

宿州矿区碎软煤渗透性特征研究

夏雄飞¹, 陈松²

¹中联煤层气有限责任公司, 北京

²宿州学院资源与土木工程学院, 安徽 宿州

收稿日期: 2024年5月14日; 录用日期: 2024年6月11日; 发布日期: 2024年6月25日

摘要

采集宿州矿区碎软煤与原生结构煤, 利用PDP-200渗透率测试仪, 结合扫描电子显微镜和孔隙度测试仪(QKX-II), 研究了宿州矿区碎软煤的渗透性特征。研究表明: 宿州矿区碎软煤构造裂隙较为发育, 渗透率较大, 其中碎斑煤的初始渗透率最大; 在煤体变形序列中, 随着煤体构造变形强度的增大, 孔隙度和渗透率大体呈增大趋势; 碎软煤的有效应力与渗透率呈负指数关系($R^2 = 0.92 \sim 0.99$), 随着有效应力的增大, 碎软煤的渗透率呈减小趋势; 不同变形程度的碎软煤, 其渗透率损害系数和无因次渗透率都随着有效应力的增大而减小, 其中碎斑煤的损害系数和碎裂煤的无因次渗透率变化随有效应力的增大, 变化最大, 表明强脆性变形煤(碎斑煤)压力敏感性大, 弱脆性变形煤(碎裂煤)压力敏感性小; 煤样降压之后, 煤体渗透率呈增长趋势, 其中碎斑煤降压前后渗透率变化最大, 碎裂煤次之, 片状煤最小。

关键词

宿州矿区, 碎软煤, 渗透率, 损害系数

The Permeability Characteristics of Broken Soft Coal in Suzhou Mining Area

Xiongfei Xia¹, Song Chen²

¹China United Coalbed Methane Corporation Ltd., Beijing

²School of Resources and Civil Engineering, Suzhou University, Suzhou Anhui

Received: May 14th, 2024; accepted: Jun. 11th, 2024; published: Jun. 25th, 2024

Abstract

The permeability characteristics of broken soft coal (BSC) in Suzhou mining area were studied by using the PDP-200 permeability tester, the scanning electron microscope and the porosity tester

文章引用: 夏雄飞, 陈松. 宿州矿区碎软煤渗透性特征研究[J]. 地球科学前沿, 2024, 14(6): 733-742.

DOI: 10.12677/ag.2024.146068

(QKX-II). The results show that the fractures of BSC in Suzhou mining area are relatively developed, and the permeability of BSC is large, among which the initial permeability of mortar coal is the largest. The porosity and the permeability of BSC tend to increase with the increase of structural coal deformation strength. There is a negative exponential relationship between the effective stress and the permeability of BSC ($R^2 = 0.92\sim 0.99$), and the permeability of BSC decreases with the increase of the effective stress. The damage coefficient and dimensionless permeability of different types BSC decrease with the increase of effective stress, among which the damage coefficient of mortar coal and the dimensionless permeability of cataclastic coal undergo significant changes with the increase of effective stress. These indicate that coal with strong brittle deformation is more sensitive to pressure, while coal with weak brittle deformation is less sensitive to pressure. During depressurization, the permeability of coal shows an increasing trend, of which the change of permeability of mortar coal before and after depressurization is the largest, followed by cataclastic coal, and flaky coal is the smallest.

Keywords

Suzhou Mining Area, BSC, Permeability, Damage Coefficient

Copyright © 2024 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

煤是一种对应力和应变非常敏感的多孔介质,在不同的应力-应变环境和构造应力作用下,煤的物理结构、化学结构及其光性特征等都将发生显著变化,从而形成具有不同结构特征的、不同类型的构造变形煤[1]。构造变形煤所具有的低渗透率和低强度等特点,为煤与瓦斯突出提供了瓦斯和软煤的物质条件[2],因此构造变形煤又被称为碎软煤,其发育区往往是煤与瓦斯突出危险地带之一[3]。此外,强烈的构造变形深刻影响煤的储层物性,进而影响煤层气的高效开发[4]。煤层瓦斯赋存与运移规律是研究煤与瓦斯突出及煤层气开采的基础,而煤层的渗透率是影响瓦斯赋存和运移的重要因素[5]。因此系统研究碎软煤发育区煤层渗透率规律对煤与瓦斯突出预测及煤层气开采有重要意义。

煤储层渗透率受多种因素影响,世界各国学者对煤岩的渗透性进行了大量的实验研究,包括应力、温度、煤体结构等因素的作用规律。其中 Konecny P 等[6], Jasinge D 等[7]研究了应力对煤体渗透性的影响;许江等[8]、胡雄等[9]开展了温度对煤岩渗透性影响规律的研究;傅雪海等[10], Cheng 等[11],王相龙等[12]探讨了煤体结构对煤岩渗透性的影响。研究认为地应力是影响瓦斯解吸、扩散、渗流的重要因素[13][14][15][16][17]: W. F. Brace 进行了应力作用下岩体渗透率变化规律研究[13]; C. R. McKee 等[14]开展了应力与煤体孔隙度和渗透率间关系研究; J. R. E. Enever 和 A. Henning [15]探讨和分析了有效应力与渗透率之间的响应关系; Li 等[16]利用含有节理的煤样研究了煤层的各向异性渗透特性,得出了平行于层理方向的渗透率要大于准直与层理方向的渗透率的结论; Gentzis 等[17]认为煤岩的力学特性和渗透率的变化主要受控于矿物组成、加载历史、剪切强度和煤体变形特征等因素。

