

含瓦斯煤体受载微破坏模型及失稳判识准则

聂百胜¹, 赵丹², 王孟霞², 柳先锋¹, 刘鹏¹, 邓博知¹,
朱熹阳², 秦枫², 马昕钰², 赵九红², 彭守建¹

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制全国重点实验室, 重庆 400044; 2. 中国矿业大学(北京) 煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室, 北京 100083)

摘要:煤体内孔隙和骨架分布对煤储层内气体运移及瓦斯动力灾害的发生具有重要的影响。为进一步探索含瓦斯煤体微观破坏机理, 针对含瓦斯煤的微观破坏过程, 对其微破坏形式展开详细的研究。采用原子力显微镜对加载前后突出煤样和非突出煤样表面进行了原位测试, 结果表明: 不同煤样受载后, 煤样表面结构均会发生变化, 闭孔孔径有所减小, 部分孔隙遭到破坏, 相邻闭孔之间有连通趋势。加载前煤样孔隙呈无规律分布, 加载后孔隙连通性增强, 开孔孔喉数量有所增加。煤样加载后由于孔隙的连通导致突出煤样煤骨架模量降低, 而非突出煤样由于本身强度较高, 施加载荷导致煤体内部结构被压实, 弹性模量略有增加。定义了煤体微观破坏类型及概念, 分析了煤体孔隙及煤骨架周边应力分布特征, 揭示了不同情况下含瓦斯煤体微观破坏机制。同时, 对闭孔微气爆的影响因素展开讨论, 狭长型椭圆孔端部孔壁处所受应力更大, 更容易发生闭孔微气爆。描述了开孔微损伤的2种发生形式, 揭示了孔隙“瓶颈效应”的制约对微破坏发生的机理。明确了原生缺陷结构为煤骨架的薄弱环节, 并对其发生破裂的演化规律进行分析。基于线弹性断裂力学、弹塑性力学以及渗流力学等理论知识, 提出了应力扰动作用下孔隙破坏和煤体失稳判识准则, 总结了含瓦斯煤体微观破坏特征及其诱导煤与瓦斯突出的机制, 并对煤与瓦斯突出的研究方向提出展望。

关键词: 孔隙; 失稳判识; 微破坏; 煤骨架; 煤与瓦斯突出

中图分类号: TD713 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)02-0707-13

Micro-damage model of gas-bearing coal under load and instability identification criteria

NIE Baisheng¹, ZHAO Dan², WANG Mengxia², LIU Xianfeng¹, LIU Peng¹, DENG Bozhi¹,
ZHU Xiyang², QIN Feng², MA Xinyu², ZHAO Jiuhong², PENG Shoujian¹

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. State Key Laboratory of Fine Exploration and Intelligent Development of Coal Resources, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The distribution of pores and skeletons within coal reservoirs significantly affects the migration of gases and the occurrence of gas dynamic disasters. To further explore the micro-damage mechanisms in gas-containing coal, a detailed study of the micro-damage process in gas-containing coal was conducted. Atomic force microscopy was employed to conduct in-situ tests on the surfaces of protruding and non-protruding coal samples before and after loading. The results indicate that the surface structure of the coal samples changes after loading, with a reduction in closed pore diameter, damage to

收稿日期: 2023-12-01 修回日期: 2023-12-25 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.ST23.1638

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(52274173); 国家自然科学基金资助项目(52204207); 国家留学基金委资助项目(201902720011)

作者简介: 聂百胜(1973—), 男, 山西平陆人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: bshnie@cqu.edu.cn

引用格式: 聂百胜, 赵丹, 王孟霞, 等. 含瓦斯煤体受载微破坏模型及失稳判识准则[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 707-719.

NIE Baisheng, ZHAO Dan, WANG Mengxia, et al. Micro-damage model of gas-bearing coal under load and instability identification criteria[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 707-719.



移动阅读

some pores, and a tendency for connectivity between adjacent closed pores. Before loading, the pores in coal samples exhibit irregular distribution, while after loading, pore connectivity increases, and the number of open pore throats slightly increases. Loading leads to a reduction in the modulus of coal skeleton in protruding coal samples due to pore connectivity, while non-protruding coal samples experience internal structure compaction, resulting in a slight increase in elastic modulus due to their higher strength. Micro-damage types and concepts in coal were defined, and the stress distribution characteristics around coal pores and the coal skeleton were analyzed, revealing the micro-damage mechanisms in gas-containing coal under different conditions. Simultaneously, the factors influencing the closed-cell micro-gas explosion were discussed. The stress at the end of a slender elliptical hole is greater along the hole wall, making it more susceptible to closed-cell micro-gas explosions. Two forms of occurrence of open-pore micro-damage were described, revealing the constraining effect of the "bottleneck effect" on micro-damage. Inherent fractures were identified as the weak link in the coal skeleton, and the evolution of their rupture was analyzed. Utilizing theories such as linear elastic fracture mechanics, elastic-plastic mechanics, and permeation mechanics, criteria for detecting pore damage and coal instability under stress disturbances were established. The micro-damage characteristics of gas-containing coal and the mechanisms inducing coal and gas outbursts were summarized, and the research direction of coal and gas outburst was prospected.

Key words: pore space; instability discrimination; micro-damage; coal skeleton; coal and gas outburst

煤层通常是在地下经历了长时间的物理化学变化而形成,同时受煤化作用、变质作用、构造演化作用、煤岩物质组成和地下流体等多种因素影响,因此其组成成分十分复杂,孔隙结构错综复杂^[1]。且煤样孔径大小跨度极大,从纳米级开始,形成一个复杂的孔隙网络,布局纵横交叉^[2]。煤的孔隙结构不仅为煤中气体的赋存提供了条件,而且在煤层气的吸附、解吸、扩散和渗透过程中起着决定性作用^[3-4]。对于含瓦斯煤体,其内部孔隙结构更加难以定性,其自身力学性质往往更为复杂。因此,对含瓦斯煤体微观结构破坏的研究,对于防治煤矿动力灾害和了解非常规储层的动态规律具有重要意义。

为更好地分析煤体孔隙结构对矿井灾害发生的影响机制,众多专家学者利用孔隙测试技术定量表征煤样的孔隙结构。赵政等^[5]对比了中阶不同破坏程度煤的孔隙特征差异,对比分析得出了不同煤样孔隙结构及分布特征。PAN 等^[6]借助原子力显微镜 (AFM) 研究了脆性变形和韧性变形煤纳米表面形态和孔结构特征,脆性变形下,过渡孔的比例和孔隙连通性随变形程度的增加而增大的现象有利于气体扩散。祝捷等^[7]基于压汞法和液氮吸附的实验结果,综合分析了突出煤样的孔隙结构特征,从煤层应力分布和应变能的角度讨论了煤的孔隙结构与煤岩动力失稳特征之间的相关性。HOU 等^[8]对比了不同粒度的原煤和构造煤孔隙结构,认为构造变形会使得煤体微孔隙破坏,导致介孔孔容和比表面积增大。煤微观结构的探索,为了解煤和瓦斯流固耦合的行为提供理论基础。

矿井瓦斯动力灾害是由地应力、瓦斯压力梯度和煤的力学性质共同影响作用的结果。研究含瓦斯煤

体的力学性质有助于认识含瓦斯煤体微观结构破坏,当前对于含瓦斯煤力学行为的描述多数以 Terzaghi 有效应力理论为基础,采用弹塑性模型解释应力路径的变化、弹性变形和破坏。当前描述含瓦斯的屈服准则主要有摩尔-库伦 (Mohr-Coulomb)、德鲁克-普拉格 (Drucker-Prager)、格里菲斯 (Griffith)、最大拉应力理论 (Maximum stress theory)。对于含瓦斯煤的随时间效应的力学属性通常采用黏弹塑性理论来描述。李祥春等^[9]经过优化得到改进的西原加速模型,提出了岩石发生非衰减蠕变是蠕变曲线上至少存在 1 个蠕变拐点的充要条件。LIU 等^[10]在研究含瓦斯煤中的固-气耦合效应,在孔隙率和渗透率处于动态效应和滑脱效应的基础上,综合考虑渗流力学和弹性力学知识,通过 Comsol 模拟数学模型,得到实验中应力应变规律与实验中煤体破坏模式的关系基本吻合。尹光志等^[11]利用自行研制的含瓦斯煤热流固耦合三轴伺服渗流实验装置,进行不同加卸载条件下含瓦斯煤力学特性的试验研究,总结了不同条件下含瓦斯煤的力学特性及表现规律。NIE 等^[12]基于 CT 和质点追踪法,从介观和宏观尺度研究了煤吸附瓦斯的变形规律,认为煤体产生吸附变形的空间分布受孔隙、裂隙和矿物分布的综合影响,是各向异性的,但宏观总体是膨胀变形。

前人从煤的微观结构、力学特征的理论模型等方面对含瓦斯煤体的破坏展开了研究,主要采用理论分析、数值模拟、实验室突出实验及现场观测的方法,取得了丰富的学术成果。笔者此前基于煤微观孔隙结构的综合表征,从微破坏发生和能量汇聚的微观角度分析了煤与瓦斯突出的过程^[13]。但对于微观破坏的

