

煤体中瓦斯水合固化的力学作用研究进展

吴 强, 张保勇

(黑龙江科技大学 安全工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150022)

摘 要:为更好地完善我国煤与瓦斯突出预测与防治方法, 基于煤与瓦斯突出综合作用假说, 提出了瓦斯水合固化防治煤与瓦斯突出的方法。该方法核心是将煤层中瓦斯固化生成瓦斯水合物, 不仅能降低瓦斯压力, 而且能够提高煤体强度, 以达到减弱或消除煤与瓦斯突出危险性的目的。实现了煤体中瓦斯水合物的生成以及含瓦斯水合物煤体力学性质-渗透率原位测试, 提出了煤体中瓦斯水合物生成及力学性质-渗透率测试技术及含瓦斯水合物煤体三轴压缩数值建模技术。瓦斯水合固化热力学和动力学条件是防突的理论基础, 煤层瓦斯水合物稳定储存是技术前提, 瓦斯压力降低及煤体力学性质改善是防突关键, 重点围绕水合固化煤体交叉力学问题进行总结。分析认为: ① 瓦斯水合固化防突技术理论框架已经初步形成, 并利用数值模拟手段初步探究了瓦斯水合固化对煤体力学特征改善的微观机理; ② 现阶段已证实煤体中水合物生成不仅能降低瓦斯压力, 而且能改善其力学性质, 高饱和度对提高煤体峰值强度明显; ③ 瓦斯水合物生成经历快速、缓慢和稳定3个阶段, 且水合物的生成会造成煤体中瓦斯渗流通道阻塞, 导致其渗透率降低; ④ 高瓦斯压力、高 CH_4 体积分数不仅有助于提高水合物饱和度而且会延缓水合物分解, 有助于水合物的稳定存在。需要注意的是, 瓦斯水合固化技术防突的可靠度仍需大量重复试验验证, 以建立普适化的数据库。综合现有研究结果, 对水合固化防突研究目前仍存在的局限性与挑战进行了讨论, 并且给出了进一步的研究方向。

关键词:煤与瓦斯突出; 瓦斯水合固化; 含瓦斯水合物煤体; 力学性质; 离散元

中图分类号: TD753 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)02-0720-19

Progress in the mechanical effects of gas solidification by hydrate in coal

WU Qiang, ZHANG Baoyong

(School of Safety Engineering, Heilongjiang University of Science & Technology, Harbin 150022, China)

Abstract: Aiming at the real problems such as the occurrence of coal and gas outburst and based on the hypothesis of comprehensive action of coal and gas outburst, a method of gas hydration and solidification to prevent coal and gas outburst is proposed. The core of this method is to solidify the gas in coal seam to form gas hydrate, which can not only reduce the gas pressure, but also improve the coal strength, so as to reduce or eliminate the risk of coal and gas outburst. Based on the idea of "coal and gas outburst prevention using hydrate", the test of gas hydrate formation in coal and the in-situ test of the mechanical property-permeability of gas hydrate bearing coal have been performed, with the numerical modeling technique of the triaxial compression of the gas hydrate bearing coal proposed. The techniques are implemented by comprehensively applying the methods of theoretical analysis, development of testing equipment, indoor test and nu-

收稿日期: 2023-11-11 修回日期: 2024-01-15 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.ST23.1482

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U21A20111, 51974112, 51674108)

作者简介: 吴 强 (1959—), 男, 山东临朐人, 教授, 博士。E-mail: wq0160@sina.com

通讯作者: 张保勇 (1982—), 男, 安徽霍邱人, 教授, 博士。E-mail: zhangbaoyong2002@163.com

引用格式: 吴强, 张保勇. 煤体中瓦斯水合固化的力学作用研究进展[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 720-738.

WU Qiang, ZHANG Baoyong. Progress in the mechanical effects of gas solidification by hydrate in coal[J].

Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 720-738.



移动阅读

merical analysis. In terms of coal and gas outburst prevention, the thermodynamic and kinetic conditions of gas hydrate formation are its theoretical basis, the stable storage of gas hydrate is its technical precondition, and the reduction of gas pressure and the improvement of mechanical properties are its key measures. This paper focuses on the cross mechanics related to the gas hydrate bearing coal. The results show that: ① the theoretical framework of gas solidification technology by the hydrate method for outburst prevention has been initially formed, and the meso-mechanism of improving the mechanical characteristics of coal before and after gas hydration has been preliminarily explored by means of the numerical simulation. ② At present, it has been confirmed that the hydrate formation in coal can not only reduce the gas pressure, but also improve its mechanical properties. High saturation can obviously improve the peak strength of coal. ③ Gas hydrate formation experiences three stages: rapid, slow and stable stage. Additionally, the formation of hydrate will cause the gas seepage channel in the coal to be blocked, resulting in a decrease in its permeability. ④ High gas pressure and high CH₄ concentration not only help to increase the saturation but also delay hydrate decomposition, which is conducive to the stable existence of the hydrate. However, a large number of repetitive experiments are still needed to verify the reliability of the method to build up a generalized database. By analyzing current research findings, the limitations and challenges that still exist are discussed, with further research interests pointed out.

Key words: coal and gas outburst; gas solidification by the hydrate method; gas hydrate bearing coal; mechanical behavior; discrete element method

当前,煤炭在我国能源结构中占主导地位,而且在相当长的一段时期内,煤炭仍将是我国能源安全的稳定器和压舱石。随着煤矿开采向深部延伸,地温上升、瓦斯压力增大、地应力升高等深部煤层开采环境愈加复杂,煤与瓦斯突出等动力灾害将日益严峻^[1-2],严重制约煤矿生产能力的释放。因此,研究煤与瓦斯突出防治技术是提高我国煤矿安全生产水平的重要保障。

目前,预防煤与瓦斯突出方法主要有穿层预抽钻孔、松动爆破、水力冲孔等。预抽煤层瓦斯是目前消除揭煤期间突出危险性的有效措施,但存在抽采时间长、抽采效率低等问题,常需实施水力割缝等增透措施^[3]。松动爆破技术是提高瓦斯抽采率、降低煤层瓦斯突出危险性的重要手段之一,但爆破有效半径快速测定技术有待探究^[4]。水力冲孔作为煤层卸压增透的强化措施能够增强煤层透气性,提高瓦斯预抽效率,但会使冲孔中心周围应力集中区的渗透率和钻孔瓦斯流量降低^[5]。基于改善煤体的力学强度的动机,学者们普遍利用低温冻结方法提高煤体强度^[6-7]。

笔者团队^[8]提出的瓦斯水合固化防突技术主要核心是降低气压以及提高煤体强度。首先通过向煤层注水或注入促进剂溶液,在低温高压条件下将瓦斯固化为水合物。1 体积水合物可以固化约 164 体积的瓦斯,水合固化后瓦斯压力降低,加之水合物的生成填充煤体孔隙或胶结于煤体,使煤体强度增大,改善煤体力学性质,以期达到减弱或预防煤与瓦斯突出目的。

笔者聚焦水合物生成前后煤体力学性质原位测

试以及水合固化后煤体力学性质的数值模型技术,从理论、试验、数值模拟 3 方面概述瓦斯水合固化防突技术可能性、含瓦斯水合物煤体渗流及力学特性的相关研究现状及发展趋势。理论研究包括瓦斯水合物生成后揭煤瞬间瓦斯压力和瓦斯涌出量的计算。试验涉及应力-渗流-化学耦合作用下含瓦斯水合物煤体三轴试验系统及测试技术及其力学参数和渗透率测试。模拟方面主要阐述三轴试验离散元模型的建立、细观参数对宏观力学特性的影响。此外,讨论瓦斯固化预防煤与瓦斯突出方法中的关键问题,并对其发展趋势进行讨论和展望。

1 瓦斯水合固化防突理论基础及关键技术

近 20 a 来,课题组在笔者提出的“瓦斯水合固化防治突出”技术思路(图 1)^[9]下,采用室内试验与数值模拟相结合的方式不断进行利用水合物固化技术预防煤与瓦斯突出的探索^[10]。经过这一阶段研究,课题组在试验设备(尺度、维度、功能)、数值模拟技术手段等方面都取得一定的进展。

1.1 气体水合物

气体水合物是由水与甲烷、乙烷、氢气、二氧化碳等小分子气体在一定温度、压力(一般是高压低温)环境下生成的非化学计量性笼状呈固态的晶体物质,又称作笼形水合物,其中气体分子(客体)被束缚在由水分子通过氢键连接而构成的多面体笼子(主体)里,主客之间通过范德华力联系在一起^[11],如图 2 所示。气体水合物具有很强的储气能力,每立方米可储存 160 ~ 180 m³ 气体。例如,1 m³ 的饱和甲烷水合物在

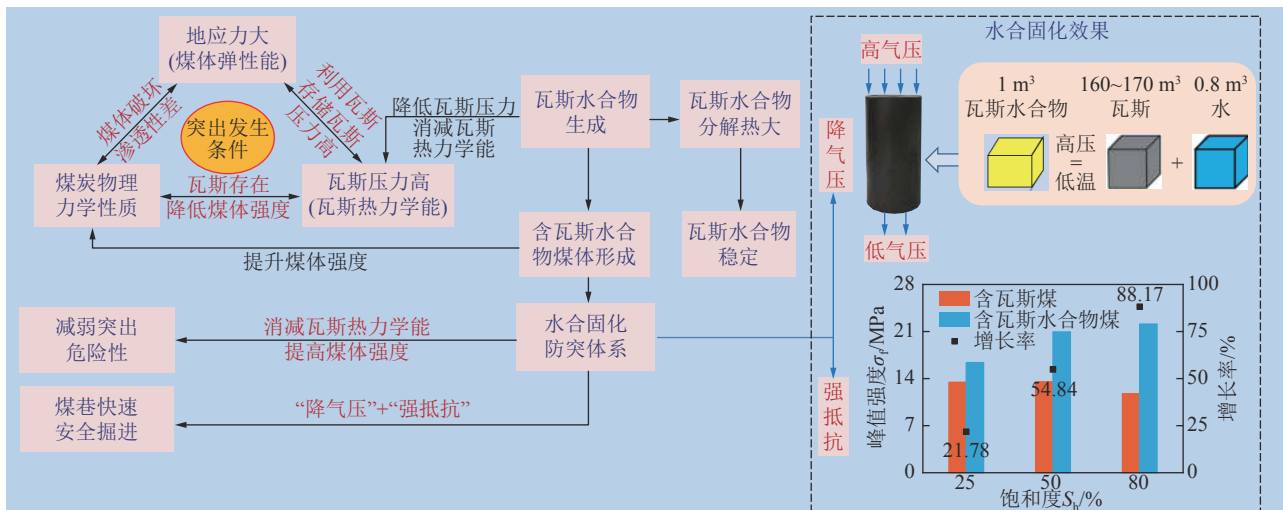


图1 瓦斯水合固化防突技术思路示意(修改自文献[9])

Fig.1 Schematic diagram of coal and gas outburst prevention based on the hydrate method (Modified from Reference[9])

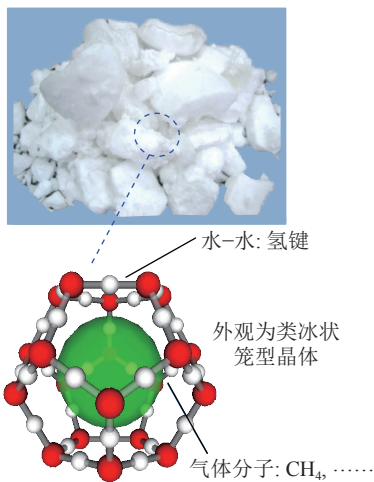


图2 瓦斯水合物实物及空间结构示意图

Fig.2 Gas hydrate and its spatial structure diagram

常温常压下分解后可释放出约 0.8 m^3 的水和 164 m^3 的甲烷。

天然气水合物^[12](Natural Gas Hydrate)是指由主体分子(水)和客体分子(天然气组分的烃类甲烷、乙烷、丙烷、异丁烷等气体分子),另外,天然气含有重烃而很少含 CO_2 和 N_2) 在低温 ($-10 \sim 28 \text{ }^\circ\text{C}$) 和高压 ($1 \sim 9.0 \text{ MPa}$) 条件下,通过范德华力相互作用,形成结晶状(类冰)、非化学计量的笼形固体络合物,笼形固体络合物中的孔穴内充满轻烃、重烃 ($\text{C}_5 \sim \text{C}_9$) 或非烃分子。通常对甲烷分子含量超过 99% 的水合物称为甲烷水合物,其遇火即可燃烧。一旦温度升高或压力降低,甲烷水合物将会发生融化。

