

DOI : 10.16285/j.rsm.2016.02.031

损伤和剪胀效应对裂隙煤体 渗透率演化规律的影响研究

魏明尧^{1,2,3}, 王春光^{1,4}, 崔光磊¹, 檀玉玲¹, 张守文¹

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2.重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 3.中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116;

4.山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590)

摘 要: 煤层瓦斯渗透率是影响瓦斯抽采和动力灾害防治的重要参数。为了研究煤体损伤和剪胀变形对渗透率的影响, 首先引入损伤变量反映煤体损伤破坏状态, 建立了基于体应变增量的煤体损伤本构模型。并采用 Hurst 指数表征裂隙表面粗糙度, 基于裂隙表面的分形特征, 建立了裂隙渗透率在压缩和剪切作用下的演化模型。通过对 TOUGH2 和 FLAC^{3D} 软件进行二次开发, 建立了基于双重孔隙模型的 TOUGH2(CH₄)-FLAC 气-固耦合数值分析工具。采用本软件对煤样单轴压缩过程进行模拟分析, 结果表明: 煤体的破坏是损伤单元累积和贯通的结果, 最终形成贯通煤体的损伤带是造成煤体失稳破坏的主因; 围岩内的渗透率增加区域与损伤区位置基本一致, 其中裂隙系统的渗透率增加幅度最大可达 2 个数量级; 剪切破坏区的裂隙发生剪胀变形, 引起裂隙渗透率大幅增加。建立的理论模型与数值计算工具为制定瓦斯治理措施提供了理论指导。

关 键 词: 剪胀效应; 煤体损伤; Hurst 指数; 渗透率演化; 双重介质

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2016) 02 - 0574 - 09

Influences of damage and shear dilation on permeability evolution of fractured coal

WEI Ming-yao^{1,2,3}, WANG Chun-guang^{1,4}, CUI Guang-lei¹, TAN Yu-ling¹, ZHANG Shou-wen¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

3. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

4. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: Gas permeability is a significant parameter influencing gas extraction and coal-gas outburst prediction in coal seams. To investigate the effects of coal damage and shear deformation on fracture permeability, a damage variable is introduced to reflect the failure state of coal damage. A constitutive model is established with the increment of volumetric strain. The evolution model of fracture permeability influenced by shear and compression is obtained, and Hurst coefficient is applied to represent the roughness of fracture surface. Based on the dual permeability media of matrix pore and fracture, a gas-solid coupling software named TOUGH2(CH₄)-FLAC is built by the secondary development of the codes of TOUGH2 and a DLL file for FLAC^{3D}. A case study is performed to investigate the influences of damage and shear dilation on gas flow in the process of uniaxial compression using the proposed model. Numerical results show that the accumulation and coalescence of damaged elements largely control the failure of coal, and the damage zone is the main factor resulting in the failure of coal. The location of permeability change is highly related to the damage zone. The fracture permeability can be increased by two orders of magnitude in most of damage zones. The variety of fracture permeability in the shear damage zone increases drastically with the increase of shear dilation. The proposed method provides a theoretical basis for the development of gas control.

收稿日期: 2015-05-04

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51474204, No. 51504235, No. 41202194); 中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放研究基金 (No. 13KF05); 重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室开放课题 (No. 2011DA105287-FW201412); 中国博士后科学基金 (No. 2013M542097); 山东省矿山灾害预防控制国家重点实验室培育基地开放基金 (No. MDPC2013KF03)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51474204, 51504235 and 41202194), the Open Projects of State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, CUMT (13KF05), the Open Projects of State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control (Chongqing University) (2011DA105287-FW201412), the China Postdoctoral Science Foundation (2013M542097), the Opening Project Foundation of State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology (MDPC2013KF03).

第一作者简介: 魏明尧, 男, 1984 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事非常规天然气开发的研究工作。E-mail: mywei@whrsm.ac.cn

Keywords: shear dilation; coal damage; Hurst coefficient; evolution of permeability; dual permeability media

1 引言

煤体作为一种脆性材料，在外部荷载作用下会导致微裂纹的成核和扩展。裂隙扩展引起的损伤不仅影响了煤体本身的力学性质，也改变了渗透性质^[1-2]。Wang^[3]和 Oda^[4]通过试验研究认为，岩石等脆性材料的破坏及渗透特征是与细观损伤演化和宏观裂纹扩展、贯通密切相关的过程。一方面裂隙扩展、连通等损伤变形可以增加煤岩体内流体渗流通道和空间^[5-6]；另一方面应力作用还引起裂隙开度的变化，进而影响裂隙的渗透性^[7]。许多研究学者分别从上述两方面对岩石材料的损伤与渗流耦合模型进行了研究。杨延毅等^[8]由现场裂隙统计分析和计算机 Monte Carlo 法随机产生扁平圆盘型的裂隙网络系统，根据其裂隙的贯通率和断裂扩展规律，建立了不同应力状态下裂隙的损伤断裂扩展过程的渗透张量演化方程。赵延林等^[9]通过对岩体裂隙扩展过程水力梯度、损伤和渗透系数的耦合关系的分析，建立了裂隙岩体渗流-损伤-断裂耦合数学模型，并开发了 FLAC^{3D} 扩展程序。郑少河等^[10]通过引入渗透压力附加柔度张量的概念以及考虑渗透张量的演化行为，建立了基于两场耦合的裂隙岩体渗流损伤模型。朱珍德等^[11]考虑岩体裂隙在压剪、拉剪应力状态下损伤演化规律，建立了裂隙岩体损伤场与渗流场耦合方程。盛金昌等^[12]考虑了裂隙非线性法向变形和剪胀对裂隙渗透性的影响，建立了反映裂隙剪胀特性的非线性弹塑性本构模型。Souley 等^[13]通过试验研究了微裂纹扩展引起的渗透率变化，并采用 FLAC^{3D} 软件实现了对开挖损伤区的渗透性的模拟分析。Maleki^[14]采用符合统计规律的三维碟型裂隙模型，其单裂隙的参数由应力环境决定，并建立了岩石等脆性材料损伤演化引起的渗透变化数值模型，讨论了细观和微观裂隙引起渗透率变化的区别。杨天鸿^[15]、李连崇等^[16]考虑了非均质煤岩体变形中应力、损伤与渗透率演化的耦合过程，基于弹性损伤理论建立了煤岩体损伤演化过程的渗流-应力耦合模型。

