

轴向应力加卸载过程含瓦斯水合物煤体 渗透率变化规律研究

张保勇¹, 于洋¹, 高霞², 吴强¹, 张旭辉³, 张强¹, 李焕如¹

(1. 黑龙江科技大学 安全工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150022; 2. 黑龙江科技大学 建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150022;
3. 中国科学院 力学研究所, 北京 100190)

摘要: 瓦斯水合固化及采掘扰动对瓦斯水合物-煤体介质体系渗透率影响是瓦斯水合固化防突技术应用的关键问题。为此, 采用基于出口端流量的稳态法, 利用应力-渗流-化学耦合作用含瓦斯水合物煤体三轴试验机, 开展含瓦斯煤体渗透试验(3种含水率和3种粒度)及轴向应力加卸载过程含瓦斯水合物煤体渗透试验, 分析水合物生成、加卸载过程有效应力及饱和度对煤体渗透率影响规律并初步探讨其影响机制。研究发现, 瓦斯水合物形成后, 煤体渗透率明显下降, 降低幅度为79%~99%; 含瓦斯水合物煤体渗透率与有效应力在加卸载过程符合指数函数关系, 卸载过程渗透率变化存在3种模式, 分别为少量恢复、部分恢复和卸载增透; 加卸载过程含瓦斯水合物煤体渗透率损失率、损伤率均随饱和度增大呈增大趋势。试验发现, 瓦斯水合物的形成堵塞煤体渗透通道, 限制由瓦斯压力降低导致的瓦斯运移补充, 有望快速降低瓦斯压力, 缩短石门揭煤工期。

关键词: 采矿工程; 煤与瓦斯突出; 含瓦斯水合物煤体; 渗透率; 加卸载; 饱和度

中图分类号: TD 32

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2022)11-2283-16

Permeability of mine gas hydrate bonded coal against loading-unloading of axial stress

ZHANG Baoyong¹, YU Yang¹, GAO Xia², WU Qiang¹, ZHANG Xuhui³, ZHANG Qiang¹, LI Huanru¹
(1. School of Safety Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150022, China;
2. School of Architecture and Civil Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150022, China; 3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Key issues still remain in revealing the effect of hydrate formation on coal permeability, as well as the permeability variation subjected to mining exploitation, concerning to the application of the hydrate method. Using steady-state method based on outlet flow, the permeability tests of gas-bearing coal(three water contents and three particle sizes) and subsequently the tests of mine gas hydrate bonded coal for against loading-unloading of axial stresses were conducted, by triaxial testing machine for coupled seepage, chemical and triaxial stress measurements in mine gas hydrate bonded coal. Then, the rule and mechanism are revealed relating to the effect of hydrate formation, effective stress and hydrate saturation on coal permeability. The results show that the coal permeability

收稿日期: 2022-01-17; **修回日期:** 2022-03-23

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51974112, 51674108); 国家自然科学基金联合基金项目(U21A20111)

Supported by the General Fund of National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 51974112 and 51674108) and Joint Fund of National Natural Science Foundation of China(Grant No. U21A20111)

作者简介: 张保勇(1982-), 男, 博士, 2004年毕业于山东科技大学建筑环境与设备工程专业, 现任教授, 主要从事瓦斯灾害防治及气体水合物衍生技术方面的研究工作。E-mail: byzhang1982@163.com。通讯作者: 高霞(1984-), 女, 博士, 现任副教授。E-mail: klgaoxia1984@163.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2022.0063

decreases after hydrate formation by a reduction between 79% and 99%. The permeability varies exponentially with the effective stress under loading-unloading of axial stresses. The variation of the permeability under unloading can be divided into three patterns, including a small amount of permeability recovery, partial permeability recovery and permeability increase. In the process of loading-unloading of axial stress, the permeability loss rate and damage rate increase with the growth in the hydrate saturation for mine gas hydrate bonded coal. As a result, the formation of gas hydrate blocks the coal penetration channel and restricts the coal mine gas migration, which makes it a possible solution to shortening the construction period of rock cross-cut coal, accompanied by gas pressure decrease in a short time.

Key words: mining engineering; coal and gas outburst; mine gas hydrate bonded coal; permeability; loading-unloading; hydrate saturation

1 引言

煤与瓦斯突出是后果最严重的煤矿灾害之一^[1]。随着开采深度增大,“三高一扰动”(高地应力、高地温、高渗透压、强烈的采掘扰动)作用显著,煤与瓦斯突出等灾害日益严重,制约黑龙江等省份优质产能释放,给煤炭资源安全高效开采提出了严峻的挑战^[2-5]。

基于瓦斯水合物生成条件温和、含气率高、分解热大等优点,吴强等^[6]提出瓦斯水合固化防突技术,即通过向煤层中注入含水合物生成促进剂的中高压水,使瓦斯与水生成固态瓦斯水合物,以此降低煤层瓦斯压力、含量,达到防治煤与瓦斯突出事故的目的。相比现有瓦斯抽采防突技术,瓦斯水合固化防突技术无需铺设瓦斯抽采管道,同时,瓦斯水合物的生成可能堵塞煤体渗透通道,限制由瓦斯压力降低导致的瓦斯运移补充,有望在较短时间降低瓦斯压力,缩短目前较长的石门揭煤工期^[7]。

煤体孔隙裂隙既是瓦斯气体(主体分子)-水溶液(客体分子)流动通道,又是瓦斯水合反应场所。瓦斯水合物形成于煤体孔隙裂隙之中伴随着孔隙扩展和堵塞,必然引起煤体渗流通道和渗透率的改变,而渗透率是衡量瓦斯流动难易程度、影响瓦斯水合固化效率的重要参数^[8]。此外,受煤炭采掘扰动影响,煤体不断处于支承压力影响区域或卸载区域,经历轴向应力的加卸载过程^[9]。当受采动影响时,固化后的含瓦斯水合物煤体内部结构极易发生变化,进而导致固化煤体的力学性质和渗透率发生显著改变。因此,开展轴向应力加卸载过程含瓦斯水合物煤体渗透率演化规律研究十分重要。

目前,鲜有“瓦斯水合物-煤体”介质体系渗透率研究,国内外相关研究主要集中于“瓦斯-煤体”和“天然气水合物-沉积物”体系。以瓦斯灾

害防治和瓦斯抽采为研究动机,尹光志等^[10]发现卸围压速度越大,煤岩渗透率增大越快。许江等^[11]发现加载过程煤体渗透率和应变变化不明显,卸载过程变化较大。王向宇等^[12-13]发现屈服前损伤变量与渗透率呈幂函数关系,屈服后呈指数函数关系。梁冰等^[14]发现轴向应力卸载过程煤样渗透率增大。贾恒义等^[15-16]发现型煤渗透率在整个加卸载过程几乎呈均等变化。程远平等^[17-18]认为有效应力是影响煤体渗透率的重要因素。王辰霖等^[19-20]发现加卸载过程渗透率与轴向应力符合负指数函数分布。刘永茜^[21]发现随加卸载次数增大,煤体渗透率逐渐减小。李清森等^[22-23]发现煤体渗透率随着应力的增大和循环次数的增加呈减小趋势。王登科等^[24-25]发现恒围压、加轴压过程煤体渗透率逐渐降低。S. Yang 等^[26]发现完整和裂隙试样渗透率均随有效应力增大呈指数下降。Z. Zhang 等^[27]研究了无煤柱、放顶煤和保护层开采路径下煤体渗透率变化规律。

以天然气水合物高效开采为研究动机,宋永臣等^[28]发现多孔介质内水合物的形成会导致渗透率下降。马慧龙等^[29]发现含水合物细粒砂渗透率随饱和度和度增大明显下降。孙可明等^[30]发现含水合物沉积物渗透率随饱和度和有效体积应力增大呈指数递减变化。吴丹梅等^[31]发现较低饱和度($<10\%$)下水合物饱和度变化对渗透率影响较大。W. G. Liu 等^[32]发现饱和度 4.27%~19.20%范围,含水合物黏土渗透率随饱和度增大呈先增大后减小趋势。C. H. Li 等^[33]发现含水合物砂岩渗透率随饱和度增大而降低。J. A. Priest 等^[34]发现水合物分解后,砂岩渗透率显著增大。

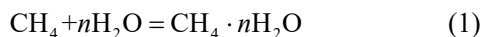
上述研究中,主要针对瓦斯-煤和天然气水合物-沉积物介质体系,以 2 种介质体系在各种条件下渗透特性变化规律为重点,展开有效应力、加卸载条件对瓦斯-煤介质体系渗透特性影响和饱和度对天然气水合物-沉积物介质体系渗透特性影响的

研究。实际上，煤体中瓦斯水合物的形成伴随着煤体孔隙的改变。瓦斯水合物形成会对煤体渗透率产生何种影响？采掘扰动下，含瓦斯水合物煤体渗流通道将会被压缩或扩充，此时有效应力、饱和度与渗透率之间呈现什么样的演化规律？目前鲜有关于加卸载下含瓦斯水合物煤体渗透率研究。本文采用应力-渗流-化学耦合作用含瓦斯水合物煤体三轴试验机，开展含瓦斯煤体渗透率试验及轴向应力加卸载过程含瓦斯水合物煤体渗透试验，获取瓦斯水合物形成对煤体渗透率影响，揭示有效应力、饱和度对含瓦斯水合物煤体渗透率、渗透率损失率、渗透率损伤率等影响规律，以期为后续煤层孔隙结构改造、煤层瓦斯快速水合固化防突提供技术参考和试验支撑。

2 瓦斯水合固化防突机制

2.1 瓦斯水合反应机制

瓦斯水合固化防突技术是基于瓦斯水合物形成的化学反应，其中水分子(主体分子)通过氢键相连形成多面体笼孔，瓦斯分子(客体分子)填充在笼孔之中，使得其具有热力学稳定性，化学反应方程式^[35]如下：



式中： n 为水合指数。

2.2 瓦斯水合物形成相平衡条件

煤(岩)层温度、压力下瓦斯水合物能否形成是瓦斯水合固化防突技术应用的关键问题之一。吴强等^[6]利用吐温 40、吐温 80 等表面活性剂，模拟实际煤层温度情况，在温度 22.7 °C、瓦斯压力 23.2 MPa 下反应釜内含促进剂溶液中生成了水合物，瓦斯压力条件可通过煤层注水实现，目前煤层超高压注水压力可达 32 MPa 以上，满足瓦斯水合物形成相平衡条件，初步证明了在煤层中形成瓦斯水合物的可行性。

目前课题组针对型煤，利用应力-渗流-化学耦合作用含瓦斯水合物煤体三轴试验机初步开展含瓦斯水合物煤体三轴渗流试验。因此，为获得采掘扰动下含瓦斯水合物煤体渗流特性变化规律，本文参照 E. D. Sloan^[36]相平衡试验结果，选取温度 0.5 °C、瓦斯压力 4 MPa 为试验条件，如图 1 所示。瓦斯压力 4 MPa 高于温度 0.5 °C 对应的相平衡压力 2.77 MPa，可以实现水合物的生成。

