真三轴条件下深部煤岩试样力学特性研究^{*}

赵杰

(山西三路安环保能源开发股份有限公司,山西长治市 046000)

摘 要:为研究深部煤岩体地下实际浸水作用后煤岩体的力学变化情况,以山西某煤矿地下5组原 位煤岩体为研究对象,通过制备的标准试验试件分别进行无水状态下、浸水之前和浸水之后的真 三轴力学试验,以期还原强降水后深部煤岩体力学特性的变化情况。研究发现:原始状态下煤岩 层试样层位岩石在真三向应力下的变形受层理、应力和结构的影响均较大,在垂直层理方向的变 形能力较强;破裂模式表现为以结构控制型剪切破坏、结构和应力综合控制型剪切破坏以及结构 控制型剪切破坏为主,以层理方向剪切滑移为主的3种破坏形式。当岩样在真三向应力作用下并 通过浸水试验后,岩样峰值强度降低,力学性质弱化,弹性模量降低,同时变形能力增加。其破坏 模式分为结构控制型和应力控制综合控制型剪切破坏,以及结构控制型剪切破坏形式。 关键词:深部煤岩;力学特性;真三轴;声发射;浸水试验

0 引言

大量降雨和地下水转移现象的发生,对煤矿采 空区稳定性的变化产生重要影响,煤矿采空区赋水, 给矿山安全生产带来了重大隐患,同时,地层中的岩 石在地质构造作用下往往处于三向不等压状态,常 规的岩石力学试验无法研究岩石在实际应力条件下 的力学特性^[1-2],开展与现场实际情况更接近的真三 轴试验研究能够更加准确地模拟岩体实际受力状 态,为分析深部煤岩体浸水作用前后煤岩体的稳定 性提供技术指导。

随着技术的进步,越来越多的学者通过真三轴 试验机开展岩体试件在三向应力状态下的力学特性 试验研究。DU等^[3]利用英国GDS真三轴仪对腾格 里沙漠风积沙进行了排水剪切试验研究。GAO 等^[4]采用三维离散元法(DEM)研究节理大理岩中 间主应力和节理倾角对宏观力学特性的影响。 SHEN等^[5]对"x向位移固定、y向加载、z向卸载" 真三轴应力路径下的冲击危险煤样进行了试验和数 值研究。DUAN等^[6]系统分析了各主应力循环对 煤体变形、能量演化及损伤特征的影响。CHEN 等^[7]研究了真三轴应力作用下原煤水力压裂诱发的 声发射参数变化规律和声发射事件的时空分布规 律。CHANG 等^[8]提出了一种考虑微裂纹引起的微 观损伤和先存缺陷引起的宏观损伤的损伤模型来描 述含单一缺陷岩石试件在真三轴压缩下的破坏行 为。LI 等^[9] 对砂岩进行了一系列真三轴试验, 研究 了裂隙岩石的破裂特征和破坏机制。ZHENG 等^[10] 对硬岩在常规和真三轴应力状态下的破坏进行了对 比分析研究。WANG 等^[11] 基于自主研发的真三轴 多功能流固耦合试验系统开展砂岩损伤力学特性研 究。冯帆等[12] 探讨了不同含水状态红砂岩试样在 动静组合状态下的失稳破裂特征,从能量转化、力 学、物理以及化学的角度初步揭示了真三轴卸载-动 力扰动下水弱化岩爆机制。王凯等[13]进行了5种 不同真三轴应力路径下含瓦斯复合煤岩体渗流特性 及力学破坏特征试验研究。许文松等[14]通过真三 轴试验发现动力事故发生的主要原因是岩体内部能 量的积聚释放,岩体次生各向异性对岩体自身极限 储存能存在很大影响。杨成祥等[15]利用真三轴加 载系统和声发射监测系统,对3种蚀变岩的变形、强 度、破裂演化过程及微观破坏机制进行了分析。

本文利用真三轴力学试验装置,对现场取样制得的5组煤岩试件分别进行真三向应力力学试验与 真三向应力浸水作用下的力学特征研究,试样标准 尺寸:100 mm×50 mm×50 mm,分析深部煤岩体