概念及相关模型研究还不够成熟, 量化分析含瓦斯煤的破坏过程也尚未实现。因此, 笔者从微观角度研究煤体与瓦斯的相互作用, 分析受载条件下微破坏失稳判识准则, 旨在对含瓦斯煤体微观破坏机理的研究进行完善和补充。

1 煤体微观破坏的概念

根据煤体的结构特征(图1)及其受载作用下微观破坏形式, 将煤体的微观破坏分为3种形式, 分别为闭孔微气爆、开孔微损伤以及煤骨架微破裂。

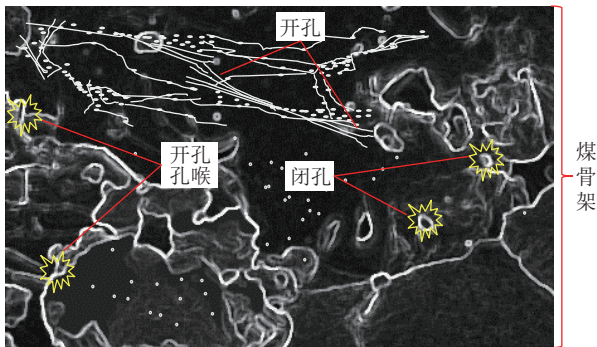


图1 煤体微观结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of coal body microstructure

(1) 闭孔微气爆。煤中闭孔的存在是由煤物质的易碎结构引起, 封闭孔隙的比容超过所有其他孔隙的比容。研究表明, 在 3.1~370 nm 的孔径内, 闭孔对总孔体积的贡献超过 90%^[14], 且在储存气体中起到重要作用。受应力扰动影响, 煤体闭孔结构受到挤压发生破坏, 孔隙内吸附的瓦斯气体瞬间解吸释放。将这种闭孔破坏瞬间释放瓦斯能量的现象, 定义为闭孔微气爆。

(2) 开孔微损伤。煤中开放孔隙之间连通较好, 在含瓦斯煤体中, 开孔结构对瓦斯的存储和运移都有着至关重要的作用, 同时在很大程度上影响着煤层的渗透性。开孔微损伤通常包含2种形式: 一是由于孔隙尺寸的非均匀性, 受到采动应力和围岩应力影响时, 会在孔径较大部分形成局部应力集中, 对孔隙造成局部微损伤; 二是瓦斯在开孔内运移过程中, 在孔道尺寸变窄的位置, 以及孔隙汇流位置, 瓦斯流动受到阻滞, 造成瓦斯大量聚集, 导致孔喉处压力梯度陡增, 诱发孔隙的变形损伤。将这2种导致开孔损伤的现象, 定义为开孔微损伤。

(3) 煤骨架微破裂。煤骨架是由煤基质间相互接触和粘结而形成、对煤体起一定支撑作用的煤体结构。由于煤体中存在大量孔裂隙, 煤骨架微观结构具有一定缺陷, 并不是密实的整体。在采动应力影响下, 煤层孔隙连通过程中, 导致堆叠煤颗粒之间的接触面积减小, 煤骨架被分割成许多细小部分。同时作用在煤骨架上的有效应力迅速增加, 导致煤骨架发生微观变形, 当应力进一步增加, 煤骨架产生变形超过自身的断裂韧度, 煤骨架遭到破坏发生键的断裂。将这种煤骨架断裂失去承压作用的现象, 成为煤骨架微破裂。

2 煤体的微观破坏实验研究

2.1 样品与实验

2.1.1 实验样品

(1) 煤样基础参数。实验煤样分别取自山西焦煤西山煤电集团公司屯兰煤矿8号煤层(以下简称“屯兰”)和鄂尔多斯市吴华精煤有限责任公司高家梁煤矿4-2中煤层(以下简称“高家梁”), 煤样基本信息见表1。

表1 煤样基本信息

Table 1 Basic information of coal samples

煤样	$M_{ad}/\%$	$A_{ad}/\%$	$V_{daf}/\%$	$FC_d/\%$	$R_{o,max}/\%$	煤质	坚固性系数
屯兰	0.83	5.44	18.17	76.39	1.73	焦煤	0.27
高家梁	13.96	3.64	25.99	70.37	0.76	不黏煤	2.31

(2) 煤样制备。由于测试过程中原子力显微镜(AFM)探针需要在距离试样表面纳米尺度内移动, 因此, 实验要求被测试样具有较高的表面光滑度。为了满足粗糙度的要求, 在处理样品时流程如下: 首先将大块煤样钻孔取心, 将煤块切割为长 20~25 mm、宽 15~20 mm、厚 9~15 mm 的小煤块, 再依次用 40 μm (360 目)、15 μm (800 目)、13 μm (1 000 目)、10.4 μm (1 200 目)、10 μm (1 500 目)、6.5 μm (2 000 目) 的砂纸对待测面进行打磨, 直至表面平整, 且游标卡尺测量

时各处高度统一。然后用抛光布和抛光膏对待测面进行抛光, 设定转速 150 r/min, 抛光 10 min, 抛光过程中需加水处理。抛光完成后, 将样品放入装有去离子水的超声清洗器内清洗, 并对处理好的煤样进行干燥, 如图2所示。

2.1.2 实验设备

微观尺度的煤具有独特的物理结构, 内部除了固体基质外, 还分布有大量结构不同、空间位置各异的孔裂隙结构^[13,15]。采用 Dimension Icon 型原子力显微

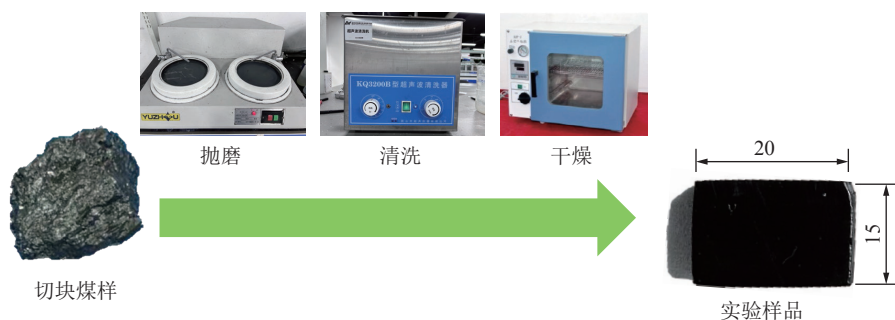


图2 实验样品处理流程

Fig.2 Experimental sample processing process

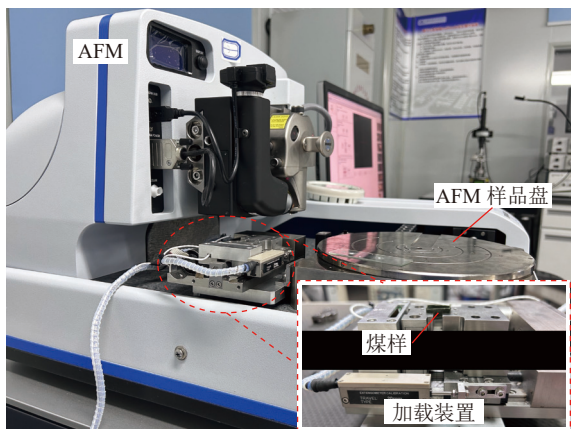


图3 实验设备

Fig.3 Laboratory equipment

镜 (AFM) 和微观动态加载装置 (图 3), 对加载前后煤样的表面形貌及纳米孔隙结构进行扫描。

2.1.3 实验流程

首先将抛光好的煤样放入加载装置的夹具中, 接通电源, 关闭夹口。为避免探针扫描过程中样品发生移动, 需对样品施加一定的预紧力将其固定在夹具上, 此荷载下默认样品为非受力的初始状态。启动加载装置, 待载荷达到设定值后保载。利用光学显微镜, 挑选表面光滑平整无明显裂痕区域。设置测试范围为 $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$, 扫描频率为 256×256 。当预紧力载荷下试样表面力学性质测试完成后, 抬起探针, 设定载荷加载试样, 待载荷达到目标值后进行保载, 通过调整 AFM 的 $x\ \text{offset}$ 和 $y\ \text{offset}$ 值, 使探针位置与第 1 次测试范围的中心位置重合, 然后再调整测试范围为 $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$, 再次对所选区域进行扫描, 以此实现加载前后煤样表面形貌的原位测试。

2.2 实验结果分析

2.2.1 表面形貌分析

图 4 为 AFM 观察到的煤表面形貌特征, 其中灰度表示表面高度, 表面高度较小甚至为负值的孔隙显示为黑色或深灰色, 灰度越高, 则孔隙越深^[16]。

由图 4 可以看出, 2 种煤样受载后, 微观表面形貌

均会发生改变。但不难看出, 屯兰煤样受载后, 煤样明显受到挤压, 较高家梁煤样在载荷方向具有明显位移。这是由于屯兰煤本身质地较软, 坚固性系数较低, 仅为 0.27, 极容易在载荷作用下产生较大变形。

