

高应力下含水煤岩力学特性研究现状

姚凯文

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2022年5月18日; 录用日期: 2022年6月21日; 发布日期: 2022年6月28日

摘要

针对含水煤岩在高应力条件下的力学特性, 从含水煤岩的力学特性、含水煤岩的本构方程等方面, 对国内外具有代表性的相关研究进行梳理, 同时对下一步研究进行展望。目前针对高应力条件下含水煤岩的研究现状指出, 在高应力条件下煤岩的脆性破坏会向延性、塑性转变, 同时煤岩材料在破坏时的扩容现象将会消失。煤岩的强度会随着含水率的增加而降低。针对含水煤岩的损伤机理的研究, 多数研究都集中在水因子对煤岩强度参数、变形参数的影响, 忽视了在压缩过程中煤岩内部孔隙水压力对煤岩破坏机理的影响, 针对含水煤岩的损伤破坏机制研究还较少。

关键词

高应力, 含水煤, 力学特性

Research Status of Mechanical Properties of Water-Bearing Coal Rock under High Stress

Kaiwen Yao

College of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: May 18th, 2022; accepted: Jun. 21st, 2022; published: Jun. 28th, 2022

Abstract

In view of the mechanical properties of water-bearing coal rock under high stress conditions, the representative relevant researches at home and abroad are sorted out from the mechanical properties of water-bearing coal rock and the constitutive equation of water-bearing coal rock, and the future research is prospected. At present, according to the research status of water-bearing coal rock under high stress condition, it is pointed out that under high stress condition, the brittle failure of coal rock will change to ductility and plasticity, and the dilatancy phenomenon of coal rock material during failure will disappear. The strength of coal and rock decreases with the increase

of water content. Most of the researches on the damage mechanism of water-bearing coal and rock focus on the influence of water factor on the strength and deformation parameters of coal and rock, and ignore the influence of pore water pressure inside coal and rock on the failure mechanism of coal and rock during the compression process. There are few researches on the damage and failure mechanism of water-bearing coal and rock.

Keywords

High Stress, Water Coal, Mechanical Properties

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国的能源结构为“富煤、贫油、少气”，其中煤炭的资源储量占据了一次能源的 94% [1]，所以在我国的《能源发展“十三五”规划》[2]中明确指出煤炭产业是我国的经济命脉以及能源安全的基础，在未来很长一段时间当中都将在一次能源结构中占据主体地位。

煤岩的力学性质复杂，其有效开采离不开强度的研究。而煤岩的强度受温度、水、应力等因素影响严重，其中水的影响最为突出。煤层注水最早用于解决矿道工作面的粉尘问题，后来广泛应用于预防冲击矿压、防治自然以及提高煤层气的抽采效率等多个方面。同时防水煤柱的预留、顶煤的冒放等都需要研究水因子对煤岩的弱化作用[3]。与此同时，我国的露天煤矿在整体的煤炭生产中占比较小，主要的煤炭生产依靠井工矿。但伴随着我国对能源需求量越来越大，浅层的煤炭资源已经几近枯竭，煤炭开采开始逐步向深部发展。煤层深度的增加必然导致地应力增加、煤层气吸附力增加以及煤岩渗透性降低等诸多问题，与水相关的事端越发频发[4]。

频繁的事故不但威胁着人们的生命财产安全，而且对于正常的生产也有着严重的影响。因此有必要研究深部含水煤岩的力学特性，国内外目前对深部含水煤岩的物理力学特性的研究主要集中在以下的两个方面：一是高应力条件下含水煤岩的物理力学特性研究；二是针对水因子对煤岩物理力学特性的影响研究。其中主要集中在水因子对煤岩的静动力学特性、破坏特征以及声学特征、高应力下煤样各项力学性能的变化及细观损伤、不同含水率下水因子对煤岩的劣化效应等分析研究。本文主要对上述研究内容以及煤岩的损伤破裂机理本构模型的研究成果的进展进行简要的综述。

