示。

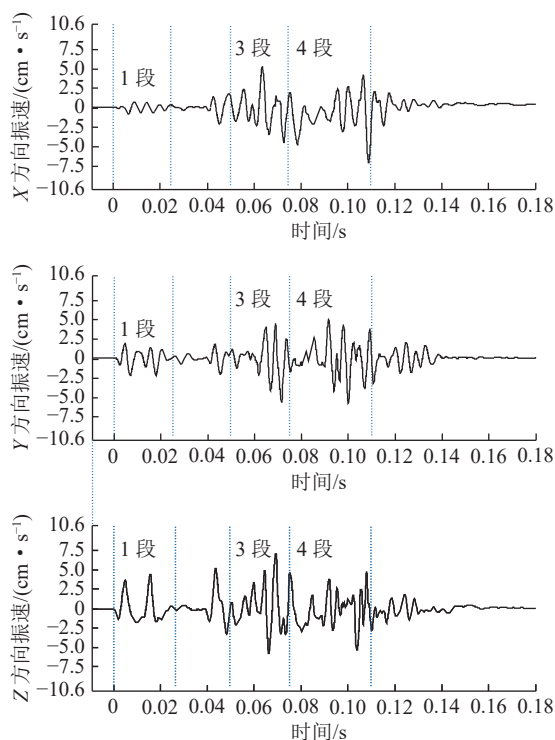


图3 爆破振动三向速度时程曲线

Fig.3 Vibration velocity-time history curve of three directions

由图 3 可知, 测点 Z 方向上的振速较大, 整个爆破过程约在 0.13 s 内结束, 且各段之间振动波形区分明显, 未产生波形叠加现象。当冻土受到爆破应力波时, 以爆破点为中心, 纵波和横波扩展为半圆形,

横波在冻土中的传播仅为纵波的 1/2 左右, 纵波沿井筒向上传递给混凝土井壁, 是造成井壁的振动的主要原因。

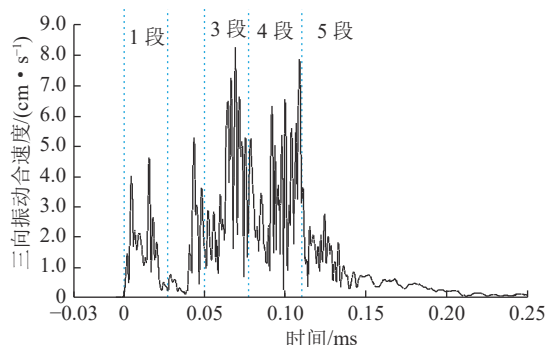


图4 实测合速度时程曲线

Fig.4 Reluctant velocity-time history curve

由图 4 可知, 合速度时程曲线各段波形区分明显, 有较明显突出波峰, 分别对应不同段爆破所引起井壁的最大振动速度, 其中最大振速发生在 3 段辅助孔爆破, 速度 8.39 cm/s, 距离井底爆破工作面 13.98 m。从合速度曲线图中可以分辨出 3 个明显波峰, 对应的时刻分别为 0.01、0.06、0.10 s。这 3 个峰值点分别对应于 1 段、3 段、4 段爆破振速, 而 5 段药量较小, 引起井壁振动不明显。1 段爆破振动波形时间在 0~0.02 s; 3 段药持续时间较长, 在 0.04~0.08 s; 4 段药造成爆破波形时间范围在 0.08~0.12 s。马芹永<sup>[12]</sup> 在立井直眼掏槽微差爆破试验中, 得出 1、2 段药易出现叠加现象, 而本次爆破未采用 2 段药, 跳段使用 1-3-4-5 段雷管, 因此没有出现明显的振动峰值叠加现象。从振动曲线上看效果较好, 波峰清晰无叠加, 表明爆破分段合理。

