

精选文章 | 地下空间工程服役安全的认识与思考

原创 工程科学学报 工程科学学报 2022-04-01 17:05

文章信息

▮ 详细信息：

- ◆地下空间工程服役安全的认识与思考
- ◆杨仁树, 王雁冰
- ◆工程科学学报, 2022, 44(4): 487
doi:10.13374/j.issn2095-9389.2021.08.11.002
- ◆稿件已网络首发（点击下方网站直达相应页面）：
官网；知网

▮ 摘 要：

中国的地下空间工程规模越来越大。如何使地下空间工程在开挖、建造和服役期间最大限度的保持安全和稳定，是目前乃至将来必须重视的重要课题。在分析地下空间工程面临的主要问题的基础上，提出了地下空间工程服役安全的3个关键科学问题：多场耦合作用下结构体材料损伤劣化规律；循环动载作用下结构体的动态疲劳损伤特性；支护与围岩的相互作用。总结和评述了在此方面的相关研究工作和最新进展。最后从宏观上指出了地下空间工程未来的发展趋势和需要重点关注和加强的基础性研究工作。

全文阅览

21世纪，人类步入地下空间开发的新时代，世界各国日益重视对地下空间的开发和利用。近年来我国基础设施的大规模建设——西部大开发、南水北调、西气东输、高速铁路（公路）、深地资源开采、城市地下空间开发等都涉及大量的地下空间工程。地下空间开发利用的类型也呈现出多样化、深层化和复杂化的特点。另外，许多地下空间工程已由建造阶段转入长期安全稳定运营阶段，如何使地下空间工程长期保持高安全、高稳定、高可靠的运营品质，已成为现阶段我国地下空间工程发展面临的突出问题，而探明地下空间工程结构体系在全生命周期中的动态性能演变规律和效应，建立科学有效的地下空间工程服役安全评价标准和控制方法，是解决这一突出问题的重要法宝，也是当前急需解决的关键难题。与地面工程相比，地下空间工程安全服役面临的问题主要有：

(1) 复杂的地质条件。我国国土面积幅员辽阔，地质条件复杂多变。工程建设中需要考虑地质构造、岩土体的物理力学性质、地下水的赋存和分布及地质灾害等方面的信息。竣工的地下工程结构埋置于地质体中，尚应考虑工程建设对区域地质体安全的影响。

(2) 建造质量影响服役安全。地下空间工程的结构体在建造过程中就已经受到各种复杂的力学作用。例如，新浇筑的混凝土在未达到龄期前，已经承受地层压力或围岩卸荷压力的作用；寒区施工时，混凝土构件在未达到设计强度前，已经受到了反复冻胀荷载的作用；在岩石工程钻爆法施工时，爆破作用已经对被保留岩体造成初始损伤。建造过程中这些复杂的力学作用已使得结构体的强度降低。另外，建筑材料的自身性能也直接影响结构体的寿命。

(3) 环境因素引起的结构性能劣化。许多结构体在服役期间常处于多重有害的化学环境中，例如，西部地区的地下水含有大量的氯离子和硫酸根离子，与混凝土发生一系列的化学反应，使得混凝土的强度和耐久性降低；矿山矿井建设开采中的瓦斯、一氧化碳、二氧化硫等有害气体危害着地下建筑物的安全性能，且二氧化硫等自身具有的强腐蚀性也会对结构产生破坏；高原地区温度改变时的冻胀融沉也会对结构体的寿命产生影响。

(4) 突发灾害。突发的自然灾害和超强冲击荷载可能会对结构体带来毁灭性的打击。例如，地下空间中的火灾和水灾，结构体在高温或水的作用下，强度大大降低；地震作为一种复杂的特殊荷载作用，对结构体及支护体—围岩提出了更高的要求；人防工程、防护工程等对超强冲击的防御能力也是服役安全中应该考虑的问题。

(5) 地下空间开发向深部发展。在资源开采领域，浅部资源逐渐减少，资源开采正在向深部发展。例如，我国煤炭开采中最深的为山东新汶集团的孙村煤矿（1501 m）。另外，在城市地下空间方面，也在提倡地下立体多层次综合开发利用。面向2030 m的深地计划也进一步强调了深层地下空间开发的必要性。深部开采工程环境中的“三高一扰动”无疑对地下空间工程的服役安全提出了更高的要求。

目前我国正处于大规模、高速度的地下空间工程开发建设的高峰期，随着地下工程建设速度的加快以及利用率的逐渐提高，如何提高地下空间工程在其全生命周期内的安全性及可靠性，从而保障在长寿命使用条件下的安全服役，对相关领域的研究人员来说是极其严峻的挑战和重大课题。本文在分析地下空间工程面临的主要问题的基础上，凝练出地下空间工程服役安全的3个关键科学问题，总结和评述了笔者及其所在课题组在此方面的相关研究工作和最新进展，并指出未来的发展趋势和需要重点关注和加强的基础性研究工作，供地下空间工程技术、研究及管理部门参考。



1 地下空间工程服役安全的关键科学问题

1.1 多场耦合作用下结构体材料损伤劣化规律

针对地下空间工程复杂的应力场、渗流场、温度场、裂隙场、能量场和物质场环境，模拟地下空间工程可能出现的极端复杂条件，研究复杂工况单因素或多因素耦合作用下对地下岩土层、支护层服役安全的影响规律。

地下空间工程结构体埋于地层中，在服役过程中既承受外部荷载的作用，又受到外部物理化学环境的影响。在力学、物理和化学多重作用下，导致结构体过早破坏失效。由于外部荷载的作用，结构体材料——岩石、混凝土内部首先出现微裂隙，在物理化学作用下，微裂