从加载前后煤微表面形貌图中还可以看出, 煤样闭孔在受力作用下, 孔隙进行收缩, 原本吸附气体的孔隙体积有所减小, 导致孔隙内部气体压力有所增加。同时受采掘扰动作用下, 闭孔所受有效应力增加, 孔隙壁薄弱处容易发生破坏, 破坏的同时孔隙内部气体压力与孔隙外部形成区域压力差, 导致孔隙内气体发生瞬时解吸现象, 即闭孔微气爆。部分孔隙遭到贯通破坏, 相邻闭孔之间有连通趋势, 进一步导致煤样孔比表面积的变化。加载前煤样孔隙呈无规律分布, 加载后孔隙连通性增强, 这也导致煤层中开孔孔喉数量有所增加, 瓦斯运移过程中造成能量积聚, 造成开孔孔喉微损伤。孔隙在受力作用下形成连通, 部分孔隙裂隙产生扩展, 进一步将煤骨架由整体进行分割, 极大程度降低了煤骨架的支撑能力, 发生煤骨架微破裂。

由此可见, 对煤样施加较小的作用力, 即可导致其微观结构发生改变和孔隙破坏。含瓦斯煤体由于其孔隙内部吸附大量的瓦斯, 孔隙结构的改变及破坏同时影响瓦斯在煤层中的渗流及运移, 随着煤体微观结构损伤的增加及瓦斯能量的积聚, 破坏由微观向宏观发展, 最终形成煤与瓦斯突出灾害。

2.2.2 表面力学性质变化

AFM 内置 PF-QNM 模式可实现材料微表面力曲线表征, 进而获取其表面力学参数和形貌特征信息。在该模式下, AFM 系统通过控制扫描器的上下移动来保持探针与试样表面之间的峰值力恒定, 进而得到微表面形貌, 同时根据力-位移曲线计算得到表面弹性模量^[17]。弹性模量可反映微纳米尺度材料表面的弹性特征, 微表面破裂的产生与发展密切相关。不同煤样受载前后表面弹性模量变化如图 5 所示。其中不同灰度表示煤样表面弹性模量的大小, 颜色越深则说明该位置弹性模量越小。

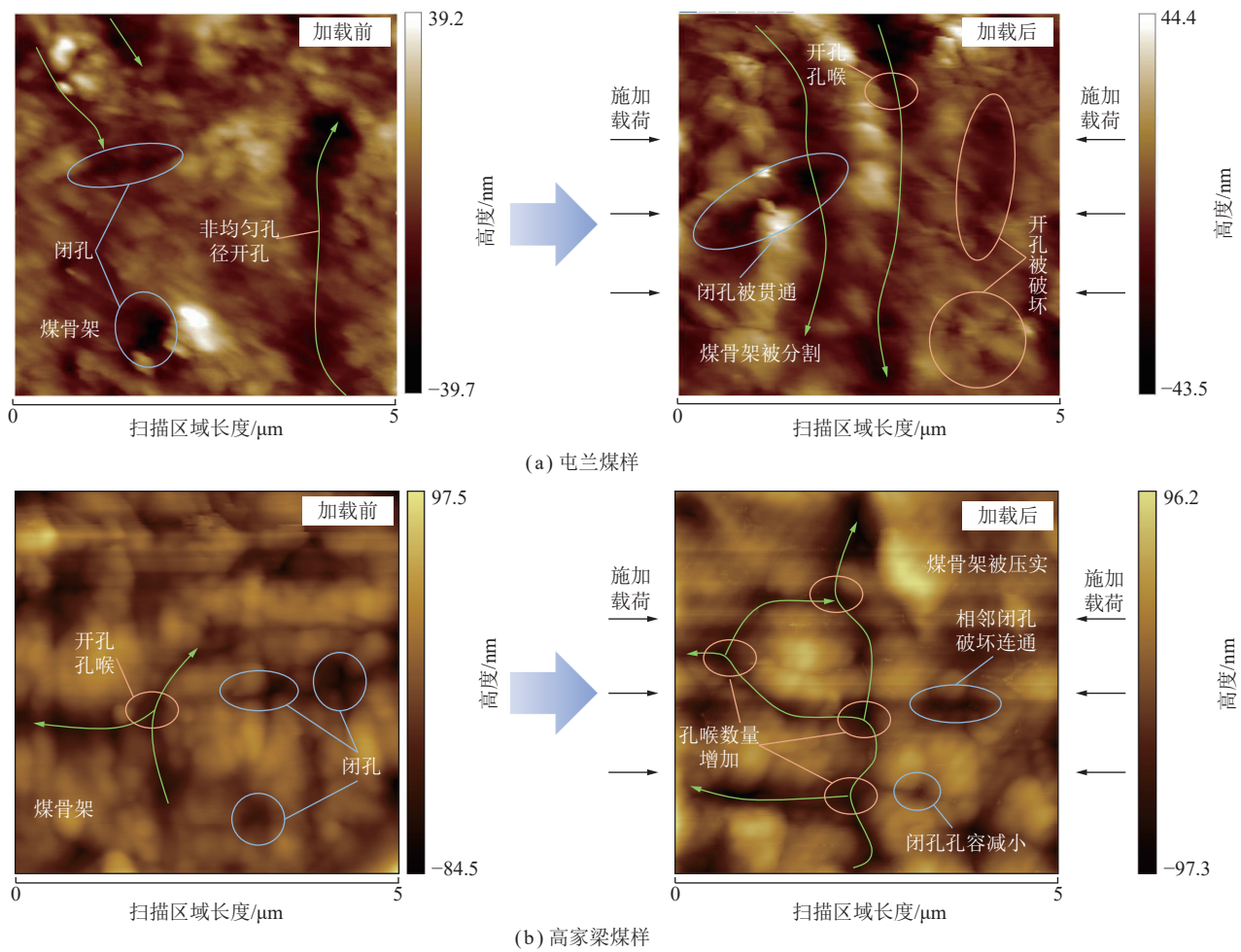


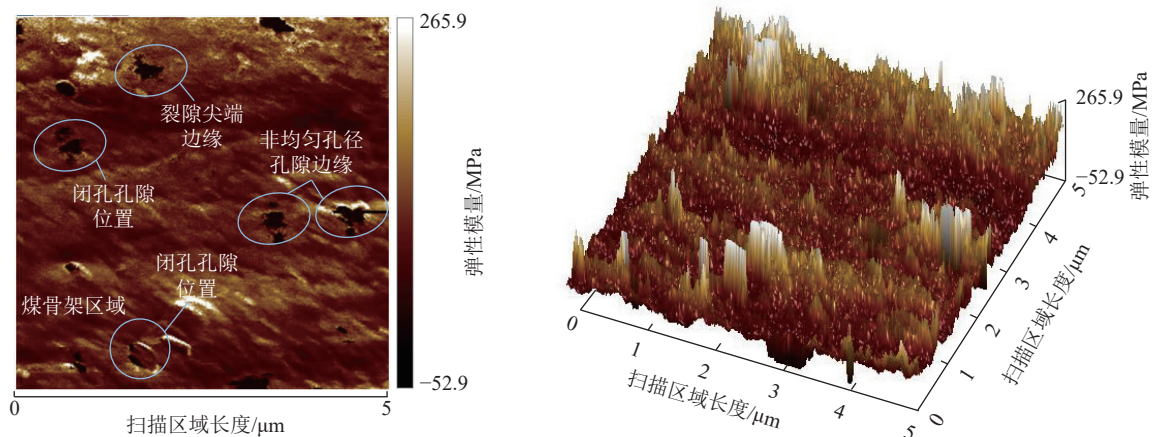
图4 加载前后煤微表面形貌原位测试示意

Fig.4 In-situ test images of coal micro surface morphology before and after loading

可以发现,加载前后的煤样的表面弹性模量分布不均匀,存在明显的明暗夹杂的分布特征,反映了煤的非均质特性,即微观表面力学仍存在非均质性。屯兰煤样表面微观弹性模量明显小于高家梁煤样,且加载后突出煤弹性模量整体低于加载前,而高家梁煤样则恰好相反,加载后弹性模量整体略高于加载前。这是由于高家梁煤样本身强度较高,抵抗外界压力的能

力较强,在载荷作用下煤体内部结构被进一步压紧密实^[18]。而屯兰煤样由于本身强度较低,加载过程中由于孔裂隙的贯通和延展,将煤骨架由整体进行切割,进一步削弱了其强度。