对于含瓦斯煤体，由于煤体微裂隙和孔隙高度发育，其尺寸和空间位置分布不均匀，以上研究采用的显式裂纹法（平板型、管型和币型裂隙）并不能完全适用煤体复杂的孔隙和裂隙结构。煤层开采会引起煤体的损伤和应力的重新分布，损伤作用导致裂隙萌生、扩展和贯通，在煤体内产生瓦斯自由流动的空间；另一方面应力又控制了裂隙空间的大

小，如压缩作用会致使裂隙闭合，而剪切应力会导致裂隙的剪胀效应。剪胀效应对裂隙渗透性能影响显著，试验研究表明，较小的剪切位移就会导致裂隙渗透率显著增大^[17]。此外，对于含瓦斯煤体的有效应力方程不仅要考虑瓦斯气体压力还要考虑瓦斯吸附膨胀/解吸收缩应力。本文采用体积应变量增量衡量煤体裂隙的损伤程度，建立了煤体的损伤演化方程，并采用 Mohr-Coulomb（简称 M-C）屈服准则作为判断破坏的依据，建立煤体损伤本构模型。对于应力重新分布对裂隙开度的影响，首先分析了压缩状态下裂隙的非线性变形规律，然后采用 Hurst 指数描述裂隙表面的粗糙特征，根据分形理论建立裂隙在剪切下的渗透率变化模型，并扩展到三维裂隙系统。通过对 TOUGH2 和 FLAC^{3D} 软件进行二次开发，建立了基于双重孔隙模型的 TOUGH2(CH4)-FLAC 气-固耦合数值模拟软件。采用该软件模拟研究煤样在加载作用下的全破坏过程，分析损伤和裂隙剪胀影响下的煤体渗透率演化规律。研究结果对指导工程方案设计、安全评价以及制定灾害防治措施都有重要的理论意义和使用价值。

2 煤体损伤演化力学本构模型

当发生塑性变形时，岩土类材料产生的一个重要特征是剪胀效应，即外部剪切作用下导致材料体积膨胀。剪胀行为主要是由微裂纹的萌生和扩展引起的，在（REV 单元体积）尺度上可以认为这些微裂纹的分布在整个材料是均匀的。Shao 等^[18]提出，损伤是微裂隙发展所导致的体积膨胀引起的，Salari 等^[19]认为，弹性损伤是由体应变膨胀引起的，用弹性体积应变及塑性体积应变表征能量释放率，从而表示岩石的损伤变量和强度软化模型。由于指数函数的形式比较符合岩土材料损伤规律，许多学者都采用这一形式^[20]。煤体损伤软化是由于微裂隙发展所导致的体积膨胀引起的，提出如下损伤演化方程：

$$D = 1 - e^{-\left(\frac{\varepsilon^V - \varepsilon_1^V}{F}\right)^m} \quad (1)$$

式中： D 为损伤因子； ε^V 为体积应变量； ε_1^V 为弹性体积应变阈值，即煤体处于弹性极限时的体积应变量，认为当体积应变超过阈值时才开始产生损伤，反映了岩体损伤的合理初始损伤起点问题^[21]； F 为煤体强度参数，反映了煤体宏观统计平均强度大小； m 为常数，反映了煤体强度分布的集中程度。

一般根据岩石应变软化特点，利用岩石应力-应变曲线的极值特性，采用极值理论确定模型中的

参数^[21]。建立的损伤演化方程是标量形式的损伤变量，将单元体内损伤均匀化处理，减小了计算量。根据 Lemaitre 应变等价性假说^[22]，损伤对应变行为的影响通过有效应力来体现，因此，可以建立煤岩体损伤本构关系如下：

$$\sigma_{ij} = E_{ijkl} (\varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ij}^p) (1 - D) \quad (2)$$

式中： σ_{ij} 为应力； E_{ij} 为弹性模量； ε_{ij} 为总应变变量； ε_{ij}^p 为塑性应变。

当材料受到超过其强度的压力时，会发生失效而失去承载能力。脆性材料的失效一般表现为断裂。一般岩体的压缩强度要远大于剪切强度和拉伸强度，所以岩体的破坏多是以剪切和拉伸破坏形式为主。裂隙煤体破坏的判断准则一般采用 M-C 准则，计算出相应的塑性应变值，并且分别对拉伸和剪切破坏后的应力进行含损伤的塑性修正。

3 双重孔隙渗透率演化模型

一般简化的煤层结构可以有两种孔隙系统描述，即孔隙系统和裂隙系统。该孔隙结构很符合双重孔隙结构特点，因此，采用双重孔隙模型可以有效地描述煤体的结构。该孔隙结构包含两个互相覆盖的连续场，即基质系统和裂隙系统。每个连续场都拥有自己的渗流压力场，即并且两个系统之间有流体的交换，交换的程度取决于两者之间的压力梯度。

