

文章编号: 1005-0523(2024)04-0054-10



地下储备工程穹顶爆破开挖对邻近洞室的动力响应研究

赵靖¹, 吴铭祥², 闵胜³

(1. 中国人民解放军94968部队, 江苏南京 211100; 2. 南昌市万都工程设计咨询有限公司, 江西南昌 330038;
3. 华东交通大学土木建筑学院, 江西南昌 330013)

摘要:【目的】探究地下洞室群爆破开挖过程中对邻近洞室安全稳定的影响。【方法】依托某地下储备工程, 开展地下洞室群穹顶爆破开挖对邻近洞室的影响分析, 研究不同埋深对邻近洞室动力响应影响。【结果】研究表明: 支坑道爆破开挖工况相对于主坑道为上穿或下穿关系, 位移响应与振速响应情况主要以竖向为主。主坑道的剪应力主要集中在范围扩展到拱腰部位, 最大剪应力出现在迎爆侧直墙中部附近, 但仍处于主坑道围岩的抗拉强度范围内; 穹顶外环爆破开挖时, 对应内圆结构振速、位移响应均较大, 拱顶、拱腰以水平为主, 与穹顶外环接壤的拱脚位置则以竖向为主, 最大拉应力和最大剪应力均出现在拱脚附近的围岩。【结论】工程中可在穹顶内圆、外环交界处设置型钢支撑, 加强穹顶内圆结构的稳定性; 在相同爆破条件下, 且处于深埋状态时, 埋深对邻近洞室振速响应几乎无影响。

关键词: 地下洞室群; 爆破开挖; 动力响应; 穹顶

中图分类号: U455

文献标志码: A

本文引用格式: 赵靖, 吴铭祥, 闵胜. 地下储备工程穹顶爆破开挖对邻近洞室的动力响应研究[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(4): 54-63.

Study on Dynamic Response of Vault Blasting Excavation to Adjacent Caverns in Underground Reserve Engineering

Zhao Jing¹, Wu Mingxiang², Min Sheng³

(1. Unit 94968, PLA, Nanjing 211100, China; 2. Nanchang Wanpo Engineering Design & Consulting Co., Ltd., Nanchang 330038, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: 【Objective】The influence of blasting excavation of underground cavern group on the safety and stability of adjacent cavern was researched. 【Method】Based on an underground reserve project, this study carried out an analysis of the influence of blasting excavation of underground cavern group dome on adjacent cavern, and the influence of different burial depths on the dynamic response of adjacent cavern was studied. 【Result】The result shows that the blasting excavation conditions of branch tunnel are in the relationship of up or down tunneling, and the displacement response and vibration velocity response are mainly in the vertical direction. The shear stress of the main tunnel mainly extends to the hance, and the maximum shear stress appears near the middle of the straight wall, but it is still within the tensile strength range of the surrounding rock of the main tunnel.

收稿日期: 2023-02-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(52278401)

During blasting excavation of the outer ring of the dome, the vibration velocity and displacement response of the corresponding inner circle structure are larger. The vault and hance are in the horizontal direction, and the skew-back is in the vertical direction. The maximum tensile stress and shear stress appear in the surrounding rock near the arch foot. **【Conclusion】** Steel supports can be set at the junction of the dome inner circle and outer ring to strengthen the stability of the dome inner circle structure. When the cavity is in deep burial state, under the same blasting conditions, the burial depth has almost no influence on the vibration velocity response of the adjacent cavity.

Key words: underground cavern group; blasting excavation; dynamic response; vault

Citation format: ZHAO J, WU M X, MIN S. Study on dynamic response of vault blasting excavation to adjacent caverns in underground reserve engineering[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(4): 54-63.

【研究意义】我国交通建设、水利设施、国防工事、能源开发、矿山开采等领域都离不开爆破技术^[1-2],促使爆破技术在现代社会进程中得以快速发展与完善。虽然爆破开挖拥有高效、快速的施工特点,但其本质仍属于一种破坏性的施工行为。由爆破开挖产生的地震效应^[3-4],可能会导致围岩原有裂隙进一步扩展或产生新的裂缝,这些裂缝弱化了岩石的力学性能,如果控制不当,可能会发生倒塌、冒顶片帮等严重事故。因此针对爆破开挖对邻近洞室的动力响应研究具有重要意义。

【研究进展】国内外学者针对爆破振动波的传播规律、爆破振动强度的影响因素及爆破振动对建筑物影响的安全判据等展开了一系列的探索^[5-9]。李宁等^[10]在洞室间距比较小的情况下进行爆破开挖研究,爆破开挖产生的爆破波会危及已有洞室围岩和衬砌结构的安全与稳定性。赵东平等^[11]针对承德迎宾大道路堑边坡开挖进行静力学和动力学数值分析,研究路堑边坡可开挖的最大范围及爆破振动对隧道的影响。张春锋等^[12]以宁波至杭州湾新区引水工程为背景,针对大断面地下洞室边墙新建隧道爆破施工对邻近地下洞室群安全稳定影响进行了研究,在亭下隧道取一断面对溪下隧道爆破开挖进行振动监测,得到了该断面围岩振动速度分布规律。陈祥等^[13]分析了爆破振动影响下地下洞室群围岩的振动响应规律,确定了相邻已开挖洞室迎爆侧边墙的安全净间距。

【创新特色】目前针对地下储备工程穹顶爆破开挖对邻近洞室的动力响应研究较少,本文以某地下储备工程为依托,结合理论计算、现场测试和数值模拟的研究方法,选取洞室群爆破开挖过程中受