煤矿瓦斯中主要成分为甲烷,并含有少量的乙烷、丙烷和丁烷,一般不含戊烷以上大分子重烃,此外,有的矿区瓦斯还可能含有一定量的硫化氢、二氧化碳和氨气。为区别于天然气水合物(甲烷水合物),以煤矿

瓦斯的主要成分甲烷作为客体分子、加上少量轻烃等形成的水合物,称之为瓦斯水合物。一般认为气体水合物的形成须具备如下基本条件:充足的气源和水的供应(以形成空穴结构)、特定的温度和压力条件、足够的生长和储存空间。

气体水合物生成过程分为溶解、诱导与成长 3 个阶段。然而气体水合物的动力学微观机制尚不清晰,揭示气体水合物动力学过程后,在一定程度上可以控制水合物生成及分解过程,这对气体水合原理的工程应用具有重要科学意义,诸如天然气水合物开采及运输、瓦斯水合提纯及储运、瓦斯水合固化防突、氢气分离、二氧化碳的捕集与封存等。

1.2 瓦斯水合物的特点

瓦斯中甲烷在纯水中可形成甲烷水合物,温度和压力条件见表 1^[10]。瓦斯中含有乙烷、丙烷等低碳烃类气体和二氧化碳时有利于水合物的形成。压力越高、温度越低,重烃或二氧化碳含量越高,越有利于水合物的形成和稳定。

表 1 甲烷水合物在纯水中形成的温压条件^[10]

Table 1 Temperature and pressure conditions for methane hydrate formation in pure water^[10]

温度/ $^\circ\text{C}$	0	5.0	10.0	20.0
压力/MPa	2.55	4.24	6.95	21.28

只有淡水才能转化为水合物,水中形成水合物时,水体积增大 $26\% \sim 32\%$ 。瓦斯水合物的摩尔质量为 16 g/mol ,具有多孔性,密度与冰大致相等(约为 0.9 g/cm^3),热传导率和电阻率远小于冰,坚固性、剪切系数和电介常数均低于冰。瓦斯水合物分解需要吸

热, 常温常压环境下分解缓慢, 在 $0 \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$ 分解时, 每克水需要 $0.5 \sim 0.6 \text{ kJ}$ 热量。

2 瓦斯水合固化关键技术及可行性

2.1 瓦斯水合防突技术关键点

煤体中瓦斯的存 在会降低煤的有效应力, 进而降低煤的强度^[13]。煤层瓦斯含量高既是发生突出的基础, 也是促使和维持突出的必要条件。而通过瓦斯水合固化防突技术, 可使煤体中大部分瓦斯生成水合物, 不仅可以降低瓦斯压力, 而且可提高煤体强度。

结合综合作用假说, 瓦斯水合固化防突技术应用有以下 4 个关键点: ① 煤体中瓦斯是否能生成瓦斯水

合物; ② 瓦斯水合物生成后是否能显著降低煤层瓦斯压力和揭煤瞬间瓦斯涌出量; ③ 揭煤或割煤过程中瓦斯水合物是否能稳定存在, 且落煤中瓦斯水合物不会快速分解; ④ 煤体中瓦斯水合物生成后是否能有效提高煤体力学特性。以上 4 点是消除突出危险性的核心。

2.2 可行性分析

2.2.1 煤的孔隙特征及煤体中瓦斯水合物生成

瓦斯水合物能否在煤层中生成是瓦斯水合固化防突技术的基础。一些学者探讨煤层中存在天然瓦斯水合物的可能性, 提出天然瓦斯水合物可能存在的煤层区域, 见表 2。

表 2 煤层中水合物存在可能性研究相关文献

Table 2 Relevant literatures on the possibility of hydrate existence in coal seams

年份	作者	部分结论
1981	MAKOGON YF ^[14]	国内外最早提出煤层中可能存在水合物
2021	VIKTOR V. Nikitin等 ^[15]	由于适合的温压条件及水和甲烷的丰富性, 煤层中可能存在水合物
1992	俞启香 ^[16]	煤层瓦斯气体可能以瓦斯水合物晶体存在
2006	吴强等 ^[17]	在中高纬度矿区的煤层中有瓦斯水合物自然存在的可能
2006	于洪观等 ^[18]	煤层中存在着甲烷水合物形成的物质、储存和温压条件, 可能存在水合物
2008	李祥春等 ^[19]	吨煤瓦斯突出量高出吨煤瓦斯含量很多, 为煤层中甲烷水合物的存在提供佐证

团队利用多孔介质中水合物形成与原位 X-CT 测试装置, 在温度 $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 、压力 6 MPa 条件下, 进行 $40 \sim 60$ 目 ($0.425 \sim 0.250 \text{ mm}$) 体系下煤体中瓦斯水合物生成试验 (图 3), 获取了煤体中瓦斯水合物的 CT 图像, 如图 4 所示 (S_h 为水合物饱和度)。从图 4 可以发现含瓦斯水合物煤体是多元多相的复杂介质, 水合物在煤体中具有不同的饱和度。

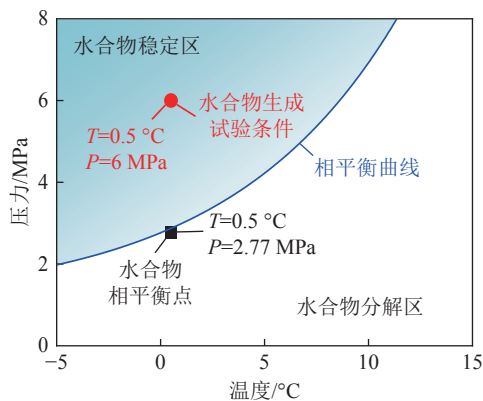


图 3 瓦斯水合物相平衡曲线^[20]

Fig.3 Phase equilibrium curve of hydrate formation^[20]

煤基质孔隙是瓦斯 (煤层气) 呈吸附状态赋存的主要空间, 天然裂隙系统则是瓦斯 (煤层气) 渗流运移的主要通道。因此, 孔隙性和渗透性不仅影响煤层的

储气性能, 而且对瓦斯水合物是否能在煤层中生成起着决定性的作用。煤的孔隙特征及其对水合物生成的影响规律, 分析如下:

(1) 煤的孔隙-裂隙特征。煤体中复杂的孔隙和裂隙^[21]既是游离瓦斯储存空间, 也是瓦斯水合物生成和赋存场所, 如图 5 所示。由图 5 可知, 结合 CT 试验结果, 煤体中水合物的分布模式主要包括胶结模式和填充模式。

(2) 煤的孔隙分类。选取龙煤集团新安煤矿 8 号上煤层煤样, 采用压汞法测试煤体孔径分布^[22], 发现煤基质孔隙尺寸主要在 $0 \sim 1000 \text{ nm}$, 其中包括小孔隙 $0 \sim 10 \text{ nm}$ (吸附容积)、中孔隙 $10 \sim 100 \text{ nm}$ (扩散容积)、大孔隙 $100 \sim 1000 \text{ nm}$ (渗透容积)^[23]都在有限的区域内发育, 如图 6 所示。其中, X 为型煤, Y 为原煤, A 为粒径 $0.850 \sim 0.425 \text{ mm}$ ($20 \sim 40$ 目), B 为粒径 $0.250 \sim 0.180 \text{ mm}$ ($60 \sim 80$ 目), C 为粒径 0.180 mm 以下 (80 目以下)。

(3) 瓦斯水合物生成。煤的孔隙比表积极大, 具有很强吸附容纳瓦斯能力。甲烷分子直径和水分子大小分别为 0.414 、 0.4 nm 。由水合物氢键连接构成的多面体晶笼可形成 $0.48 \sim 0.90 \text{ nm}$ 的气体分子赋存空间, 能够使直径为 0.414 nm 甲烷分子进入笼中, 瓦

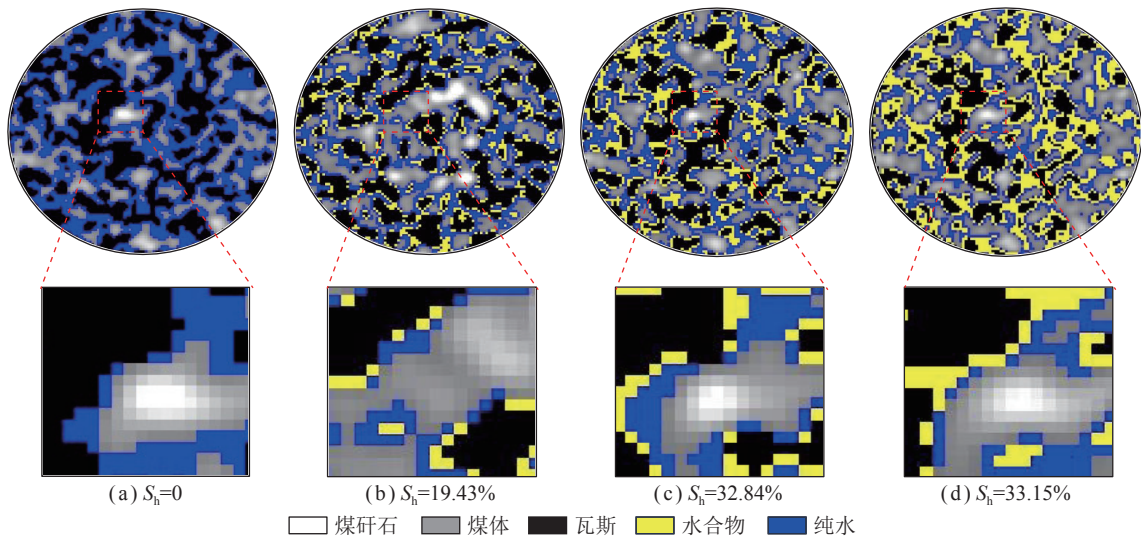


图 4 不同饱和度下煤体中瓦斯水合物分布模式

Fig.4 Distribution pattern of gas hydrate in coal under different saturations

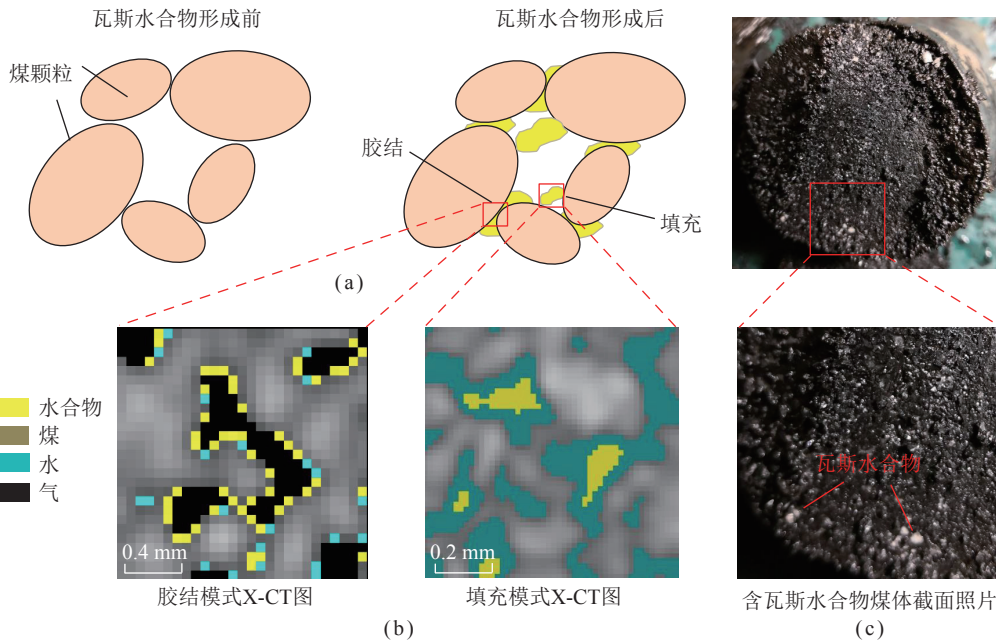


图 5 水合物在煤孔裂隙中的微观分布模式^[20]

