

DOI: 10.11779/CJGE201909022

硬岩中的可重复使用抗爆洞室结构设计技术

熊益波, 钟方平, 王万鹏, 肖卫国, 王雷元, 杨文喜, 白友良, 杨进超

(西北核技术研究所强动载与效应实验室, 陕西 西安 710024)

摘要: 在原岩中直接进行化爆模拟试验是研究地震耦合效应的重要方法, 但存在爆心附近原岩介质状态改变或地震传播路径变化的问题, 从而导致地震信号质量差、工程代价高。为此, 提出了在地下洞室中构建可重复使用钢纤维混凝土衬砌结构的抗爆设计思路。采用数值模拟方法, 对结构损伤破坏的高风险区域及破坏形式进行了预测; 根据数值模拟结果, 制定了针对性结构设计方案。在设计建设的密闭设施内重复开展了数百公斤级 TNT 当量化爆试验, 通过爆后壁面破损情况对比、钻孔取样与钻孔摄像观测, 证实多次爆炸未对衬砌与原岩界面产生明显影响; 相似事件在同一台站的地震信号表现出了较高稳定性和重复性, 证明该抗爆结构达到了预期设计目标。该工作可为类似抗爆设施建设提供工程实例与技术参考。

关键词: 爆炸力学; 钢纤维混凝土衬砌; 空腔爆炸; 抗爆结构; 地震波

中图分类号: O383; O347; TU352.13

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2019)09 - 1759 - 08

作者简介: 熊益波(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地下抗爆结构与工程防护方面的科研与实践工作。E-mail: bombxiong@163.com。

Structural design technology of reusable blast-resistant caverns in hard rock mass

XIONG Yi-bo, ZHONG Fang-ping, WANG Wan-peng, XIAO Wei-guo, WANG Lei-yuan, YANG Wen-xi,
BAI You-liang, YANG Jin-chao

(Laboratory of Intense Dynamic Loading and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: Chemical explosion in rock mass is an important method to study the seismic coupling effects, but the characteristics of rock near the explosive always change or the propagation path of seismic waves always changes, which will bring bad quality of seismic waves and higher engineering cost. An antiknock structure and its design method are presented to solve this problem, in which the steel fiber-reinforced concrete is lined, and the experiments can be reduplicated. The numerical simulation is performed on predicting the high-risk location of structural damages and the fracture modalities. Then, a structural design project is established in allusion to the simulated results. In this closed facility, the chemical experiments with TNT charge of hundreds of kiloliters magnitude are carried out repeatedly. Through the comparisons of damages on wall after bursting, borehole sampling and borehole observation, it is confirmed that multiple explosions have no obvious effects on the lining interface. The seismic signals of similar events in the same placement show good stability and repeatability, which confirm that the blast resistant structure has achieved the expected design objective. This work may be provided as an engineering case or technical reference.

Key words: explosion mechanics; steel fiber-reinforced concrete liner; cavity explosion; antiknock structure; seismic wave

0 引 言

在地下爆炸中, 利用空腔能大幅降低地运动和地震信号, 实现相关防护目的。该方法由美国学者 Later 等^[1-3]于 20 世纪 60 年代提出, 随后美国、前苏联等开展了大量试验和理论研究工作, 而中国相关研究起步较晚, 公开报道始于 2000 年左右, 主要成果有: ①理论探索方面。李孝兰^[2-3]系统介绍了相关基础理论、数据分析方法及简化分析模型, 钟放庆等^[4]据此计算了美国内华达试验场岩盐介质的解耦因子; 朱号峰等^[5]

修正了地下爆炸地震耦合效应的准静态理论, 分析认为硬岩介质的剪切模量、强度和埋深与震源强度负相关。②数值模拟方面。钟放庆等^[6]、周钟等^[7]分别研究了花岗岩地下爆炸的震源函数特征, 后者认为含水率会提高耦合强度; 劳俊等^[8]、肖卫国等^[9]研究认为空腔增大有利于地震耦合强度的降低。③试验研究方面。楼涛涛等^[10]对花岗岩地下空腔爆炸信号进行时频

域分析得出非填实爆炸在源区和近区激发高频应力波的结论；王占江等^[11-12]分别研究了硬岩、软岩介质中地下爆炸的自由场应力波和地运动数据，认为小当量化爆的应力波传播对岩体状况较敏感，岩体性质对加速度参量的影响最大；钟放庆等^[13]采用硬岩中小当量化爆试验数据得到了相同埋深地下爆炸地震强度与爆炸当量成正比的结论；肖卫国等^[14]测量了3种不同介质地下爆炸试验的地表速度信号，研究认为介质强度是影响地震耦合的最主要因素，且介质干孔隙率和水饱和度也是重要影响因素。事实上，已有研究工作对地下爆炸客观规律的相关认识并不充分，因为理论分析和数值模拟常引入过多假设而不能完全反映现场真实工况，而定量认识的获得则需要大量现场试验作为支撑以积累足够数据资料。