振动影响较大的位置进行模拟。**【关键问题】**模拟穹顶爆破开挖对邻近主洞室及其邻近结构的影响,分别从振速、位移、应力等方面研究邻近洞室的动力响应特性,实现动态指导施工,为类似工程提供借鉴。

1 工程概况

依托项目为某地下石油储备工程,储油罐为圆柱穹顶贴壁式结构,共 N 个罐室。罐室中心间距约为57.0 m,开挖断面宽约为23.0 m,高约为19.0 m。罐室由主坑道、支坑道连接,坑道至罐室最近距离约为9.0 m,洞室群均位于岩层。坑道为直墙圆拱贴壁式结构,主要开挖断面宽为4.0 m,高为4.5 m,洞室群为葡萄形。拟建工程场地内未见明显断裂、褶皱等构造,构造相对简单。坑道及罐室位于IV级围岩中,场地地貌属中低山区,洞内通过主要地层为震旦系砂岩:中厚层为主,局部夹有薄层,岩质为较坚硬-坚硬。

地表水主要为山前沟谷及山体坡面降雨流水;地下水主要为基岩裂隙水。洞身段为中风化砂岩,岩体较完整、较稳定,局部可能出现小坍塌、掉块,工程地质条件相对较好。本工程首先开挖上、下主坑道,形成两条主通道,然后再依次开挖洞室。

2 数值模型

2.1 数值模型与网格划分

选取1#、2#、3#三个罐室为研究对象建立三维模型,主要模拟分析1#下支坑道爆破开挖对上主坑道的影响,2#上支坑道爆破开挖对下主坑道的影响和3#穹顶爆破开挖对邻近主洞室及其邻近结构的

影响。

三维模型以主坑道纵向为Y轴,竖向为Z轴,横向为X轴建立直角坐标系,结合工程的实际尺寸,建立1#、2#、3#三个主洞室的数值模型,整个模型长210 m、宽200 m、高132 m,见图1。

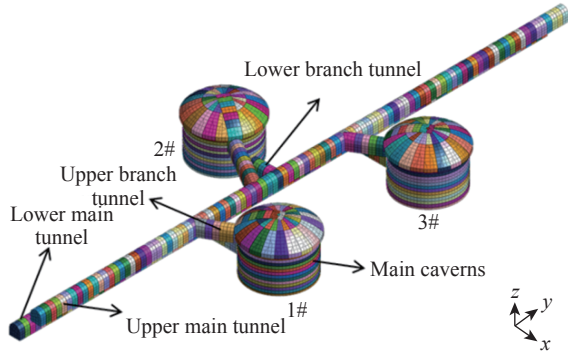


图1 开挖区域三维模型

Fig. 1 3D model of excavation area

三维模型网格划分采用混合网格生成器,开挖区域网格划分尺寸定义为1 m,开挖区域之外的岩体网格划分尺寸定义为6 m,岩体采用实体单元模拟,初期支护中的喷混层采用板单元,锚杆采用植入式桁架单元模拟,整个模型共划分248 780个单元,125 284个节点。

2.2 材料参数

岩石在动荷载和静荷载作用下的强度有所不同,耿乃光等^[14]采用高频脉冲法和单轴试验对多组岩石样本进行测试,分析试验数据后得出动态弹性模量 E_d 和静态弹性模量 E_s 的比值在1.15~1.30之

间,其中,对于砂岩等软岩的比值为1.25~1.30。在工程爆破的加载频率范围内,动泊松比(ν_d)与静泊松比(ν_s)的经验关系^[15]: $\nu_d=0.8\nu_s$ 。参考以上公式,同时结合本工程地勘报告,计算模型主要材料的物理力学参数选取如表1所示。

2.3 边界条件

在模拟过程中,由于爆破振动波在人工边界上存在反射、折射效应,如果模型边界不加处理,反射波、折射波和爆破振动波可能会出现相互叠加的情况,严重干扰了模型计算的准确性。为解决这一问题,Lysmer等^[16-17]提出了黏性边界,即在人工边界上设置阻尼器,用以吸收应力波能量,从而消除人工边界对振动波的反射、折射效应。为了定义黏性边界条件需要计算岩体在竖直、水平方向上的阻尼,阻尼计算公式如下

$$P波: C_p = \rho A \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} = \gamma A \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\gamma g}} = c_p A \quad (1)$$

$$S波: C_s = \rho A \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} = \gamma A \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\gamma g}} = c_s A \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}, G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (3)$$

式中: C_p 、 C_s 是压缩波P波、剪切波S波的阻尼, $N \cdot s/m$; c_p 、 c_s 分别是压缩波P波、剪切波S波单位面积的阻尼 $N \cdot s/m^3$; λ 是体积弹性系数, N/m^2 ; G 是剪切弹性系数, N/m^2 ; ρ 是围岩密度, kg/m^3 ; γ 是围

表1 材料物理力学参数表

Tab.1 Physical and mechanical parameters of the material

Rock stratum	Static modulus of elasticity/GPa	Dynamic modulus of elasticity/GPa	Static Poisson's ratio	Moving Poisson's ratio	Unit weight/(kN/m ³)	Internal friction angle/(°)	Apparent cohesion/MPa
Fully weathered sandstone	0.5	0.6	0.40	0.32	20.0	20	0.04
Heavily weathered sandstone	3.0	3.8	0.30	0.24	22.0	35	0.20
Moderately weathered sandstone	15.0	19.1	0.25	0.20	27.3	50	0.80
Anchor bolt	210.0	/	0.30	/	78.5	/	/
Sprayed on method of curing	23.0	/	0.20	/	22.0	/	/