Fig.5 Microscopic distribution pattern of hydrate in coal^[20]

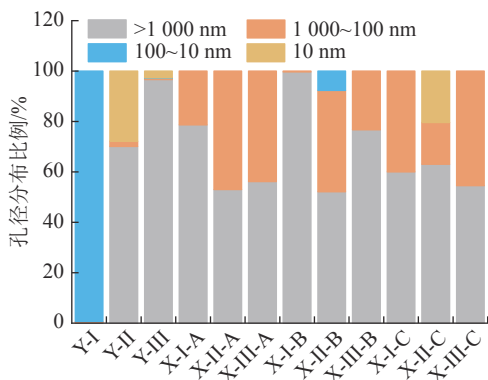


图 6 试样的孔径分布^[24]

Fig.6 Pore size distribution ratio of samples^[24]

斯水合物以固体形式填充在煤基质的孔隙和煤体裂隙中。煤基质孔隙在 0~1 000 nm,由此可见,形成瓦斯水合物的主体分子(水)和客体分子(甲烷)均可进入煤基质孔隙和裂隙中,在流体压力差驱动下瓦斯和水可在煤层内部运动,各类孔隙均可成为储存空间,具备生成瓦斯水合物物质条件(水、甲烷)。如果流体压力高于瓦斯水合物生成相平衡压力,就会在煤体孔隙和裂隙中生成瓦斯水合物。

例如,当煤层温度为 10、20 ℃,对应的相平衡压力分别为 6.95、21.28 MPa。采用增压泵向煤层注水,达到生成水合物所需的相平衡压力。若在水中添加促进水合物生成的热力学促进剂,可降低相同温度下

相平衡压力。

此外,含水合物沉积物岩心样品发现水合物在沉积物中以多种方式存在,主要包括球粒状或者为大块固态状^[25]。该结果为煤体中水合物的生成提供了一定借鉴。综上所述,瓦斯水合物可以在煤体中生成,并且具备存储空间。

2.2.2 煤体中瓦斯水合物稳定存在

在一定温压条件下,即在水合物稳定区域内(环境压力高于环境温度下的水合物生成压力),瓦斯水合物可以稳定存在,当环境温度升高或压力降低时才会分解水合物释放甲烷。在0~20℃条件下分解瓦斯水合物时,每克水需要0.5~0.6 kJ的热量,煤体和水合物的导热性较差,难以在短时间内获得水合物分解所需的大量热量。前苏联学者ERSHOV、YAKUSHEV等^[26]发现气体水合物的自保性。同时经证实,自然界中甲烷水合物也同样具有自保性^[27],证明了水合物不会快速分解。

课题组考察煤体中瓦斯水合物生成、分解融化全过程,从瓦斯水合物表面出现气泡到完全分解,时长约为1.5 h(图7),证实瓦斯水合物不会快速分解,表明含有瓦斯水合物的煤体在揭煤或落煤时,分解出来的瓦斯难以形成高压瓦斯流。

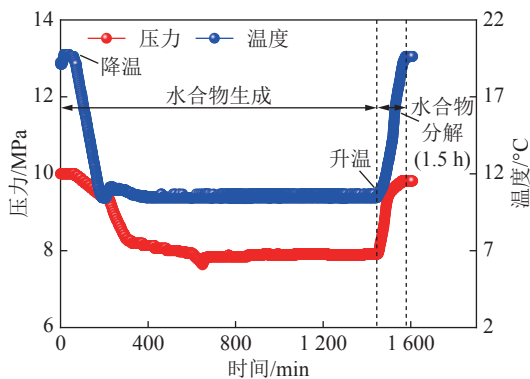


图7 煤体中水合物生成、分解过程压力-温度-时间曲线

Fig.7 Pressure-temperature-time curves of hydrate formation and dissociation processes in coal

2.2.3 瓦斯水合物对揭煤瞬间瓦斯压力和瓦斯涌出量的影响

煤与瓦斯突出过程中,地压破碎煤体是导致突出的首要原因,而瓦斯则起到抛出煤体和搬运煤体的作用,从突出的总能量来说,瓦斯是完成突出的主要能源。煤层中的瓦斯以吸附和游离状态存在,游离态瓦斯是指自由充填存在于煤体孔隙或裂隙中的瓦斯,一般占比为10%~20%。在吸附瓦斯中,通常又将进入煤体内部晶格中的瓦斯称为吸收瓦斯,吸收瓦斯被认为在常温常压下是不可解吸的,一般占总瓦斯含量的

10%(称为残存瓦斯含量)。把附着在煤体表面的瓦斯称为吸着瓦斯,以单分子薄膜形式凝聚在煤的微孔和超微孔的表面上,煤的微孔和超微孔的内部面积可达200 m²/g,吸附容积相当大,所以绝大部分瓦斯以吸附态存在。吸收瓦斯和吸着瓦斯统称为吸附瓦斯。

设定瓦斯近似为准标准气体,煤体孔隙率 ϕ 为10%~40%^[28],每立方米煤体中瓦斯体积为8~50 m³,游离态瓦斯体积占比15%。假定每立方米煤体孔隙率 ϕ 分别为10%、20%,则煤体孔隙体积分别为0.1、0.2 m³。

选取8组每立方米煤体中瓦斯含量,在石门揭煤或采煤过程中,若煤体破碎后可以解吸的瓦斯全部解吸,根据以下计算公式计算得出水合固化前破碎煤体脱落瞬间形成的瓦斯压力:

$$P_i = n_i RT / V \quad (1)$$

$$n_i = \frac{\rho v_i}{\mu} \quad (2)$$

式中, P_i 为破碎煤体脱落瞬间形成的瓦斯压力, $i=1$ 代表瓦斯固化前, $i=2$ 代表瓦斯固化后,MPa; μ 为甲烷的摩尔质量,为16 g/mol; ρ 为常温常压下甲烷密度,为0.717 4 kg/m³; v_i 为甲烷体积,m³; n_i 为气体物质的量,mol; R 为普适气体常数,为8.31 J/(mol·K); T 为环境温度,为293 K; V 为每立方米煤体中孔隙体积,m³。

向煤体中高压注入含促进剂的水溶液后,在每立方米煤体0.1 m³或0.2 m³孔裂隙空间内,瓦斯与含促进剂的水溶液生成瓦斯水合物饱和度 S_h 分别为20%、40%、60%、80%(如果水合物晶笼中全部充填了甲烷分子,即饱和度100%,每立方米水合物可固化瓦斯164 m³),减去10%不可解吸瓦斯含量,可得到水合固化后煤体破碎后剩余解吸瓦斯量,若剩余解吸瓦斯在煤体破碎后可瞬间全部解吸,根据式(1)、(2)得到水合固化后破碎煤体脱落瞬间形成的瓦斯压力 P_2 。

表3给出了煤体中水合物固化前后瓦斯压力理论值,由表3可知,采取瓦斯水合固化技术措施后,煤体破碎后形成的瓦斯压力明显降低,降低率32.35%~97.28%。根据《煤矿安全规程》中规定瓦斯压力达到或超过0.74 MPa,煤层具有突出危险性。因此,瓦斯水合固化防突技术应用后可减弱煤与瓦斯突出危险性。

为深入研究瓦斯水合物在煤体生成过程中压力变化规律,进行煤体中水合物生成试验。结合煤体中压力、温度随时间变化关系可将试验过程分为3个阶段:瓦斯吸附阶段、水合物生成阶段和水合物生成平衡阶段,如图8所示。

表 3 煤体中水合物固化前后瓦斯压力理论值

Table 3 Theoretical gas pressures before and after gas hydrate formation

编号	煤体瓦斯 体积/m ³	孔隙率 ϕ / %	不可解吸量/ m ³	固化前破碎 后压力 P_1 /MPa	饱和度 S_h /%	固化瓦斯 体积/m ³	固化后破碎 后压力 P_2 /MPa	瓦斯压力降 低率/%
1	8	10	0.8	0.79	20	3.28	0.43	45.57
		20				6.56	0.07	91.14
2	10	10	1.0	0.98	20	3.28	0.62	36.73
		20				6.56	0.27	72.45
3	15	10	1.5	1.47	40	6.56	0.76	48.30
		20				13.12	0.04	97.28
4	20	10	2.0	1.97	40	6.56	0.76	61.42
		20				13.12	0.53	73.10
5	25	10	2.5	2.46	60	9.84	1.38	43.90
		20				19.68	0.31	87.40
6	30	10	3.0	2.95	60	9.84	1.87	36.61
		20				19.68	0.80	72.88
7	40	10	4.0	3.93	80	13.12	2.60	33.84
		20				26.24	1.07	72.77
8	45	10	4.5	4.42	80	13.12	2.99	32.35
		20				26.24	1.56	64.71

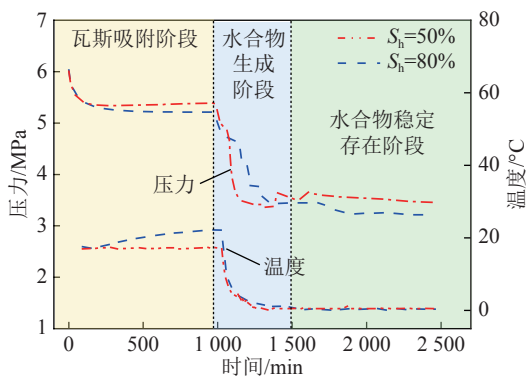


图 8 围压 12 MPa 下煤体中水合物生成过程压力-温度-时间曲线

Fig. 8 Pressure-temperature-time curves of hydrate formation in coal at 12 MPa

(1) 瓦斯吸附阶段: 不同饱和度下煤体中水合物生成过程中瓦斯压力随时间变化规律一致。吸附阶段初期瓦斯压力下降速率较快, 随着吸附时间推移, 瓦斯压力逐渐趋于平缓, 煤体吸附瓦斯趋于稳定。

(2) 水合物生成阶段: 降温开始, 反应釜中气体压力再次开始迅速下降, 随着温度的降低, 煤体中瓦斯水合物开始生成, 瓦斯压力逐渐降低直至趋于平衡, 煤体中水合物进入稳定存在阶段。

(3) 水合物稳定存在阶段: 饱和度越大, 瓦斯压力越小。例如, 饱和度为 50% 时, 瓦斯压力从 6.007 MPa 降低到 3.457 MPa, 降低了 42.45%。饱和度为 80% 时,

瓦斯压力从 6.030 MPa 降低到 3.216 MPa, 降低了 46.67%。说明煤体中瓦斯水合物生成的越多, 瓦斯压力下降幅度越大, 降压效果越好。

需要说明的是, 由于瓦斯水合物生成试验为不添加促进剂条件 (纯水环境), 瓦斯水合物生成压力较高 (4 MPa), 课题组正在进行环保型促进剂的筛选, 将在较低的瓦斯压力条件下进行煤体中水合物生成试验, 水合反应生成所需瓦斯压力有望进一步降低。

图 9 为围压为 20 MPa 下气体消耗量随时间的变化曲线。从图 9 可以看出, 瓦斯吸附阶段中瓦斯消耗量由快速增加逐渐趋近于稳定, 且较小含水量体系达到吸附平衡时间较短; 降温后开始进行水合物生成阶段, 水合物生成初始阶段气体消耗量增长较快, 随着水合物生成进程推移气体消耗量逐渐趋于稳定; 在水合物稳定区域气体消耗量基本上无变化。

2.2.4 含瓦斯水合物煤体抗压强度提高

煤体强度是影响煤与瓦斯突出的一个重要因素。当有效围压为 3 MPa 时, 随着饱和度增加, 峰值强度 σ_f 增大幅度从 44.16% 增加至 63.96%; 当围压为 12 MPa 时, 随着饱和度增加, 峰值强度增大幅度从 21.78% 增加至 88.17%, 如图 10 所示。

