

· 研究进展 ·

不同赋存深度岩石力学行为差异及本构模型研究

张茹^{1, 2*}

张安林¹

谢和平^{1, 2, 3}

高明忠^{1, 2}

张泽天^{1, 2}

任利²

张朝鹏²

贾哲强⁴

1. 四川大学水利水电学院 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065
2. 深地科学与工程教育部重点实验室, 成都 610065
3. 深圳大学 深地科学及绿色能源研究院, 深圳 518060
4. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031

[摘要] 深部资源开采和深地空间利用已成为常态, 深部工程开发将是我国未来重要发展领域。符合深部特征的岩石力学行为及基础理论研究是保障深部工程安全高效开发的核心关键。总结了近年来在不同赋存深度岩石力学行为及本构模型方面的研究进展: 依托千米级深部煤炭综合开采基地—平煤矿区(1100 m)和世界上埋深最深的锦屏地下实验室(2400 m), 以赋存深度为研究主线, 初步研发了考虑深部赋存环境和工程扰动特征的岩石力学测试技术, 揭示了不同赋存深度岩石的动静力学行为差异, 构建了考虑赋存深度影响的岩石本构关系和能量灾变分析模型, 并在平煤矿区和锦屏地下实验室等深部工程实践中实现了初步应用, 成果对于促进深部资源和深地空间的高效安全开发具有重要意义。

[关键词] 深部岩石; 不同赋存深度; 力学行为; 能量特征; 本构模型

随着全球经济的迅速发展, 地球浅部矿产资源逐渐枯竭, 资源开发不断向地球深部延伸, 同时人类生存发展需求和对未知世界的探索也迫使我们向地球深部拓展空间^[1, 2]。目前, 山东孙村煤矿的开采深度达到 1 501 m, 川藏铁路已建桑珠岭隧道最大埋深为 1 347 m, 中国锦屏地下实验室最大埋深为 2 400 m, 南非姆波尼格金矿开采深度达到 4 350 m。我国正处于工业化、城镇化加速发展阶段, 对能源资源及地下空间开发的需求日益增加。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》明确指出“瞄准……深地深海等前沿领域, 实施一批具有前瞻性、战略性的国家重大科技项目”“实施川藏铁路……雅鲁藏布江下游水电开发等重大工程”。可见, 深地领域的重大工程建设和前沿科技创新必将是我国未来的重大战略发展趋势。然而, 随着开发深度的增加, 深部复杂赋存环境和工程扰动作用下, 工程灾害的频度和烈度更



张茹 四川大学教授、博士生导师, 深地科学与工程教育部重点实验室执行主任。国家杰出青年科学基金获得者、四川省青年科技创新团队带头人、突出贡献专家。获孙越崎青年科技奖、省青年科技奖等奖项; 获教育部科技进步奖一等奖(排名第 1)、河南省科技进步奖二等奖(排名第 1)等省部级科技奖励 9 项。担任中国岩石力学与工程学会理事、四川省岩石力学与工程学会理事等学术任职。发表学术论文 140 余篇, 出版著作 4 部, 授权发明专利 34 项、软件著作权 13 项。

加凸显, 且更加难以有效预测和防控^[3, 4]。目前, 深部工程实践活动普遍具有盲目性、不确定性和低效性, 传统的浅部岩石力学基础理论与方法在深部可能失效, 而深浅部岩体力学行为与工程响应差异尚未探清, 符合深部特征的岩体力学理论尚未系统建立^[1]。因此, 系统探索不同赋存深度岩体力学行为差异, 开展符合深部特征的岩体力学理论及工程应用研究, 不仅是保障深部资源和深地空间高效安全

收稿日期: 2021-06-02; 修回日期: 2021-12-15

* 通信作者: 张茹, Email: zhangru@scu.edu.cn

本文受到国家自然科学基金项目(51622402)的资助。

开发的核心关键，也是国家深地开发重大战略的现实需求，关乎国家前沿科技创新和国民经济可持续发展。

为此，近几年来，我们在国家自然科学基金委员会优秀青年科学基金“岩体力学与岩层控制”等项目资助下，围绕深部资源开采与深地空间利用领域的重大共性科学问题—深部岩石力学，紧抓深部围岩的赋存环境特征和工程扰动特征，依托世界上埋深最深的锦屏地下实验室(2400 m)和千米级深部煤炭资源综合开采基地平煤矿区(1100 m)等深部工程实践，系统开展了深部岩石力学测试技术研发、力学行为表征、理论模型构建和工程应用方面的创新研究工作，并取得了系列有价值的研究成果，本文对此进行了系统的总结与凝练。

1 深部岩石力学实验测试技术初探

1.1 赋存深度的双因素实验模拟方法^[5]