2. 高应力对煤岩力学性质研究

深部的煤岩相较于浅层的煤岩承受着更大的地应力，在应力环境、煤样内部的裂隙发育情况等多个方面都与浅部煤岩有着明显区别，因此其变形情况、破坏特征以及破坏过程中的裂隙变化都会发生变化，强度、泊松比、弹性模量以及声发特征都会因为所应力力的不同而发生变化[5]。李小双[6]等对含瓦斯煤岩进行了不同围压条件下的三轴试验，实验结果表明，随着围压的增加，含瓦斯煤的抗压强度、弹性模量、峰值应变均会随之增加。不同于其他强度高的岩石，煤岩内部裂隙多，导致其强度以及其他力学参数的离散型要明显高于其他岩石。杨永杰[7]等利用超声波测速试验，得出了煤岩声速与力学参数之间的关系，为实验选样阶段降低煤岩离散性提供了新的理论依据，同时借助三轴实验，得出煤岩的弹性模量会随着围压的增加呈现非线性增加的规律。杨永明等[8]借助 CT 扫描技术发现围压会改变岩石的裂隙特

征且深部岩石裂痕的形态规则。

煤岩在单轴压缩以及低围压的情况下,一般会呈现脆性破坏,而在围压较高的情况下,煤岩的脆性破坏特征会转向塑性破坏。苏承东[9]等研究表明在低围压下,煤岩的应力应变曲线中有明显的弹性阶段,但在高围压下会呈现非线性特征,有着明显的塑性变形特征。刘泉声[10]进行了高应力条件下的常规三轴试验,研究结果表明围压增加后,煤岩的破坏形态会逐渐转变为延性破坏,同时在围压为 50 MPa 后,煤岩的轴向应变会表现为塑性流动状态。谢和平[11]等对三种典型煤岩进行了三轴卸荷实验,以模拟绵阳在开采过程中煤体的应力变化过程,结果表明卸荷的速率会改变煤岩的破坏特征。Goodman [12]对不同的岩石进行了不同围压下的三轴试验,同时指出了岩石发生脆延性转变的围压条件,石垩岩、石灰岩、花岗岩的脆延性转变发生在围压为 10 MPa、20~100 MPa 和 100 MPa 以上。

综上所述,深部煤岩的破坏形态、强度以及变性特征与浅部煤岩都有着明显的区别。煤岩的强度会因为围压的增加而增加。开采深度的增加会导致煤岩的破坏形式发生明显变化,由脆性破坏向延性、塑性转变。深部岩石的破坏符合非线性岩石强度特征,同时煤岩材料在破坏时的扩容现象将会消失。

3. 含水煤岩的力学特性研究

水-煤作用一直是岩石力学领域研究的热点和难点。因为煤岩的均质性差、内部裂隙多等影响,在受到水因子的影响后,其力学性质会发生明显变化。研究煤岩在水因子的影响下,力学性质的变化规律,有助于进一步分析水对煤样的损伤劣化机理。

目前,国内外学者研究认为,水对煤岩的力学作用机制主要有以下几种:

1) 化学效应。水会充满煤岩的裂隙,在一定条件下与煤岩中的一些化学成分发生化学反应,从而使这些成分被腐蚀、溶解,最终导致煤岩强度降低。

2) 应力的垮塌作用。水的溶解作用会导致裂隙尖端高强度的 Si-O 键断开,从而促进裂隙不断发育。这需要较长的时间才可以实现,同时与水分子向裂隙尖端发展的深度有关。