综合作用假说认为煤的力学性质是制约煤与瓦斯突出发生的重要因素, 瓦斯会降低煤的有效应力, 并造成基质膨胀变形, 吸附在微孔表面的瓦斯分子对

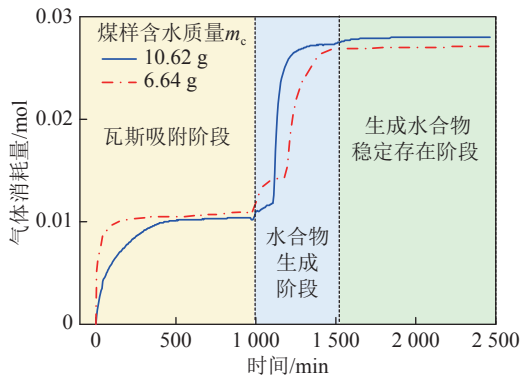


图 9 围压 20 MPa 下煤体中水合物生成过程气体消耗量-时间曲线^[29]

Fig.9 Gas consumption-time curves of hydrate formation in coal at 20 MPa^[29]

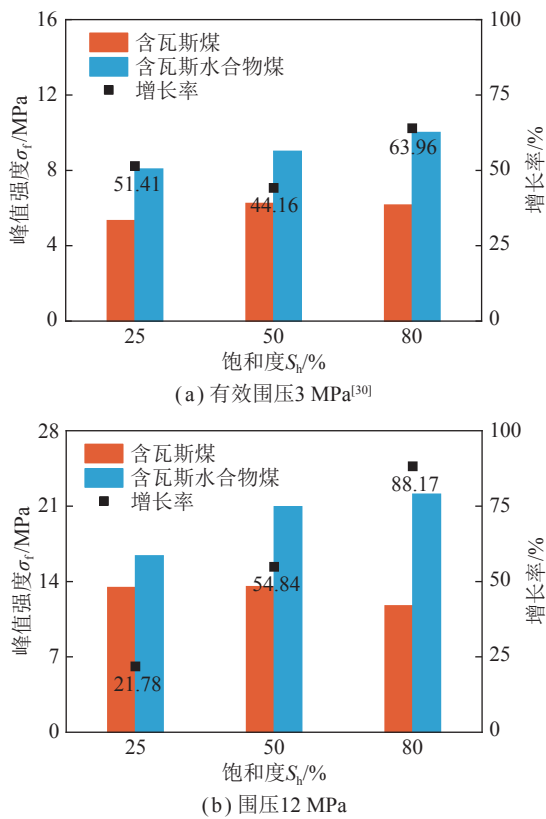


图 10 含瓦斯煤体/含瓦斯水合物煤体的峰值强度
Fig.10 Peak strength of gas bearing coal/gas hydrate bearing coal

微孔起楔子作用,降低煤体强度。而通过瓦斯水合固化技术,煤体中大部分瓦斯聚集到水合物中,可促使瓦斯对煤体力学性质的负面影响大幅度减弱。本文的研究结果与含水合物多孔介质三轴试验^[31-33]研究结果相似,均发现水合物对力学性质的强化作用。

3 力学作用研究进展

煤体中水合物能否形成、能否快速形成、能否消

除突出危险是瓦斯水合固化防突技术应用的关键问题。为此,课题组前期分析表面活性剂在煤层注水、水合物诱导、水合物生长 3 个阶段的作用机理^[34],探讨煤层环境温度条件下瓦斯水合固化相平衡热力学影响^[35],初步建立了瓦斯水合固化防突技术理论。

3.1 瓦斯压力对诱导时间、生成速率的影响

探究煤体中瓦斯水合固化动力学规律是瓦斯水合固化防突技术应用的关键。为此,课题组自主研发的瓦斯水合高压固化与阻抗监测于一体试验装置(试验温度为 $-20\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$,精度为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,最大承压为 18 MPa ,搭载 TD3691 恒定电位仪和 TD1250 频响分析仪),可实现煤体中瓦斯水合固化过程空间多层位监测并准确获取阻抗数据,如图 11 所示。针对不同瓦斯组分,开展不同初始压力(4、5、6、7 MPa)下煤体中瓦斯水合物动力学试验,瓦斯组分见表 4。

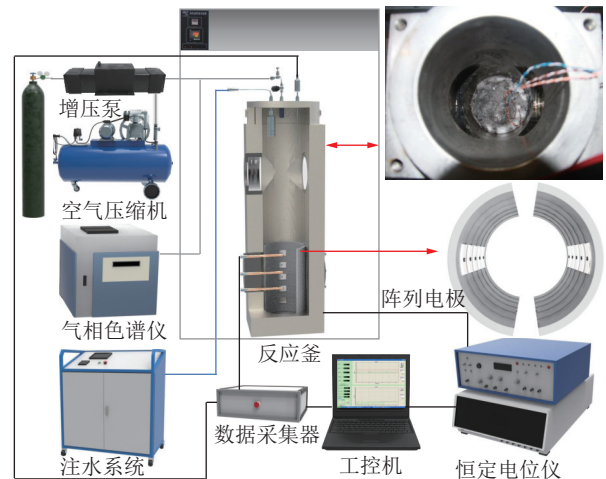


图 11 突出煤体中瓦斯水合固化阻抗特性监测实验装置^[36]

Fig.11 Mine gas hydration and impedance characteristic monitoring device for outburst coal^[36]

表 4 瓦斯气样组分^[36]

Table 4 Gas sample composition^[36]

瓦斯气样	瓦斯气样组分
G1	$\varphi(\text{CH}_4)=99.99\%$
G2	$\varphi(\text{CH}_4)=85\%、\varphi(\text{CO}_2)=8\%、\varphi(\text{N}_2)=5.6\%、\varphi(\text{O}_2)=1.4\%$
G3	$\varphi(\text{CH}_4)=80\%、\varphi(\text{CO}_2)=8\%、\varphi(\text{N}_2)=9.6\%、\varphi(\text{O}_2)=2.4\%$
G4	$\varphi(\text{CH}_4)=75\%、\varphi(\text{CO}_2)=8\%、\varphi(\text{N}_2)=13.6\%、\varphi(\text{O}_2)=3.4\%$

为分析不同初始瓦斯压力对煤体中瓦斯水合物生成等动力学参数影响规律,对诱导时间和水合物平均生长速率进行分析。结果发现,随着初始压力升高,诱导时间呈逐渐降低趋势。此外,瓦斯体积分数对诱导时间有着重要影响,随着瓦斯体积分数的降低诱导时间先降低后增加,如图 12 所示。

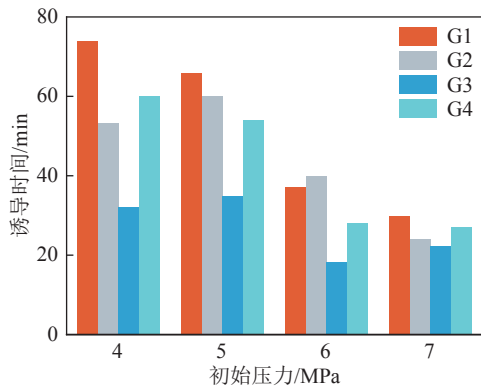
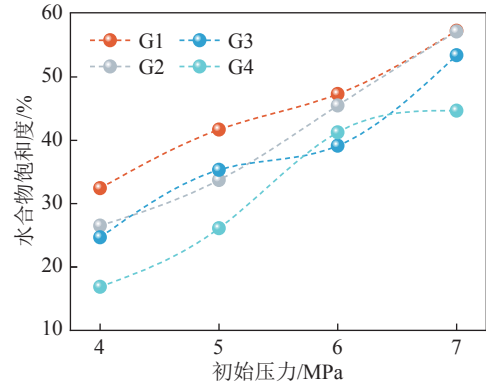
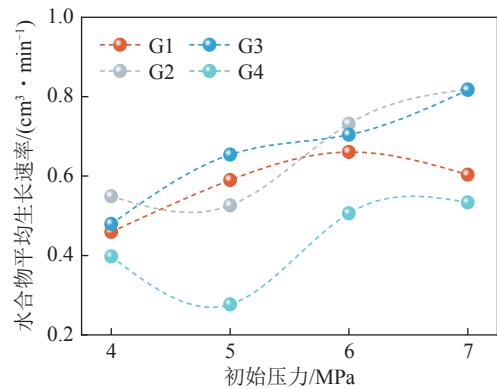
图 12 初始压力与诱导时间关系^[36]Fig.12 Relationship between induction time and initial pressure^[36]

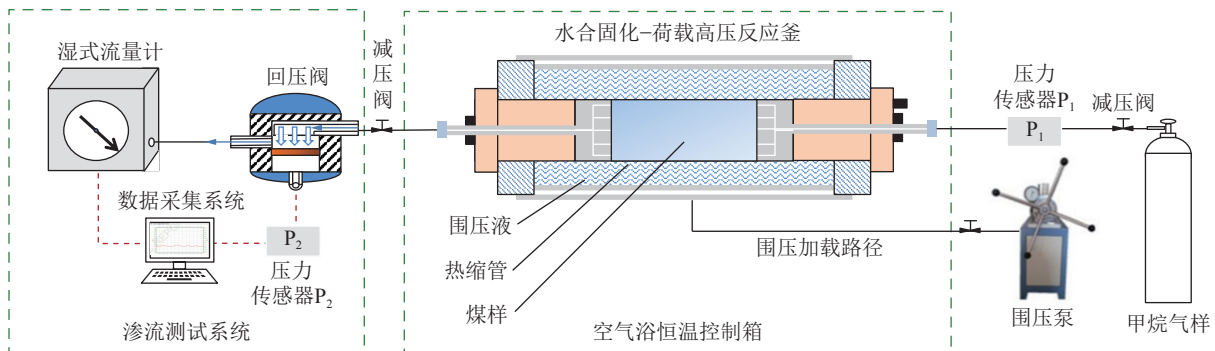
图 13 给出了不同瓦斯组分下煤体中瓦斯水合物平均生长速率/饱和度与初始压力关系曲线。从图 13 可发现, 随初始压力升高, 瓦斯水合物平均生长速率、水合物饱和度总体呈增加趋势。表明瓦斯水合物形成过程中, 初始瓦斯压力越大, 即水合反应驱动力越大, 导致水合物生成量越多及水合物平均生成速率越快。

3.2 含瓦斯水合物煤体力学特性

为研究煤体中瓦斯水合物生成对其力学特性的影响规律, 课题组自主搭建了考虑应力-渗流-化学耦合作用的含瓦斯水合物煤体三轴试验装置 (装置参数: 最大围压 20 MPa、最大轴压 40 MPa、温控范围为 $-20\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, 温度波动 $< \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$)。该装置主要由瓦斯水合固化-荷载高压反应釜、渗透率测试系统、压力控制系统、温度控制系统及数据采集系统 5 部分组成,

图 13 煤体中瓦斯水合物平均生长速率/饱和度与初始压力关系曲线^[36]Fig.13 Variations of mean growth rate/hydrate saturation with initial pressure for different gas samples^[36]

可进行不同瓦斯压力、水合物饱和度下含瓦斯水合物煤体原位三轴压缩及渗透率测试试验, 如图 14 所示。为瓦斯水合固化防突技术关键基础问题研究提供了可靠的室内试验设备。

图 14 含瓦斯水合物煤体力学性质原位测试装置^[37]Fig.14 Schematic diagram of in-situ triaxial test for gas hydrate-bearing coal^[37]

3.2.1 水合物饱和度作用

为研究煤体中瓦斯水合物饱和度对其力学特性的影响规律, 课题组采用含瓦斯水合物煤体力学性质原位测试装置, 开展含瓦斯水合物煤体三轴试验。发现不同围压条件下水合物饱和度的增大均有助于增

强煤体抵抗外力破坏的能力。不同围压条件下峰值强度-饱和度关系, 如图 15 所示。

由图 15 可知, 围压 4、5、6 MPa, 饱和度为 60% 的含瓦斯水合物煤体峰值强度 σ_f 在 5.29~9.26 MPa; 与之相比, 饱和度为 80% 时, 其峰值强度增幅在