综上所述,可以发现前人的研究主要聚焦在对未变形的原生结构煤渗透性影响因素上,对于碎软煤的渗流特性及其有效应力响应报道较少,即使有少量研究碎软煤的渗流特征,也多采用型煤样品,破坏了碎软煤的孔裂隙特征,不能真实反映碎软煤的渗流特征。因此,本文采用原煤样品并在前人研究的基础上,结合扫描电子显微镜和孔隙度测试仪(QKX-II)揭示碎软煤储层裂隙发育特征,通过脉冲衰减渗透

率仪(PDP-200), 系统揭示碎软煤在有效应力作用下的渗透性的变化规律, 为煤矿瓦斯突出防治及煤层气有效开采提供理论指导。

2. 地质概况

宿州矿区位于华北古大陆板块东南缘, 徐宿弧形逆冲推覆构造南端[1]。矿区内发育有所宿东向斜、宿南背斜、宿南向斜以及西寺坡逆断层等构造(图 1(a))。石炭系和二叠系是宿县矿区内含煤岩系, 其中二叠系的山西组和下石盒子组为主要含煤层位(图 1(b)) [18]。印支期末至燕山早期 NWW 向的逆冲推覆, 后期又经燕山中晚期和喜马拉雅期构造运动的改造, 区内以压性断裂构造为主利于瓦斯保存(6~24 m³/t) [19] [20]: 宿南向斜为一 NE 翼被逆冲断层所破坏的不完整的向斜构造(图 1(c)), 向斜东翼, 逆断层较为发育, 利于瓦斯保存, 且煤体结构较为破碎, 煤与瓦斯突出危险性较大; 宿东向斜是徐 - 宿逆冲推覆构造南部前缘的一个逆冲岩席(图 1(c)), 煤层流变和碎软煤发育, 且断裂构造以逆断层为主, 构造封闭条件较好, 气体不易逸散, 煤层的透气性较差, 为矿井生产带来重大安全隐患[1]。

