

深部地下工程中的岩石力学行为研究

徐晓明

江西省煤田地质勘察研究院 江西南昌 330000

【摘要】面向国家推动岩石力学与工程领域核心关键技术研发的政策背景，大力推动地下工程中岩石力学行为研究可为该政策奠定技术底座。立足深部地下工程中岩石力学行为定义及研究意义，归纳出当前深部地下工程中岩石力学开采现状和技术难题。在此基础上，总结出该领域现有岩石热损伤力学效应、岩石的流变特性、岩石的强度特征和岩石的破坏特征四大研究成果，旨在为进一步研究该工程中的岩石力学行为建立较为完善的理论体系，以期可为持续推进深部地下工程中的岩石力学研究提供理论指导。

【关键词】深部地下工程；岩石力学行为；岩石热损伤；流变特性

2023年6月，中国岩石力学与工程学会印发《城市深部地下空间施工环境控制技术指南》等8项团体标准的公告，为中国深部地下工程中的施工行为指明实施路径。作为深部地下工程中的重要研究领域，岩石力学行为的研究成果对于保障人类生命财产安全，促进经济社会发展具有重要现实意义。事实上，早在2021年4月，中国岩石力学与工程学会就印发《中国岩石力学与工程学会“十四五”规划》的通知，指出“聚焦岩石力学与工程领域核心关键技术研发”，再次强调深部地下工程中的岩石力学行为研究的重要性。值此政策背书，相关部门应以深部地下工程中的岩石力学行为研究为抓手，持续驱动该领域研究高质量发展，为扎实推进中国深部地下工程实施提质增效。然而，深部地下工程中的岩石力学行为研究却遇到部分技术难题，给该领域的深入探究造成一定影响。基于此，本文总结出该领域部分现有研究成果，希冀为突破此领域技术难题给予理论指导。

1 深部地下工程中岩石力学行为定义及研究意义

1.1 行为定义

在深部地下工程中，岩石处于较为复杂的环境。在温度、地应力、循环加卸载等因素影响下，岩石处于长期流变状态^[1]，对深部岩体的长期稳定产生不利影响，由此衍生出深部地下工程的岩石力学。深部地下工程中的岩石力学是研究岩石与岩土在岩石外力作用下的变形、破坏特征、力学性质和岩土结构稳定性的学科，主要研究对象是岩体、岩石结构、碎屑岩、砂土、卵石和粘土^[2]。当前，岩石力的研究行

为主要集中在如下层面。其一，岩石的机械性质。岩石的机械性质研究主要包含岩石的强度、模量、弹性、泊松比与裂纹，这些性质主要影响岩石的破坏与变形。其二，岩土结构稳定性。岩土结构稳定性研究是岩石力学的重要分支，主要研究地质构造及岩围的静力学、动力学等各种稳定性问题。其三，岩石力学实验研究。岩石力学实验研究是通过岩石样本进行力学实验，包括岩石单轴压缩实验、岩石拉伸实验、岩石弯曲实验与岩石三轴实验，以总结各种岩石在不同外力作用下的变形和破坏过程。

1.2 研究意义

岩石作为地质的历史产物，其内在结构和演变机理均刻画地质内部环境。深部地下工程的岩石力学行为的深入研究可协助人类了解地下水资源和油气资源的赋存状态^[3]，及时采取超前地质预报等预测应对措施，以有效规避地质灾害。由此，深部地下工程的岩石力学行为的深入研究可有效帮助人类实现地质资源的可持续利用，提高矿产资源开采效益，预防地质灾害。同时，伴随岩石的深入研究，人类可对岩石特征与形成过程进一步了解，通晓岩石资源的迁移与聚集机制，有助于圈定找矿靶区^[4]，指导矿区勘察工作，并对未来找矿勘察工作和区域成矿规律的总结完善具有重要现实意义。此外，岩石资源变动可记录海洋的物质进化过程。由于岩石种类的演变过程具有长期变动性，其丰富的变动过程可折射出海洋深部地幔物质组成^[5]、地壳岩浆演变过程和地球动力学内在演化机制，且能够提前预测全球气候变化趋势，对人类资源的可持续获取和人类生活

水平具有重要价值意蕴。

2 深部地下工程中岩石力学开采现状与技术难题

2.1 开采现状

在深部地下工程岩石力学开采过程中，人类对岩石资源的开采深度以每年8到12米的速度增加。伴随浅部岩石资源逐渐减少，世界各国开始钻研深部资源开采^[6]，故超深钻探、深部地下工作室与核废料处置等深部工程日益增多。时下，中国当前已有16座矿山的开采深度达到1000米，且深部地下工程岩石力学研究取得部分新进展；俄罗斯科拉超深钻孔深部已达到12.262千米；库页岛的油井实验室深度达到12.345千米，且该实验室深度为世界最深^[7]。在此情形下，地球深部地下工程岩石力学研究却仍处于“灰箱”状态，且现有研究成果无法高效赋能深部地下工程岩石力学研究^[8]，寻求赋能该工程岩石力学研究的新动能已成为全世界各学界关注的焦点。