总结不同赋存深度岩石力学行为的研究现状，主要通过以下两种方法进行赋存深度的模拟：(a) 考虑长期地质作用对岩石自身微观结构等物理属性的影响，即重点关注赋存深度对岩石物性特征的影响，以不同赋存深度获取的岩样为研究对象，通过室内力学实验获取不同赋存深度岩石的本征力学参数差异，但研究中忽略了不同深度岩石的赋存环境差异；(b) 重点关注不同深度的赋存环境差异，通过改变岩样的测试环境(围压或温度)进行赋存深度的模拟，进而研究不同赋存深度岩石的变形破坏差异，但研究对象大多未能采用相应模拟深度的原位岩心，忽略了岩石本身的物性特征差异。这些赋存深度模拟方法虽存在一定的不足，但为我们发展赋存深度的实验模拟方法奠定了坚实基础。针对以往研究中较少将岩石物性特征和赋存环境特征进行协同考虑的现状，我们提出了同时考虑岩石赋存应力环境和物性特征的赋存深度双因素实验模拟方法。对于不同赋存深度岩石物性特征的考虑，在工程现场钻取不同赋存深度处的原位岩心，并尽可能地保证研究岩样同时满足岩性一致且取自不同赋存深度的要求；在赋存应力环境的模拟方面，采用围压 $\sigma_3 = K\gamma H$ 或 $\sigma_3 = \gamma H$ 的模拟方式有时较难真实反映深部岩层的实际赋存应力状态，为此我们提出了围压模拟采用实测地应力这一更贴近围岩实际赋存应力环境的方式，即 $\sigma_3 = \sigma_H$ (实测最大水平应力)。具体地，在不同赋存深度岩石力学行为的研究过程中，首先获取不同赋存深度条件下的原位岩样，同时充分

调研并分析该岩层的赋存应力特征，采用对应深度条件下岩石的实测初始地应力进行模拟，从而探究不同赋存深度岩石更为真实的力学特性差异。

1.2 考虑工程扰动影响的深部岩石力学实验方法^[6]

深部洞室开挖扰动后会引发围岩的大范围变形和应力再分布，深部地下工程的稳定性主要取决于应力再分布后围岩的承载力。在不同开挖条件下，围岩扰动应力演化规律各不相同，尤其是在峰值应力、峰值点位置的区别最为明显，但整体上仍存在显著的共性特征。有必要从开挖扰动引起的围岩应力演化规律入手，建立考虑工程扰动影响的深部岩石力学测试模拟技术。为此，考虑全断面钻爆法、分部开挖钻爆法和全断面掘进机法三种不同开挖扰动条件，将开挖扰动全过程中的应力演化过程概化为原岩应力、开挖扰动、应力稳定三个阶段(图 1)，系统探索了工程扰动条件下的深部围岩应力环境演化共性特征，建立了不同开挖阶段围岩扰动应力演化规律的控制方程，即：

(1) 原岩应力阶段

当掌子面前方洞室围岩远离掌子面时，未受到开挖扰动影响，考虑原始岩体的初始地应力状态为：竖直分量 $p_v = \gamma H$ ，水平分量 $p_H = p_h = \lambda \gamma H$ ，则掌子面前方洞室围岩的应力状态可表示为：

$$\begin{cases} \sigma_1 = \lambda \gamma H \\ \sigma_3 = \gamma H \end{cases} \quad (1)$$

式中， γ 表示覆盖岩石的容重， H 表示赋存深度， λ 表示水平应力与垂直应力之比。

(2) 开挖扰动阶段

掌子面前方洞室围岩开挖诱导应力的峰值可表示为 $\sigma_1 = \alpha \lambda \gamma H$ ，在岩层、围岩属性、赋存深度等条件相似的情况下，通过数值模拟和现场监测参数可得到不同施工方法下的围岩应力集中程度，基于对三种不同开挖方式下典型深埋地下洞室(锦屏引水隧

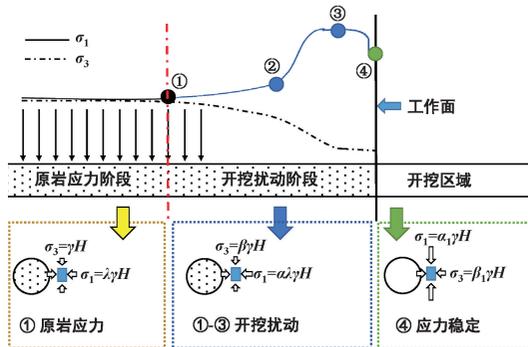


图 1 深部洞室开挖过程中掌子面前方围岩的应力环境演化示意图

洞、Furka 隧道)围岩应力分布参数结果进行分析与总结,全断面钻爆法、分部开挖钻爆法和全断面掘进机法实施造成的峰值应力集中系数 α 的量值范围分别被概化为 2.5~3.5、2.0~3.0、1.5~2.5。随着掌子面的推进,掌子面前方洞室围岩体应力状态由 ①点逐渐过渡到 ③点,最大主应力 σ_1 由 $\lambda\gamma H$ 上升到 $\alpha\lambda\gamma H$,最小主应力 σ_3 也将经历持续卸压的应力调整过程,可表示为:

$$\begin{cases} \text{②点: } \sigma_1 = 1.5\lambda\gamma H, \sigma_2 = \sigma_3 = \frac{3\sigma_1}{5\lambda} \\ \text{③点: } \sigma_1 = \alpha\lambda\gamma H, \sigma_2 = \sigma_3 = \frac{2\sigma_1}{5\alpha\lambda} \end{cases} \quad (2)$$