3) Rhebinder 效应。进入煤岩裂隙的水分子会被吸附在岩石颗粒的表面,导致其表面性质发生改变,从而降低其强度。这一点也需要水与煤岩长时间接触才能实现。

4) 煤岩在饱水后,受到毛细管压力的影响使其发生软化作用。

5) 岩石颗粒表面吸附水分子后的性质与裂隙水导致煤岩的弱化作用向联系。水因子导致岩石强度降低已经成为了广大学者的共识。煤岩中存下这大量宏观、微观裂隙。这些实际存在的裂隙会导致煤岩的强度、弹性模量、极限应变等力学参数呈现复杂性变化。

3.1. 含水煤岩的宏观力学特性研究

邱吉龙[13]研究了不同含水率下煤岩的力学性质,从微观的角度阐释了活性剂对煤岩力学性质产生影响的原因。刘忠峰[14]等进行了干燥和饱水两种状态下的煤岩强度试验,结果表明,含水率不同的情况下其表现的力学特性也不相同。潘俊峰[15]等研究了浸水时间的不同对煤岩冲击性的影响将其将千秋煤层不同煤层的煤岩分别浸水 0 d、10 d、20 d、30 d,其后进行冲击倾向度实验。研究结果表明,具有强冲击倾向性的煤岩其冲击倾向性显著性降低,弱冲击倾向的煤岩则影响较小。陈田[16]等采用自制的浸水装置对煤岩进行了浸水实验,研究结果表面,浸水次数的增加会使得煤岩的应力应变曲线趋向于光滑,其抗压强度、弹性模量均会有所下降。Yao [17]等对含水煤的强度特征,结果表明含水率的增加会导致煤岩的应变增加,而峰值强度会降低,同时推导了具有含水率影响因素的本构模型。来兴平[18]等对不同的含水煤岩进行单轴压缩实验,研究其力学特性、破坏形态以及能量的释放特征。同时借助能量、振铃计数贡献率共同准则进行关键孕灾声发射信号的拾取。结果表明水因子会明显弱化煤样的强度、应变以及弹性模

量。刘谦[19]等借助电镜扫描和核磁共振技术,研究了受不同溶液浸泡后煤岩的微细观结构的变化规律。熊德国[20]等对煤层中的砂岩、泥岩以及砂质泥岩饱水,其后进行了三轴压缩实验,研究其软化特性,结果表明三种岩石在饱水后其粘聚力都出现了明显的下降,而摩擦因素的变化并不大。

同时,针对岩体的裂隙发育不同阶段的划分,学者们也做了大量的研究。Hoek [21]等根据单轴压缩实验结果,将脆性材料的裂隙发育划分为如下的五个部分:压密阶段、弹性阶段、裂隙稳定发育阶段、裂隙不稳定发育阶段以及峰后阶段。研究者可以从不同的角度对这些阶段进行定义,如:应力应变曲线、声发射的振铃计数等。其中典型的应力应变阶段裂隙发育如图 1 所示。

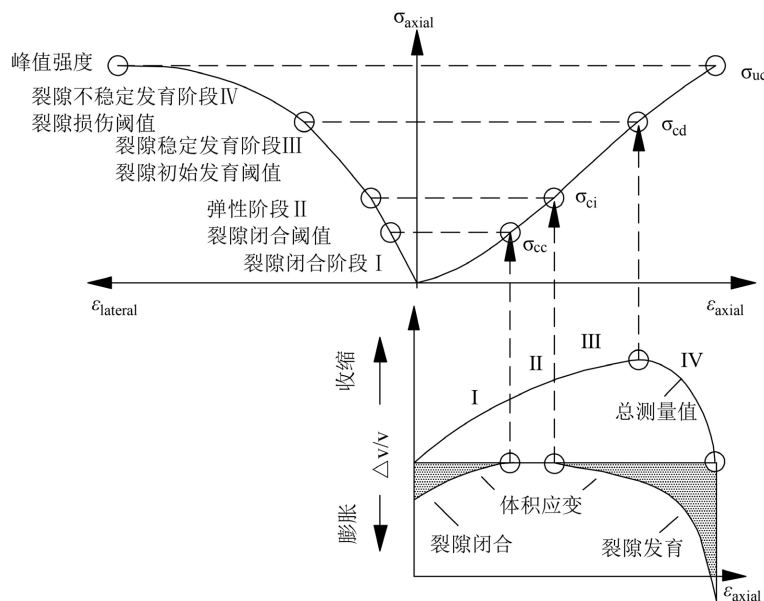


Figure 1. Stress strain curve
图 1. 应力应变曲线[22]