3.1 基质介质中孔隙率和渗透率的动态变化模型

基于 Liu 等^[23]提出的 TPHM 模型，他把在静水压力下的均质岩体概化为两部分，一部分由岩体孔隙或裂隙组成的符合天然应变 (natural strain) 下的虎克定律，另一部分符合工程应变 (engineering strain) 的虎克定律。天然应变部分相对较软，而工程应变部分相对较硬。得到的基质孔隙率与应力关系可写为

$$\phi^M = \phi_e^M + (\phi_0^M - \phi_e^M) e^{-\frac{\sigma}{K_t}} \quad (3)$$

式中： ϕ^M 为基质孔隙率 (%)； ϕ_0^M 为无应力下的基质初始孔隙率 (%)； ϕ_e^M 为无应力下的硬介质部分的孔隙率 (%)； σ 为静水压力 (MPa)； K_t 为体积模量 (GPa)。

通过对大量试验数据与模型的对比分析，验证了本模型可以有效准确地匹配试验结果^[24]。在三维应力状态下，基质介质孔隙率与 3 个主应力的关系为^[25]

$$\phi^M = \phi_0^M - \gamma_1 - (\phi_0^M - \gamma_1) C_e (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) + \frac{\gamma_1}{3} \left[e^{-\frac{\sigma_1}{K_t}} + e^{-\frac{\sigma_2}{K_t}} + e^{-\frac{\sigma_3}{K_t}} \right] \quad (4)$$

式中： γ_1 为软部分占总体积的比例 (%)； σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为最大、中间、最小主应力 (MPa)； C_e 为孔隙压缩率，为常数。

根据该实验结果^[26]可以得出，多孔介质中基质的渗透率随孔隙率变化的关系为

$$\frac{k^M}{k_0^M} = \left(\frac{\phi^M}{\phi_0^M} \right)^3 \quad (5)$$

式中： k^M 为基质的渗透率 (%)； k_0^M 为基质初始状态的渗透率 (%)。

3.2 裂隙介质中的孔隙率和渗透率的动态变化模型

裂隙介质的渗流规律是由裂隙结构面的空间位置及自然特征决定的。结构面的几何特征包括结构面的方位、形态、裂隙开度、间距或密度、结构面粗糙度、贯通性和充填性等。结构面的这些几何特征值，直接影响裂隙介质渗透性的大小方向和规律。双重孔隙介质模型假设裂隙结构面为正交、连续、形状相同的，每一个裂隙方向都平行其中一个渗透主方向。裂隙在正应力作用下发生张开或闭合行为，裂隙的开度也随着作用在裂隙面上的应力变化。Liu 等^[23]依据 TPHM 理论，将含裂隙岩体概化分成两部分，一部分认为较硬，在应力作用下变形较小；另一部分受应力影响变形明显。据此建立了一种单裂隙在正应力作用下裂隙开度的模型为

$$b = b_r + b_f e^{-\frac{\sigma_n}{K_t^F}} \quad (6)$$

式中： b 为裂隙开度 (m)； b_r 为残余裂隙开度 (m)； b_f 为应力敏感部分的裂隙开度 (m)； σ_n 为直接作用在裂隙面上的有效应力 (MPa)； K_t^F 为应力敏感部分体积模量 (GPa)。

试验表明^[27]，单裂隙煤体受剪切作用时，裂隙间接接触点和接触部分的面积逐渐减小，裂隙的平均开度逐渐增加，与剪切位移垂直方向上的渗透性增加量要比平行方向的渗透性增加量明显大很多。Lee^[17]对花岗岩进行了剪切渗流试验，发现剪切位移为 8 mm 时，裂隙的渗透系数增加量达到 1.5~2 个数量级，因此，剪切作用对裂隙的渗透性影响较大。通过对裂隙表面的分形特征分析，建立了裂隙在剪切状态下的裂隙开度与应力的关系，并结合式 (6) 得到裂隙开度在压缩和剪切共同作用下的变化规律^[28]为

$$b = b_r + \left[b_f + A (\delta_s)^H e^{-k W_p} \right] e^{-\frac{\sigma_n}{K_t^F}} \quad (7)$$

式中： δ_s 为剪切方向位移； A 为常数； H 为裂隙表面的 Hurst 指数，代表了裂隙面的粗糙程度； W_p 为

剪切作用的塑性功。

通过与试验测试结果对比，验证了此模型的正确性^[28]。

由裂隙开度值可以得到裂隙结构的渗透性参数。在三维裂隙系统中，此时孔隙率可按式计算^[29]：

$$\frac{\phi^F}{\phi_0^F} = \frac{b_1 + b_2 + b_3}{b_{0,1} + b_{0,2} + b_{0,3}} \quad (8)$$

式中： ϕ^F 为裂隙孔隙率（%）； ϕ_0^F 为初始无应力状态下裂隙的孔隙率（%）； b_1 、 b_2 和 b_3 分别为垂直于坐标轴裂隙的开度（m）； $b_{0,1}$ 、 $b_{0,2}$ 和 $b_{0,3}$ 分别为各个方向裂隙的初始开度值（m）。

根据 Rutqvist^[29]的计算方法，各个坐标轴方向的渗透率模型为

$$\begin{aligned} \frac{k_x^F}{k_{0,x}^F} &= \frac{(b_2)^3 + (b_3)^3}{(b_{0,2})^3 + (b_{0,3})^3} \\ \frac{k_y^F}{k_{0,y}^F} &= \frac{(b_1)^3 + (b_3)^3}{(b_{0,1})^3 + (b_{0,3})^3} \\ \frac{k_z^F}{k_{0,z}^F} &= \frac{(b_1)^3 + (b_2)^3}{(b_{0,1})^3 + (b_{0,2})^3} \end{aligned} \quad (9)$$