隙进一步扩展，形成宏观的裂纹，导致结构物的耐久性及其强度降低。在作用效应中，力学、物理及化学三因素的作用之间互为前提，又相互促进。多因素耦合作用下，结构体的损伤破裂机理要比单因素单独作用复杂的多。结构体的损伤劣化程度并不是单因素作用结果的简单叠加，例如有研究表明，环境化学因素的作用虽然存在加速混凝土结构劣化的负面效应，但在历程中某一阶段内，同样存在延缓混凝土材料与结构损伤进程的正面效应。因此研究微裂隙在多场耦合作用下的起裂、扩展及其止裂规律，既能预测判断结构体的服役寿命，又可以采用某些可行技术措施对其损伤劣化过程进行控制。

1.2 循环动载作用下结构体的动态疲劳损伤特性

目前国内一些重大的岩石地下工程建设和资源开采领域，爆破作为一种破岩手段被广泛采用，但在爆破过程中，炸药爆炸后会产生冲击波和高温高压的爆生气体，由爆源向岩石中传播，应力波在岩体中的传播、反射引起岩体内部裂纹发育、扩展甚至贯通是导致岩体发生损伤的主要原因，在应力波的传播距离逐渐增大后，将衰减成为地震波。根据传播途径的差异，地震波分为体积波和表面波。当爆破所产生的地震波在岩土体介质中进行传播时，会使爆源附近围岩产生颠簸、摇晃，该现象称为爆破地震效应。由爆破所引发的地震效应具有很强的危害性，在单次地震波能量较小的情况下或许不会对结构或者岩体造成破坏，而在多次地震波反复作用下，结构或者岩体将出现疲劳效应，承载力下降，从而出现裂纹。

工程实践的结果表明，动载是影响岩体疲劳累积损伤和性能劣化的重要因素，动态效应存在多种负面影响，如动态效应可以直接破坏岩体的完整性，导致失稳过程的发生，同时在反复动载作用下岩土会发生疲劳破坏，从而加速了岩体的破坏过程。从天生桥、太平驿及二滩等大型水电站引水隧洞的开挖过程中，研究人员通过分析发现无论在时间上还是空间上，岩爆与爆破之间都存在着极为密切的关系。因此由循环动载作用所引起的岩体疲劳损伤破坏，是目前亟待解决的问题。目前国内外关于岩体动态疲劳损伤破坏的研究并不突出，因此被认为是涉及复杂动力过程且少有参考资料的国际性前沿课题。

1.3 支护与围岩的相互作用

地下空间工程就是在地面以下的地层中挖掘出一个空间，达到不同使用功能的目的。这样必然导致原本处于平衡状态的地层因为扰动而发生应力的重新调整和变形，以寻求新的平衡态。由于地质条件的差异，有的围岩可以通过自身的应力调整达到新的平衡；有的围岩则难以自身达到平衡，随着变形的不断发展，出现了破坏和失稳现象，这样就需要适当的人工的支护干预，使其能够尽快达到新的平衡。

支护与围岩的相互作用关系较为复杂。首先，支护与围岩的相互作用具有时间效应，地下空间开挖后的应力平衡不是瞬间实现的，而且支护构件的施工和架设也需要一定的时间。再有，支护和围岩两者相辅相成、密不可分，支护在一定程度上可以承担围压卸荷带来的压力，调动围岩自身承载能力，控制围岩变形；围岩自身的荷载和因变形约束产生的反力又作用在支护上，这对支护体的刚度和强度都提出了较高的要求。围岩和支护的变形破坏往往都具有非线性的特征，两者中的任何一方失效都可能导致整个结构体失效。所以要综合考虑支护和围岩的相互作用关系。

2 地下空间工程服役安全相关问题的研究现状与主要进展

2.1 特殊环境下岩石、混凝土的破坏过程

对于单一环境因素为控制变量或双因素耦合作用影响下的岩石、混凝土的破坏过程，已有大量的研究成果。

在考虑“温度”因素方面，对不同冻结温度 and 不同冻融次数的饱水红砂岩进行研究，从应力-应变曲线的变化、试件的破坏形态等方面入手，研究红砂岩的动力学特性的温度效应及应变率效应。通过分析常温到负温状态下煤-岩样动态力学参数及相关力学性质的变化，研究了低温梯度对煤-岩动态力学性能的影响，探讨了低温与冲击荷载耦合作用下的煤-岩应力-应变曲线特征（图1）。分析了不同应变率下低温冻结煤-岩的强度性能，探究了应变率对试样压缩变形破坏的影响规律（图2）。且通过对煤-岩样进行饱水处理，通过与干燥条件下试样的力学性能进行对比，分析了水、水冰相变对相应煤-岩样强度性能的影响。利用高温加热控制系统和SHPB试验系统，开展不同温度和不同冲击速度耦合作用下的煤-岩的动态断裂韧度测试，发现断裂韧度随温度升高而降低，但不是线性降低。