将煤微表面弹性模量分布(图5)与加载前后煤微表面形貌原位测试(图4)结合起来不难发现,图5中黑色区域为煤样孔隙壁和裂纹边缘处,其弹性模量相



(a) 屯兰煤样加载前

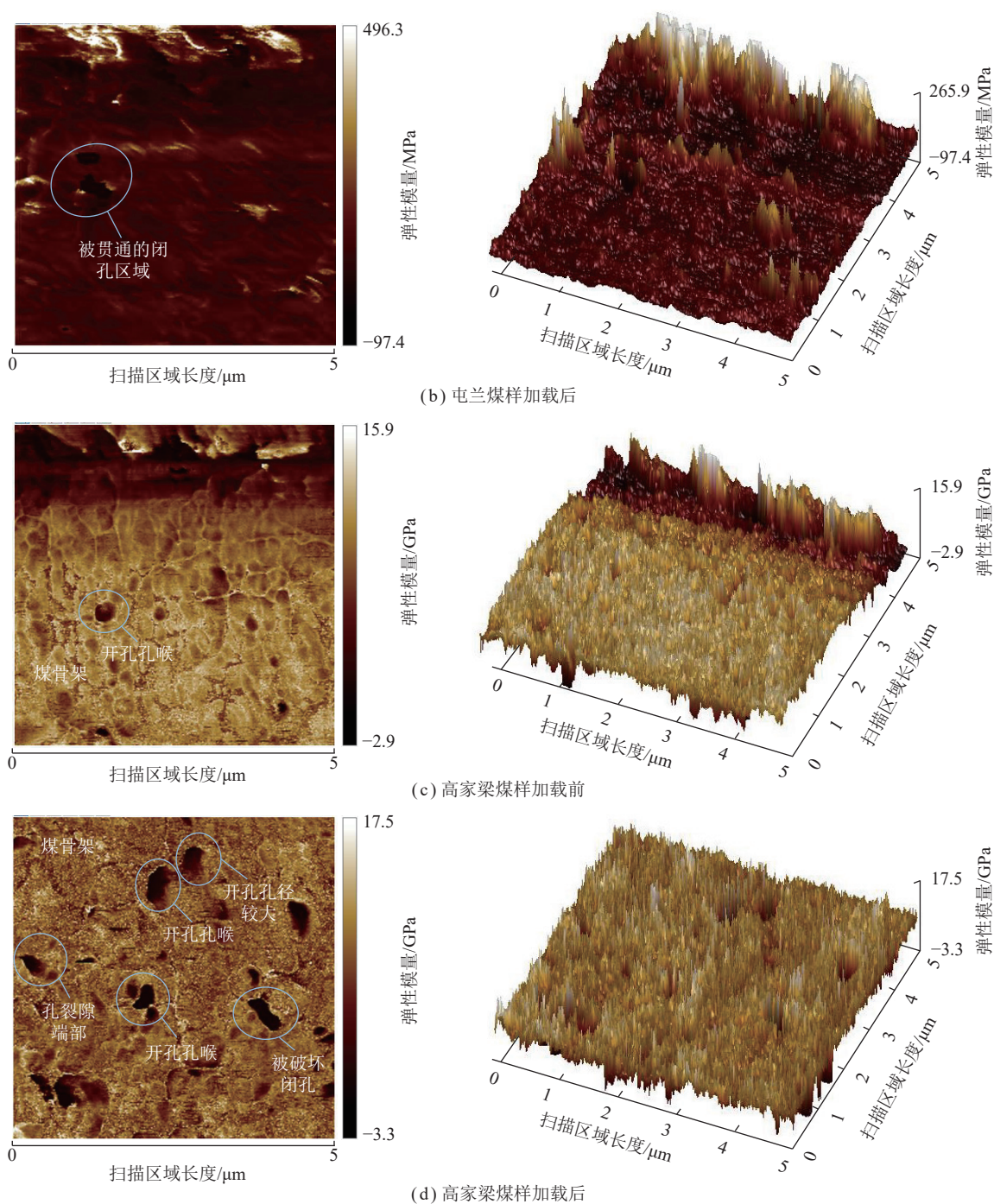


图5 煤微表面弹性模量分布

Fig.5 Distribution map of coal micro surface elastic modulus

对较低,为煤样孔裂隙结构的薄弱环节。因此,煤样受载后容易在此处发生破坏。

3 煤体微破坏应力分析及失稳判识准则

3.1 煤体细观受力分析

煤作为多孔介质材料,微观结构包含了孔隙、微裂隙以及煤基质固相裂开接触区域,这些微裂隙和固相接触区域通常强度较低,且形状狭窄又不规则。为了更好地分析宏观加载条件下的煤体微观力学传递

现象,基于 Eshelby 夹杂理论的假设,将孔隙视为夹杂体,煤体微观结构视为夹杂孔隙的异质煤体,如图 6 所示。

均质煤样所受外力在孔隙周围产生二维应力应变场^[19]。对于一个面积为 S 的代表性单元体 Ω ,区域内平均应力定义为

$$\bar{\sigma} = \sum_{j=0}^N s_j \sigma_j \quad (1)$$

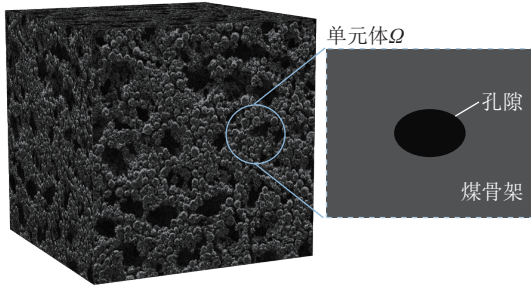


图6 煤体夹杂模型示意

Fig.6 Schematic diagram of coal inclusion model

式中, 0 代表煤基质; $1 \sim N$ 代表不同的孔隙; s_j 为第 j 个孔隙 ($j \neq 0$) 或基质 ($j=0$) 的面积占比; σ_j 为各个孔隙所受应力。

在外力 σ_j^A 的作用下, 基体对异质夹杂产生了扰动应变和约束应变, 将“煤体胞元”产生的应变进行分解, 可得到夹杂体所受平均应力^[20]为

$$\sigma_j^1 = \sigma_j^A + \sigma_j^* + \sigma_j^C = C_{jkl}^1 (\varepsilon_{kl}^A + \varepsilon_{kl}^* + \varepsilon_{kl}^C) \quad (2)$$

式中, σ_j^A 为夹杂体总应力张量; σ_j^* 为煤基质对夹杂孔隙的扰动应力张量; σ_j^C 为煤基质对夹杂孔隙的约束应力张量; C_{jkl}^1 为夹杂孔隙的弹性常数张量; ε_{kl}^A 为夹杂孔隙和煤基质因外力而产生的共同应变; ε_{kl}^* 为外力作用下煤基质对夹杂孔隙产生的扰动应变; ε_{kl}^C 为煤基质对夹杂孔隙的约束应变。

煤体胞元内煤基质的平均应力^[20]为

$$\sigma_j^0 = \sigma_j^A + \sigma_j^* = C_{ijkl}^0 (\varepsilon_{kl}^A + \varepsilon_{kl}^*) \quad (3)$$

式中, C_{ijkl}^0 为煤基质的弹性常数张量。

采用 Eshelby 夹杂理论和 Mori-Tanaka 等效方法^[21], 式 (2) 可变为

$$\sigma_j^1 = C_{jkl}^1 (\varepsilon_{kl}^A + \varepsilon_{kl}^* + \varepsilon_{kl}^C) = C_{jkl}^0 (\varepsilon_{kl}^A + \varepsilon_{kl}^* + \varepsilon_{kl}^C - \varepsilon_{kl}^T) \quad (4)$$

式中, ε_{kl}^T 为夹杂孔隙的本征应变。

由此, 则可得到煤体所受宏观应力 σ_j^A 与传递作用到微观结构上应力之间的关系。但由于孔隙形状、流体压力等因素的影响, 不同孔隙较理想夹杂模型应力值有所不同。假设煤体胞元所受平均应力为孔隙周边均匀分布应力, 考虑孔隙内流体压力, 进一步针对不同孔隙及煤基质的应力状态进行分析。

3.2 闭孔微气爆

3.2.1 受载闭孔应力分析

对煤中闭孔进行受力分析时, 通常将孔隙简化成长半轴为 a_1 、短半轴为 b_1 的椭圆形。通过对椭球形孔周边应力的分析, 从而分析闭孔的力学破坏机制。假设含瓦斯闭孔内部存在流体压力 P , 流体压力的存

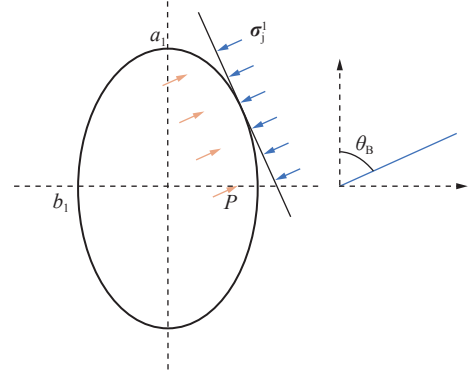


图7 含瓦斯闭孔周边应力分布模型

Fig.7 Computational mechanical model of stress around gas-containing obturator

在起到抵消闭孔外部应力的作用, 使得闭孔受到的初始应力发生改变, 如图 7 所示。

煤样中存在大量封闭孔隙^[22], 将闭孔看成由弹性力学知识可以求得椭球体孔周边应力的复变函数解^[23], 即

$$\sigma_C = (1 + 2m) \sigma_j^1 \sin \theta_B - \sigma_j^1 \cos \theta_B \quad (5)$$

