

CO₂-荷载耦合作用下煤体细观统计损伤本构模型及验证

王 磊, 陈礼鹏, 谢广祥, 范 浩, 李少波, 邹 鹏, 张 宇

(安徽理工大学 深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室, 安徽 淮南 232001)

摘要: CO₂ 吸附会对煤体产生损伤劣化作用进而降低其稳定性, 对 CO₂ 封存的长期安全性提出挑战, 明确 CO₂ 劣化作用并建立本构模型至关重要。采用损伤力学理论和统计理论推导出能够综合反映 CO₂ 吸附和荷载耦合作用下煤体总损伤变量的计算公式, 并重点考虑了压密段的影响, 分段建立了 CO₂ 作用下煤体的细观统计损伤本构方程, 明确了模型各参数的确定方法。最后通过 CT 扫描实验系统、MTS 816 实验系统确定了本构模型参数, 并采用自主研制的气-固耦合实验系统对不同 CO₂ 压力下煤体进行了单轴压缩实验, 验证了模型的合理性。研究结果表明: ① 基于 CT 扫描获取的裂隙率和运用 Weibull 分布理论分别定义了吸附和受载作用下的损伤变量, 结合损伤理论进一步得到二者耦合作用下的总损伤变量, 并建立了细观统计损伤本构模型; ② 基于 CT 扫描技术的裂隙三维重构真实反映了 CO₂ 作用前后裂隙扩展特征, CO₂ 压力越高, 裂隙扩展越充分, 煤样三维裂隙参数和损伤变量越大, 所形成的空间裂隙网络越复杂; ③ CO₂ 对煤体力学性质劣化作用显著, 煤体的抗压强度与弹性模量随 CO₂ 压力增加分别降低了 49.78% 和 22.63%, CO₂ 对煤体的溶胀效应、塑化效应和气楔效应的综合作用导致了力学参数的降低; ④ 建立的 CO₂ 作用下煤体细观统计损伤模型理论曲线与单轴实验曲线具有较高的吻合度, 说明损伤本构模型能够较好地反映出 CO₂ 对煤体力学特性的损伤劣化作用, 体现了损伤本构模型及模型参数确定方法的合理性与适用性。

关键词: CO₂ 地质封存; 本构模型; 损伤变量; 力学特性; 裂隙演化

中图分类号: TD313 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2024)06-2630-13

Meso-statistical damage constitutive model and validation of coal under CO₂ - load coupling

WANG Lei, CHEN Lipeng, XIE Guangxiang, FAN Hao, LI Shaobo, ZOU Peng, ZHANG Yu

(State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mine, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: CO₂ adsorption causes damage degradation to the coal body and thus reduces its stability, challenging the long-term safety of CO₂ sequestration, and it is important to clarify the role of CO₂ degradation and establish an ontological

收稿日期: 2023-09-21 修回日期: 2023-12-22 责任编辑: 郭晓炜 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.1186

基金项目: 安徽省科技重大专项资助项目(202203a07020010); 深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室开放基金课题资助项目(SKLMRDPC22KF10)

作者简介: 王 磊(1980—), 男, 山东济宁人, 教授, 博士生导师。E-mail: leiwang723@126.com

通讯作者: 陈礼鹏(1998—), 男, 河南信阳人, 博士研究生。E-mail: honesty0511@126.com

引用格式: 王磊, 陈礼鹏, 谢广祥, 等. CO₂-荷载耦合作用下煤体细观统计损伤本构模型及验证[J]. 煤炭学报, 2024, 49(6): 2630-2642.

WANG Lei, CHEN Lipeng, XIE Guangxiang, et al. Meso-statistical damage constitutive model and validation of coal under CO₂ - load coupling[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(6): 2630-2642.



移动阅读

model. The damage mechanics theory and statistical theory were used to derive the calculation formula that can comprehensively reflect the total damage variables of the coal body under CO_2 adsorption and load coupling, and focusing on the influence of the pressure-tight section, the fine statistical damage ontological equation of the coal body under the action of CO_2 was established by segmentation, and the method of determining each parameter of the model was clarified. Finally, the parameters of the constitutive model were determined by CT scanning experiment system and MTS 816 experiment system, and the uniaxial compression experiments of coal body under different CO_2 pressures were carried out by the self-developed gas-solid coupling experiment system to verify the rationality of the model. The results show that: ① The damage variables under adsorption and loading were defined based on the fracture rate obtained from CT scanning and by applying the Weibull distribution theory, respectively, and the total damage variable under the coupling of the two was further obtained by combining the damage theory, and a fine-scale statistical damage constitutive model was established; ② Three-dimensional reconstruction of the fracture based on CT scanning technology realistically reflects the fracture extension characteristics before and after CO_2 interaction, the higher the CO_2 pressure, the fuller the fracture expansion, the greater the three-dimensional fracture parameters and damage variables of the coal samples, and the more complex the spatial fracture network formed; ③ CO_2 had a significant deterioration effect on the physical properties of the coal body, and the compressive strength and modulus of elasticity of the coal body were both reduced by 49.78% and 22.63%, respectively, with the increase of CO_2 pressure, and the combined effect of dissolution, plasticization and air wedge effect of CO_2 on the coal body led to the reduction of the mechanical parameters; ④ The theoretical curves of the fine statistical damage model of the coal body under the action of CO_2 have a high degree of agreement with the uniaxial experimental curves, which indicates that the present structural model can better reflect the damage degradation effect of CO_2 on the physical properties of the coal body, and embodies the reasonableness and applicability of the constitutive model and the method for determining the model parameters.

Key words: CO_2 geological storage; constitutive model; damage variable; mechanical properties; fissure evolution

随着工业化程度的提高, CO_2 排放量逐年增加^[1], 造成全球变暖、海平面上升等环境问题, 对地球生命系统造成严重威胁^[2]。地质封存是典型的负碳排放技术, 且煤层封存 CO_2 的同时可实现煤层气的高效采收, 具有明显的经济优势^[3-4]。然而, 在封存 CO_2 过程中, 煤层吸附 CO_2 会导致其内部细观裂隙萌生扩展从而影响强度、变形等力学特性, 对长期封存 CO_2 方面存在安全隐患^[5]。因此, 基于细观层面建立 CO_2 作用下煤体损伤本构关系可以为揭示 CO_2 损伤劣化机理奠定理论基础, 以及对煤层更高效、更安全地封存 CO_2 具有一定的理论参考价值。

通过本构关系来研究煤岩体在受力过程中的变形和破坏特征一直是研究热点之一, 王超等^[6]基于损伤力学理论, 结合煤岩在单轴压缩下的裂纹体积变化来研究煤岩的内部损伤演化过程, 并构建了相应的统计损伤本构模型。马秋峰等^[7]基于摩尔-库伦准则和能量耗散准则, 采用能量法定义了损伤变量, 由此构建了损伤-塑性本构方程。刘洪永等^[8]通过引入理想弹脆塑性模型和内切圆准则, 采用 FLAC3D 技术, 在德鲁克-普拉格塑性流动格式基础上建立采动煤岩体弹脆塑性损伤本构模型。另一方面, 外部载荷或环境作用会使得煤岩材料内部细观结构缺陷(微裂纹和微

孔隙等)萌生扩展而造成损伤, 损伤的演化与材料中微裂纹和微孔隙的发展及其大小、形状和分布密切相关。借助统计学理论可以较好地描述损伤演化^[9], 因此, 损伤力学理论与统计强度理论的结合逐渐成为研究本构模型的重要手段之一^[10]。唐春安^[11]假定各微元强度服从正态分布规律, 认为微元破坏积累才导致了岩样的宏观力学特性劣化。肖鹏等^[12]引入孔隙率来定义冻融损伤变量, 并采用损伤力学理论, 建立了冻融与围压耦合作用下岩石的损伤演化方程及细观损伤本构模型。ZUO 等^[13]基于断裂力学理论, 考虑煤体内部裂隙扩展演化建立了含瓦斯煤的气-力耦合本构方程, 该方程考虑了煤的摩擦因数、孔隙瓦斯压力、多孔弹性系数和断裂参数的影响。王登科等^[14]通过引入与塑性屈服准则相关联的各向异性损伤因子和损伤准则描述含瓦斯煤岩的塑性变形及损伤演化过程, 建立了能反映各种应力条件下含瓦斯煤岩力学行为的弹塑性损伤耦合本构模型。吴岩^[15]基于岩石力学和损伤力学, 研究了含瓦斯煤在三轴应力加载条件下的损伤演化过程, 建立了一种考虑含瓦斯煤压密阶段裂隙闭合效应的新型损伤本构模型, 并对其进行验证。以上研究为正确构建煤岩体损伤演化本构方程奠定了良好的基础, 而在气固耦合条件下大多是含