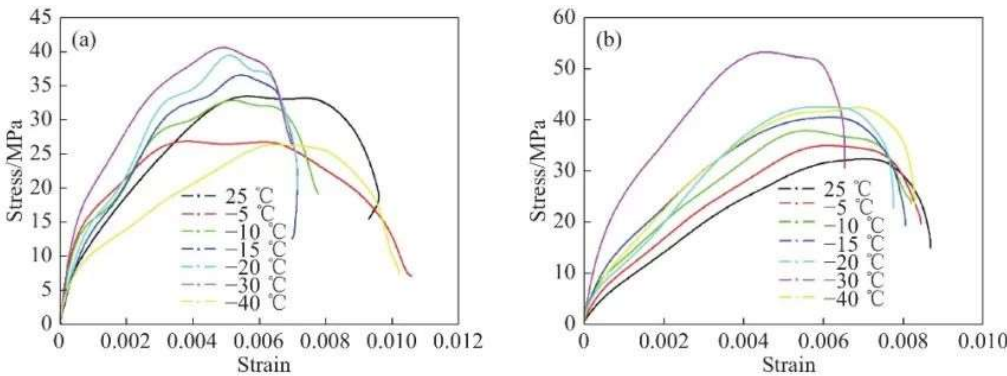


图 1 不同温度下煤-岩样应力-应变曲线. (a) 饱水煤样；(b) 干燥煤样

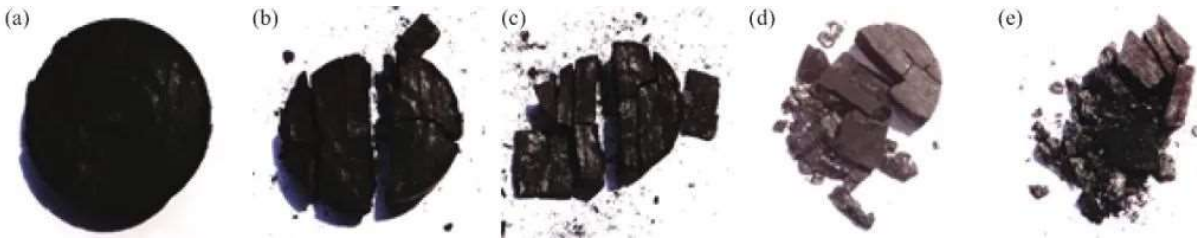


图 2 不同应变率下的煤-岩样品的破坏形态.

(a) 49 s^{-1} ; (b) 61 s^{-1} ; (c) 70 s^{-1} ; (d) 82 s^{-1} ; (e) 101 s^{-1}

在考虑岩石、混凝土自身所含裂隙、节理、孔洞等缺陷对破坏过程的影响方面，将焦散线法引入爆炸、冲击实验中，研究了爆生裂纹与弱面、缺陷等不连续结构面的相互作用机理。研究了含层理煤的动态断裂韧度，并将不同层理角度 (β) 下的动态断裂韧度与离散格子弹簧 (DLSSM) 的数值计算的结果进行了对比，如图3所示。采用霍普金森杆实验系统，结合数字图像相关法 (DIC) 研究了含倾斜弱面介质中动态裂纹的扩展行为，发现裂纹在遇到弱面后易偏向弱面扩展，裂纹尖端应力场初始为拉应力场，而随着裂纹逐渐偏向弱面扩展，导致裂纹尖端出现拉剪复合应力场，且随之改变的有开裂应变及开裂速度，均出现增大现象，如图4所示。