15.49%~42.79%, 但提升幅度随着围压增加逐渐减小。表明在煤体中生成水合物, 能有效提高煤体峰值强度, 但围压对提升幅度有弱化趋势。

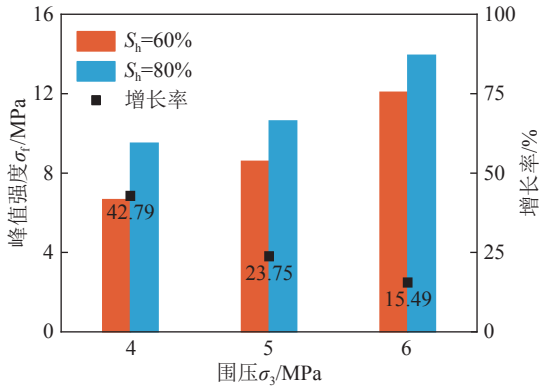


图 15 七星矿型煤峰值强度与水合物饱和度的关系^[38]

Fig.15 Relationship between peak strength of briquette and hydrate saturation in Qixing Coal Mine^[38]

为进一步研究水合物饱和度对含瓦斯水合物煤体峰值强度提升幅度与围压的关系。课题组针对桃山矿煤样开展不同围压下 4 种饱和度含瓦斯水合物煤体三轴压缩试验, 并绘制峰值强度与饱和度的关系, 如图 16 所示。由图 16 可知, 增大水合物饱和度能有效提高煤体峰值强度, 且围压越大饱和度对煤体峰值强度提升效果越好。围压 4、5、6 MPa 时, 饱和度 50% 的含瓦斯水合物煤体峰值强度在 5.86~9.38 MPa; 与之相比, 饱和度 80% 的峰值强度 σ_1 增幅在 48.12%~76.87%, 提升幅度随着围压的增大而增加。表明提高水合物饱和度有助于增强其抵抗破坏变形的能力, 但围压与提升幅度的关系不同于七星矿型煤。针对不同煤矿型煤试样饱和度变化对峰值强度的提升幅度与围压之间的关系, 课题组将进一步开展深入研究。

3.2.2 围压作用

为获取不同深度突出煤体瓦斯水合固化后强度

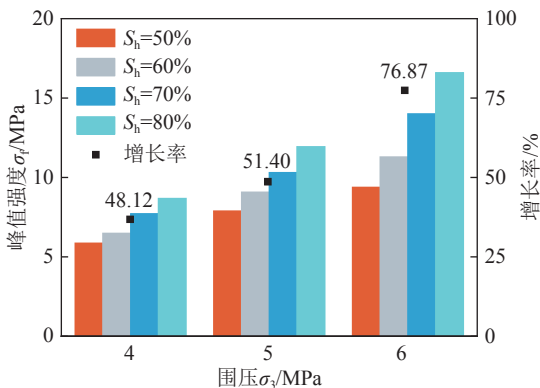


图 16 桃山煤矿型煤峰值强度与水合物饱和度的关系^[39]

Fig.16 Relationship between peak strength of briquette and hydrate saturation in Taoshan Coal Mine^[39]

特征参数, 准确掌握含瓦斯水合物煤体强度与围压的关系, 明确瓦斯水合物固化技术在预防深部煤岩突出事故的有效性, 课题组通过试验研究表明, 围压增大能有效提升含瓦斯水合物煤体峰值强度。峰值强度与围压的关系如图 17 所示。

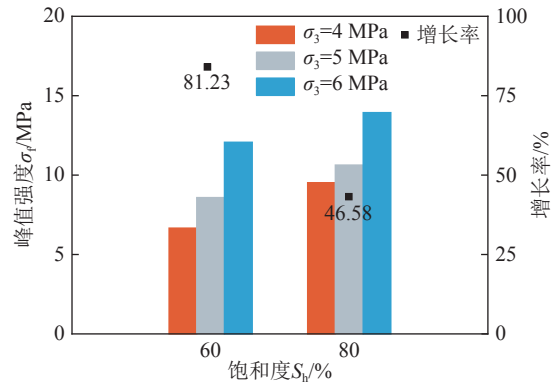


图 17 七星矿型煤峰值强度与围压的关系^[38]

Fig.17 Relationship between peak strength and confining pressure of briquette in Qixing Coal Mine^[38]

由图 17 可知, 对于饱和度为 60% 和 80% 含瓦斯水合物煤体, 围压为 4 MPa 时, 其峰值强度分别为 6.66、9.51 MPa, 当围压增加至 6 MPa 时, 其峰值强度增加幅度分别为 81.23%、46.58%。说明突出煤体在瓦斯水合固化后其抵抗外力破坏的能力随着围压的增加而增加, 但增加幅度随着饱和度的增加而减小。表明瓦斯水合固化技术在预防深部煤与瓦斯突出方面具有可行性。

为进一步深入研究含瓦斯水合物煤体峰值强度与围压的关系, 绘制了桃山矿的峰值强度和围压关系柱状图, 如图 18 所示。发现不同饱和度含瓦斯水合物煤体峰值强度均随着围压增大而增大。例如: 围压 4 MPa 下, 含瓦斯水合物煤体饱和度为 50%、60%、70%、80% 时, 其峰值强度分别为 5.86、6.48、7.71、8.68 MPa, 当围压增加至 6 MPa 时, 煤体峰值强度增幅分

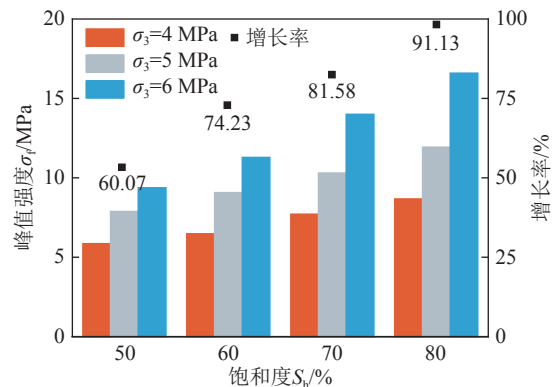


图 18 桃山煤矿型煤峰值强度与围压的关系^[39]

Fig.18 Relationship between peak strength and confining pressure of briquette in Taoshan Coal Mine^[39]

别为 60.07%、74.23%、81.58%、91.13%。说明突出煤体在瓦斯水合固化后其抵抗外力破坏的能力随着围压的增加而增加,且增加幅度与饱和度呈正相关关系,增加幅度与饱和度的关系不同于七星矿型煤。

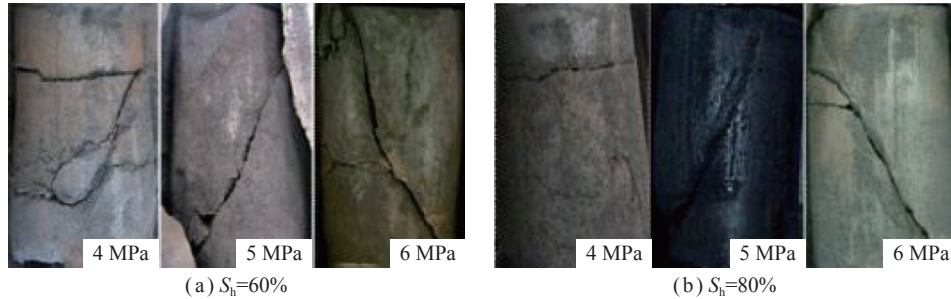


图 19 不同围压下试样变形破坏^[38]

Fig.19 Failure patterns of samples with hydrate saturations at different confining pressures^[38]

3.2.3 应力路径作用

通常而言,采动煤体往往受到地应力和强卸荷载共同作用^[40-41],为获取更加符合实际工程的试验参数,课题组自主搭建了应力-渗流-化学耦合作用含瓦斯水合物煤体三轴试验系统,如图 20 所示。该试验系

图 19 为不同围压和饱和度下含瓦斯水合物煤体变形破坏特征。由图 19 可知,当饱和度为 60%、80% 时,煤体在较低围压下,其破坏模式为环向破坏;在围压 5、6 MPa 时,煤体破坏模式转变为单面剪切破坏。

统可实现不同应力路径、饱和度、围压条件下含瓦斯水合物煤体原位三轴压缩及渗透率测试试验,具备复现深部突出煤体水合物生成前后力学及渗流特性变化规律的能力,为瓦斯水合固化防突技术关键基础问题研究提供了可靠的室内试验设备。

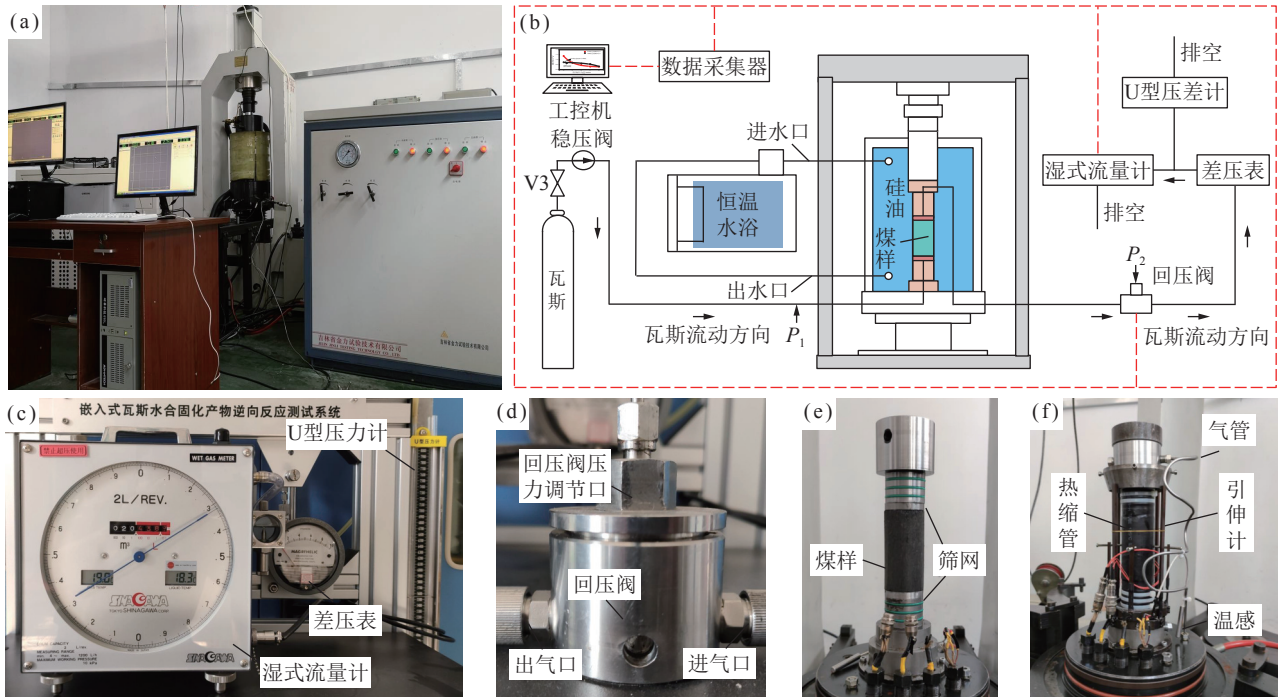


图 20 应力-渗流-化学耦合作用含瓦斯水合物煤体三轴试验系统^[20]

Fig.20 Triaxial testing device for coupled seepage, chemical and triaxial stress measurements in gas hydrate bearing coal^[20]

图 21 对比了常规三轴和卸围压条件下煤体的主应力-轴向应变曲线。可以发现,常规三轴压缩下曲线为应变硬化型;卸围压路径下具有明显的应力平台和残余阶段。应力平台的出现可能是由于煤样自身的强度和所处围压共同构成其三轴抗压强度^[42],围压初降时,轴向应力小于煤样三轴抗压强度,所以卸围

压试验会出现轴向应力保持不变的应力平台。

应力平台持续时间可以表征突出等灾害发生的难易程度。图 22 为应力平台持续时间变化规律,可以发现,随着饱和度、围压增大,应力平台持续时间增加,其增幅在 16.16%~46.11%,最长持续 9.92 min。为描述饱和度和围压的协同作用对应力平台持续时