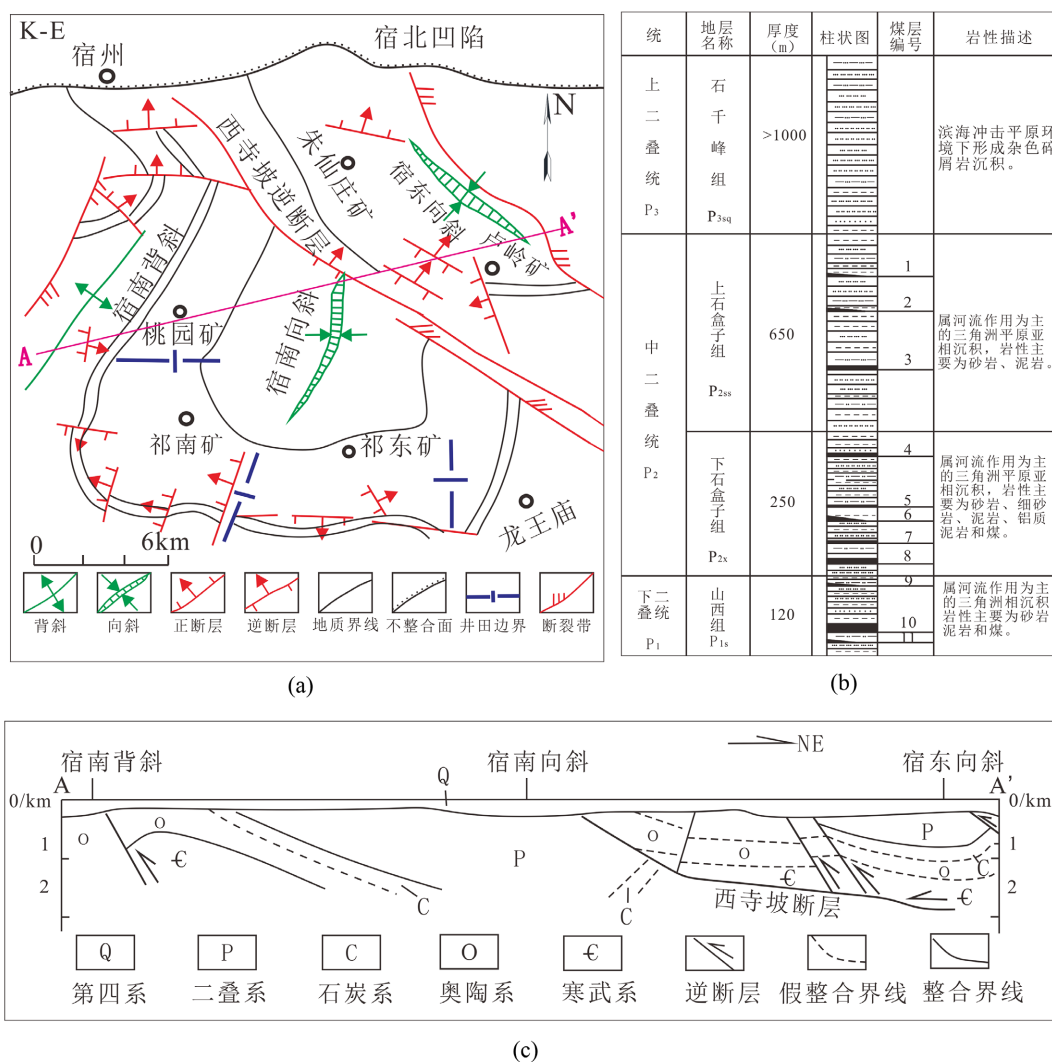


Figure 1. Structure outline map (a) and profile map (c) of the of the Suzhou mining area, comprehensive bar chart of the main coal bearing strata in the Huabei area (b) [1]

图 1. 宿州矿区构造纲要图(a)及剖面图(c)、淮北地区主要含煤地层综合柱状图(b) [1]

3. 样品与实验

3.1. 样品的采集及制备

采集宿州矿区朱仙庄煤矿(Z)、芦岭煤矿(L)、祁东煤矿(D)主采煤层 8 号煤层及 10 号煤层的原生结构煤和碎软煤样片 5 块, 其中 4 块不同变形程度的碎软煤分别为典型的初碎裂煤、碎裂煤、片状煤和碎斑煤, 1 块原生结构煤用于对比分析。采样过程依据煤层煤样采取方法(GB/T 482-2008)和煤岩样品采取方法(GB/T 19222-2003)进行, 选取不同变形程度的碎软煤, 用塑料盒装取以防样品破坏。样品制备: 选择样品中典型构造部分, 依次用 240 目、480 目、600 目、1000 目、1500 目、2000 目、3600 目和 5000 目砂纸打磨, 将样品打磨成表面光滑, 上下底面水平的圆柱状, 其中圆柱的上、中、下直径误差小于 0.1 mm, 从而可以准确标定样品体积。样品基本特征见表 1。

Table 1. Samples and their basic information

表 1. 样品及其基本信息

煤样 编号 No.	煤矿	煤体 类型	煤层	煤样 直径(cm)	煤样 长度(cm)	标准室 压力(MPa)	孔隙 体积(cm ³)	孔隙度 (%)
L1	芦岭	原生煤	10 煤	2.44	4.16	0.41	1.15	5.94
Z1	朱仙庄	初碎裂煤	10 煤	2.51	5.10	0.41	1.56	6.22
Z2	朱仙庄	碎裂煤	8 煤	2.52	3.64	0.39	2.90	16.04
D1	祁东	片状煤	8 煤	2.49	2.77	0.37	2.88	21.38
Z3	朱仙庄	碎斑煤	10 煤	2.33	3.91	0.40	1.40	8.40

3.2. 宏微观变形特征

宿州矿区初碎裂煤 Z1, 煤岩条带清晰可见, 以亮煤为主; 层理可见, 原生结构构造保存完好, 内生裂隙可以分辨(图 2(a))。显微镜下, 原生结构保存较好, 发育少量显微构造裂隙, 且以张裂隙为主, 裂隙的成组性和方向性较明显(图 2(a'))。

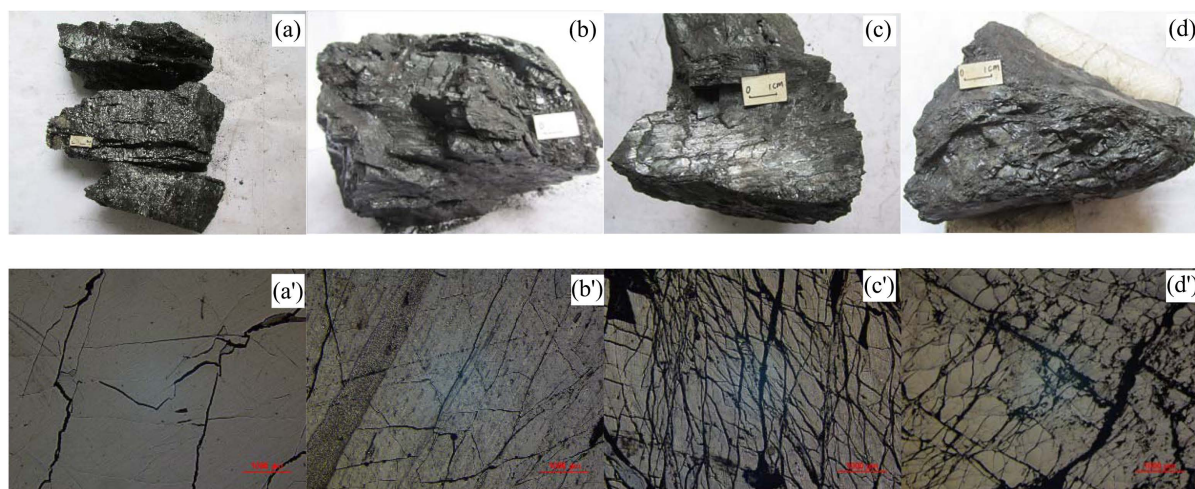


Figure 2. The macroscopic and microscopic deformation characteristics of different types of broken soft coal