以上说明,目前针对含水煤岩的物理力学特性的研究主要集中在干燥、自然以及不同含水率的条件下。同时依靠抗压、抗剪、抗拉等实验得出,当煤岩的质地较为坚硬且完整时,煤岩强度会随着含水率的增加而减小,当煤岩质地松软且含有一定裂隙时,煤岩的强度随含水率的增加呈现出先增加后减小的变化规律。但国内外的学者一般认为煤岩的强度会随着含水率的增加而降低。

3.2. 含水煤岩的微观力学特性研究

煤的分子结构会与水分子相互作用,反应出煤岩在宏观上的力学特性,与此同时煤与水结合方式也是一种宏观力,在微观层面的表现。因此许多学者对含水煤岩的微观结构进行了研究,特别是水与煤岩之间的微观作用机理。

赵东[23]等对含水煤岩进行了 CT 扫描和三维模型重建,其结果表明煤岩在水分子的影响下孔隙率会出现明显下降。曾凡[24]在研究粉煤成型的过程中,发现在外力作用下,小的煤粒会进入到大的煤粒中,同时由于煤粒之间的相互作用、推挤等,使得煤粒堆砌的更加紧密。赵玉兰[25]等对潮湿状态下的粉煤颗粒制成型煤的机理进行了研究,结果证明此状态下的粉煤煤粒可以成型主要依靠煤粒之间的粘结力。因为在破碎的媒体中存在一些不饱和键,使得在煤粒的表面形成负电荷,水分子因为是极性的,所以会在煤粒表面形成水化膜,煤粒之间正是通过这种富有粘结力的水化膜粘结成型的。Funerstenal [26]等通过煤

岩分子的结构理论,指出煤岩中的含氧官能团遇水会发生水化和溶解作用,导致煤的表面具有亲水性,而这些基团一般会依附在煤的脂肪结构和芳香族骨架上。

以上针对煤大分子和水分子之间作用力以及微观结构的研究,虽然在一定程度上解释了水因子对煤岩特性的影响,但是缺乏煤岩微观结构和宏观力学特性之间联系的研究。

3.3. 含水煤岩的渗透性研究

煤岩是一种各向异性且多空隙的岩石,水分子在煤样的内部以自由水和结合水的方式存在。首先结合水对于煤岩的渗透性不产生影响,所以学者在研究时多考虑自由水。煤岩内部的自由水在水头压力的影响下会形成渗流场,不断的冲刷煤粒、软化煤样内部的矿物质,使得其粘聚力、强度、泊松比以及弹性模量都呈现出降低的趋势。同时水分子还会对裂隙和裂隙的壁面施加一定的法向力和切向力,从而改变煤岩所受的有效应力。

有些学者[27]会借助压力梯度的假设,进行不同有效应力和渗透率条件下煤岩渗流规律的分析,但实际环境中影响含水煤岩气体渗流的影响因素非常多。

Shi [28]等借助实验发现,当煤岩的含水率在一定限度内,渗透性会随着含水率的增加而增加,而一旦超过这个限度,渗透性则会极限下降。Louis *et al.* [29]研究发现多孔介质的孔隙特征会直接影响到其束缚水的能力,并借此建立了孔隙率与渗透性的耦合模型,同借助实验加以验证。A. G. Kin *et al.* [30]建立了煤岩在水、压力等多个条件耦合作用下的吸附模型,并且指出煤岩的水饱和度对其渗透率有直接影响。冯增朝[31]等借助含水煤岩吸附瓦斯导致煤样吸附膨胀角度,研究了煤岩饱水程度对其渗透率的影响。尹光志[32]在研究后,借助线性函数来表述含水煤岩水饱和程度的不同于瓦斯有效渗透率间的关系。魏建平[33]等借助型煤进行实验,结果表明随着含水煤岩含水率的增加其瓦斯渗透性会逐步降低。