式中应力集中系数 α ,全断面钻爆法取 3.0,分部开挖钻爆法取 2.5,全断面掘进机法取 2.0。

(3) 应力稳定阶段

围岩应力集中主要由洞室形态决定,将应力稳定阶段深部围岩的环向应力集中系数定义为 α_{shape} ,径向应力卸荷系数定义为 β_{shape} 。考虑深部围岩应力集中峰值点通常出现在洞室表面,考察洞室表面附近的围岩应力状态,即 $r \approx r_0$ 位置处围岩的应力状态,基于弹性力学理论得到圆形洞室围岩沿水平轴和垂直轴的应力分布控制方程。

水平轴:

$$\begin{cases} \sigma_\gamma = 0 \\ \sigma_\theta = (3 - \lambda)\gamma H \end{cases} \quad (3)$$

垂直轴:

$$\begin{cases} \sigma_\gamma = 0 \\ \sigma_\theta = (3\lambda - 1)\gamma H \end{cases} \quad (4)$$

对于现有工程开挖范围,通常 $\lambda > 1$,因此 ④点应力状态的 α_{shape} 为

$$\alpha_{shape} = 3\lambda - 1 \quad (5)$$

开挖后围岩应力迅速调整到相对稳定的状态,应力峰值也随之调整,最大应力出现的位置可通过应变非线性软化本构关系确定,此时 α_{shape} 和 β_{shape} 为

$$\begin{cases} \alpha_{shape} = \frac{71}{32}\lambda - \frac{15}{32} \\ \beta_{shape} = \frac{9}{32}\lambda - \frac{1}{32} \end{cases} \quad (6)$$

考虑最不利组合情况,在实验室实验时 α_{shape} 和 β_{shape} 可按下式计算:

$$\begin{cases} \alpha_{shape} = 3\lambda - 1 \\ \beta_{shape} = \frac{9}{32}\lambda - \frac{1}{32} \end{cases} \quad (7)$$

根据上述分析,建立了考虑深部围岩赋存环境及工程扰动影响的力学实验模拟方法,实验应力路

径如图 2 所示。该实验模拟方法能够同时反映开挖扰动和开挖深度对围岩应力状态的影响,突破了现有实验技术难以定量考虑不同赋存深度应力环境和工程扰动效应对深部围岩力学行为及长期应力调整影响的局限。

2 不同赋存深度岩石动静力学行为实验研究

基于课题组提出的深部岩石力学创新实验方法,依托千米级深部煤炭开采基地—平煤矿区(1 100 m)和世界埋深最深的锦屏地下实验室(2 400 m)等深部工程实践,以不同赋存深度原位工程岩石为研究对象,系统开展了不同赋存深度岩石动静力学实验研究,初步揭示了不同赋存深度岩石力学参数、能量特征和变形破裂等力学行为差异。

2.1 不同赋存深度岩石静态力学行为差异^[5, 7]

以取自平煤矿区己—15 煤层不同赋存深度(300、600、700、850 和 1 050 m)的煤样为研究对象(图 3),结合平煤矿区己—15 煤层的实测地应力资料(表 1),基于赋存深度的双因素实验模拟方法,以不同赋存深度下的最大水平应力 σ_H 作为初始静水围压,系统开展不同赋存深度煤样的三轴压缩实验和同步声发射监测,探索了不同赋存深度岩石的静态力学行为差异。

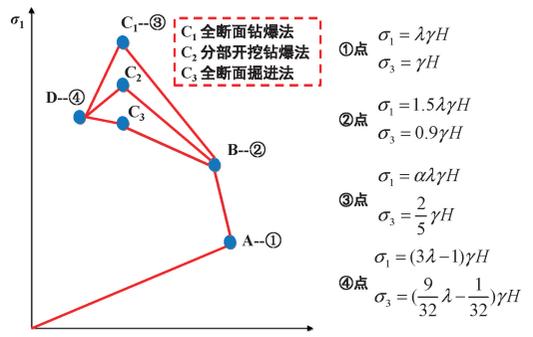


图 2 考虑工程扰动影响的实验应力路径

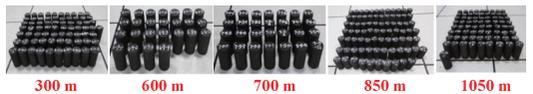


图 3 平煤矿区不同赋存深度煤样

表 1 平煤矿区不同赋存深度实测地应力

深度/m	最大水平应力 σ_H /MPa	最小水平应力 σ_h /MPa	竖直应力 σ_v /MPa
300	14.2	7.6	11.5
600	31.3	17.4	11.0
700	34.4	22.4	20.1
850	40.7	23.5	17.4
1 050	43.6	27.2	23.3