为了直接观察含瓦斯水合物煤样，采用快开式

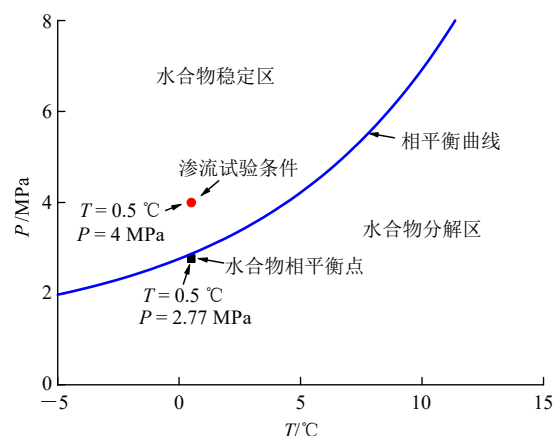


图 1 含瓦斯水合物煤体渗流试验温度、压力及水合物相平衡曲线^[36]

Fig.1 Temperature, pressure and phase equilibrium curve of seepage test in mine gas hydrate bonded coal^[36]

高压反应釜，在与渗透试验相同温度、压力(0.5 °C，4 MPa)条件下开展煤中瓦斯水合物生成试验，其中，反应釜内径为 10.2 cm，高为 26.5 cm，水为纯水，其质量为 25 g，煤粉粒径为 60~80 目，气样为甲烷(纯度为 99.99%)。图 2(a)为含瓦斯水合物煤体截面照片，图中白色颗粒为瓦斯水合物，黑色颗粒为煤粒，可明确观察到瓦斯水合物存在于煤样之中。

2.3 瓦斯固化防突机制

瓦斯水合过程，煤体中瓦斯与水反应生成固相瓦斯水合物，降低了瓦斯压力和含量^[6]，同时，瓦斯水合物以包裹、表面等模式分布于煤体孔隙空间^[37]，提高了煤体破坏强度、变形模量和内摩擦角^[38]，从瓦斯压力和煤体力学性质 2 个方面降低了煤与瓦斯突出的危险性^[1]。

此外，瓦斯水合固化后，瓦斯水合物填充于煤体渗流通道之中，必然会影响煤体渗流能力，有望限制由瓦斯压力降低导致的瓦斯运移补充，缩短目前较长的石门揭煤工期^[7]。

图 2(b)为煤体中瓦斯水合物分布模式示意图。图 2(c)为含瓦斯水合物煤体 X-CT 图像。参考含天然气水合物沉积物 X-CT 测试相关研究^[37-39]，含瓦斯水合物煤体 X-CT 测试利用阈值分割方法，基于瓦斯、水、水合物、煤 4 种组分密度差异，实现煤体中瓦斯水合物识别。含瓦斯水合物煤体 X-CT 试验中，试验温度、压力、水合物形成方法、煤样来源均与下文渗透率试验相同。含瓦斯水合物煤体 X-CT 试验在中国地质调查局青岛海洋所完成，试验设备具体参数见胡高伟等^[37-39]研究。含瓦斯水合物煤体 X-CT 图像分析主要分为两大步骤，具体如下：

(1) 确定表征单元体尺寸

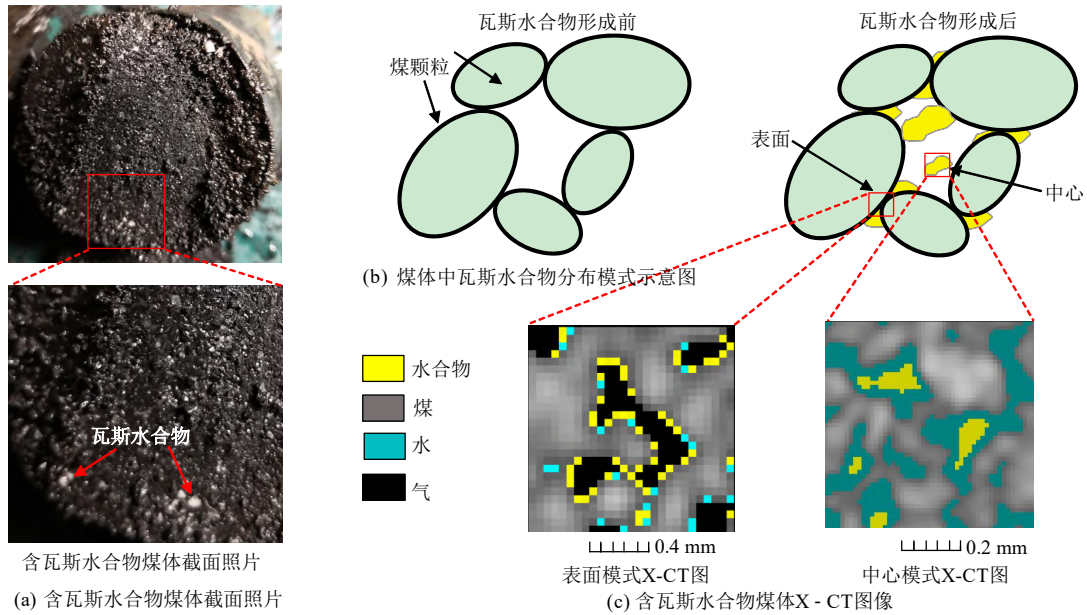


图2 瓦斯水合固化防突机制示意图

Fig.2 Schematic diagram of coal and gas outburst prevention technology based on the hydrate method

含瓦斯水合物煤体 X-CT 图像分析首先需要确定表征单元体尺寸。表征单元体尺寸越大,对含瓦斯水合物煤体微观孔隙特性描述的越准确,因此,采用距离胶套较近的曲线作为表征单元体边界,如图 3 所示。图中给出了碳纤维三轴釜截面图像,由外至内分别为碳纤维三轴釜壁、围压液、胶套、煤样。

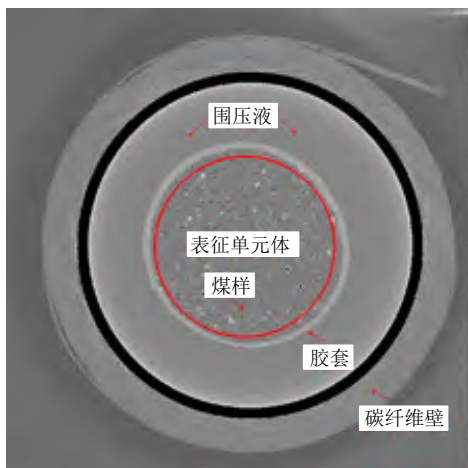


图3 碳纤维三轴釜 X-CT 截面图像

Fig.3 X-CT cross-section of carbon fiber triaxial reactor

(2) X-CT 图像阈值分割

含瓦斯水合物煤体各组分阈值分割是 X-CT 图像处理的关键环节,也是确定水合物、水、瓦斯、煤 4 种组分分布信息的主要难点。X-CT 射线穿过含瓦斯水合物煤体时,由于煤、水合物、水、瓦斯组分之间密度、厚度及对 X-CT 射线吸收能力差异,呈现不同灰度值的 X-CT 图像。基于含瓦斯水合物

煤体各组分灰度差异,通过阈值分割就可以获取煤、水合物、水、瓦斯 4 种组分的分布信息。

选取 AB 区域进行灰度剖面分析,进而确定各组分灰度阈值。图 4 给出了灰度剖面位置及灰度的变化情况。由图可知,含瓦斯水合物煤体体系中,甲烷气密度最小,其对应灰度范围为灰度剖面中最小灰度平台,而煤颗粒密度最大,对应最大灰度平台。水与水合物密度相近,2 组分之间灰度差别较小,但 I 型水合物密度(0.91 g/cm³)小于水的密度(1 g/cm³)^[39],因此,可以确定瓦斯水合物、水灰度范围,实现水合物组分的识别,见图 4(b)。

3 含瓦斯水合物煤体渗透率试验

3.1 试样制备

试样制备过程具体如下:首先,使用碎煤机破碎由城山矿取出的原煤,之后,筛分成 20~40 目、40~60 目、60~80 目煤粉,然后,取一定量煤粉与纯水充分混合后装入模具,将模具放置于压力机上,施加 100 MPa 的力并持续 30 min,最后,将成型煤样取出,烘干至指定含水量后放入三轴试验机内^[40]。煤样高度、质量等参数见表 1。表中饱和度数值为对应粒度和含水量下含瓦斯水合物煤体的饱和度。

试验用煤取自龙煤集团鸡西市城山矿二采区

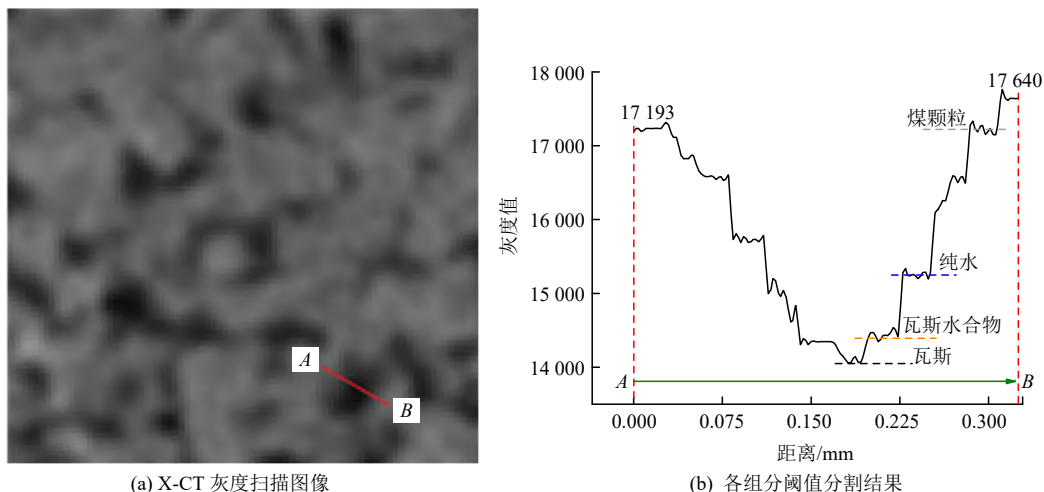


图 4 含瓦斯水合物煤体的灰度剖面分析

Fig.4 X-CT cross-section of carbon fiber triaxial reactor

表 1 煤样基本参数

Table 1 Basic parameters of coal sample

目数	高度/mm	直径/mm	质量/g	含水量/g	饱和度/%
	99.92	50.89	233.08	12.52	80
20~40	98.45	50.81	233.71	9.39	60
	98.81	50.53	237.64	6.26	40
	99.00	50.61	225.91	9.19	80
40~60	99.76	50.83	227.60	6.90	60
	98.65	50.60	231.40	4.60	40
	100.80	50.79	227.28	10.62	80
60~80	100.98	50.65	229.63	7.97	60
	100.59	50.72	232.79	5.31	40

42#煤层。甲烷气样(体积分数为 99.99%)由哈尔滨通达气体有限公司提供。纯水由实验室自制。

3.2 试验装置

应力 - 渗流 - 化学耦合作用含瓦斯水合物煤体三轴试验机如图 5 所示。该装置可用于测定加卸载过程不同围压、饱和度等条件下含瓦斯水合物煤体渗透特性与力学特性，主要由渗透率测试系统、压力控制系统、加卸载伺服控制系统、应变、压力等信号采集系统、温度控制系统等组成。渗透率测试系统核心部件为湿式流量计(日本品川)，流量测试范围为 0~20 L/min，准确度高。湿式流量计工作压