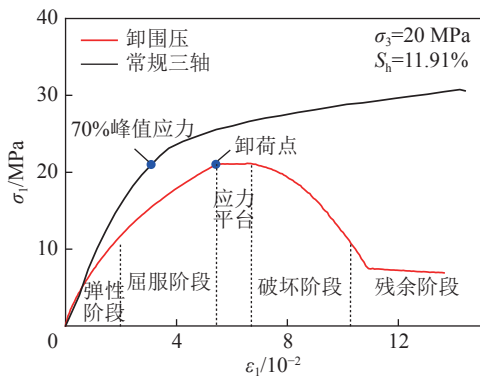


图 21 煤体轴向应力-应变曲线^[29]

Fig.21 Axial stress-axial strain curves of coal^[29]

间影响, 建立围压、饱和度与应力平台持续时间 T_p 的多元线性回归方程, 即 $T_p=0.274\sigma_3+0.535S_h-2.966$, $R^2=0.969$, 该方程可以更好反映围压、饱和度与应力平台时间的变化关系, 为预测煤层瓦斯水合固化后煤炭开采过程中应力平台持续时间提供理论依据。

研究卸荷条件下煤体力学性质对揭示采动应力下瓦斯水合固化后煤体破坏特征具有重要意义。为此, 课题组开展恒轴压卸围压条件下含瓦斯水合物煤

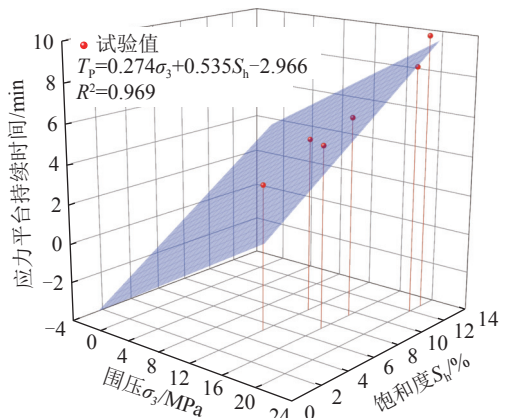
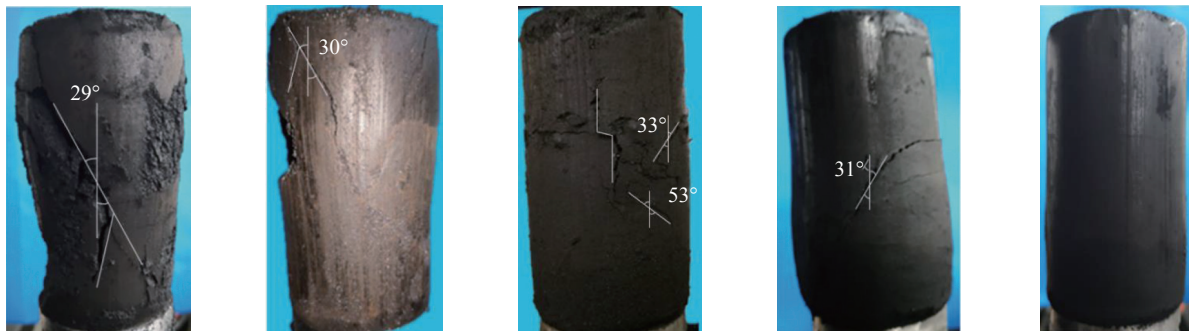


图 22 应力平台持续时间变化规律^[29]

Fig.22 Variation pattern of stress platform duration^[29]

体三轴试验, 得出卸围压条件下煤体破坏形式以剪切破坏为主、伴随劈裂破坏; 随着围压增大, 煤体破坏更为显著; 在较低饱和度条件下, 随着围压增加, 煤体破坏形态由单一剪切断面向以剪切断面为主、伴随劈裂破坏模式转变; 相同围压下, 饱和度越高, 煤体破坏程度越轻 (裂缝数量少, 长度短), 如图 23 所示。



(a) $m_c=6.64$ g, $\sigma_3=16$ MPa (b) $m_c=6.64$ g, $\sigma_3=12$ MPa (c) $m_c=10.64$ g, $\sigma_3=20$ MPa (d) $m_c=10.62$ g, $\sigma_3=16$ MPa (e) $m_c=10.62$ g, $\sigma_3=12$ MPa

图 23 卸围压条件下含瓦斯水合物煤体破坏照片^[29]

Fig.23 Photos of gas hydrate bearing coal under confining pressure unloading condition^[29]

3.2.4 数值模拟

课题组前期进行了不同粒径、饱和度、围压以及应力路径对煤体力学性质影响规律研究。为进一步揭示其细观机理, 利用离散元法针对含瓦斯水合物煤体三轴试验进行数值模拟研究。从颗粒尺度描述煤岩材料颗粒介质的变形过程^[43-45]。课题组通过 X-CT 发现瓦斯水合物在煤体孔裂隙内主要呈胶结、填充 2 种分布模式, 如图 24 所示。

针对胶结型水合物开展不同饱和度下含瓦斯水合物煤体宏细观力学特性试验研究, 采用平行接触黏结模型来表征水合物的胶结作用, 利用归一化方法获得宏细观参数间关系, 据此建立离散元三维数值模型, 如图 25 所示。通过应力-应变曲线及试样破坏模式

验证模型的可行性, 如图 26 所示。

颗粒离散元可得到不同轴向应变的速度场、位移场、配位数及孔隙率, 揭示试样变形破坏过程的细观演化规律。研究表明, 围压越大、饱和度越高, 接触力链个数越多, 接触力越大, 试样抵抗变形破坏的能力提高, 如图 27(a)、(b) 所示。随着围压增加, 颗粒配位数呈增大趋势, 孔隙率呈减小趋势; 随着饱和度增加, 配位数总体呈增大趋势, 孔隙率整体呈减小趋势。配位数越大, 孔隙率越小, 试样强度增强, 如图 27(c)、(d) 所示。

目前, 课题组正在开展基于柔性边界、不规则颗粒及水合物分布模式条件下含瓦斯水合物煤体离散元数值模拟。可为利用水合固化方法预防煤与瓦斯

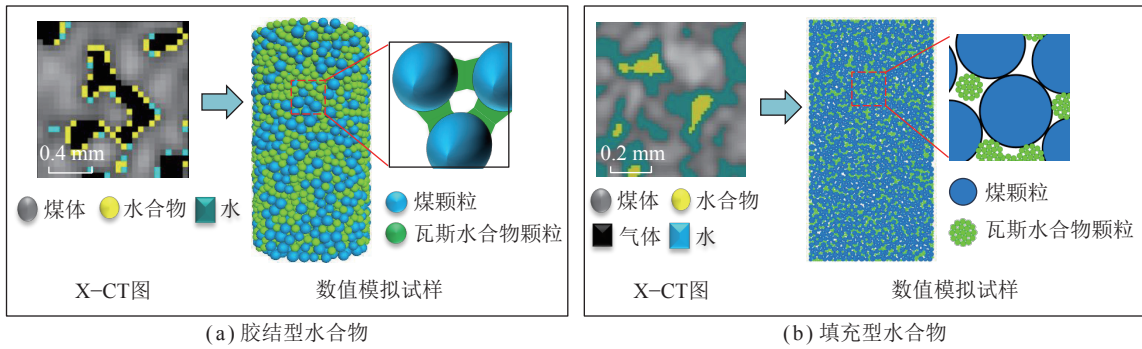


图 24 煤体中水合物分布模式

Fig.24 Distribution patterns of gas hydrate in coal

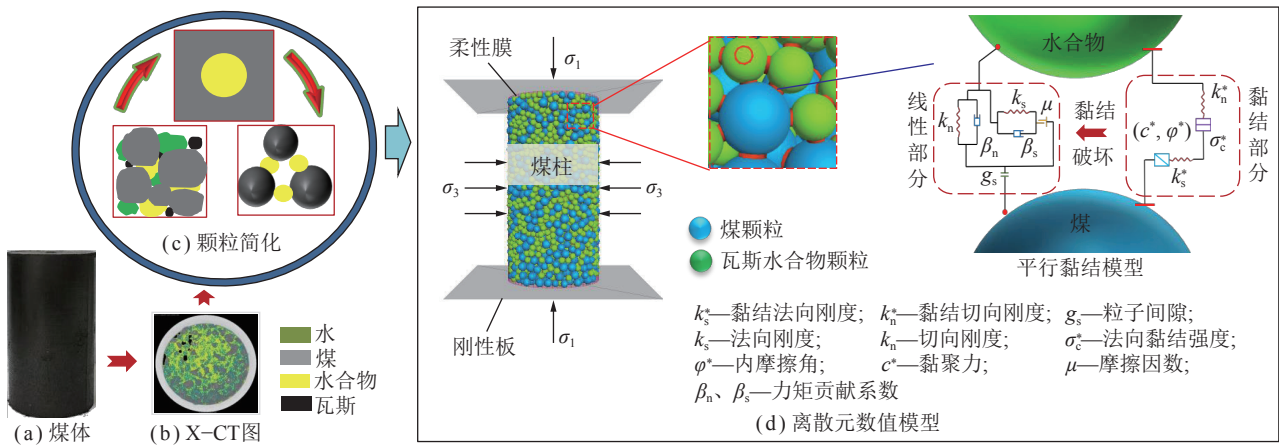


图 25 含瓦斯水合物煤体三轴压缩试验模拟

Fig.25 Discrete element simulation of the triaxial compression test on gas hydrate bearing coal

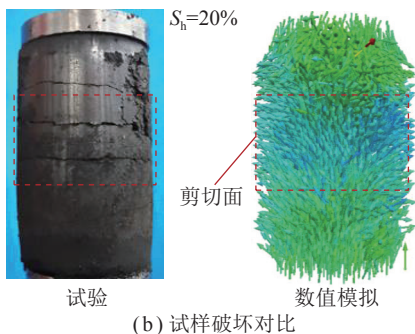
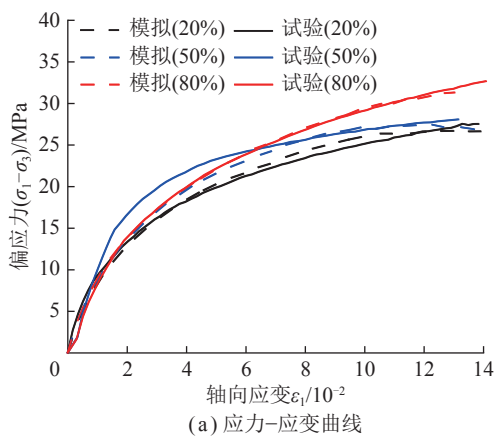


图 26 应力-应变曲线及试样破坏模式^[46]

Fig.26 Stress-strain curves and failure patterns of the sample^[46]

突出的工程尺度模拟提供基础力学参数和建模方法。

3.3 含瓦斯水合物煤体渗透率变化

基于达西定律的出口端瓦斯流量稳态法, 获取水合物生成、饱和度、瓦斯压力及有效应力与煤体渗透率的变化关系。在试验研究结果基础上, 利用多孔介质渗透率理论模型预测煤体中水合物分布模式, 运用二次渗透率修正方程拟合计算得到滑脱因子, 定量分析了瓦斯压力、滑脱效应和有效应力对渗透率的影响规律。各参数计算公式见表 5, 相关细节将在以下章节详细描述。

3.3.1 水合物饱和度作用

水合物在煤体中分布模式和饱和度动态变化将导致煤体孔隙结构及渗透率改变, 制约瓦斯水合固化反应进程。因此, 研究瓦斯水合物生成前后、不同饱和度下含瓦斯水合物煤体渗透率的影响规律十分重要。研究表明, 水合物生成于煤体孔裂隙空间, 造成有效瓦斯渗流通道尺寸减小, 渗透率下降, 下降幅度为 37.6%~84.4%, 如图 28 所示。随着饱和度增加, 越来越多的水合物在孔裂隙空间中积聚, 允许瓦斯气体通过的有效面积减小, 渗透能力下降。