瓦斯煤的本构模型,对于CO₂-荷载耦合作用下煤体本构模型的建立仍需要进一步深入研究。

近年来,关于CO₂注入对煤体力学特性影响方面的研究受到了众多国内外学者的重视,并取得了丰硕的成果:朱川曲等^[16]通过对不同CO₂吸附平衡压力下煤样的三轴压缩试验测试,揭示了CO₂吸附后煤体力学性能的变化规律。MASOUDIAN M 和 VIETE D R 等^[17-18]发现有侧限压力和无侧限压力条件下的煤样经CO₂吸附后其强度及弹性模量均降低;SAMPATH K 和 RANATHUNGA A 等^[19-20]通过对不同吸附时间下煤体力学特性进行压缩实验,得出随吸附时间增加,煤体力学参数降低幅度变缓;HOL S 等^[21]对不同煤阶煤吸附CO₂后的强度变化进行研究,发现高阶煤比低阶煤强度降幅更大且具有更高的刚度;李清川等^[22]利用可视化恒容固气耦合试验系统对型煤开展了吸附CO₂后的单轴压缩实验,得到了气-固耦合加载过程中煤体损伤劣化规律与裂隙发育分形演化特征。上述研究均表明煤吸附CO₂后力学特性会出现劣化现象,而煤体宏观层面的力学特性降低是其微观性质综合作用出现损伤的结果^[23]。随着数字图像处理的发展成熟,X射线断层扫描(CT)技术因其具有无损探伤与三维重建的可视化能力,广泛应用于煤岩体微观损伤方面的研究^[24-25],可直观地展现损伤后岩石内部不同切面上的裂纹扩展情况,成为目前最广泛运用的一种无损检测技术。王登科等^[26-27]对受载煤体进行了温度和瓦斯影响下的CT扫描实验,获取了受载煤体的裂隙结构演化规律;杨更社等^[28]基于岩石损伤的CT扫描结果,定义了以CT数为损伤变量,构建了单轴压缩状态下的损伤本构方程;笔者^[29]利用工业CT对含瓦斯煤冲击破裂情况进行扫描,基于裂纹结构特征参数定量表征了含瓦斯煤破裂过程中裂纹扩展情况。

笔者基于煤样微元强度服从两参数的Weibull分布,考虑应力-应变曲线压密阶段的影响,以SMP准则为煤样强度准则,分段建立了包含CO₂吸附-荷载耦合作用损伤效应的微观统计损伤本构模型,结合工业CT扫描系统、MTS 816力学实验系统和自主研发的气-固耦合实验系统开展了CO₂作用下的单轴压缩实验,获取了不同CO₂压力下煤体内部微裂隙的扩展演化情况以及力学特性,并结合实验数据验证了理论本构模型的合理性。

1 细观统计损伤本构模型的建立

1.1 损伤变量

吸附气体后,煤样内部不可避免地会产生大量细

观裂纹^[22,24],并随着气体压力的升高而逐渐扩展,表明吸附气体会对煤体造成损伤;另一方面,在荷载作用下煤体内部缺陷萌生扩展,继而造成煤体损伤,引起力学性能劣化,受荷时表现为承载力的降低。因此在选择损伤变量时,应充分考虑气体吸附和荷载耦合作用对煤体的损伤。

1.1.1 吸附损伤变量

煤体的损伤变量已有大量研究,通常是利用宏观力学参数(如弹性模量、密度和超声波波速等)变化来表征损伤程度,而煤岩的破坏起始于煤岩在受荷载前已存在的初始损伤-裂隙或微裂隙,煤岩在外荷载作用下,内部的微裂隙或微裂隙会由于应力集中的作用而不断扩展,导致煤岩体宏观力学性能的劣化^[30],因此,煤体微观损伤是导致其力学性能劣化的本质原因。利用CO₂吸附前后煤样内部孔隙率来定义微观损伤变量,表征煤样在CO₂吸附作用下的损伤程度,微观损伤变量表达式为

$$D_m = 1 - \frac{1 - e_1}{1 - e_0} \quad (1)$$

式中,D_m为煤体微观损伤变量;e₀为未吸附CO₂时煤样的初始孔隙率;e₁为CO₂作用后煤样的孔隙率。

1.1.2 荷载损伤变量

煤岩体在荷载作用下的损伤源自于局部微元体的非线性渐进破坏,微元体强度服从Weibull分布,损伤体强度的概率密度函数P(F)为

$$P(F) = \begin{cases} \frac{m}{F_0} \left(\frac{F}{F_0}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m\right], & F > 0 \\ 0, & F \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中,F为微元体强度的分布变量;m、F₀为反映煤岩材料力学性质的Weibull分布参数。

当微元体承受应力超过极限时,即发生破坏。因此,将荷载作用下已经破坏的微元数目N_f与初始状态下微元总数目N的比值定义为荷载损伤变量D_f^[31]:

$$D_f = \frac{N_f}{N} \quad (3)$$

由于煤岩体受到外荷载作用时,其微元的破坏是随机的,因此煤岩体在外载荷由0增加至F过程中,其内部破坏的微元数目^[32]为

$$N_f = \int_0^F N P(y) dy = N \left\{ 1 - \exp \left[-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m \right] \right\} \quad (4)$$

进一步地,推导出荷载作用下损伤变量:

$$D_f = 1 - \exp \left[-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m \right] \quad (5)$$

1.1.3 吸附—荷载耦合作用下煤的总损伤变量

煤岩体在CO₂作用下其内部原始孔隙隙会扩展并萌生出新裂隙,导致损伤增加,加上荷载作用会使得新生裂隙与原有缺陷发生交互作用,使得损伤进一步加剧,最终形成吸附—荷载耦合作用下的动态总损伤。因此,新生动态损伤不能视作在原有损伤的基础上简单累加。

假设煤在吸附和受载两种状态下的损伤采用缺陷材料的体积来表示,即缺陷体积占材料总体积的比值^[12]。若原始煤样、吸附损伤煤样和吸附—荷载耦合作用损伤后煤样的有效体积分别为V₀、V_m和V_q,则

煤样吸附CO₂后的损伤为

$$D_m = 1 - \frac{V_m}{V_0} \quad (6)$$

受载后的损伤为

$$D_l = 1 - \frac{V_q}{V_m} \quad (7)$$

吸附—荷载耦合作用后的损伤D_c为

$$D_c = 1 - \frac{V_q}{V_0} \quad (8)$$

联立式(6)和式(7)可得

$$\frac{V_q}{V_0} = (1 - D_m)(1 - D_l) \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)可得

$$D_c = 1 - (1 - D_m - D_l + D_m D_l) = D_m + D_l - D_m D_l \quad (10)$$

将吸附损伤变量和荷载损伤变量代入式(10),可得煤岩体在吸附—荷载耦合作用下煤的总损伤变量:

$$D_c = 1 - \frac{1 - e_1}{1 - e_0} \exp \left[- \left(\frac{F}{F_0} \right)^m \right] \quad (11)$$

1.2 气固耦合作用下煤的损伤本构模型

利用应变等效假设^[33]和有效应力原理可得

$$\sigma_1^* = \sigma_1 / (1 - D) \quad (12)$$

$$\varepsilon_1^* = [\sigma_1^* - v(\sigma_2^* + \sigma_3^*)] / E \quad (13)$$

由式(12)和式(13)推导得到煤岩的损伤本构关系为

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= E \varepsilon_1 (1 - D) + v(\sigma_2 + \sigma_3) = \\ &= E \varepsilon_1 \frac{1 - e_1}{1 - e_0} \exp \left[- \left(\frac{F}{F_0} \right)^m \right] + v(\sigma_2 + \sigma_3) \end{aligned} \quad (14)$$

式中,σ₁^{*}、σ₂^{*}、σ₃^{*}分别为最大、中间和最小有效应力;v为泊松比;E为弹性模量;ε₁^{*}、ε₁分别为最大有效应变和主应变;D为损伤变量。

SMP准则既符合Mohr-Coulomb准则又克服了Drucker-Prager准则的抗压强度相等性^[34-35],其表达式为

$$I_1 I_2 / I_3 = K = 8 \tan^2 \varphi + 9 \quad (15)$$

$$\begin{cases} I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \\ I_2 = \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_1 \sigma_3 \\ I_3 = \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3 \end{cases} \quad (16)$$

式中,I₁、I₂和I₃分别为应力张量第一不变量、第二不变量和第三不变量;φ为岩石的内摩擦角;K为材料常数;σ₁、σ₂和σ₃分别为最大、中间和最小主应力。

SATAKE^[36]、MASTUOKA等^[37]对该准则进行了改进,使其同时适应黏结性材料和非黏结性材料,改进后的SMP准则表达式为

$$I'_1 I'_2 / I'_3 = K = 8 \tan^2 \varphi + 9 \quad (17)$$

$$\begin{cases} I'_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + 3\sigma_0 \\ I'_2 = (\sigma_1 + \sigma_0)(\sigma_2 + \sigma_0) + (\sigma_2 + \sigma_0)(\sigma_3 + \sigma_0) + (\sigma_1 + \sigma_0)(\sigma_3 + \sigma_0) \\ I'_3 = (\sigma_1 + \sigma_0)(\sigma_2 + \sigma_0)(\sigma_3 + \sigma_0) \\ \sigma_0 = c \cot \varphi \end{cases} \quad (18)$$