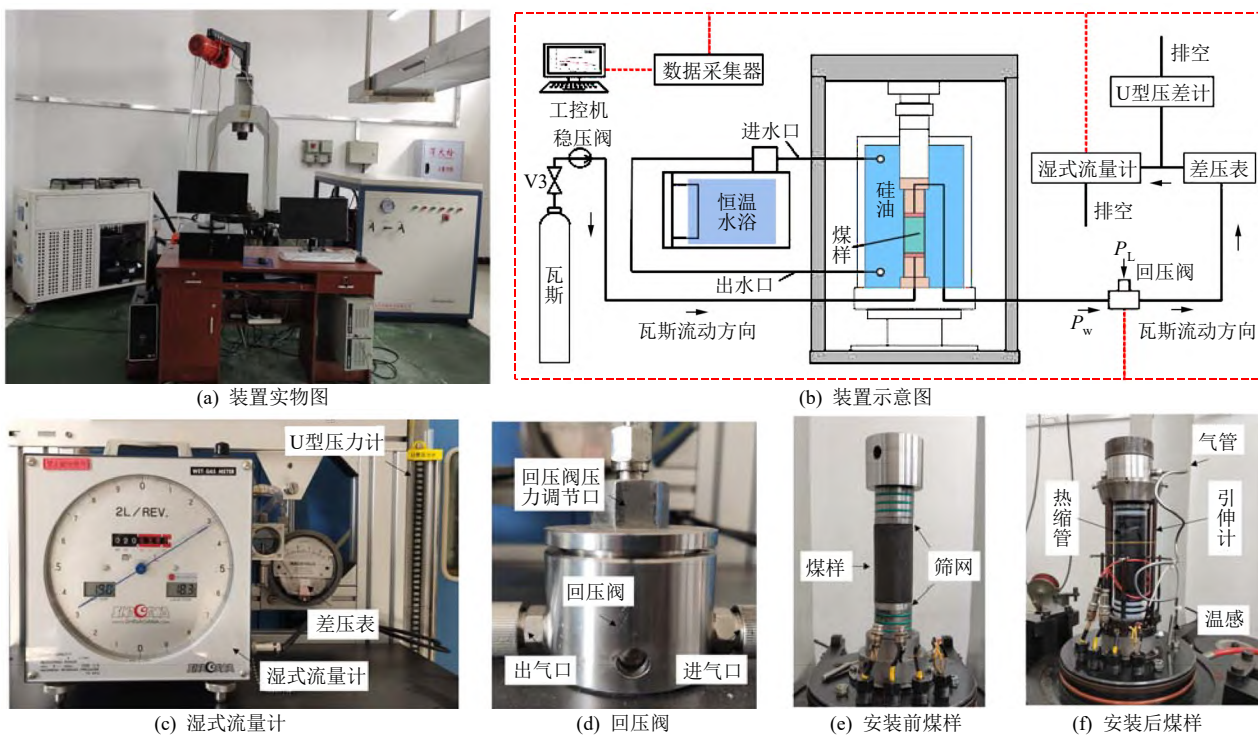


图 5 应力 - 渗流 - 化学耦合作用含瓦斯水合物煤体三轴试验机

Fig.5 Triaxial testing machine for coupled seepage, chemical and triaxial stress measurements in mine gas hydrate bonded coal

力较低，最大仅为 10 kPa，一般情况下回压阀流出气体不会超过湿式流量计最大工作压力，但为避免较高压力损坏湿式流量计，在前端安装差压表和 U 型压力计来保护湿式流量计。压力控制系统由回压阀、气瓶、稳压阀等构成。回压阀用于控制煤体出口端气体压力，当煤体出口端压力 P_w 超过回压阀内压力 P_L 时，瓦斯经回压阀流至流量计；当煤体出口端压力 P_w 小于回压阀内压力 P_L 时，瓦斯无法通过回压阀。加卸载伺服控制系统、应变、压力等信号采集系统、温度控制系统等参数见张保勇等^[40]研究。

3.3 水合物饱和度控制

水合物饱和度是评价水合物对煤体力学及渗透特性影响的重要参数，它指煤体中水合物体积与总孔隙体积的比值^[41]。水合物饱和度控制是含瓦斯水合物煤体渗透率试验开展的难点问题，其主要可分为 2 个方面，一是如何控制瓦斯水合物生成后含瓦斯水合物煤体饱和度，二是渗透率测试过程，如何尽量保持水合物稳定状态。

(1) 含瓦斯水合物煤体饱和度控制

多孔介质体系中水合物饱和度控制方法主要有水饱和法和气饱和法 2 种^[41]。水饱和法一般加入过量水制备饱和水煤样，仅供应一次气体，水合物生成过程不补充气体，通过控制反应时间来调节水合物饱和度，基于气体消耗量和水合反应方程式确定水合物饱和度^[40]。气饱和法通过烘干等方式制备不同初始含水量煤样，水合物生成过程持续补充气体，直至气体压力不再降低，基于初始含水量、质量变化等来计算水合物饱和度^[42]。

气饱和法具有饱和度范围广、控制便捷等优点，被较多水合物-多孔介质研究领域学者采用^[30-31, 41-42]。因此，本文选用气饱和法形成水合物。图 6 给出了试验过程温度、压力变化情况。图中 0~1 和 33~

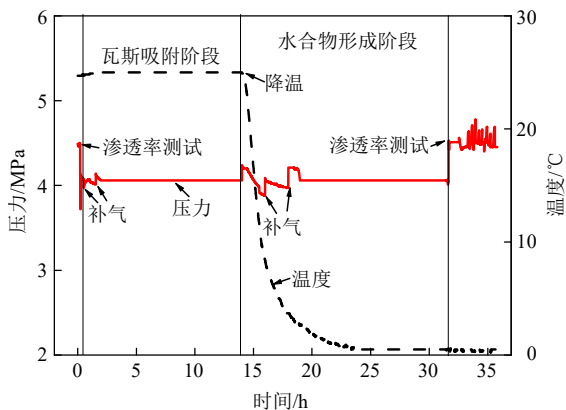


图 6 试验过程温度、压力变化情况

Fig.6 Variations of pressure and temperature curves during gas adsorption the test

35 h 内为渗透率测试阶段，1~14 h 为瓦斯吸附阶段，15~33 h 为水合物形成阶段。

(2) 渗透率测试过程瓦斯水合物稳定状态控制

瓦斯水合物稳定状态受压力、温度变化影响较大。瓦斯水合物生成过程压力为 4 MPa。为尽量保持渗透率测试过程煤体中瓦斯水合物稳定，通过稳压阀与回压阀控制煤体进口压力为 4.5 MPa、出口压力为 3.5 MPa。测试过程温度一直保持在 0.5 °C。

3.4 试验步骤和方案

(1) 含瓦斯煤体渗透率试验

本试验由 2 个部分组成，分别为含瓦斯煤体渗透率试验和加卸载过程含瓦斯水合物煤体渗透率试验。为分析瓦斯水合物生成对煤体渗透特性影响，测定相同围压、进出口压力、含水量下含瓦斯煤体渗透率，首先，将制备好的煤样装入三轴室内，用热缩管包裹、密封，注满围压液后，分级施加轴压与围压，加载速率为 0.01 MPa/s。为避免较低温度下液压油出现凝固现象，采用凝固点较低的硅油作为围压液。然后，当轴压和围压均加载至 12 MPa 后，开始测试含瓦斯煤渗透率(见图 7(a)和图 8 中 O 点)，施加回压阀内压力至 3.5 MPa，通过稳压阀控制气源出口压力为 4.5 MPa，采用湿式流量计测试出口端流量，待流量稳定一段时间后，渗透率测试结束，将气源出口端压力调至 4 MPa，即水合物生成压力，关闭煤体出口端阀门。本试验基于出口端流量，采用稳态法进行渗透率测试，渗透率计算公式^[18]如下：

$$k = \frac{2\mu P_0 L Q}{A(P_1^2 - P_2^2)} \quad (2)$$

式中： k 为渗透率(m^2)； μ 为测定温度下气体动力黏度系数($MPa \cdot s$)； P_0 为大气压力，为 0.101 MPa； P_1 为进气端气压，为 4.5 MPa； P_2 为出气端压力，为 3.5 MPa； L 为试样长度(m)； Q 为标准状况下瓦斯流量(m^3/s)； A 为试样横截面面积(m^2)。

式(2)中气体动力黏度系数受压力影响较小，而与温度明显相关^[43]，因此，根据萨特兰公式计算了试验温度(0.5 °C 和 20 °C)下气体动力黏度系数，计算公式^[43]如下：

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{1.5} \frac{T_0 + B}{T + B} \quad (3)$$

式中： $T_0 = 273.15 K$ ； μ_0 为标准状态下甲烷气体动力黏度系数，取 $1.0198 \times 10^{-11} MPa \cdot s$ ； B 为萨特兰常数，取 164。气体动力黏度系数分别为 $1.0214 \times 10^{-11} MPa \cdot s$ (0.5 °C)和 $1.0842 \times 10^{-11} MPa \cdot s$ (20 °C)。