岩容重, N/m^3 ; g 是重力加速度, m/s^2 ; E 是动弹性模量, N/m^2 ; A 是截面积, m^2 ; ν 是动泊松比。

在Midas/Gtsnx软件中可通过建立阻尼常数/面积地基曲面弹簧来实现黏性边界条件的添加,底部为固定边界,四周为黏性边界,如图2所示。

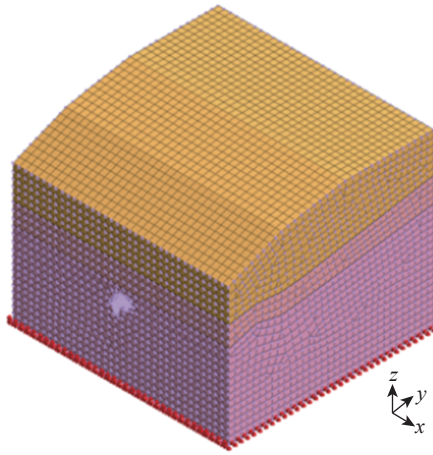


图2 添加黏性边界
Fig. 2 Sticky boundary adding

2.4 爆破荷载

本文依托工程使用的爆破炸药为02W-二号岩石乳化炸药,爆炸荷载表现为瞬间升压至荷载峰值,再快速卸载的一个过程,与应用广泛的三角形爆破荷载模型极为相似,故本文模拟采用三角形爆破荷载模型。荷载加载时间取10 ms,卸载时间取90 ms,荷载持续时间共计100 ms,计算总时间为1 s。关于爆破荷载峰值的确定,本文采用经验公式法^[18]

$$P_{max} = \frac{139.97}{Z} + \frac{844.81}{Z^2} + \frac{2154}{Z^3} - 0.8034 \quad (4)$$

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{Q}} \quad (5)$$

式中: Z 是比例距离; R 是炮孔至荷载作用面的距离, m ; Q 是炮孔装药量, kg 。

由于掏槽眼最先起爆,轮廓面上的峰值荷载最大,故爆破荷载主要是由掏槽眼起爆所产生。在用经验公式计算掏槽眼起爆产生的峰值荷载时,采用等效方法。在 Q 的取值上,考虑8个掏槽眼的装药之和,为14.4 kg; R 取掏槽眼与掌子面边界最近距离,为1.4 m,计算得到洞壁冲击荷载 $P_{max} = 14.097 MPa$,爆破荷载时程曲线如图3所示,加载时间 $t_1=0.01 s$,卸载时间 $t_2=0.09 s$,总时间 $t_0=1 s$ 。

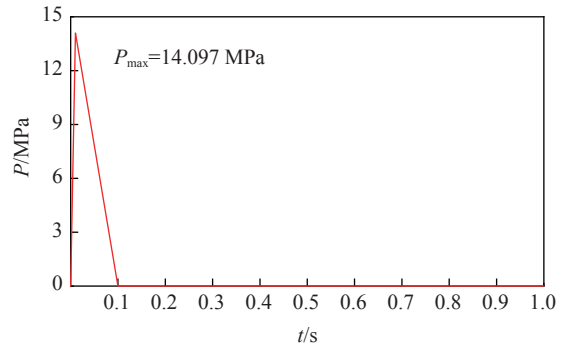


图3 爆破荷载时程曲线
Fig. 3 Blasting load time curve

2.5 数值模型合理性验证

本文通过数值计算,提取现场爆破振动测试对应监测点的矢量合成振速,再进行回归分析,并与现场爆破振动测试结果进行对比以验证模型合理性,实测与模拟振速拟合曲线如图4所示。

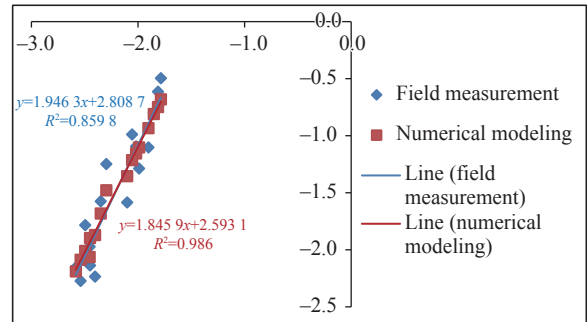


图4 实测与模拟振速拟合曲线
Fig. 4 Fitting curve of measured and simulated vibration speed

由数值模拟和现场实测对应数据的回归曲线可知,数值模拟回归曲线的 $R^2 = 0.986$,相比于现场实测表现的规律性和相关性更强,两者回归曲线的趋势一致性较好,近似度较高。因此,基于该场地建立的爆破开挖数值模型较为合理。

3 模拟结果分析

由于穹顶整体结构较为特殊,当开挖穹顶外环时,可能会对邻近主洞室、上支坑道以及穹顶内圆结构周围岩体产生一定的影响,本文选取穹顶外环第1至第4环开挖区域(4次循环进尺)进行爆破开挖模拟,研究其对邻近洞室及结构的影响。其中穹顶采用以角度划分、分扇区逐步开挖的施工方法,根据灌室尺寸,将穹顶分成19个扇区,扇区角度 18° ,整体形成内圆外环模式。