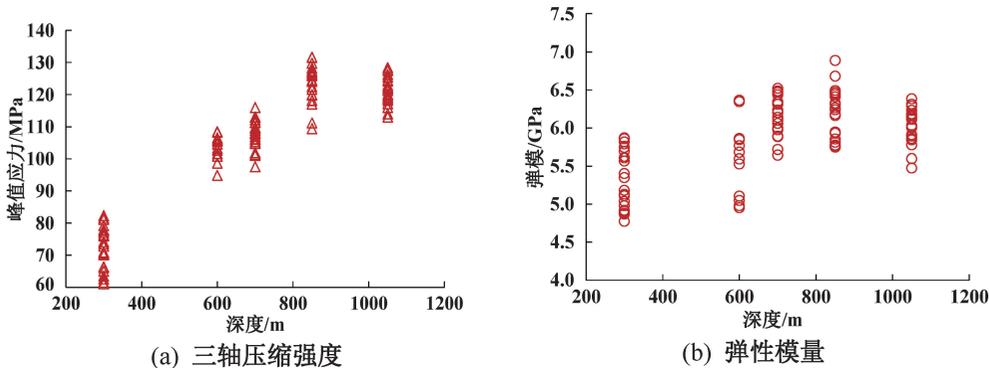


图 4 不同赋存深度煤岩的力学参数差异

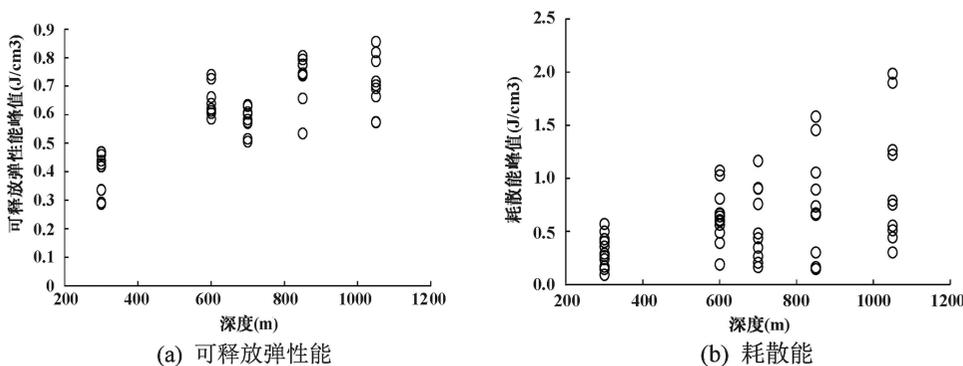


图 5 不同赋存深度煤样的能量特征差异

研究发现,(1)力学参数差异:随着赋存深度增加,三轴压缩条件下煤样的强度、弹性模量和泊松比等力学参数均呈现非线性变化趋势。然而,现有岩石力学研究的一般性认识,认为只要是同一种岩石,弹性模量和泊松比均为常数,与赋存深度无关。而我们的这一研究结果则强调了深部岩石力学研究同时考虑深部应力环境和原位岩石物性特征的必要性和重要性。

(2)能量演化差异:随着赋存深度的增加,三轴压缩条件下煤岩弹性能聚积更加迅速且量值更大,煤岩耗散能增加越迅速且所能达到的耗散能峰值也越大,导致内部结构劣化越显著,从能量机理角度解释了煤岩越往深部其破坏程度越显著的规律。

(3)损伤破坏差异:随着赋存深度增加,三轴压缩条件下煤岩的声发射(Acoustic Emission, AE)活动减缩,煤岩内部的微破裂受到了抑制(图 6);基于累计 AE 振铃计数,从 AE 参数角度建立损伤变量(详见文献[7]),定量刻画了不同赋存深度煤岩的损伤演化过程,发现随着深度增加,煤岩的损伤发展相对提前,损伤发展过程变缓但损伤程度更高(图 7);基于组合 AE 参数研究了不同赋存深度煤岩的破坏