(2) 加卸载过程含瓦斯水合物煤体渗透率试验

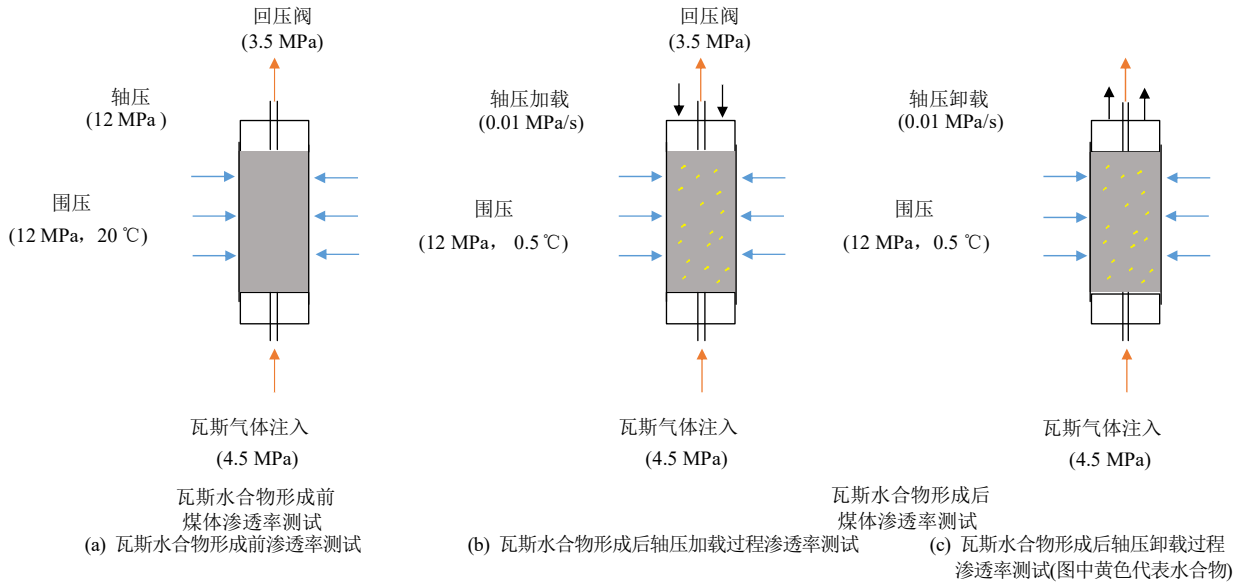


图 7 渗透率测试过程示意图

Fig.7 Schematic diagram of the permeability test process

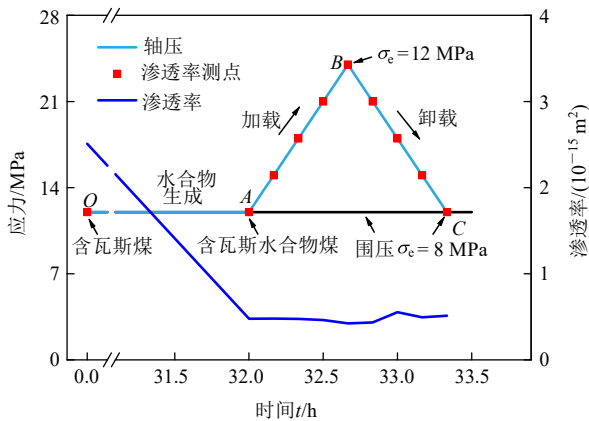


图 8 应力路径及渗透率测点示意图

Fig.8 Schematic diagram of stress paths and permeability measuring point

轴向应力加卸载过程含瓦斯水合物煤体渗透率测试主要分为水合物生成、含瓦斯水合物煤体渗透率测试、加载和卸载过程含瓦斯水合物渗透率测试阶段，各阶段介绍如下：

① 水合物生成阶段(OA 段)：含瓦斯煤渗透率测试结束后，设定恒温水浴温度为 0.5 °C，降温至设定温度后，三轴室内温度、压力均为水合物生成条件，开始水合物原位生成，水合物生成会导致气相空间压力降低，气压降低后补气至 4 MPa，保持水合物生成过程持续供气，待压力平稳 6 h 后，水合物生成结束。试验过程温度、压力变化情况见图 6。

② 含瓦斯水合物煤体渗透率测试(A 点)：调节煤体进口压力为 4.5 MPa、出口压力为 3.5 MPa，测定瓦斯水合物形成后煤体渗透率(见图 7(b))。

③ 加载过程含瓦斯水合物煤体渗透率测试(AB 段)：保持进出口压力及围压不变，以 0.01 MPa/s 加载速率加载，每加载 3 MPa，测量渗透率，待流量稳定后进行读数记录，直至轴向引伸计达到量程(见图 7(b))，开始卸载轴向应力。

④ 卸载过程含瓦斯水合物煤体渗透率测试(BC 段)：以 0.01 MPa/s 卸载速率卸载，每卸载 3 MPa，测量渗透率，轴向应力达到 12 MPa，试验结束(见图 7(c))。应力路径及渗透率测点示意图见图 8。

有效应力计算公式^[18]如下：

$$\sigma_e = (\sigma_1 + 2\sigma_3) / 3 - (P_1 + P_2) / 2 \quad (4)$$

式中： σ_e 为有效应力(MPa)， σ_1 为轴向应力(MPa)， σ_3 为围压(MPa)。煤样加卸载过程轴向应力及各渗透率测点有效应力等条件见表 2。

表 2 应力加卸载过程含瓦斯水合物煤体有效应力条件
Table 2 Effective stress conditions of mine gas hydrate bonded coal during stress loading and unloading process

应力状态	σ_1 /MPa	σ_3 /MPa	P_1 /MPa	P_2 /MPa	σ_e /MPa
加载	12				8
	15				9
	18				10
	21				11
	24	12	4.5	3.5	12
卸载	21				11
	18				10
	15				9
	12				8

4 试验结果及分析

4.1 瓦斯水合物形成对煤体渗透率影响

图 9 给出了不同饱和度和粒径下瓦斯水合物形成前后煤体渗透率。由图可知，瓦斯水合物形成后，煤体渗透率明显降低，降低幅度为 79%~99%。图 9(b) 给出了不同饱和度下含瓦斯水合物煤体渗透率。由图可知，含瓦斯水合物煤体渗透率随饱和度增大呈降低趋势。饱和度由 40% 增大至 80% 时，煤体渗透率分别降低为原来的 0.14(20~40 目)，0.01(40~60 目)，0.30(60~80 目)。饱和度越高，煤体孔隙空间内分布的水合物量越多，水合物对煤体孔隙流体通道堵塞作用越明显，煤体渗透率就越低。

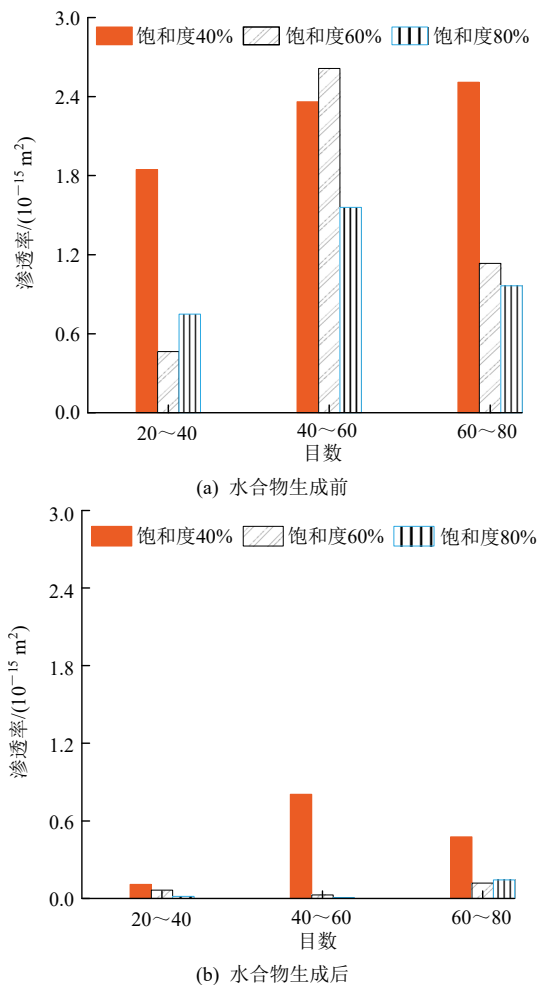


图 9 瓦斯水合物生成前后煤体渗透率

Fig.9 Coal permeability before and after gas hydrate formation

随饱和度增大，饱和度变化对煤体渗透率影响逐渐变小。40~60 目体系中，饱和度由 40% 增大至 60% 时，煤体渗透率降低为原来的 0.05，而当饱和

度由 60% 增大至 80% 时，煤体渗透率降低为原来的 0.15，60~80 目体系中也出现了相似的现象。

4.2 轴向应力加载过程有效应力对含瓦斯水合物煤体渗透率影响

图 10 给出了轴向应力加载过程有效应力与含瓦斯水合物煤体渗透率。由图可知，加载过程含瓦斯水合物煤体渗透率随有效应力增大而降低。加载过程增大的有效应力压缩了煤体孔隙裂隙，造成了煤体内孔隙、微裂隙等渗流通道半径的减小甚至关闭，导致了煤体渗透率的下降^[26]。渗透率随有效应力增大呈非线性趋势。有效应力小于 10 MPa 范围内，渗透率降低速率较快；有效应力大于 10 MPa 范围内，渗透率降低速率较慢。为定量描述加载过程煤体渗透率与有效应力关系，大量研究采用数学公式对试验数据进行拟合，主要包括以下 3 种拟合形式^[9, 26]：

(1) 二项式拟合：

$$K = B_1 \sigma_e + B_2 \sigma_e^2 + c \quad (5)$$

(2) 指数函数拟合：

$$K = A_1 \exp(-\sigma_e / t_1) + y_0 \quad (6)$$

(3) 幂函数拟合：

$$K = a \sigma_e^b \quad (7)$$

式(5)~(7)是从煤岩体渗透率测试中获得的经验拟合公式，其中 $a, b, c, B_1, B_2, A_1, t_1, y_0$ 均为拟合系数。为研究含瓦斯水合物煤体渗透率与有效应力关系，采用 3 种经验拟合公式进行拟合，拟合度见表 3。由表可知，3 个方程与含瓦斯水合物煤体拟合程度较好，其中，指数函数拟合效果最好， R^2 均在 0.88 以上，多数条件下拟合度达到了 0.99。煤体是非连续、非均质的材料，其包含复杂的孔隙、裂隙结构^[44]，而瓦斯水合物分布模式、生成位置具有一定随机性，增大了煤体非均质性，因此出现了部分条件下拟合度较低现象。为了进一步分析和对比 3 种拟合方式对加载过程含瓦斯水合物煤体渗透率测试的预测效果，图 10 给出了 3 种拟合曲线与渗透率测试结果。由图可知，指数函数拟合结果显示出了较高的拟合度，可以较好地描述含瓦斯水合物煤体渗透率随有效应力变化的规律。二项式拟合度整体较好，相比于指数函数拟合，在部分条件下拟合效果较差。幂函数方程仅对少数预测点具有较高的预测精度，且难以描述有效应力大于 10 MPa 后含瓦斯水合物煤体渗透率增大速率变缓现象。