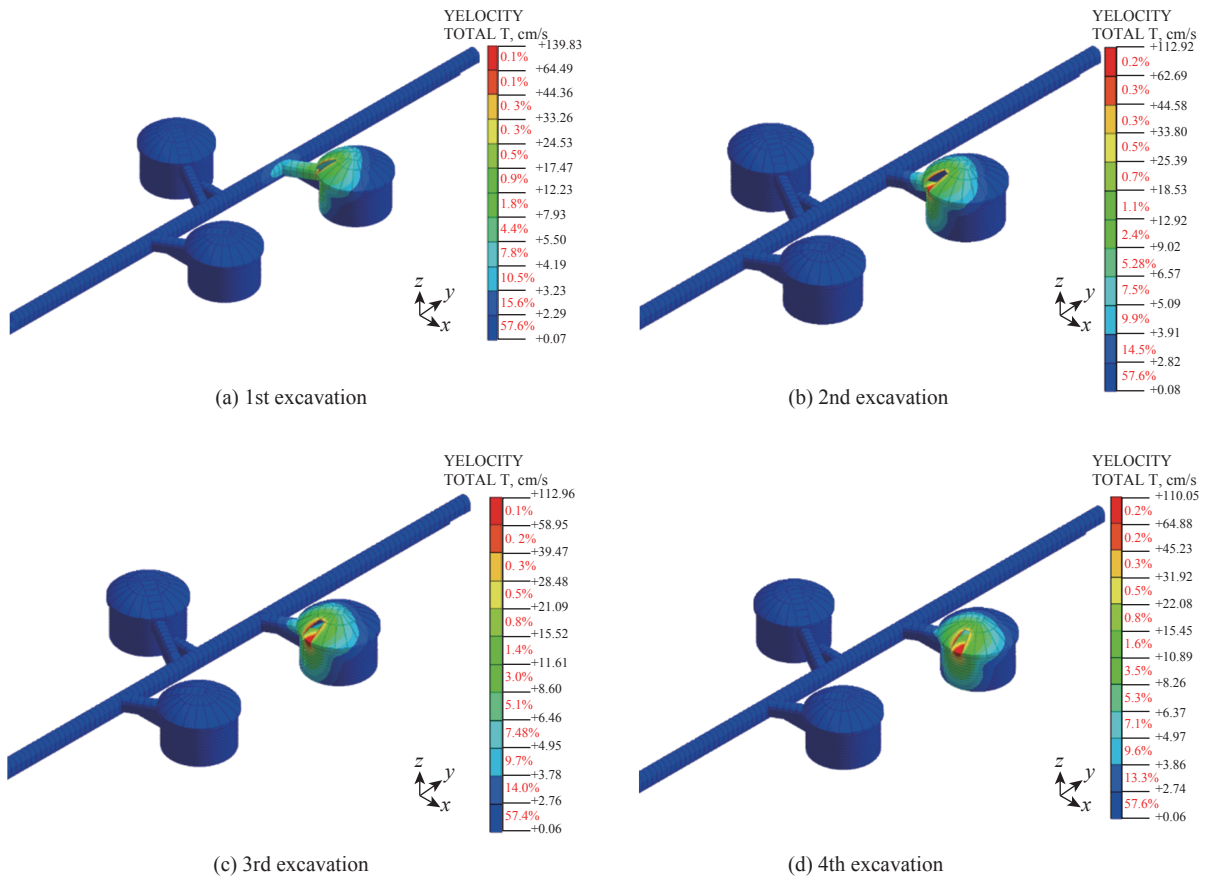


图5 穹顶外环4次循环进尺模拟结果振速云图

Fig. 5 Vibration velocity cloud image for 4 cycles of vault outer ring simulation

3.1 模拟结果

穹顶外环4次循环进尺模拟结果振速云图如图5所示,由于主洞室间距较远,穹顶爆破开挖对邻近主洞室的影响很小,主要影响范围是开挖洞室附近。

从振速模拟结果可知,振速圈随着开挖位置有序变化,穹顶外环第1次爆破开挖对上支坑道的影响最大,随着开挖区域的依次推进,对上支坑道的影响逐渐减小,但4次循环进尺振速圈均覆盖了整个穹顶内圆结构,可见,穹顶外环爆破开挖对穹顶内圆结构周围岩体有较大影响。

3.2 上支坑道的动力响应分析

由于穹顶外环第1次爆破开挖对上支坑道的影响最大,因此,本文主要分析穹顶外环第1次爆破开挖上支坑道的动力响应情况。

3.2.1 振速分析

上支坑道振速云图如图6所示,上支坑道马头门进洞附近(进入主洞室穹顶交接位置)振速响应较大,最大振速为50.82 cm/s,该部位初衬极有可能发生开裂破坏,应采取相应措施进行局部加强处