式中： k_x^F 、 k_y^F 和 k_z^F 分别为 x 、 y 、 z 轴方向的渗透率（ m^2 ）； $k_{0,x}^F$ 、 $k_{0,y}^F$ 和 $k_{0,z}^F$ 分别为 3 个方向初始状态的渗透率（ m^2 ）。

4 含瓦斯煤体气-固耦合数值分析方法

4.1 气-固耦合模型建立

根据质量守恒定律，在单位时间内单元体内流体质量的变化量 M^g 等于流体流入流出单元体的质量差值 q^M 和汇源项流体生成量 Q^g 。在小变形假设下，煤体基质系统内瓦斯气体的质量平衡方程为

$$\frac{d}{dt} M^g = Q^g - \nabla q^M \quad (10)$$

煤体基质系统内的瓦斯气体含量由游离态瓦斯量和吸附瓦斯量组成，瓦斯气体的渗流符合 Darcy 定律，由此可以得到基质内瓦斯平衡方程为

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\phi^M p_M \frac{M}{ZRT} + (1 - \phi^M) \rho_g \rho_M \frac{L_a L_b p_M}{1 + L_b p_M} \right) = \\ \nabla \left(\rho_g \frac{k_{rg}^M k^M}{\mu} (\nabla p_M - \rho_g g e) + D_f e \nabla \rho_g \right) \end{aligned} \quad (11)$$

式中： k_{rg} 为气体相对渗透率（ m^2 ）； ρ_g 为气体密度（ kg/m^3 ）； ρ_m 为基质密度（ kg/m^3 ）； p_M 为基质气体压力（ $J/mol/K$ ）； M 为气体摩尔质量（ kg/mol ）；

Z 为气体压缩系数； R 为气体常数； T 为温度（ K ）； g 为重力加速度（ m/s^2 ）； μ 为气体动力黏度（ $Pa \cdot s$ ）； ∇p 为气体压力梯度矢量（ Pa/m ）； e 为单位矩阵； L_a 为 Langmuir 体积常数； L_b 为 Langmuir 压力常数。

煤体内发达的裂隙构成了贯通的裂隙网络是瓦斯流动的主要空间。裂隙系统内瓦斯全部以游离态存在，因此，裂隙系统内瓦斯质量平衡方程为

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\phi^F p_F \frac{M}{ZRT} \right) = \nabla \left[\rho_g \frac{k_{rg}^F k^F}{\mu} (\nabla p_F - \rho_g g e) + \right. \\ \left. D_f e \nabla \rho_g \right] - Q^g \end{aligned} \quad (12)$$

式中： p_f 为裂隙气体压力密度（ pa ）。

4.2 气-固耦合数值模拟程序开发

通过对多相和多组分流体模拟软件 TOUGH2 程序^[30]的修改和重新编写，将瓦斯渗流理论模型嵌入 TOUGH2 程序中，开发了软件 TOUGH2(CH₄)，实现了模拟瓦斯气体渗流场的功能。同时采用 VC++2005 软件编写了损伤本构模型的动态链接库文件 Damage-model.dll，并在 FLAC^{3D} 程序中加载此本构模型，实现对煤体损伤破坏过程的模拟。Rutqvist^[29]基于 TOUGH2 代码和 FLAC^{3D} 的 FISH 语言修改，建立了这个软件之间的耦合计算程序 TOUGH-FLAC。耦合计算过程在 TOUGH2 中是以步为间隔进行 THM (thermo-hydro-mechanical) 计算，在每一时间步或迭代过程，通过 FLAC^{3D} 计算准静态的应力变化引起的孔隙率和渗透率值。从 TOUGH2 到 FLAC^{3D} 的传递参数过程是：TOUGH2 进行计算，并提供温度、孔隙压力。由于 TOUGH2 网格采用中心节点代表一个单元，参数都赋值在中心节点上，而 FLAC^{3D} 的节点位于单元的四角，因此，数据必须由中心节点转换到边缘节点。之后在 FLAC^{3D} 内计算有效应力值和应变值，并计算出此时应力环境下的孔隙率、渗透率和毛细压力，最后把参数传递到 TOUGH2 进行下一时间步的计算。

TOUGH2(CH₄)-FLAC 程序计算过程中应力场和渗流场的耦合过程如图 1 所示。耦合计算过程中，FLAC^{3D} 程序计算模型中的应力场，根据孔隙率和渗透率与应力的耦合模型，由得到的应力场数据，计算出新应力条件下的孔隙率和渗透率，然后导入 TOUGH2(CH₄)中进行渗流场的计算，得到瓦斯压力的重新分布，而瓦斯压力的变化又改变了煤体有效应力值，从而又引起应力场的变化。这个过程包括了应力场和渗流场之间的相互影响，完全反映了两者的耦合关系。

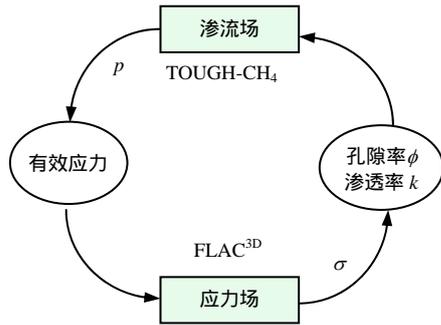


图1 TOUGH2(CH4)-FLAC^{3D} 程序耦合计算示意图
 Fig.1 Schematic of linking TOUGH(CH4) and FLAC^{3D} for a coupled simulation