#### 3.2 爆破振动速度传播衰减规律

爆破方案采用 4 个延时段别, 分别为 1、3、4 及 5 段电雷管。由于 5 段周边孔爆破引起的振动较小, 重点分析 1 段掏槽孔、3 段辅助孔和 4 段辅助孔三个装药段别爆破引起的井壁振动规律。将各段爆破引起的  $v_x$ 、 $v_y$ 、 $v_z$  三向振速及实时合速度  $v$  分别取最大值, 并绘制如下曲线。上述各振动速度随测点至工作面垂直距离  $S$  的关系如图 5、图 6 所示。

从图 5 各段三向振速的传播规律可以看出, 1 段掏槽爆破时, 各测点测得的三向振速峰值差别较大, Z 向速度最大, 其次为 Y 向速度, X 向速度最小。Z 向振速约为 Y 向的 1.2~2.0 倍, 为 X 向的 2.4~5.3 倍。说明立井掏槽孔爆破对井壁垂直方向的振动最大, 对混凝土环向的振动最小。掏槽爆破冲击波主要沿着炮孔向上传播到自由面, 所以引起垂直方向上的

振速最大。3 段辅助段爆破时, Y 向振动速度有大于 Z 向振速的趋势。4 段辅助爆破时, Z 向振速在 3 个方向中振速最小, 呈现出 Y 向振动速度>X 向振动速度>Z 向振动速度。说明随着掏槽孔及前段辅助孔爆破创造出自由面后, 后续辅助孔炸药的能量主要向立井周边释放, 应力波在井壁中传播, 由于混凝土井

壁内部非匀质, 内部微小裂纹在逐渐扩大, 造成井壁结构法向和环向的振动损伤。对比各爆破段三向振动速度的衰减趋势, 各向振速随距离的变化规律整体呈现出非线性的衰减特点。距离井底工作面处 17.32 m 处的测点, 各向速度出现突然增大现象, 是由于井筒工作面前方有放大效应导致的。

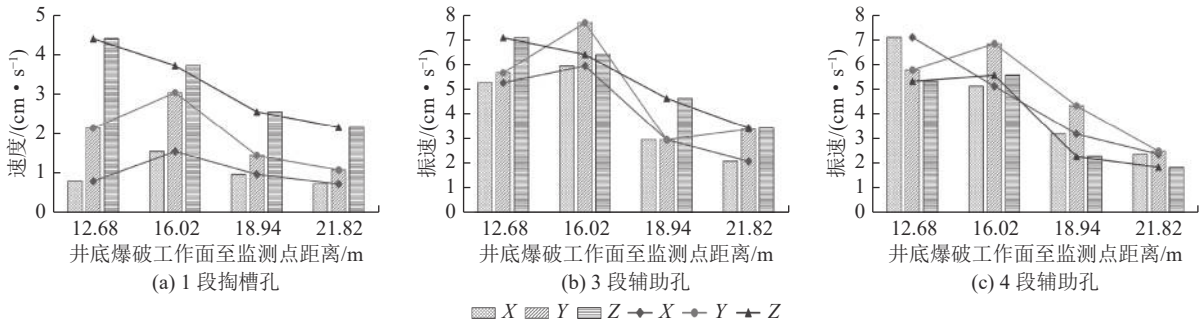


图5 各爆破段振动速度实测衰减曲线

Fig.5 Measured attenuation curve of vibration velocity in each blasting section

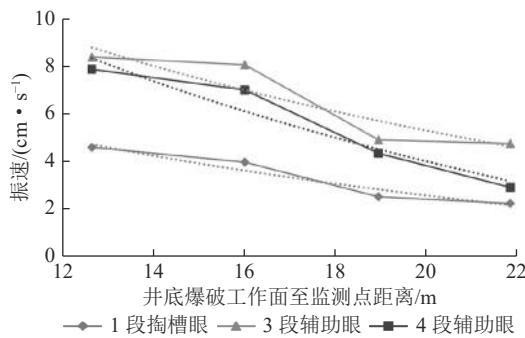


图6 典型段别实测合速度衰减规律

Fig.6 Attenuation law of vibration reluctant velocity of typical segment blasting