式中,I'_1、I'_2、I'_3分别为第一、第二、第三有效应力张量;σ₀为黏结力;c为煤岩黏聚力。

进一步推导^[38]得

$$\frac{\sigma_1 + \sigma_0}{\sigma_3 + \sigma_0} = \frac{1}{4} \times \left(\sqrt{8 \tan^2 \varphi + 9} + \sqrt{8 \tan^2 \varphi + 6 - \sqrt{8 \tan^2 \varphi + 9} - 1} \right)^2 \quad (19)$$

基于SMP准则下的岩石微元强度F^[39-40]:

$$F = f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = \frac{\sigma_1^* + \sigma_0}{\sigma_3^* + \sigma_0} \quad (20)$$

假定煤样屈服前服从Hooke定律,其内部微单元为线弹性单元,则有

$$\sigma_1^* = E \varepsilon_1 + 2v \sigma_3^* \quad (21)$$

将式(21)代入式(20)得

$$F = \frac{E \varepsilon_1 + 2v \sigma_3^* + \sigma_0}{\sigma_3^* + \sigma_0} \quad (22)$$

由于煤体吸附CO₂后微细观裂隙会萌生扩展,逐渐向宏观裂纹、裂隙转变,内部的孔隙率逐渐增加,从而产生一定的损伤(微缺陷)^[41],造成煤体在气固耦合作用下的单轴压缩应力应变曲线会存在明显的压密阶段^[42]。然而根据Weibull分布函数形式的特点,应力—应变曲线的形状主要与式中的指数函数部分有关,

因此,假定煤样内部的微观孔隙、裂隙是随机分布的,在压密阶段将指数部分变化为 $1 - \exp\left[-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m\right]$,从而得到煤在CO₂-荷载耦合作用下的细观统计损伤本构模型为

$$\sigma_1 = \begin{cases} E\varepsilon_1 \frac{1-e_1}{1-e_0} \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m\right] \right\}, & \varepsilon_1 \leq \varepsilon_p \\ E(\varepsilon_1 - \varepsilon_p) \frac{1-e_1}{1-e_0} \exp\left[-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m\right] + \sigma_p, & \varepsilon_1 > \varepsilon_p \end{cases} \quad (23)$$

$$F = \begin{cases} (E\varepsilon_1 + \sigma_0)/\sigma_0, & \varepsilon_1 \leq \varepsilon_p \\ [E(\varepsilon_1 - \varepsilon_p) + \sigma_0]/\sigma_0, & \varepsilon_1 > \varepsilon_p \end{cases} \quad (24)$$

式中, σ_p 、 ε_p 分别为应力应变曲线压密阶段终点的应力和应变。

2 模型参数的确定

2.1 参数 e

基于孔隙率定义细观损伤变量以表征煤岩体在CO₂作用下的损伤程度,其中参数孔隙率通过CT扫描实验来确定。

2.2 参数 m 和 F_0

对于参数 m 和 F_0 的确定,常用极值法和线性回归法进行求解^[43-44],2种方法各有千秋,极值法具有严格的数学逻辑和物理意义,线性回归法过程简单且拟合效果较好。因此,在压密阶段采用线性回归法进行求解,在压密阶段以后采用极值法确定模型参数 m 和 F_0 。

(1) 当 $\varepsilon_1 \leq \varepsilon_p$ 时,对式(23)第1段函数进行移项变形并取对数得

$$\ln\{-\ln[1 - \sigma(1 - e_0)/(E\varepsilon_1(1 - e_1))]\} = m_1 \ln F - m_1 \ln F_{01} \quad (25)$$

式中, F_{01} 为第1个阶段模型参数。

令 $Y = \ln\{-\ln[1 - \sigma(1 - e_0)/(E\varepsilon_1(1 - e_1))]\}$ 、 $X = \ln F$ 、 $b_1 = -m_1 \ln F_{01}$,则

$$Y = m_1 X + b_1 \quad (26)$$

通过对应力应变压密段数据进行拟合,即可求解得到压密阶段参数 m_1 、 b_1 ,从而得到

$$F_{01} = \exp(-b_1/m_1) \quad (27)$$

(2) 当 $\varepsilon_1 > \varepsilon_p$ 时,在极值点 $(\sigma_m, \varepsilon_m)$ 处,存在以下关系:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_m, \sigma_1 = \sigma_m, \frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} = 0 \quad (28)$$

对式(23)第2段函数两边进行求导得

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} = E \frac{1-e_1}{1-e_0} \exp\left[-\left(\frac{F}{F_{02}}\right)^{m_2}\right] \left[1 - \frac{m_2 E(\varepsilon_1 - \varepsilon_p)}{E(\varepsilon_1 - \varepsilon_p) + \sigma_0} \left(\frac{F}{F_{02}}\right)^{m_2} \right] \quad (29)$$

式中, F_{02} 和 m_2 为第2个阶段模型参数。

将式(28)代入式(29)和式(23)第2段函数得

$$\sigma_m = E(\varepsilon_m - \varepsilon_p) \frac{1-e_1}{1-e_0} \exp\left[-\left(\frac{F}{F_{02}}\right)^{m_2}\right] + \sigma_p \quad (30)$$

$$1 - \frac{m_2 E(\varepsilon_m - \varepsilon_p)}{E(\varepsilon_m - \varepsilon_p) + \sigma_0} \left(\frac{F}{F_{02}}\right)^{m_2} = 0 \quad (31)$$

对式(30)化简得

$$\left(\frac{F}{F_{02}}\right)^{m_2} = \ln \left[\frac{E(\varepsilon_m - \varepsilon_p)(1-e_1)}{(\sigma_m - \sigma_p)(1-e_0)} \right] \quad (32)$$

联立式(30)~(32)确定参数 m_2 和 F_{02} :

$$m_2 = \frac{E(\varepsilon_m - \varepsilon_p) + \sigma_0}{E(\varepsilon_m - \varepsilon_p) \ln \left[\frac{E(\varepsilon_m - \varepsilon_p)(1-e_1)}{(\sigma_m - \sigma_p)(1-e_0)} \right]} \quad (33)$$

$$F_{02} = \frac{E(\varepsilon_m - \varepsilon_p) + \sigma_0}{\sigma_0} / \left\{ \ln \left[\frac{E(\varepsilon_m - \varepsilon_p)(1-e_1)}{(\sigma_m - \sigma_p)(1-e_0)} \right] \right\}^{\frac{1}{m_2}} \quad (34)$$

2.3 参数 σ_0

根据式(14)可知,只需确定煤岩的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 即可得到参数 σ_0 ,而根据摩尔圆原理可得 c 和 φ 并通过式(35)和式(36)进行求解。

$$c = \frac{\sigma_c(1 - \sin \varphi)}{2 \cos \varphi} \quad (35)$$

$$\varphi = \arcsin \left(\frac{k-1}{k+1} \right) \quad (36)$$

式中, k 和 σ_c 为峰值应力与围压关系的斜率和截距。

为得到参数 σ_0 ,基于MTS 816系统对煤体开展围压分别为10、20和30 MPa下的常规三轴实验,得到应力应变曲线、峰值应力与围压之间关系分别如图1、2所示。代入式(35)和式(36),可求得煤体的黏聚力和内摩擦角分别为1.53 MPa和30.25°,进一步计算得到参数 σ_0 为2.62 MPa。

3 模型验证及分析

为了验证所构建的煤岩在CO₂作用下损伤演化方程、细观统计损伤本构模型的正确性和合理性,开展CO₂作用前后CT扫描实验以及CO₂吸附后力学实验,确定本构模型参数,并对比理论模型与试验结果。