式中, m 为长半轴与短半轴的比值, 即 $m=a/b$; θ_B 为椭圆孔上所受应力方向与长轴 a 之间的夹角, ($^\circ$)。

假设流体压力在各个方向上应力是相同的, 根据有效应力原理得, 含瓦斯闭孔有效应力:

$$\sigma'_C = \sigma_C - P \quad (6)$$

将式 (5) 代入式 (6), 即可得到含瓦斯椭球体闭孔周边应力为

$$\sigma'_C = (1 + 2m) \sigma_j^1 \sin \theta_B - \sigma_j^1 \cos \theta_B - P \quad (7)$$

3.2.2 闭孔微气爆失稳准则

封闭孔隙的破坏与应力条件、孔隙内瓦斯压力和孔隙形状因素有关。采掘扰动影响下, 较高的集中应力导致孔隙趋于剪切破坏, 而处于卸压状态的孔隙趋于发生拉张破坏。瓦斯压力越大, 越促进对孔隙壁的剪切破坏和拉张破坏的发生。当孔隙不规则时, 产生的切向应力集中程度是必然加强的。

结合含瓦斯椭球体闭孔周边有效应力公式 (式 (7)), 讨论不同孔隙形状 (不同 m) 含瓦斯闭孔所受有效应力与夹角 θ_B 的规律, 如图 8 所示。

图 8 中正值表示孔隙受剪切破坏, 负值表示拉张破坏。从图 8 可以看出, 闭孔孔型参数和应力与孔隙对含瓦斯椭球体孔周边的应力分布产生重要影响。 $0^\circ \sim 360^\circ$ 内含瓦斯闭孔周边应力随夹角 θ_B 呈现周期性变化, 当所受应力与长轴方向一致时 (θ_B 为 0° 或 180°), 孔隙长轴端部处所受应力最大, 即最容易发生

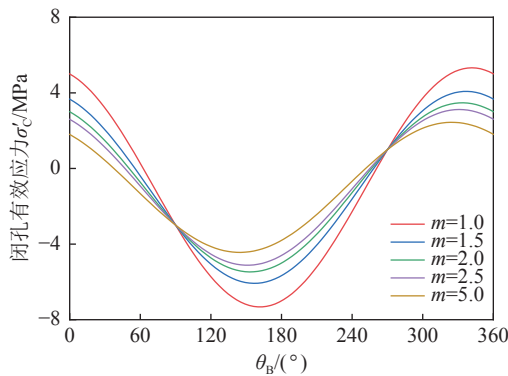


图 8 含瓦斯椭圆孔周边应力分布

Fig.8 Stress distribution around the elliptical closed cell containing gas

孔隙破坏。随着 m 值的增加,有效应力曲线逐渐趋于陡峭,波峰和低谷数值逐渐增大。说明相同储层环境下,狭长型椭圆孔更容易发生闭孔微气爆。煤中闭孔通常包含球形、不同高径比的圆柱形以及不同长短轴之比的椭球形^[24]。当煤体中狭长型闭孔含量较多时,煤体发生微破坏的概率会大幅增加。

3.3 开孔微损伤

3.3.1 受载开孔应力分析

纳米级孔隙中的气体运移通常包括表面扩散、努森扩散和滑脱流动等多种方式^[25]。在研究开放孔隙的受力状态,要尤其注意气体在孔隙内部的运移状态。孔隙喉道聚集瓦斯吸附导致煤体膨胀,煤吸附瓦斯的膨胀应力^[26-27]可表示为

$$\sigma_G = \frac{2a\rho_{\text{gas}}RT(1-2\mu)\ln(1+bP)}{3V_m} \quad (8)$$

式中, a 和 b 为 Langmuir 吸附常数,分别取 $31.7 \text{ m}^3/\text{t}$ 和 1.22 MPa^{-1} ; ρ_{gas} 为气体密度, g/cm^3 , 取 $716.3 \text{ g}/\text{cm}^3$; R 为气体通用常数,取 $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为绝对温度, K ; V_m 为摩尔体积,取 $22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol}$ 。

考虑瓦斯吸附膨胀效应和瓦斯孔隙压力的开孔有效应力为

$$\sigma'_o = \sigma'_j - P \left[\alpha' + \frac{2a\rho_{\text{gas}}RT(1-2\mu)\ln(1+bP)}{3V_m P} \right] \quad (9)$$

式中, α' 为孔隙压力作用系数,取 0.3。

3.3.2 受载开孔微损伤特征及失稳准则

瓦斯在煤体中出现扩散、渗流和扩散渗流中间态等多种形式都对开孔中的孔喉存在较大的影响。尤其是对高微孔比例和狭窄孔喉区域,孔隙的不规则性以及孔喉处明显的“瓶颈作用”会对应力分布及孔隙内瓦斯压力梯度造成影响,如图 9 所示。对孔喉周边的孔壁造成过高压,由于较高的瓦斯压力梯度,孔壁难以承受气压的持续冲击发生损伤,甚至导致破

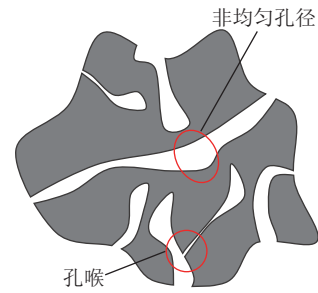


图 9 煤中开孔结构示意图

Fig.9 Schematic diagram of opening structure in coal 坏^[13,28]。

(1) 非均匀孔径应力集中损伤失稳模型。由于煤体中开孔大多为形状不规则、大小不一且孔径不断变化的孔隙,受应力扰动影响,孔径较大的区域所承受应力较高,容易产生应力集中现象,造成孔隙微损伤。由于孔径较大处应力远大于开孔其他位置,且孔隙的尺寸远小于煤体宏观尺寸,孔边距煤体宏观的边界较远。因此,将非均匀孔径应力集中现象简化为薄板(或长柱)孔口应力集中问题^[29],如图 10 所示。

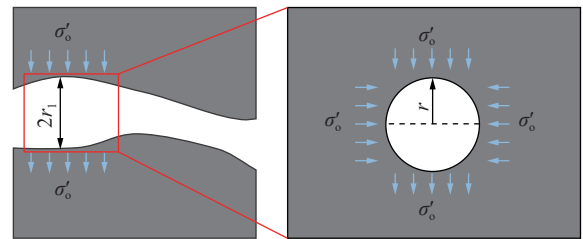


图 10 开孔受力示意

Fig.10 Schematic diagram of opening force

采用极坐标轴对开孔所受应力求解^[30],可得

$$\sigma_\rho = \sigma'_o \frac{1-r^2/\rho^2}{1-r^2/R^2} \quad (10)$$

$$\sigma_\phi = \sigma'_o \frac{1+r^2/\rho^2}{1-r^2/R^2} \quad (11)$$

其中, σ_ρ 与 σ_ϕ 为应力在极坐标轴上的分量; r 为开孔孔径最大值; R 为煤层半径,其值远大于孔隙半径。因此,可以取 $r/R=0$ 。

则式 (10) 和式 (11) 可简化为

$$\sigma_\rho = \sigma'_o \left(1 - \frac{r^2}{\rho^2} \right) \quad (12)$$

$$\sigma_\phi = \sigma'_o \left(1 + \frac{r^2}{\rho^2} \right) \quad (13)$$

利用极坐标变换式,得到煤体的边界条件^[30]为

$$\begin{cases} (\sigma_\rho)_{\rho=R} = \sigma'_0 \cos^2 \varphi - \sigma'_0 \sin^2 \varphi = \sigma'_0 \cos 2\varphi \\ (\tau_\rho)_{\rho=R} = -2\sigma'_0 \sin \varphi \cos \varphi = -\sigma'_0 \sin 2\varphi \end{cases} \quad (14)$$

式中, φ 为内摩擦角, 取 36° 。

同理, 孔边的边界条件为

$$\begin{cases} (\sigma_\rho)_{\rho=r} = 0 \\ (\tau_\rho)_{\rho=r} = 0 \end{cases} \quad (15)$$

由边界条件式 (14) 和式 (15) 可见, 采用半逆解法, 得剪切应力最后表达式为

$$\begin{cases} \sigma_\rho = \frac{\sigma'_0}{2} \left(1 - \frac{r^2}{\rho^2} \right) + \frac{\sigma'_0}{2} \cos 2\varphi \left(1 - \frac{r^2}{\rho^2} \right) \left(1 - 3 \frac{r^2}{\rho^2} \right) \\ \sigma_\varphi = \frac{\sigma'_0}{2} \left(1 + \frac{r^2}{\rho^2} \right) - \frac{\sigma'_0}{2} \cos 2\varphi \left(1 - 3 \frac{r^4}{\rho^4} \right) \end{cases} \quad (16)$$