图 2. 不同类型碎软煤的宏微观变形特征

碎裂煤 Z2 较初碎裂煤 Z1 变形加强, 发育有碎裂结构, 原生结构、构造尚可识别, 无定向性, 节理发育较密集, 且相互交切, 内生裂隙尚可分辨(图 2(b))。显微镜下, 原生结构保存较好, 发育多组显微构造裂隙, 垂直裂隙、顺层裂隙和斜交裂隙均有发育, 以张裂隙为主; 构造裂隙切割煤岩条带以及内生裂隙, 构造裂隙间以微裂隙相连通(图 2(b'))。

片状煤 Z3, 宏观特征: 层理清晰可见, 镜煤和亮煤中可见内生裂隙; 片状结构, 可捏碎为碎片和碎粒(图 2(c))。显微特征: 主要受到剪切构造应力作用, 发育一组平行排列、延伸稳定的剪切裂隙, 裂隙多平直稳定、平行排列, 裂隙间常见其他方向的细微裂隙发育(图 2(c'))。

碎斑煤 D1, 煤体变形较强, 肉眼可见碎斑结构, 节理十分发育, 内生裂隙较难分辨; 煤体易破碎为碎块(图 2(d))。显微镜下, 煤体破碎较为严重, 煤体裂隙发育密集, 不同方向裂隙多呈小角度相交, 将煤体切割成碎块状、碎斑状, 裂隙规模较大, 延伸不稳定(图 2(d'))。

3.3. 实验方法

渗透率实验是在中国矿业大学煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室进行。样品经砂纸打磨成圆柱状, 利用实验室孔隙度测试仪进行煤样孔隙度测试, 然后再采用美国生产的 PDP-200 型渗透率仪进行渗透率测试。PDP-200 型渗透率仪采用非稳态法的压力脉冲衰减测量技术。其测量范围为: 0.00001~10 md。测试方法: 将样品放入岩芯, 拧紧上下压阀, 并关闭围压加油阀, 开始加围压, 其具体围压加载方案如表 2, 气体压力设定为 2 MPa。

Table 2. Permeability testing pressure loading plan
表 2. 渗透率测试压力加载方案

样品号	围压/MPa									
L1	2	6	10	14						
Z1	10	14	18	22						
Z2	10	14	18	22	12	6				
Z3	2	6	10	14	18	22	24	20	16	12
D1	18	22	24	20	16					

注: 测试气体压力均为 2 MPa, 红色部分为降压; 由于煤样存在裂缝, 若加载较小围压, 无法准确测出其相应的渗透率, 故各煤样初始围压不同。

4. 结果与讨论

4.1. 不同类型脆性变形煤渗透率与有效应力的关系

本文根据李传亮建立的多孔介质的有效应力体系[21], 根据其计算公式:

$$\sigma_e = P_c - \varphi P_m \quad (1)$$

式中: σ_e ——有效应力, MPa;

P_c ——围压, MPa;

φ ——为孔隙度;