* 收稿日期: 2023-04-18

作者简介:赵杰(1985—),男,山西长治人,工程师,主要从事矿山地压管理等方面的研究工作,E-mail:272370635@qq.com。

变形、强度变化、岩石破坏模式以及岩石破裂失稳全 过程,为现场采空区赋水情况分析提供技术指导。

1 试验概述

1.1 试验设备

采用的试验装置为实验室自主研发的集成了压 缩-拉伸-电磁卸荷的高刚性真三轴实验机,系统外 观及结构如图 1 所示。可进行符合储层应力条件的 真三轴岩石力学试验,该装置可以通过三方向刚性 加载实现 3 个主应力方向的独立加载,其中,真三轴 加载装置在中间主应力 σ_2 、最小主应力 σ_3 方向两端 加载轴均为主动加载,在最大主应力 σ_1 方向一端加 载轴为主动加载,另外一端为随动加载。

1.2 煤岩体真三轴力学试验

首先依据煤层应力条件确定真三轴岩石力学试验的应力水平。依据取样附近地应力测试结果,确定了室内真三轴岩石力学试验的应力水平。按照自



图 1 高刚性软岩真三轴实验机

重应力场计算,取样附近地层最小水平地应力值为 5~6 MPa,最大水平地应力值为 10~12 MPa,竖直 向地应力值为 9~10 MPa,见表 1。同时,图 2 为煤 层与岩性真三轴岩石力学特性试验应力水平示意 图。设定不同层位及岩性真三轴岩石力学试验最小 水平应力 σ_3 =15 MPa、垂向应力 σ_2 =20 MPa,最大 水平应力 σ_1 为加载破坏力。

深度/	最大水平	最小水平	垂向地应力值/	最大水平	最小水平	垂向地应力梯度/
m	地应力值/MPa	地应力值/MPa	MPa	地应力梯度/(MPa/m)	地应力梯度/(MPa/m)	(MPa/m)
470	$10 \sim 12$	$5 \sim 6$	9~10	0.021	0.017	0.025





图 2 真三轴力学试验应力水平

煤岩体真三轴岩石力学特性试验均采种混合的加载方式。在加载初期,最大主应力方向主动加载轴以力控为主,随动加载轴以位移控为主,通过随动加载轴跟随主动加载轴位移进行加载。图 3 为煤岩体真三轴岩石力学特性试验应力路径。首先, $\sigma_2 = \sigma_3$ 以恒定的应力加载速率 4 kN/min 加载, σ_1 以恒定的应力加载速率 2 kN/min 同步增压至 σ_3 设定的目标值,即 $\sigma_3 = \sigma_2 = \sigma_1 = 5$ MPa。在这个过程中,3 个主应力方向应力始终以静水压力的形式增长。然后,保持 σ_3 不变,以恒定的速率 4 kN/min 增加 σ_2 ,同时以恒定的速率 2 kN/min 增加 σ_1 至 σ_2 设定的目标值,即 $\sigma_2 = \sigma_1 = 12$ MPa。在这个过程中, σ_1 和 σ_2 始终保持相等。最后,保持 σ_2 与 σ_3 不变,岩样最大主应力方向以恒定变形速率 0.01

mm/min进行加载。此时,主动加载轴和随动加载 轴均以位移控为主,主动加载轴通过伺服反馈保持 岩样变形速率恒定,而随动加载轴始终跟随主动加 载轴位移。当岩样强度达到峰值强度后,根据岩样 变形的增大幅度调整变形速率,直到最终达到残余 强度。



2 试验结果及分析

2.1 岩样力学特性及破坏模式

通过实验室真三轴试验机开展5组煤岩层岩样的力学试验测试,具体效果如图4所示,图4为5组

煤层岩样在真三向应力作用下的全应力-应变曲线, 通过图 4 中 1[#]、3[#]和 5[#]岩样全应力-应变曲线可以 总结出以下 3 点。

(1)煤层1^{*}总体上表现出较强的延性,其应力
-应变曲线可以分为裂纹压密阶段、弹性压缩阶段、
裂纹稳定扩展阶段、裂纹非稳定扩展阶段和宏观裂

纹形成阶段。

(2)3*岩样总体上表现出较强的延性,其应力-应变曲线可以分为裂纹压密阶段、弹性压缩阶段、 局部裂纹稳定扩展阶段、局部裂纹压密、裂纹稳定 扩展阶段、裂纹非稳定扩展阶段和宏观裂纹形成 阶段。



图 4 1[#]、3[#]和 5[#]岩样全应力-应变曲线对比

(3)5*岩样总体上表现出较强的脆性,其应力-应变曲线表现出阶段性特征,即裂纹压密阶段、弹 性压缩阶段、裂纹稳定扩展阶段、裂纹非稳定扩展 阶段和宏观裂纹形成阶段。