5 算例分析

5.1 煤体损伤过程验证及分析

采用建立的耦合模拟程序对煤体损伤过程中渗流性能演化过程进行模拟分析。鉴于单轴压缩试验的过程简单和结果明确，建立如下物理试验和数值模型。试验煤样取自北京长沟峪煤矿无烟煤，存在弱冲击倾向性。试验采用 SANS-YAW 型微机控制电液伺服压力试验机控制系统，该系统可以直接测得轴向应力-应变关系。测试过程采用恒定

0.01 mm/s 的速度进行位移加载，直至试样出现破坏。建立的计算模型为三维圆柱结构，高为 10 cm，直径为 5 cm，如图 2 所示。加载方式为上端面进行位移控制方式加载，加载速率与试验一致，下端面固定位移，侧面为自由面。渗流场中基质和裂隙系统的初始压力为均匀分布的瓦斯压力 2 MPa。为了忽略气体压力变化引起的有效应力变化对渗透率的影响，模型所有边界设为无流动边界，即模型内无气体流动。模型中忽略了气体压力对试样的作用。数值模拟采用的力学和渗流参数如表 1 所示^[20-21, 23]。

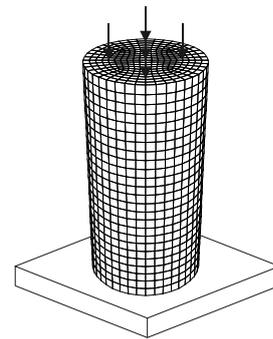


图2 单轴压缩数值模型
 Fig.2 Model for simulating uniaxial compression

表1 数值模型参数表(1)

Table 1 Parameters for numerical simulation (1)

ρ_c /(kg/m ³)	K_1 /GPa	G /GPa	σ_t /MPa	φ_a /(°)	ψ_a /(°)	ϵ_1^v	F	m	C_0 /MPa	ρ_g /(kg/m ³)	μ /(Pa·s)
1329	1.41	2.2	1.5	30	10	0.01	0.3	2	4.5	0.714	1.84×10^{-5}

表1 数值模型参数表(2)

Table 1 Parameters for numerical simulation (2)

A	K	H	b_r /mm	b_f /mm	ϕ^M /%	k^M /m ²	ϕ^F /%	k^F /m ²	L_a /(m ³ /kg)	L_b /MPa ⁻¹
0.2	6×10^{-5}	0.75	0.5	0.5	6.23	1.2×10^{-16}	1.2	1.0×10^{-15}	0.019 85	3.34

注： ρ_c 为煤体密度， G 为剪切模量， σ_t 为拉伸强度， φ_a 为内摩擦角， ψ_a 为膨胀角， ϵ_1^v 为损伤阈值， F 为损伤参数， m 、 K 为常数， C_0 为黏聚力， H 为Hurst指数。

通过监测单元的位移和应力变化，绘制出模型的全应力-应变曲线如图 3 所示。

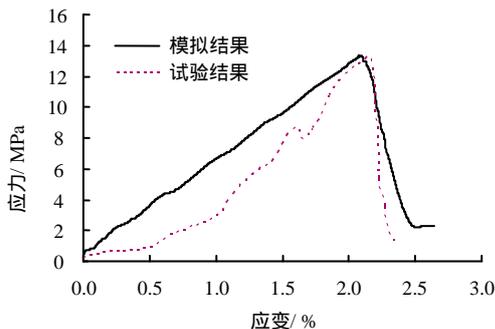


图3 单轴压缩模型与试验的应力-应变曲线对比
 Fig.3 Comparison between simulated stress-strain curve and experimental data under uniaxial compression

由图可以看出，应力-应变曲线与典型的试验结果基本一致，在不同阶段分别表现出不同的应力变化特征。在峰后阶段，表现出明显的应力突降，然后降低到残余应力值。这说明建立的损伤本构模型完全反映了煤体脆性材料的峰后特征，能很好地体现损伤煤体的力学响应特征。同时结果也说明了建立的数值程序的可行性。

煤体在压缩过程中发生损伤破坏，直至裂隙贯通导致煤体完全破碎，其损伤演化过程如图 4 所示，其颜色越深代表损伤越严重。在加载初期，煤体首先在上、下两端接受外部荷载，故损伤首先发生在两端，但损伤值较小。继续加载煤体的损伤范围和强度都继续扩大，由于损伤的累积，在端部的

损伤值要大于其他部位。当损伤继续累积，上、下端部的单元损伤速度加快。在 6 000 步时上、下端部形成明显较大损伤的单元。在计算至 7 000 步时，沿着上、下端部高损伤单元开始发生损伤连贯现象，随着加载过程继续，损伤继续发展，形成了明显的损伤破坏带，并在中间位置形成了垂直劈裂带。此时为应力的峰值区域，但随着损伤单元的继

续贯通，形成了斜切煤体的连续损伤带，造成了煤体的承载能力下降，煤体应力快速的下降。在 8 000 步时，加载作用已造成煤体大面积的损伤，并在短时间内形成了连续贯通的破坏，其破坏形态完全符合煤体的单轴压缩试验破坏形态。通过单轴压缩过程的数值模拟，验证了建立的损伤本构模型的有效性。