P_m ——平均压力, 即进口压力与出口压力的平均值, MPa。

由上式计算每个煤样每个压力点的有效应力, 并拟合有效应力值与渗透率之间的相互关系, 如图 3(a)~(e)。

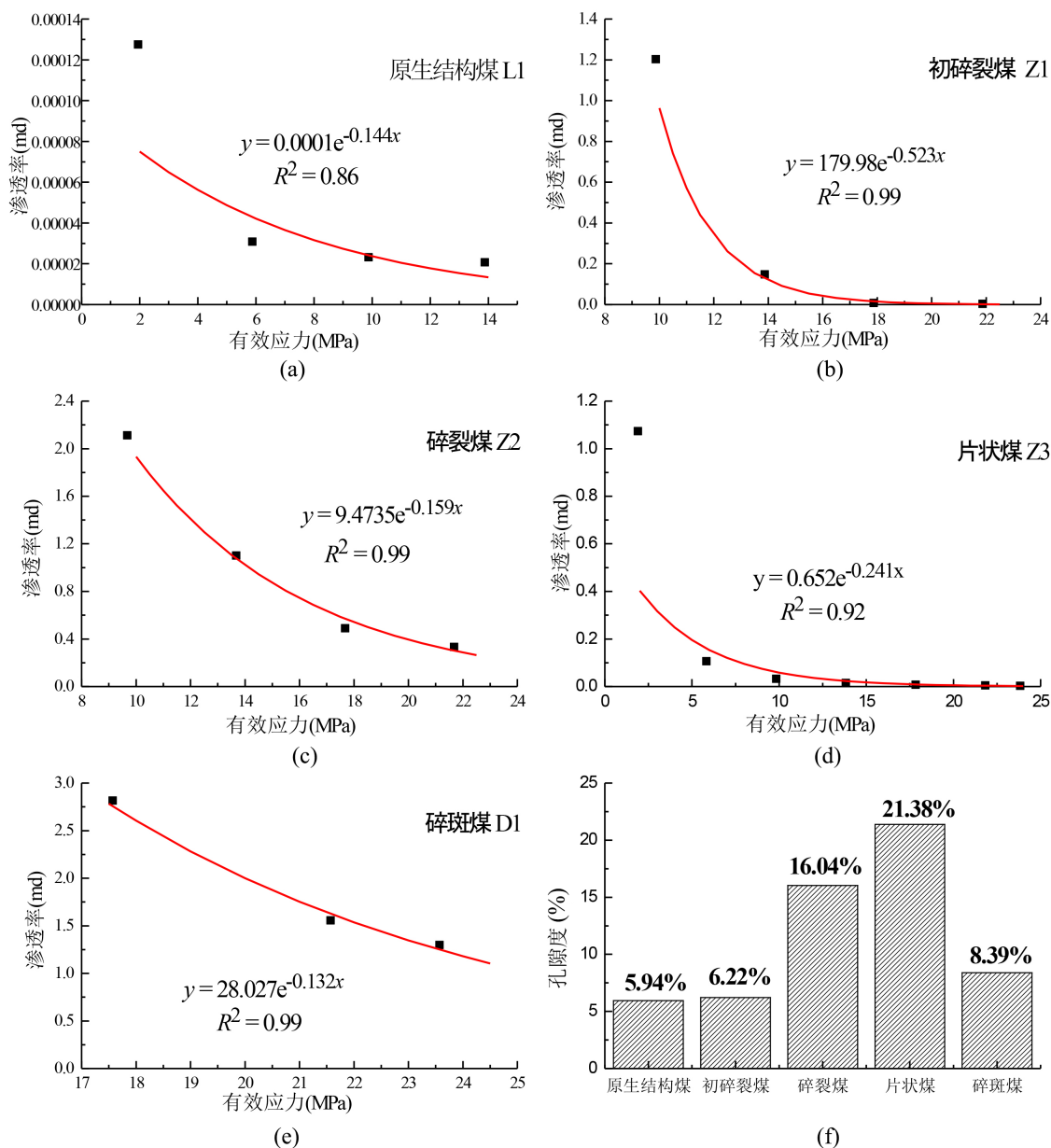


Figure 3. The relationship between effective stress and permeability of coal with different coal body structures and the porosity bar chart of coal with different coal body structures

图 3. 不同煤体结构煤有效应力与渗透率关系图及不同煤体结构煤的孔隙度柱状图

在加载过程中, 宿州矿区碎软煤的有效应力与渗透率呈负指数关系($R^2 = 0.92\sim 0.99$), 即随着有效应力的增加, 煤储层的渗透率不断减小(图 3(a)~(e)), 原生结构煤的有效应力与渗透率相关性较碎软煤差。就初始渗透率而言, 碎斑煤最高, 但随着有效应力的增大, 其渗透率迅速下降, 变化幅度较大(图 3(e)); 片状煤渗透率变化幅度相比碎斑煤、碎裂煤以及初碎裂煤最小; 原生结构煤初始渗透率最低, 随着有效应力的增加, 渗透率变化幅度不大。

初碎裂煤与原生结构煤孔隙度相差不大(图 3(f)), 但初碎裂煤的渗透率是原生结构煤渗透率的 9430 倍(图 3(a)和图 3(b)), 表明这与煤样中发育的裂隙以及孔裂隙连通性有关, 初碎裂煤受剪切应力的作用, 发育多组构造裂隙, 为瓦斯渗流提供通道, 从而使渗透率大大增加。从初碎裂煤到碎裂煤到碎斑煤再到

片状煤, 随着煤体变形程度的增加, 煤基质的孔隙度和渗透率大体呈增大趋势, 但也有反常。碎斑煤孔隙度较小(图 3(f)), 但渗透率最大(图 3(e)), 猜测随着构造应力的不断增大, 煤储层发生严重变形, 部分内生孔在构造应力下闭合, 但是构造裂隙大大发育, 且孔隙连通性较其他碎软煤好, 所以碎斑煤渗透率最大。片状煤渗透率较初碎裂煤、碎裂煤以及碎斑煤低(图 3), 表明片状煤孔裂隙连通性差, 导致其渗透率低。所以宿州矿区碎斑煤及碎裂煤发育区, 煤与瓦斯突出危险性高, 但也是煤层气开发和利用的有利区。