通过图 5 中 2^{*} 和 4^{*} 煤层岩样为在浸水前后真 三向应力作用下的全应力-应变曲线可以总结出以 下 2 点。

(1)2^{*}岩样表现出理想弹塑性和较强的延性, 岩样浸水后的应力-应变曲线表现出阶段性特征,第 一阶段岩石变形随应力近乎线性增加,到达一定应 力后,变形快速增加,应力-应变曲线近水平。2*岩 样浸水后表现为理想弹塑性,当岩石强度超过其峰 值强度4.14 MPa时,岩石发生破坏,其后强度几乎 无变化。岩石在发生浸水及应力破坏后,峰值强度 降低了55.3%,力学性质弱化,岩石平行层理方向 膨胀变形量大于垂直层理方向膨胀变形量,岩石在 浸水以及应力破坏后沿层理方向持续发生滑移,该 层位岩石在真三向应力和地层浸水后的变形受层 理影响较大。浸水后,2*岩样弹性模量降低了 33.5%,变形能力增加。



图 5 2[#]和 4[#]岩样浸水前后全应力-应变曲线对比

(2) 4^{*} 岩样总体上仍然表现出较强的脆性,岩 样的密度为 1.402 g/cm³,岩样浸水后的阶段性强 度特征与未浸水试样一致,可以看出,浸水后仍具 有较高的峰值强度,且岩石在发生破坏后,其仍然 具有残余强度,4^{*} 岩样浸水前后力学性质对比,浸 水后 4[#] 岩样峰值强度降低了 16.4%,力学性质弱 化。岩石在垂直层理方向的变形能力较强,该层位 岩石在真三向应力及浸水条件下的变形受结构影 响较大。浸水后,4[#] 岩样弹性模量降低了 8%,变形 能力增加。

2.2 真三向应力下岩石的表观破坏模式及破裂失 稳全过程

通过观察5组试件表观破裂模式,研究该试样

在岩石真三轴条件下的破裂模式,如图 6 所示,同时 使用声发射设备监测真三向应力下岩石破裂失稳 全过程,获得如图 7 所示的岩样声发射破裂特征。



图 6 1[#]、2[#]、3[#]、4[#]和 5[#]岩样表观破裂模式





图 7 1[#]、2[#]、3[#]、4[#]和 5[#]岩样声发射破裂特征

1[#] 岩样的峰值强度为 9.266 MPa 且破裂模式 表现为结构控制型剪切破坏,以层理方向剪切滑移 为主:2[#] 岩样浸水前的峰值强度为 4.140 MPa,浸 水后,峰值强度降低了 55.3%,其破坏模式表现为 结构控制型和应力控制综合控制型剪切破坏,煤岩 体浸水后的破坏受层理结构和应力的综合控制;3* 岩样的峰值强度为 10.042 MPa 且破坏模式表现为 结构和应力综合控制型剪切破坏,当煤体层理不发 育时,煤岩体的破坏受层理结构和应力的控制;4* 岩样浸水前峰值强度为11.714 MPa,浸水后峰值强 度降低了16.4%,其破坏模式主要表现为结构控制 型剪切破坏,该试样岩石剪切破坏表现主要为结构 控制,结构面受到水的润滑作用,裂纹多沿着结构 面扩展,岩石易沿结构面产生滑移;5*岩样的峰值 强度为 12.378 MPa 且破坏模式表现为结构控制型 剪切破坏为主,以层理方向剪切滑移为主。

通过对比岩石破裂特征图和声发射破裂特征 图,发现无水煤岩体在裂纹压密阶段,其原始裂隙 被压密;进入弹性变形阶段后,岩石不会产生次生 裂隙;当进入岩石塑性阶段,即达到岩石的损伤强 度时,岩石内部裂隙由稳定扩展进入到非稳定扩 展;当岩石达到峰值强度以及峰后阶段,岩石随即 产生宏观裂隙。浸水煤岩体在裂纹压密阶段,产生 较多声发射信号,初始原生裂隙由于水的进入,层 理胶结程度减弱,水作用后产生的初始裂隙被压 密;进入弹性变形阶段后,岩石不会产生次生裂隙; 当进入岩石塑性阶段,即达到岩石的损伤强度时, 岩石内部裂隙由稳定扩展进入到非稳定扩展;当岩 石达到峰值强度以及峰后阶段,岩石随即产生宏观 裂隙。