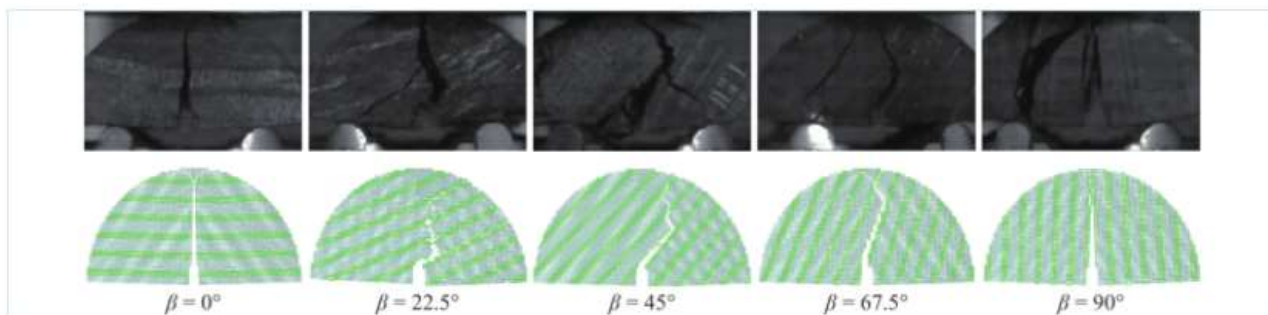


图 3 含层理煤的动态断裂结果

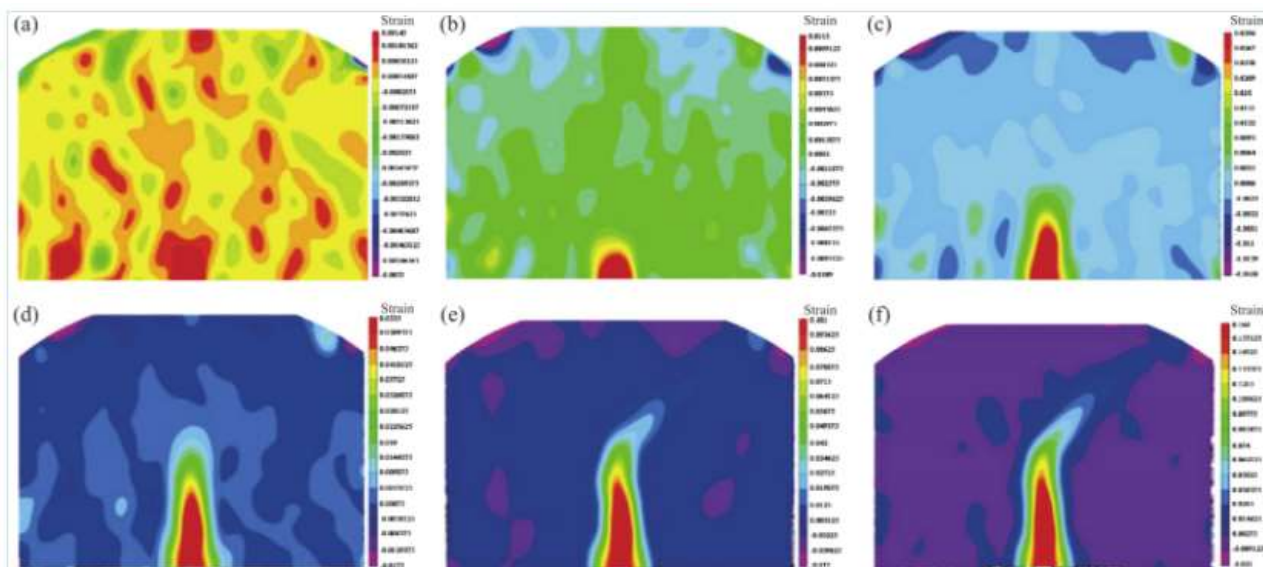


图 4 冲击荷载下含层理介质中x方向的名义应变随时间变化云图.

(a) 118.52 μs ; (b) 125.93 μs ; (c) 140.74 μs ;

(d) 155.56 μs ; (e) 170.37 μs ; (f) 185.18 μs

在水-岩作用方面,开展了水压作用下井壁高强混凝土力学性能的试验研究,建立了高强混凝土在不同水压条件下的两参数破坏准则,提出了高强混凝土在不同水压条件下的单轴单参数本构模型和三轴全曲线的三参数本构模型[15]。利用混合罚函数方法和复变函数理论,推导出全水压作用下直墙半圆拱斜井井壁的映射函数方程和井壁的弹性近似解析解,分析了量纲为一的水压、井壁设计参数等因素对井壁应力和位移分布的影响,如图5所示,图中A~H点为井壁测点,其中A为拱顶,D为底板。

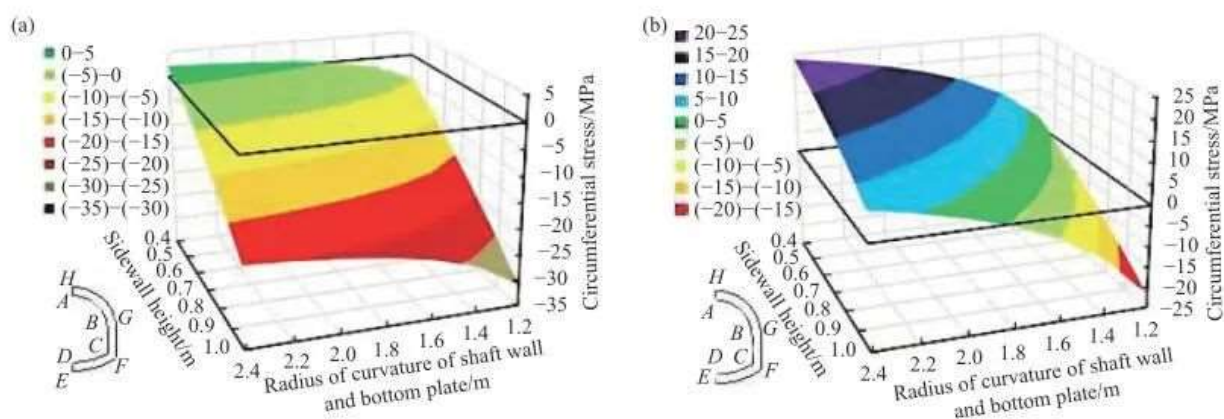


图 5 组合试验井壁关键点环向应力等值曲线图.

(a) A点环向应力等值线图；(b) D点环向应力等值线图

以上研究的考虑角度各有侧重，很少涉及多因素耦合或是多场耦合条件下的岩石、混凝土材料的破坏过程。多场耦合下，材料的破坏效应并非是单因素影响效应的叠加，对此需要进行深入的研究。另外，理论和试验研究往往会提前对某些条件进行简化和假设，理论成果对实际工程直接指导作用的针对性有待加强。

2.2 动载下岩石、混凝土的动态力学性能

岩石动态力学性质反映了岩石变形与破坏的动态过程，其时间相关性显著，即岩石材料本身具有加载率敏感性。采用SHPB（霍普金森压杆）结合DIC试验系统进行复合岩体的冲击压缩试验，发现：（1）复合岩体的动态力学特性及能量耗散规律均具有明显的应变率效应。

（2）相同冲击速度下，受波阻抗匹配关系影响，应力波由硬入软和由软入硬时复合岩体动力学特性差异明显。（3）复合岩体两部分岩石破坏程度和破坏形式明显不同。研究了波阻抗对岩石动力学特性的影响。发现应变率相同时，随着波阻抗的减小，反射波幅值增大、透射波幅值减小；峰值应力减小，应变软化阶段延长，塑性段趋于明显，且有塑性流动现象出现。采用SHPB结合高速摄影研究了黏土经固结作用后，应变率在 $60 \sim 600 \text{ s}^{-1}$ 范围内的动态力学特性，其动态应力-应变关系表明，固结黏土具有明显的应变率相关性，在达到破坏应变前，其具有理想弹塑性的特征。应用极限分析法研究了岩石破坏形式对强度的影响效应，通过反演分析获得了岩石黏聚力、内摩擦角等参数的简便计算公式。