目前，能够公开查询到的国内外现场试验数据特别是大当量地下爆炸试验数据非常有限，其重要原因是现场试验周期长、代价高。通常，采用化爆模拟试验进行相关研究，试验平台分重复使用原岩设施^[11, 13, 15]和一次性原岩设施^[12, 14]。重复使用原岩设施可固定爆心，每次试验震源到测点的波传播路径相同，但当化爆当量较大以致不满足完全解耦条件时，源区附近岩体将发生非弹性响应（如裂隙扩展）、岩体性质改变等^[15]，导致地震信号稳定性、重复性差。一次性原岩设施可使源区附近岩体初始条件基本一致，但系列试验需频繁变更地点，重新建设相关设施的工程代价和时间成本高，且爆心改变导致地震波传播路径改变，其影响很可能掩盖欲研究因素对地震信号的影响。事实上，介质物理学因素强烈影响地下爆炸地震信号^[5, 7, 11-12, 14]，而岩体力学性质的空间变异及节理、裂隙等结构弱面的存在，使得原岩设施对模拟试验的影响无法忽视。

为解决上述原岩设施中进行地下爆炸试验存在的问题，探索建设可重复开展较大当量化爆模拟试验的平台，提出了钢纤维混凝土（SFRC）衬砌抗爆结构的思路，尝试通过原岩加衬砌的方法，构筑可重复使用抗爆设施，拟实现3项设计目标：①能在固定爆心位置进行化爆试验，避免波传播路径不一致问题；②近区岩体不发生非弹性响应，即控制结构损伤破坏不发生或仅发生在局部衬砌中（便于修复）；③一次设计施工建造，重复多次使用。从而确保每次化爆试验的约束条件尽量相同、波传播路径一致、试验工程量小，最终实现提高地震信号质量、降低经济成本和时间成本的目的。

1 钢纤维混凝土衬砌设计

1.1 衬砌材料设计

钢纤维混凝土较普通混凝土的抗拉止裂能力有显著提升，故在抗爆工程中被广泛采用，如杨黎明等^[16]、

范新等^[17]将其用于地下工程防震塌设计。而内部爆炸作用下封闭或半封闭结构的破坏形式，除了与爆炸当量、构型及材料性能有关，也与约束条件密切相关。如王春明等^[18]尝试采用钢纤维混凝土圆筒结构约束内部爆炸作用，在无约束条件下结构同时出现环向与轴向开裂，而C40约束时抗爆能力大幅提升（未开裂）。因此，设想在拟开展化爆模拟试验的选定原岩洞室内，衬砌一定厚度钢纤维混凝土，使其承担化爆的主要冲击损伤，避免爆炸冲击对原岩的破坏（因衬砌可修复，而原岩不可修复）。考虑到钢纤维混凝土抗爆能力并非标号越高越好^[16]，以及洞室衬砌施工条件和工艺限制，最终通过实验室试配得到高强钢纤维混凝土的力学参数由表1示出。

表1 实验室设计配制的SFRC力学性能参数

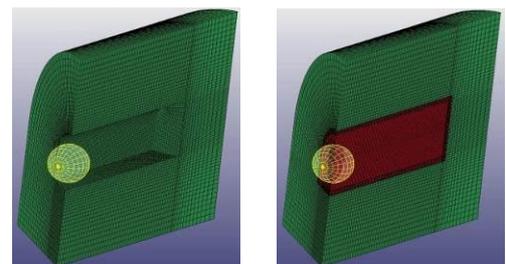
| 基体等级 | 抗压强度 /MPa | | | 劈拉强度 /MPa | | | 密度 /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) | 弹性模量 /GPa | 泊松比 |
|------|-----------|------|------|-----------|-----|------|---------------------------------------|-----------|-----|
| | 3 d | 7 d | 28 d | 3 d | 7 d | 28 d | | | |
| | C80 | 62.4 | 68.9 | 84.8 | 8.3 | 9.0 | | | |

1.2 结构破坏风险分析

采用数值模拟方法，研究揭示抗爆结构破坏方式及高风险区域，从而为确定衬砌厚度等关键设计参数及局部加固对应措施的制定提供依据。

(1) 有限元模型

抗爆结构内衬高强钢纤维混凝土，截面为直墙圆拱。试验爆炸当量分常用当量和上限当量两种。考虑到现场实际浇筑钢纤维混凝土强度应低于设计强度，计算中取为72 MPa。结构存在3个几何对称面：两个过洞室轴向的纵剖面，一个与洞室轴向呈45度夹角的纵剖面。因此，采用八分之一（ $1/2^3$ ）模型（如图1）减小规模，降低计算成本。由于需要通过计算来评估结构损伤程度，以确定衬砌设计参数，因此模型中并不区分衬砌与围岩。计算采用LS-DYNA的ALE多物质算法。利用体积填充在空气网格中建立球形炸药，其位于结构几何中心。在对称面上施加对称约束，远离结构的其它边界均采用非反射（non-reflect）条件。由于主要考察结构在爆炸冲击下的瞬时响应，因此未考虑地应力因素。