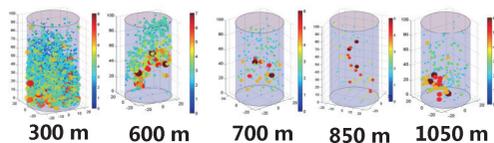


图 6 不同深度煤样的微破裂演化特征差异

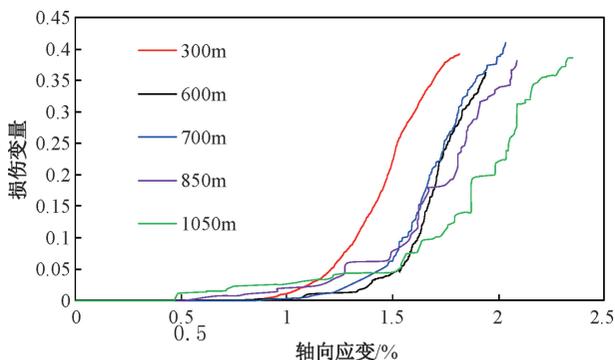


图 7 不同赋存深度煤岩的损伤演化过程

行为差异,发现导致煤岩破坏失效的剪切裂纹占比由 300 m 的 56% 转变为 1050 m 的 82%,破坏模式逐渐向深部的压剪破坏转变。

2.2 不同赋存深度岩石动态力学行为差异^[8]

以世界埋深最深的中国锦屏地下实验室深部大理岩为研究对象(图 8),典型试样基础信息见表 2。结合锦屏地下实验室的实测地应力资料,基于考虑扰动影响的深部岩石力学实验方法,设计了 0、100、300、600、700、900、1200、1500 和 1800 m 九种不同深度单向赋存应力环境下洞壁围岩应力稳定后的初始预静载条件(见表 3)。据此,首先将岩样施加不同赋存环境下的预设静载荷,待静载保持稳定后再分别以 0.5~1.9 MPa 的气压激发子弹对岩样进行冲击,从而研究了不同赋存深度单向赋存应力环境下锦屏大理岩的动态力学特性,初步揭示了大理岩动态强度和能量特征随赋存深度的变化规律。



图 8 锦屏地下实验室的深部大理岩试样

表 2 典型大理岩试样的基础信息表

试样编号	重量 /g	直径 /mm	高度 /mm	密度 /g · cm ⁻³
10-73-1	217.54	49.66	40.07	2.80
10-73-2	217.45	49.66	40.00	2.81
10-73-3	217.66	49.64	40.06	2.81
10-73-4	216.78	49.64	39.99	2.80
10-73-5	217.14	49.64	39.94	2.81
10-73-6	218.07	49.64	40.15	2.81
10-73-7	217.65	49.64	40.09	2.81
10-73-8	217.51	49.63	40.03	2.81
10-73-9	217.41	49.66	40.33	2.78
10-73-10	218.36	49.64	40.13	2.81

表 3 不同深度单向赋存应力环境下岩石动态冲击力学实验的预静载条件

深度/m	轴向预静载 σ_{p1} /MPa
0	0
100	5.3
300	15.9
600	31.8
700	37.1
900	47.7
1200	63.6
1500	79.5
1800	95.4

研究结果显示,(1)强度特征差异:在较低应变率时,锦屏大理岩的单向动态压缩强度受赋存深度的影响更为显著,在较高应变率时,大理岩的动态强度受赋存深度的影响逐渐减弱。随着深度增加,单向赋存应力环境下大理岩动态强度的应变率敏感性表现为逐渐降低的趋势。虽然岩石破坏强度与动载变化的关联性降低,但动力灾害却随深度增加变得更严重,因此不能仅依靠岩石动态强度判断深部地下工程动力灾害的危险程度。

(2)能量特征差异:当应变率范围一定时,单向赋存应力环境下大理岩的耗散能密度随赋存深度增加而减小;深部岩样内部由于较高轴向预静载作用而积聚的弹性能更高,在动载作用下岩样发生变形破坏主要受控于大量弹性应变能的急剧释放,因此单位体积耗散的能量相对更小。深度一定时,应变率越大,岩样发生动态变形破坏的过程耗能密度更大,表明冲击作用更为强烈,岩样破坏耗能与碎片弹射动能明显增大,从而表现出更高的耗能密度。