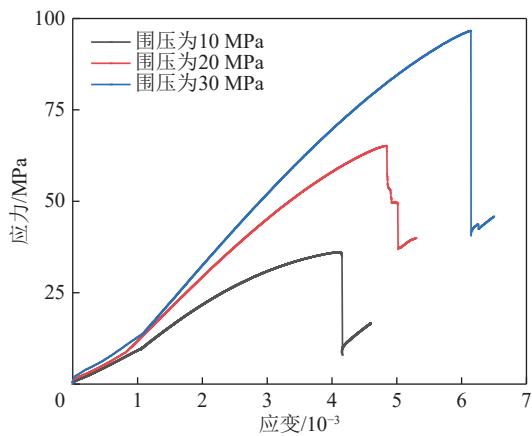


图 1 应力应变曲线

Fig.1 Stress-strain curves

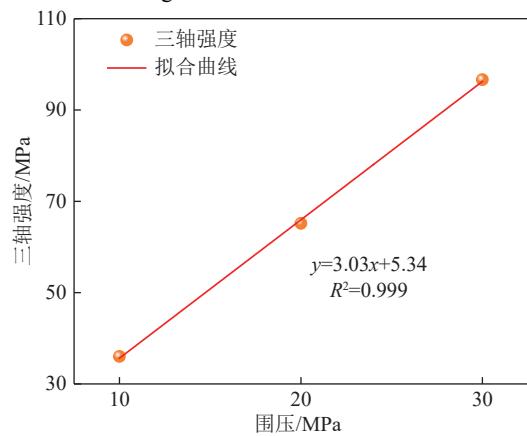


图 2 三轴强度与围压关系

Fig.2 Relationship between triaxial strength and confining pressure

3.1 实验系统

3.1.1 气-固耦合实验系统

自主研发了气-固耦合实验系统, 主要由气体吸附模块和数据采集模块组成, 如图 3 所示。气体吸附

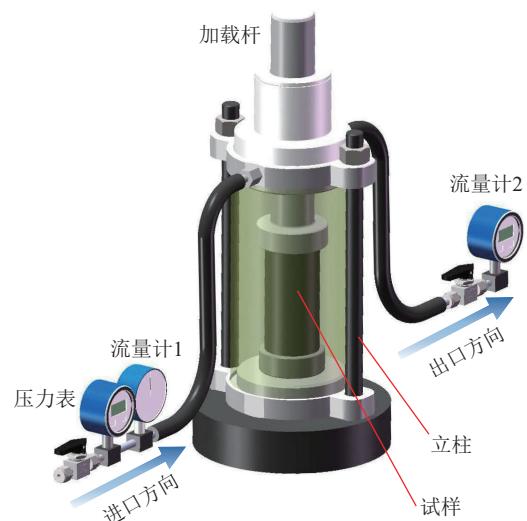


图 3 气-固耦合实验系统

Fig.3 Gas-solid coupling experimental system

模块主要包含样品罐、供排气流量监测装置; 数据采集模块主要是高精度气体压力传感器及流量计进行数据采集。吸附罐采用硬密封和密封圈密封双重密封方式, 增强了系统的密封性, 其最大气体压力负荷为 6 MPa。该实验系统可以与伺服压力机配合实现对标准煤岩试件在气体环境下的轴向加载。

对实验系统气密性进行了测试, 先对系统抽真空, 再进行充气, 测试结果如图 4 所示。气体压力快速上升、快速下降、缓慢下降, 最后变得几乎恒定。气体压力的变化过程可以解释为: 首先, 当气体按照预设值注入罐体中时, 气体迅速扩散到整个容器, 气体压力迅速上升; 其次, 当气体压力达到预定值时, 关闭气体入口的阀门。由于煤是一种双重介质, 游离气迅速进入孔隙和裂纹, 密封容器内的气体压力下降很快; 更次, 自由气体在煤的孔隙和裂隙中膨胀后, 由于范德华力的作用, 自由气体在孔隙和裂隙表面转变为吸附状态, 吸附的气体不再传递气体压力, 这导致气体密封装置中的气体压力进一步降低; 最后, 吸附/解吸平衡后自由气体压力基本稳定。图 4 中的气体压力变化曲线表明, 该气体密封装置具有良好的气密性, 满足煤体吸附/解吸实验条件。

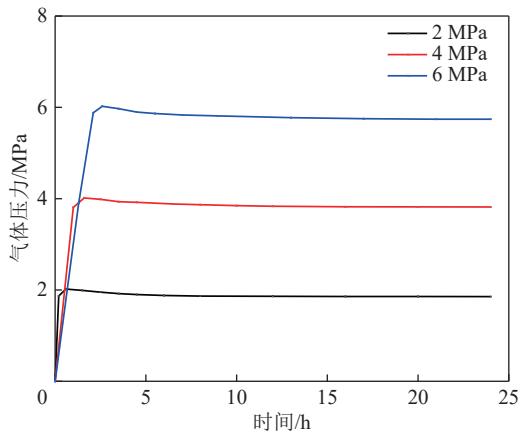


图 4 系统气密性测试结果

Fig.4 System airtightness test results

3.1.2 CT 扫描实验系统

CT 扫描实验采用安徽理工大学深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室的工业 CT 扫描系统, 如图 5 所示。

系统主要由射线源、机械扫描系统与自动控制系统、探测器系统及数据采集系统、计算机系统、辅助系统等组成, 并配置了高功率微米管和高功率纳米管, 高功率微米射线管的最大管路电压为 300 kV, 电流为 3 mA, 细节分辨能力 $\leq 2 \mu\text{m}$; 高功率纳米射线管的最大管路电压为 180 kV, 电流为 0.8 mA, 细节分辨能力 $\leq 1 \mu\text{m}$ 。通过计算机数控平台控制被测物体移动

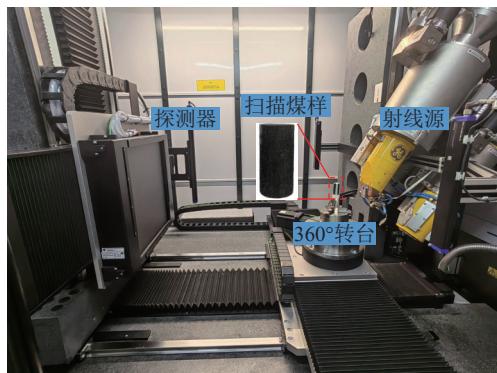


图 5 CT 扫描系统

Fig.5 CT scanning system

或旋转, 试件在扫描过程中随转台做 360° 旋转, 利用 X 射线的高穿透性对样品不同层面进行 X 光照射, X 射线穿过被测物体后, 由于部分光子会被样品吸收, 造成光强的衰减, 其衰减程度与材料类型、密度及厚度有关。

3.2 实验方案

实验煤样取自淮南张集矿块度大、完整性好的原煤, 利用取心机对其进行钻取, 取样规格为 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, 对其两端进行打磨, 加工完成后煤样使用保鲜膜进行包装, 以保持煤样最原始的形式。煤样基础物性实验测试结果见表 1。

表 1 煤样基础物性实验测试结果

Table 1 Experimental results of the basic physical characteristics in coals

工业分析				元素分析					%
M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}	S	O	C	H	N	
4.24	4.93	4.79	86.04	0.84	4.60	82.64	2.55	1.08	

加工完成的煤样如图 6 所示, 并采用真空干燥箱将煤样在 65°C 下干燥 12 h^[45], 当温度降至室温时, 使用 ZBL-U510 非金属超声波检测仪测定试样波速, 选



图 6 加工完成的煤样

Fig.6 Processed coal samples

取各向异性较小的煤样。

基于自主研发的气-固耦合实验系统, 对煤体开展初始 CO_2 压力 p 分别为 0、1、2、3、4、5 和 6 MPa 的吸附试验, 吸附保压 24 h, 并在吸附前后进行 CT 扫描, 再结合 MTS 816 系统对煤样进行力学测试实验, 具体步骤如下:

(1) 吸附实验。首先将煤样放至气-固耦合实验系统中并进行抽真空, 其次, 充入预定 CO_2 压力进行吸附实验, 吸附保压 24 h。

(2) CT 扫描实验。取煤样进行第 1 次扫描, 根据预扫描效果将参数设置如下: 电压为 180 kV, 电流为 $200 \mu\text{A}$, 曝光时间为 1 000 ms, 采集图片数量为 1 800 张, 分辨率为 $55 \mu\text{m}$ 。为保证扫描质量, 后续扫描均采用此扫描参数; 然后对煤样开展吸附实验, 吸附完成后, 对试样进行第 2 次 CT 扫描。每个压力条件下 1 个试样。

(3) 单轴压缩实验。煤样吸附 24 h 后, 将气-固耦合实验系统与 MTS 816 力学实验系统相结合, 开展预定 CO_2 压力下的力学特性测试实验 (每个压力条件下 3 个平行试样)。

(4) 重复以上步骤完成剩余实验。

3.3 实验结果

3.3.1 CT 扫描

基于 CT 扫描系统对吸附前后煤样进行扫描, 对原始切片进行图像堆栈、阈值分割等处理 (图 7), 得到煤内部裂隙结构的形态及分布, 实现试样内部裂隙的可视化。

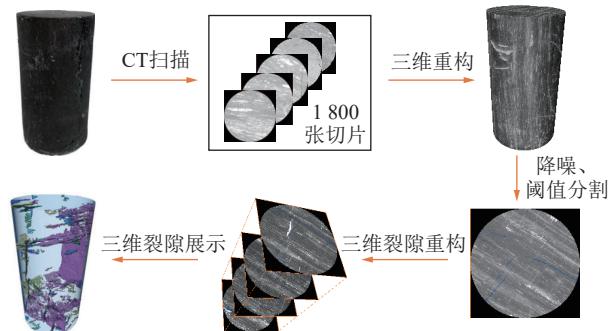


图 7 图像处理步骤

Fig.7 Image processing steps

不同 CO_2 压力下煤样吸附前后的三维裂隙结构见表 2, 其可以直观、完整地表征煤样内部三维裂隙动态演化规律。由吸附前扫描结果可以看出, 不同煤样内部原生裂隙分布迥异, 存在一定的非均质性。CT1 煤样存在带有倾角的原生裂隙; CT2 和 CT6 煤样由上端面至下端面零星分布一些小裂隙; CT3 煤样存