(a) 炸药与结构

(b) 空气耦合炸药与结构

图1 有限元模型

Fig. 1 FE model

(2) 材料模型及参数

空气采用流体模型和线性多项式状态方程; 炸药采用高能炸药燃烧模型、JWL 状态方程。空气和炸药相关参数均根据文献[18]取值。钢纤维混凝土材料采用 Johnson-Holmquist (JH) 本构模型来描述其在强爆炸冲击作用下的本构行为, 参数根据文献[19]取值, 如表 2 所示。

表 2 混凝土 JH 本构模型参数^[19]

Table 2 Concrete parameters of JH model^[19]

| | | | | |
|--|--------------------|--------------------|--------------------|------------------------------------|
| $\rho_0 / (\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | G/Pa | f_c/Pa | T/Pa | $\dot{\epsilon}_0 / \text{s}^{-1}$ |
| 2450 | 23.0×10^9 | 72.0×10^6 | 6.40×10^6 | 1.0 |
| C | A | B | N | S_{\max} |
| 0.007 | 0.17 | 2.40 | 0.75 | 12 |
| ϵ_f^{\min} | D_1 | D_2 | P_C / Pa | U_C |
| 0.01 | 0.04 | 1.0 | 24.0×10^6 | 0.001 |
| P_L / Pa | U_L | K_1 / Pa | K_2 / Pa | K_3 / Pa |
| 1000×10^6 | 0.08 | 79×10^9 | -304×10^9 | 4697×10^9 |

(3) 模拟结果及分析

如图 2 所示, 计算给出了损伤云图 (相关本构模型损伤定义可参考文献[20])。注意到爆心周围衬砌在近距离爆炸作用下发生压剪损伤, 但在端部附近则有张拉破坏风险, 因端部中心位置与边沿位置关键点存在约 10 mm 的收敛位移差 (如图 3)。考虑到上述收敛位移差可能导致结构张拉破坏, 根据文献[20]对经典混凝土动态本构模型适用性的讨论, 另外采用 RHT 模型针对该抗爆结构近回填段 (或端部附近) 进行了结构响应分析。

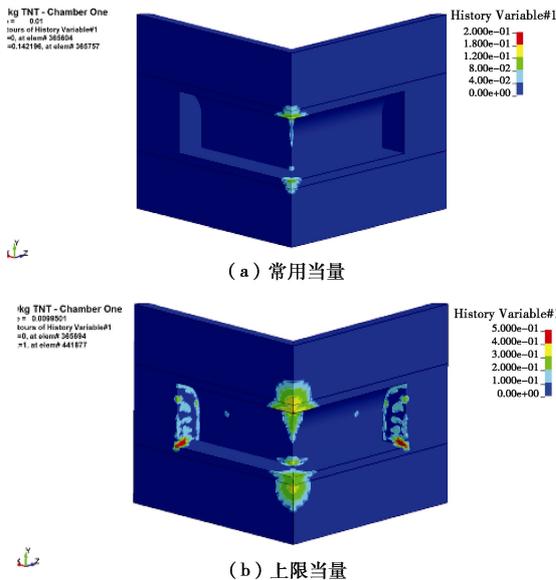


图 2 结构损伤分布 (JH 模型)

Fig. 2 Distribution of damage in structure (JH model)

在采用 RHT 模型对端部进行结构响应数值模拟时, 利用之前流固耦合计算得到的端部载荷, 直接施加到端面节点组进行计算。近回填段的结构损伤结果 (如图 4) 表明, 无论在常用当量还是上限当量的爆