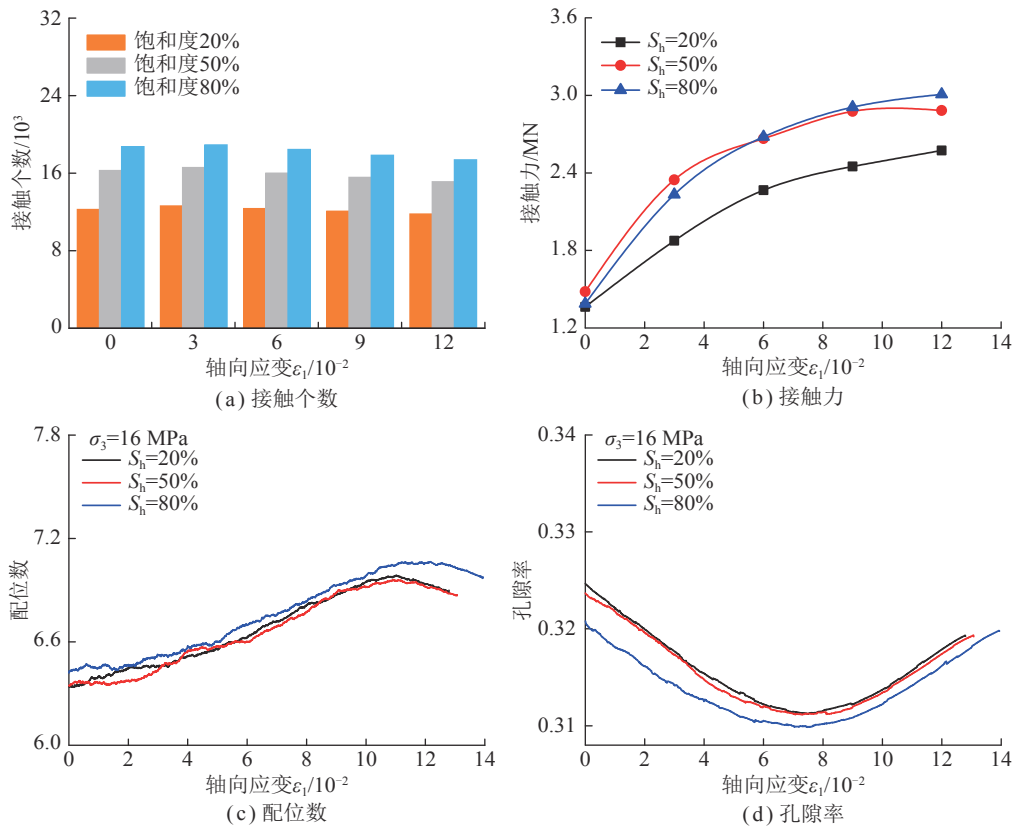


图 27 不同饱和度下含瓦斯水合物煤体接触个数、接触力、配位数以及孔隙率与轴向应变的关系^[46]

Fig.27 Relationship between contact number, contact force, coordination number, porosity and axial strain of gas hydrate bearing coal under different saturations^[46]

表 5 试验公式信息汇总

Table 5 Summary of test formula information

编号	指标	计算方法	参数
1	渗透率 ^[47]	$k = \frac{2\mu P_0 L Q}{A(P_1^2 - P_2^2)}$	μ 为测量温度下气体黏度系数; P_0 为大气压力; P_1 为进气压力; P_2 为出气压力; L 为试样长度; A 为试样横截面面积; Q 为瓦斯流量
2	渗透率变化率 ^[48]	$B_p = \frac{k_1 - k_m}{k_1}$	k_1 为第1个瓦斯压力下的渗透率; k_m 为瓦斯压力变化过程的渗透率
3	瓦斯压力敏感系数 ^[48]	$C_p = -\frac{1}{k_1} \frac{\partial k}{\partial P_m}$	k_1 为第1个瓦斯压力下的渗透率; ∂k 为煤体渗透率变化量; ∂P_m 为瓦斯压力变化量
4	滑脱效应影响率 ^[49]	$M_k = \frac{k - k_0}{k}$	k 为试验渗透率; k_0 为绝对渗透率
5	渗透率损失率 ^[50]	$L_k = \frac{k_0 - k_1}{k_0}$	k_0 为初始渗透率; k_1 为应力加载至第1个应力点对应的渗透率
6	渗透率损伤率 ^[50]	$D_{k1} = \frac{k_1 - k_{1x}}{k_1}$	k_1 为加载过程第1个应力点对应的渗透率; k_{1x} 为卸载过程应力恢复至第1个应力点对应的渗透率

注: 变量含义仅适用于对应公式。

为分析煤体中水合物分布模式及其对含瓦斯水合物煤体渗透率演化规律的影响, 将实测归一化渗透率(水合物生成后渗透率与水合物生成前渗透率比值)与理论模型(毛细管模型、MASUDA 模型)相互对比分析, 发现 20~40 目(0.850~0.425 mm), 饱和度 40%、饱和度 60% 与 60~80 目(0.250~0.180 mm) 饱和度 60% 体系下接近于毛细管壁模型, 说明以上粒径和饱和度体系下水合物在煤体中主要以胶结型为主, 如图 29 所示。预测结果与前述 2.2.1 节的煤体中

水合物分布模式 X-CT 测试结果相吻合。

3.3.2 瓦斯压力作用

煤层赋存瓦斯压力的变化会对渗透率产生显著影响。为此, 研究不同瓦斯压力下含瓦斯水合物煤体渗透率试验具有重要意义。由图 30 和表 6 可知, 煤体渗透率随着瓦斯压力增加而降低, 降低幅度为 36.3%, 指数函数更能准确描述渗透率随瓦斯压力的变化规律, 即 $k = a \exp(-bP_m) + y_0$, 其中, P_m 为瓦斯压力, MPa; a 、 b 、 y_0 均为拟合参数。所建立的关系可以有效

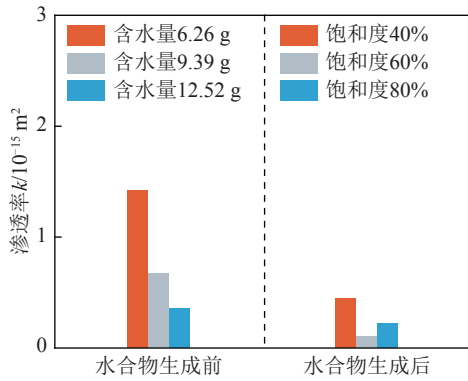


图 28 瓦斯水合物生成前后煤体渗透率对比^[37]

Fig.28 Comparison of coal permeability before and after hydrate formation^[37]

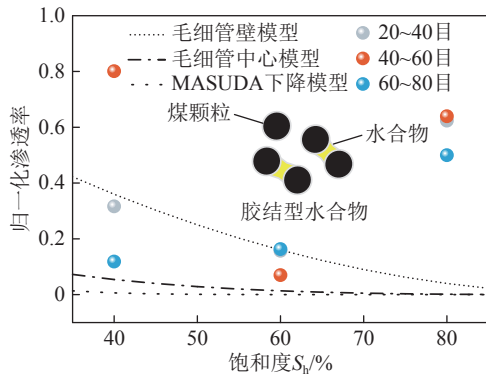


图 29 试验结果与预测渗透率对比 (修改自文献^[37])

Fig.29 Comparison of theoretical models with experimental permeability(Modified from Reference^[37])

预测含瓦斯水合物煤体渗透率随着瓦斯压力变化规律。

引入渗透率变化率 B_p 、瓦斯压力敏感系数 C_p 两个评价参数, 来反映渗透率随着瓦斯压力的变化趋势。渗透率变化率 B_p 及瓦斯压力敏感系数 C_p 与瓦斯压力关系, 如图 31 所示。由图 31 可知, 瓦斯压力增加 (<1.625 MPa), 渗透率变化率快速增大趋势, 瓦斯压力敏感系数快速减小; 瓦斯压力增加 (>1.625 MPa), 渗透率变化率快速增大, 瓦斯压力敏感系数快速减小。结合渗透率变化率与瓦斯压力敏感系数随瓦斯压力的变化规律, 可将渗透率变化分为渗透率加速减小阶段 (瓦斯压力<1.625 MPa) 和渗透率平稳阶段 (瓦斯压力>1.625 MPa)2 个阶段。

在较低瓦斯压力条件下, 滑脱效应的存在对煤体渗透率产生一定的影响, 可以增强瓦斯在煤体中的流动能力。为此, 阐明水合物饱和度对滑脱效应的影响规律, 对于评估瓦斯在固化煤体中的渗流能力提供依据。滑脱因子是判断滑脱效应强弱的重要指标, 滑脱因子越大, 表示滑脱效应越显著。结果发现随着饱和度增加, 滑脱因子整体呈减小趋势, 即滑脱效应减弱, 如图 32 所示。

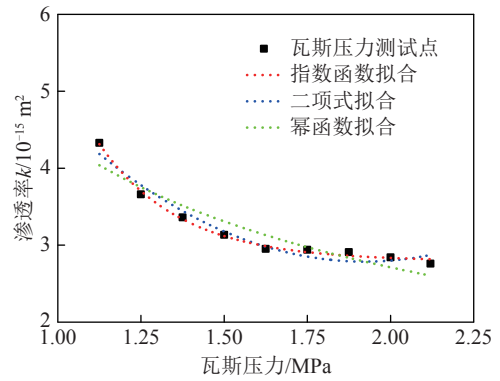


图 30 煤体渗透率与瓦斯压力拟合关系^[51]

Fig.30 Fitting relationship between the permeability and the gas pressure for coal^[51]

表 6 煤体渗透率经验公式^[51]

Table 6 Empirical equations for coal permeability^[51]

拟合类型	拟合参数	拟合度 R^2
指数函数	$k = 153.82\exp(-4.10P_m) + 2.79$	0.99
幂函数	$k = 4.38P_m^{0.69}$	0.87
二次函数	$k = 2.20P_m^2 - 8.47P_m + 10.92$	0.95

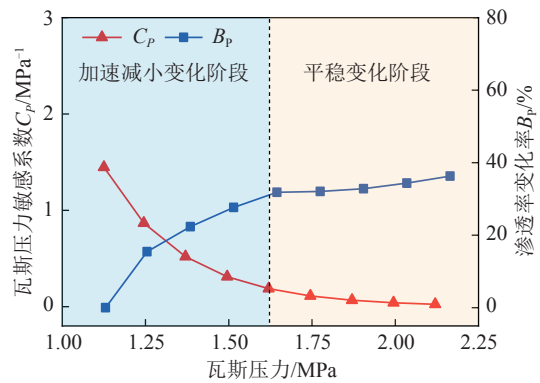


图 31 渗透率变化率、瓦斯压力敏感系数随瓦斯压力变化关系^[51]

Fig.31 Relationship between permeability variation rate, sensitivity coefficient and gas pressure in gas hydrate bearing coal^[51]

滑脱效应对含瓦斯水合物煤体渗透率的影响程度随着水合物饱和度和瓦斯压力的变化有所不同。研究发现, 在较低饱和度时, 随着瓦斯压力增加, 滑脱效应影响率基本保持不变, 随着饱和度增加, 滑脱效应影响率呈现整体减小趋势, 变化范围为 51.2%~86.6%。在相同瓦斯压力下, 随着饱和度增加, 滑脱效应影响率减小, 滑脱效应减弱, 如图 33 所示。

3.3.3 应力加卸载过程作用

受煤层开采影响下, 工作面前煤体经历支撑应力的加卸载过程^[52], 其中有效应力对渗透率的动态演化有着显著影响^[53]。研究表明在轴向应力加卸载过程

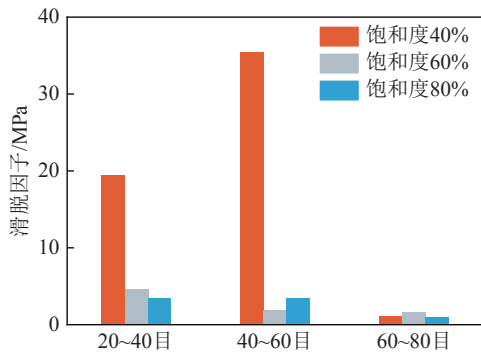


图 32 滑脱因子变化规律^[51]

Fig.32 Slippage factor variation law^[51]

