



李正伟

- ▣ 2025.01-至今，东北大学，深部金属矿智能开采与装备全国重点实验室，副教授（长聘）
- ▣ 2019/11-2024.12，东北大学，深部金属矿山安全开采教育部重点实验室，副教授（人才引进）
- ▣ 2016/9-2019/10，东北大学，深部金属矿山安全开采教育部重点实验室，讲师，师资博士后（导师：冯夏庭院士）
- ▣ 2011/9-2016/6，吉林大学，地质工程，博士（导师：张延军教授）
- ▣ 2006/9-2010/6，吉林大学，土木工程，本科

主要从事深部岩体工程地质力学、深部结构性岩体多场耦合效应、深空资源开发与智能建造研究。主持国家自然科学基金项目3项、国防科工局民用航天预研项目、重大科技基础设施预研项目、教育部重大科研装置建设项目课题等



東北大學
Northeastern University



深部金属矿智能开采与装备全国重点实验室
State Key Laboratory of Intelligent Deep Metal Mining and Equipment

高应力围岩破坏机理的模拟试验技术研究及应用

汇报人：李正伟

目 录

一

研究背景及意义

二

相似物理模拟原理与技术

三

大型深部工程物理模型实验系统研发

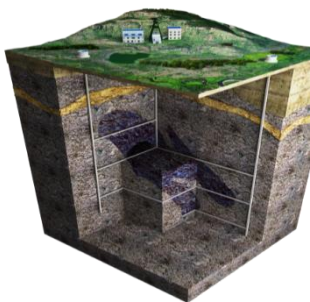
四

典型应用案例分析

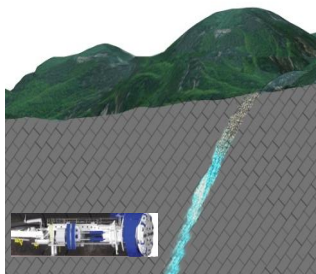
(一) 研究背景及意义

国家重大工程建设需求

能源、资源、水利水电、交通与环境工程不断向深部发展



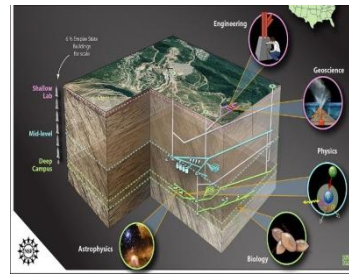
深部采矿
(800-4000m)



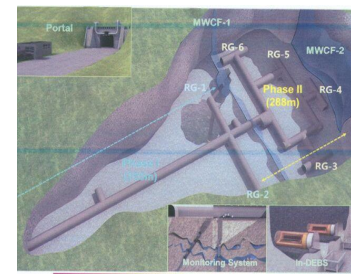
交通隧道
(200-3000m)



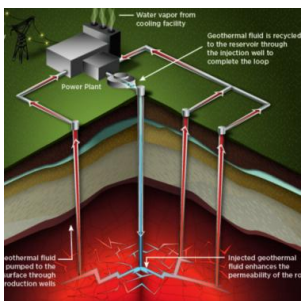
水电隧洞、地下厂房
(500-3000m)



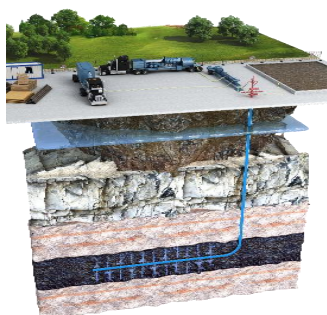
地下实验室
(100-2400m)



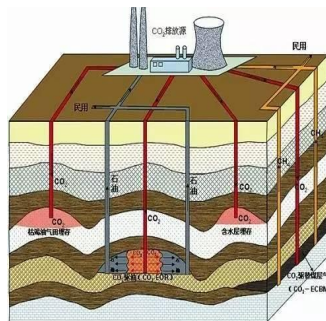
核废料地质处置
(400-1000m)



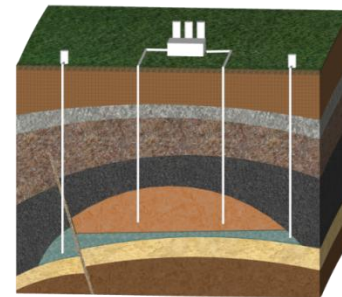
深地热开发
(3300-10000m)



深层油气开发
(1600-5600m)



CO₂地质处置
(1000-3000m)



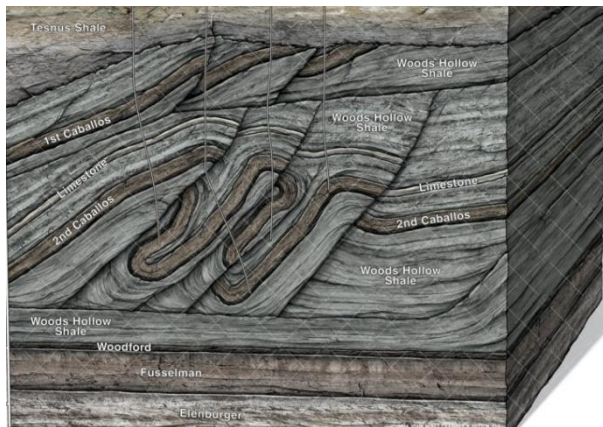
深层油气储存
(3000-8000m)



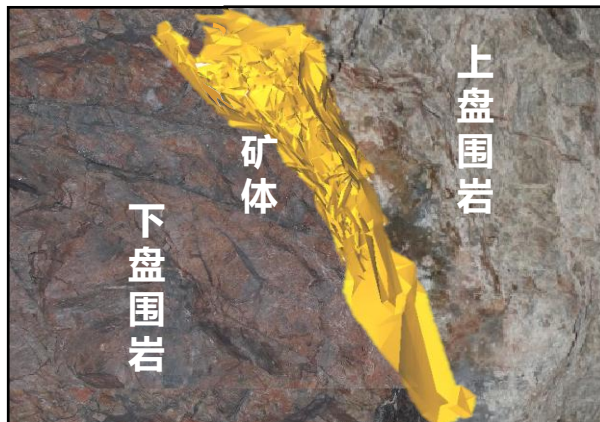
城市地下空间
(100-200m)

(一) 研究背景及意义

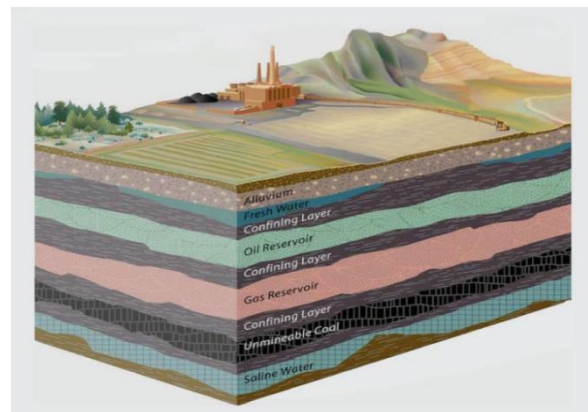
深部工程安全建设与运行面临的挑战：地质条件与赋存环境极为复杂



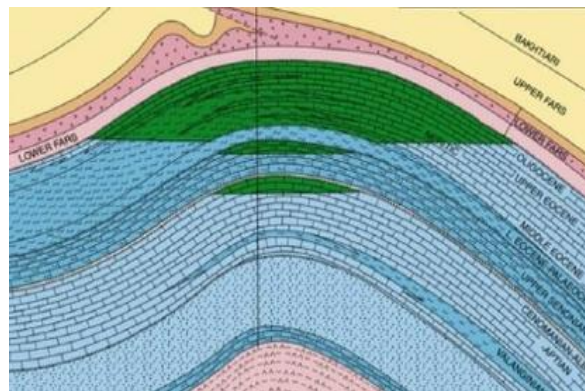
褶皱、断层



急倾斜矿体



层状结构

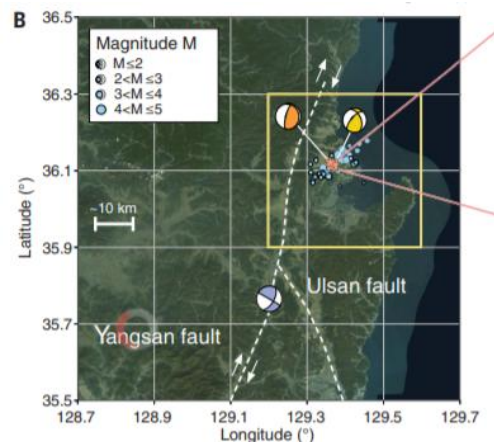


圈闭构造

- 超高地应力
(200MPa)
- 超高流体压力
(100MPa)
- 超高温(300°C)
- 强化学腐蚀 (pH:
3-11)

(一) 研究背景及意义

深部工程安全建设与运行面临的挑战：工程活动诱发的重大灾害频发



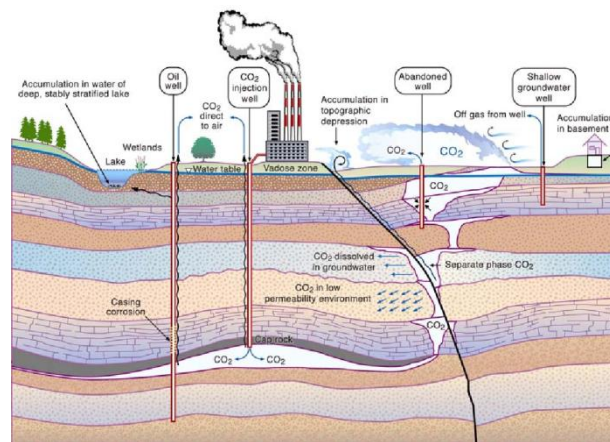
诱发地震

(浦项地热开采, 5.4级, 50余人受伤)



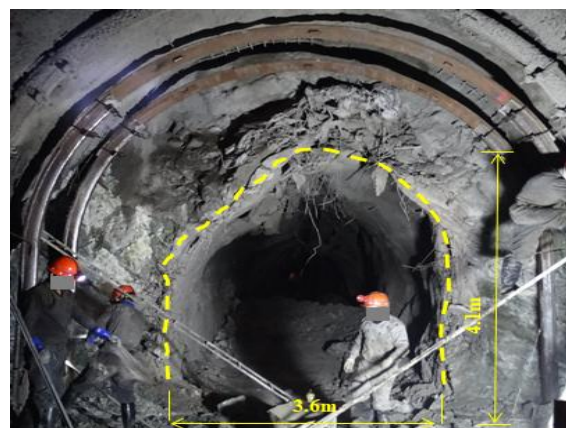
岩爆

(某引水隧洞, 一次7人死亡, 停工半年)



CO₂泄露

(喀麦隆某湖底CO₂泄露, 造成人员死亡)



大变形

(某地下矿山, 最大变形1.1m, 衬砌报废)



储气库泄露

(持续4个月, 遣散数千户居民)



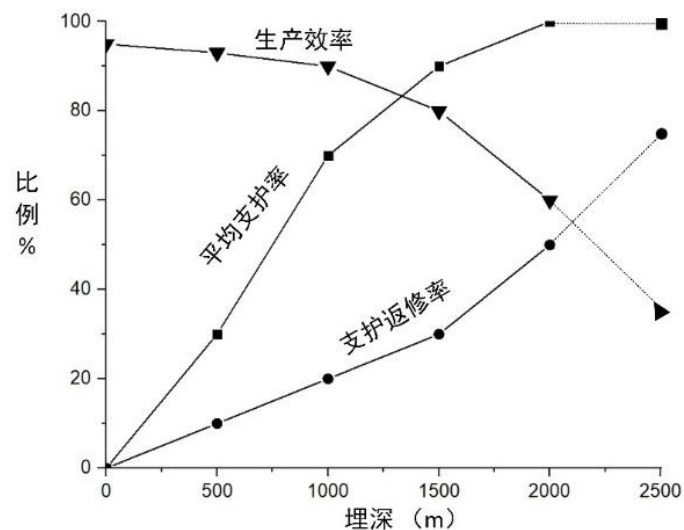
大体积塌方

(某交通隧道, 塌方高度30m, 处置1年多)

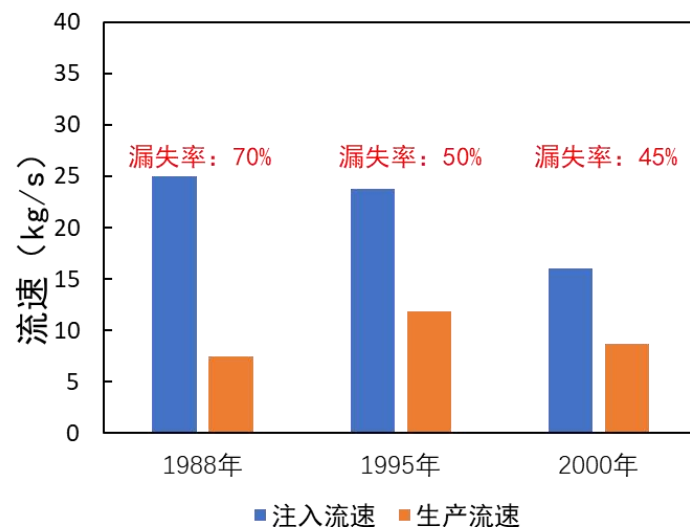
(一) 研究背景及意义

深部工程安全建设与运行面临的挑战：深部工程生产效率降低

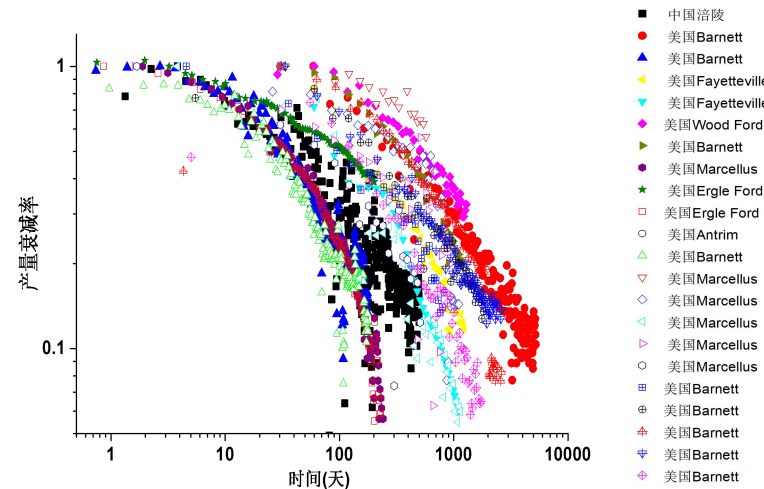
随着深度增加，矿山、地热、油气等开采效率急剧下降



加拿大Sudbury某镍矿进入开采深度2500m，生产效率下降50%



日本Hijiori干热岩项目漏失率居高不下，导致项目终止

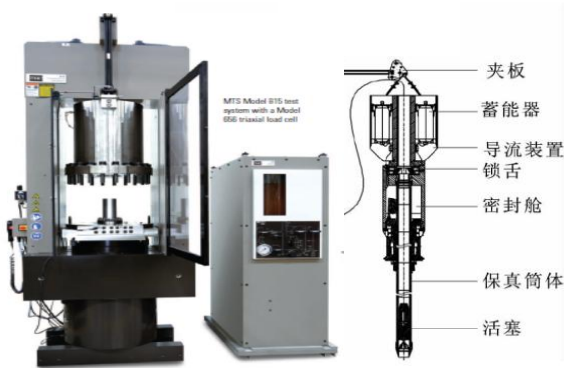


全球主要页岩气区块采气率
3年内降低90%

(一) 研究背景及意义

国内外研究现状

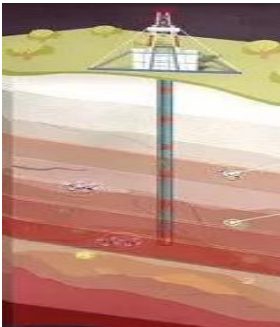
	室内岩石力学试验	室内模型试验	深部钻孔/钻井	深部地下实验室
特征	试样尺寸: cm 级	模型尺寸: 1-2m	在/拟建井深: 3-7km	加拿大 SNOLab: 埋深2km 锦屏CJPL-II: 埋深2.4km
功能	获得力学行为模型	工程开挖, 改变地质体性质	钻孔/孔间地质问题	岩石力学/物理实验
局限	尺寸效应显著	单一地质条件、赋存环境 及工程活动	针对特定的地质条件	