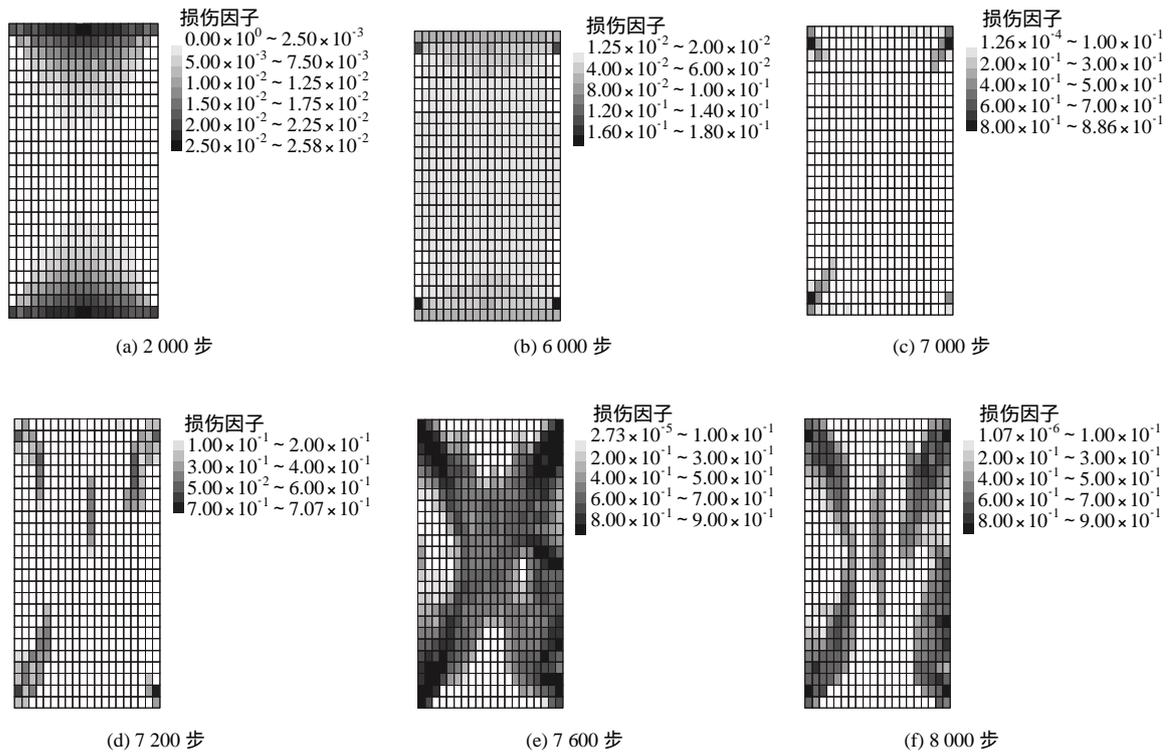


图 4 煤体单轴压缩损伤演化规律模拟结果

Fig.4 Numerical results of damage evolution process of coal under uniaxial compression

5.2 煤体渗透性能演化模拟分析

在压应力和剪应力共同作用下，煤体渗透率变化受多方面影响。通过对单轴压缩模型进行数值模拟，采用建立的渗透率模型对煤体渗透率分布情况进行模拟，分别得到了煤体基质和裂隙系统在发生主破坏前后的孔隙率和渗透率分布情况。

在煤样未发生主破裂时，煤体基本处于压缩状态，此时孔隙率要低于初始值。图 5 为煤体在加载 6 000 步时应力环境下对应的基质和裂隙的渗透率分布，颜色越深代表渗透率越大。此时煤体损伤状态较轻，煤体主要处于压缩状态。由图 5(a)可以看出，在裂隙系统内，受到压缩致使裂隙开度变小，而在应力值较小区域的渗透率较高。对比裂隙系统不同方向的渗透率看出，Z 方向的渗透率普遍高于其他两个方向，这是由于模型是在 Z 轴方向加载导致垂直 Z 轴裂隙产生较大压应力，而 Z 方向的渗透

率是由平行 Z 轴的裂隙系统影响，受压应力较小，因此，此方向的渗透率较大。

在煤体发生大量损伤破坏前，应力导致煤体压缩从而致使渗透率下降。在高应力集中作用下煤体会发生损伤破坏，而损伤导致裂隙的扩展，引起渗透率增加，煤体发生大量损伤破坏之后的渗透率分布如图 6 所示。在基质系统内，由图 6(a)可以看出，渗透率分布与损伤分布形态相似，损伤越严重，煤体的渗透率越高。煤体损伤破坏导致基质系统的渗透率增大，由破坏前最大 $0.775 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ 增加到最大 $1.12 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ 。在裂隙系统中，裂隙同时受到剪切应力和压缩应力作用，单元发生损伤破坏后，裂隙空间增大，裂隙的渗透率也增加。图 6(b)~6(d)为裂隙在不同方向的渗透率分布，可以看出，在损伤区域各个方向的渗透率都较高，而且高渗透率单元贯通，形成了瓦斯的流通通道。其渗透率与破坏