从图6各段爆破引起的实时合速度随距离的变化规律可以看出, 3 段辅助孔爆破(装药量为 81.9 kg)引起的振速, 大于 4 段辅助孔爆破(装药量为 119 kg)引起的振速, 大于 1 段掏槽孔爆破(装药量为 40 kg)引起的振速。装药在冻土爆破瞬间产生强烈的冲击作用, 造成炮孔周围的塑性流动, 此过程消耗了大部分爆炸能量, 使得冲击强度急剧衰减形成了冻土中的径向压缩应力波而使冻土受压。由于 1 段掏槽爆破提供了自由面, 为应力波的反射创造了条件, 由于反射拉应力的作用, 使以受压为主的冻土变成了以受拉为主, 因为冻土的抗拉强度远小于它的抗压强度, 致使冻土破坏, 所以 3 段辅助爆破造成的振动较大。4 段辅助孔炮孔装药分散, 爆破能量主要用于破碎冻土, 所以对井壁的振动小于 3 段辅助爆破。这说明大直径立井冻土爆破引起井壁的最大振动速度, 与段装药量、炮孔分布、炮孔布置方案等因素有关。

实测测点最大振动合速度为 8.39 cm/s, 在允许范围以内, 未对井壁产生破坏性影响。

### 3.3 冻土爆破对井壁的振动损伤

通过对混凝土井壁进行应力分析, 获得混凝土应力与振动速度的关系, 可以控制振动速度来减小混凝土的损伤。褚怀保等<sup>[17]</sup> 在新浇混凝土爆破振动损伤累积模拟试验中, 表明混凝土振动累积损伤值会随着振动速度的增大而增大。将爆破传递到井壁混凝土上的应力波进行简化为一维弹性波, 只考虑纵波, 其他波进行忽略。根据一维弹性波理论<sup>[18-19]</sup>, 其应力为

$$\sigma = \rho v c_p \quad (1)$$

其中:  $\sigma$  为应力;  $\rho$  为井壁混凝土的密度;  $v$  为振动速度;  $c_p$  为混凝土的纵波波速。令  $\rho = 2310 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_p = 4000 \text{ m/s}$ , 并且测得的最大振速为  $v = 8.39 \text{ cm/s}$ , 故  $\sigma = 0.078 \text{ MPa}$ 。该值小于混凝土的抗拉强度  $2.01 \text{ MPa}$ <sup>[20]</sup>, 分析结果表明监测处混凝土井壁强度符合安全要求。

爆破工作面上方临近新浇井壁处爆破振速较大, 但新浇井壁振速测试较为困难, 通过数值模拟来获取距爆破点最近的振速。

## 4 冻土爆破数值模拟

模拟基于 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件, 采用等尺寸模型来进行数值模拟, 井筒直径 9.9 m, 混凝土外壁采用钢筋混凝土, 强度等级为 C65, 混凝土外壁厚度 1 m, 研究冻土爆破对立井外壁混凝土的振动规律。

现场井深为 700 m, 是处于空间的半无限体, 在

利用软件进行建模和分析时,只需在爆破荷载影响的范围内进行建模分析即可。通常认为爆破荷载的影响半径可以取立井空间的 3~5 倍,因此,本次模拟取圆柱形岩体的直径为 40 m,为立井直径的 4 倍,高度取 50 m,主要研究井底工作面爆破时,对该范围内的混凝土外壁的影响,整体模型如图 7 所示。