4.2. 不同类型脆性变形煤渗透率损害性差异

1) 根据石油天然气行业标准(SY/T 5336, SY/T 5358, SY/T 6385)对储层敏感性进行评价, 引入渗透率损害率以及渗透率损害系数来反应在有效应力作用下煤储层渗透率损害的百分数, 应力敏感性引起的渗透率损害系数 D_{kp} [22], 即:

$$D_{kp} = \frac{K_i - K_{i+1}}{|P_{i+1} - P_i|} \quad (2)$$

式中: D_{kp} 为渗透率损害系数, mD/MPa; K_i 、 P_i 、 K_{i+1} 及 P_{i+1} 分别为 i 、 $i+1$ 点的渗透率和有效应力值, mD、MPa。

煤层渗透率的影响因素十分复杂, 地质构造、应力状态、煤层埋深、煤体结构、煤岩煤质特征以及煤阶及天然裂隙等都不同程度地影响着煤层渗透率, 因此可通过定义渗透率对有效应力的敏感系数, 即:

$$\alpha_k = -\frac{1}{K_0} \frac{\partial K}{\partial P} \quad (3)$$

式中: K_0 为初始渗透率, mD。为更直观的描述煤储层有效应力对气相渗透率的影响, 引入无因次渗透率, 即 K/K_0 (煤样渗透率与初始渗透率的比值)。

当围压从 2.07 MPa 增加到 6 MPa 时, 片状煤和原生结构煤的无因次渗透率分别为 0.099、0.242, 片状煤渗透率降低为初始渗透率的 9.9%, 原生结构煤降低为初始值的 24.2%; 当围压从 10 MPa 增加到 14 MPa 时, 初碎裂煤的无因次渗透率为 0.123, 其渗透率较初始渗透率下降 12.3%, 碎裂煤无因次渗透率为 0.521, 其渗透率降低为原始值的 52.1%。总体而言, 碎裂煤随着有效应力的增强衰减较快(图 4(a)), 表明连通裂隙随着有效应力的增强逐渐趋于闭合, 这与碎裂煤具有较好的孔隙配置有关。本文根据李传亮建立的多孔介质的有效应力体系[21], 根据其计算公式:

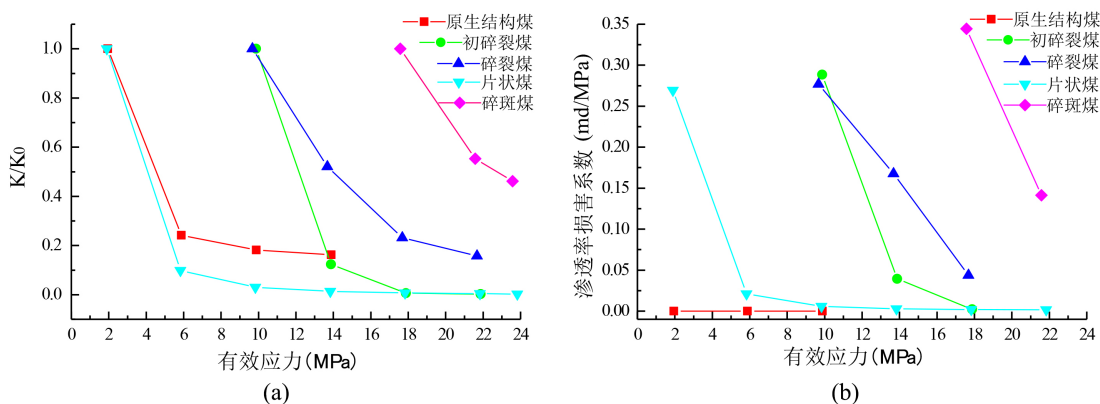


Figure 4. The variation of dimensionless permeability K/K_0 and permeability damage coefficient with effective stress for coal with different coal body structures

图 4. 不同煤体结构煤无因次渗透率 K/K_0 及渗透率损害系数随有效应力的变化

从渗透率损害系数变化特征来看, 在有效应力作用下, 碎斑煤的渗透率损害系数最高且随着有效应力增加减小较快, 其损害系数介于 0.3148~0.1287 md/MPa (平均 0.1496 md/MPa); 原生结构煤损害系数较小且变化不大, 其损害系数介于 0.000025~0.0000063 md/MPa (平均 0.000009 md/MPa); 有效应力对于初碎裂煤和碎裂煤具有相似的损伤规律, 其损害系数分别介于 0.2635~0.0011 md/MPa (平均 0.0100 md/MPa), 0.2529~0.0392 md/MPa (平均 0.1483 md/MPa); 对于片状煤(平均 0.0907 md/MPa)而言, 随着有效应力的增大, 渗透率损害系数骤减(0.2461~0.0184 md/MPa), 随后, 随着有效应力的增大, 渗透率损害系数变化不大(0.0044~0.0006 md/MPa)。总体而言, 从初碎裂煤 - 碎裂煤 - 碎斑煤, 随着变形程度的增加, 碎软煤渗透率损害系数增加, 说明煤体变形程度越高, 其压力敏感性越强。