前相比提高幅度较大，与破坏前相比，各个方向最大渗透率分别提高了 65、163 和 128 倍，而且损伤

区域要明显大于其他区域，这说明了煤体破坏造成的裂隙剪胀对渗透率影响明显。

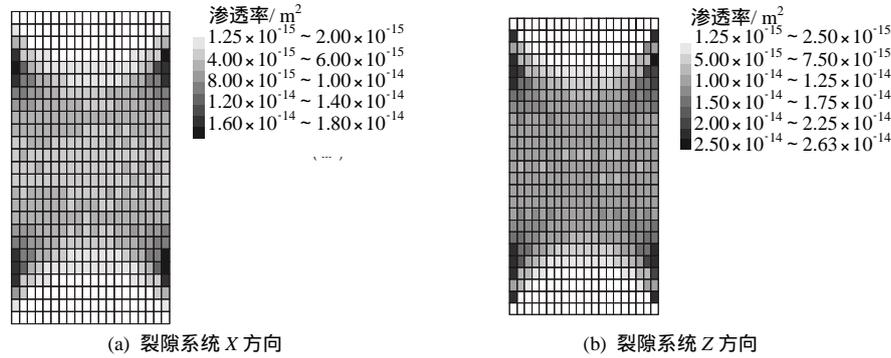


图 5 主破坏前煤体裂隙系统渗透率分布

Fig. 5 Distributions of permeability in fracture system before the major failure

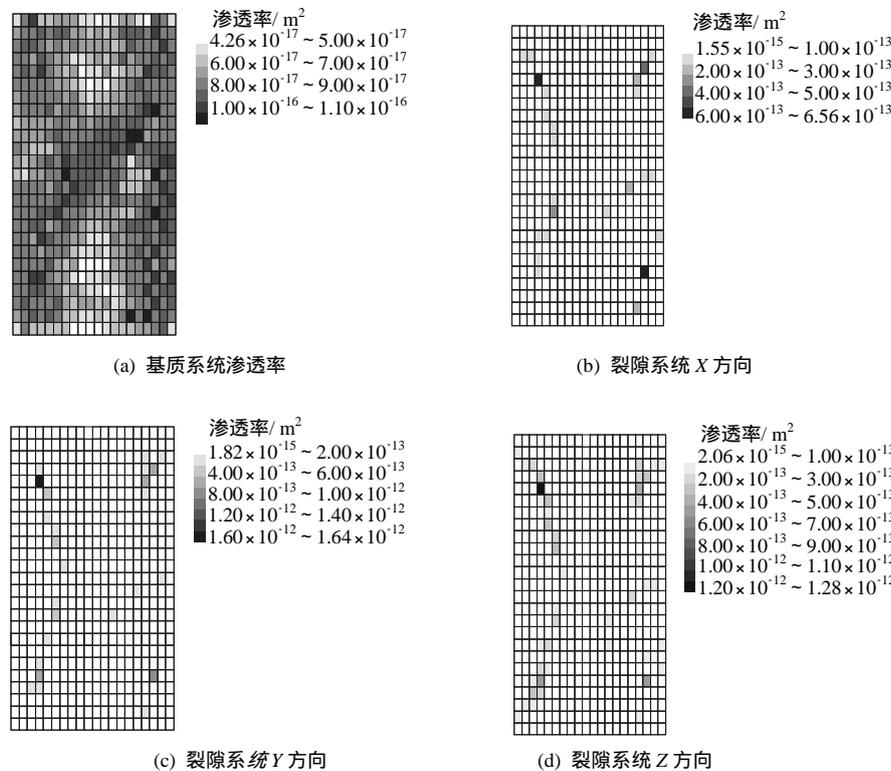


图 6 主破坏后煤体基质系统和裂隙系统渗透率分布

Fig.6 Distributions of permeability in fracture system after the major failure

6 结 论

(1) 本文建立了 TOUGH2(CH₄)和 FLAC^{3D} 的耦合计算程序 TOUGH2(CH₄)-FLAC，并通过煤体的单轴压缩过程的数值模型进行了验证，得到了煤体单轴压缩过程的应力-应变曲线，其结果与实际试验曲线特征趋势一致。得到了煤体的损伤演化过程，其结果完整地揭示了煤体从破裂诱发到完全破坏的机制。

(2) 煤体渗透性与损伤状态和应力是密切相关

的。在加载初期，应力压缩导致裂隙闭合，引起孔隙率和渗透率的降低；当加载至煤体发生大量损伤时，导致裂隙的张开和扩展，并且沿着煤体的破裂面，裂隙系统单元的渗透率增加最大，最大增加幅度达 2 个数量级。

参 考 文 献

[1] ZHOU J J, SHAO J F, LYDZBA D. Micromechanical study of damage and permeability variation in brittle rocks[C]//Modern Trends in Geomechanics. Berlin:

- Springer, 2006: 289 - 300.
- [2] ZHANG X, SANDERSON D J, HARKNESS R M, et al. Evaluation of the 2-D permeability tensor for fractured rock masses[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1996, 33(1): 17 - 37.
- [3] WANG J A, PARK H D. Fluid permeability of sedimentary rocks in a complete stress-strain process[J]. **Engineering Geology**, 2002, 63(3 - 4): 291 - 300.
- [4] ODA M, TAKEMURA T, AOKI T. Damage growth and permeability change in triaxial compression tests of Inada granite[J]. **Mechanics of Materials**, 2002, 34(6): 313 - 331.
- [5] 王臻, RUTQVIST J, 左建平, 等. 裂隙单元修正等效渗透率模型及其验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(4): 728 - 733.
- WANG Zhen, RUTQVIST J, ZUO Jian-ping, et al. A modified equivalent permeability model of fracture-element and its verification[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(4): 728 - 733.
- [6] 曹林卫, 彭向和, 杨春和, 等. 三轴压缩下岩石类材料的细观损伤-渗流耦合本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(11): 2309 - 2319.
- CAO Lin-wei, PENG Xiang-he, YANG Chun-he, et al. A meso-mechanical coupling constitutive model of damage and permeability in rock-like materials under triaxial compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(11): 2309 - 2319.
- [7] BAI M, MENG F, ELSWORTH D, et al. Analysis of stress-dependant permeability in nonorthogonal flow and deformation field[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 1999, 32(3): 195 - 219.
- [8] 杨延毅, 周维垣. 裂隙岩体的渗流-损伤耦合分析模型及其工程应用[J]. 水利学报, 1991, 05 19 - 35.
- YANG Yan-yi, ZHOU Wei-yuan. A coupled seepage-damage analysis model for jointed rock masses and its application to rock engineering[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1991, 05: 19 - 35.
- [9] 赵延林, 王卫军, 黄永恒, 等. 裂隙岩体渗流-损伤-断裂耦合分析与工程应用[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 24 - 32.
- ZHAO Yan-lin, WANG Wei-jun, HUANG Yong-heng, et al. Coupling analysis of seepage-damage-fracture in fractured rock mass and engineering application[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(1): 24 - 32.
- [10] 郑少河, 姚海林, 葛修润. 裂隙岩体渗流场与损伤场的耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(9): 1413 - 1418.
- ZHENG Shao-he, YAO Hai-lin, GE Xiu-run. Coupling analysis of seepage and damage in fractured rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(9): 1413 - 1418.
- [11] 朱珍德, 孙钧. 裂隙岩体的渗流场与损伤场耦合分析及其工程应用[J]. 长江科学院院报, 1999, 16(2): 22 - 27.
- ZHU Zhen-de, SUN Jun. Coupling model of seepage field and damaging field of fractured rock mass and its application[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 1999, 16(2): 22 - 27.
- [12] 盛金昌, 速宝玉, 王媛, 等. 裂隙岩体渗流-弹塑性应力耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 304 - 309.
- SHENG Jin-chang, SU Bao-yu, WANG Yuan, et al. Coupling analysis of elasto-plastic stress and fluid flow in jointed rock masses[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(3): 304 - 309.
- [13] SOULE M, HOMAND F, PEPA S, et al. Damage-induced permeability changes in granite: A case example at the URL in Canada[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2001, 38(2): 297 - 310.
- [14] MALEKI K, POUYA A. Numerical simulation of damage-permeability relationship in brittle geomaterials[J]. **Computers and Geotechnics**, 2010, 37(5): 619 - 628.
- [15] 杨天鸿, 徐涛, 刘建新, 等. 应力-损伤-渗流耦合模型及在深部煤层瓦斯卸压实践中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2900 - 2905.
- YANG Tian-hong, XU Tao, LIU Jian-xin, et al. Coupling model of stress-damage-flow and its application to the investigation of instantaneous seepage mechanism for gas during unloading in coal seam with depth[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(16): 2900 - 2905.

- [16] 李连崇, 杨天鸿, 唐春安, 等. 岩石水压致裂过程的耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1060 - 1066.
LI Lian-chong, YANG Tian-hong, TANG Chun-an, et al. Coupling analysis of hydraulic fracturing process of rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(7): 1060 - 1060.
- [17] LEE H S, PARK Y J, CHO T F, et al. Influence of asperity degradation on the mechanical behavior of rough rock joints under cyclic shear loading[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2001, 38(7): 967 - 980.
- [18] SHAO J F, CHIARELLI A S, HOTEIT N. Modeling of coupled elastoplastic damage in rock materials[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1998, 35(4): 444 - 444.
- [19] SALARI M R, SAEB S, WILLAM K J, et al. A coupled elastoplastic damage model for geomaterials[J]. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 2004, 193(27): 2625 - 2643.
- [20] ZHU Q Z, SHAO J F, MAINGUY M. A micromechanics-based elastoplastic damage model for granular materials at low confining pressure[J]. **International Journal of Plasticity**, 2010, 26(4): 58 - 602.
- [21] 曹文贵, 赵衡, 张玲, 等. 考虑损伤阈值影响的岩石损伤统计软化本构模型及其参数确定方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1148 - 1154 .
CAO Wen-gui, ZHAO Heng, ZHANG Ling, et al. Damage statistical softening constitutive model for rock considering effect of damage threshold and its parameters determination method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(6): 1148 - 1154.
- [22] LEMAITRE J, DESMORAT R. Engineering damage mechanics: Ductile, creep, fatigue and brittle failures[M]. Berlin: Springer, 2005.
- [23] LIU H H, RUTQVIST J, BERRYMAN J G. On the relationship between stress and elastic strain for porous and fractured rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2009, 46(2): 289 - 296.
- [24] LIU H H, WEI M Y, RUTQVIST J. Normal-stress dependence of fracture hydraulic properties including two-phase flow properties[J]. **Hydrogeology Journal**, 2013, 21(2): 371 - 382.
- [25] ZHAO Y, LIU H H. An elastic stress-strain relationship for porous rock under anisotropic stress conditions[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2012, 45(3): 389 - 399.
- [26] PALMER I, MANSOORI J. How permeability depends on stress and pore pressure in coalbeds: A new model[J]. **SPE Reservoir Evaluation & Engineering**, 1998, 1(6): 539 - 544.
- [27] BARTON N. Rock mechanics review: The shear strength of rock and rock joints[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1976, 13(9): 255 - 279.
- [28] WEI M Y, LIU H H, LI L C, WANG E Y. A fractal-based model for fracture deformation under shearing and compression[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2013, 46(6): 1539 - 1549.
- [29] RUTQVIST J, WU Y S, TSANG C F, et al. A modeling approach for analysis of coupled multiphase fluid flow , heat transfer ,and deformation in fractured porous rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2002, 39(4): 429 - 442.
- [30] 施小清, 张可霓, 吴吉春. TOUGH2 软件的发展及应用[J]. 工程勘察, 2009, 10: 29 - 39.
SHI Xiao-qing, ZHANG Ke-ni, WU Ji-chun. The history and application of TOUGH2 code[J]. **Geotechnical Investigation and Surveying**, 2009, 10: 29 - 39.