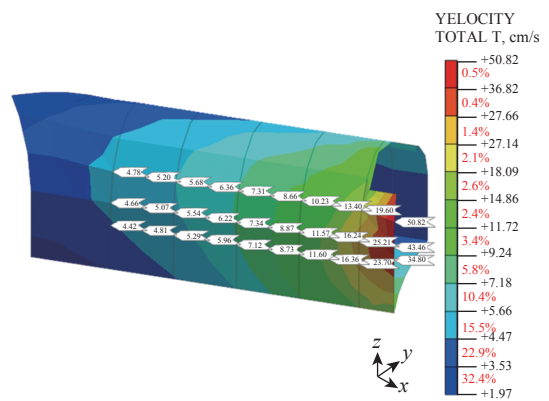


图6 上支坑道振速云图

Fig. 6 Vibrational velocity cloud of the upper support trench

理,如加密布置钢拱架。为讨论穹顶外环第1次爆破开挖作用下上支坑道的安全判定依据,选取截面C作为研究的典型截面,并布置16个监测点,监测点布置如图7所示。

截面C的X、Y、Z三个方向振动速度包络图如图8所示。由图8截面C振速包络图可见,迎爆侧

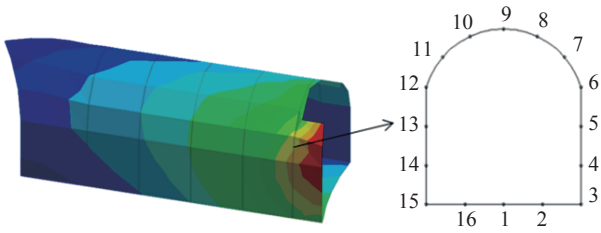


图7 截面C监测点布置

Fig. 7 Cross-section C monitoring point arrangement

的振动速度远大于背爆侧,但X、Y、Z三个方向的最大峰值振速相差较小。各点的X方向最大峰值振速出现在迎爆侧的12号监测点(迎爆侧拱脚),为15.90 cm/s;Y方向最大峰值振速出现在迎爆侧的10号监测点(迎爆侧拱腰),为13.59 cm/s;Z方向最大峰值振速出现在迎爆侧的13号监测点(迎爆侧直墙中部附近),为17.29 cm/s。由于X、Y、Z三个方向的振动速度均较大,应以合成振速作为爆破作用下上

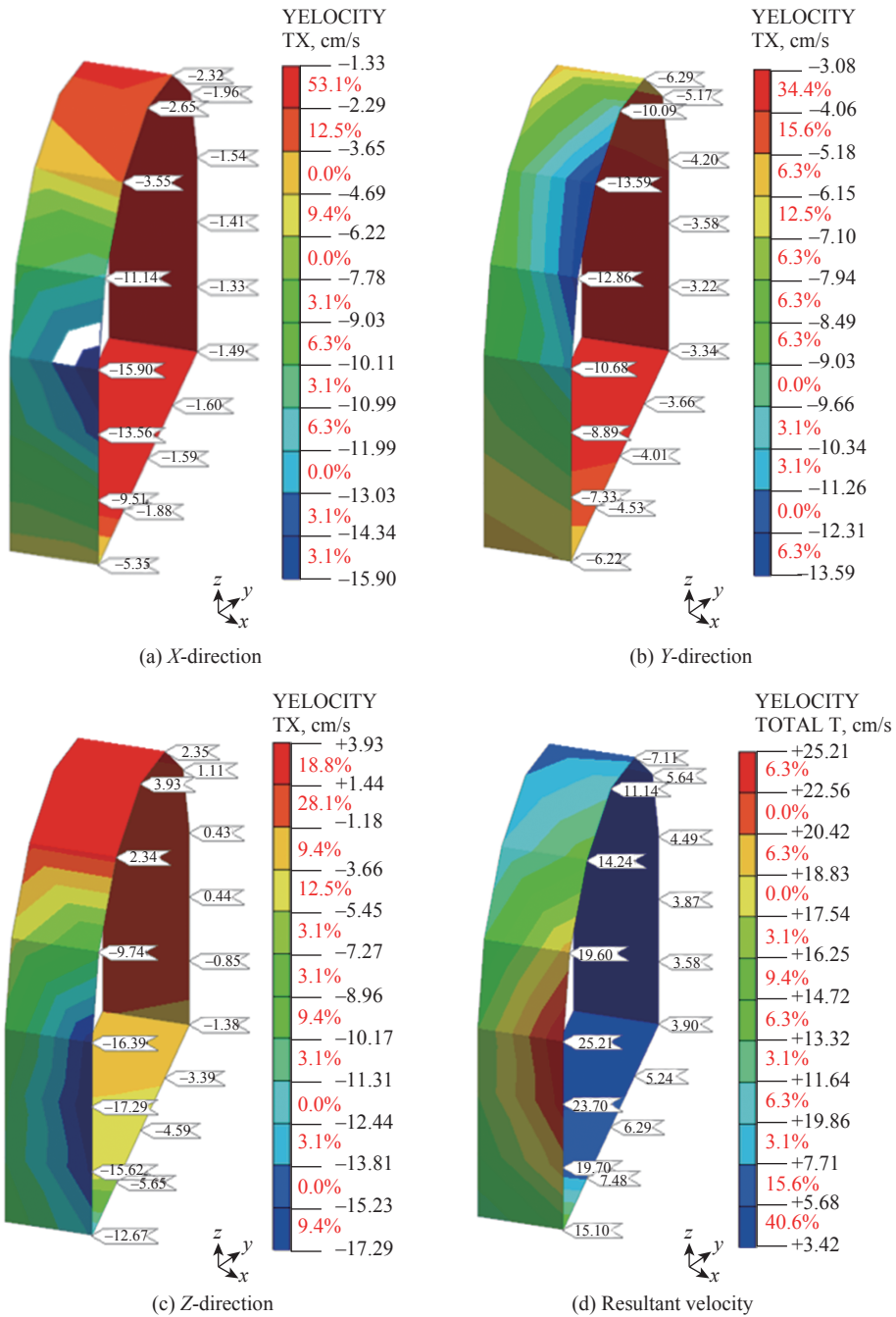


图8 截面C振速包络图

Fig. 8 Cross-sectional C vibration velocity envelope

支坑道的安全判定依据。

3.2.2 应力分析

以截面C为研究截面,分析其拉应力和剪应力的分布情况,并判断上支坑道容易出现破坏的位置。截面C各监测点最大主应力、最小主应力(拉应力为正值,压应力为负值)及最大剪应力值如图9所示。