同时岩石在高应力场下表现为显著的各向异性，其本构关系的建立异常困难，因此对于复杂环境下（如高地应力场、温度场等）岩石爆破的动态力学行为尚未进行深入研究。

2.3 爆炸荷载下岩体内部的损伤测试及评价方法

爆炸应力场作用下的岩石损伤测试方面，主要采用声波检测、钻孔窥视、声发射、微地震监测、钻孔CT、围岩变形监测以及地质雷达等手段确定围岩损伤范围。

为解决边界约束和冲孔的问题，自主设计研发了一种“主动围压与边界约束装置”（如图6）。将CT扫描及三维重构等手段引入爆破损伤的分析中，提出了岩石损伤度的测试及计算方法。基于分形损伤理论研究了爆炸作用下介质的损伤破坏规律，定量研究了普通药包和切缝药包爆破中炮孔周围不同区域的损伤破坏程度，如图7~8所示（图8中D1~D4为炸药耦合侧的分形维数）。在青岛地铁区间隧道光面爆破中利用声波测试的方法研究了切缝药包的减震减损规律。发明了一种基于第二临空面形成时间的楔形掏槽起爆段别设计方法，适用于城市浅埋隧道的低振动精确控制爆破。

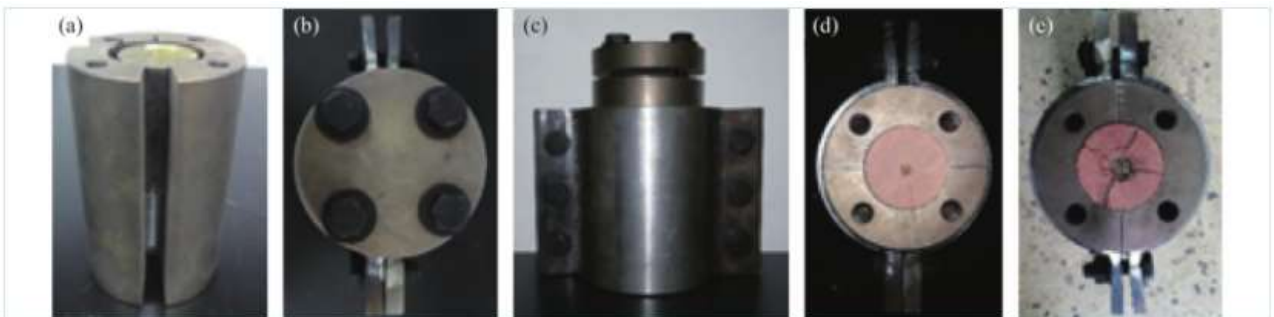


图6 “主动围压与边界约束装置”实物图。

(a) 侧视图；(b) 仰视图；(c) 正视图；(d) 俯视图1；(e) 俯视图2

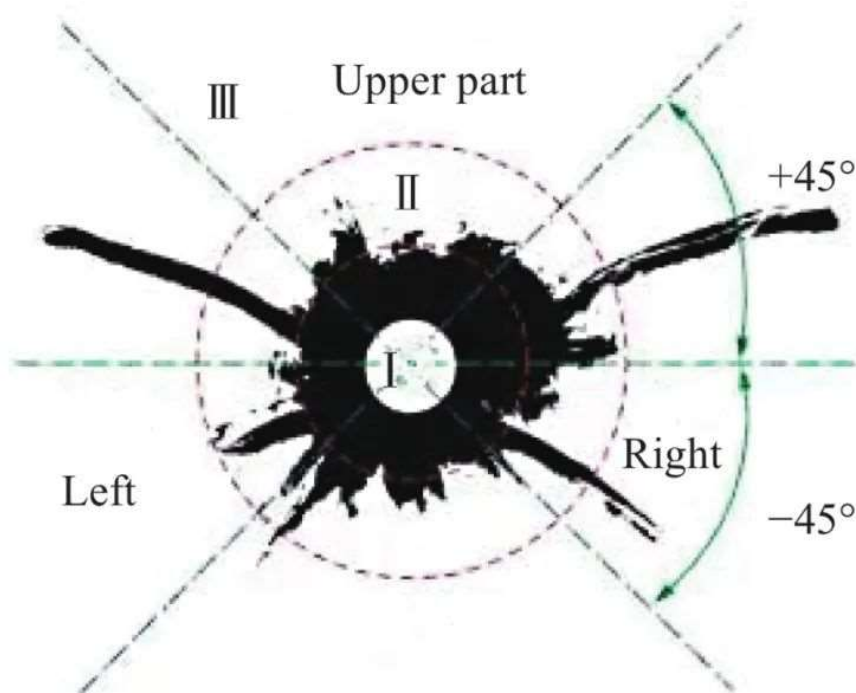


图 7 普通药包爆破下裂纹分区

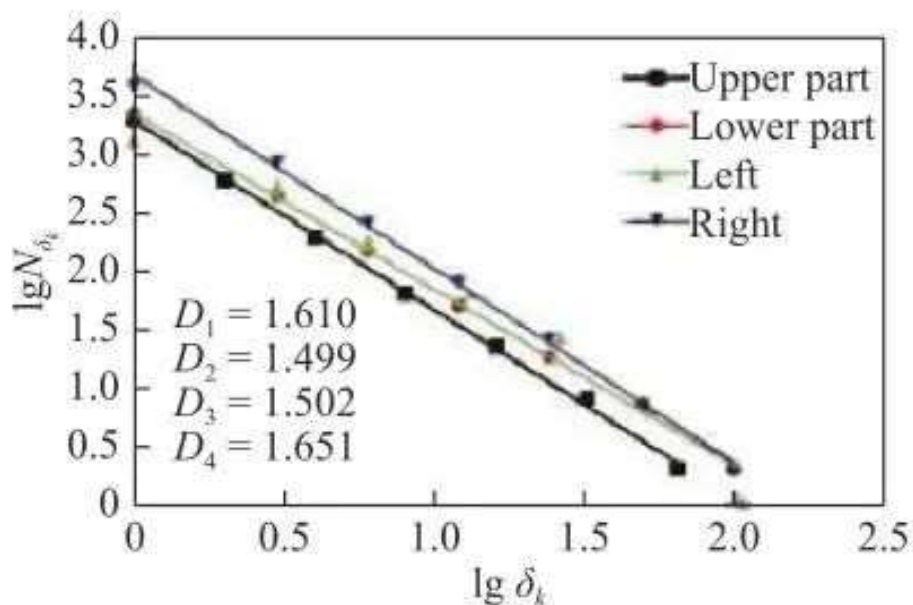


图 8 普通药包爆破下炮孔II区的分形维数

在岩石爆破损伤评价方面，由于地质条件的复杂多变，相对应的岩石爆破损伤评价方法也多种多样，尚未形成统一、较为精确和完善的爆破损伤评价及控制方法。鉴于岩体内部的裂隙、节理对于波速的敏感性较高，因此可以采用超声波检测的方法来描述分析岩体的损伤特性。所测数据为被选取两侧点之间的均值，但是岩石材料的内部颗粒组成差异性较为明显，同时密度也存在较大差异，因此测量精度并不是很高。地质雷达的探测精度及雷达图像的判释依据具有相对的局限性，可靠性并不是很高，影响了地质雷达探测结果的准确性和可靠性，并且部分操作较为困难，例如在检测大断面空间保留岩体时明显困难；而在地下空间规模较大的工程中，需要不间断地对损伤区进行追踪检测，但是由于坡体结构等地质因素的制约，检测难度非常大，人力物力资源耗费严重。因此对于岩石的爆破损伤评价仍需进行大量的工作来深入研究。