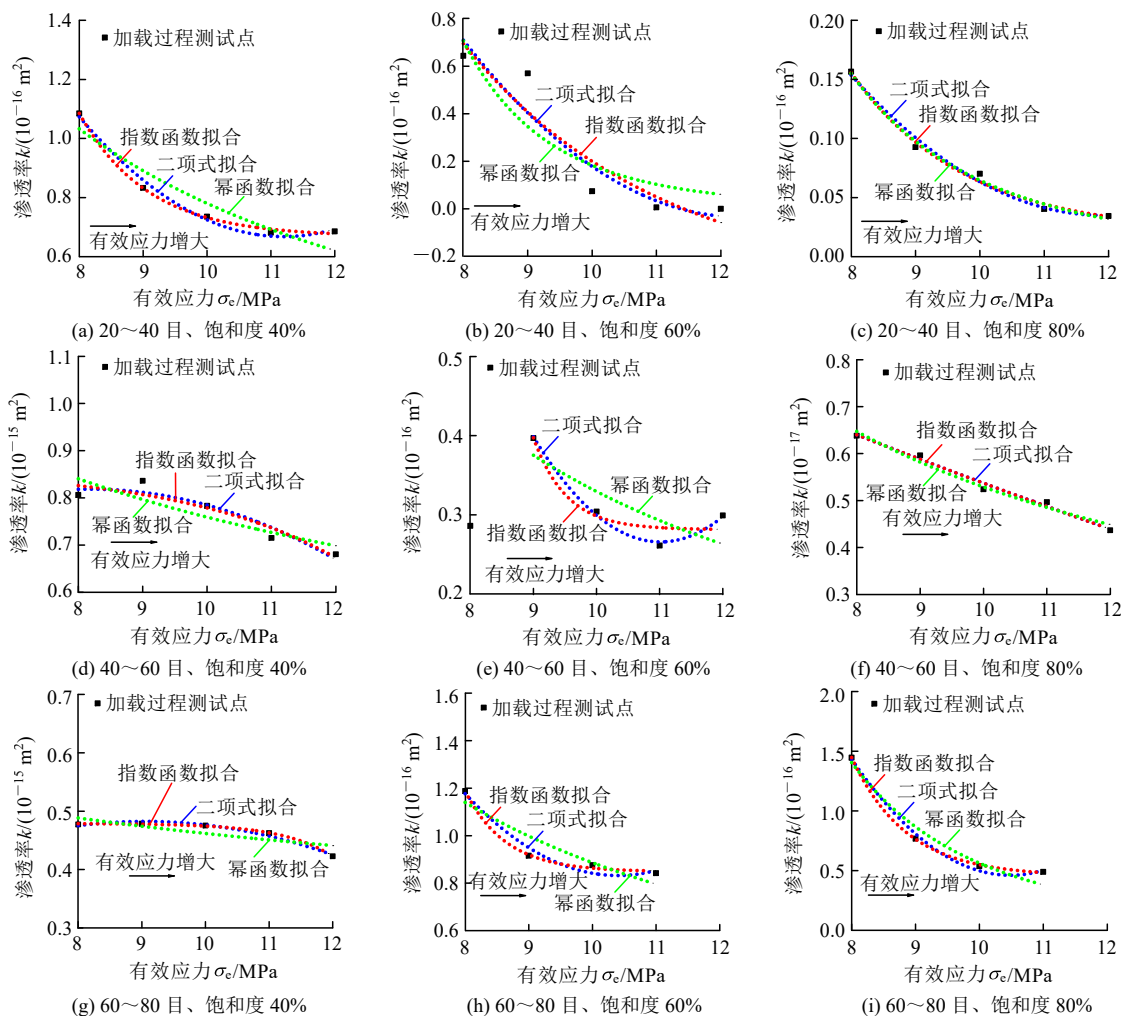


图 10 加载过程含瓦斯水合物煤体渗透率随有效应力变化曲线

Fig.10 Variation curves of permeability of mine gas hydrate bonded coal with effective stress during loading

表 3 加载过程含瓦斯水合物煤体渗透率与有效应力拟合结果

Table 3 Fitting results of permeability and effective stress of mine gas hydrate bonded coal during loading

目数	饱和度/ %	指数函数拟合				二项式拟合				幂函数拟合		
		A_1	t_1	y_0	R^2	B_1	B_2	c	R^2	a	b	R^2
20~40	40	729.08	1.07	0.67	0.99	-0.89	0.04	5.64	0.99	14.07	-1.26	0.89
	60	14.06	3.07	-0.34	0.88	-0.99	0.04	6.06	0.89	2.04×10^4	-6.05	0.81
	80	12.62	1.77	0.02	0.99	-0.18	0.01	1.14	0.99	541.54	-3.92	0.99
40~60	40	-0.01	-2.48	0.86	0.89	0.17	-0.01	0.13	0.92	2.17	-0.46	0.77
	60	3.50×10^6	0.52	0.28	0.91	-0.72	0.03	4.24	0.99	5.70	-1.24	0.66
	80	2.56	39.52	-1.45	0.99	-0.06×10^{-4}	6.32	1.10	0.99	4.25	-0.90	0.98
60~80	40	-1.47×10^{-8}	-0.79	0.48	0.99	0.12	-0.01	-0.06	0.98	0.82	-0.25	0.64
	60	8.71×10^4	0.64	0.85	0.99	-1.24	0.06	7.31	0.97	11.93	-1.13	0.85
	80	1.09×10^4	0.86	0.45	0.99	-3.30	0.16	17.77	0.99	7.05×10^3	-4.10	0.96

因此，通过直观对比和详细分析，指数函数拟合最能反映加载过程含瓦斯水合物煤体渗透率与有效应力关系。尽管上述经验拟合公式不能描述含瓦斯水合物煤体渗透行为的基本物理过程，但能较好

地描述加载过程含瓦斯水合物煤体渗透率随有效应力的演变。

需要说明的是，60~80目体系中，饱和度 60% 和 80%条件下，有效应力由 11 MPa 增大至 12 MPa

过程,因轴向引伸计达到量程,无法继续加载,缺少有效应力 12 MPa、饱和度 60%和 80%下含瓦斯水合物煤体渗透率测试结果。40~60 目体系饱和度 60%下渗透率拟合过程出现拟合度较低情况,而且 8 MPa 下渗透率值与总体变化趋势差别较大,表 3 中为去除一个离散点后的拟合结果。

4.3 轴向应力卸载过程有效应力对含瓦斯水合物煤体渗透率影响

图 11 给出了卸载过程含瓦斯水合物煤体渗透率随有效应力变化规律。由图可知,卸载过程含瓦斯水合物煤体渗透率卸载过程渗透率变化存在 3 种模式,分别为少量恢复(见图 11(b), (c), (h), (i))、部分恢复(见图 11(a), (d), (f))和卸载增透(见图 11(e), (g))^[45]。多数情况下含瓦斯水合物煤体渗透率随有效应力减小呈少量恢复或部分恢复趋势,如 20~40 目 60%饱和度等,仅 40~60 目 60%饱和度和 60~

80 目 40%饱和度下出现了卸载增透现象,即卸载后含瓦斯水合物煤体渗透率高于加载前初始渗透率。随着卸载过程有效应力的降低,被压缩的孔隙流体渗流通道逐渐恢复,增强了煤体渗流能力。渗流通道张开程度决定了渗透率恢复程度,若渗流通道张开程度较小,就会出现渗透率少量或部分恢复现象;若渗流通道张开程度较大,甚至超过了含瓦斯水合物煤体初始状态,或是卸载应力导致煤体出现新裂隙,增强了煤体渗流能力^[45],就会出现卸载增透现象^[15]。

为定量描述卸载过程含瓦斯水合物煤体渗透率与有效应力关系,采用指数函数、二项式和幂函数对渗透率和有效应力进行拟合,如表 4 所示。由表可知,指数函数拟合效果较好,除少数点外,拟合度均在 0.89 以上。卸载过程拟合相关度整体要差于加载过程拟合相关度,且 20~40 目 60%饱和度下

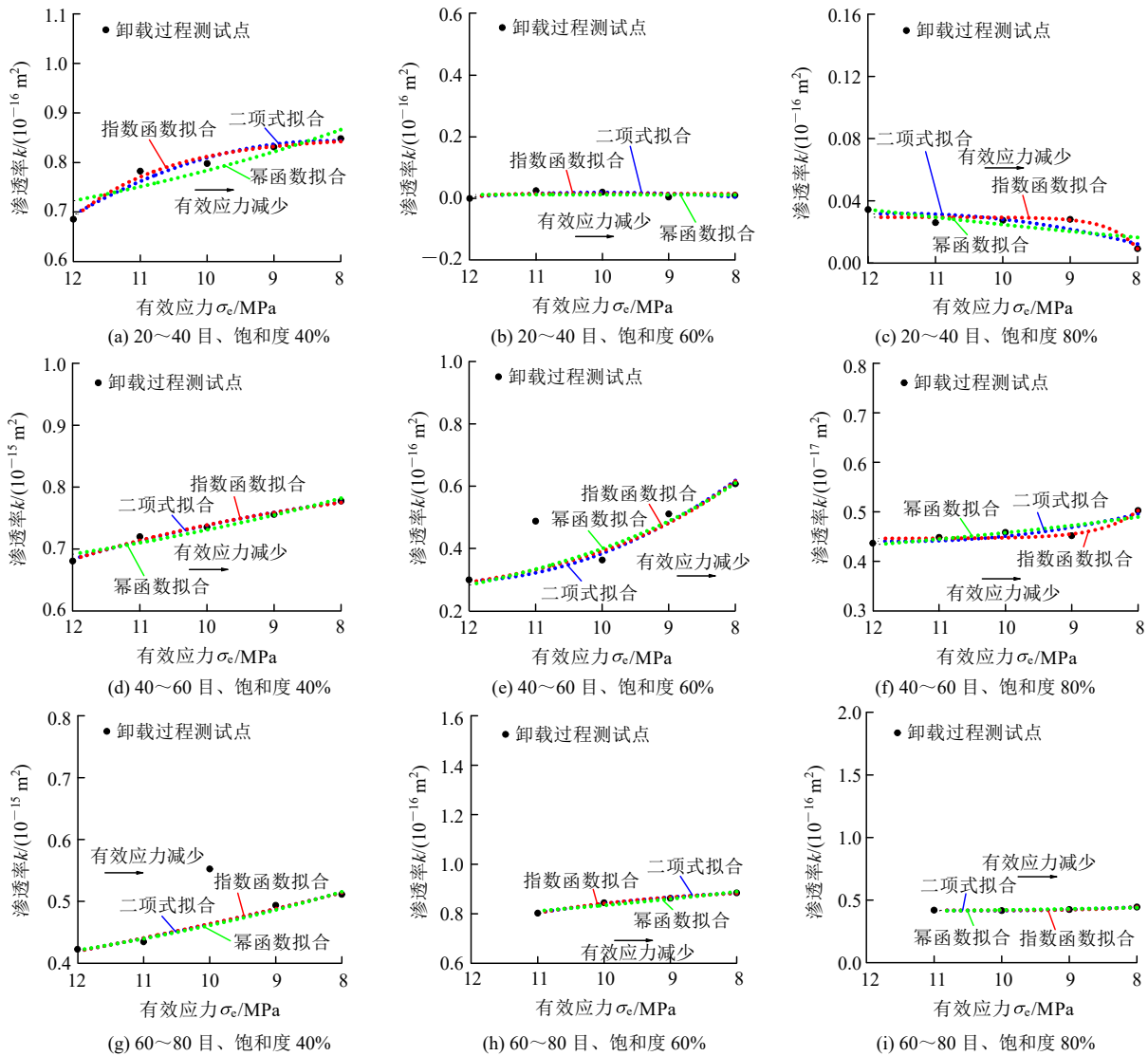


图 11 卸载过程含瓦斯水合物煤体渗透率随有效应力变化曲线

Fig.11 Variation curves of permeability of mine gas hydrate bonded coal with effective stress during unloading

表 4 卸载过程含瓦斯水合物煤体渗透率与有效应力拟合结果

Table 4 Fitting results of permeability and effective stress of mine gas hydrate bonded coal during unloading

目数	饱和度/%	指数函数拟合				二项式拟合				幂函数拟合		
		A_1	t_1	y_0	R^2	B_1	B_2	c	R^2	a	b	R^2
20~40	40	-3.60×10^{-5}	-1.42	0.85	0.98	0.17	-0.01	0.16	0.96	2.20	-0.45	0.82
	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	80	-6.21×10^6	0.41	0.03	0.89	0.04	-0.01	-0.18	0.75	3.78×10^{-4}	1.82	0.63
40~60	40	-0.01	-4.67	0.84	0.99	0.02	-0.01	0.75	0.99	1.47	-0.30	0.95
	60	10.10	2.49	0.21	0.97	-0.45	0.02	3.01	0.98	31.61	-1.90	0.96
	80	1.43×10^5	0.54	0.45	0.91	-0.10	0.01	1.03	0.82	0.91	-0.30	0.76
60~80	40	0.69	15.36	0.10	0.98	-0.04	9.41×10^{-4}	0.79	0.98	1.46	-0.50	0.98
	60	-9.92×10^{-4}	-2.34	0.91	0.99	0.07	-0.01	0.66	0.99	1.62	-0.29	0.94
	80	3.00×10^3	0.69	0.42	0.97	-0.12	0.01	1.03	0.99	0.65	-0.19	0.77