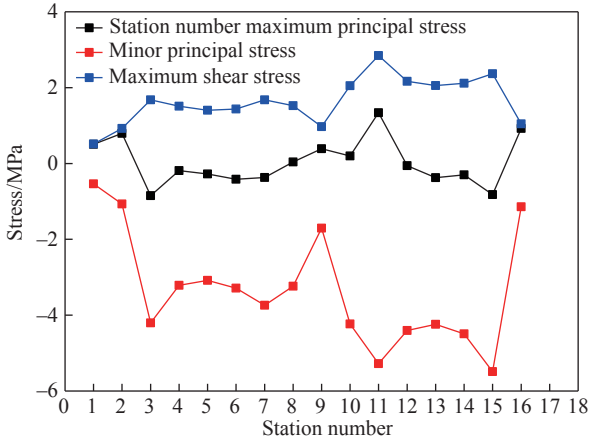


图9 截面C各监测点应力图

Fig. 9 Stress of each monitoring point in cross-section C

在穹顶外环第1次爆破开挖产生的动荷载作用下,截面C拱顶出现拉应力、剪应力集中现象,最大拉应力和最大剪应力均出现在11号监测点,即迎爆侧拱腰位置,最大拉应力为1.339 MPa,最大剪应力为2.848 MPa。因此,穹顶外环第1次爆破开挖对上支坑道马头门进洞附近围岩(进入主洞室穹顶交界位置)产生的影响较大。

3.2.3 位移分析

截面C各监测点X、Y、Z三个方向的位移响应情况如图10所示,三个方向的最大位移均为2 mm

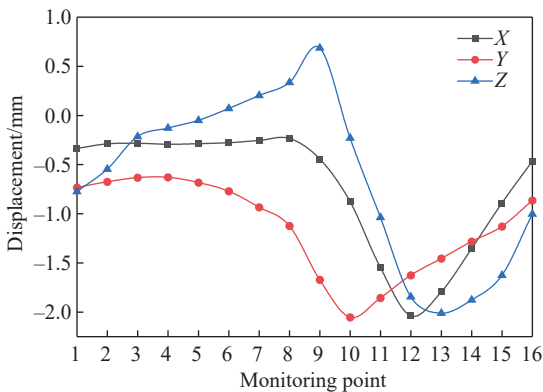


图10 截面C各监测点位移响应

Fig. 10 Displacement response of each monitoring point in cross-section C

以上。X方向最大位移值出现在迎爆侧的12号监测点(迎爆侧拱脚),为2.04 mm;Y方向最大位移值出现在迎爆侧的10号监测点(迎爆侧拱腰),为2.05 mm;Z方向最大位移值出现在迎爆侧的13号监测点(迎爆侧直墙中部附近),为2.01 mm。可见,穹顶外环第1次爆破开挖施工过程中,上支坑道迎爆侧位移响应较大。综合分析振速、应力、位移响应情况,上支坑道马头门进洞附近围岩振速和位移响应较大,且极易发生受拉或受剪破坏,现场应采取相应措施进行局部加强处理,如加密布置钢拱架。

3.3 穹顶内圆结构的动力响应分析

以穹顶外环第3次爆破开挖为例,分析穹顶的动力响应情况。

3.3.1 振速分析

由于主洞室间距较大,穹顶外环爆破开挖邻近主洞室的振速响应较小,主要影响范围在开挖部位附近,如图11所示。

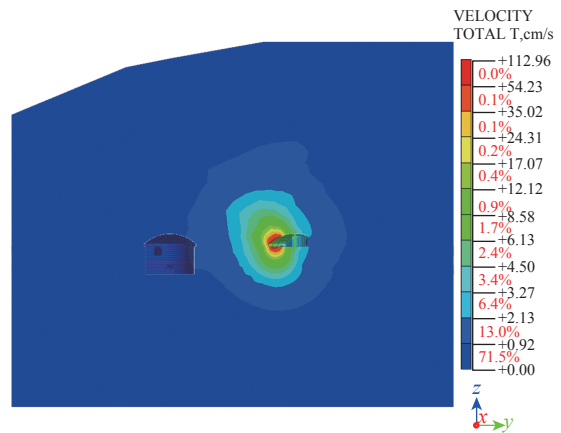


图11 穹顶外环爆破开挖振速云图

Fig. 11 Vibration speed cloud map of vault outer ring blasting excavation

由于穹顶开挖工序的特殊性,开挖穹顶外环部分时,内圆部分已经开挖完成,当穹顶外环第3次爆破开挖时,穹顶围岩振速云图如图12所示。

由图12可知,穹顶外环第3次爆破开挖时,对应内圆结构拱脚峰值振速为52.12 cm/s,拱腰峰值振速为10.66 cm/s,拱顶中心峰值振速为5.80 cm/s,其对应X、Y、Z三个方向0.5 s范围内的振速时程曲线如图13所示,在爆破动荷载的作用下,与穹顶外环接壤的拱脚位置以Z向为主,穹顶内圆结构拱顶、拱腰以Y向为主。可见,穹顶外环爆破开挖时,穹顶