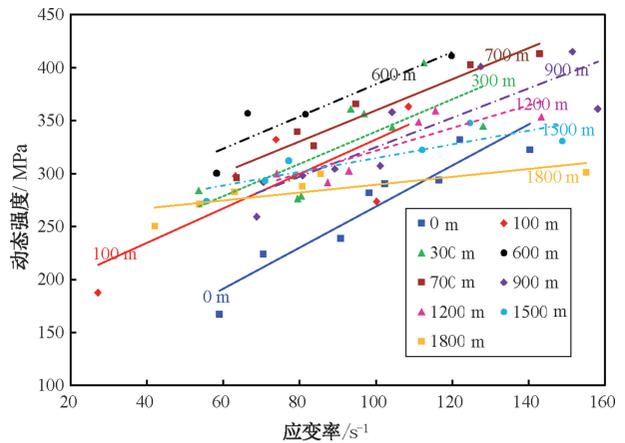


图 9 不同深度单向赋存应力环境下大理岩动态强度—应变率关系

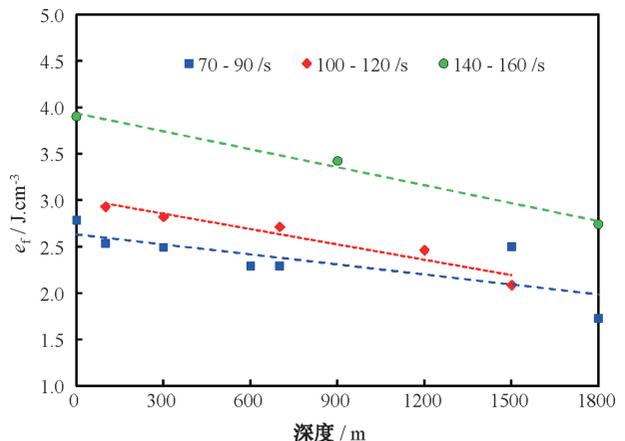


图 10 不同应变率下大理岩耗散密度随深度的变化规律

3 不同赋存深度岩石本构与能量演化模型研究

3.1 考虑赋存深度影响的岩石损伤本构模型^[9]

前述研究表明,不同赋存深度煤岩的力学参数和能量特征均存在显著差异,构建可以考虑赋存深度影响的岩石本构关系是进一步深入定量探究不同赋存深度岩石损伤机制和破坏机理的重要基础。为此,我们基于损伤统计理论,从岩石微元强度的 Weibull 分布入手^[10, 11],首先建立了考虑赋存深度效应的岩石损伤演化方程:

$$D = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{E \varepsilon_1 \left[\left(\alpha_0 + \frac{1}{\sqrt{3}} \right) \sigma_1 + \left(2\alpha_0 - \frac{1}{\sqrt{3}} \right) \sigma_3 \right]}{(\sigma_1 - 2\mu\sigma_3) F_0(H)} \right)^{m(H)} \right\} \quad (8)$$

结合 Lemaitre 应变等价性假说^[12],构建了体现赋存深度 H 影响的岩石损伤本构关系:

$$\sigma_1 = E \varepsilon_1 \exp \left\{ - \left(\frac{E \varepsilon_1 \left[\left(\alpha_0 + \frac{1}{\sqrt{3}} \right) \sigma_1 + \left(2\alpha_0 - \frac{1}{\sqrt{3}} \right) \sigma_3 \right]}{(\sigma_1 - 2\mu\sigma_3) F_0(H)} \right)^{m(H)} \right\} + 2\mu\sigma_3 \quad (9)$$

其中, D 为损伤变量, σ_1 为轴向应力, σ_3 为围压, ε_1 为轴向应变; E 和 μ 为弹性模量和泊松比。

利用上述建立的考虑赋存深度影响的岩石损伤本构模型计算得到了平煤矿区不同赋存深度煤岩的应力—应变理论曲线,并将其与实验曲线进行对比。图 11 显示了 300 m 深度下的实验曲线与理论曲线的对比情况。由图可见,我们建立的考虑赋存深度影响的岩石损伤本构模型理论曲线与实验曲线吻合效果更佳,说明考虑赋存深度影响的岩石损伤本构能够更有效地刻画不同深度煤岩的变形破坏全过程,凸显了岩石本构模型构建时考虑赋存深度影响的重要性与必要性。

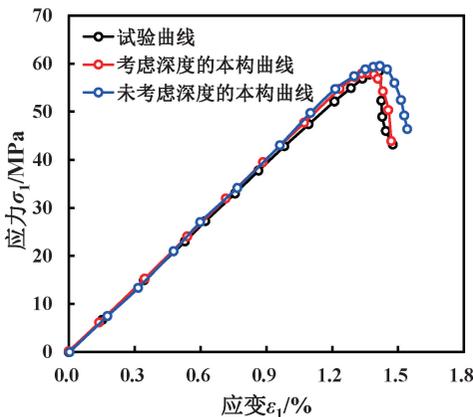


图 11 实验曲线与理论曲线对比(300 m 为例)

3.2 不同赋存深度岩石能量演化模型及灾变分析^[13]

岩石破坏过程中的能量演化规律随赋存深度变化有所不同,能量积聚、耗散和释放所呈现的复杂的促进和制约作用也有所差异^[14, 15]。岩石在初始应力环境条件下储存了一定能量(初始弹性能),随着外部能量输入,弹性能开始积聚,耗散能随之产生。事实上,初始储存能量越多就越促进后续的能量积聚或耗散行为,而已经积聚的能量会对后续弹性能的继续积聚产生抑制,已经产生的耗散能会促进后续能量的耗散,这一关系可以表示为:

$$\begin{cases} U^e = \frac{1}{c_e e^{-a_e U_0 \sigma} + \frac{b_e}{a_e U_0}} + U_{e0} \\ U^d = \frac{1}{c_d e^{-a_d U_0 \sigma} - \frac{b_d}{a_d U_0}} + U_{d0} \end{cases} \quad (10)$$