2) 不同变形煤降压渗透率变化

由图 5 可知, 随着有效应力的减小(绿色曲线), 碎软煤的渗透率增大。其中, 碎斑煤降压前后渗透率变化最大, 降压后的煤体渗透率远小于降压前的煤体渗透率(图 5(b)), 碎裂煤次之(图 5(a)), 片状煤降压前后渗透率几乎没有变化(图 5(c)), 表明不同煤体变形程度的碎软煤压力敏感性碎斑煤 > 碎裂煤 > 片状煤。其中碎斑煤发生强烈的脆性变形, 围压增加, 孔裂隙趋于闭合, 煤体发生塑性变形; 围压减小, 煤体无法恢复原始状态, 部分孔裂隙依然为闭合状态, 渗透率较降压前小。所以碎斑煤发育区, 煤储层渗透率更容易受地应力的影响, 碎裂煤次之, 片状煤影响最小。

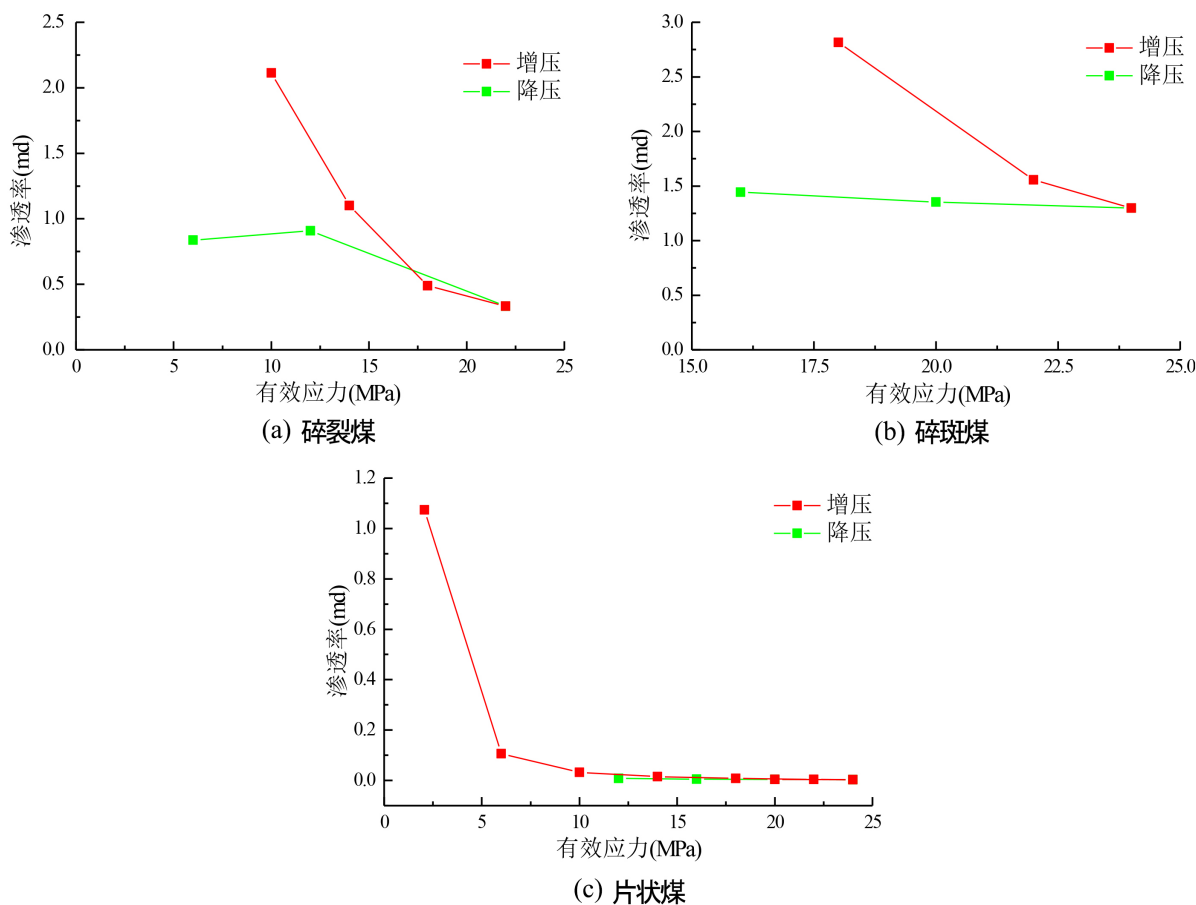


Figure 5. The relationship between pressure boosting and pressure reducing permeability changes of different types of broken soft coal

图 5. 不同类型碎软煤增压与降压渗透率变化关系图

5. 结论

1) 宿州矿区碎软煤中构造裂隙较为发育, 致使其渗透率较大, 且随着煤体变形程度的增强, 碎软煤的渗透率大体呈增大的趋势。

2) 研究区碎软煤渗透率与有效应力负指数关系, 且其随有效应力增加而减小的幅度与煤体变形程度存在一定的相关性, 大体表现为随煤体变形程度的增强, 其变化幅度呈减小趋势。

3) 碎软煤损害率与有效应力也呈负相关关系, 随有效应力的增大而减小, 在初碎裂煤 - 碎裂煤 - 碎斑煤的变形序列中, 碎斑煤的损害系数最高, 初碎裂煤的损害系数最小。说明强脆性变形煤(碎斑煤)压力敏感性大, 弱脆性变形煤(初碎裂煤)压力敏感性小。