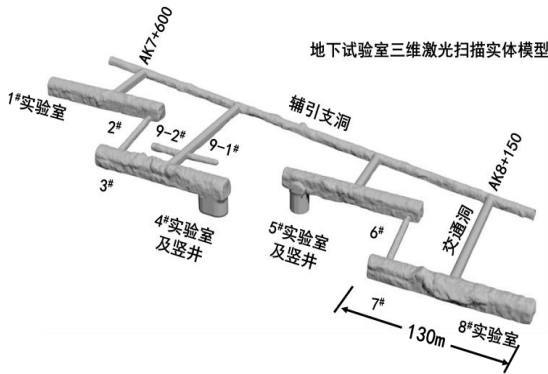
保真取样+室内三轴试验



室内物理模型



松科二井



中国CJPL-II

什么是相似物理模型实验？

物理模型试验是一种基于相似原理，将原型的几何尺寸、力学参数等按照一定的相似比缩放为模型，再依据相似比研制出各种具备原型物理力学特征的相似材料，最后用相似材料制作成物理模型以开展各类复杂问题研究的试验技术。

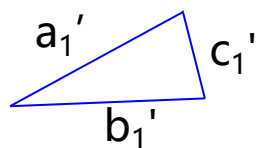
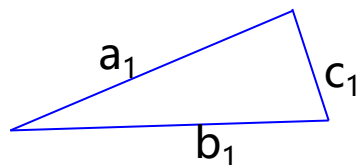
有何种优点？

物理模型是真实物理实体的再现，在基本满足相似原理的条件下，能够比较**形象、直观、真实**地反映地质构造与工程结构的空间关系，能够比较**准确地模拟**岩土施工过程和把握岩土岩土介质的力学变形特征。

(二) 相似物理模拟原理与技术

相似理论

□几何相似

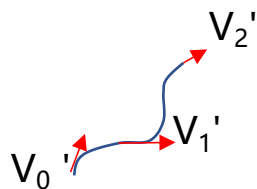
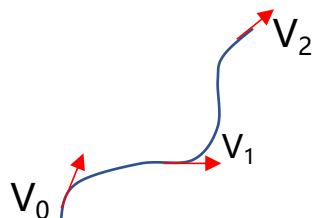


$$\frac{a_1}{a_1'} = \frac{b_1}{b_1'} = \frac{c_1}{c_1'} = C_l$$

相似条件

相似常数

□物理相似

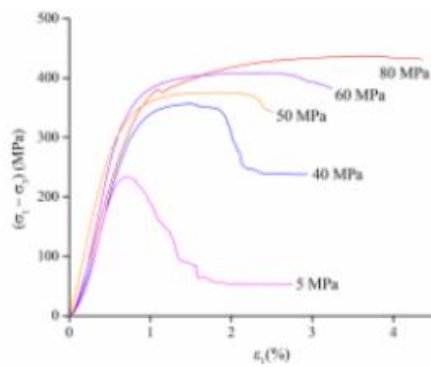


$$\frac{v_0}{v_0'} = \frac{v_1}{v_1'} = \frac{v_2}{v_2'} = C_v$$

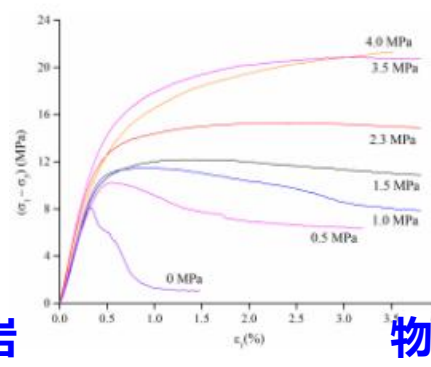
相似条件

相似常数

□运动相似



原岩



物理模型

应力-应变曲线相似

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x^p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}^p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}^p}{\partial z} + f_x^p &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_y^p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}^p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xy}^p}{\partial x} + f_y^p &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_z^p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}^p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}^p}{\partial y} + f_z^p &= 0 \end{aligned} \right\}$$

原型平衡方程

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x^m}{\partial x^m} + \frac{\partial \tau_{yx}^m}{\partial y^m} + \frac{\partial \tau_{zx}^m}{\partial z^m} + f_x^m &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_y^m}{\partial y^m} + \frac{\partial \tau_{zy}^m}{\partial z^m} + \frac{\partial \tau_{xy}^m}{\partial x^m} + f_y^m &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_z^m}{\partial z^m} + \frac{\partial \tau_{xz}^m}{\partial x^m} + \frac{\partial \tau_{yz}^m}{\partial y^m} + f_z^m &= 0 \end{aligned} \right\}$$

模型平衡方程

相似指标

(1) 应力相似常数 C_σ 、容重相似常数 C_γ 和几何相似常数 C_L 之间的相似指标:

$$C_\sigma = C_\gamma C_L$$

(2) 位移相似常数 C_δ 、应变相似常数 C_ε 和几何相似常数 C_L 之间的相似指标:

$$C_\delta = C_\varepsilon C_L$$

(3) 应力相似常数 C_σ 、弹性模量相似常数 C_E 和应变相似常数 C_ε 之间的相似指标:

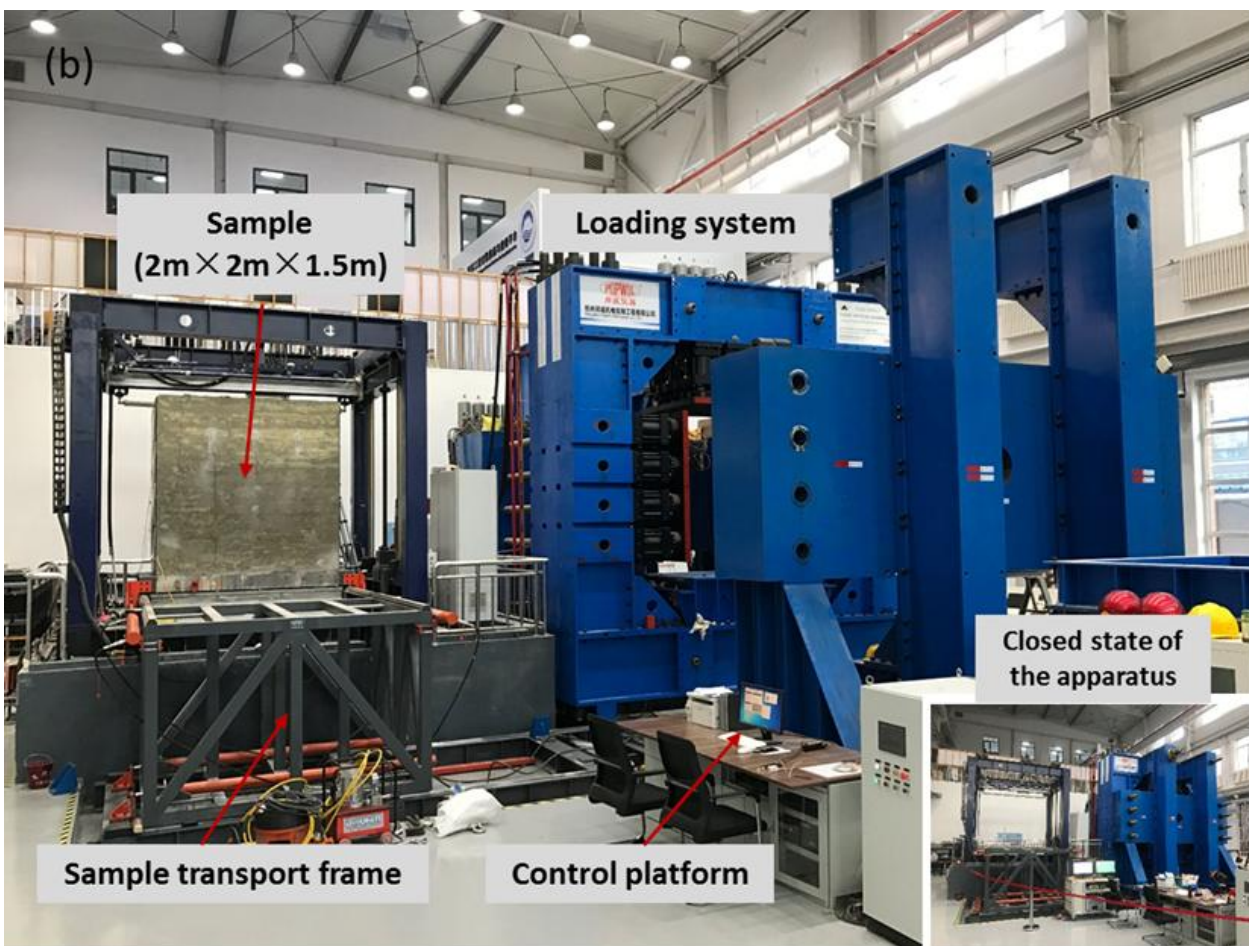
$$C_\sigma = C_\varepsilon C_E$$

(4) 无量纲物理量 (应变、内摩擦角、泊松比、脆性系数) 的相似常数等于1

$$C_\varepsilon = 1, \quad C_\varphi = 1, \quad C_\mu = 1, \quad C_K = 1$$

(三) 大型深部工程物理模型实验系统研发

系统组成



①复杂地质体模型3D打印子系统

②复杂应力边界加载子系统

③开挖过程模拟子系统

④多元信息综合监测子系统

(三) 大型深部工程物理模型实验系统研发

① 复杂地质体模型3D打印子系统

➤ 岩土材料3D打印性能调控技术

3D打印材料
调控技术

力学性能调控
技术

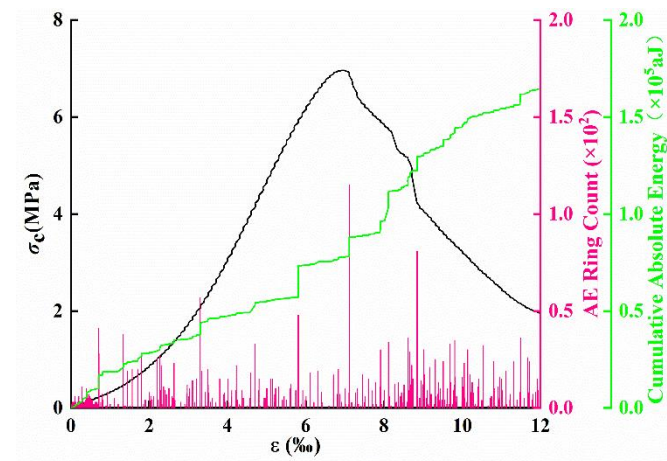
材料配比
打印参数

定制化
物理力学参数

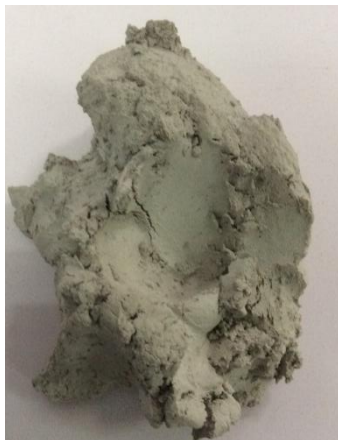
打印性能调控
技术

缓凝剂
保水剂

流动性、挤出
性、自持力



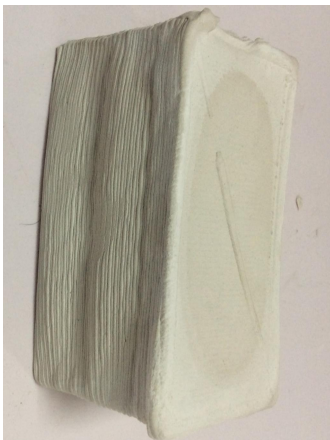
定制化物理力学参数



初凝时间短



泌水



自支持能力差

- 添加缓凝剂
- 降低水灰比
- 添加保水剂



材料持续挤出

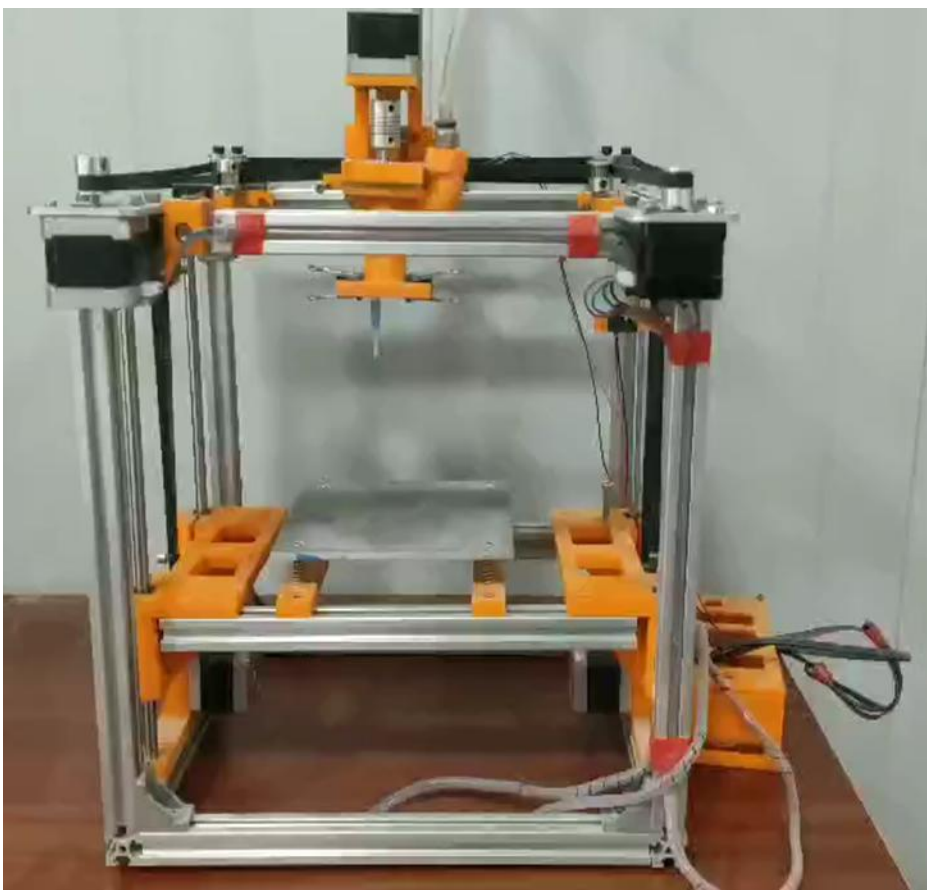


改善后的打印成型效果

(三) 大型深部工程物理模型实验系统研发

① 复杂地质体模型3D打印子系统

➤ 研发桌面级岩土材料3D打印机



螺旋挤出式



电机驱动式

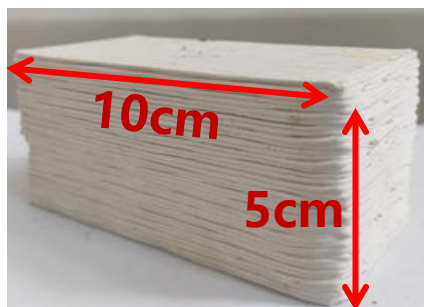


空气压力挤出式



空气压力-螺旋驱动式

自主设计了不同出料原理的打印喷头



石膏



黏土



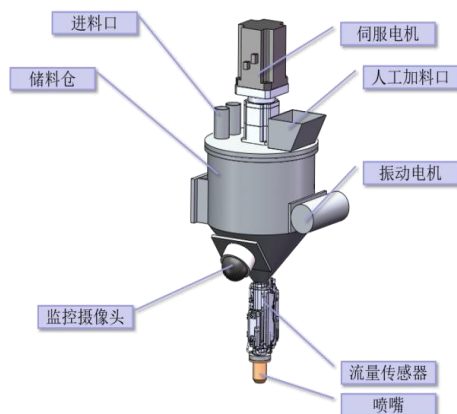
模拟月壤



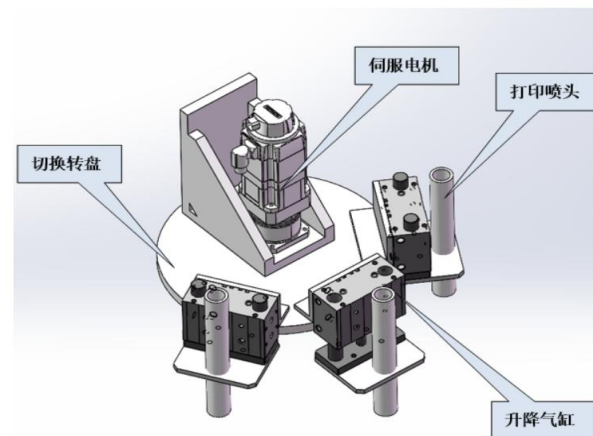
(三) 大型深部工程物理模型实验系统研发

① 复杂地质体模型3D打印子系统

➤ 研发大型复杂地质体模型3D打印装置 ($2\text{m} \times 2\text{m} \times 1.5\text{m}$)