由式 (16) 可获得煤体内部开孔孔径较大位置周围应力分布, 如图 11 所示。

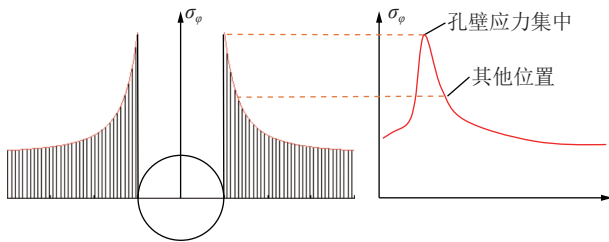


图 11 开孔孔径较大位置周围应力分布曲线

Fig.11 Stress distribution curve around positions with larger aperture

可以看出, 开孔所受环向正应力在较大孔径的孔壁处产生应力集中, 孔附近所受应力远大于距孔壁较远处应力。由于应力的增加, 孔隙产生的变形增加, 产生局部损伤。

(2) 瓦斯流动汇聚开孔损伤失稳模型。煤体内开放孔和闭孔随机分布, 组成孔隙网络, 开孔相互交错形成通道, 瓦斯在孔隙内不断运移, 由于孔隙孔径收缩 ($d_1 > d_2$) (图 12(a)), 或在开孔连通处, 瓦斯发生汇流, 各支流孔径总断面积大于干流孔径断面面积时 ($\sum S_{in} > S_{out}$) (图 12(b)), 受瓶颈效应的制约, 瓦斯流动受阻, 孔隙喉道处聚集大量瓦斯, 引起孔隙内瓦斯压力梯度变化, 即 $p_1 > p_2$ 。

如图 12 所示, 瓦斯在孔喉处发生积聚, 即 p_1 处压力最大, 根据土力学理论, 气体流动过程中对煤孔隙产生与流动方向一致的拖拽力, 且与压力梯度呈正相关。对开孔孔喉处进行受力分析, 任取孔喉处一段宽度为 dx , 高为 d_2 的孔隙单元体, 单元体在 z 轴方向上受到应力 σ_z , 忽略 z 轴方向上孔隙所受应力增量, 则降

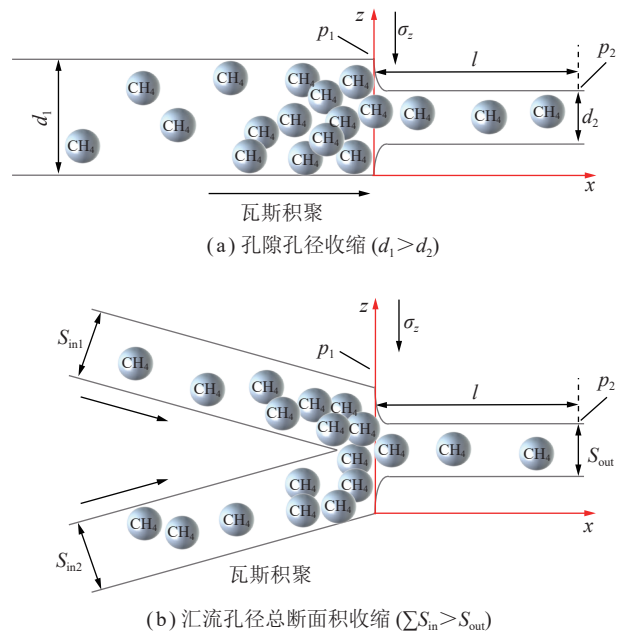


图 12 开孔孔喉示意

Fig.12 Schematic diagram of opening throat

压区内单位压力梯度^[31]可表示为

$$\frac{dp}{dx} = \frac{p_1^2 - p_2^2}{2l} \frac{1}{\sqrt{p_2^2 + \frac{x}{l}(p_1^2 - p_2^2)}} \quad (17)$$

式中, l 为孔隙中压力梯度区长度, nm; x 为孔隙中某一位置到瓦斯积聚端距离, nm; p_1 、 p_2 分别为压力梯度两端压力, MPa。

单位体积内瓦斯压力梯度产生的拖拽力为

$$f(x) = \Delta d \frac{dp}{dx} \quad (18)$$

式中, Δd 为开孔孔径增量, $\Delta d = d_1 - d_2$, nm。

由此可得到瓦斯流动方向的平衡方程为^[32]为

$$f(x)dx - 2(\sigma_z \tan \varphi + c)dx = 0 \quad (19)$$

式中, c 为煤体黏聚力, MPa。

将式 (17) 和式 (18) 代入式 (19) 可得

$$\frac{\Delta d}{2l} \frac{p_1^2 - p_2^2}{\sqrt{p_2^2 + \frac{x}{l}(p_1^2 - p_2^2)}} - 2(\sigma_z \tan \varphi + c) = 0 \quad (20)$$

由式 (20) 可知, 瓦斯积聚 ($x=0$) 处为孔隙最容易破坏的位置, 此处产生的拖拽力最大。此时孔隙壁所受侧向应力为 0, 则孔隙破坏应满足

$$\frac{\Delta d}{4l} \frac{p_1^2 - p_2^2}{p_2} - c = 0 \quad (21)$$

进一步将式 (21) 进行整理, 可以得到孔隙壁损伤破坏模型:

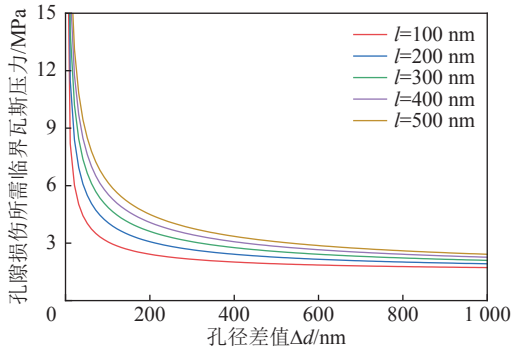


图 13 孔径变化值和临界瓦斯压力关系

Fig.13 Relationship between pore size variation and

$$p_1 = \sqrt{p_2^2 + \frac{4clp_2}{\Delta d}} \quad (22)$$

由式 (22) 可以得到不同孔径差值对应的开孔孔喉损伤临界压力变化曲线, 如图 13 所示。

从图 13 中不难看出, 开孔孔径 (孔径总断面) 变化越大, 孔喉损伤的临界瓦斯压力越低, 也就是说, 当孔径变化较大时, 孔喉处只需积聚少量瓦斯即可对孔隙造成损伤, 引起煤体的微观破坏。同时, 降压区越长, 所需临界瓦斯压力越大, 反之, 对应临界瓦斯压力减小。由此可见, 孔径均匀且较长的孔隙, 不易受到瓦斯积聚造成的损伤。

3.4 煤骨架微破裂

3.4.1 煤骨架应力分析

煤体内部除大量的孔隙结构以外, 剩余部分均为煤骨架结构, 煤骨架是煤体的主体部分, 起主要支撑作用。煤骨架所承受的应力主要来自 2 部分: 一部分是地应力作用下与周边煤体的相互挤压; 另一部分是受周边孔隙中瓦斯的影响, 游离态瓦斯产生的孔隙压力以及吸附解吸瓦斯过程中产生的膨胀或收缩应力。根据修正的 Terzaghi 有效应力公式, 煤骨架所受有效应力^[33]为

$$\sigma'_s = \sigma_j^0 - \gamma p' \delta_j \quad (23)$$

式中, γ 为与煤体有关系数, 且 $0 \leq \gamma \leq 1$; p' 为煤骨架所受孔隙压力, MPa; δ_j 为 Kronecker 符号。

3.4.2 含原生缺陷煤骨架受载微破坏特征及失稳准则

煤骨架是煤体的主要支撑结构, 由于煤化过程中垂直压力作用下, 成煤物质的体积均匀收缩产生内张力, 导致煤骨架中含有大量的内生裂隙, 如图 14 所示。原生缺陷位置是煤骨架的薄弱环节, 受应力扰动的影响, 在气体压力和应力的共同作用下, 煤骨架中的原生缺陷产生膨胀并快速扩展, 同时诱发周边煤骨架产

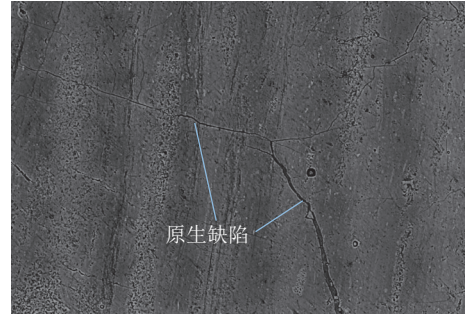


图 14 含有原生缺陷的煤骨架示意

Fig.14 Schematic diagram of coal skeleton containing primary defects

生破裂, 导致煤骨架遭到破坏, 最终失稳。

假设在原岩应力条件下, 在煤体中有半径为 r_L 、厚度为 h 的盘型缺陷结构, 则其体积 V_c 可表示为

$$V_c = \pi r_L^2 h \quad (24)$$

所做的总功^[34]为

$$W = \frac{8(1-\mu^2)r_L^3\sigma_s'^2}{3E} \quad (25)$$

式中, μ 为煤体泊松比, 取 0.3; E 为煤体弹性模量, 取 3 500 MPa。

所做的功同时又等于整个断裂面上的牵引力和位移之积的一半^[35], 即

$$W = \frac{\pi r_L^2 \sigma_s' h}{2} \quad (26)$$

结合式 (25)、(26), 缺陷结构半径与应力相关函数可表示为

$$r_L = \frac{3\pi E h}{16(1-\mu^2)\sigma_s'} \quad (27)$$

基于线弹性断裂力学 (LEFM), 当断裂尖端的应力强度因子 (K_I) 达到临界值 (K_{IC}) 时, 材料被认为断裂失效。无限域中嵌入裂缝的应力强度因子 K_I 可以用有效应力和缺陷结构半径表示为