2.4 岩石、混凝土疲劳

在爆破振动方面，采用现场测试的方法对岩石巷道爆破近区的振动进行测试，随着掘进工作面的推进，得出了爆破振动沿巷道侧壁的传播衰减规律；基于超声波测试技术手段，通过对巷道侧壁的损伤规律进行分析，揭示了爆破振动下岩体的损伤累积规律[25]。

在循环载荷方面，岩石材料在循环荷载的作用下，岩石的强度明显和常规条件下的强度和变形规律不同，强度明显降低，破坏强度峰值明显低于常规实验条件下的破坏强度峰值。在变形方面则表现为记忆性，破坏点的位置受到常规应力-应变全过程曲线的控制。目前针对岩石的疲劳损伤研究主要是在交变循环应力或者循环应变的作用下的一个损伤破坏过程，爆破荷载所产生的动态应力场为脉冲应力场，这和以往所研究的应力场状态完全不同。同样爆破荷载作用下岩石的疲劳特性表现出动静荷载相互叠加的作用，弹性波应力场和岩体的静态应力场相互交织，注定了研究的复杂性。

2.5 地下空间工程围岩稳定性分析及支护机理

近年来主要围绕煤矿地下空间围岩安全稳定和支护机理做了大量研究。

在冻结凿井方面，利用复变函数理论，建立了非均匀荷载作用下圆形水平冻结壁模型（图9），并考虑冻结壁与围岩作用及开挖卸荷作用，推导出弹性冻结壁与围岩的应力和位移解析解，讨论了基于Tresca和Mises准则的冻结壁厚度设计方法。利用复合型最优化设计方法计算出非圆形冻结壁的映射函数方程，推导出非均匀荷载作用下非圆形水平冻结壁与围岩的弹性应力和位移近似解析解。

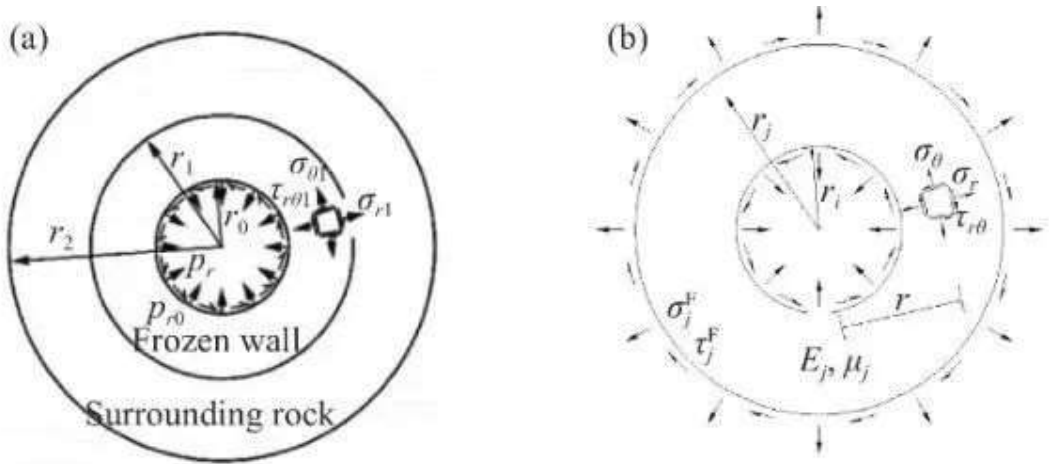


图9 圆形冻结壁力学模型。(a) 力学模型A；(b) 力学模型B

在支护方面，为解决高应力破碎软岩巷道支护难题，将深部稳定岩体视为围岩大结构，提出以强力锚杆为基础，通过进行注浆来强化巷道浅部破碎和裂隙损伤岩体等围岩小结构，且通过高预应力锚索注浆前后两次张拉，形成了围岩大小结构间协同承载的联合支护技术。研究了硐室群及周边巷道围岩变形破坏特征和机理，提出了硐室及周边20 m范围内巷道围岩“强柱固底”的加固支护方案，有效控制了围岩变形，达到了理想的加固支护效果。