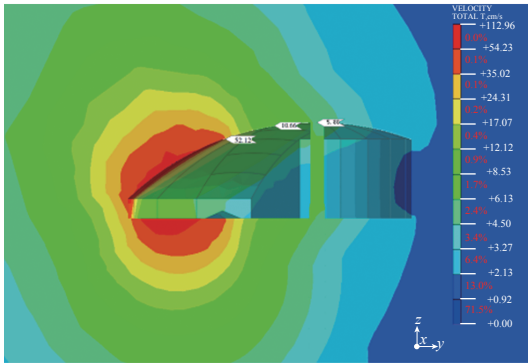
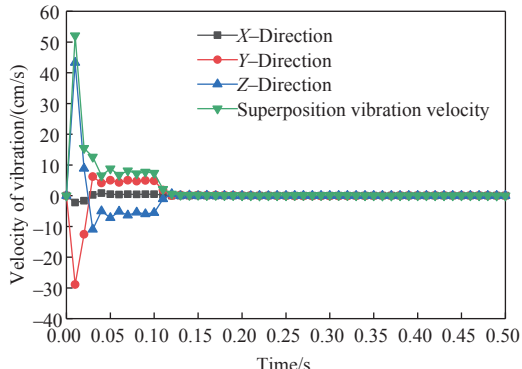
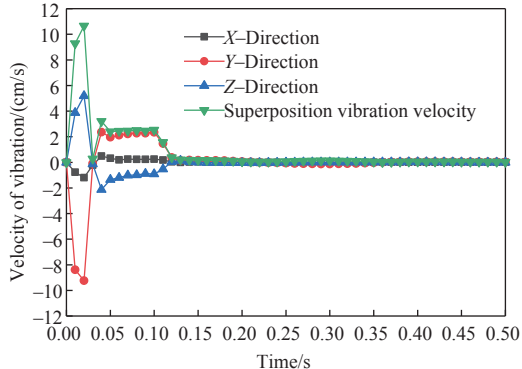


图 12 穹顶围岩振速云图

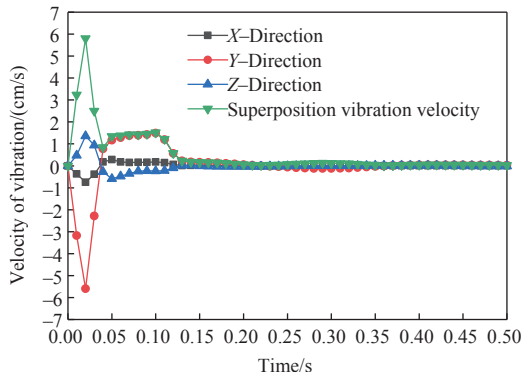
Fig. 12 Vibration velocity cloud map of vault surrounding rock



(a) Vibration velocity time history curve of arch foot



(b) Time history curve of arch waist vibration velocity



(c) Vibration velocity time history curve of vault

图 13 振速时程曲线

Fig. 13 Time course curve of vibration speed

已开挖内圆结构振速响应较大。

由于内圆结构拱脚与开挖位置相交,拱脚附近围岩应力变化最大,且最大拉应力和最大剪应力都发生在该位置,分别为1.092、2.593 MPa。对应内圆结构拱脚、拱腰、拱顶的X、Y、Z三个方向位移响应情况如图14所示。由图可知,穹顶内圆结构拱顶、拱腰以Y方向位移为主,分别为1.07、1.58 mm,而与穹顶外环接壤的拱脚位置位移表现较为复杂,Y方向位移、Z方向位移均较大,分别为3.28、3.54 mm。综合振速、应力、位移分析可知,穹顶内圆结构受穹顶外环爆破开挖影响较大,尤其是内圆结构拱脚位置附近,因其与开挖位置相交,其振速、应力、位移响应较大。在实际开挖过程中,应该设置合适的临时支护予以保护,如在穹顶内圆、外环交界处设置型钢支撑,可有效加强穹顶内圆结构的稳定性,避免内圆结构发生安全事故。

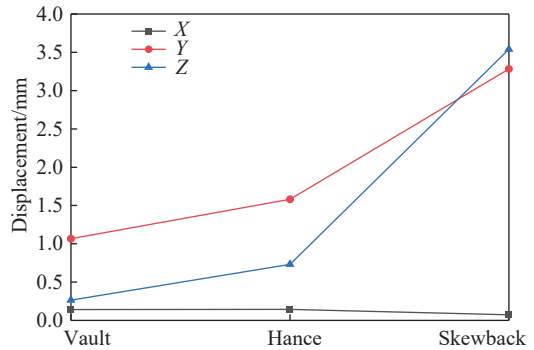


图 14 拱顶、拱腰、拱脚位移响应

Fig. 14 Displacement response of the vault, hance and skewback

4 结论

1) 穹顶外环爆破开挖对邻近主洞室的影响很小,主要影响范围是开挖洞室附近。振速圈随着开挖位置有序变化,随着开挖区域的依次推进,对上支坑道的影响逐渐减小。由于振速圈均覆盖了整个穹顶内圆结构,穹顶外环爆破开挖对穹顶内圆结构周围岩体有较大影响。

2) 穹顶外环第1次爆破开挖时,上支坑道马头门进洞附近(进入主洞室穹顶交界位置)X、Y、Z三个方向振速、位移响应均较大,应以合成振速作为爆破作用下上支坑道的安全判定依据。拉应力主要分布在坑道底板和拱顶,拱顶出现拉应力、剪应力集中现象,最大拉应力和最大剪应力均出现在迎爆侧拱腰位置,最大拉应力为1.339 MPa,最大剪应

力为 2.848 MPa, 极易发生受拉或受剪破坏, 可在上支坑道马头门进洞附近加密布置钢拱架进行局部加强处理。

3) 穹顶外环第 3 次爆破开挖时, 对应内圆结构振速、位移响应均较大, 拱顶、拱腰以 Y 方向为主, 与穹顶外环接壤的拱脚位置则以 Z 方向为主。由于内圆结构拱脚与开挖位置相交, 拱脚附近围岩应力变化最大, 且最大拉应力和最大剪应力都发生在该位置, 分别为 1.092、2.593 MPa。在实际施工过程中, 应该设置合适的临时支护予以保护, 可在穹顶内圆、外环交界处设置型钢支撑, 有效加强穹顶内圆结构的稳定性。