自储料式打印喷头

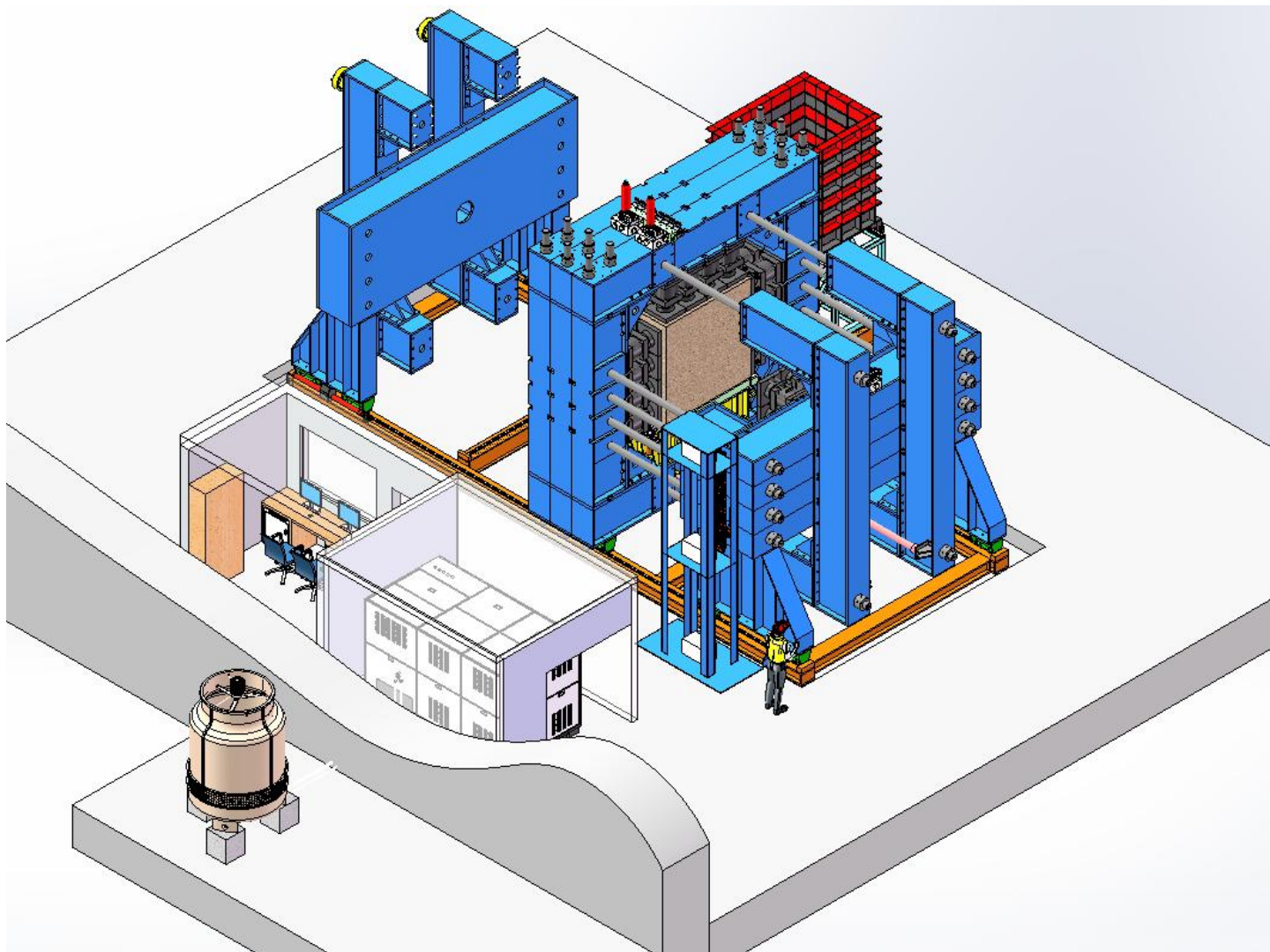


自旋交替打印喷头

设备参数与性能:

- 喷头精度: 1 - 20mm
- 密实滚筒调控模型密度
- 多喷头、变精度实现非均质、非连续地质模型打印

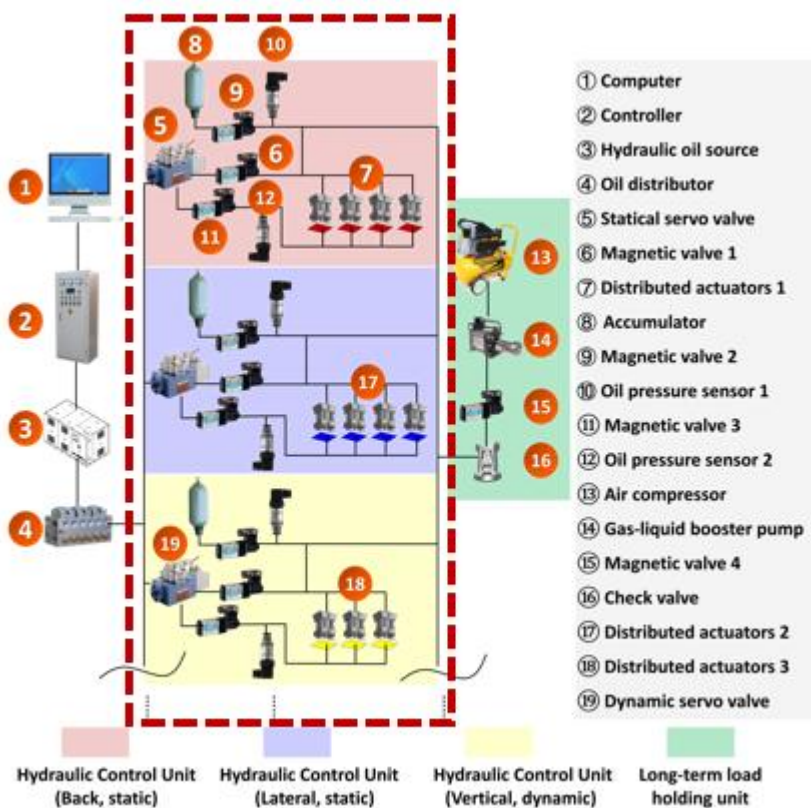
② 复杂应力边界加载子系统



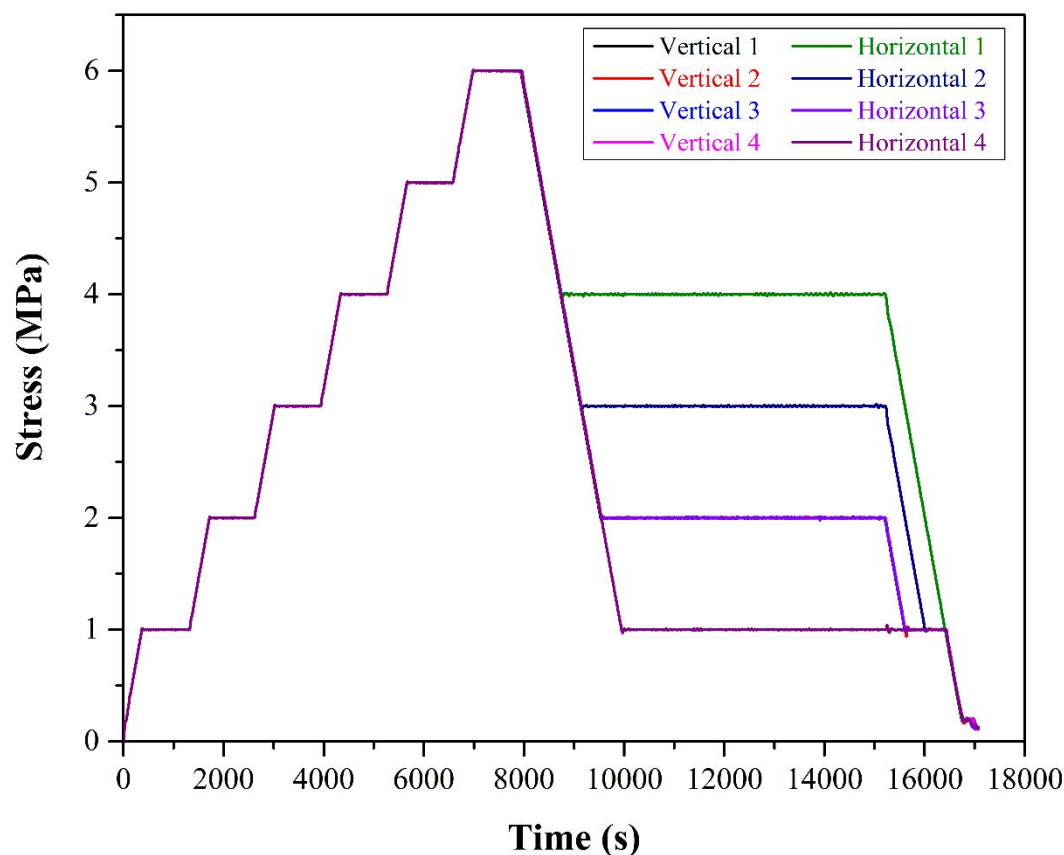
- ◆ 试样尺寸 **2m×2m×1.5m**，最大模拟洞室尺寸 **φ0.4m**
- ◆ 加载能力：水平(前后)24000kN，水平(左右) 18000kN，竖向 18000kN（折算应力**6MPa**）
- ◆ **12个**独立的控制通道，顶部4个，侧面4个，后面4个
- ◆ 保载能力：保载时长≥**12个月**，保载精度≤设定值的1%
- ◆ 动载能力：最大动载幅值 **1.5MPa**，最高频率**10Hz**