炸载荷作用下, 结构端部与侧壁交界处均存在较大的张拉破坏风险。

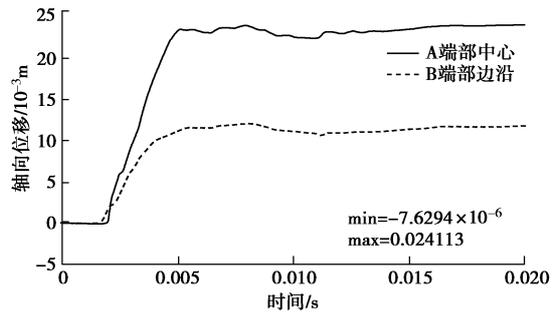


图 3 端部中心及边沿位移时程曲线

Fig. 3 Displacements of key points on end face

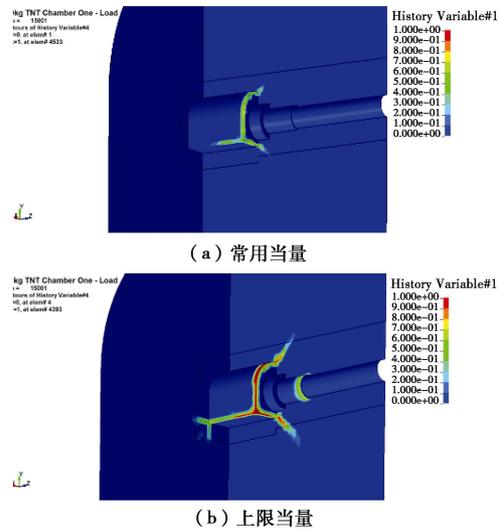


图 4 结构近回填段损伤分布 (RHT 模型)

Fig. 4 Distribution of damage in structure near end face

根据上述数值模拟结果, 进一步给出衬砌的损伤深度预估值, 如表 3 所示, 其大致规律是爆心拱顶损伤略大于爆心地面损伤; 常用当量试验条件下仅轻微损伤, 而上限当量试验条件下损伤较严重。

表 3 结构损伤分布及深度预估

Table 3 Prediction of damage distribution and damage depths

| TNT 当量 | 损伤位置 | 最大损伤深度 /m | | | | |
|--------|--------|-----------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | 损伤度 $D=1$ | 损伤度 $D \geq 0.8$ | 损伤度 $D \geq 0.6$ | 损伤度 $D \geq 0.4$ | 损伤度 $D \geq 0.2$ |
| 常用当量 | 爆心拱顶 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.10 |
| | 爆心地面 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.08 |
| | 端部侧壁交界 | 0 | 0 | 0 | 0.12 | 0.22 |
| 上限当量 | 爆心拱顶 | 0.01 | 0.05 | 0.08 | 0.13 | 0.86 |
| | 爆心地面 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.09 | 0.72 |
| | 端部侧壁交界 | 0.04 | 0.38 | 0.51 | 0.72 | 1.24 |

1.3 关键参数设计

根据数值模拟揭示的衬砌结构破坏风险,结合现场施工条件,针对性制定了以下设计方案:

(1)衬砌主体采用厚度 30~50 cm 高强高纤维混凝土(基体标号 C80)。

(2)爆心附近衬砌压剪破坏风险高,此处进行局部加厚到约 1 m。

(3)结构端部与侧壁交界处张拉破坏风险高,采用钢筋拉结加固。

(4)结构近回填段采用原岩局部超挖(约 1.5 m)再回填钢纤维混凝土,以规避力学安全风险。

1.4 施工工艺设计

由于衬砌施工空间条件极其有限,为确保施工质量,设计了异型混凝土浇筑模具(如图 5)。由于钢纤维混凝土流动性较差且作业空间狭小,设计人工送料方式进行浇筑,顺序如图 6 所示,即地坪→侧壁→非入口坑道顶部(由端部向中心方向封顶作业)→入口坑道顶部(中心向出口方向封顶)的作业顺序。

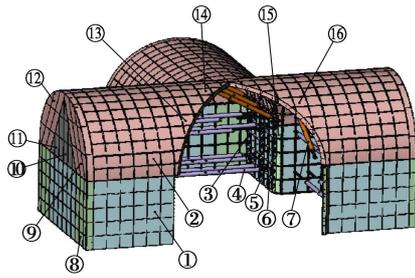


图 5 异型混凝土浇筑模具设计示意图

Fig. 5 Design drawing of work mould of steel fiber-reinforced concrete

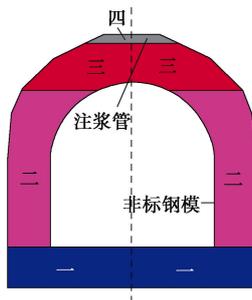


图 6 衬砌浇筑顺序示意图

Fig. 6 Schematic diagram of liner work order

由于重力因素和空间限制,顶部衬砌与围岩往往难以回填密实,故在封顶作业后,通过预埋注浆管,在衬砌与围岩结合处以及浇筑封口处注入高强度水泥浆。为增强衬砌与围岩结合的整体性,在衬砌与围岩中预先植入锚杆(浇筑前)。最终现场浇筑混凝土强度约 70~80 MPa(如图 7),略低于实验室设计强度。