以上研究证明水因子会改变煤岩的渗透性,且一般煤岩的含水率与其渗透性之间出现负相关的关系。

4. 岩石损伤模型研究

煤岩作为一种典型的非均质材料,内部具有很多分布随机裂隙、空隙以及层理等。难以通过统一的理论确定不同条件下的煤岩损伤。以往很多煤岩的损伤本构模型都没有考虑水因子对煤岩损伤的影响,而现实情况是煤岩的破坏是在复杂的赋存条件、岩性、应力等共同作用下发生的。分析煤样的劣化损伤演化规律,借此揭示煤岩内部的损伤劣化机理。煤岩的损伤本构模型可以反应煤岩的破坏变形过程,而建立损伤模型的关键在于确定损伤变量。目前主要有两种方式可以确定煤岩的损伤变量:第一,假设煤岩应力-应变状态与损伤变量之间存在某种关系。第二,通过选取的随机概率分布描述煤岩损伤得到损伤变量[34]。

孙传猛[35]等通过提取电镜扫描图像信息,结合摩尔库伦理论对煤样的细观结果进行重构,获取初始损伤,以此建立了煤岩的损伤本构模型;王凯[36]等进行了不同含水率条件下原煤与型煤的单轴压缩应力应变曲线数据,借助 Drucker-Preger 强度准则对煤岩微元强度进行表征,以此建立不同含水率条件下的煤岩损伤本构模型。王在泉等[1]建立了波速和岩石结构分维之间的关系。并且建立了岩石损伤参量 D 与分形维数的关系:

$$D = \frac{\rho V_p'^2 - \rho(a - bD_f)^2}{\rho V_p'^2} \quad (1)$$

式中的 a 、 b 为回归系数。所以只需做到岩体的波速、弹性模量、密度以及分形维数基坑确定岩体的损伤参数 D 。

Yao [37]考虑到浸水时间会影响到煤岩的弹性模量,借助 Weibull 统计分布,建立了不同浸水时间影响下的煤岩损伤本构模型。秦跃平通过指数分布确定损伤变量,将损伤应变的释放率作为微元强度,以此建立了损伤模型;基于 Weibull 概率密度函数分布,曾晋[38]指出损伤模型中微元体的声发射参数可以用如下的格式表示:

$$n(t) = N \frac{m}{n} \left(\frac{t}{n} \right)^{m-1} \exp \left[- \left(\frac{t}{n} \right)^m \right] \quad (2)$$

其中: N 表示样品在破坏时总的声发射参数; m 、 n 表示岩石的物理性质、试验相关的参数; t 表示时间; 损伤变量的表达式为:

$$D = D_u \left(1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{n} \right)^m \right] \right) \quad (3)$$

5. 存在问题及解决方法

5.1. 存在的问题

国内外的很多学者针对含水煤岩的力学特性问题,在强度、变形特征、破坏机制、数值模拟等多个方面展开了大量的研究,也取得了很多实质成果。但是,煤岩自身内部存在很多天然的裂隙,这些裂隙的形成具有随机性、形状具有多样性,导致其力学性质也具有复杂性,至今对于高应力条件下煤岩中水-岩体的作用机制研究还不成熟,也不至于指导、解决各种实际的工程问题。

目前在具体研究方面存在如下的几个问题:

问题 1: 对于高应力条件下含水煤岩的力学特性研究,很少有从微观、细观以及宏观的多尺度分析含水煤岩力学特性。

问题 2: 目前,国内外学者研究中所使用到的煤样都是未经过矿区水体长期浸泡的,而是在实验时后期浸泡或者加压饱水的。因此在煤岩的力学特性上会和实际矿井内长期受矿区水体浸泡的煤岩存在差异。

问题 3: 在高应力条件下含水煤岩的破坏机制研究方面,主要从宏细观角度进行,缺乏在微观角度下研究煤岩体在水力耦合条件下的失稳行为;目前对含水煤样的变形破坏机制尚未完全理清,对含水煤岩裂隙发展破坏过程中的线性、非线性渗流特征、力学特性等规律还未形成统一的科学解释。

问题 4: 在数值模拟方面,很多研究者无法获取正确的矿区地质资料以及渗流参数,对煤岩体的裂隙结果无法进行定量化的描述。因为煤岩体基础参数的不准确,对水力耦合模型的选取也将失去实际意义;现有的数值模型,对实际工程问题的解决帮助不大,同时在本构关系、计算方法等选取方面没有统一的共识;在数值分析上没有有机结合不同数值方法的特点与优势,建立科学的、高性能的、功能齐全且结果可靠的分析方法;目前大多数模型的尺度都较大,计算过程缓慢。

问题 5: 在实际煤岩开采过程中,煤岩体中除了有水,还存在瓦斯、各种矿物质等。除了受到高应力的影响,还会受到温度的影响等。对于应力-瓦斯-水-温度等多场耦合的研究还需要进一步的深入。

5.2. 展望

通过总结分析国内外关于高应力条件下含水煤岩力学特性的研究现状,并进一步研究现有研究中的存在的问题,从解决采矿工程中实际问题的角度出发,对相关研究作出如下的一些展望。

1) 加强含水煤岩变形破坏全过程的研究。含水煤岩的破坏过程十分复杂,在水因子、高应力的共同作用下煤岩的初始细观结构发生劣化,从而改变煤岩的宏观力学特性,在水力耦合过程中实现从微观向

宏观的跨越。近些年，很多学者对煤岩破坏过程中的渗流问题进行了大量的研究，具体的研究工作从以下的几个方面发展。a) 借助声发射、CT、核磁共振等技术手段分析煤样从微观到宏观的逐步破坏过程，理清在实际工程中煤岩的压缩、剪切变形与渗流场的关系，从而分析含水煤岩的破坏机理，并且研究也逐步从宏观转向微观。b) 加强高水压力下煤岩破坏全过程的实验研究。

2) 建立水力耦合数学模型。水力耦合模型的选取需要结合实际的工程背景，但是理论模型的选取一直是研究的难点。主要原因是煤岩的裂隙结构难以实现真实表征，构建的数值模型最终难以与实际工程进行匹配，现有的很多经典模型自身又存在诸多的限制条件。因此不断更新和发展现场测量技术，提出新的理论模型，让实际的工程问题建立在可以反应真实情况的模型上，具体可以从以下的几个方面入手：

a) 发展在真三维条件下的煤岩结构面测量手段；b) 建立模型时要充分考虑煤岩在复杂的应力下自身微小裂隙的非线性变形、渗流特征；c) 大力发展三维视角的水力耦合数值模型，因为二维的数值模型难以做到真实反应实际工程状况，存在很大的局限性。