② 复杂应力边界加载子系统

➤ 关键技术与创新性功能：高精度均匀加载与梯度加载



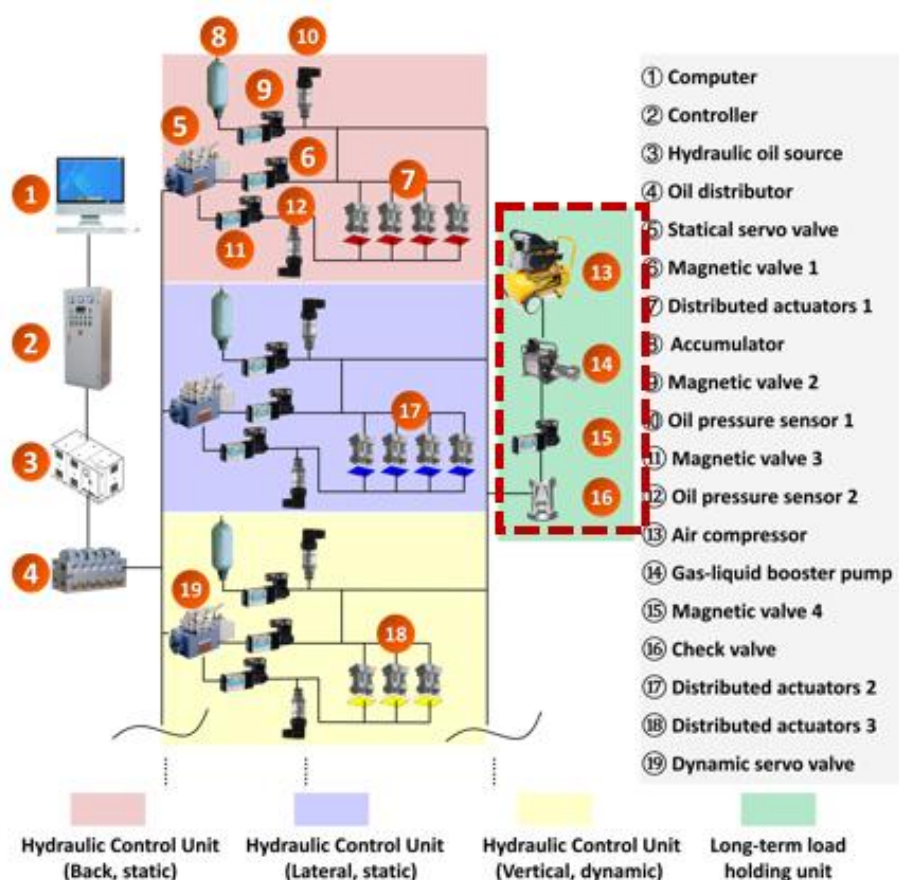
实现方法



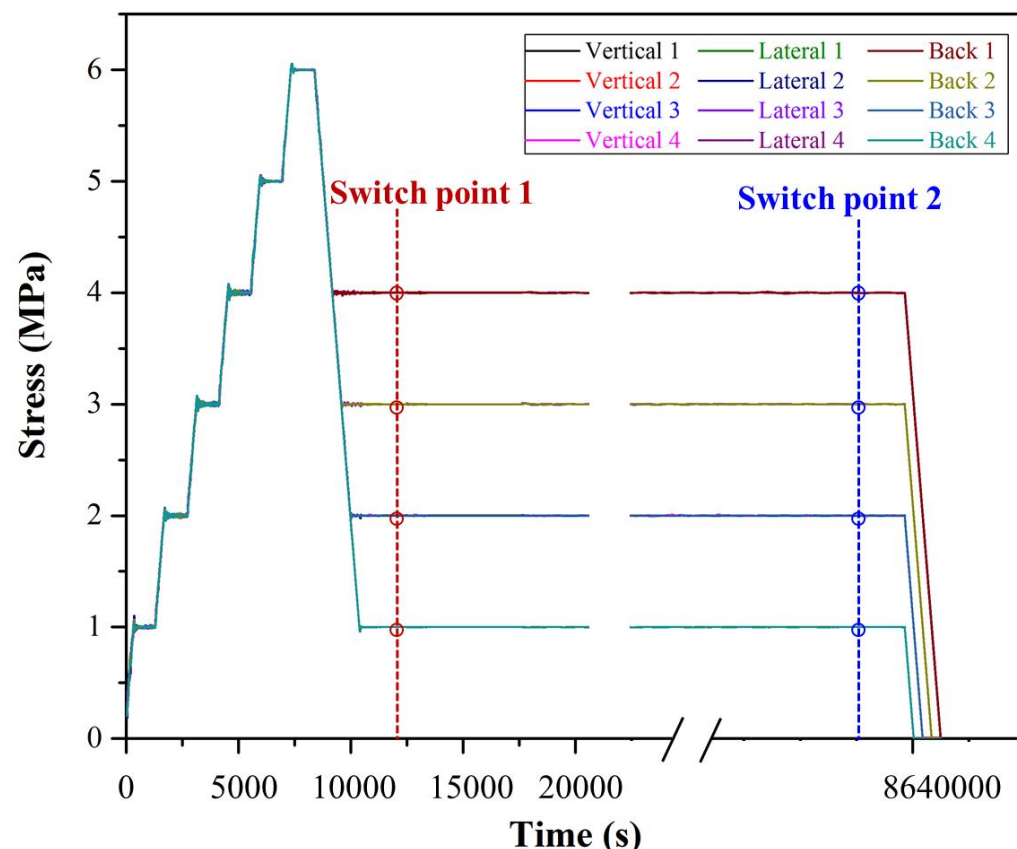
实验验证

② 复杂应力边界加载子系统

➤ 关键技术与创新性功能：多通道不同应力水平长时协同保载



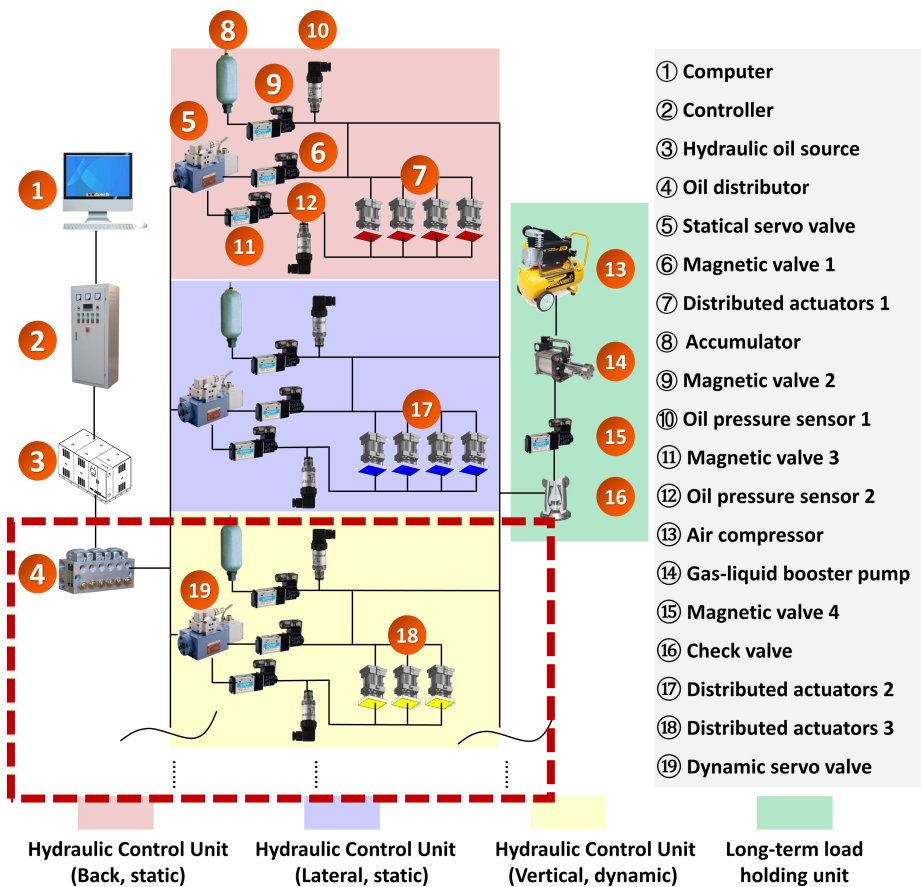
实现方法



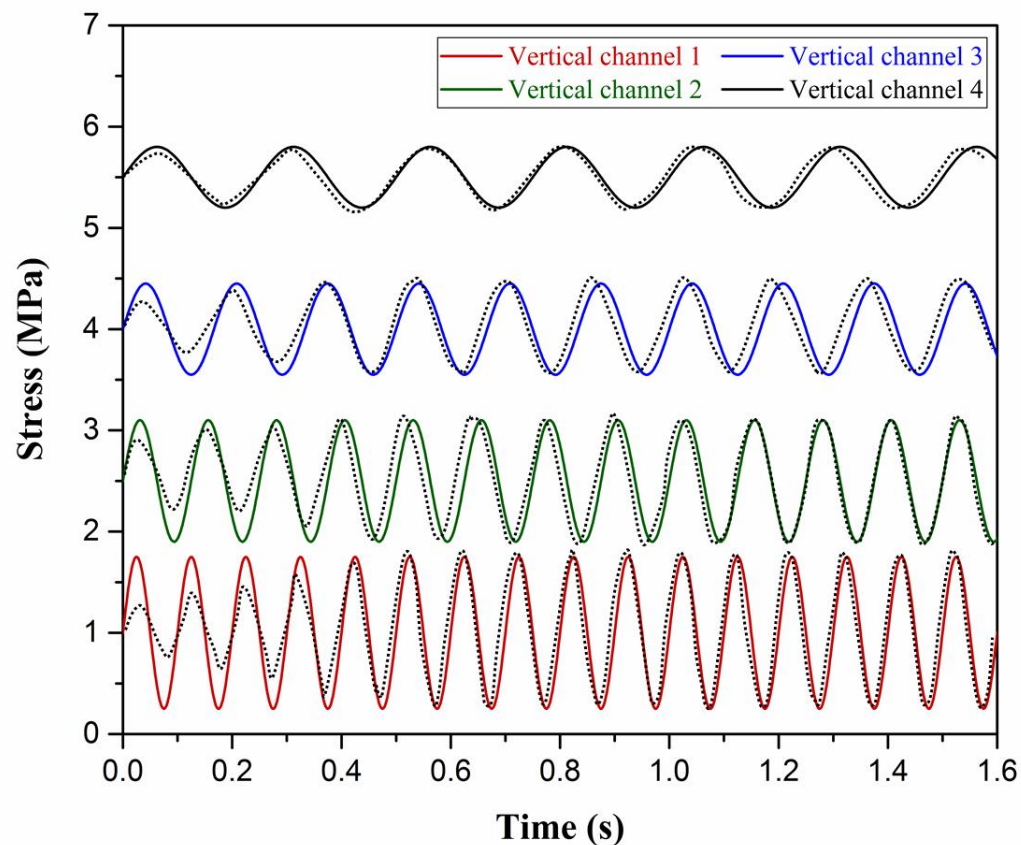
实验验证

② 复杂应力边界加载子系统

➤ 关键技术与创新性功能：竖向多点动力扰动



实现方法



实验验证

(三) 大型深部工程物理模型实验系统研发

③ 开挖过程模拟子系统



(三) 大型深部工程物理模型实验系统研发

④ 多元信息综合监测子系统



分布式传感光纤



声发射



内窥镜



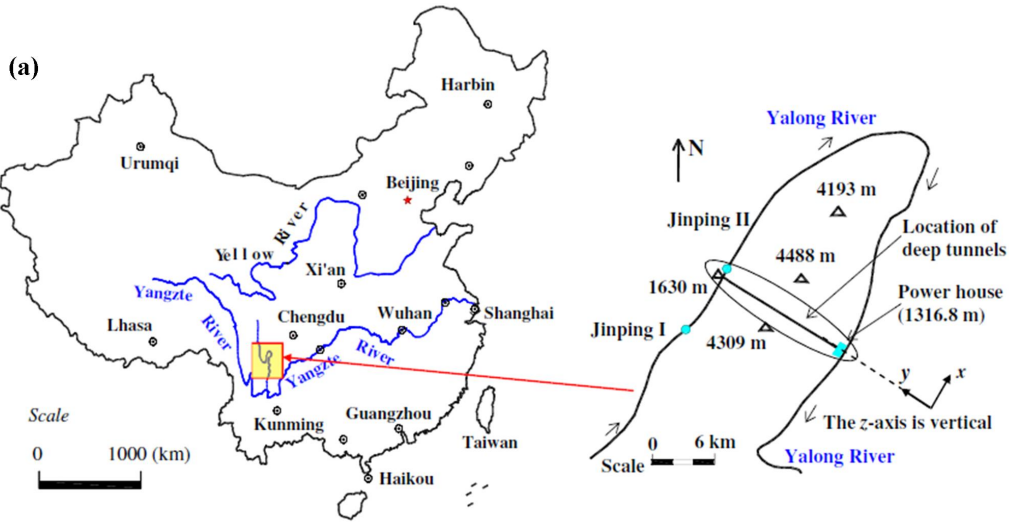
动态FBG

(四) 典型应用案例分析

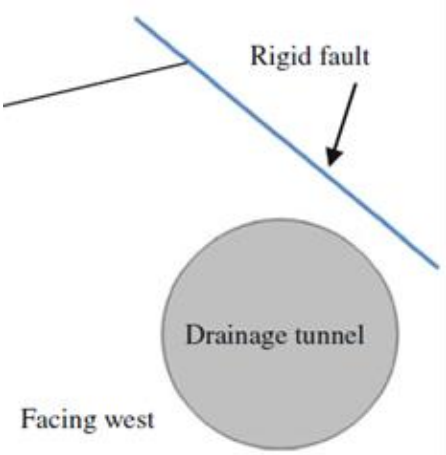
- **案例1：** 锦屏二级水电站排水洞岩爆灾害孕育过程模拟
- **案例2：** 沈阳采空区沉陷灾害孕育过程模拟

(四) 典型应用案例分析1：隧道岩爆

➤ 工程背景



锦屏二级水电站



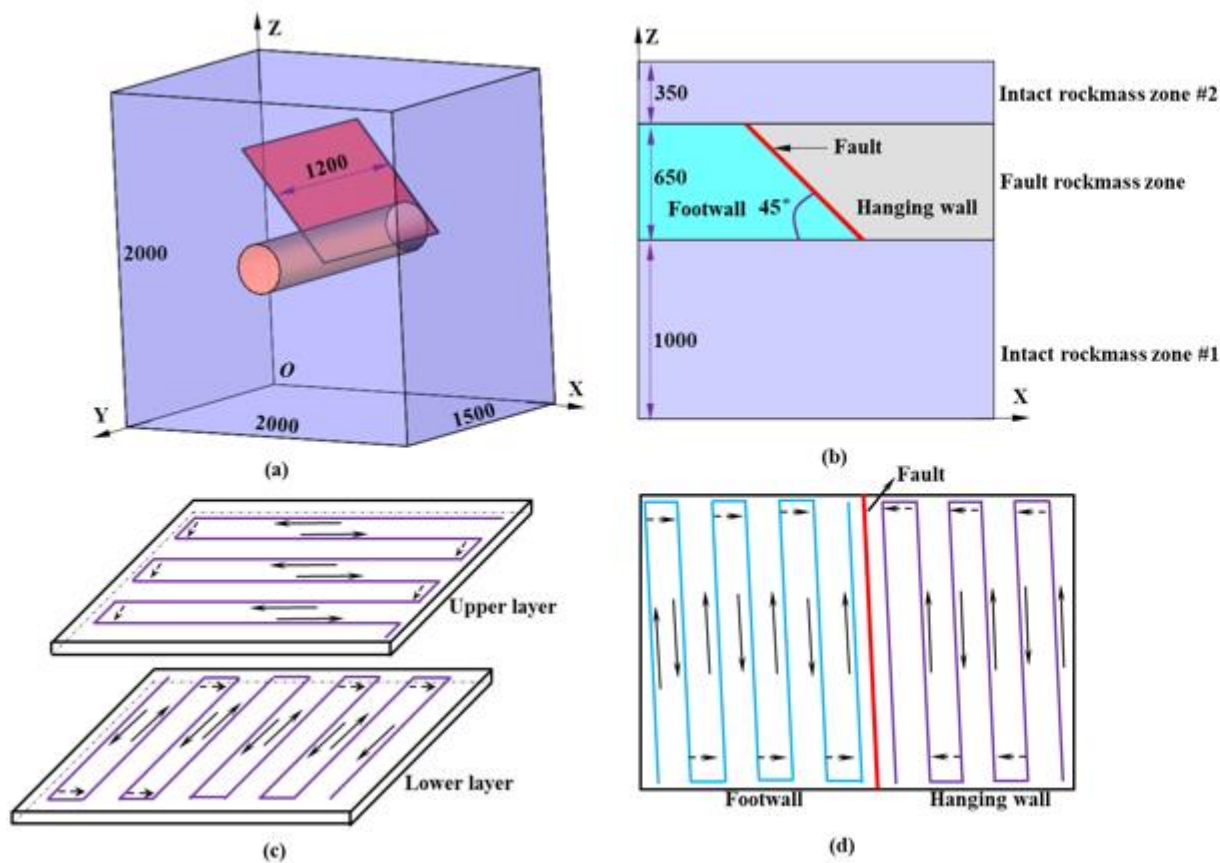
锦屏11.28岩爆

项目	参数
几何相似比	1: 24
应力相似比	1: 50
加载方案	61.48/50=1.23 MPa (竖向) ; 51.68/50=1.03 MPa (水平左右) ; 46.42/50=0.93 MPa (水平前后)
开挖方案	每天开挖15cm, 共计开挖135cm, 留下200cm未开挖, 模拟掌子面效应
监测方案	声发射, 分布式光纤, 视频观测系统

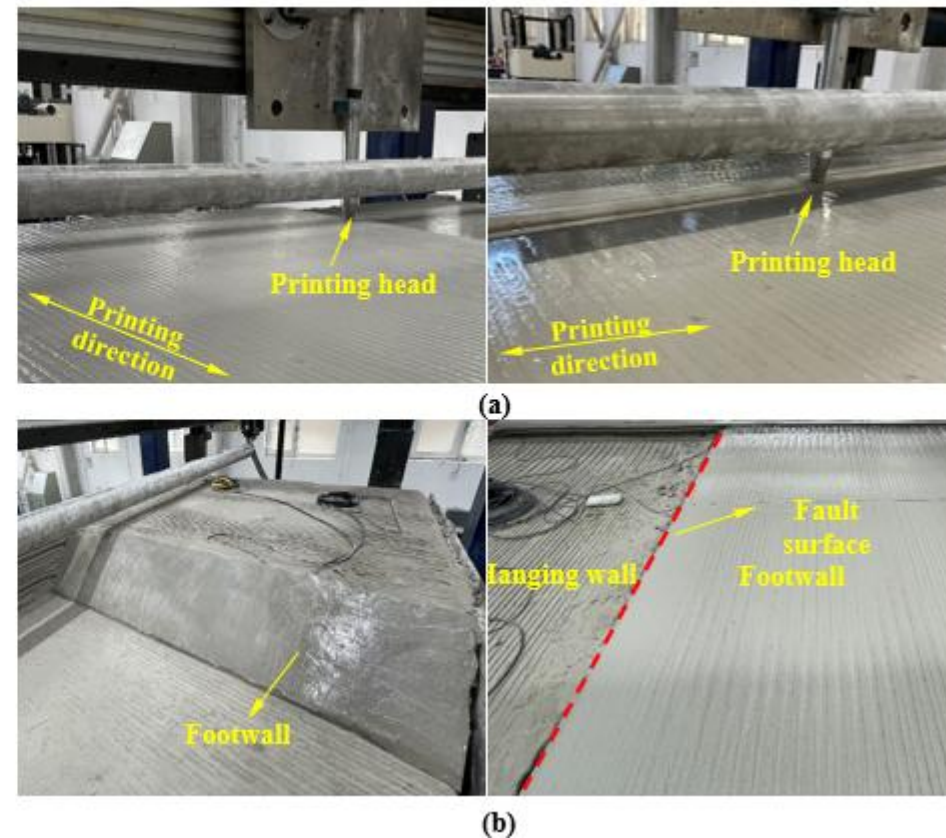


(四) 典型应用案例分析1：隧道岩爆

➤ 物理模型试样制备 (3D打印)