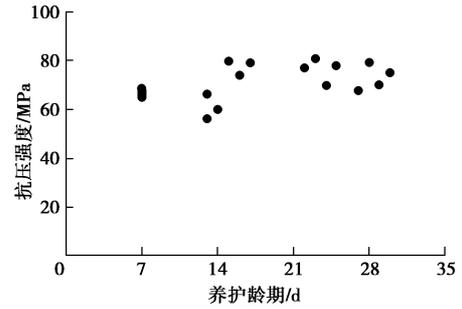


图 7 现场同步取样立方体试块强度

Fig. 7 Strengths of cubic specimen obtained on site

2 结构抗爆效果

2.1 表观破坏

多次常用当量试验后,对结构表观破坏特征进行了观测(如图 8),对比原岩结构破坏形态^[15](如图 9),结果显示:①在爆心顶部比例距离约 $0.197 \text{ m/kg}^{1/3}$ 的试验后,原岩结构即出现宽度厘米级、深度达数十厘米的裂纹,且随化爆次数增加裂缝不断扩展;②原岩结构扩挖并衬砌高强钢纤维混凝土后,进行了爆心顶部比例距离约 $0.188 \text{ m/kg}^{1/3}$ 的多次化爆试验后,衬砌表观无明显裂纹,仅爆心拱顶及底部出现少量毫米级侵蚀坑。

上述事实表明,由于节理、裂隙等结构弱面的存在,使得原岩物理力学性质不均匀,在爆炸载荷下原岩洞室更易出现随机的局部拉伸破坏,而人工构筑的钢纤维混凝土衬砌洞室结构则较原岩洞室抗爆能力有了显著提升。在重复化爆试验中,钢纤维混凝土衬砌结构能保持较好完整性,这对于提高试验中地震信号的稳定性和可比性是有利的。

2.2 钻孔探测

为进一步确认非弹性响应仅在衬砌局部产生,进行了钻孔探测。采用便携式取样钻机,在洞室中部、端部以及近爆心部位的侧壁打孔取芯,结合岩芯及钻孔摄像观测结果评估衬砌质量状况。

根据数值模拟结果,在结构内选取 3 个损伤可能较严重的区域进行钻孔取芯(测孔分别标记为#1, #2, #3,孔径均为 30 mm),并进行孔内摄像。作为对比,选取了数值模拟中处于弹性或轻微损伤的区域(洞室中部)开孔观测(测孔标记为 0)。检测结果如图 10, 11 所示。

钻孔过程中,#0, #1, #2 孔均未出现返水异常,可判断测孔区域未发育较大裂隙。由钻孔摄像可见,岩芯与衬砌层界面贴合紧密,未见明显裂缝,可判断多次爆炸未对测孔区域衬砌与围岩界面产生明显影响。

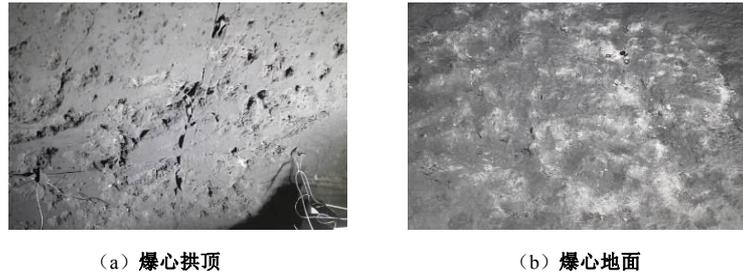


图 8 衬砌爆后 (0.188 m/kg^{1/3}) 破坏形态

Fig. 8 Damage forms in liner near explosive center after experiments (0.188 m/kg^{1/3})



(a) 端部与侧壁之间裂缝 (b) 爆心附近轴向裂缝 (c) 近回填段轴向裂缝

图 9 原岩爆后 (0.197 m/kg^{1/3}) 破坏形态^[15]

Fig. 9 Damage forms in rock mass near explosive center after experiments (0.197 m/kg^{1/3})

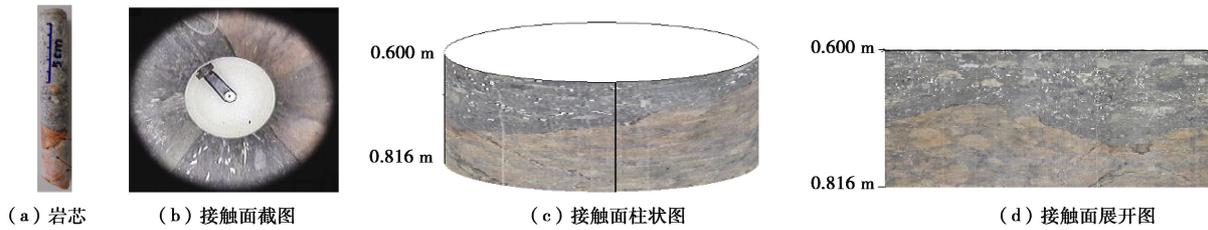


图 10 0 号开孔探测结果

Fig. 10 Borehole observations of hole No. 0



图 11 #1~#3 开孔探测结果

Fig. 11 Borehole observations of holes from No.1 to No. 3

#3 孔在钻进至衬砌与围岩交界面时返水量减少, 判断界面有较大裂缝。观测岩芯、接触面展开图 (如图 11 (c)) 得知, 衬砌内有成团钢纤维, 衬砌与围岩之间有孔洞, 围岩内有不规则裂缝。因界面偏衬砌一侧出现的孔洞阻断了波的传播, 故另一侧围岩内裂缝不可能为爆炸产生, 应为原生或爆破开挖时形成。而界面裂缝应为衬砌浇筑过程中钢纤维搅拌不均匀以及