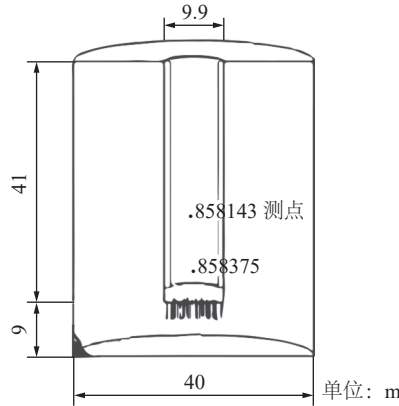


图 7 立井模型

Fig.7 Vertical well model

为了减少计算量,加快计算速度,取 1/2 模型进行建模计算。模型的顶面、地面和外围圆柱面均为无反射边界条件,应力波在该界面不会发生反射。沿母线的切面为对称面,其余各面均为自由面,尽量同实际原型边界条件相同。

4.1 模型建立与材料参数

数值模拟爆破方案采用四段起爆的方式,炮孔相对应也划分为 5 圈(含中空孔),每一圈的圈径根据下式进行等效:

$$R_i = \sum_{j=1}^n r_{ij} q_{ij} / \sum q_i \quad (2)$$

式中:  $R_i$  为第  $i$  段炸药的等效圈径;  $r_{ij}$  和  $q_{ij}$  分别为第  $i$  段药第  $j$  个炮孔的圈径和药量;  $\sum q_i$  为第  $i$  段药的总药量。

保持每一个孔的药量尽量相等,最后通过近似计算,1/2 模型中各圈的炮孔数分别为 2、4、18、6,将每一段的药量平均分配到各段炮孔。将建立起来的模型赋予不同的材料属性,进行网格划分。

土壤由于受到冻结作用,与水结合形成冻土,具有一定的刚度和强度,不具有泡沫材料的性质,而具有一定弹性,采用 MAT\_PLSTIC\_KINEMATIC 材料模型进行模拟,力学模型参数如下:

密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	2.65
动弹性模量 $E_d/\text{GPa}$	30
$\mu$	0.3

初始屈服强度 $\sigma_0/\text{MPa}$	100
切线模量 $E_{\text{tan}}/\text{GPa}$	4
硬化参数 $\beta$	0.5

炸药采用 \*MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN 材料模型模拟 T220nd 抗冻水胶炸药,其允许建立具有高爆速的模型,状态方程主要参数如下:

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	1.2
爆速 $D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	4 018
Chapman-Jouguet 压力 $P_C/\text{GPa}$	18.5
$A/\text{GPa}$	216.7
$B/\text{GPa}$	0.184
$R_2$	0.9
$\omega$	0.15

爆轰产物的初始内能比  $E_0/\text{GPa}$  为 4.192。

其中:  $A$ 、 $B$ 、 $R_2$ 、 $\omega$  为试验确定的常数。

炮孔堵塞材料即炮泥采 MAT\_SOIL\_AND\_FOAM 状态方程确定,使用该状态方程可在模拟过程中对固气二相介质的耦合问题进行有效的描述,具体参数如下:

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	2.5
剪切模量 $G/\text{MPa}$	16.01
体积模量 $K/\text{MPa}$	25
屈服函数常数 $A_0$	$3.300\times 10^{-11}$
体积应变 $EPS2$	0.050
体积应变 $EPS3$	0.090

混凝土材料采 \*MAT\_JOHNSON\_HOLMQUIST\_CONCRETE 材料模型,该模型可用于大变形、高应变率及高压力的混凝土,等效强度由压力、应变速率和损伤函数计算,模型主要参数如下:

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	2.5
$G/\text{GPa}$	11.04
无量纲黏度常数 $A$	0.79
应变速率系数 $C$	0.007
应变速率系数 $C$	0.007
无量纲压力硬化指数 $N$	0.61
准静态单轴抗压强度 $F_c/\text{GPa}$	0.40