打印路径规划



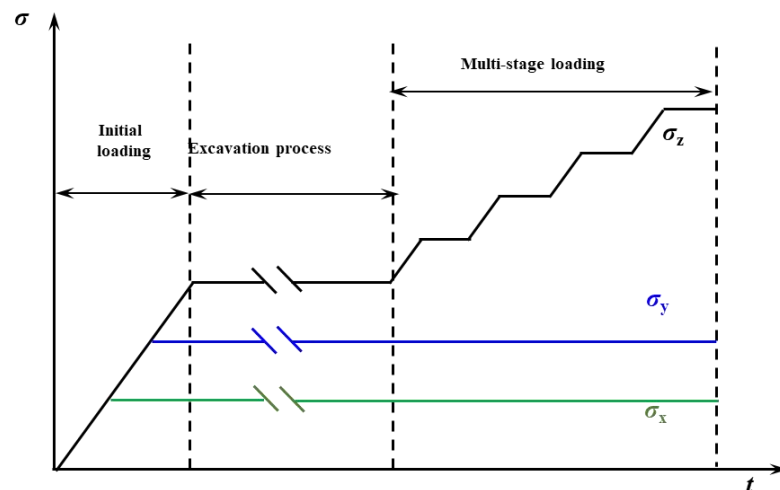
打印过程

(四) 典型应用案例分析1：隧道岩爆

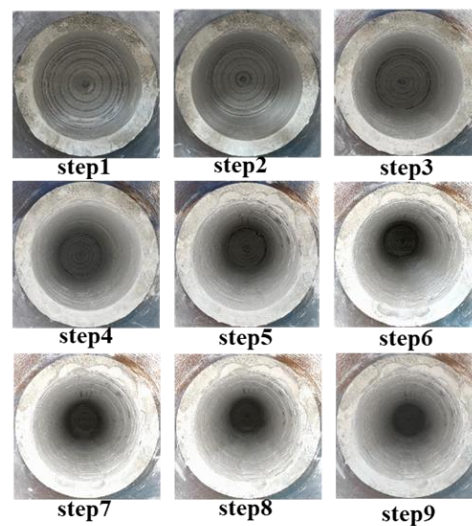
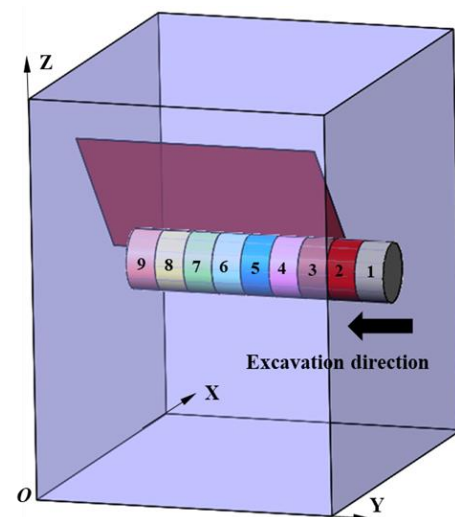
➤ 试样转运、加载与开挖



转运



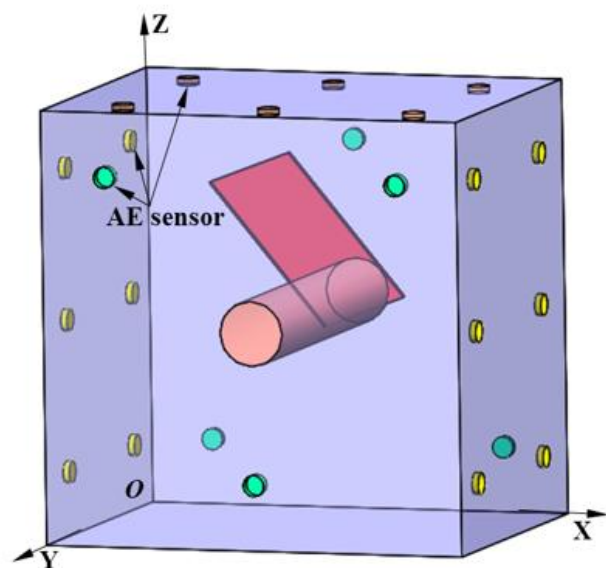
加载



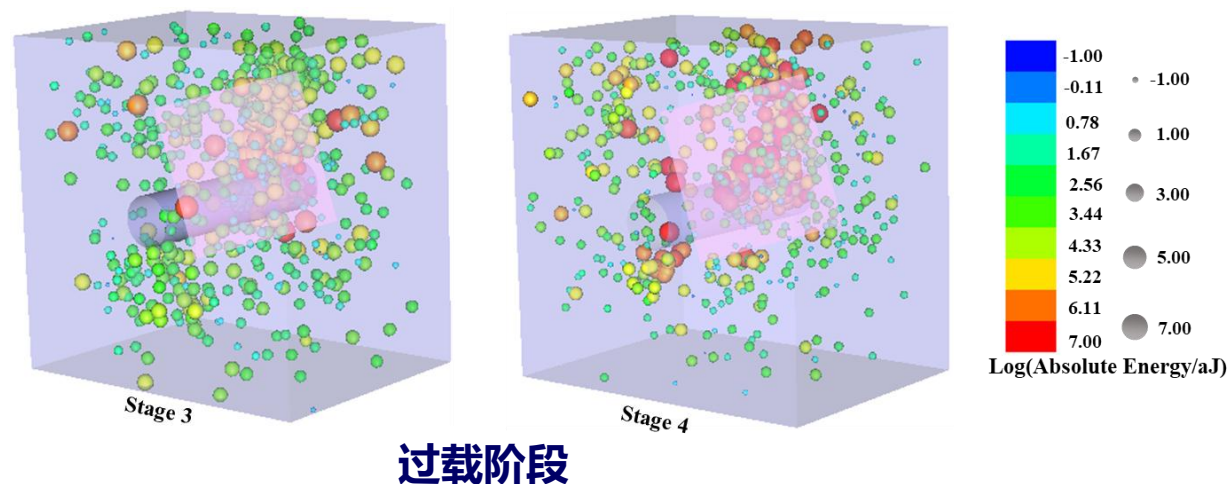
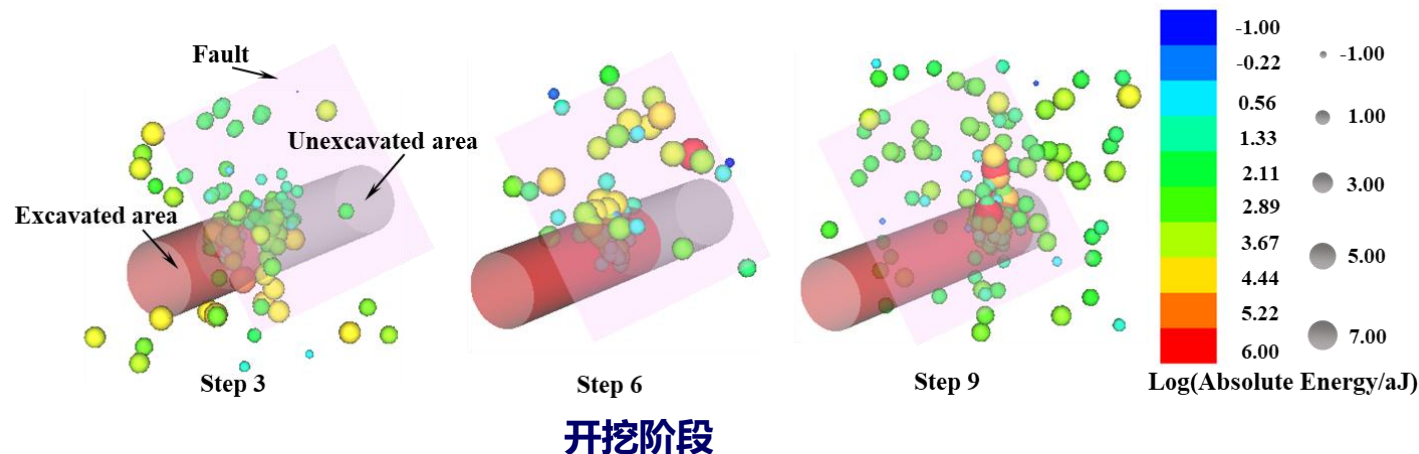
开挖

(四) 典型应用案例分析1：隧道岩爆

实验结果与讨论



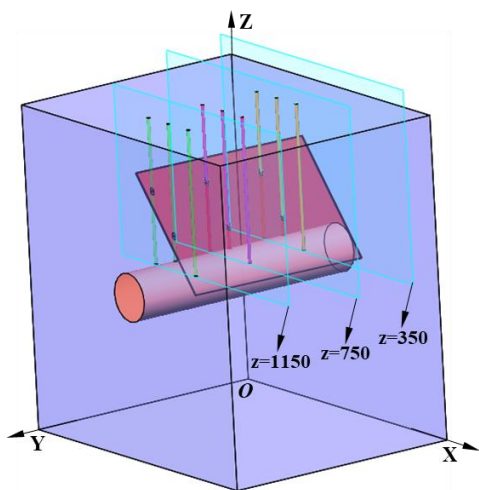
声发射监测方案



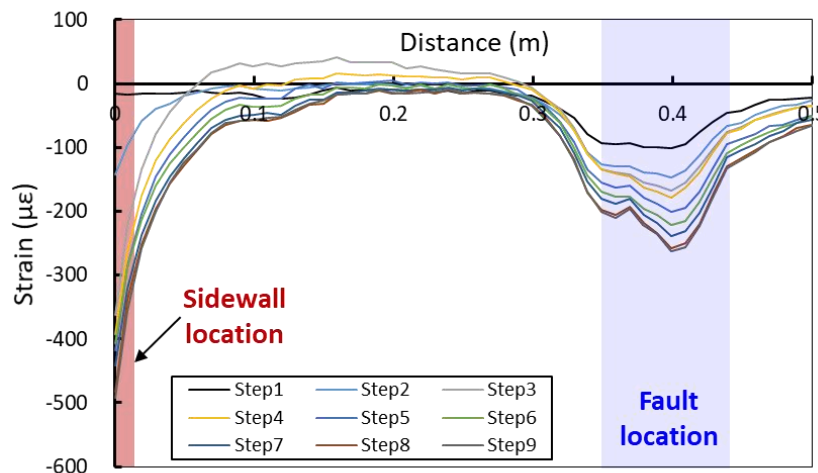
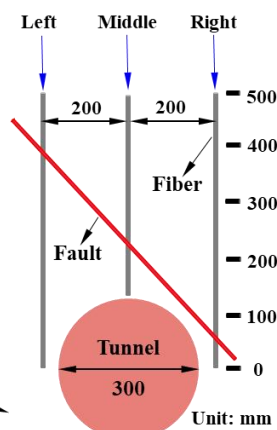
- 开挖过程，声发射信号主要分布在断裂附近，并在掌子面处聚集成核
- 过载阶段，声发射信号主要集中在断裂下盘，并在隧洞上方聚集成核

(四) 典型应用案例分析1：隧道岩爆

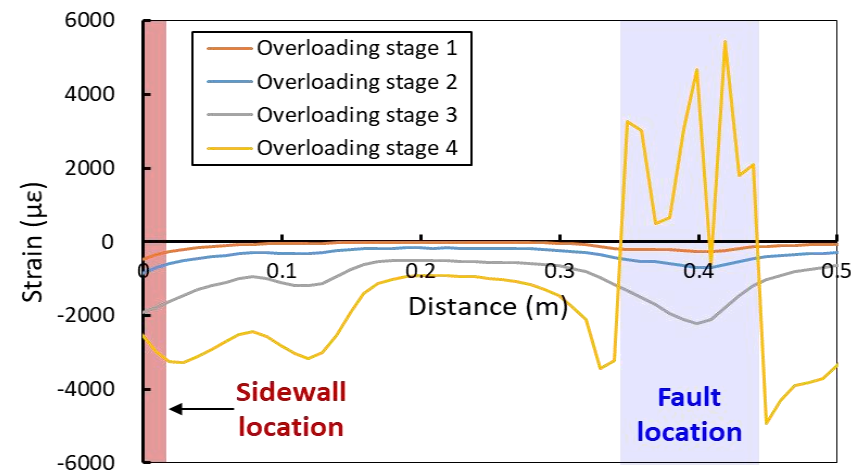
实验结果与讨论



光纤分布



开挖阶段

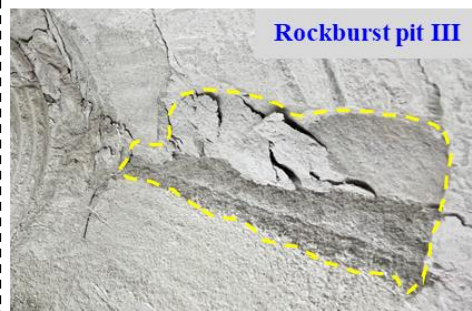
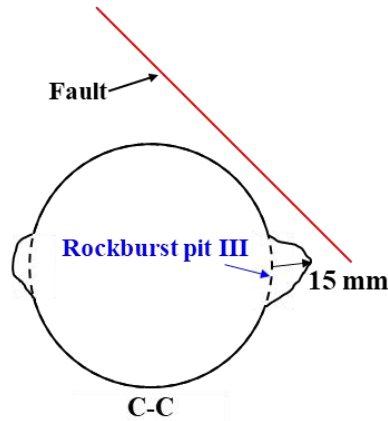
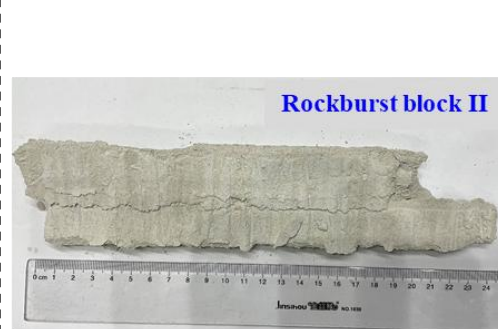
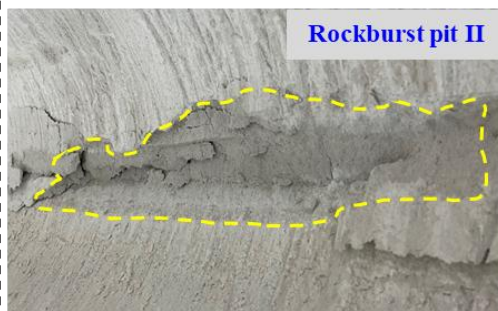
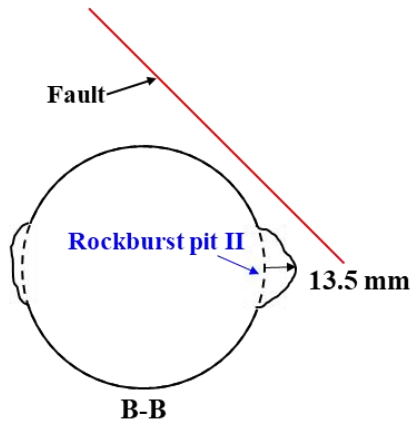
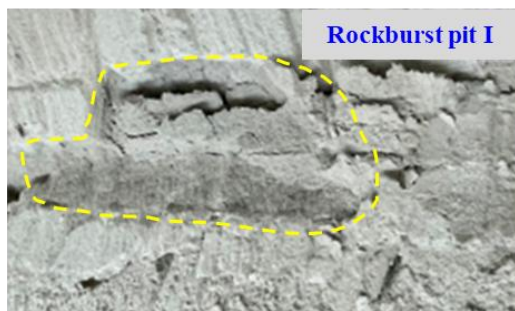
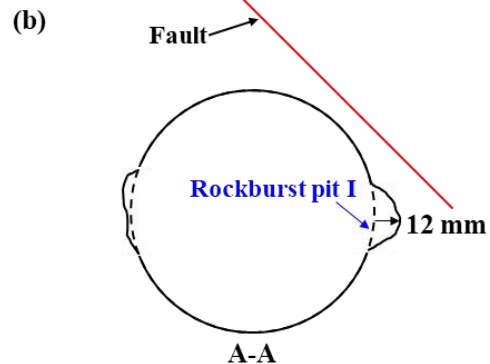