在一条原生主裂隙, 体积为 254.53 mm^3 ; CT4 和 CT5 煤样原生裂隙主要分布在中间区域。煤样在吸附 CO_2 后其内部裂隙均有明显增加, 初始 CO_2 压力为 1 MPa 时, 煤样吸附后沿薄弱面和原生裂隙扩展贯通, 并且萌生出新生裂隙; 压力增加至 2 MPa 时, 内部裂隙数量增加, 与原生裂隙交汇贯通, 内部损伤增加; 压力增加至 3 MPa 时, 原生主裂隙逐渐扩展, 并在中下部萌生出新生裂隙; 随初始 CO_2 压力逐渐增加至 6 MPa 的过程中, 煤样内部裂隙逐渐贯通和扩展, 新生裂隙占比逐渐增加, 裂隙网络逐渐复杂。

由表 2 可知, 受吸附压力影响, 煤样内部的孔裂隙呈现出不同的扩展演化规律, 煤体内部裂隙体积 V 、

孔隙率 e 和裂隙表面积 S 随 CO_2 压力的变化关系是反映气固耦合条件下煤样裂隙动态扩展演化过程最直观的体现。对煤样内部三维裂隙结构分布以及发育情况进行提取, 得到裂隙体积、孔隙率和裂隙表面积的量化值, 见表 3, 较煤样吸附前, 其均有所增长。由于试样存在原生裂隙, 采用各参数增量量化表征煤体三维裂纹扩展演化特征, 即三维裂隙参数^[29]:

$$\begin{cases} e_i = V_i/V \\ \Delta S = S_2 - S_1 \\ \Delta V = V_2 - V_1 \\ \Delta e = \Delta V/V \end{cases} \quad (37)$$

表 2 不同 CO_2 压力下煤样吸附前后的三维裂隙结构演化

Table 2 Three-dimensional fracture structure evolution of coal samples before and after adsorption under different CO_2 pressures

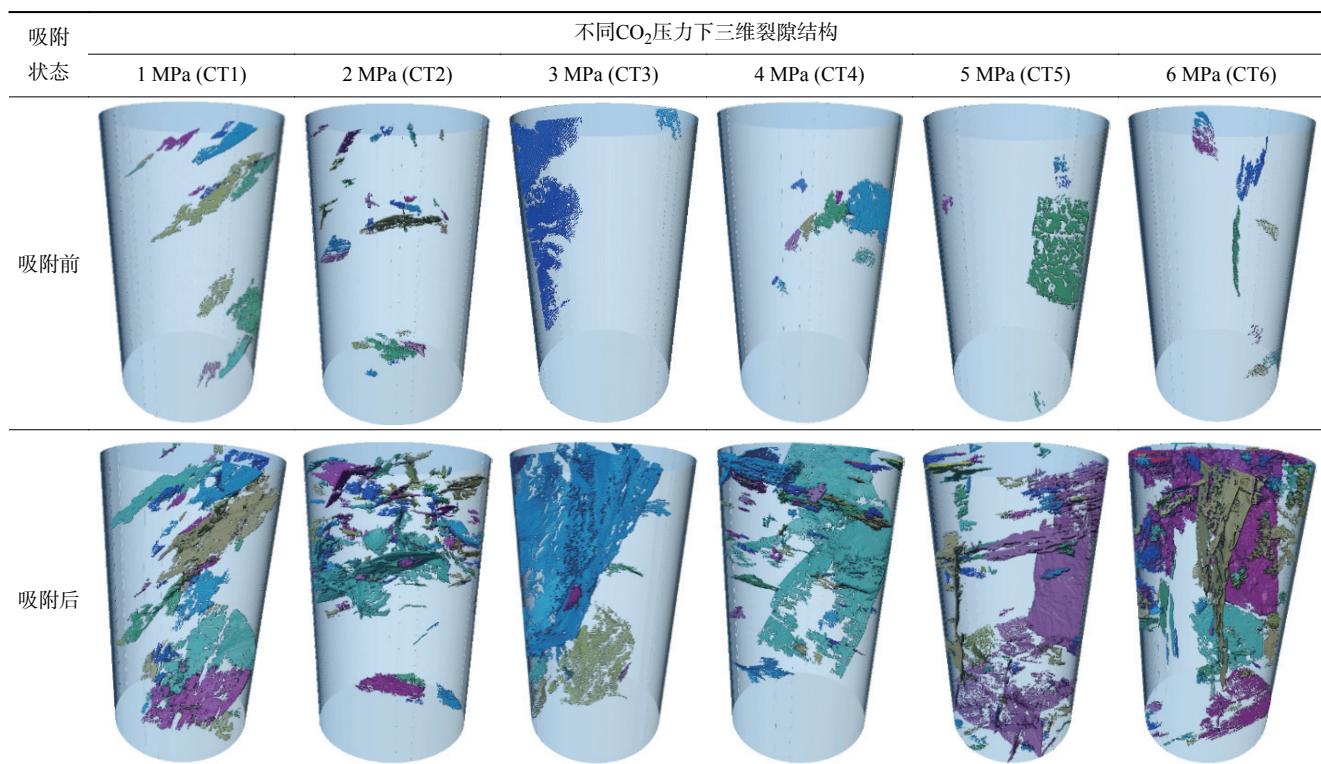


表 3 吸附前后煤样的裂隙表征参数

Table 3 Slit characterization parameters of coal samples before and after adsorption

煤样编号	原始体积/ cm^3	吸附前			吸附后			$\Delta V/\text{cm}^3$	$\Delta e/\%$	$\Delta S/\text{cm}^2$
		V_1/mm^3	$e_1/\%$	S_1/cm^2	V_2/mm^3	$e_2/\%$	S_2/cm^2			
CT1	195.49	294.16	0.15	200.21	1 920	0.98	1 077.22	1.62	0.83	877.01
CT2	202.08	237.23	0.12	144.93	6 600	3.26	1 172.44	6.36	3.14	1 027.51
CT3	196.60	264.04	0.13	177.38	11 220	5.71	1 510.08	10.96	5.58	1 332.70
CT4	197.53	208.96	0.11	122.06	18 490	9.36	1 719.89	18.28	9.25	1 597.83
CT5	194.39	252.56	0.13	163.46	27 150	13.97	2 080.60	26.90	13.84	1 917.15
CT6	197.06	197.74	0.10	111.69	44 430	22.55	2 134.61	44.23	22.45	2 022.92

式中, e_i 为吸附前后裂隙率, %, $i=1, 2, 1$ 代表吸附前, 2 代表吸附后; V_i 为吸附前后裂隙总体积, mm^3 ; V 为试样总体积, cm^3 ; Δe 、 ΔS 和 ΔV 分别为裂隙率增量 (%)、裂隙表面积增量 (cm^2) 和裂隙体积增量 (cm^3); S_1 、 S_2 和 V_1 、 V_2 分别为吸附前后裂隙总表面积 (cm^2) 和裂隙体积增量 (mm^3)。

随初始 CO_2 压力增加, 三维裂隙参数均呈上升趋势, 初始 CO_2 压力由 1 MPa 增加至 6 MPa 时, 三维裂隙参数分别由 1.62 cm^3 、 0.83% 和 877.01 cm^2 增加至 44.23 cm^3 、 22.45% 和 2022.92 cm^2 , 较 1 MPa 条件下分别增加了 42.61 cm^3 、 21.62% 和 1145.91 cm^2 , 表明初始 CO_2 压力越大, 其对煤体的损伤程度也越大。根据式(1)计算煤样细观损伤变量, 将其与初始 CO_2 压力关系绘制于图 8, 随初始 CO_2 压力升高, 细观损伤变量呈增长趋势。对 2 者进行拟合发现, 初始 CO_2 压力从 0 增长到 6 MPa 变化过程中, 煤样损伤变量由 0 呈二次函数关系增加到 22.47%, 表明随初始 CO_2 压力的提高, 煤体损伤劣化程度越来越大。

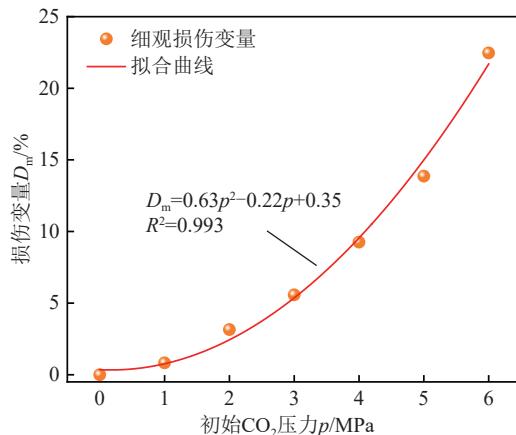


图 8 煤样细观损伤变量与初始 CO_2 压力关系

Fig.8 Relationship between fine-scale damage variables and initial CO_2 pressure in coal samples