3) 完善水力耦合的理论体系。煤岩体是一个十分复杂的滋润地质体，当前人们对其的力学特性的研究还不测地，尤其是含水煤岩的方面。近些年来，研究者针对水力耦合下煤岩体的机制的研究已经取得了一些阶段性的成果，但事实有很多问题亟待解决。随着岩石力学、自然科学、实验技术等多方领域不断的发展、完善，可以更加深入、全面、综合地分析含水煤岩的力学特性，完整地揭露高应力条件下含水煤岩的损伤破裂机制。因此，需要开展以下几个方面的工作：a) 关于含水煤岩的力学特性，目前研究主要集中在干燥、函数率等参数条件下煤岩的物理力学特性。对于水力耦合作用下饱和和含水煤岩的力学特性研究还较少，但在实际工程中，煤岩很可能长期处于浸水和高应力沟通作用的状态，因此对于水力耦合作用下煤岩的力学特性研究就显得尤为重要。b) 针对含水煤岩的损伤作用机理，多数研究只是考虑了水因子对煤岩强度参数、变形参数的影响，忽视了在压缩过程中煤岩内部孔隙水压力对煤岩破坏机理的影响，针对含水煤岩的损伤破坏机制研究还较少。c) 基于合理的耦合模型，结合工程实践问题，从微观的角度研究含水煤岩的损伤破裂机制。

参考文献

- [1] 王拓. 高应力巷道含层理围岩变形机理及应用研究[D]: [博士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2021. <https://doi.org/10.27623/d.cnki.gzkyu.2021.000022>
- [2] 国家能源局. 能源发展“十三五”规划[Z]. 北京: 国家发改委, 国家能源局, 2016.
- [3] 郭海防. 水压力作用下煤岩损伤弱化规律研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2010.
- [4] 鲁俊. 深部煤岩真三轴力学响应特性及复合动力灾害研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2020. <https://doi.org/10.27670/d.cnki.gcqdu.2020.000490>
- [5] 杨永杰, 宋扬, 陈绍杰. 三轴压缩煤岩强度及变形特征的试验研究[J]. 煤炭学报, 2006, 31(2): 150-153.
- [6] 李小双, 尹光志, 赵洪宝, 王维忠, 敬小非. 含瓦斯突出煤三轴压缩下力学性质试验研究[C]//第十一次全国岩石力学与工程学术大会论文集, 2010: 3350-3358.
- [7] 杨永杰, 宋扬, 陈绍杰, 李廷春. 煤岩强度离散性及三轴压缩试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(10): 1763-1766.
- [8] 杨永明, 鞠杨, 陈佳亮, 高峰. 三轴应力下致密砂岩的裂纹发育特征与能量机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(4): 691-698.
- [9] 苏承东, 翟新献, 李永明, 李仕明, 刘中云. 煤样三轴压缩下变形和强度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(z1): 2963-2968.
- [10] 刘泉声, 刘恺德, 朱杰兵, 卢兴利. 高应力下原煤三轴压缩力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 24-34.
- [11] 谢和平, 周宏伟, 刘建锋, 高峰, 张茹, 薛东杰, 等. 不同开采条件下采动力学行为研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(7): 1067-1074.
- [12] 尹光志, 蒋长宝, 王维忠, 黄启翔, 司焕儒. 不同卸围压速度对含瓦斯煤岩力学和瓦斯渗流特性影响试验研究[J].