过载阶段

- 开挖过程，围岩整体受压，断裂位置压应变集中尤为明显
- 过载阶段，断裂滑移，光纤由负突变为正，表明光纤由受压突变为受拉

(四) 典型应用案例分析1：隧道岩爆

实验结果与讨论

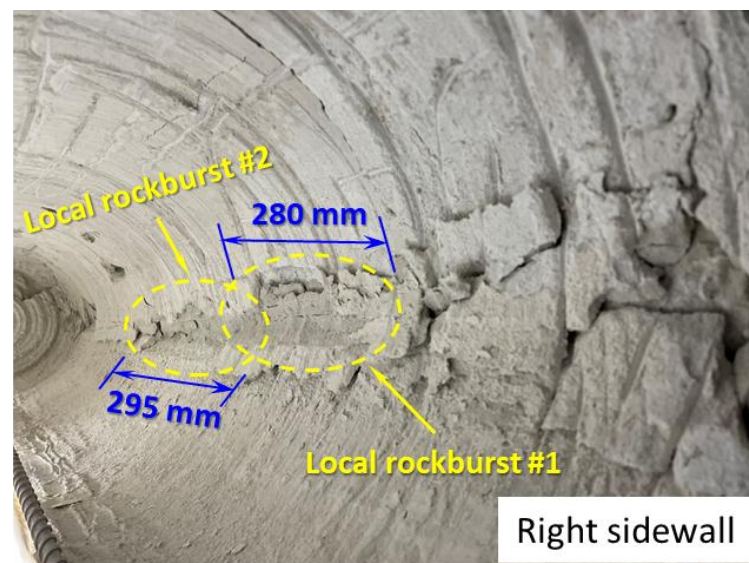
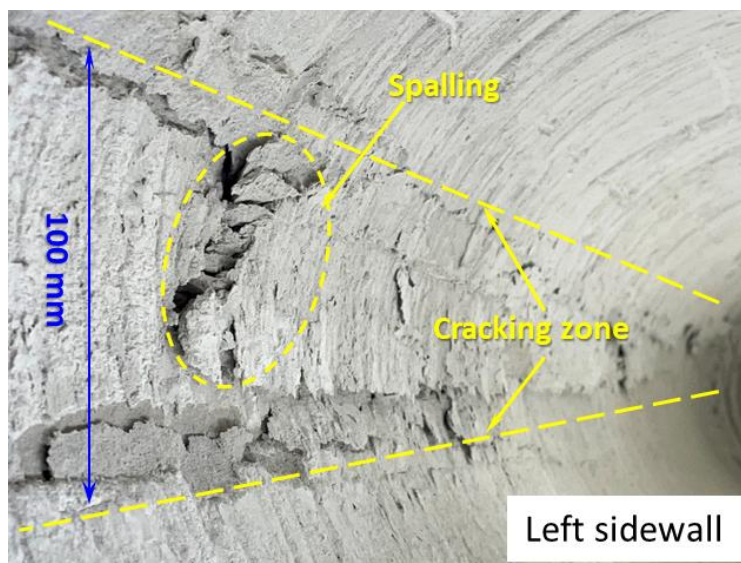


- 沿洞轴线方向先后发生3次强烈岩爆，表现出明显的“**间歇性**”
- **断裂滑移**诱发的岩爆烈度明显更强，爆坑深度更大，爆块破碎程度更大

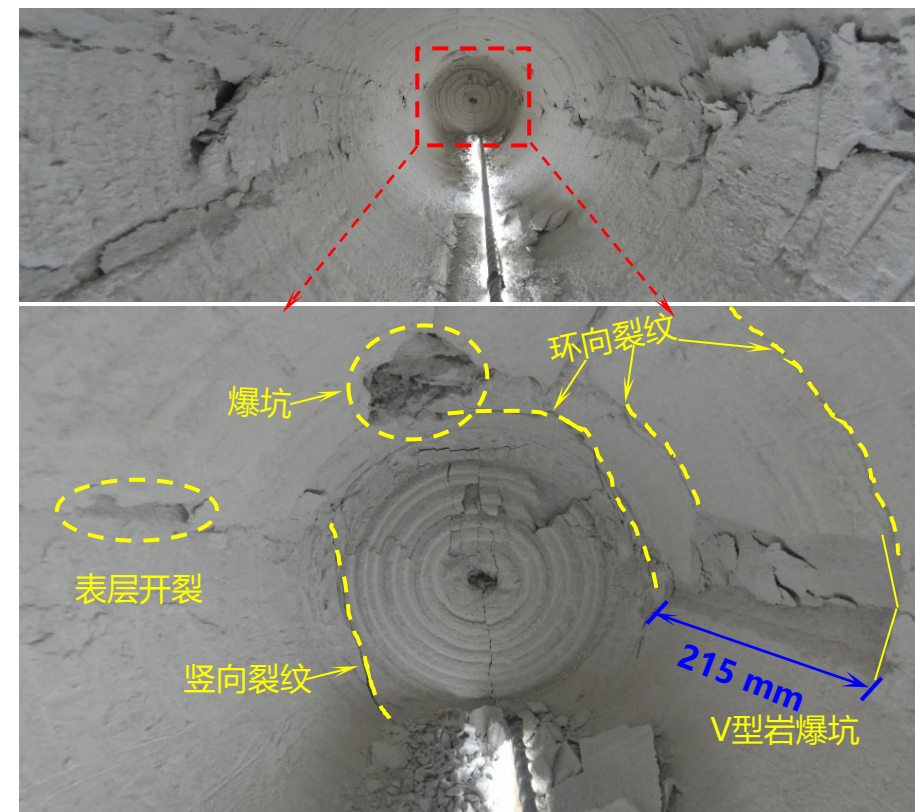
(四) 典型应用案例分析1：隧道岩爆

实验结果与讨论

两侧边墙围岩破坏形态



掌子面附近围岩破坏形态

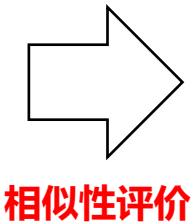
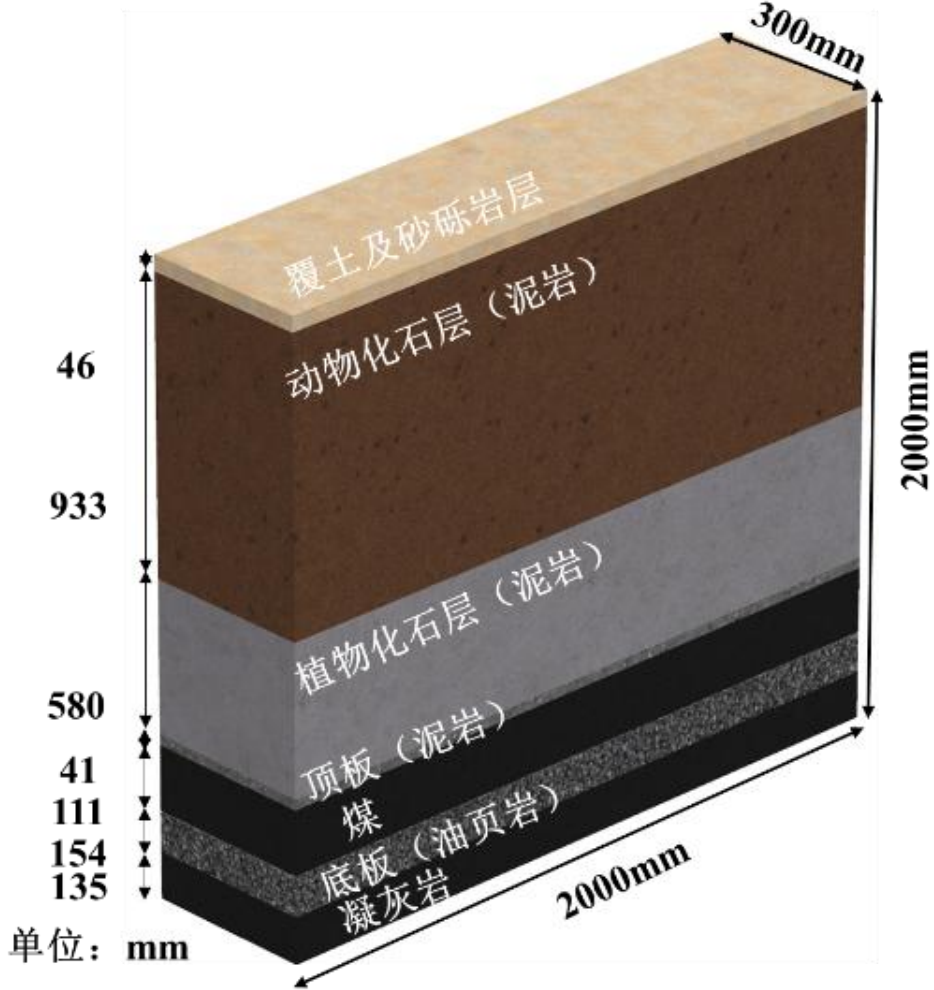


□ 左侧边墙以开裂、片帮破坏为主，破坏区域更大

□ 断裂影响下，右侧边墙破坏区域更集中，且破坏程度更剧烈

(四) 典型应用案例分析2：采空区沉陷

物理模型岩土层设计方案



$$C_L = 150$$

$$\frac{C_\sigma}{C_L \cdot C_\lambda} = 1$$
 相似常数计算

编号	岩土层	原岩			相似材料			C _γ	C _σ	配比方案
		厚度 m	密度 g/cm ³	抗压强度 MPa	厚度 mm	密度 g/cm ³	抗压强度 MPa			
1	覆土及砂砾岩层	6.9			46					
2	动物化石层 (泥岩)	140	1.98	7.84	933	1.89	0.06	1.05	130.67	A-2
3	植物化石层 (砂岩)	87	1.98	11.1	580	1.88	0.08	1.05	138.75	M-4
4	顶板 (泥岩)	6.1	2.05	17.8	41	1.82	0.13	1.13	136.92	M-1
5	煤	16.67	1.35	8	111	1.45	0.06	0.93	139.5	A-1
6	底板 (油页岩)	23.06	1.9	15	154	1.82	0.13	1.04	115.38	M-2
7	凝灰岩	20.27	2.32	19	135	1.89	0.14	1.23	135.71	M-8

物理模型岩土层相似材料配比方案

确定了物理模型各岩土层尺寸与相似材料配比方案，基于相似原理完成相似性评价

(四) 典型应用案例分析2：采空区沉陷

物理模型制作过程



(a) 称量与搅拌



(b) 支模



(c) 浇筑与振捣



(d) 成型



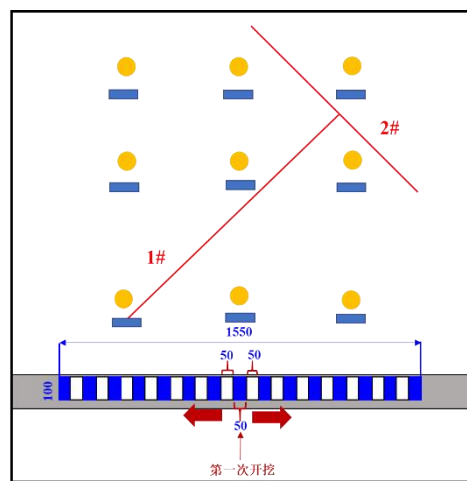
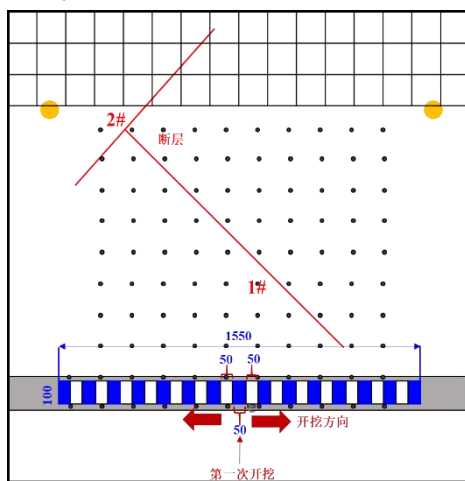
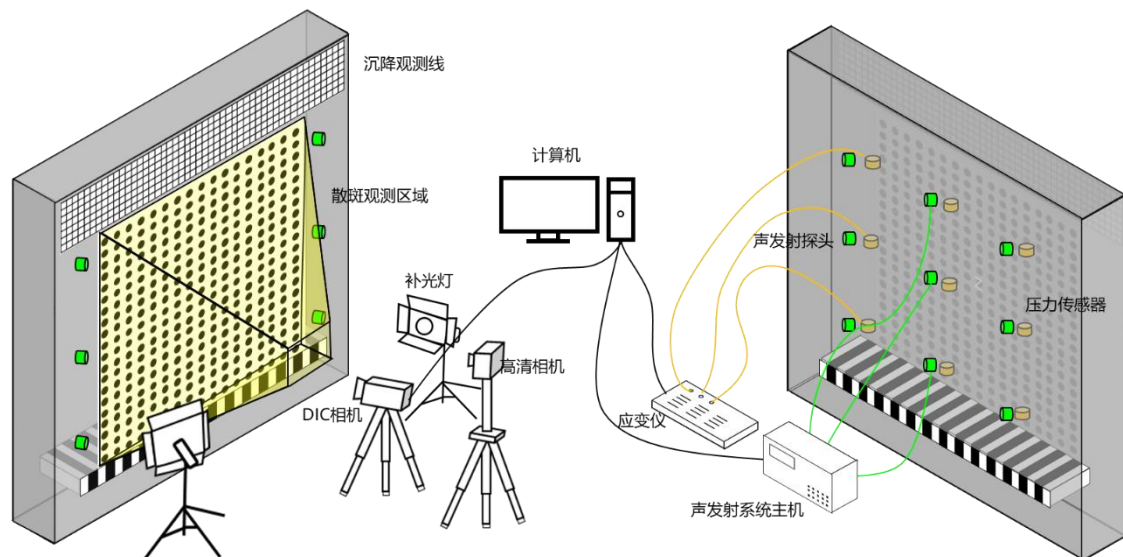
(e) 脱模与养护