含瓦斯水合物煤体渗透率随有效应力降低呈非单调变化趋势，拟合效果较差，说明加卸载过程煤体发生部分塑性损伤变形^[45]，加之煤非均质性和瓦斯水合物形成位置随机性，致使卸载过程拟合结果离散性较大。需要说明的是，40~60目、饱和度60%和60~80目、饱和度40%下渗透率拟合过程出现拟合度较低情况，而且均出现一个有效应力条件下渗透率值与总体变化趋势差别较大，表4中均为去除一个离散点后的拟合结果。

进一步分析和对比3种拟合方式对卸载过程含瓦斯水合物煤体渗透率的预测效果，由图11可知，指数函数拟合不仅能较好的地描述渗透率随有效应力的变化趋势，对少数点也有较好的预测精度。二项式拟合趋势与渗透率变化趋势基本一致，但对少数点预测精度较差，且拟合度整体较低。幂函数仅对少数点预测精度较高，整体拟合度较差。

综上所述，指数函数拟合最能反映加卸载过程含瓦斯水合物煤体渗透率与有效应力关系，能较好地描述加卸载过程含瓦斯水合物煤体渗透率随有效应力的演变，可对瓦斯水合固化后采掘扰动下含瓦斯水合物煤体渗透率变化进行有效计算和预测，为瓦斯水合固化技术现场应用提供数据支撑。

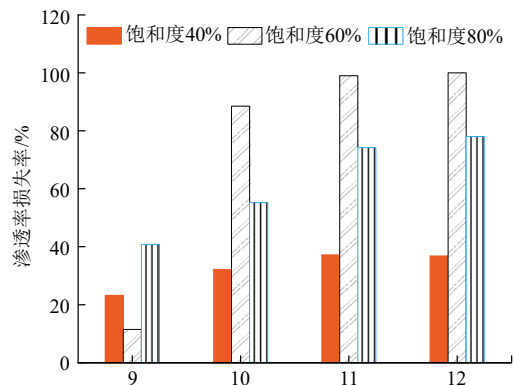
4.4 加载过程饱和度对含瓦斯水合物煤体渗透率损失率影响

为分析加载过程饱和度对含瓦斯水合物煤体渗透率变化影响，采用渗透率损失率评价加载过程渗透率减少程度，计算公式^[46]如下：

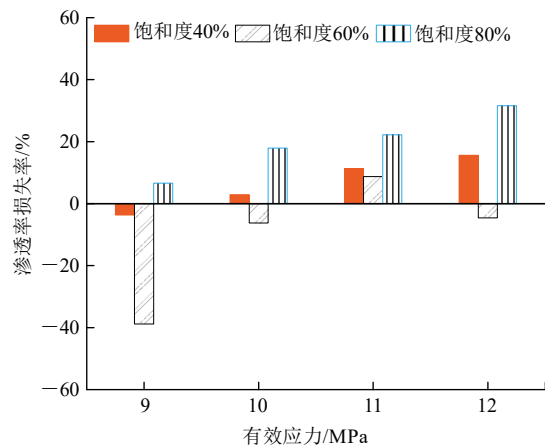
$$L_k = \frac{k_0 - k_1}{k_0} \times 100\% \quad (8)$$

式中： L_k 为应力加载至第1个应力点产生的渗透率损失率(%)， k_0 为初始渗透率(m^2)， k_1 为应力加载至第1个应力点对应的渗透率(m^2)。

图12给出了加载过程不同粒度和饱和度下含瓦斯水合物煤体渗透率损失率。由图可知，相同有效应力下，含瓦斯水合物煤体渗透率损失率随饱和度增大呈增大趋势。例如，有效应力9MPa下，20~



(a) 20~40 目



(b) 40~60 目

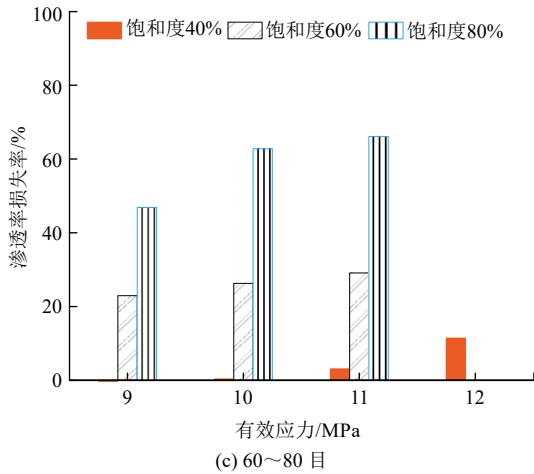


图 12 加载过程含瓦斯水合物煤体渗透率损失率
Fig.12 Permeability loss rate of mine gas hydrate bonded coal during loading

40 目体系中，饱和度 40%渗透率损失率为 23.26%，而饱和度 80%渗透率损失率为 40.75%，在其他目数和饱和度下均可观察到类似的变化趋势。受有效应力增大影响，煤体的原生微孔裂隙组成的渗流通道被挤压，渗流通道尺寸减小，渗透能力降低，而瓦斯水合物分布于煤体渗流通道之中，在相同的有效应力挤压作用下，煤体中瓦斯水合物量越多，越易于发生渗流通道堵塞现象^[30]，导致加载过程渗透率损失率增大。

40~60 目、饱和度 60%下不同有效应力含瓦斯水合物煤体渗透率损失率为负，是由于其加载过程第一个点渗透率值较低，且与之后的渗透率变化趋势也有一定差距导致的。分析认为，可能是煤非均质性和瓦斯水合物形成位置随机性导致加载后煤样渗透率增大，出现了拟合度低和渗透率损失率为负的现象。

20~40 目体系中，有效应力 10, 11, 12 MPa 下出现了饱和度 60%煤体渗透率损伤率高于饱和度 80%煤体渗透率损伤率的现象。煤体孔隙按连通类型可分为交联孔、通孔、封闭孔和半封闭孔 4 类。瓦斯水合物形成具有一定随机性，可能形成于交联孔、通孔之中，也可能形成于半封闭孔之中。半封闭孔中瓦斯水合物对煤体渗流能力几乎无影响^[45]。分析认为，有效应力 10, 11, 12 MPa 下饱和度 80%煤体半封闭孔中可能分布有一定量的瓦斯水合物，没有对煤体渗流能力产生影响，导致了饱和度 80%煤体渗透率损伤率较低。

4.5 卸载过程饱和度对含瓦斯水合物煤体渗透率损伤率影响

上述研究发现卸载过程有效应力恢复至初始状

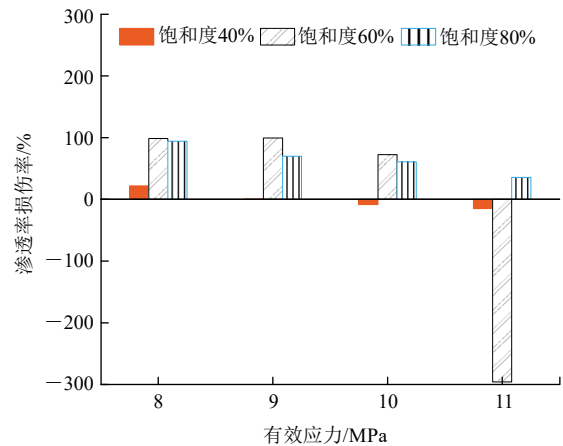
态后，多数情况下含瓦斯水合物煤体渗透率有所增大，但不能恢复至原始状态，因此，采用渗透率损伤率来评价卸载过程渗透率不能恢复的程度，计算公式^[15]如下：

$$D_{k_1} = \frac{k_1 - k_{1x}}{k_1} \times 100\% \quad (9)$$

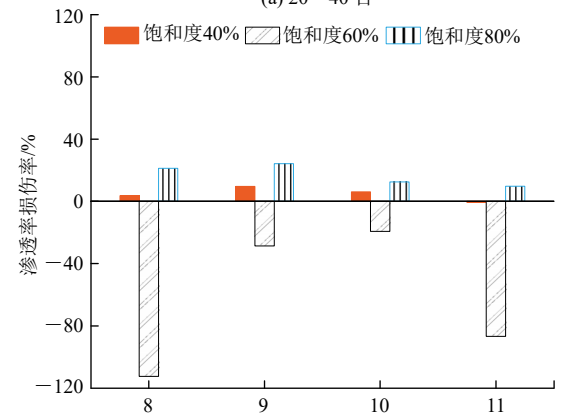
式中： D_{k_1} 为应力恢复至第 1 个应力点产生的渗透率损伤率(%)， k_{1x} 为卸载过程应力恢复至第 1 个应力点对应的渗透率(m^2)。

图 13 给出了不同粒度、饱和度下卸载过程含瓦斯水合物煤体损伤率。由图可知，渗透率损伤率随有效应力减小呈增大趋势。例如，20~40 目、饱和度 80%下，有效应力 11 MPa 渗透率损伤率为 35.56%，而有效应力 8 MPa 渗透率损伤率为 94.08%。

相同有效应力下，较高饱和度含瓦斯水合物煤体具有较高的渗透率损伤率。卸载过程含瓦斯水合物煤体出现卸载增透现象，即卸载后渗透率大于卸载起始点渗透率，渗透率损伤率就会是负值。张磊等^[46]也发现循环荷载下完整和裂隙煤样部分出现卸载增透现象，计算得到了负值渗透率损伤率及不可逆渗透率损伤率。



(a) 20~40 目



(b) 40~60 目

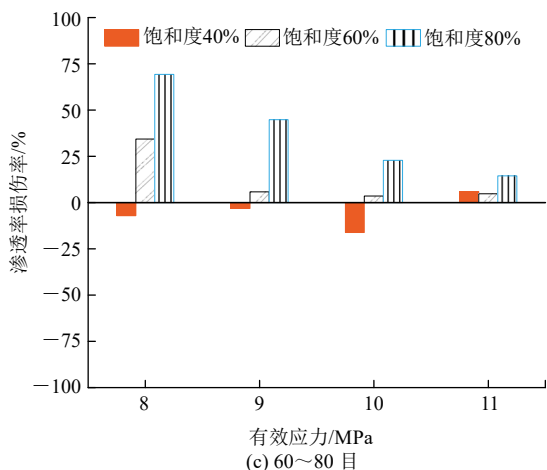


图 13 卸载过程含瓦斯水合物煤体渗透率损伤率

Fig.13 Permeability damage rate of mine gas hydrate bonded coal during unloading

卸载过程渗透率不能恢复量主要包括两部分：一是部分煤体孔隙、裂隙发生塑性变形，卸载过程无法恢复，导致加载压密的渗流通道保持了压缩状态，未能张开；二是卸载过程有效应力减少导致被压缩的渗流通道呈张开状态，但瓦斯水合物堵塞于渗流通道之中，降低了渗流通道的有效尺寸，导致了较高饱和度含瓦斯水合物煤体卸载过程渗透率不能恢复程度较高^[30]。