获得真三向应力下煤岩体无水和浸水条件下 煤岩体的破坏形式,以上试验结果与现象为力学模 型的开发提供了基础数据,进而对老旧采空区由于 气候变化造成的采空区再次赋水影响矿区稳定问 题的研究提供了研究基础。对矿区工程岩体稳定 性分析有着重要意义。

3 结论

本文基于真三轴煤岩体力学特性试验,以现场 原位煤岩体为模板制成标准试验试件,对煤岩体浸 水前后的破坏模式进行模拟研究,得到以下结论。

(1)浸水与否不会影响煤岩体变形方向,煤岩体岩石均沿第二主应力方向(垂直层理方向)、第三主应力方向(平行层理方向)发生膨胀变形,但是未浸水煤岩体在垂直层理方向的变形能力较强,而浸水后煤岩体平行层理方向膨胀变形量大于垂直层理方向。层位岩石存在受层理影响、受层理和应力同时影响以及受结构影响3种形式。

(2) 通过研究浸水前后煤岩体真三向应力下的 力学特征发现,浸水前煤岩体层位岩石存在受层理 影响、层理+应力同时影响和结构影响3种形式;在 发生浸水后,2[#]岩样峰值强度降低了55.3%,4[#]岩 样峰值强度降低了16.4%,力学性质弱化。更加真 实地证明了浸水作用会极大地降低煤岩体的稳 定性。

参考文献:

- [1] 尤明庆.围压对岩石试样强度的影响及离散性[J].岩石力学 与工程学报,2014,33(5):929-937.
- [2] 陈亮,刘建峰,王春萍,等.北山深部花岗岩不同应力状态下声 发射特征研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(增刊2): 3614-3618.
- [3] DU Chenyan, MA Zhigang, LI Xuefeng. True Triaxial Study on Aeolian Sand Subgrade[J]. Journal of Physics: Conference

Series, 2021, 1972(1):012110.

- [4] GAO Yaohui, WANG Kezhong, ZHOU Chang. A numerical study on true triaxial strength and failure characteristics of jointed marble[J]. Acta Geotechnica, 2021, 17:2001-2020.
- [5] SHEN Wei, Liu GUANG Jian, DOU Lin ming et al. Influences of True Triaxial Loading-Unloading Stress Paths on Mechanical Properties and Wave Velocity of Coal Samples subject to Risk of Rock Burst[J]. Shock and Vibration, 2021, 2021:4074159.
- [6] DUAN Minke, JIANG Changbao, YIN Wenming, et al. Experimental study on mechanical and damage characteristics of coal under true triaxial cyclic disturbance [J]. Engineering Geology, 2021, 295:106645.
- [7] CHEN Dong, LI Nan SUN Weichen. Rupture properties and safety assessment of raw coal specimen rupture process under true triaxial hydraulic fracturing based on the source parameters and magnitude[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 158:661-673.
- [8] CHANG Xu, ZHANG Xu, DANG Faning, et al. Failure Behavior of Sandstone Specimens Containing a Single Flaw Under True Triaxial Compression[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(5):2111-2127.
- [9] LI Bangxiang, YU Song, YANG Lei, et al. Multiscale fracture characteristics and failure mechanism quantification method of cracked rock under true triaxial compression[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2022, 262:108257.
- [10] ZHENG Guoqiang, TANG Yonghui, ZHANG Yan, et al. Study on Failure Difference of Hard Rock Based on a Comparison Between the Conventional Triaxial Test and True Triaxial Test [J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 923611.
- [11] WANG Man, DU Weihang, WANG Yingwei, et al. The Effects of True Triaxial Loading and Unloading Rates on the Damage Mechanical Properties of Sandstone[J]. Sustainability,2022,14(19):100-108.
- [12] 冯帆,陈绍杰,王琦,等.真三轴卸载-动力扰动下自然与饱水 砂岩破坏特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2022, 41(11):2240-2253.
- [13] 王凯,郭阳阳,王刚,等. 真三轴路径下含瓦斯复合煤岩体渗流 及力学破坏特性[J]. 煤炭学报,2023,48(1):226-237.
- [14] 许文松,赵光明,孟祥瑞,等.真三轴加卸载岩体各向异性及能 量演化机制[J].煤炭学报,2023,48(4):1502-1515.
- [15] 杨成祥,陈祥艳,周建华.三山岛金矿深埋蚀变硬岩真三轴压 缩下的力学性质[J].东北大学学报(自然科学版),2022, 43(11):1599-1606.