2.2 开采技术难题

目前，深部地下工程岩石开采技术难题主要集中于如下层面。其一，多场耦合岩石力学效应。囿于温度较高、地应力较高与岩溶水压较高较强等障碍因素的影响，深部地下工程岩石在开采过程中产生多场耦合效应，引致岩石冻融循环损伤，有损岩石稳定性。其二，深部地下工程低碳管控。近年来，中国提出“双碳计划”，对深部地下工程实施低碳管控政策，而CCS技术发展却呈现缓慢趋势，影响到深部地下工程岩石资源的低碳开采。其三，岩石冷却问题。砂岩具有硬度较高、渗水性极好特征^[9]，而深部环境水源较充足。此情形下，若用金刚石对砂岩进行开采，砂岩便会以较快速度抽取水源，引致水资源流失，影响到深部地下工程中岩石资源的高效开采。其四，岩石破坏引发的岩爆。伴随深部地下工程中的岩石力学行为增多，面临的岩爆问题也随之增多，滞后深部地下工程中岩石资源的开采过程。

3 深部地下工程中岩石力学行为研究成果

3.1 岩石热损伤力学效应

由于地壳深部岩浆侵入，地壳深部的岩石温度和围压都在上升，通常温度会达到200℃以上，引致岩石产生热损伤力学效应。因此，有部分学者通过理论与实验方法研究岩石热损伤对自身力学性质的影响，且取得一定成果。有研究指出^[10-11]，当温度升高至75℃与200℃之间，花岗岩内部

矿物颗粒会产生脱水、相变和变形现象，认为该温度为该品种岩石试样的温度阈值；当温度阈值介于400℃与500℃之间时，砂岩的泊松比值呈现先下降后上升态势，内部结构产生破裂情况；当温度达到500℃时，粗砂内部结构产生形变现象。同时，在实验过程中，学者均对岩石的围压进行测算。结果显示，温度较低时，岩石表面及内部结构变化较小；温度较高时，岩石内外部结构变化较大，即热损伤效应较大。并且，围压对岩石热损伤力学效应的影响大于温度影响。

3.2 岩石的流变特性

岩石的流变特性主要取决于温度变化和应力差，且有部分学者已开展实验研究，主要成果为如下层面。其一，深部岩石的时间效应。通常来讲，硬岩不会产生明显的流变效应，而在深部高地应力条件下情况有所不同。有部分研究人员对南非深部进行岩石开采，结果显示深部环境下硬岩同样产生显著时间效应，而这一现象直接导致岩石的流变现象^[12]。其二，地下核废料对岩石流变特性的影响。当前，世界各国核废料储蓄库大多置于地壳深部，利用稳定的地质条件对核废料进行处理，而这对深部地下工程中的岩石流变特性产生一定影响^[13]。据瑞典Forsmark核废料观测站记录可知，在温度、水和力的耦合作用下，核废料对岩石资源产生强大的剥离作用，预计1000年后，岩石剥离深度将达到3米，对深部地下工程岩石力学行为的高质量推进产生不利影响。

3.3 岩石的强度特征

有资料证实，岩石的强度与地质深度成正比。细言之，当地下工程深度从600米增加到1000米时，强度介于81到100Mpa之间的岩石资源比重从5.5%增加到24.5%，且岩石脆度有所增加，更容易发生岩爆，这也是发生地震的直接原因。Hoek与Brown通过大量岩石力学实验，基于岩性断裂理论和能量平衡原理，研究出一个著名的强度准则。该准则假设岩石强度受两个因素影响，其一是内部摩擦力和粘聚力，其二是岩石强度。

$$\text{具体公式为: } \sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(\partial_b \frac{\sigma_1}{\sigma_a} + s \right)^a \quad (1)$$

式中， σ_1 和 σ_3 表征有效主应力； σ_c 代表岩石样本的单轴抗压强度； ∂_b 表示岩体折减参数； s 和 a 分别表征岩体破碎程度参数和岩体质量有关的参数。这些参数是依据