5 讨论

5.1 瓦斯水合物形成对煤体渗透率影响分析

含水合物多孔介质渗透率受饱和度和分布模式耦合影响。根据平行毛细管等模型计算值，对比分析多孔介质中水合物分布模式，解释水合物对多孔介质渗透特性影响机制，是含水合物多孔介质领域水合物分布模式影响研究的常用方法^[28]。

基于平行毛细管模型^[47](分布模式：假设多孔介质是由多根平行毛细管组成，水合物均匀包裹在毛细管内壁或水合物合成于毛细管中心)和 Kozeny 颗粒模型^[47](分布模式：假设水合物合成于颗粒表面或中心)，间接确定了煤体中瓦斯水合物分布模式，如图 14 所示。由图可知，煤体中瓦斯水合物分布模式差异是导致归一化渗透率(含瓦斯水合物煤体渗透率与不含水合物的煤体渗透率比值)随饱和度呈非单调变化趋势的主要原因。20~40 目体系中，由于饱和度 40%和饱和度 80%下瓦斯水合物分布模式以中心型为主，而饱和度 60%下瓦斯水合物分布模式以表面型为主，导致归一化渗透率随饱和度先增大后减小。

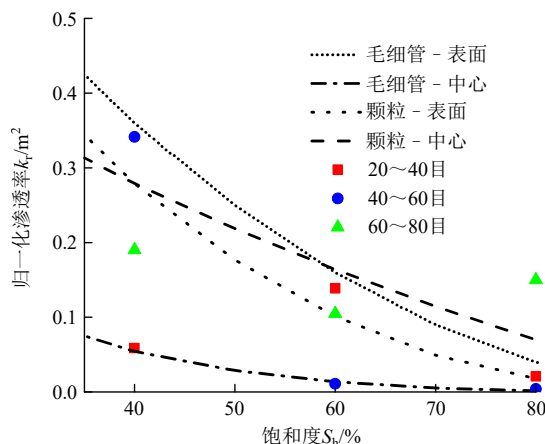


图 14 实测渗透率与模型计算渗透率对比

Fig.14 Comparison of measured permeability and model calculated permeability

煤体中瓦斯水合物分布多以单一模式为主，如饱和度 40%下，20~40 目煤样中瓦斯水合物以中心型为主，40~60 目则以表面型为主。瓦斯水合物分布模式与饱和度、目数相关性较小，不同饱和度、目数下煤体中瓦斯水合物分布模式呈现一定随机性。

60~80 目饱和度 40%下煤体中瓦斯水合物以表面和中心型 2 种模式为主，因此出现了归一化渗透率位于 2 种分布模式曲线之间的现象。60~80 目饱和度 80%下部分瓦斯水合物可能形成于半封闭或封闭孔^[45]，对渗流影响较小，致使归一化渗透率高于饱和度 80%下所有模型计算值。

5.2 轴向应力加卸载过程含瓦斯水合物煤体渗透率变化规律分析

采掘扰动下，工作面煤体不断处于支承压力影响区域或卸载区域^[9]。当有效应力增大，煤体渗流通道被压缩，渗流通道有效尺寸减小，强化了水合物堵塞作用，造成了煤体渗透率的进一步下降(见图 13 加载曲线)。孙可明等^[30]以含天然气水合物沉积物为研究对象，也发现了相似的规律。

有效应力减小过程煤体渗透率出现 3 种演化类型，一是卸载过程含瓦斯水合物煤体渗透率少量恢复，对应图 15 中序号 1 曲线和图 11(b), (c), (h), (i)，此演化类型较为多见，说明卸载过程渗流通道张开程度较小；二是卸载后渗透率小于初始渗透率，煤体渗透率部分恢复，对应图 15 中序号 2 曲线和图 11(a), (d), (f)，卸载后渗透率小于初始渗透率，说明经历加卸载后渗流通道仍处于压缩状态，未恢复至初始状态；三是卸载后渗透率大于初始渗透率，出现了卸载增透现象，说明渗流通道张开程度较大，甚至超过了含瓦斯水合物煤体初始状态，或是卸载应

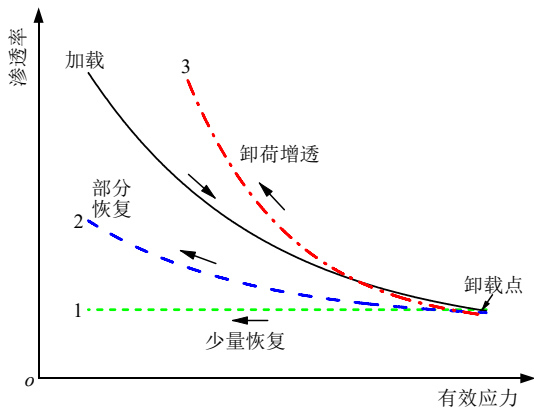


图 15 加卸载过程含瓦斯水合物煤体渗透率变化类型
Fig.15 Types of permeability change of mine gas hydrate bonded coal during loading and unloading

力导致煤体出现新裂隙，对应图 15 中序号 3 曲线和图 11(e), (g)。

相比现有预抽煤层瓦斯技术，瓦斯水合固化防突技术具有三大优点：一是瓦斯水合反应时间较短，室内试验一般在 32 h 以内，能在较短时间降低瓦斯压力和含量^[35-40]；二是瓦斯水合固化过程，瓦斯水合物形成能降低煤体渗透率，加载过程含瓦斯水合物煤体渗透率进一步下降，卸载过程含瓦斯水合物煤体渗透率多数情况下少量或部分恢复，限制了由于瓦斯压力降低导致的运移补充；三是瓦斯水合固化防突技术无需铺设瓦斯抽采管道，有望缩短目前较长的石门揭煤工期，助力煤炭安全高效开采^[7]。

6 结 论

(1) 瓦斯水合物形成后，煤体渗透率明显降低，降低幅度最大为 99%。含瓦斯水合物煤体渗透率随水合物饱和度增大呈降低趋势。

(2) 加卸载过程含瓦斯水合物煤体渗透率与有效应力呈指数函数关系。加载过程含瓦斯水合物煤体渗透率随有效应力增大而降低。卸载过程含瓦斯水合物煤体渗透率随有效应力减小而呈少量恢复、部分恢复和卸载增透 3 种变化趋势。

(3) 相同有效应力下，含瓦斯水合物煤体渗透率损失率随饱和度增大呈增大趋势，较高饱和度含瓦斯水合物煤体具有较高的渗透率损伤率。

为研究瓦斯水合物形成对煤体渗透率影响、轴向应力加卸载过程含瓦斯水合物煤体渗透率变化规律，本文开展了试验温度冰点附近煤体中瓦斯水合物生成和含瓦斯水合物煤体渗透率测试试验，而实际煤炭开采过程煤岩体经历的温度较高，后续研究

需要采用热力学、动力学促进剂，探索模拟煤炭开采温度下瓦斯水合物形成及含瓦斯水合物煤体渗透率测试，降低瓦斯水合物生成难度，为瓦斯水合物固化防突技术提供试验参考和数据支撑。

参考文献(References):

- [1] 袁 亮. 深部采动响应与灾害防控研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 716 - 725.(YUAN Liang. Research progress of mining response and disaster prevention and control in deep coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 716 - 725.(in Chinese))
- [2] 王 焰, 何满潮, 刘冬桥, 等. 深部椭圆形洞室围岩冲击岩爆实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(11): 2 214 - 2 228.(WANG Yang, HE Manchao, LIU Dongqiao, et al. Experimental study on impact rockburst of surrounding rock in deep elliptical caverns[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(11): 2 214 - 2 228.(in Chinese))
- [3] 左建平, 陈 岩, 宋洪强. 深部煤岩组合物体破坏行为与非线性模型研究进展[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2021, 52(8): 2 510 - 2 521.(ZUO Jianping, CHEN Yan, SONG Hongqiang. Study progress of failure behaviors and nonlinear model of deep coal-rock combined body[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2021, 52(8): 2 510 - 2 521.(in Chinese))
- [4] 唐巨鹏, 郝 娜, 潘一山, 等. 基于声发射能量分析的煤与瓦斯突出前兆特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(1): 31 - 42.(TANG Jupeng, HAO Na, PAN Yishan, et al. Experimental study on precursor characteristics of coal and gas outbursts based on acoustic emission energy analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(1): 31 - 42.(in Chinese))
- [5] 贾荔丹, 李波波, 李建华, 等. 采气-采煤阶段煤岩渗透率演化机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(1): 132 - 146.(JIA Lidan, LI Bobo, LI Jianhua, et al. Study on the evolution mechanism of coal permeability during gas production and coal mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(1): 132 - 146.(in Chinese))
- [6] 吴 强, 李成林, 江传力. 瓦斯水合物生成控制因素探讨[J]. 煤炭学报, 2005, 30(3): 283 - 287.(WU Qiang, LI Chenglin, JIANG Chuanli. Discussion on the control factors of forming gas hydrate[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(3): 283 - 287.(in Chinese))
- [7] 冯 涛, 谢雄刚, 刘 辉, 等. 注液冻结法在石门揭煤中防突作用的可行性研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(6): 937 - 941.(FENG Tao, XIE Xiongqiang, LIU Hui, et al. Research on feasibility in preventing the coal and gas outburst by infecting liquid and freezing in uncovering coal seam in cross-cut[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(6): 937 - 941.(in Chinese))
- [8] 邹俊鹏, 陈卫忠, 杨典森, 等. 基于 SEM 的珲春低阶煤微观结构特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(9): 1 805 - 1 814.(ZOU Junpeng, CHEN Weizhong, YANG Diansen, et al. Microstructural characteristics of low-rank coal from Hunchun based on SEM[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(9): 1 805 - 1 814.(in Chinese))