局部振捣不充分所致。

2.3 地震信号

衬砌洞室某轮次试验在台站 A 的信号如图 12 所示, 可观察到地震信号起跳时间、趋势同步性等均较好。为进一步比较试验地震信号的质量差异, 分别选取原岩洞室中进行的第 m 轮 6 发试验和衬砌洞室中进行的第 n 轮 7 发试验, 对地震信号进行统一取 2 s 信

号长度、3~30 Hz 滤波处理，然后各自进行同轮次试验波形间的 Spearman 相关性分析。结果（如图 13）表明，在衬砌洞室中进行的该轮次 7 发试验地震信号间的相关性系数（共计 21 个数据）均大于 85%（均值 0.94），而原岩洞室中 6 发试验地震信号间相关性系数（共计 15 个）整体偏低（均值 0.85）。该事实表明，在衬砌洞室中进行重复多次相似试验得到的地震波形一致性更好。

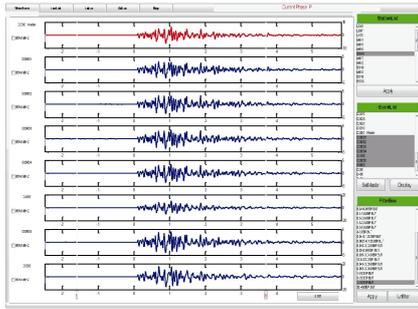


图 12 相似事件地震信号（台站 A）

Fig. 12 Seismic signals in similar events (station A)

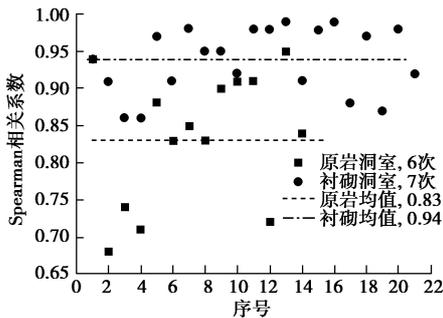
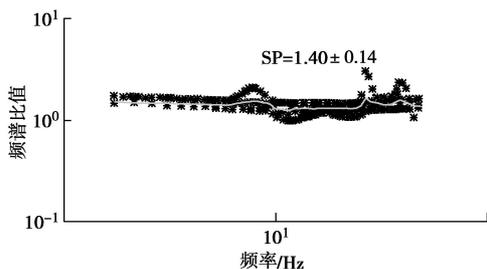


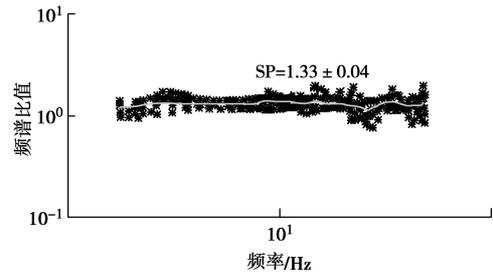
图 13 地震信号的 Spearman 相关系数

Fig. 13 Spearman correlations between seismic signals

此外，在所关心的频域范围内，分别处理在同轮次试验中地震信号相对各自参考事件（基准试验）地震信号的频谱比值，典型如图 14 所示。进一步计算得到相对谱比值的不确定度（如图 15，排除上限当量试验），发现衬砌洞室中试验地震相对频谱比值的不确定度较低（均值 4%，最高不超过 5%）。这表明，在衬砌洞室中开展重复多次相似试验的地震信号稳定性要优于原岩洞室中进行系列试验的地震信号（相对谱比值不确定度均值 11%）。