4) 降压之后, 煤体渗透率呈增长趋势。碎斑煤降压前后渗透率变化最大, 碎裂煤次之, 片状煤最小。碎斑煤发育区, 煤储层渗透率较容易受地应力的影响。

基金项目

安徽宿南碎裂煤水文特征与含气潜力分析项目(ZZGSSAQLFX2022-591, 2023xhx013)。

参考文献

- [1] 姜波, 李明, 宋昱, 等. 构造煤及其瓦斯地质意义[M]. 南京: 科学出版社, 2020.
- [2] 桑树勋, 皇凡生, 单衍胜, 等. 碎软低渗煤储层强化与煤层气地面开发技术进展[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 196-210.
- [3] 姜波, 秦勇, 琚宜文, 等. 构造煤化学结构演化与瓦斯特性耦合机理[J]. 地学前缘, 2009, 16(2): 262-271.
- [4] 姜波, 李明, 程国玺, 李凤丽. 矿井构造预测及其在瓦斯突出评价中的意义[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2306-2317.
- [5] 郭德勇, 揣筱升, 张建国, 等. 构造应力场对煤与瓦斯突出的控制作用[J]. 煤炭学报, 2023, 48(8): 3076-3090.
- [6] Konecny, P. and Kozusnikova, A. (2011) Influence of Stress on the Permeability of Coal and Sedimentary Rocks of the Upper Silesian Basin. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **48**, 347-352. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2010.11.017>
- [7] Jasinge, D., Ranjith, P.G. and Choi, S.K. (2011) Effects of Effective Stress Changes on Permeability of Latrobe Valley Brown Coal. *Fuel*, **90**, 1292-1300. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.10.053>
- [8] 许江, 张丹丹, 彭守建, 等. 三轴应力条件下温度对原煤渗流特性影响的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(9): 1848-1854.
- [9] 胡雄, 梁为, 侯么靖, 等. 温度与应力对原煤、型煤渗透特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1222-1229.
- [10] 傅雪海, 李大华, 秦勇, 等. 煤基质收缩对渗透率影响的实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(2): 129-131, 137.
- [11] Cheng, G., Jiang, B., Li, M., Li, F. and Song, Y. (2020) Effects of Pore-Fracture Structure of Ductile Tectonically Deformed Coals on Their Permeability: An Experimental Study Based on Raw Coal Cores. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **193**, Article ID: 107371. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107371>
- [12] 王相龙, 潘结南, 王凯, 等. 微米CT扫描尺度下构造煤微裂隙结构特征及其对渗透性的控制[J]. 煤炭学报, 2023, 48(3): 1325-1334.
- [13] Brace, W.F. (1978) A Note on Permeability Changes in Geologic Material Due to Stress. *Pure and Applied Geophysics Pageoph*, **116**, 627-633. <https://doi.org/10.1007/bf00876529>
- [14] McKee, C.R., Bumb, A.C. and Koenig, R.A. (1988) Stress-Dependent Permeability and Porosity of Coal. In: Fassett, J.E., Ed., *Geology and Coal-Bed Methane Resources of the Northern San Juan Basin*, Rocky Mountain Association of Geologists Guidebook, Colorado, 143-153.
- [15] Enever, J.R.E. and Henning, A. (1997) The Relationship between Permeability and Effective Stress for Australian Coal and Its Implications with Respect to Coalbed Methane Exploration and Reservoir Model. *Proceedings of the 1997 International Coalbed Methane Symposium*, Tuscaloosa, 12-17 May 1997, 13-22.
- [16] Li, H., Shimada, S. and Zhang, M. (2004) Anisotropy of Gas Permeability Associated with Cleat Pattern in a Coal

- Seam of the Kushiro Coalfield in Japan. *Environmental Geology*, **47**, 45-50.
<https://doi.org/10.1007/s00254-004-1125-x>
- [17] Gentzis, T., Deisman, N. and Chalaturnyk, R.J. (2007) Geomechanical Properties and Permeability of Coals from the Foothills and Mountain Regions of Western Canada. *International Journal of Coal Geology*, **69**, 153-164.
<https://doi.org/10.1016/j.coal.2006.02.007>
- [18] 宋昱. 低中阶构造煤纳米孔及大分子结构演化机理[D]: [博士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [19] Zheng, L., Liu, G., Wang, L. and Chou, C. (2008) Composition and Quality of Coals in the Huaibei Coalfield, Anhui, China. *Journal of Geochemical Exploration*, **97**, 59-68. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2007.11.002>
- [20] 么玉鹏. 脆性变形系列构造煤物性特征及其结构定量表征[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- [21] 李传亮, 孔祥言, 徐献芝, 等. 多孔介质的双重有效应力[J]. 自然杂志, 1999, 21(5): 288-292.
- [22] 孟召平, 侯泉林. 煤储层应力敏感性及其影响因素的试验[J]. 煤炭学报, 2012, 37(3): 430-436.