- [9] 孙光中, 荆永滨, 张瑞林, 等. 轴向应力循环加卸载作用下含瓦斯煤渗透性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(5): 928 - 938.(SUN Guangzhong, JING Yongbin, ZHANG Ruilin, et al. Permeability of coal samples containing methane under cyclic loading-unloading of axial stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(5): 928 - 938.(in Chinese))
- [10] 尹光志, 蒋长宝, 王维忠, 等. 不同卸围压速度对含瓦斯煤岩力学和瓦斯渗流特性影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 68 - 77.(YIN Guangzhi, JIANG Changbao, WANG Weizhong, et al. Experimental study of influence of confining pressure unloading speed on mechanical properties and gas permeability of containing-gas coal rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(1): 68 - 77.(in Chinese))
- [11] 许江, 李波波, 周婷, 等. 循环荷载作用下煤变形及渗透特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(2): 225 - 234.(XU Jiang, LI Bobo, ZHOU Ting, et al. Experimental study of deformation and seepage characteristics of coal under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(2): 225 - 234.(in Chinese))
- [12] 王向宇, 周宏伟, 钟江城, 等. 三轴循环加卸载下深部煤体损伤的能量演化和渗透特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(12): 2676 - 2684.(WANG Xiangyu, ZHOU Hongwei, ZHONG Jiangcheng, et al. Study on energy evolution and permeability characteristics of deep coal damage under triaxial cyclic loading and unloading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(12): 2676 - 2684.(in Chinese))
- [13] 周宏伟, 荣腾龙, 牟瑞勇, 等. 采动应力下煤体渗透率模型构建及研究进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 221 - 235.(ZHOU Hongwei, RONG Tenglong, MOU Ruiyong, et al. Development in modeling approaches to mining-induced permeability of coals[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 221 - 235.(in Chinese))
- [14] 梁冰, 石占山, 孙维吉, 等. 采动过程中下被保护层煤体变形渗流规律研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(5): 842 - 847.(LIANG Bin, SHI Zhansha, SUN Weiji, et al. Protected coal seam deformation and seepage law research in the process of mining[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(5): 842 - 847.(in Chinese))
- [15] 贾恒义, 王凯, 王益博, 等. 围压循环加卸载作用下含瓦斯煤体渗透特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1710 - 1718.(JIA Hengyi, WANG Kai, WANG Yibo, et al. Permeability characteristics of gas-bearing coal specimens under cyclic loading-unloading of confining pressure[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1710 - 1718.(in Chinese))
- [16] 王凯, 王亮, 杜锋, 等. 煤粉粒径对突出瓦斯-煤粉动力特征的影响[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1369 - 1377.(WANG Kai, WANG Liang, DU Feng, et al. Influence of coal powder particle sizes on dynamic characteristics of coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1369 - 1377.(in Chinese))
- [17] 程远平, 刘洪永, 郭品坤, 等. 深部含瓦斯煤体渗透率演化及卸荷增透理论模型[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1650 - 1658.(CHENG Yuanping, LIU Hongyong, GUO Pinkun, et al. A theoretical model and evolution characteristic of mining-enhanced permeability in deeper gassy coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1650 - 1658.(in Chinese))
- [18] 祝捷, 王学, 于鹏程, 等. 有效应力对煤体变形和渗透性的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(9): 2213 - 2219.(ZHU Jie, WANG Xue, YU Pengcheng, et al. Effects of the effective stress on deformation and permeability of coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(9): 2213 - 2219.(in Chinese))
- [19] 王辰霖, 张小东, 李贵中, 等. 循环加卸载作用下不同高度煤样渗透性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(10): 2299 - 2308.(WANG Chenlin, ZHANG Xiaodong, LI Guizhong, et al. Experimental study on the permeability of coal samples with different heights under cyclic loading and unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(10): 2299 - 2308.(in Chinese))
- [20] 张小东, 刘炎昊, 桑树勋, 等. 高煤级煤储层条件下的气体扩散机制[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(1): 43 - 48.(ZHANG Xiaodong, LIU Yanhao, SANG Shuxun, et al. Study of the gas diffusion mechanism in high-rank coal reservoirs[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2011, 40(1): 43 - 48.(in Chinese))
- [21] 刘永茜. 循环荷载作用下煤体渗透率演化的实验分析[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2579 - 2588.(LIU Yongqian. Experimental analysis of coal permeability evolution under cyclic loading[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2579 - 2588.(in Chinese))
- [22] 李清森, 梁运培, 邹全乐. 循环加卸载路径下不同含瓦斯煤渗流及损伤演化特征[J]. 煤炭学报, 2019, 44(9): 2803 - 2815.(LI Qingmiao, LIANG Yunpei, ZOU Quanle. Seepage and damage evolution characteristics of different gas-bearing coal under cyclic loading-unloading conditions[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(9): 2803 - 2815.(in Chinese))
- [23] LIANG Y, LI Q, GU Y, et al. Mechanical and acoustic emission characteristics of rock: Effect of loading and unloading confining pressure at the postpeak stage[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2017, 44: 54 - 64.
- [24] 王登科, 魏建平, 尹光志. 复杂应力路径下含瓦斯煤渗透率变化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 303 - 310.(WANG Dengke, WEI Jianping, YIN Guangzhi. Investigation on change rule of permeability of coal containing gas under complex stress paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(2): 303 - 310.(in Chinese))
- [25] 张东明, 齐消寒, 宋润权, 等. 采动裂隙煤岩体应力与瓦斯流动的耦合机制[J]. 煤炭学报, 2015, 40(4): 774 - 780.(ZHANG Dongming, QI Xiaohan, SONG Runquan, et al. Coupling mechanism of rock mass stress and gas flow in coal mining fissures [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(4): 774 - 780.(in Chinese))
- [26] YANG S, YIN P, XU S. Permeability evolution characteristics of intact and fractured shale specimens[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(12): 6057 - 6076.
- [27] ZHANG Z, ZHANG R, XIE H, et al. Mining-induced coal permeability change under different mining layouts[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(9): 3753 - 3768.
- [28] 宋永臣, 黄兴, 刘瑜, 等. 含甲烷水合物多孔介质渗透性的实

- 验研究[J]. 热科学与技术, 2010, 9(1): 51 - 57.(SONG Yongchen, HUANG Xing, LIU Yu, et al. Experimental study of permeability of porous medium containing methane hydrate[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2010, 9(1): 51 - 57.(in Chinese))
- [29] 马慧龙, 阴良魁, 汪华军, 等. 含水合物细粒土的渗透特性[J]. 土工基础, 2020, 34(4): 563 - 566.(MA Huilong, YIN Liangku, WANG Huajun, et al. Permeability fine-grained soils with natural gas hydrate[J]. Soil Engineering and Foundation, 2020, 34(4): 563 - 566.(in Chinese))
- [30] 孙可明, 翟 诚, 辛利伟, 等. 不同饱和度水合物沉积物的三轴加载渗透率试验[J]. 天然气工业, 2017, 37(12): 61 - 67.(SUN Keming, ZHAI Cheng, XIN Liwei, et al. Triaxial loading permeability experiments on hydrate bearing sediments with different saturations[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(12): 61 - 67.(in Chinese))
- [31] 吴丹梅, 李 刚, 李小森, 等. 不同水合物饱和度下渗透率变化特性的实验研究[J]. 化工进展, 2017, 36(8): 2 916 - 2 923.(WU Danmei, LI Gang, LI Xiaosen, et al. Experimental investigation of permeability characteristics under different hydrate saturation[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(8): 2 916 - 2 923.(in Chinese))
- [32] LIU W G, WU Z R, LI J J, et al. The seepage characteristics of methane hydrate-bearing clayey sediments under various pressure gradients[J]. Energy, 2019, 191: 116507.
- [33] LI C H, ZHAO Q, XU H J, et al. Relation between relative permeability and hydrate saturation in Shenhu area, South China Sea[J]. Applied Geophysics, 2014, 11(2): 207 - 214.
- [34] PRIEST J A, DRUCE M, ROBERTS J, et al. PCATS Triaxial: A new geotechnical apparatus for characterizing pressure cores from the Nankai Trough, Japan[J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 66: 460 - 470.
- [35] ZHANG Q, ZHENG J J, ZHANG B Y, et al. Coal mine gas separation of methane via clathrate hydrate process aided by tetrahydrofuran and amino acids[J]. Applied Energy, 2021, 287: 116576.
- [36] SLOAN E D. Fundamental principles and applications of natural gas hydrates[J]. Nature, 2003, 426: 353 - 359.
- [37] 胡高伟, 李承峰, 业渝光, 等. 沉积物孔隙空间天然气水合物微观分布观测[J]. 地球物理学报, 2014, 57(5): 1 675 - 1 682.(HU Gaowei, LI Chengfeng, YE Yuguang, et al. Observation of gas hydrate distribution in sediment pore space[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(5): 1 675 - 1 682.(in Chinese))
- [38] 高 霞, 刘文新, 高 橙, 等. 含瓦斯水合物煤体强度特性三轴试验研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(12): 2 829 - 2 835.(GAO Xia, LIU Wenxin, GAO Cheng, et al. Triaxial shear strength of methane hydrate-bearing coal[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(12): 2 829 - 2 835.(in Chinese))
- [39] 王代刚, 魏 伟, 孙静静, 等. 水合物降压分解过程中沉积物孔隙结构动态演化规律[J]. 科学通报, 2020, 65(21): 2 292 - 2 302.(WANG Daigang, WEI Wei, SUN Jingjing, et al. Dynamic evolution of pore structures of hydrate-bearing sediments induced by step-wise depressurization [J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(21): 2 292 - 2 302.(in Chinese))
- [40] 张保勇, 于 洋, 高 霞, 等. 卸围压条件下含瓦斯水合物煤体应力 - 应变特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(增 1): 281 - 290.(ZHANG Baoyong, YU Yang, GAO Xia, et al. Stress-strain characteristics of coal mine gas hydrate-coal mixture under confining pressure unloading[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(Supp.1): 281 - 290.(in Chinese))
- [41] 颜荣涛, 韦昌富, 傅鑫晖, 等. 水合物赋存模式对含水合物土力学特性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增 2): 4 115 - 4 122.(YAN Rongtao, WEI Changfu, FU Xinhui, et al. Influence of occurrence mode of hydrate on mechanical behaviour of hydrate-bearing soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Supp.2): 4 115 - 4 122.(in Chinese))
- [42] 吴 杨, 崔 杰, 廖静容, 等. 不同细颗粒含量甲烷水合物沉积物三轴剪切试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(1): 156 - 164.(WU Yang, CUI Jie, LIAO Jingrong, et al. Experimental study on mechanical characteristics of gas hydrate-bearing sands containing different fines[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(1): 156 - 164.(in Chinese))
- [43] 刘 杰, 张永利, 崔余岩. 热力耦合作用下含瓦斯煤层渗透特性试验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2017, 36(12): 1 270 - 1 274.(LIU Jie, ZHANG Yongli, CUI Yuyan. Experimental study on permeability properties of coal containing gas with thermo-mechanical coupling[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2017, 36(12): 1 270 - 1 274.(in Chinese))
- [44] 谢建林, 赵阳升. 随温度升高煤岩体渗透率减小或波动变化的细观机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(3): 543 - 551.(XIE Jianlin, ZHAO Yangsheng. Meso-mechanism of permeability decrease or fluctuation of coal and rock with the temperature increase[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(3): 543 - 551.(in Chinese))
- [45] 程远平, 刘清泉, 任廷祥. 煤力学[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 62 - 63.(CHENG Yuanping, LIU Qingquan, REN Tingxiang. Coal mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2017: 62 - 63.(in Chinese))
- [46] 张 磊, 阚梓豪, 薛俊华, 等. 循环加卸载作用下完整和裂隙煤体渗透性演变规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(12): 2 487 - 2 499.(ZHANG Lei, KAN Zihao, XUE Junhua, et al. Study on permeability law of intact and fractured coal under cyclic loading and unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(12): 2 487 - 2 499.(in Chinese))
- [47] KLEINBERG R L, FLAUM C, GRIFFIN D D. Deep sea NMR: Methane hydrate growth habit in porous media and its relationship to hydraulic permeability, deposit accumulation, and submarine slope stability[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2003, 108(B10): 1 - 12.