(f) 传感器布设

(四) 典型应用案例分析2：采空区沉陷

采空区地质体模型试验多元监测方案

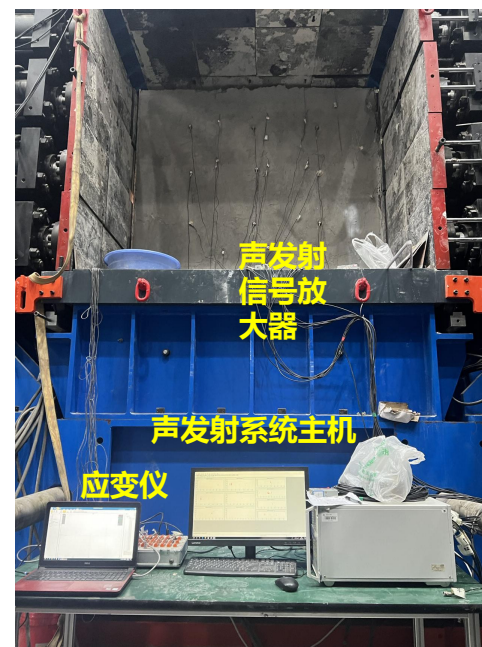


• 散斑
— 压力传感器
● 声发射传感器
— 断层
单位: mm

多元监测系统布置方案示意图



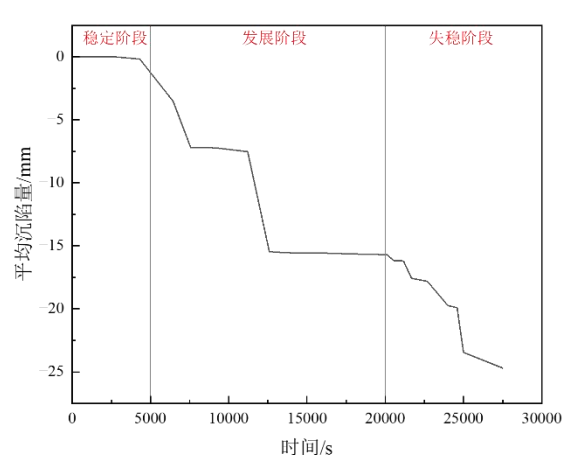
模型表面全场应变监测



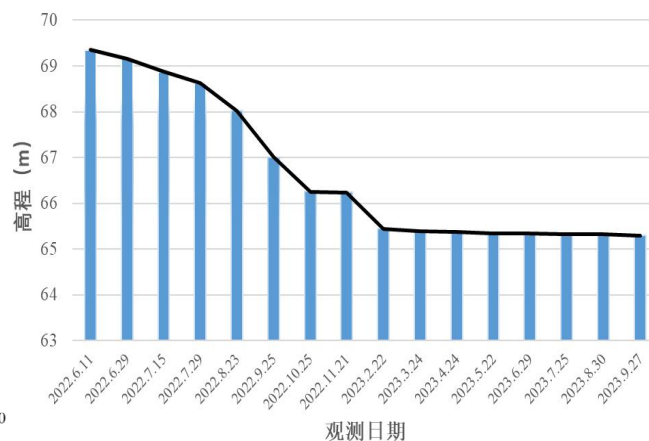
内部破坏与应变监测

(四) 典型应用案例分析2：采空区沉陷

采煤沉陷相似物理模型试验相似性评价



不同时刻的上覆岩土层表面平均沉陷量



沉陷观测点高程监测数据

$$C_{\text{沉陷量}} = C_{\text{现场}} / C_{\text{试验}} = -4.06\text{m} / -24.7021\text{mm} = 164.3585$$

$$C = C_L / C_{\text{沉陷量}} = 150 / 164.3585 = 0.9126 \approx 1$$

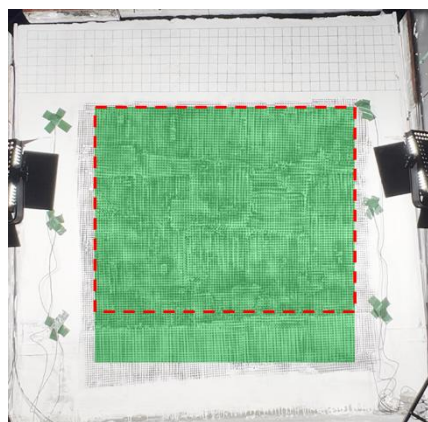


采煤沉陷物理模型试验最终破坏过程

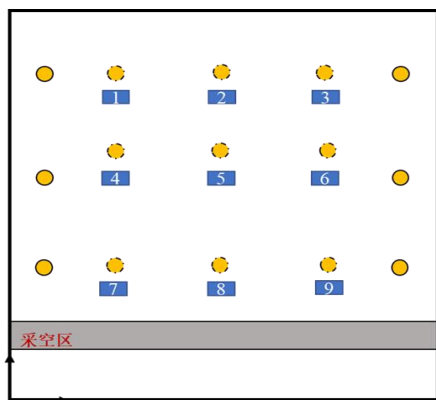
采煤沉陷相似物理模型试验结果显示模型试验与现场沉陷过程均呈现相同的采空区沉降特征，最终沉陷量的相似常数为0.926，表明两者高度一致，验证了相似物理模型试验的有效性与可靠性

(四) 典型应用案例分析2：采空区沉陷

□ 试验结果与分析

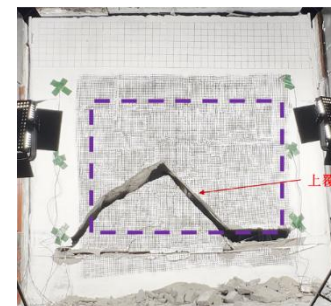
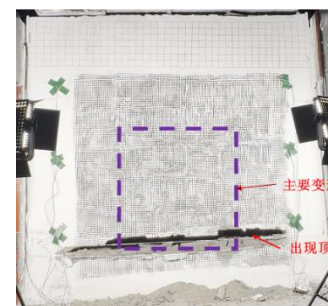
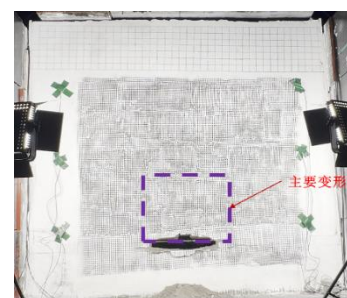


DIC监测范围

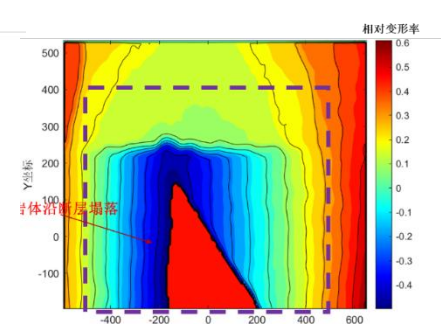
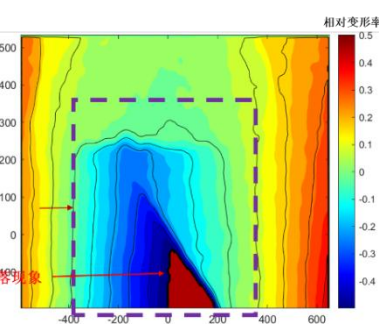
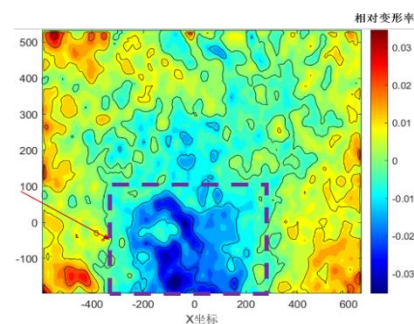
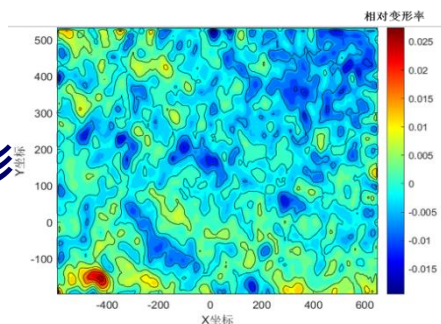


传感器埋设位置

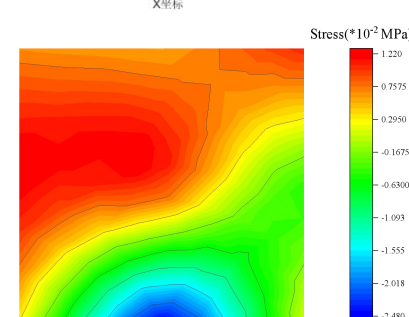
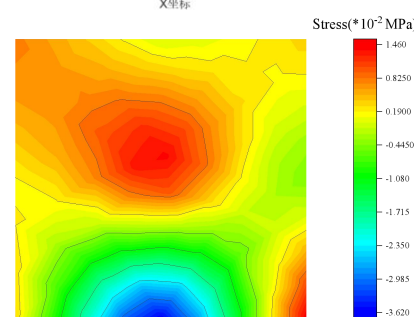
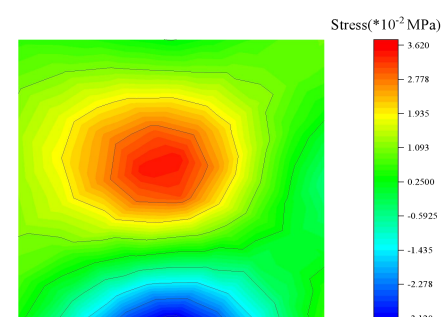
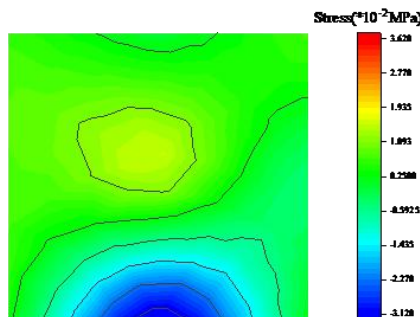
开挖过程



表面变形



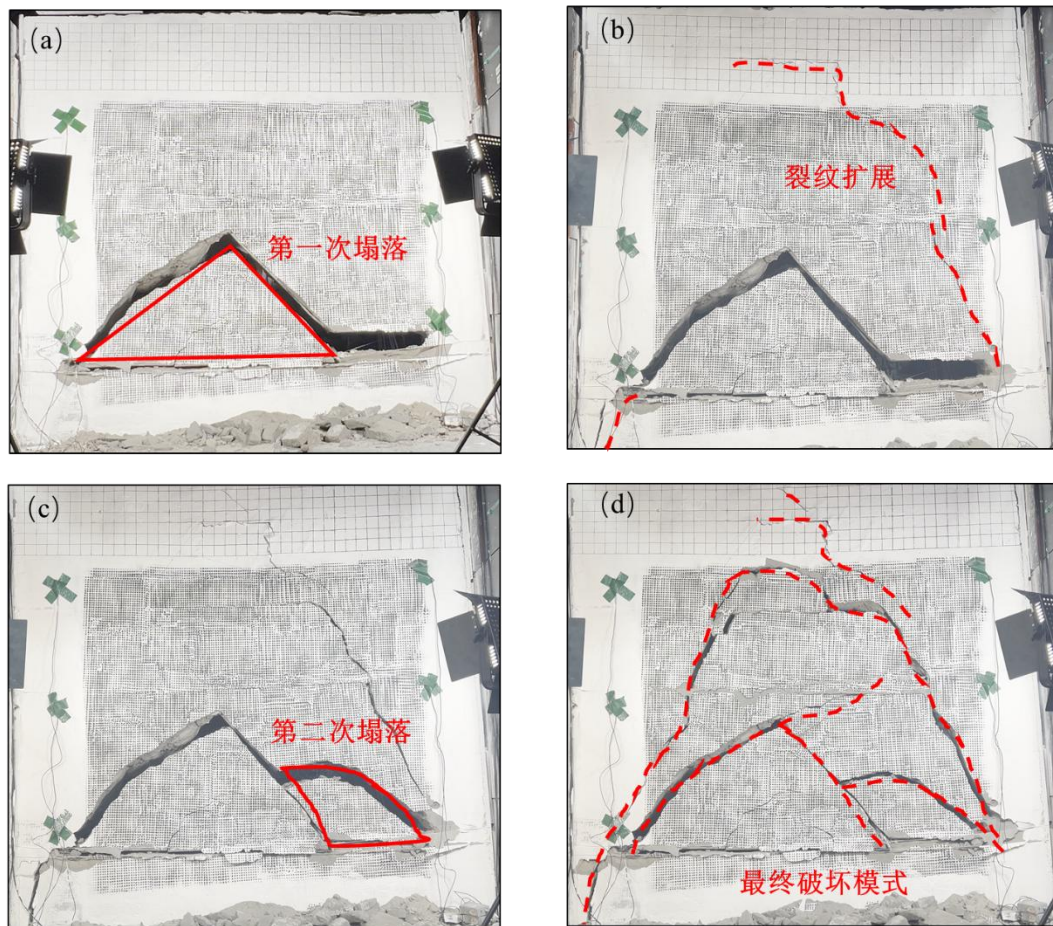
应力分布



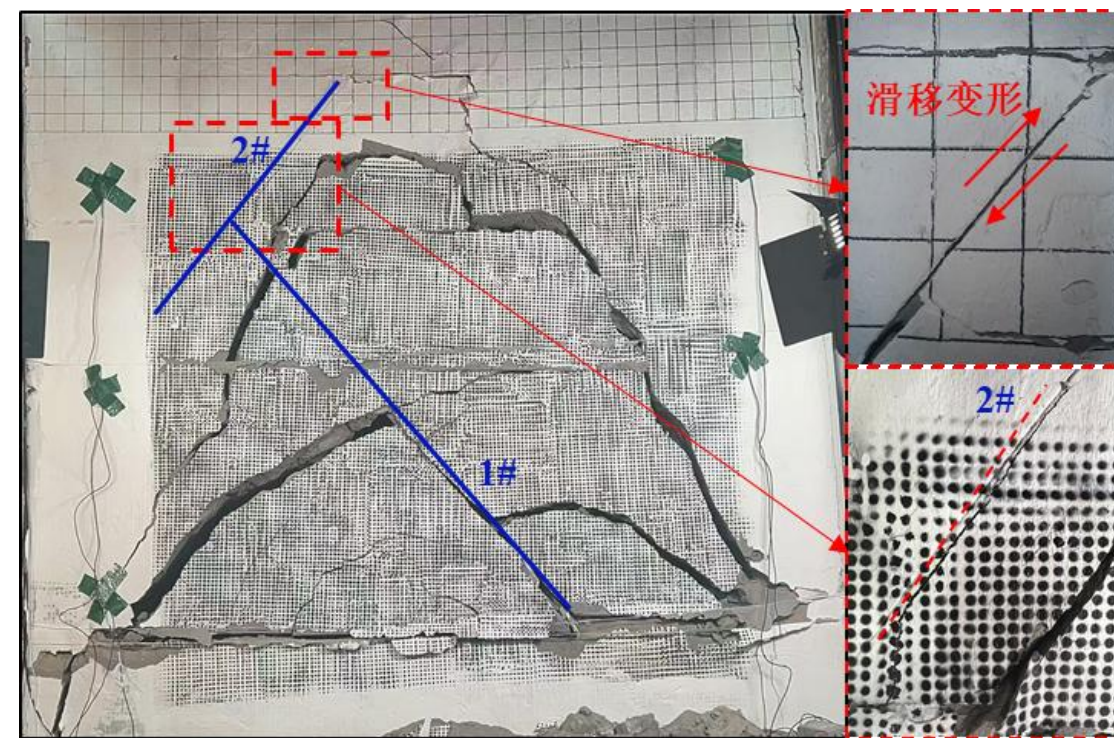
采空区上覆岩体在长期开挖过程中累积的应力与变形集中于断层位置，特别是在开挖后期，断层及其周边区域的沉降逐渐增大，导致采空沉陷现象发生并最终塌落

(四) 典型应用案例分析2：采空区沉陷

□ 断层对采煤沉陷特征的影响



采煤沉陷试验最终破坏图



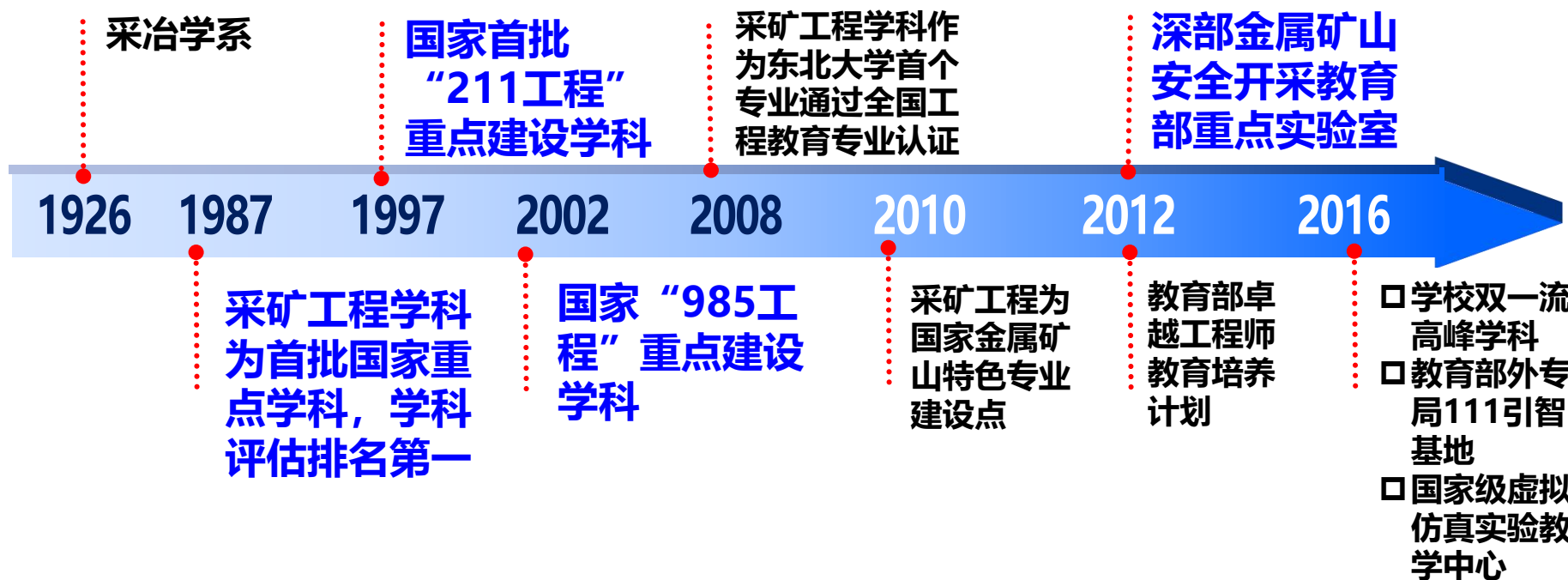
2#断层对采空沉陷的控制作用

断层的弱面性质使得应力集中区容易发生破坏；裂隙逐渐沿着岩层与破坏面方向扩展，采空模型整体最终发生失稳破坏

- 相似物理模型试验是**工程灾害孕育机理**研究的重要手段
- 研发了大型深部工程物理模型实验系统，可实现**复杂地质体模型的3D打印、复杂边界应力施加、开挖过程模拟与多元信息综合监测**
- 物理模型试验可有效揭示工程灾害的孕育机理，支撑灾害的**预测预警与防控技术**的发展