- 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 68-77.
- [13] 邱吉龙. 不同含水率煤体的物理力学性质试验研究[J]. 华北科技学院学报, 2013, 10(1): 6-9.
- [14] 刘忠锋, 康天合, 鲁伟, 高鲁. 煤层注水对煤体力学特性影响的试验[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(1): 17-19.
- [15] 潘俊锋, 宁宇, 蓝航, 彭永伟, 夏永学, 魏向志, 等. 基于千秋矿冲击性煤样浸水时间效应的煤层注水方法[J]. 煤炭学报, 2012, 37(s1): 19-25.
- [16] 陈田, 姚强岭, 杜茂, 朱晨光, 张博. 浸水次数对煤样裂隙发育损伤的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S2): 3756-3762.
- [17] Yao, Q., Li, X., Zhou, J., Ju, M., Chong, Z. and Zhao, B. (2015) Experimental Study of Strength Characteristics of Coal Specimens after Water Intrusion. *Arabian Journal of Geosciences*, **8**, 6779-6789. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1764-5>
- [18] 来兴平, 张帅, 崔峰, 王泽阳, 许慧聪, 方贤威. 含水承载煤岩损伤演化过程能量释放规律及关键孕灾声发射信号拾取[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(3): 433-444.
- [19] 刘谦, 黄建滨, 倪冠华, 郭玉森, 仲涛. 不同煤级煤液相侵入效应低场核磁共振实验研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 1108-1115.
- [20] 熊德国, 赵忠明, 苏承东, 王耕耀. 饱水对煤系地层岩石力学性质影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 138-146.
- [21] Hoek, E. and Bienawski, Z.T. (1965) Brittle Fracture Propagation in Rock under Compression. *International Journal of Fracture Mechanics*, **1**, 137-155. <https://doi.org/10.1007/BF00186851>
- [22] Eberhardt, E., Stead, D., Stimpson, B. and Read, R.S. (1998) Identifying Crack Initiation and Propagation Thresholds in Brittle Rock. *Canadian Geotechnical Journal*, **35**, 222-233. <https://doi.org/10.1139/t97-091>
- [23] 赵东. 水-热耦合作用下煤体瓦斯吸附解吸机理研究[D]: [博士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2012.
- [24] 曾凡, 胡永平. 矿物加工颗粒学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1995: 78-88.
- [25] 赵玉兰, 吉登高, 王琳. 原煤成型特性研究(III)煤的硬度和脆度与成型效果的关系[J]. 煤炭转化, 1999, 22(2): 59-62.
- [26] 徐永. 含水率影响成型煤样力学性质实验研究[D]: [硕士学位论文]. 廊坊: 华北科技学院, 2016.
- [27] 葛家理. 现代油藏渗流力学原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
- [28] Shi, J.Q. and Durucan, S. (2004) Drawdown Induced Changes in Permeability of Coalbeds: A New Interpretation of the Reservoir Response to Primary Recovery. *Transport in Porous Media*, **56**, 1-16. <https://doi.org/10.1023/B:TIPM.0000018398.19928.5a>
- [29] Louis, C. (1972) Rock Hydraulics. In: Müller, L., Ed., *Rock Mechanics*, Springer, Vienna, 299-387. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-4109-0_16
- [30] Cui, X. and Bustin, R.M. (2005) Volumetric Strain Associated with Methane Desorption and Its Impact on Coalbed Gas Production from Deep Coal Seams. *AAPG Bulletin*, **89**, 1181-1202. <https://doi.org/10.1306/05110504114>
- [31] 冯增朝, 赵东, 赵阳升. 块煤含水率对其吸附性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(z2): 3291-3295.
- [32] 尹光志, 蒋长宝, 许江, 彭守建, 李文璞. 煤层气储层含水率对煤层气渗流影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011(S2): 3401-3406.
- [33] 魏建平, 位乐, 王登科. 含水率对含瓦斯煤的渗流特性影响试验研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(1):, 97-103.
- [34] 龚鹱, 曲文峰, 行鹏飞, 赵奎. 岩石损伤理论研究进展[J]. 铜业工程, 2011(1): 7-11.
- [35] 孙传猛, 曹树刚, 李勇, 李国栋, 杨红运. 含初始损伤的煤统计损伤本构模型研究[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(2): 244-253.
- [36] 王凯, 蒋一峰, 徐超. 不同含水率煤体单轴压缩力学特性及损伤统计模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1070-1079.
- [37] 杜建坡, 王飞, 李秀芬. 岩石损伤本构模型研究进展[J]. 山西建筑, 2007(10): 179+210.
- [38] Yao, Q., Li, X., Zhou, J., Ju, M., Chong, Z. and Zhao, B. (2015) Experimental Study of Strength Characteristics of Coal Specimens after Water Intrusion. *Arabian Journal of Geosciences*, **8**, 6779-6789. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1764-5>
- [39] 曾晋. 温度-渗流-应力耦合作用下岩石损伤及声发射特征研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(1): 69-74.