在注浆加固方面，采用自主研发的实验室液压注浆系统对高应力深井破坏软岩等效试件进行了注浆试验，研究了注浆后试件单轴抗压强度、裂隙变化情况和试件内部裂隙分形维数变化规律。

在支护智能设计方面，研发了煤巷支护方案专家系统，实现了不同地质条件下煤巷支护方案的智能决策，如图10所示。

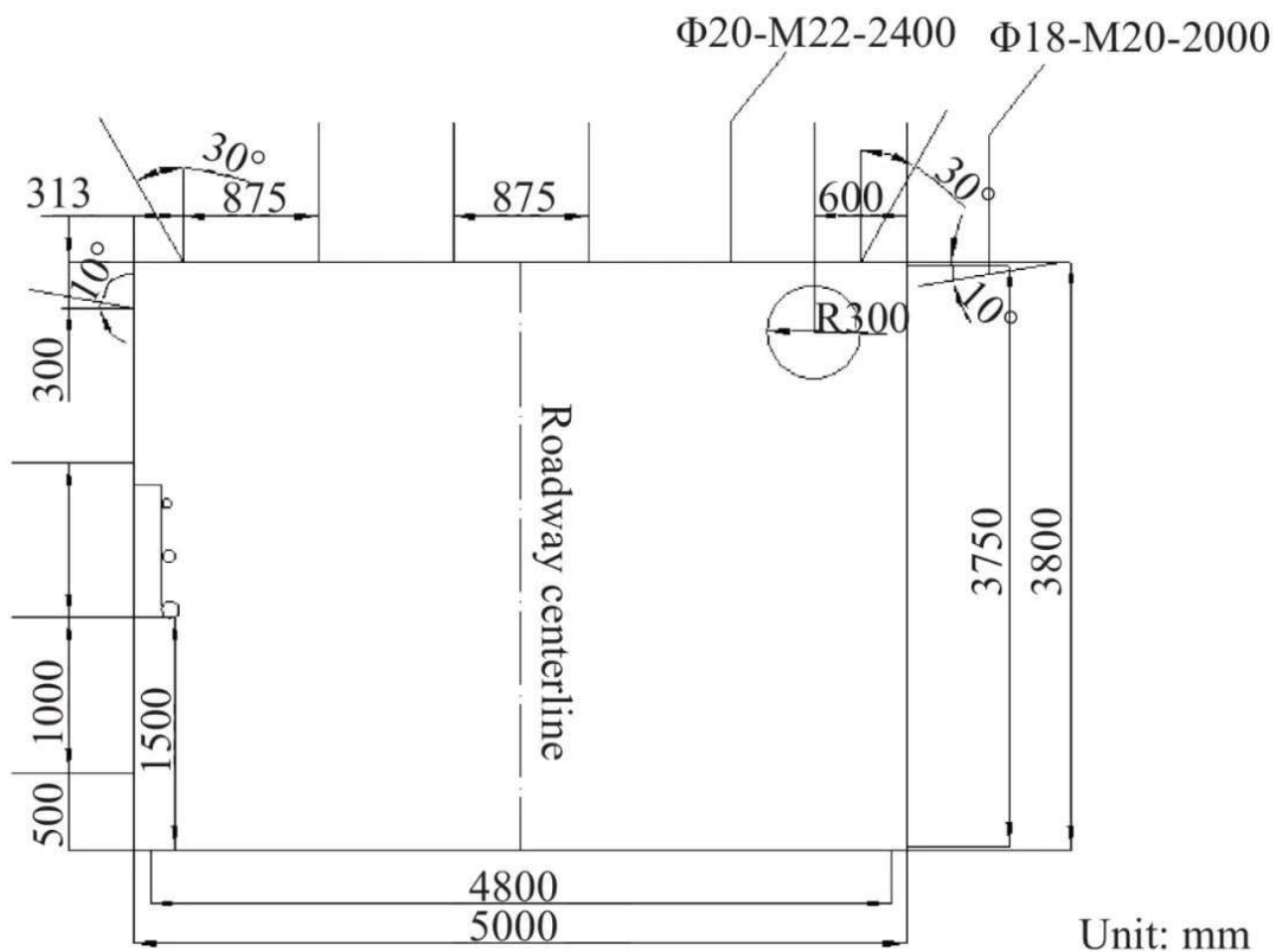


图 10 系统生成的支护断面图

图9 (a) 中冻结壁的内外半径为 r_0 , r_1 ; 围岩的内外半径为 r_1 , r_2 ($r_2 \rightarrow \infty$); p_r 为任一点径向压力; p_{r0} 为围岩初始压力; $\sigma_{\theta 1}$, σ_{r1} 分别为冻结壁处环向和径向处应力; $\tau_{r\theta 1}$ 为冻结壁处的剪应力; 图9 (b) 中 σ_{iF} 和 τ_{iF} 、 σ_{jF} 和 τ_{jF} 分别模型内、外边界的边界面力,下标 $j = i+1, (i = 0, 1)$, 0代表冻结壁内边界; 1代表冻结壁外边界; 2代表围岩无限远处; E_j 、 μ_j 分别为围岩的弹性模量和泊松比; r_i 、 r_j 分别对应图1中的 r_0 、 r_1 或 r_1 、 r_2 , σ_{θ} 、 σ_r 分别为某一点处的环向和径向应力; $\tau_{r\theta}$ 为某一点处的剪应力。其中力学模型B是力学模型A的深入表达。