深部金属矿智能开采与装备全国重点实验室
State Key Laboratory of Intelligent Deep Metal Mining and Equipment



2024

深部金属矿智能开发与工程装备全国重点实验室

实验室已形成**采矿工程、工程力学、土木工程、地质工程、人工智能**等多学科交叉融合与创新的发展理念

团队简介



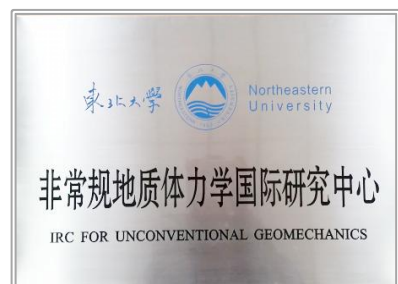
主席(2018-2022)



主席(2011-2015)

国际岩石力学学会岩石工程设计方法委员会
International Society for Rock Mechanics
Commission on Design Methodology

主席(2007-2023)



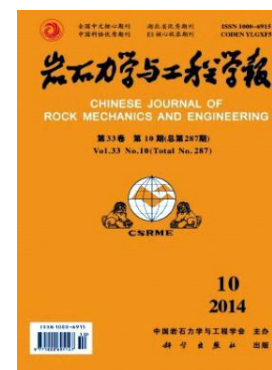
理事长(2012-2024)



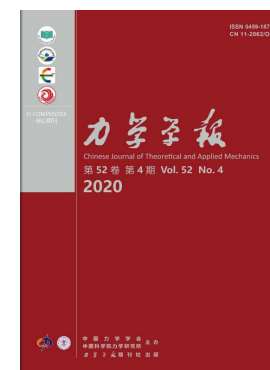
理事长(2018-)



主编

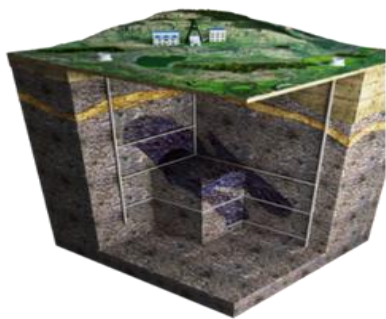


主编

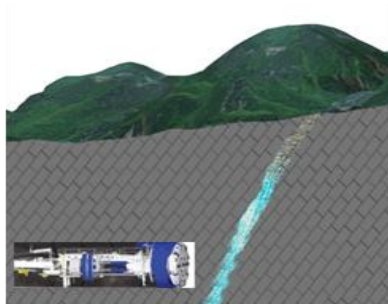


副主编

实验室面向**采矿、交通、水电、非常规油气开发、地热开发、油气地下储存**等方向开展岩石力学工程与安全前沿研究



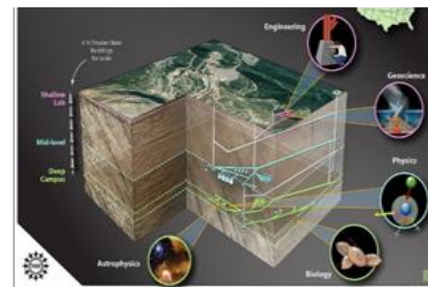
深部采矿
(800-4000m)



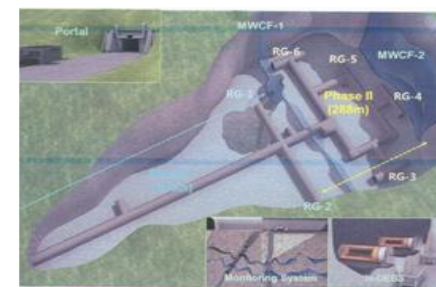
交通隧道
(200-3000m)



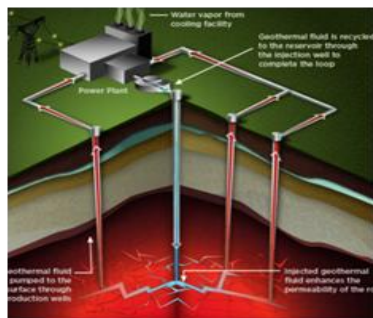
水电隧洞、地下厂房
(500-3000m)



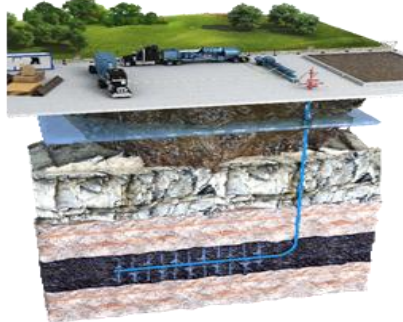
地下实验室
(100-2400m)



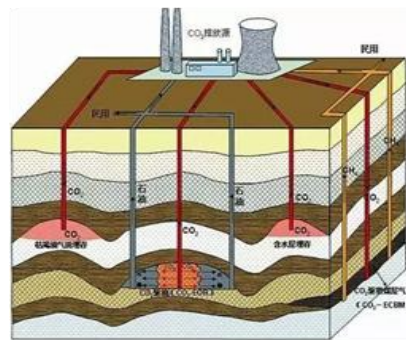
核废料地质处置
(400-1000m)



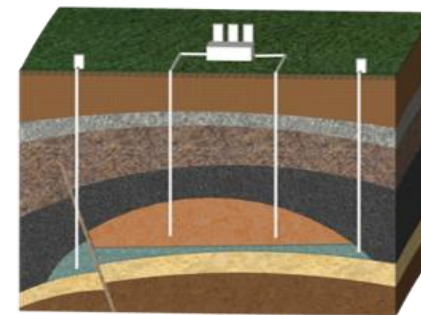
深地热开发
(3300-10000m)



深层油气开发
(1600-5600m)



CO₂地质处置
(1000-3000m)



深层油气储存
(3000-8000m)



城市地下空间
(100-200m)

实验室形成了以东北大学校长、中国工程院院士冯夏庭教授为带头人的人才队伍，团队成员专业背景包括**采矿工程、岩石力学、工程地质、油气开发、机械工程、计算机、人工智能等**



冯夏庭 Prof. Xia-Ting Feng 重点实验室主任
刘造保 Prof. Zao-Bao Liu 重点实验室副主任
王者超 Prof. Zhe-Chao Wang 重点实验室副主任
徐帅 A.P. Shuai Xu 重点实验室副主任
李元辉 Prof. Yuan-Hui Li 重点实验室副主任
张凤鹏 Prof. Feng-Peng Zhang 重点实验室副主任
杨成祥 Prof. Cheng-Xiang Yang 重点实验室党支部书记
蔡明 Prof. Ming Cai 特聘教授



邵建富 Prof. Jian-Fu Shao 特聘教授
潘哲君 Prof. Zhe-Jun Pan 特聘教授
沈挽青 Prof. Wan-Qing Shen
王延庆 Prof. Yan-Qing Wang
金长宇 Prof. Chang-Yu Jin
张希巍 Prof. Xi-Wei Zhang
刘建坡 A.P. Jian-Po Liu
何本国 A.P. Ben-Guo He



徐煜航 A.P. Yu-Hang Xu
李正伟 A.P. Zheng-Wei Li
郑贵平 Gui-Ping Zheng
王运森 Dr. Yun-Sen Wang
陈天宇 Dr. Tian-Yu Chen
安龙 Dr. Long An
徐世达 Dr. Shi-Da Xu
周扬一 Dr. Yang-Yi Zhou
姜海强 Dr. Hai-Qiang Jiang



彭建宇 Dr. Jian-Yu Peng
段永婷 Dr. Yong-Ting Duan
田军 SN ENGR Jun Tian
姚志宾 Zhi-Bin Yao
王强 Qiang Wang
高继开 Ji-kai Gao
王新悦 Xin-Yue Wang
刘洋洋 Yang-Yang Liu
王月婷 Yue-Ting Wang

人才梯队:

中国工程院院士1人;

国家万人计划 领军人才2人;

国家创新人才计划2人;

国务院学科评议组成员2人;

教育部特聘教授2人;

国家杰出青年基金获得者2人;

国家优秀青年基金获得者2人;

青年长江学者1人;

教育部新世纪优秀人才7人

自主研发工程岩石力学系列装置

深部赋存环境（硬岩→软岩、干燥→水压、常温→高温、静力→动力）



高压真三轴硬岩
实验装置



岩石细观变形
实验装置



硬岩时效破裂真三轴
实验装置



高压硬岩扰动真三轴
实验装置



超高刚度硬岩三轴试
验装置



相似材料真三轴
实验装置



复杂地质模型3D打印
实验装置



大型三维物理模型
实验装置

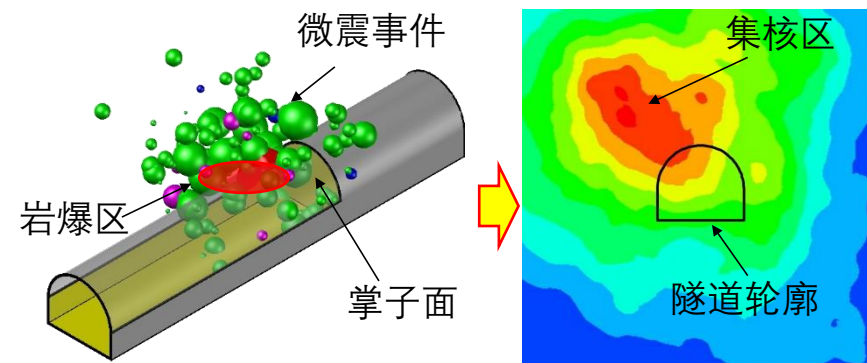
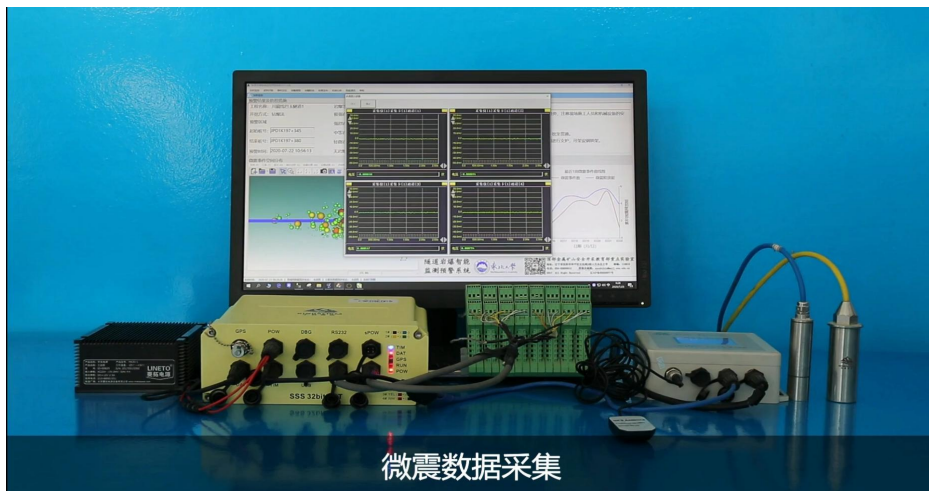


微波致裂效果综合
实验装置

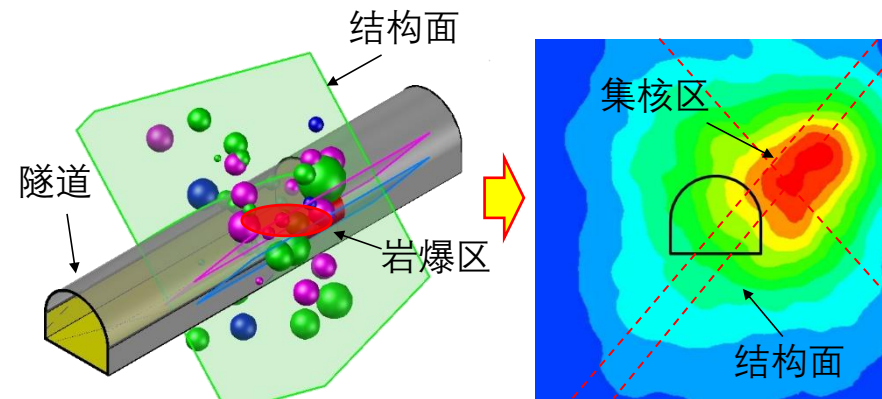
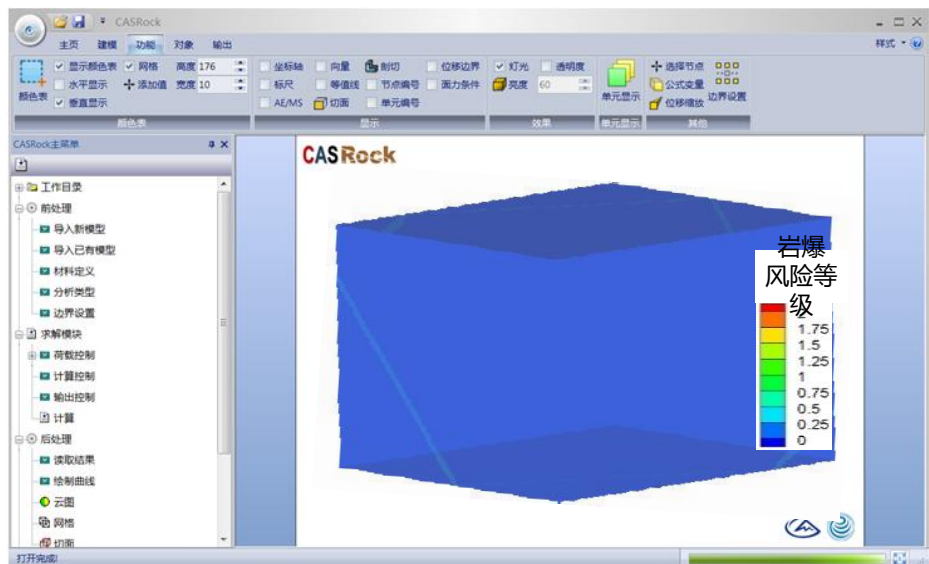


采矿过程三维物理
模型实验装置

□ 自主研发岩体破裂现场监测与数值模拟技术



应变型岩爆



应变-结构面滑移型岩爆



東北大學
Northeastern University

敬请批评指正