建立立井中的空气空间需要进行耦合,计算时间将远远增大,并且主要考虑岩体中的爆破应力波传播到混凝土井壁引起的振动效应,故没有设置空气单元。

4.2 数值结果对比分析

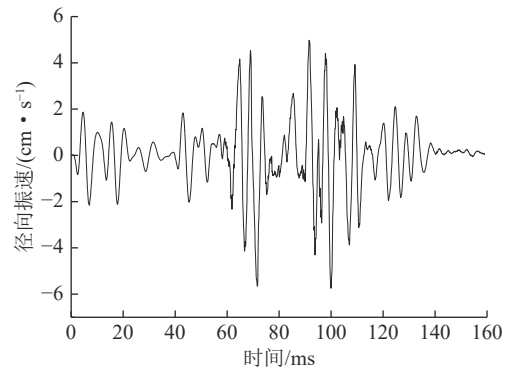
为分析冻土爆破对井壁的振动速度,建立二分之一模型,使  $X$  轴指向井壁切线方向,  $Y$  轴为井壁径向方向,  $Z$  轴为立井轴向方向,并在井壁上选取如图 7



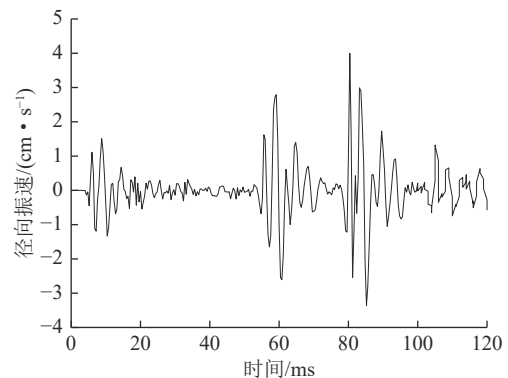
所示 2 个测点。858375 测点为距离工作面最近一模的混凝土井壁位置, 858143 测点到工作面的垂直距离为 13.3 m, 此测点与实际测点 A 位置相近, 用于比较数值模拟结果与实际结果的差异。858143 测点数值计算的速度时程曲线与实测曲线的对比如图 8 所示。

从图 8 可以看出, 数值模拟振速大小与现场实测结果较为相近。从波形来看, 数值模拟受限于模型本构, 在理想化的状态下进行求解, 波形振动频率较实际振动频率大。4 段辅助孔爆破振动时间也较实测结果提前 10 ms 左右, 但整体振速大小相差不大。通过以上分析可知数值模拟结果与实际监测结果相似, 现直接选取模型上离工作面最近的 858375 测点进行分析, 如图 9 所示。

从图 9 中看出, 最大振动速度出现在 Z 方向(井壁轴向), 最大振动分速度为 23 cm/s。由于数值模拟时, 采用的冻土本构模型具有一定的刚度和强度, 而实际上冻土内部存在弱结构面, 在传递过程中能量耗散较多, 因此爆破后振动速度明显比实测速度要大。在保证安全的前提下, 依据爆破安全规范, 数值模拟获得井壁振速在合理范围内。