$$K_I = 2\sigma_s' \sqrt{\pi r_L} \quad (28)$$

将式 (27) 代入式 (28), 即可得到应力强度因子与所受应力之间的关系

$$K_I = \sqrt{\frac{3\pi^2 E h \sigma_s'^2}{4(1-\mu^2)}} \quad (29)$$

由此可得到含原生缺陷煤体在不同有效应力状态下的断裂临界应力强度因子 K_{IC} , 如图 15 所示。

从图 15 可以看出, 煤骨架所受有效应力的增加使得煤体的应力强度因子增加, 造成煤岩体的破裂。

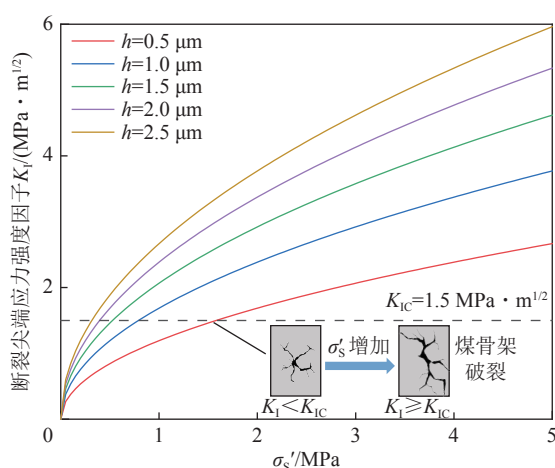


图15 煤骨架微破坏阈值极限

Fig.15 Threshold limit of coal skeleton micro fracture

同时,煤层中原始结构缺陷厚度越大,越容易在应力作用发生破坏,结合式(28)也可以看出,裂缝扩展,即裂纹半径不断增加,会进一步导致应力强度因子增加,假设煤骨架临界强度因子为 $1.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,当 K_I 超过临界值 K_{IC} ,煤骨架就会发生破坏。因此,一旦裂缝产生,它将随应力的增加继续扩展,而不是在连续气体解吸条件下达到平衡状态。由于裂缝扩展后裂缝内气体压力降低,导致气体持续解吸并流动,为煤与瓦斯突出提供能量。

4 微破坏诱发突出机制

煤层在未开采时,处于原岩应力平衡状态。开采工作进行后,受采掘应力扰动影响,煤层宏观应力发生变化,煤体内部重新调整应力分布。基于微观等效应力传递理论,作用于煤体微观孔裂隙的应力发生改

变,导致孔裂隙结构发生改变。当应力达到某一临界值后,煤样中闭孔薄弱处发生破坏,孔隙内部瓦斯涌出,释放瓦斯能量,同时带动周围区域孔隙发生破坏连锁效应。

在应力重新分布过程中,由于开孔孔径的非均匀性,应力会更容易集中在孔径较大处,同时由于闭孔微气爆释放了大量的吸附态瓦斯,导致微破坏发生区域内形成瓦斯压力差。在压力差的影响下,瓦斯发生流动,并在汇流或孔径狭窄处产生能量积聚,积聚的能量在孔喉处对开孔孔隙产生拖拽力,最终导致开孔损伤的发生。

气体分子运移过程中,吸附态和游离态瓦斯处于动态转换状态过程中,当气体的能量高于分子(或原子)间的键能时,气体分子能够楔开并进入到与气体分子直径相当的煤物质大分子(或芳香层)之间^[36]。此过程将部分瓦斯膨胀能转化为煤体的破碎功,使煤骨架产生一定的变形或形成微小的裂隙,对煤体起到“蚀损作用”。此外,裂隙的产生和扩展会导致煤骨架强度因子增加,并逐渐超过煤样的断裂临界应力强度因子,最终使煤骨架发生断裂。煤骨架的断裂宏观表现为煤体粉化程度增加,无法抵抗高压梯度瓦斯对煤体产生的拖拽作用以及应力的剪切作用,同时进一步加速了吸附态瓦斯的解吸作用,造成能量积聚。

当煤体微破坏积聚的综合能量小于突出屏障的约束时,突出就不会发生。如果该能量大于突出屏障区域煤体的约束,微破坏积聚的大量瓦斯膨胀能就会以动能形式快速释放,并将破碎的煤体抛出,瓦斯及煤体共同涌向巷道,发生煤与瓦斯突出事故,如图16所示。

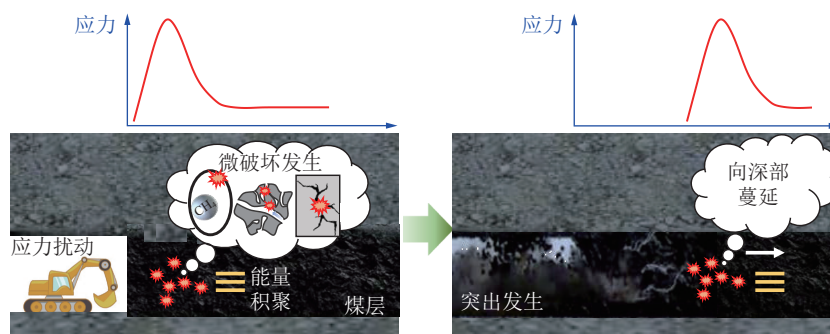


图16 微破坏诱发煤与瓦斯突出

Fig.16 Micro damage induced coal and gas outburst

5 讨 论

基于线弹性断裂力学、弹塑性力学以及渗流力学等理论知识,结合煤体受载条件下微观破坏特征,建

立了3种微破坏的失稳判识准则,针对微破坏复合连锁效应诱发宏观突出灾害的机制进行分析,对突出动力灾害预防和控制有极其重要的意义。但随着煤层开采逐渐向深部转移,煤储层环境变得更加复杂,煤

与瓦斯突出的微观机理还需进一步研究:

(1) 微纳米尺度流固耦合致灾机制研究。煤体受到应力扰动影响,导致储层内气体赋存状态发生改变。同时,气体状态的改变又影响着煤体的力学性质。由于煤体的非均质性特征,其微观表面范德华力、弹性模量等力学相关参数差异性较大。针对微纳米尺度煤体受载条件下,瓦斯分子与煤分子相互作用机制进行研究,可进一步解释煤体在流固耦合作用下微观致灾机理。

(2) 突出全过程能量转化机制研究。煤与瓦斯突出的发生是由于煤体内部积聚的瓦斯能量大于突出屏障的约束,导致气体携带破碎煤体涌入巷道。后续研究从瓦斯热力学能、煤体弹性能及裂隙扩展需要的表面能等角度入手,分析瓦斯突出过程的能量来源;研究突出的物质来源、突出初速度、突出强度等,明确突出过程中瓦斯热力学能、势能、动能及其他能量之间转化机制和耗散规律,对于煤与瓦斯突出的防治具有重要意义。

6 结 论

(1) 借助原子力显微镜对不同煤样受载条件下微破坏进行了全面表征,并对煤体微破坏3种形式进行了阐释,定义了闭孔微气爆、开孔微损伤和骨架微破裂的概念,揭示了3种微破坏的发生机制。通过分析煤体孔隙及骨架周边的应力分布情况,综合考虑煤体的外载应力、拉应力、剪切力以及瓦斯流动,结合煤体受力模型的特点,提出含瓦斯煤体微破坏失稳判识准则。

(2) 孔型参数会对含瓦斯闭孔周边的应力分布产生重要影响。当 m 增加时,闭孔端部孔壁处所受有效应力数值更高,说明煤层中狭长型椭圆孔含量过高时更容易导致突出的发生。

(3) 非均匀孔径的开孔,通常在孔径较大处产生应力集中现象,对于孔隙截面变小或开孔连通处支流孔径总断面小于干流孔径断面的狭窄孔喉区域,由于瓶颈效应的制约,孔隙喉道处聚集大量瓦斯,引起孔隙内瓦斯压力梯度升高,孔喉前后截面面积(半径)变化越大,积聚的瓦斯能量越多。

(4) 受成煤作用影响,煤骨架中的内生裂隙是煤骨架的薄弱环节。内生裂隙在应力扰动作用下,首先经历张开,然后膨胀和快速扩展。原始内生裂隙厚度越大,越容易在应力作用发生破坏,且裂缝一旦产生,它将随应力的增加持续扩展。

(5) 含瓦斯煤体微观破坏特征为:煤体闭孔受应力扰动影响,发生闭孔微气爆,孔隙破坏瞬间释放大

瓦斯,进一步推动煤体内部瓦斯流动。由于孔隙的不规则性且非均匀分布,开孔内发生瓦斯能量积聚,导致开孔所受应力不断升高,最终开孔受到损伤,瓦斯进一步解吸。同时由于应力影响,作用在煤骨架上的有效应力迅速增加,煤骨架发生微观变形,在解吸瓦斯及应力的综合作用下,原生缺陷结构发生进一步扩展,最终导致煤骨架破裂,煤体内部失稳。