(a) 原岩洞室试验



(b) 衬砌洞室试验

图 14 相对各自参考事件的典型频谱比值

Fig. 14 Typical spectral ratios relative to respective reference events

综上所述，较好的地震信号质量（包括在所关心频域范围的相对谱比值）使得该衬砌洞室结构能够满足开展重复多轮次相关试验研究的需求，从而实现了预期设计目标。

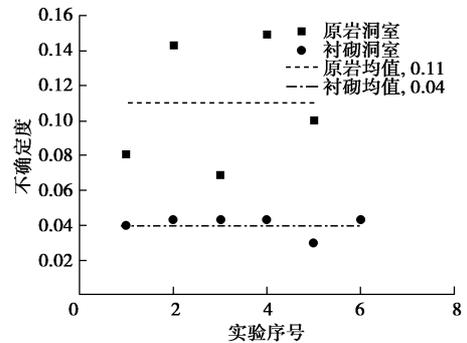


图 15 相对频谱比值的不确定度

Fig. 15 Uncertainties of relative spectral ratio

3 结 语

为合理设计建造预期功能的地下抗爆洞室结构，采用数值模拟方法预测了其损伤破坏的高风险区域，给出的半定性、半定量损伤评估结果使得指导结构设计更具科学性、局部加固措施更具针对性。试验后，通过钻孔观测，结果表明衬砌与围岩界面保持相对完好，实现了非弹性响应仅发生在衬砌中的设计目标。设计建成的可重复使用钢纤维混凝土衬砌洞室确保了不同轮次试验中地震波传播路径的一致性，且相对原岩重复结构提高了源区介质力学状态的稳定性，因而有效提高了地震信号质量及其可比性。同时，其可重复使用特性极大节约了场地资源，降低了工程代价，缩短了试验周期，具备较高工程实用价值。

研究中发现，钢纤维混凝土衬砌中的孔洞、钢丝成团等现象一定程度上干扰了钻孔检测结果的判断，给衬砌质量评价带来一定影响。今后可进一步优化高强钢纤维混凝土的现场施工工艺，深入探索发展混凝土类抗爆结构的无损检测技术，以及考虑地应力对地

下抗爆结构的稳定性影响等。

致 谢: 感谢王春明高级工程师、梁瑛高级工程师、阎长虹高级工程师、李昕助理研究员、陈建华工程师、刘明工程师的帮助、讨论与大力协作!

参考文献:

- [1] LATTER A L, LELEVIER R E, MAR TINELLI E A, et al. A method of concealing underground nuclear explosions[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1961, **66**(3): 943 - 946.
- [2] 李孝兰. 空腔解耦爆炸实验研究的基础理论(I) [J]. *爆炸与冲击*, 2000, **20**(2): 186 - 192. (LI Xiao-lan. Basic theory of decoupled explosions in cavities(I) [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2000, **20**(2): 186 - 192. (in Chinese))
- [3] 李孝兰. 空腔解耦爆炸实验研究的基础理论(II) [J]. *爆炸与冲击*, 2000, **20**(3): 283 - 288. (LI Xiao-lan. Basic theory of decoupled explosions in cavities(II) [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2000, **20**(2): 186 - 192. (in Chinese))
- [4] 钟放庆, 李孝兰. 盐岩介质中空腔爆炸解耦因子的计算[J]. *爆炸与冲击*, 2000, **20**(1): 83 - 86. (ZHONG Fang-qing, LI Xiao-lan. Calculation of decoupling factor for nuclear explosion in salt cavity[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2000, **20**(1): 83 - 86. (in Chinese))
- [5] 朱号峰, 靳 平, 肖卫国. 地下爆炸地震耦合效应的静态分析[J]. *地震学报*, 2010, **32**(2): 234 - 241. (ZHU Hao-feng, JIN Ping, XIAO Wei-guo. Static analysis on seismic coupling of underground explosions[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2010, **32**(2): 234 - 241. (in Chinese))
- [6] 钟放庆, 靳 平, 李孝兰, 等. 地下爆炸地震波的数值模拟及震源函数的研究[J]. *爆炸与冲击*, 2001, **21**(1): 53 - 56. (ZHANG Fang-qing, JIN Ping, LI Xiao-lan, et al. Seismic wave simulation and seismic functions for underground explosions[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2001, **21**(1): 53 - 56. (in Chinese))
- [7] 周 钟, 肖卫国, 王肖钧, 等. 花岗岩介质中地下爆炸震源函数研究[J]. *爆炸与冲击*, 2007, **27**(1): 18 - 25. (ZHOU Zhong, XIAO Wei-guo, WANG Xiao-jun, et al. study on the main characteristics of underground explosion seismic source function in granite[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2007, **27**(1): 18 - 25. (in Chinese))
- [8] 劳 俊, 肖卫国, 王肖钧, 等. 地下空腔解耦爆炸的数值模拟[J]. *爆炸与冲击*, 2009, **29**(5): 535 - 541. (LAO Jun, XIAO Wei-guo, WANG Xiao-jun, et al. Numerical simulation on underground cavity decoupling explosion[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009, **29**(5): 535 - 541. (in Chinese))
- [9] 肖卫国, 王肖钧, 劳 俊, 等. 不同方式地下爆炸地震耦合效应的数值模拟[J]. *计算物理*, 2011, **28**(6): 797 - 802. (XIAO Wei-guo, WANG Xiao-jun, LAO Jun, et al. Numerical simulation of seismic coupling effects in underground explosion with different explosion modes[J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2011, **28**(6): 797 - 802. (in Chinese))
- [10] 楼尧涛, 张海波, 肖卫国. 岩体中非填实爆炸空腔壁振动状态分析[J]. *爆炸与冲击*, 2001, **21**(3): 237 - 240. (LOU Wei-tao, ZHANG Hai-bo, XIAO Wei-guo. Study on vibration behaviors of rock wall in decoupling explosion[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2001, **21**(3): 237 - 240. (in Chinese))
- [11] 王占江, 李孝兰, 戈 琳, 等. 花岗岩中化爆的自由场应力波传播规律分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, **22**(11): 1827 - 1831. (WANG Zhan-jiang, LI Xiao-lan, GE Lin, et al. Free-field stress wave propagation induced by underground chemical explosion in granite[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, **22**(11): 1827 - 1831. (in Chinese))
- [12] 王占江, 门朝举, 刘冠兰, 等. 石灰岩中球形装药封闭化爆试验的自由场应力和地运动[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, **29**(增刊 1): 3403 - 3410. (WANG Zhan-jiang, MEN Chao-ju, LIU Guan-lan, et al. Free-field stress and ground motion of underground confined chemical explosions with spherical charge in limestone[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, **29**(S1): 3403 - 3410. (in Chinese))
- [13] 钟放庆, 李山林, 孙恒仲, 等. 地下爆炸地震强度与当量的比例关系[J]. *爆炸与冲击*, 2005, **25**(2): 180 - 182. (ZHONG Fang-qing, LI Shan-lin, SUN Heng-zhong, et al. Study on seismic coupling of underground explosion in rock[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, **25**(2): 180 - 182. (in Chinese))
- [14] 肖卫国, 王肖钧, 朱号峰, 等. 不同介质地下爆炸的地震耦合效应[J]. *爆炸与冲击*, 2011, **32**(3): 267 - 272. (XIAO Wei-guo, WANG Xiao-jun, ZHU Hao-feng, et al. Experimental study on seismic coupling effects of underground explosions in different materials[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2011, **32**(3): 267 - 272. (in Chinese))
- [15] 熊益波, 王雷元, 王万鹏, 等. 内部爆炸作用下的花岗岩地下洞室损伤机理[J]. *现代应用物理*, 2018, **9**(3): 59 - 64. (XIONG Yi-bo, Wang Lei-yuan, WANG Wang-peng, et al. Damage mechanism of underground chamber in granite