(a) 实测径向振速时程曲线



(b) 数值模拟径向振速时程曲线

图 8 实测曲线与模拟曲线比较

Fig.8 Measured curve is compared with simulated curve

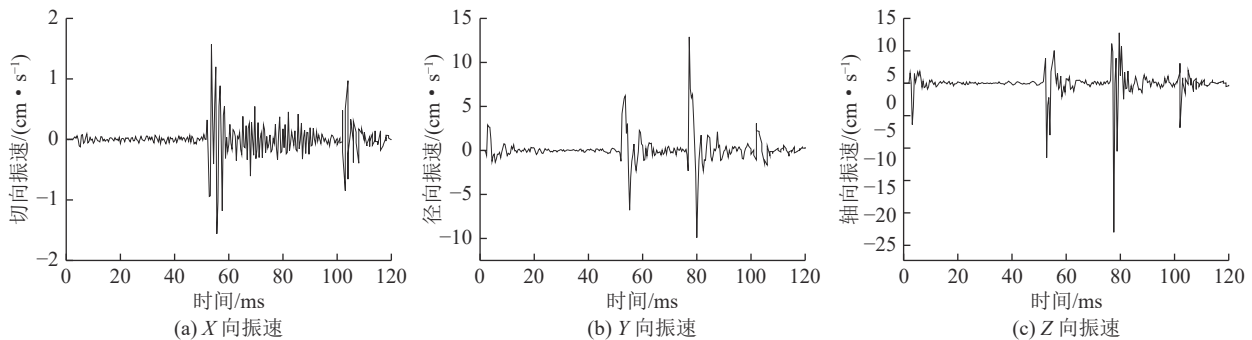


图 9 离工作面最近测点振动时程曲线

Fig.9 Time history curve of particle vibration closest to palm surface

## 5 结 论

1) 立井冻土掏槽孔爆破时, 井壁主要受到爆破应力波的纵波作用产生振动, 井壁垂直方向的振动最大, 对混凝土环向的振动最小。其中最大振速发生在 3 段辅助孔爆破, 速度 8.39 cm/s, 距离井底爆破工作面 13.98 m 四段辅助孔爆破处。

2) 大直径立井冻土爆破引起井壁的最大振动速度, 与段装药量、炮孔分布、炮孔布置方案等因素有关。1 段、3 段、4 段爆破振速对井壁影响较大, 5 段药量较小; 因 1 段掏槽爆破提供了自由面, 且较 4 段辅助爆破孔炮孔装药较为集中, 所以 3 段辅助爆破

对井壁振速影响最大, 实测测点最大振动合速度为 8.39 cm/s, 在允许范围以内, 未对井壁产生破坏性影响。

3) 利用 ANSYS/LS-DYNA 建立模型, 对比相同位置测点的径向振速可知, 数值模拟结果与实际监测结果相似, 模型建立具有准确性。通过模拟得到离井壁最近的质点振动速度, 进而确保爆破方案对井壁振动的安全性。

## 参考文献(References):

- [1] 张俊兵, 潘卫东, 傅洪贤. 青藏铁路多年高含冰量冻土爆破漏斗的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 1077-1081.