煤样吸附 CO_2 后, 内部裂隙结构扩展演化, 主要表现在沿着原生裂隙扩展、萌生出新裂隙、新生裂隙与原生裂隙贯通 3 方面, 且随初始 CO_2 压力增加, 内部损伤加剧, 裂隙网络逐渐复杂。这是由于在 CO_2 进入煤体后, 并不能直接与所有的孔裂隙表面接触, 会形成压力梯度和浓度梯度, 压力梯度会形成渗流作用, CO_2 直接进入大裂隙、面割理和端割理, 在煤体内部表现为游离态形式, 其会对裂隙产生压力作用, 楔开煤体内部的裂隙, 从而扩大煤的孔隙通道; 浓度梯度会促使二氧化碳由高浓度向低浓度扩散, 使得煤基质以及矿物对 CO_2 产生不均匀吸附, 煤体内部萌生出新生裂隙; 另外根据断裂力学和热力学理论, 将 Gibbs 吸附方程代入 Griffith 方程可知, 煤吸附 CO_2 会引起吸

附质组分化学势的增大和表面能降低, 从而引起煤的原生裂隙拉伸强度也降低。因此在 CO_2 作用下煤体内部细观裂隙快速发育、扩展, 与原始裂隙相互交织, 不断演化, 最终形成复杂的裂隙网络, 并且随着初始 CO_2 压力增大, 气楔效应和不均匀吸附将会更加明显, 从而导致煤体内部损伤逐渐增加, 表明 CO_2 对煤体的损伤随压力增加而加剧。

3.3.2 力学特性

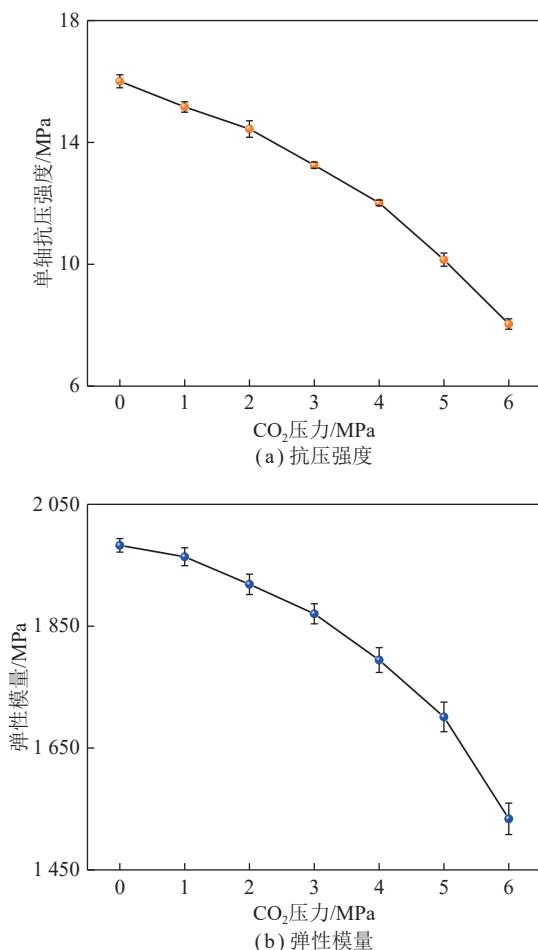
通过对不同 CO_2 压力下煤样进行单轴压缩试验, 得到煤样的峰值强度和弹性模量, 列于表 4。由表 4 可以看出, 由于煤样本身的非均质性和非连续性, 相同条件下煤样的力学性质会有一定的差别, 但是差别较小。

表 4 煤样物理及力学参数

Table 4 Physical and mechanical parameters of coal samples

初始CO ₂ 压力/MPa	试样	直径/mm	长度/mm	波速/(km·s ⁻¹)	峰值强度/MPa	弹性模量/MPa
0	A1	49.74	100.12	1.78	16.22	1 994.51
	A2	50.06	99.81	1.63	15.79	1 972.32
	A3	49.79	99.87	1.72	16.01	1 981.17
平均值					16.01	1 982.69
1	B1	49.79	99.95	1.69	15.32	1 968.35
	B2	50.20	100.20	1.75	15.19	1 947.63
	B3	49.69	100.81	1.63	14.98	1 975.95
平均值					15.16	1 963.98
2	C1	50.59	100.53	1.64	14.31	1 936.54
	C2	50.45	100.17	1.74	14.26	1 916.21
	C3	50.18	100.21	1.67	14.75	1 903.34
平均值					14.44	1 918.70
3	D1	50.23	100.71	1.71	13.24	1 888.51
	D2	49.93	100.41	1.67	13.16	1 866.31
	D3	50.40	100.20	1.75	13.36	1 856.36
平均值					13.25	1 870.40
4	E1	50.20	99.80	1.78	12.11	1 810.65
	E2	48.80	100.20	1.68	12.01	1 801.32
	E3	49.80	100.20	1.78	11.93	1 771.65
平均值					12.02	1 794.54
5	F1	50.14	100.10	1.63	10.36	1 727.81
	F2	49.80	99.80	1.72	9.93	1 680.61
	F3	49.80	99.60	1.69	10.16	1 694.87
平均值					10.15	1 701.10
6	G1	50.04	100.40	1.75	8.06	1 563.61
	G2	50.04	100.20	1.63	7.86	1 521.36
	G3	49.80	99.80	1.64	8.20	1 516.82
平均值					8.04	1 533.93

煤样在加载条件下测得的力学参数随初始 CO_2 压力的增加呈现出降低趋势, 如图 9 所示。随初始 CO_2 压力由 0 增加至 6 MPa, 抗压强度和弹性模量分别降低了 49.78% 和 22.63%, 表明 CO_2 会对煤产生劣化作用。分析可知, 力学特性弱化原因主要体现在 3 个方面: ① 随着 CO_2 压力的增大, 含有一定动能的 CO_2 通过渗流作用不断地进入煤样内部的孔裂隙中, 造成孔裂隙与基质之间 CO_2 浓度差异较大, CO_2 迅速扩散到煤基质中并通过吸附作用附着在煤体颗粒的表面, 降低了煤基质的表面能和煤基质之间的联结力, 使得煤体颗粒间的间距变大, 即 CO_2 吸附造成的膨胀效应导致了煤体抵抗变形能力和破坏能力降低^[46-47]; ② CO_2 吸附会引起塑化效应, 在二氧化碳注入煤的过程中, 它与煤的结构相互作用, 导致聚合分子的部分分解, 煤大分子定向性降低, 结构更加疏松, 分布更加紊乱, 在受载情况下更容易遭到破坏; 其次, CO_2 可以吸附在煤表面, 溶解到煤基质中, 最终导致组成煤质组的煤基质或颗粒的膨胀, 故注入 CO_2 煤岩力学性能减弱^[48]; ③ 游离态 CO_2 会作用于微裂隙, 产生气楔效

图 9 不同初始 CO_2 压力下煤样力学参数劣化曲线Fig.9 Deterioration curves of mechanical parameters of coal under different initial CO_2 pressures

应, 导致裂隙向深部及两侧扩展, 扩充煤体裂隙体积, 同时进入到煤颗粒内部的孔隙中, 促使颗粒膨胀。因此, 在游离态和吸附态 CO_2 的共同作用下, 造成煤体力学性质劣化。

3.4 煤样细观损伤本构模型验证

将煤样在不同初始 CO_2 压力下的应力-应变曲线按照 3.2 节进行分段求解, 可以得到本构模型中对应的参数 m 和 F_0 , 见表 5。

表 5 不同 CO_2 压力下模型参数选值Table 5 Value of constitutive model parameters under different CO_2 pressures

不同 CO_2 压力/MPa	压密阶段占比/%	模型参数			
		第1段($\varepsilon_1 \leq \varepsilon_p$)	第2段($\varepsilon_1 > \varepsilon_p$)	m_1	F_{01}
0	30.36	2.14	3.45	61.12	6.33
1	30.41	0.76	8.84	34.70	6.60
2	31.91	1.01	5.38	7.77	7.62
3	32.85	1.57	8.81	30.39	6.40
4	35.67	1.48	10.70	5.25	7.96
5	41.89	0.43	97.56	9.41	5.79
6	39.60	0.56	35.23	41.21	4.02

运用细观本构模型计算得到的应力应变理论曲线与实验曲线对比如图 10 所示, 可以看出, 本文建立的分段细观本构模型计算值与试验曲线重合度较高, 可以很好地描述 CO_2 作用过程对煤应力-应变曲线压密阶段的影响, 以及准确表征 CO_2 对煤样力学特性的损伤劣化作用。煤样的应力应变曲线在 CO_2 作用后压密阶段均有所增长, 这是由于 CO_2 的作用下, 煤体内部微裂隙萌生扩展造成孔隙率增加, 且塑化作用使得煤骨架更加疏松, 导致煤体产生一定的损伤, 因此在建立损伤本构模型的过程中, 需要考虑压密阶段的非线性特征。

4 结 论

(1) 分别定义了煤体在 CO_2 作用和受载过程中的损伤变量, 并推导出吸附-荷载耦合作用下煤体的总损伤变量。分段建立了考虑压密阶段的吸附-荷载耦合作用下煤体细观统计损伤本构模型, 明确了模型各参数的确定方法。