参考文献(References):

- [1] 刘世奇,王鹤,王冉,等. 煤层孔隙与裂隙特征研究进展[J]. 沉积学报, 2021, 39(1): 212-230.
LIU Shiqi, WANG He, WANG Ran, et al. Research advances on characteristics of pores and fractures in coal seams[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(1): 212-230.
- [2] ZHANG Y, LEBEDEV M, SARMADIVALEH M, et al. Swelling effect on coal micro structure and associated permeability reduction[J]. Fuel, 2016, 182: 568-576.
- [3] WANG X, CHENG Y, ZHANG D, et al. Influence of tectonic evolution on pore structure and fractal characteristics of coal by low pressure gas adsorption [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2021, 87.
- [4] YANG T, NIE B S, YE Q S, et al. Local temperature variation mechanism during gas desorption Process[J]. Advances in Civil Engineering, 2018, 2018: 1-7.
- [5] 赵政,倪小明,韩文龙,等. 不同破坏程度煤的孔隙特征差异对比研究[J]. 煤矿安全, 2021, 52(7): 9-14.
ZHAO Zheng, NI Xiaoming, HAN Wenlong, et al. A comparative study on difference of pore characteristics of coal with different deformation degrees[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(7): 9-14.
- [6] PAN J, ZHU H, HOU Q, et al. Macromolecular and pore structures of Chinese tectonically deformed coal studied by atomic force microscopy[J]. Fuel, 2015, 139: 94-101.
- [7] 祝捷,张博,王全启,等. 煤的孔隙结构与煤岩动力失稳特征的相关性[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(1): 97-103.
ZHU Jie, ZHANG Bo, WANG Quanqi, et al. The interdependency of pore structures and coal dynamic failures[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(1): 97-103.
- [8] HOU S H, WANG X M, WANG X J, et al. Pore structure characterization of low volatile bituminous coals with different particle size and tectonic deformation using low pressure gas adsorption[J]. International Journal of Coal Geology, 2017, 183: 1-13.
- [9] 李祥春,张良,李忠备,等. 不同瓦斯压力下煤岩三轴加载时蠕变规律及模型[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2): 473-82.
LI Xiangchun, ZHANG Liang, LI Zhongbei, et al. Creep law and model of coal under triaxial loading at different gas pressures[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 473-82.
- [10] LIN Q B, CAO P, LI K H, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of jointed rock mass by double disc cutter[J]. Journal of Central South University, 2018, 25(2): 357-367.
- [11] 尹光志,李文璞,李铭辉,等. 不同加卸载条件下含瓦斯煤力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 891-901.

- YIN Guangzhi, LI Wenpu, LI Minghui, et al. Experimental study of mechanical properties of coal containing methane under different loading-unloading conditions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(5): 891–901.
- [12] NIE B S, FAN P H, LI X C. Quantitative investigation of anisotropic characteristics of methane-induced strain in coal based on coal particle tracking method with X-ray computer tomography[J]. *Fuel*, 2018, 214: 272–284.
- [13] 聂百胜, 马延崑, 何学秋, 等. 煤与瓦斯突出微观机理探索研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2022, 51(2): 207–220.
- NIE Baisheng, MA Yankun, HE Xueqiu, et al. Micro-scale mechanism of coal and gas outburst: A preliminary study[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2022, 51(2): 207–220.
- [14] CHEN Y, QIN Y, WEI C, et al. Porosity changes in progressively pulverized anthracite subsamples: Implications for the study of closed pore distribution in coals[J]. *Fuel*, 2018, 225: 612–622.
- [15] 杨昌永, 常会珍, 邵显华, 等. 扫描电镜下不同煤体结构煤微孔隙特征研究[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(12): 194–200.
- YANG Changyong, CHANG Huizhen, SHAO Xianhua, et al. Study on micro-pore characteristics of structural coal in different coal bodies under scanning electron microscopy[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(12): 194–200.
- [16] LIU X, SONG D, HE X, et al. Nanopore structure of deep-burial coals explored by AFM[J]. *Fuel*, 2019, 246: 9–17.
- [17] 王伟象, 梅国栋, 郭利杰, 等. 不同成像原理显微镜在煤微表面形貌表征中的应用[J]. *中国矿业*, 2022, 31(9): 162–170.
- WANG Weixiang, MEI Guodong, GUO Lijie, et al. Application of different imaging principles microscopes in characterizing coal micro-surface morphology[J]. *China Mining Magazine*, 2022, 31(9): 162–170.
- [18] 王伟象. 受载煤微表面力电特性及电荷振荡电磁辐射模型研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2020.
- WANG Weixiang. Study on the micro-nano electromechanical characteristics of loaded coal and the electromagnetic radiation model of charge oscillation [D]. Beijing: Beijing University of Science and Technology, 2022.
- [19] 徐军, 肖晓春, 潘一山, 等. 基于 J 积分的颗粒煤岩单轴压缩下裂纹扩展研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(21): 1–8.
- XU Jun, XIAO Xiaochun, PAN Yishan, et al. Granular coal crack propagation study under uniaxial compression based on J integral[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(21): 1–8.
- [20] 许宏发, 陈晓, 董璐, 等. 含孔隙流体夹杂岩石的等效弹性常数[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2017, 25(2): 369–381.
- XU Hongfa, CHEN Xiao, DONG Lu, et al. Equivalent elastic constants of rock containing pore fluid inclusions[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2017, 25(2): 369–381.
- [21] MORI T, TANAKA K. Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions[J]. *Acta Metallurgica*, 1973, 21(5): 571–574.
- [22] LI X, ZHANG F, LI Z, et al. Nanopore characteristics of coal and quantitative analysis of closed holes in coal[J]. *ACS Omega*, 2020, 5(38): 24639–53.
- [23] 钱鸣高, 石平五, 许家林. 矿山压力与岩层控制 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010.
- [24] 聂百胜, 王科迪, 樊培, 等. 基于小角 X 射线散射技术计算不同孔形的煤孔隙特征比较研究[J]. *矿业科学学报*, 2020, 5(3): 284–290.
- NIE Baisheng, WANG Kedi, FAN Yu, et al. The comparative study on calculation of coal pore characteristics of different pore shapes based SAXS[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2020, 5(3): 284–290.
- [25] 闫宝珍, 王延斌, 倪小明. 地层条件下基于纳米级孔隙的煤层气扩散特征[J]. *煤炭学报*, 2008, 33(6): 657–660.
- YAN Baozhen, WANG Yanbin, NI Xiaoming. Coalbed methane diffusion characters based on nano-scaled pores under formation conditions[J]. *Journal of China Coal Society*, 2008, 33(6): 657–660.
- [26] SUN Y F, ZHAO Y X, YUAN L. Quantifying nano-pore heterogeneity and anisotropy in gas shale by synchrotron radiation nano-CT[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2018, 258: 8–16.
- [27] HOL S, PEACH C J, SPIERS C J. Effect of 3-D stress state on adsorption of CO₂ by coal[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 93: 1–15.
- [28] 聂百胜, 马延崑, 孟筠青, 等. 中等尺度煤与瓦斯突出物理模拟装置研制与验证[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(5): 1218–1225.
- NIE Baisheng, MA Yankun, MENG Junqing, et al. Middle scale simulation system of coal and gas outburst[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(5): 1218–1225.
- [29] 徐芝纶. 弹性力学. 上册 [M]. 北京: 人民教育出版社, 1979.
- [30] 徐芝纶. 弹性力学简明教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- [31] 周世宁, 林柏泉. 煤层瓦斯赋存与流动理论 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1999.
- [32] 张士岭, 和树栋. 瓦斯压力对煤体应力及失稳破坏特性影响分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2022, 39(4): 847–856.
- ZHANG Shiling, HE Shudong. Analysis of the influence of gas pressure on coal stress and instability failure characteristics[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2022, 39(4): 847–856.
- [33] 唐巨鹏, 潘一山, 李成全, 等. 有效应力对煤层气解吸渗流影响试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(8): 1563–1568.
- TANG Jupeng, PAN Yishan, LI Chengquan, et al. Experimental study on effect of effective stress on desorption and seepage of coalbed methane[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(8): 1563–1568.
- [34] WILLMORE T J. The distribution of stress in the neighbourhood of a crack[J]. *Genetics*, 1949, 46(1): 53–63.
- [35] KASSIR M K, SIH G C. Griffith's theory of brittle fracture in three dimensions[J]. *International Journal of Engineering Science*, 1967, 5(12): 899–918.
- [36] 何学秋, 王恩元, 林海燕. 孔隙气体对煤体变形及蚀损作用机理[J]. *中国矿业大学学报*, 1996, 25(1): 6–11.
- HE Xueqiu, WANG Enyuan, LIN Haiyan. Coal deformation and fracture mechanism under pore gas action[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1996, 25(1): 6–11.