参考文献

- [1] 张璐. 水利工程施工中高边坡开挖爆破与支护技术的应用[J]. 石材, 2023(8): 28-29.
ZHANG L. Application of excavation blasting and support technology of high slope in hydraulic engineering construction[J]. Stone Material, 2023(8): 28-29.
- [2] 许添宝, 陈晓宇, 卢飞, 等. 露天矿开采爆破对溜井及平硐影响分析[J]. 冶金与材料, 2023, 43(10): 150-152.
XU T B, CHEN X Y, LU F, et al. Influence analysis of open pit blasting on chute and adit[J]. Metallurgy and Materials, 2023, 43(10): 150-152.
- [3] 郭映聪. 基于小波分析基坑钻爆开挖地震效应预测研究[J]. 市政技术, 2023, 41(2): 126-132.
GUO Y C. Prediction of seismic effect by foundation pit drilling and blasting excavation based on wavelet analysis [J]. Journal of Municipal Technology, 2023, 41(2): 126-132.
- [4] 朱斌, 蒋楠, 周传波, 等. 粉质黏土层直埋铸铁管道爆破地震效应[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(3): 500-510.
ZHU B, JIANG N, ZHOU C B, et al. Blasting seismic effect of buried cast iron pipeline in silty clay layer[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2021, 55(3): 500-510.
- [5] 文兴, 赵亮, 郭晓强. 爆破振动在充填体中的传播规律研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(5): 32-35.
WEN X, ZHAO L, GUO X Q. Propagation law of blasting vibration in backfill[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021, 41(5): 32-35.
- [6] 李继业, 康强, 赵明生, 等. 节理岩体爆破振动传播衰减规律相似模型试验研究[J]. 爆破, 2022, 39(2): 30-35, 74.
LI J Y, KANG Q, ZHAO M S, et al. Study on propagation attenuation law of blasting vibration in jointed rock mass by similarity model test[J]. Blasting, 2022, 39(2): 30-35, 74.
- [7] 薛田喜, 徐鸿鹏, 张旭飞, 等. 进路式采矿爆破振动波在充填体内的传播规律研究[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(7): 42-49.
XUE T X, XU H P, ZHANG X F, et al. Study on propagation law of blasting vibration waves in filling body during drift mining[J]. Mining Research and Development, 2023, 43(7): 42-49.
- [8] 于建新, 郭敏, 高帅杰, 等. 深井冻结黏土爆破振动传播规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(3): 111-117.
YU J X, GUO M, GAO S J, et al. Study on vibration propagation law of frozen clay blasting in deep mine shaft [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(3): 111-117.
- [9] 张玉成, 杨光华, 胡海英, 等. 爆破振动对建(构)筑物影响数值计算模型及安全判据的研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(S2): 22-29.
ZHANG Y C, YANG G H, HU H Y, et al. Study on numerical model and safety criterion of the influence of blasting vibration on buildings and structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S2): 22-29.
- [10] 李宁, 张承客, 周钟. 边坡爆破开挖对邻近已有洞室影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S2): 3471-3477.
LI N, ZHANG C K, ZHOU Z. Influence research of slope blasting excavation on adjacent existed tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S2): 3471-3477.
- [11] 赵东平, 王明年, 贾玲利. 路堑边坡开挖对邻近既有隧道影响研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1399-1402, 1408.
ZHAO D P, WANG M N, JIA L L. Research on influence of excavating road trench slope on adjacent existing tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1399-1402, 1408.
- [12] 张春锋, 秦天戈, 张旭, 等. 爆破施工对地下洞室群的影响研究[J]. 爆破, 2022, 39(3): 56-63.
ZHANG C F, QIN T G, ZHANG X, et al. Study on influence of blasting construction on underground cavern group[J]. Blasting, 2022, 39(3): 56-63.
- [13] 陈祥, 刘明学, 祁小博. 爆破振动作用下大型地下洞室群围岩动力响应及合理间距分析[J]. 振动与冲击, 2021, 40(1): 277-285.
CHEN X, LIU M X, QI X B. Dynamic response of surrounding rock of large underground caverns under blast vibration and reasonable spacing between adjacent caverns[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(1): 277-

285.

- [14] 耿乃光, 郝晋升, 李纪汉, 等. 第二届全国岩石动力学学术会议论文选集[C]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1990.

GENG N G, HAO J S, LI J H, et al. The Second National Conference on Rock Dynamics[C]. Wuhan: Wuhan Technical University of Surveying and Mapping Press, 1990.

- [15] 戴俊. 岩石动力学特性与爆破理论(第2版)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013.

DAI J. Rock Dynamic Characteristics and Blasting Theory (2nd ed) [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2013.

- [16] LYSMER J, KUHLEMEYER R L. Finite dynamic model for infinite media[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1969, 95(4): 859-878.

- [17] LYSMER J, WAAS G. Shear waves in plane infinite structures[J]. Journal of Engineering Mechanics-ASCE, 1972, 98(1): 85-105.

- [18] 刘国华, 王振宇. 爆破荷载作用下隧道的动态响应与抗爆分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2004, 38(2): 204-209.

LIU G H, WANG Z Y. Dynamic response and blast-resistance analysis of a tunnel subjected to blast loading[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),

2004, 38(2): 204-209.



第一作者: 赵靖(1977—), 男, 工程师, 研究方向为隧道工程施工。E-mail: 2545405644@qq.com。



通信作者: 闵胜(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程。E-mail: 1459456646@qq.com。

(责任编辑:熊玲玲)