(2) CT 扫描结果直观反映出煤样吸附 CO_2 后内部裂隙有明显扩展。采用三维裂隙参数定量表征了不同 CO_2 压力下裂隙发育扩展特征, 且随初始 CO_2

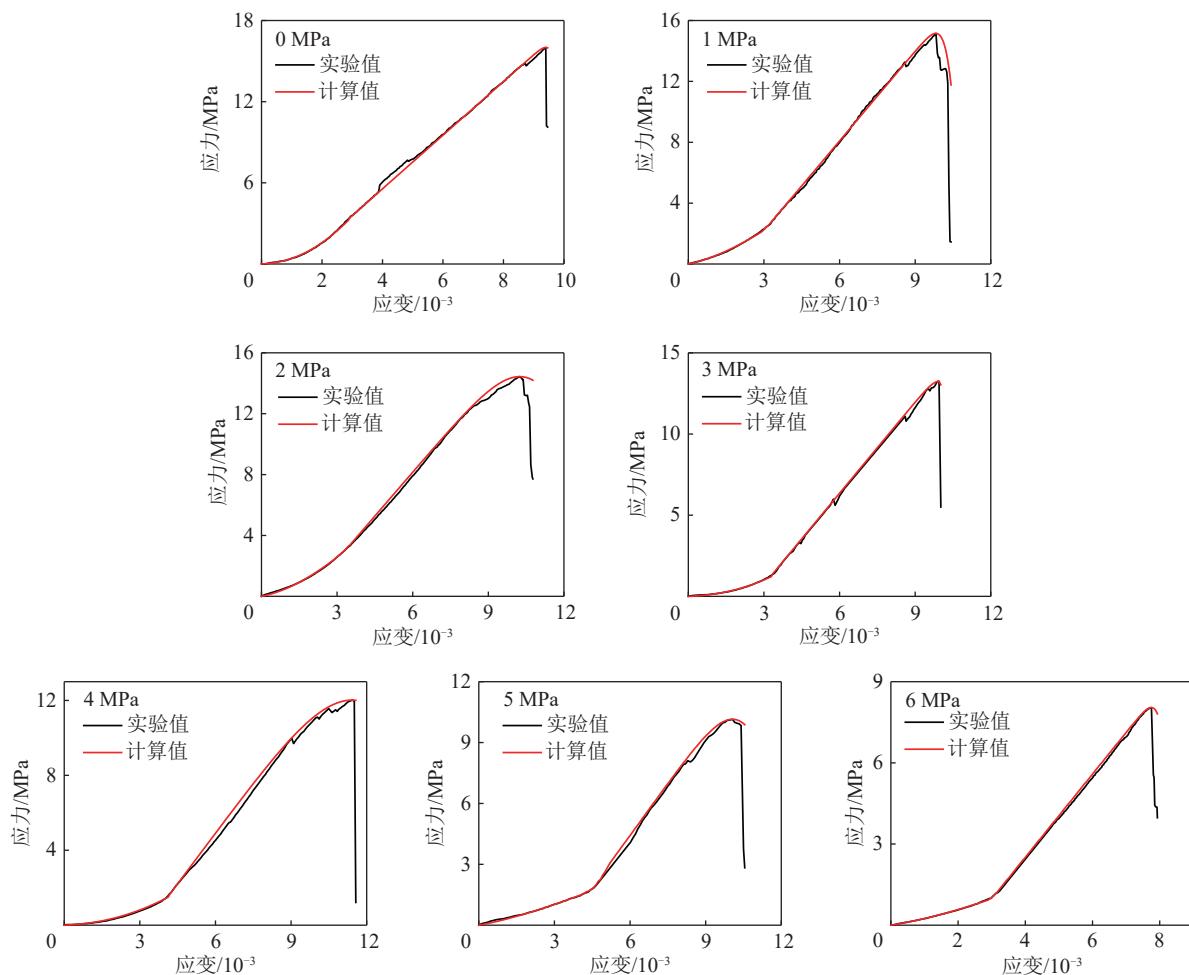


图 10 本构模型理论曲线与实验曲线对比

Fig.10 Comparison the constitutive model theoretical curves and experimental curves

压力增加,三维裂隙参数呈上升趋势,煤体内部损伤程度增加,裂隙网络更加复杂。

(3) 成功研制了煤岩气-固耦合实验系统,结合MTS816系统开展了不同CO₂压力下煤体的单轴压缩实验,获取了煤体的应力-应变曲线,煤样的强度和弹性模量较未吸附时均呈现降低趋势,即CO₂对煤体存在明显的损伤劣化作用。

(4) 对比所建立的分段统计损伤本构模型理论曲线与试验曲线,二者吻合度较高,说明所建立的细观统计损伤本构模型可以较好地反应CO₂-荷载耦合作用的损伤效应,建立了煤体细观损伤与宏观参量损伤的内在联系。

参考文献(References):

- LIU C J, SANG S X, ZHANG K, et al. Effects of temperature and pressure on pore morphology of different rank coals: Implications for CO₂ geological storage[J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2019, 34: 343–352.
- 王双明, 申艳军, 孙强, 等. “双碳”目标下煤炭开采扰动空间CO₂地下封存途径与技术难题探索[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 45–60.
- WANG Shuangming, SHEN Yanjun, SUN Qiang, et al. Underground CO₂ storage and technical problems in coal mining area under the “dual carbon” target[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 45–60.
- 何学秋, 田向辉, 宋大钊. 煤层CO₂安全封存研究进展与展望[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 212–219.
- HE Xueqiu, TIAN Xianghui, SONG Dazhao. Progress and expectation of CO₂ sequestration safety in coal seams[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(1): 212–219.
- 叶建平, 张兵, 韩学婷, 等. 深煤层井组CO₂注入提高采收率关键参数模拟和试验[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 149–155.
- YE Jianping, ZHANG Bing, HAN Xueting, et al. Well group carbon dioxide injection for enhanced coalbed methane recovery and key parameter of the numerical simulation and application in deep coalbed methane[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(1): 149–155.
- CUÉLLAR-FRANCA R M, AZAPAGIĆ A. Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts[J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2015, 9: 82–102.
- 王超, 杨小彬, 郭伟旗, 等. 煤岩单轴加载统计损伤本构模型[J]. 煤矿安全, 2015, 46(11): 10–13.