式中, a_e 、 b_e 、 a_d 、 b_d 表示能量演化过程中抑制或促进程度的参数,均为正数; c_e 、 c_d 为积分常数; U_{e0} 为初始弹性能,与 U_0 相等; U_{d0} 为初始耗散能,应为零。令 $m_e = a_e U_0$, $m_d = a_d U_0$ 表示初始能量状态对后续演化的影响,建立了定量刻画不同赋存深度岩石非线性能量演化行为的理论模型:

$$\begin{cases} U^e = \frac{1}{c_e e^{-m_e \sigma} + \frac{b_e}{m_e}} + U_0 \\ U^d = \frac{1}{c_d e^{-m_d \sigma} - \frac{b_d}{m_d}} \end{cases} \quad (11)$$

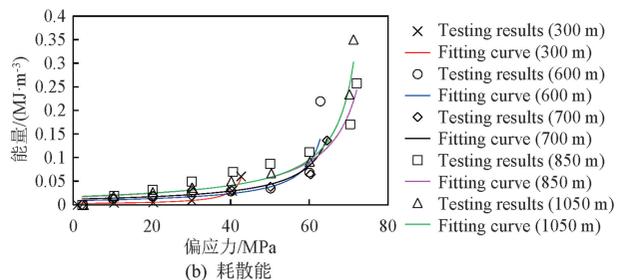
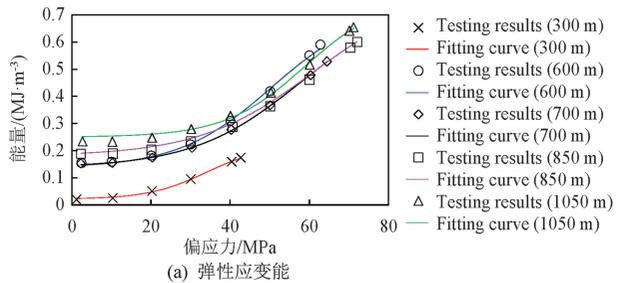


图 12 非线性能量演化模型验证

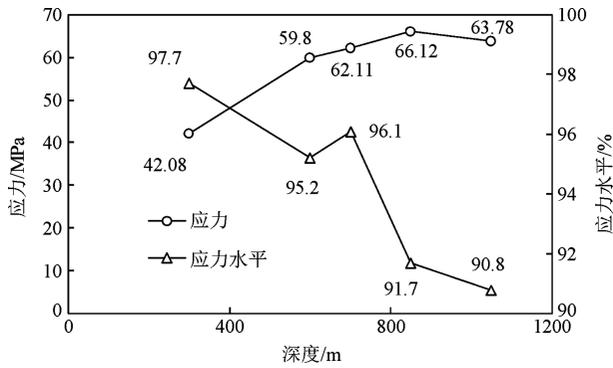


图 13 能量耗散效率 $u_{ed} = 0.5$ 时对应的应力及应力水平随深度变化

如图 12 所示,利用上述模型对开采卸荷条件下不同赋存深度煤岩的弹性应变能和耗散能的演化过程进行了理论刻画,效果良好。

随着能量的持续输入,煤岩系统中发生着

$U \rightarrow U^d$ 的转化,这与岩石的变形破坏密切相关,而能量演化速率则代表着外界输入能量的实时去向和效率。

根据上述能量演化模型,进一步定义了能量耗散效率 u_{ed} ,即 $u_{ed} = dU^d/dU$ 表示输入单位能量产生的能量耗散,开展不同赋存深度岩石的灾变分析,发现当输入能量的主要去向从积聚向耗散转化时($u_{ed} > 0.5$)预示着煤岩的失稳灾变。并且,此时对应的应力水平随赋存深度呈现降低趋势(图 13),表明深部煤岩在能量输入的过程中,相对更早发生能量主要去向的转变。

以上研究成果在平煤八矿、十二矿、同煤塔山矿等多个矿山围岩灾害防控和瓦斯抽采治理以及锦屏地下实验室深部围岩稳定性研究中得到了初步应用,取得了一定的社会效益,促进了深部资源和深地空间开发利用领域的理论与技术进步。

4 结语及展望

近年来,随着资源开采和空间利用不断向纵深发展,深部岩石力学与工程灾害防控领域的基础理论与应用研究取得了颇为丰富的研究成果。但深部工程开发是一个涉及工程地质、岩石力学、渗流力学和灾害力学等多学科交叉的复杂过程,其复杂性、未知性和不确定性给基础科学研究带来巨大挑战。因此,我们的研究工作还需不断完善与深入,建立的理论与方法的工程普适性及针对性尚需