在分析围岩的变形失稳机理过程中，一般遵循连续性、均匀性假设，即将围岩视为连续均匀介质，因此当分析围岩时，侧重点偏向岩性，然而对于层状顶板中所存在的软弱结构面分析较少；在分析锚杆锚索受力时，一般集中于轴向拉伸的分析探究，而忽视了锚杆锚索横向层间剪切滑动的研究；在锚杆与锚索联合支护体系中，对锚杆锚索间的作用机制理解较为片面，同时由于缺乏对层状顶板变形失稳的深入考虑导致了支护方案针对性较差。

3 未来的研究方向

开展以工学学科为基本，多学科“渗透”为特色的地下空间服役安全研究，展现中国地下空间学术研究的大格局。

◆ 研发应用于地下空间工程的新型绿色建筑材料。

开展以石墨烯混凝土复合材料为代表的高强增韧低渗水率材料的研发，并将其应用于地下空间工程服役结构。研发新型智能材料，使其具有采暖、防静电、电磁屏蔽、应变传感器和接地/雷电保护功能。

◆ 新的支护设计理论。

锚杆锚索在腐蚀环境中的阳极溶解造成裂纹萌生与扩展；而氢原子在裂纹处富集将加速裂纹扩展。阳极溶解和氢脆是支护材料产生应力腐蚀断裂的关键因素，提出以“抑制微区电化学反应”和“限制氢扩散”为核心的抗 scc （应力腐蚀开裂）钢二元设计理论，为开发新型耐蚀高强支护材料奠定了基础。

依托国际一流的腐蚀与防护研究基地——国家材料环境腐蚀平台，结合锚杆锚索真实受力特征，阐明锚杆锚索在高侵蚀环境服役过程中力学性能衰减规律，从材料、环境、应力三个维度，揭示锚杆锚索应力腐蚀断裂机理。

◆ 基于人工智能的地下空间服役安全研究。

从未来地下空间的发展角度看，基于“智慧城市”的地下空间发展是必然趋势，其学术研究的发展潜力巨大，BIM（建筑信息模型）、网络化信息技术、人工智能技术和大数据处理分析技术等与地下空间工程服役安全的深度融合等研究方向或将成为未来10年地下空间学术研究的焦点。

建立基于多场联测、智慧物联的透明地下空间监测预警与安全评估中心，应急救援决策中心，以及重特大事故调查与仿真推演实验中心。通过人工智能算法能预测地下空间工程服役安全风险，最终能形成应急救援技术辅助决策能力、重大事故调查专家支持能力等。

◆ 构建全生命周期的地下空间服役风险分析与防控体系。

对地下空间工程服役周期中的设计、建造、运维等各个重要环节进行主要风险因素辨识及相应事故分析，判断主要因素的相互关系。综合考虑多因素、多方法，建立起安全评价指标体系，并且要通过客观案例进行可行性验证。在此基础上针对地下空间的开发利用，构建“三全”（全周期、全体系、全系统）技术体系，从而为保障城市地下空间工程服役安全提供科学的思路及可行的方法。



曾用名: 北京科技大学学报

主管单位: 教育部

主办单位: 北京科技大学

ISSN: 2095-9389

CN: 10-1297/TF

刊期: 月刊

报道范围: 主要刊载工学领域的具有创新意义或有较大应用价值的高水平研究论文。

专业领域: 矿业、冶金、材料、设备、能源、控制

期刊分级: 有色金属领域高质量科技期刊分级目录T1级别期刊

冶金工程技术领域高质量科技期刊分级目录T1级别期刊

材料腐蚀与失效领域中文高水平期刊



❖ 数据库收录情况 ❖

数据库: Scopus

美国《工程索引》数据库 (EI)

美国化学文摘 (SciFinder)

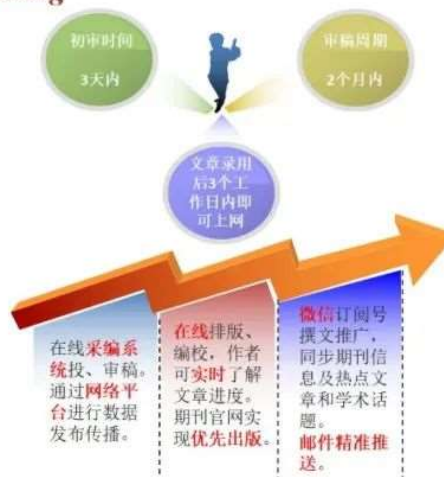
剑桥科学文摘 (CSA)

科学文摘数据库 (INSPEC)

中国科学引文数据库来源期刊 (CSCD)

综合性科学技术类中文核心期刊

中国科技论文统计源期刊



官 网: <http://cje.ustb.edu.cn>

邮 箱: xuebaozr@ustb.edu.cn

电 话: 010-62333436



阅读原文 阅读 236

分享 收藏

3

2