严苛的实验所得，几乎适用于所有类型的岩石，为深部地下工程中的岩石力学行为研究做出巨大学术贡献。

3.4 岩石的破坏特征

随着人类对岩石开采深度的增加，岩石的破坏特征也随之转变，具体呈现为由地壳浅部的脆性力学响应转变为深部的潜在延性行为力学响应，而这一转变引致岩石强度增加、岩爆发生次数随之增加^[14]。据南非金框统计数据 displays, 岩爆次数与开采深度之间存在显著线性关系，具体表现为如下层面。其一，岩爆多发生在开采活动较频繁地区，且在开采深度介于100到200米之间，发生频率会显著增加。其二，当开采深度增加时，底部岩石资源支撑压力随之增大，其强度与脆性均增大，故而岩爆的可能性也增加。其三，当开采次数较频繁时，岩层运动速率会显著加快，这会导致岩爆的强度与震级增加。其四，随着开采次数增加，深部地下开采引起的沉积也成为岩爆的诱因，有可能直接引发岩爆。上述研究成果既是深部地下工程中的岩石力学行为的重大突破，也是阻碍该行为高质量进行的滞碍因素，是当下岩石力学界亟需解决的问题之一。

4 结语

伴随国家作出岩石力学与工程领域核心关键技术研发的战略部署，相关部门、学术界专家应紧随战略趋势，对深部地下工程中的岩石力学作出全面深化研究。揭示深部地下工程中的岩石力学行为机理和失稳致灾机理，不仅对减少岩爆动力灾害具有重要现实意义，而且对深部地下工程的岩石力学行为安全进行具有重要指导意义。对此，立足深部地下工程中的岩石力学行为定义及研究意义作出详细阐述，归纳出当前该领域的开采现状和技术难题，总结出此领域现有主要研究成果，希冀为高质量推进深部地下工程中的岩石力学研究提供理论指导。

参考文献:

- [1] 刘闯龙, 陈士海, 石伟民, 等. 多次动态扰动下红砂岩时效变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(10): 1917-1924.
- [2] 许海亮, 杜羽, 宋义敏, 等. 层间作用对复合岩石单轴抗压强度的影响研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2023, 42(6): 167-172.
- [3] 庞小娇, 王贵文, 匡立春, 等. 沉积环境控制下的页岩

岩相组合类型及测井表征: 以松辽盆地古龙凹陷青山口组为例[J]. 古地学报, 2023, 25(5): 1156-1175.

- [4] 杨庆坤, 庞文静, 章传超, 等. 赣中相山地区加里东期细粒花岗岩成因及其对钼多金属矿的找矿意义[J]. 地质科学, 2024, 59(1): 120-137.
- [5] 陈宁, 曾忠诚, 赵端昌, 等. 阿尔金造山带南缘晚奥陶世碱性辉长岩成因及其大地构造意义[J]. 西北地质, 2023, 56(4): 91-102.
- [6] 高明忠, 叶思琪, 杨本高, 等. 深部原位岩石力学研究进展[J]. 中国科学基金, 2021, 35(6): 895-903.
- [7] 吴星辉, 李鹏, 郭奇峰, 等. 热损伤岩石物理力学特性演化机制研究进展[J]. 工程科学学报, 2022, 44(6): 827-839.
- [8] 谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深部开采的定量界定与分析[J]. 煤炭学报, 2015, 40(1): 1-10.
- [9] 白玉书, 裴强强, 刘鸿, 等. 砂岩石窟顶板微小型锚杆倒置锚固方法与性能研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(12): 3031-3042.
- [10] 黄长松, 梁卫国, 陈跃都, 等. 循环高温作用下花岗岩岩裂缝渗流-传热特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(9): 2253-2265.
- [11] 刘星辰, 黄锋, 李修磊, 等. 高温处理灰岩单轴压缩力学性质及能量演化规律[J]. 力学季刊, 2023, 44(4): 854-866.
- [12] 周传涛, 田文岭, 杨圣奇, 等. 高温后花岗岩循环加卸载力学行为数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(27): 11768-11777.
- [13] 李邵军, 郑民总, 邱士利, 等. 中国锦屏地下实验室开挖隧洞灾变特征与长期原位力学响应分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(8): 842-852.
- [14] 周泽卿, 王建国, 蒋新闻, 等. 循环冲击下灰岩动态破坏的围压效应[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(06): 228-236.
- [15] 张健, 郭亮亮, 涂坤. 不同围压卸荷速率下砂岩力学特性数值试验研究[J/OL]. 采矿与安全工程学报, 1-15 [2024-03-10].

作者简介:

徐晓明(1989.11.4—), 男, 汉, 江西南昌人, 学历: 本科, 学校职称: 江西省煤田地质勘察研究院工程师, 研究方向: 岩土工程。