ZHANG Junbing, PAN Weidong, FU Hongxian. Experimental



- study on the explosion crater of ice-rich frozen soil along Qinghai-Tibet railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(6): 1077-1081.
- [2] 李志敏, 汪旭光, 汪 泉, 等. 冻结砂土爆破作用区域内损伤模型分析[J]. 工程爆破, 2018, 24(3): 4-9, 34.
- LI Zhimin, WANG Xuguang, WANG Quan *et al.* Analysis of the damage model of frozen sandy soil in blasting area[J]. Engineering Blasting, 2018, 24(3): 4-9, 34.
- [3] 单仁亮, 王二成, 李 慧, 等. 西北冻结立井砼井壁爆破损伤模型[J]. 煤炭学报, 2013, 32(22): 73-78.
- SHAN Renliang, WANG Ercheng, LI Hui, *et al.* Damage model of frozen vertical shaft concrete under blasting load in Northwest China[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(22): 73-78.
- [4] 单仁亮, 白 瑶, 宋永威, 等. 冻结立井模型爆破振动信号的小波包分析[J]. 煤炭学报, 2016, 41(8): 1923-1932.
- SHAN Renliang, BAI Yao, SONG Yongwei, *et al.* Wavelet packet analysis of blasting signals of freezing blasting shaft model[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(8): 1923-1932.
- [5] BHAGWAT Vaibhab-Pramod, DEY Kaushik. Comparison of some blast vibration predictors for blasting in underground drifts and some observations[J]. Springer India, 2016, 97(1): 33-38.
- [6] 杨仁树, 付晓强, 杨立云, 等. 冻结立井爆破冻结壁成形控制与井壁减振研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(12): 2975-2985.
- YANG Renshu, FU Xiaoqiang, YANG Liyun, *et al.* Research on the shaping control of frozen wall and blasting vibration mitigation of shaft wall effect in mine vertical shaft[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(12): 2975-2985.
- [7] 付晓强, 陈岐范, 陈 程, 等. 煤矿冻结立井爆破振动信号时频特征精细化提取[J]. 煤矿安全, 2017, 48(6): 226-229.
- FU Xiaoqiang, CHEN Qifan, CHEN Cheng, *et al.* The fine extraction of time-frequency characteristics of blasting vibration signal of coal mine freezing shaft[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(6): 226-229.
- [8] 夏 宇. 立井混凝土井壁在爆破作用下的振动速度特性研究[J]. 建设科技, 2016(8): 135-136.
- XIA Yu. Research on the vibration velocity characteristics of shaft concrete wall under blasting[J]. Construction Science and Technology, 2016(8): 135-136.
- [9] 李廷春, 王 超, 胡兆峰, 等. 巨厚砾岩层爆破掘进快速建井技术[J]. 爆破, 2013, 30(4): 45-49.
- LI Tingchun, WANG Chao, HU Zhao Feng, *et al.* Technology of blasting and excavation fast mine construction in giant thick gravel stratum[J]. Blasting, 2013, 30(4): 45-49.
- [10] 马芹永. 人工冻土波速及爆破性的研究[J]. 冰川冻土, 1998, 20(1): 56-60.
- MA Qinyong. Wave velocity and blastability test on artificially frozen soils[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998, 20(1): 56-60.
- [11] 宗 琦, 马芹永, 王从平. 立井冻土爆破的理论与实践[J]. 冰川冻土, 2002, 24(2): 192-197.
- ZONG Qi, MA Qinyong, WANG Congping. Theory and practice of frozen-soil blasting in shaft[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(2): 192-197.
- [12] 马芹永, 袁 璞, 张经双, 等. 立井直眼微差爆破模型试验振动测试与分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(6): 172-176.
- MA Qinyong, YUAN Pu, ZHANG Jingshuang, *et al.* Blasting vibration measurement and analyses of millisecond blasting models for vertical shaft blasting[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(6): 172-176.
- [13] 单仁亮, 宋立伟, 白 瑶, 等. 爆破作用下冻结岩壁损伤评价的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(10): 1945-1952.
- SHAN Renliang, SONG Liwei, BAI Yao, *et al.* Model test studies of damage evaluation of frozen rock wall under blasting loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(10): 1945-1952.
- [14] 单仁亮, 白 瑶, 宋立伟, 等. 冻结岩壁爆破振动及损伤特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S2): 3732-3741.
- SHAN Renliang, BAI Yao, SONG Liwei, *et al.* Experimental study of blasting vibration and damage characteristics on frozen shaft wall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S2): 3732-3741.
- [15] 谢立栋, 东兆星, 张 涛, 等. 立井爆破掘进空隙高度优化设计的小波包分析[J]. 煤矿安全, 2018, 49(12): 229-234.
- XIE Lidong, DONG Zhaoxing, ZHANG Tao, *et al.* Wavelet packet analysis of optimization design of vertical shaft blasting excavation gap height[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(12): 229-234.
- [16] 中华人民共和国国家标准编写组. GB6722—2014爆破安全规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [17] 褚怀保, 杨小林, 叶红宇, 等. 新浇混凝土爆破振动损伤累积规律模拟试验研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(9): 2469-2475.
- CHU Huaibao, YANG Xiaolin, YE Hongyu, *et al.* Simulation test of blasting vibration damage accumulation law of new concrete[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(9): 2469-2475.
- [18] 张宗宪. 岩石破裂与爆破: 理论与应用[J]. Butterworth-Heinemann, 2016, 2(21): 11-14.
- ZHANG Zongxian. Rock fracture and blasting: theory and applications[J]. Butterworth-Heinemann, 2016, 2(21): 11-14.
- [19] KOLSKY H. Stress waves in solids[J]. Courier Corporation, 2007, 1(1098): 13-18.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010-2010. [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.