- under inner explosion[J]. *Modern Applied Physics*, 2018, **9**(3): 59 - 64. (in Chinese))
- [16] 杨黎明, 周风华, 董新龙, 等. 地下工程抗爆防震塌设计动力学机理讨论[J]. *中国工程科学*, 2011, **13**(3): 29 - 37. (YANG Li-ming, ZHOU Feng-hua, DONG Xin-long, et al. Dynamic study on anti-collapse design for underground structures subjected to explosion[J]. *Engineering Sciences*, 2011, **13**(3): 29 - 37. (in Chinese))
- [17] 范新, 章克凌, 王明洋, 等. 钢纤维喷射混凝土支护抗常规爆炸震塌能力研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, **25**(7): 1437 - 1442. (FAN Xin, ZHANG Ke-ling, WANG Ming-yang, et al. Study on spalling resistance performance of steel fiber shotcrete induced by conventional explosions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, **25**(7): 1437 - 1442. (in Chinese))
- [18] 王春明, 熊益波, 赵康. 钢纤维增强混凝土圆筒结构抗内爆炸性能试验研究[J]. *兵工学报*, 2013, **34**(增刊 1): 303 - 309. (WANG Chun-ming, XIONG Yi-bo, ZHAO Kang. Experimental study on antiknock characteristics of cylindrical steel fiber reinforced concrete structure under inner explosion[J]. *Acta Armamentarii*, 2013, **34**(S1): 303 - 309. (in Chinese))
- [19] 熊益波, 陈剑杰, 胡永乐, 等. 混凝土 Johnson-Holmquist 本构模型关键参数研究[J]. *工程力学*, 2012, **29**(1): 121 - 127. (XIONG Yi-bo, CHEN Jian-jie, HU Yong-le, et al. Study on the key parameters of the Johnson-Holmquist constitutive model for concrete[J]. *Engineering Mechanics*, 2012, **29**(1): 121 - 127. (in Chinese))
- [20] 熊益波, 彭璐, 王雷元, 等. 爆炸载荷下地下钢管道-混凝土-围岩结构损伤效应数值模拟[J]. *现代应用物理*, 2014, **5**(1): 51 - 58. (XIONG Yi-bo, PENG Lu, WANG Lei-yuan, et al. Numerical simulation on damage effects of underground structure of steel pipeline-concrete-rock under explosive loading[J]. *Modern Applied Physics*, 2014, **5**(1): 51 - 58. (in Chinese))

本期广告索引

- 封 2 广州国光仪器有限公司
封 3 北京理正软件股份有限公司
封 4 南端集团水利水电技术分公司