强化。

未来,我们将进一步聚焦国家重大战略工程建设安全的现实需求,开展相关研究工作。作为十四五规划纲要中的重点实施工程之一,川藏铁路目前已开工建设,沿线拟建超千米级埋深的长大隧道占比 47.8%(最大埋深超 2 000 m);同时,十四五规划建设的雅鲁藏布江下游流域开发工程也将面临超千米平均埋深大型洞室群的建设难题。并且这两大战略工程均位于新世纪构造活动最为强烈的青藏高原地区,工程建设面临内外地质运动活跃、多场作用强烈、构造应力突出等不利地质条件,安全风险与技术难题世所罕见。符合青藏高原深部特征的岩石力学与围岩稳定性研究必将是川藏铁路与雅下工程建设的核心研究主题之一。因此,我们认为未来需要重点攻关强构造活跃区深部岩石力学行为及围岩控制技术体系研究难题,从微观岩石结构、宏观力学特性和工程围岩响应等多尺度、全方位地揭示赋存深度及构造作用对深部围岩灾变机制的影响,从而形成构造活跃区深部围岩安全评估与稳定性控制技术,服务于川藏铁路、雅下开发工程等构造活跃区深部重大工程实践。

参 考 文 献

- [1] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1283—1305.
- [2] 谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深部开采的定量界定与分析. 煤炭学报, 2015, 40(1): 1—10.
- [3] 谢和平, 高峰, 鞠杨. 深部岩体力学研究探索. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2161—2178.
- [4] 袁亮. 深部采动响应与灾害防控研究进展. 煤炭学报, 2021, 46(3): 716—725.
- [5] Zhang ZP, Xie HP, Zhang R, et al. Deformation damage and energy evolution characteristics of coal at different depths. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 52(5): 1—13.
- [6] Zha ES, Zhang ZT, Zhang R, et al. Long-term mechanical and acoustic emission characteristics of creep in deeply buried Jinping marble considering excavation disturbance. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 139(2): 104603.
- [7] Jia ZQ, Xie HP, Zhang R, et al. Acoustic emission characteristics and damage evolution of coal at different depths under triaxial compression. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(6): 1—14.

- [8] Zhang AL, Xie HP, Zhang R, et al. Dynamic failure behavior of Jinping marble under various preloading conditions corresponding to different depths. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 148(11): 104959.
- [9] Qin L, Zhang ZP, Wang M, et al. Research on damage constitutive model of coal with different depths// 2nd International Conference on Geo-Mechanics, Geo-Energy and Geo-Resources (IC3G), 2019: 113—123.
- [10] 曹文贵, 方祖烈, 唐学军. 岩石损伤软化统计本构模型之研究. *岩石力学与工程学报*, 1998, 17(6): 628—633.
- [11] 曹文贵, 赵明华, 唐学军. 岩石破裂过程的统计损伤模拟研究. *岩土工程学报*, 2003, 25(2): 184—187.
- [12] Lemaitre J. How to use damage mechanics. *Nuclear Engineering and Design*. 1984, 80(3): 233—245.
- [13] Jia ZQ, Li CB, Zhang R, et al. Energy evolution of coal at different depths under unloading conditions. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2019, 52(11): 4637—4649.
- [14] 张志镇, 高峰. 单轴压缩下岩石能量演化的非线性特性研究. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(6): 1198—1207.
- [15] 郑在胜. 岩石变形中的能量传递过程与岩石变形动力学分析. *中国科学: 化学生命科学地学*, 1990(5): 524—537.

Mechanical Behavior Differences and Constitutive Model of Rock at Different Depths

Ru Zhang^{1, 2*} Anlin Zhang¹ Heping Xie^{1, 2, 3} Mingzhong Gao^{1, 2}
 Zetian Zhang^{1, 2} Li Ren² Zhaopeng Zhang² Zheqiang Jia⁴

1. College of Water Resource & Hydropower, State Key Laboratory of Hydraulics & Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065
2. MOE Key Laboratory of Deep Earth Science & Engineering, Chengdu 610065
3. Institute of Deep Earth Science & Green Energy, Shenzhen University, Shenzhen 518060
4. China Railway Eryuan Engineering Group Company, Ltd, Chengdu 610031

Abstract Deep resource mining and deep underground space utilization have become normal, and deep engineering development will be an important development field in China in the future. The research on mechanical behavior and basic theory of rock in accordance with deep characteristics is the key factor to ensure the safe and efficient development of deep engineering. This work summarized our research progresses of mechanical behaviors and constitutive models of rock at different depths in recent years: relying on the kilometer-level deep coal comprehensive mining base, i. e., Pingdingshan Coal Mining Area (1 100 m), and the world's deepest China Jinping Underground Laboratory (2 400 m), taking the depth as the main research line, the rock mechanical testing technologies considering the characteristics of deep occurrence environment and engineering disturbance were preliminarily developed, the differences in dynamic and static mechanical behaviors of rocks at different depths were revealed, the constitutive relation and catastrophe analysis model based on energy of rock considering the influence of depth were established, and the preliminary applications were realized in the deep engineering practices of Pingdingshan Coal Mine Area and China Jinping Underground Laboratory. Those results are of great significance to promote the efficient and safe development of deep resources and deep underground space.

Keywords deep rock; different depth; mechanical behavior; energy characteristics; constitutive mode

(责任编辑 吴征天 张强)