- WANG Chao, YANG Xiaobin, GUO Weiqi, et al. Uniaxial loading statistical damage constitutive model for coal and rock[J]. *Safety in Coal Mines*, 2015, 46(11): 10–13.
- [7] 马秋峰, 刘志河, 秦跃平, 等. 基于能量耗散理论的岩石塑性-损伤本构模型[J]. *岩土力学*, 2021, 42(5): 1210–1220.
- MA Qiufeng, LIU Zhihe, QIN Yueping, et al. Rock plastic-damage constitutive model based on energy dissipation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(5): 1210–1220.
- [8] 刘洪永, 程远平, 赵长春, 等. 采动煤岩体弹脆塑性损伤本构模型及应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(2): 358–365.
- LIU Hongyong, CHENG Yuaping, ZHAO Changchun, et al. Constitutive model for elasto-brittle-plastic damage of coal rock mass due to mining and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(2): 358–365.
- [9] 张良, 齐庆新, REN Ting, 等. 基于显微CT扫描和统计强度的煤岩损伤破裂特性研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(S2): 1–12.
- ZHANG Liang, QI Qingxin, REN Ting, et al. Study on the damage and fracture characteristics of coal rock based on the X-ray micro-CT scanning technology and statistical strength theory[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(S2): 1–12.
- [10] KRAJCINOVIC D, SILVA M A G. Statistical aspects of the continuous damage theory[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1982, 18(7): 551–562.
- [11] 唐春安. 岩石破裂过程中的灾变[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993: 13–31.
- [12] 肖鹏, 陈有亮, 杜曦, 等. 冻融循环作用下砂岩的力学特性及细观损伤本构模型研究[J]. *岩土工程学报*, 2023, 45(4): 805–815.
- XIAO Peng, CHEN Youliang, DU Xi, et al. Mechanical properties of sandstone under freeze-thaw cycles and studies on meso-damage constitutive model[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(4): 805–815.
- [13] ZUO J P, JIANG G H, WEI X, et al. A gas-mechanical coupled constitutive equation for fractured coal containing gas[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 36: 1109–1119.
- [14] 王登科, 尹光志, 刘建, 等. 三轴压缩下含瓦斯煤岩弹塑性损伤耦合本构模型[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(1): 55–60.
- WANG Dengke, YIN Guangzhi, LIU Jian, et al. Elastoplastic damage coupled model for gas-saturated coal under triaxial compression[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(1): 55–60.
- [15] 吴岩. 基于工业CT扫描的受载含瓦斯煤裂隙动态演化与损伤本构模型研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2023.
- WU Yan. Study on dynamic evolution and damage constitutive model of loaded gas-bearing coal based on industrial CT scanning [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2023.
- [16] 朱川曲, 马合意, 赵鹏涛. 吸附 CO_2 煤体的力学性能劣化机制[J]. *过程工程学报*, 2022, 22(12): 1676–1682.
- ZHU Chuanqu, MA Heyi, ZHAO Pengtao. Degradation mechanism of mechanical properties for CO_2 adsorbed coal[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2022, 22(12): 1676–1682.
- [17] MASOUDIAN M S, AIREY D W, EL-ZEIN A. Experimental investigations on the effect of CO_2 on mechanics of coal[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2014, 128: 12–23.
- [18] VIETE D R, RANJITH P G. The effect of CO_2 on the geomechanical and permeability behaviour of brown coal: Implications for coal seam CO_2 sequestration[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2006, 66(3): 204–216.
- [19] SAMPATH K H S M, PERERA M S A, RANJITH P G, et al. Application of neural networks and fuzzy systems for the intelligent prediction of CO_2 -induced strength alteration of coal[J]. *Measurement*, 2019, 135: 47–60.
- [20] RANATHUNGA A S, PERERA M S A, RANJITH P G. Influence of CO_2 adsorption on the strength and elastic modulus of low rank Australian coal under confining pressure[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2016, 167: 148–156.
- [21] HOL S, SPIERS C J. Competition between adsorption-induced swelling and elastic compression of coal at CO_2 pressures up to 100 MPa[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2012, 60(11): 1862–1882.
- [22] 李清川, 王汉鹏, 袁亮, 等. 吸附气体量对煤岩力学特性损伤劣化的试验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2019, 48(5): 955–965.
- LI Qingchuan, WANG Hanpeng, YUAN Liang, et al. Experimental study of damage and degradation of coal by adsorbed gas amount[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2019, 48(5): 955–965.
- [23] MENG M, QIU Z S. Experiment study of mechanical properties and microstructures of bituminous coals influenced by supercritical carbon dioxide[J]. *Fuel*, 2018, 219: 223–238.
- [24] 王登科, 庞晓非, 魏建平, 等. 气体性质和孔隙压力对煤体微裂隙扩展的影响[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(2): 183–192.
- WANG Dengke, PANG Xiaofei, WEI Jianping, et al. Effect of gas properties and pore pressure on the microcrack propagation in coal[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(2): 183–192.
- [25] 王磊, 刘怀谦, 谢广祥, 等. 含瓦斯煤孔裂隙结构精细表征及强度劣化机制[J]. *岩土力学*, 2021, 42(12): 3203–3216.
- WANG Lei, LIU Huaiqian, XIE Guangxiang, et al. Fine characterization of the pore and fracture structure and strength degradation mechanism of gas bearing coal[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(12): 3203–3216.
- [26] 王登科, 张平, 浦海, 等. 温度冲击下煤体裂隙结构演化的显微CT实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(10): 2243–2252.
- WANG Dengke, ZHANG Ping, PU Hai, et al. Experimental research on cracking process of coal under temperature variation with industrial micro-CT[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(10): 2243–2252.
- [27] 王登科, 张航, 魏建平, 等. 基于工业CT扫描的瓦斯压力影响下含瓦斯煤裂隙动态演化特征[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(11): 3550–3564.
- WANG Dengke, ZHANG Hang, WEI Jianping, et al. Dynamic evolution characteristics of fractures in gas-bearing coal under the influence of gas pressure using industrial CT scanning technology[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(11): 3550–3564.
- [28] 张全胜, 杨更社, 任建喜. 岩石损伤变量及本构方程的新探讨[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(1): 30–34.
- ZHANG Quansheng, YANG Gengshe, REN Jianxi. New study of damage variable and constitutive equation of rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(1): 30–34.

- al of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 30–34.
- [29] 王磊, 陈礼鹏, 刘怀谦, 等. 不同初始瓦斯压力下煤体动力学特性及其劣化特征[J]. 岩土力学, 2023, 44(1): 144–158.
- WANG Lei, CHEN Lipeng, LIU Huaiqian, et al. Dynamic behaviors and deterioration characteristics of coal under different initial gas pressures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(1): 144–158.
- [30] 来兴平, 方贤威, 崔峰, 等. 冲击荷载下煤岩损伤演化规律[J]. 西安科技大学学报, 2019, 39(6): 919–927.
- LAI Xingping, FANG Xianwei, CUI Feng, et al. Damage evolution of coal and rock under impact load[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2019, 39(6): 919–927.
- [31] 曹瑞琅, 贺少辉, 韦京, 等. 基于残余强度修正的岩石损伤软化统计本构模型研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1652–1660, 1667.
- CAO Ruilang, HE Shaohui, WEI Jing, et al. Study of modified statistical damage softening constitutive model for rock considering residual strength[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6): 1652–1660, 1667.
- [32] 曹文贵, 赵明华, 刘成学. 基于 Weibull 分布的岩石损伤软化模型及其修正方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3226–3231.
- CAO Wengui, ZHAO Minghua, LIU Chengxue. Study on the model and its modifying method for rock softening and damage based on weibull random distribution[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(19): 3226–3231.
- [33] JEAN L. A continuous damage mechanics model for ductile fracture[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1985, 107(1): 83–89.
- [34] 朱建明, 彭新坡, 姚仰平, 等. SMP 准则在计算煤柱极限强度中的应用[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2987–2990.
- ZHU Jianming, PENG Xinpo, YAO Yangping, et al. Application of SMP failure criterion to computing limit strength of coal Pillars[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2987–2990.
- [35] 李波, 栾茂田. 基于 SMP 破坏准则的柱形孔扩张问题理论分析[J]. 大连理工大学学报, 2006, 46(2): 246–251.
- LI Bo, LUAN Maotian. Theoretical analysis of expansion of cylindrical cavity based on SMP criterion[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2006, 46(2): 246–251.
- [36] SATAKE M. Stress-deformation and strength characteristics of soil under three difference principle stresses (Discussion)[J]. Proc of Japan Society of Civil Engineers, 1976, 246: 137–138.
- [37] MATSUOKA H, HOSHIKAWA T, UENO K. A general failure criterion and stress-strain relation for granular materials to metals[J]. Soils and Foundations, 1990, 30(2): 119–127.
- [38] 冯清波, 王明帅, 江信东, 等. 基于 SMP 准则的岩石统计损伤本构模型[J]. 黑龙江科技大学学报, 2021, 31(1): 38–42, 67.
- FENG Qingbo, WANG Mingshuai, JIANG Xindong, et al. Statistical damage constitutive model for rock based on SMP criterion[J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2021, 31(1): 38–42, 67.
- [39] 朱建明, 程海峰, 姚仰平. 基于 SMP 准则的破裂岩统计损伤软化模型及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S2): 3160–3168.
- ZHU Jianming, CHENG Haifeng, YAO Yangping. Statistical damage softening model of fractured rock based on SMP criterion and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2): 3160–3168.
- [40] 朱建明, 程海峰, 姚仰平. 基于 SMP 强度准则的岩石残余应力与围压的关系[J]. 煤炭学报, 2013, 38(S1): 43–48.
- ZHU Jianming, CHENG Haifeng, YAO Yangping. Relationship between the residual stress and the surrounding rock pressure based on SMP failure criterion[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(S1): 43–48.
- [41] 刘力源, 朱万成, 魏晨慧, 等. 气体吸附诱发煤强度劣化的力学模型与数值分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(4): 1500–1508.
- LIU Liyuan, ZHU Wancheng, WEI Chenhui, et al. Mechanical model and numerical analysis of mechanical property alterations of coal induced by gas adsorption[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(4): 1500–1508.
- [42] SU E L, LIANG Y P, CHANG X Y, et al. Effects of cyclic saturation of supercritical CO₂ on the pore structures and mechanical properties of bituminous coal: An experimental study[J]. Journal of CO₂ Utilization, 2020, 40: 101208.
- [43] 邓华锋, 胡安龙, 李建林, 等. 水岩作用下砂岩劣化损伤统计本构模型[J]. 岩土力学, 2017, 38(3): 631–639.
- DENG Huafeng, HU Anlong, LI Jianlin, et al. Statistical damage constitutive model of sandstone under water-rock interaction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(3): 631–639.
- [44] 王登科, 刘淑敏, 魏建平, 等. 冲击破坏条件下煤的强度型统计损伤本构模型与分析[J]. 煤炭学报, 2016, 41(12): 3024–3031.
- WANG Dengke, LIU Shumin, WEI Jianping, et al. Analysis and strength statistical damage constitutive model of coal under impacting failure[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(12): 3024–3031.
- [45] 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.
- WANG Kai, JIANG Yifeng, XU Chao. Mechanical properties and statistical damage model of coal with different moisture contents under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1070–1079.
- [46] BALAN H O, GUMRAH F. Assessment of shrinkage–swelling influences in coal seams using rank-dependent physical coal properties[J]. International Journal of Coal Geology, 2009, 77(1–2): 203–213.
- [47] SIRIWARDANE H, HALJASMAA I, MCLENDON R, et al. Influence of carbon dioxide on coal permeability determined by pressure transient methods[J]. International Journal of Coal Geology, 2009, 77(1–2): 109–118.
- [48] GUO H Y, GAO Z X, XIA D P, et al. Simulation study on the biological methanation of CO₂ sequestered in coal seams[J]. Journal of CO₂ Utilization, 2019, 34: 171–179.