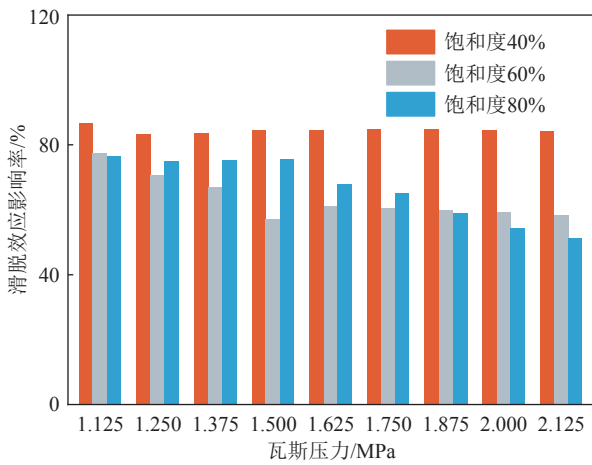


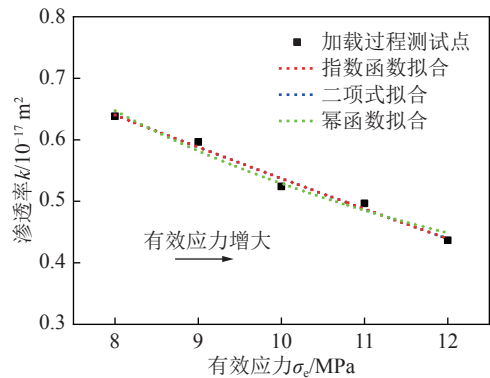
图 33 滑脱效应影响率变化规律^[51]

Fig.33 Gas slippage effect rate variation law^[51]

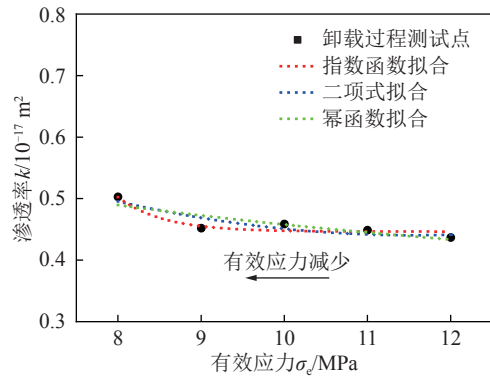
中,随着有效应力增加,煤体渗透率降低,如图 34 所示。分析认为渗透率的降低主要是由于煤体骨架压缩变形,引起有效瓦斯渗流通道闭合所造成。

为了进一步定量描述煤体渗透率与瓦斯压力的关系,对两者进行拟合。表 7 给出了 3 种拟合公式对煤体渗透率与有效压力关系的拟合参数。发现指数函数对轴向应力加卸载过程中含瓦斯水合物煤体渗透率与有效应力的关系拟合效果好,即 $k = A_2 \exp(-\sigma_e/t_1) + y_1$, 其中, σ_e 为有效应力; A_2 、 t_1 、 y_1 均为拟合参数。该经验公式可较好预测采掘扰动过程中含瓦斯水合物煤体渗透率随着有效应力演化规律。

为量化评价轴向应力加卸载过程含瓦斯水合物煤体渗透率减小程度,引入渗透率损失率、渗透率损伤率 2 种评价参数,与有效应力的关系如图 35 所示。由图 35 可知,在相同饱和度下,渗透率损失率随着有效应力增加呈增加趋势。而在相同有效应力下,渗透率损失率随着饱和度增加呈增加趋势。卸载过程中饱和度 60% 体系下渗透率损伤率存在负值。分析认为可能是由于卸载过程煤体孔裂隙处于张开状态,渗透率增加,出现卸荷增压现象。



(a) 加载过程渗透率



(b) 卸载过程渗透率

图 34 煤体渗透率随有效应力变化规律^[20]

Fig.34 Coal permeability versus effective stress^[20]

表 7 轴向应力加卸载过程含瓦斯水合物煤体渗透率与有效应力的拟合公式^[20]

Table 7 Empirical equations of permeability and effective stress in gas hydrate bearing coal under axial stress loading and unloading^[20]

应力路径	拟合类型	拟合公式	拟合度 R^2
轴向应力 加载过程	指数函数	$k = 2.56 \exp(-\sigma_e/39.52) - 1.45$	0.99
	幂函数	$k = 4.25 \sigma_e^{-0.90}$	0.98
	二次函数	$k = 6.32 \sigma_e^2 - 0.06 \times 10^{-4} \sigma_e + 1.10$	0.99
轴向应力 卸载过程	指数函数	$k = 1.43 \times 10^5 \exp(-\sigma_e/0.54) + 0.45$	0.91
	幂函数	$k = 0.91 \sigma_e^{-0.30}$	0.76
	二次函数	$k = 0.01 \sigma_e^2 - 0.10 \sigma_e + 1.03$	0.82

4 结论与展望

(1) 综述了瓦斯水合固化防突理论基础、关键技术及不同影响因素条件下含瓦斯水合物煤体力学特性和渗透率研究方面取得的初步成果。但由于煤层环境的复杂性以及含瓦斯水合物煤体的特殊性,目前的研究仍存在改进的空间。

(2) 室内三轴试验是研究含瓦斯水合物煤体力学性质和渗透率的主要手段。试验装置功能的研发逐渐从模拟浅部低应力条件到深部高应力条件、从常规

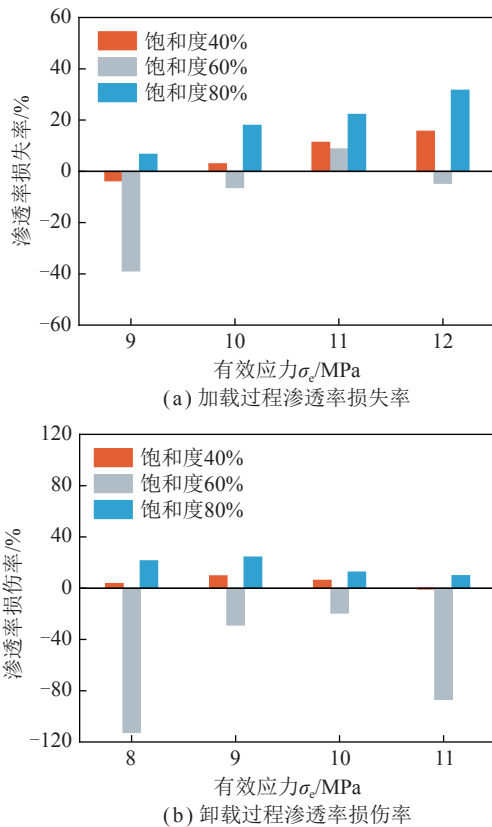


图35 煤体渗透率损失率、损伤率与有效应力的关系^[20]

Fig.35 Coal permeability loss rate, damage rate versus effective stress^[20]

三轴应力路径到复杂应力路径过渡,即研究更接近于深部煤体的应力状态,进而阐明高应力开采扰动下含瓦斯水合物煤体力学性质变化规律。关于煤体中瓦斯水合物含量及分布实时监测等方面仍需自主搭建高效可行的开采瓦斯水合固化技术工艺及装备,如:将超声技术、低场核磁共振以及电—声响应特性联合探测技术与力学测试设备结合是今后在设备研发方面的重点。

(3) 目前在含瓦斯水合物煤体力学性质测试方面,主要是基于较低温度下在煤体中生成瓦斯水合物。因此,后续需优选出环保型瓦斯水合物动力学和热力学促进剂,模拟常温条件下煤层温度环境,降低煤体中瓦斯水合物的生成压力,提升瓦斯水合固化速率,实现在常温条件下煤体中瓦斯水合物的生成,进而在该条件下进行其力学性质研究。

(4) 含瓦斯水合物煤体的力学性质与围压、水合物饱和度等密切相关。经研究发现瓦斯水合物在煤体中呈现胶结型和填充型混合分布模式,但由于含瓦斯水合物煤体本身的复杂结构,水合物分布均匀性对其力学性质有着重要影响。因此,如何定量评价水合物的均匀性,在此基础上提出考虑水合物分布均匀性的含瓦斯水合物煤体离散元建模方法,据此更真实评

价其力学性质并揭示其强化机理是下一步重点研究的方向。

(5) 含瓦斯水合物煤体力学性质及渗透率测试、力学性质数值模拟已基本形成体系,水合物强化煤体力学性质的理论已初步形成研究框架,为水合固化交叉力学的研究提供比较全面的技术途径。但在含瓦斯水合物煤体强度准则与本构模型建立、考虑渗流—应力耦合条件下的含瓦斯水合物煤体三轴试验离散元研究以及基于水合物固化方法进行煤与瓦斯突出危险评价方面仍需深入研究。

参考文献(References):

- 王恩元, 张国锐, 张超林, 等. 我国煤与瓦斯突出防治理论技术研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 297-322.
WANG Enyuan, ZHANG Guorui, ZHANG Chaolin, et al. Research progress and prospect on theory and technology for coal and gas outburst control and protection in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 297-322.
- 袁亮. 煤矿典型动力灾害风险辨识及监控预警技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1557-1566.
YUAN Liang. Research progress on risk identification, assessment, monitoring and early warning technologies of typical dynamic hazards in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1557-1566.
- 卢义玉, 彭子焯, 夏彬伟, 等. 深部煤岩工程多功能物理模拟实验系统—煤与瓦斯突出模拟实验[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S1): 272-283.
LU Yiyu, PENG Ziyue, XIA Binwei, et al. Multifunctional physical simulation experiment system for deep coal and rock engineering coal and gas outburst simulation experiment[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S1): 272-283.
- 史庆元. 鹤煤六矿煤巷掘进松动爆破防突技术研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2023.
SHI Qingyuan. Study on outburst prevention technology of loose blasting in coal roadway excavation in Hebi No. 6 Coal Mine [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2023.
- 王恩元, 汪皓, 刘晓斐, 等. 水力冲孔孔洞周围煤体地应力和瓦斯时空演化规律[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(1): 39-45.
WANG Enyuan, WANG Hao, LIU Xiaofei, et al. Temporal and spatial evolution law of in-situ stress and gas in coal mass around hydraulic punching holes[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(1): 39-45.
- 冯涛, 谢雄刚, 刘河清. 石门揭露突出煤层冻结温度场的实验研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(11): 1884-1889.
FENG Tao, XIE Xiong-gang, LIU Heqing. Experimental study on the freezing temperature field of outburst coal seam exposed by Shimen[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(11): 1884-1889.
- 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 Xiong-gang, LIU Hui, et al. Feasibility study on outburst prevention effect of liquid injection freezing method in cross-cut coal uncovering[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(6): 937-941.

- [8] WU Qiang, HE Xueqiu. Preventing coal and gas outburst using methane hydration[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2003, 13(1): 7-10.
- [9] 郑仰峰, 翟成, 辛海会, 等. 煤巷掘进工作面强弱耦合能量控制防治煤与瓦斯突出理论与方法[J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(6): 1269-1280.
ZHENG Yangfeng, ZHAI Cheng, XIN Haihui, et al. Theories and methods of coal and gas outburst prevention by strong-weak coupling energy control in coal roadway driving face[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2021, 38(6): 1269-1280.
- [10] 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 controlling factors of gas hydrate formation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2005, 30(3): 283-287.
- [11] SLOAN E D. *Clathrate Hydrates of Natural Gases*[M]. 3rd ed. New York: CRC Press, 2008.
- [12] SLOAN E D, FLEYFEL F. A molecular mechanism for gas hydrate nucleation from ice[J]. *AICHE Journal*, 1991, 37(9): 1281-1298.
- [13] 李浩威. 姚家山5号煤层瓦斯赋存规律及层次分析法在瓦斯灾害预测中的应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
LI Haowei. Gas occurrence rule of Yaojiashan No. 5 coal seam and application of analytic hierarchy process in gas disaster prediction [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016.
- [14] MAKOGON Y F. *Hydrates of natural gas*[M]. Tulsa: Penn Well Books, 1981.
- [15] NIKITIN V V, FOKIN M I, DUGAROV G A, et al. Dynamic in situ imaging of methane hydrate formation in coal media[J]. *Fuel*, 2021, 298: 120699.
- [16] 俞启香. 矿井瓦斯防治[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1992.
- [17] 吴强, 张保勇, 王永敬. 煤层存在瓦斯水合物的可能性[J]. *黑龙江科技学院学报*, 2006, 16(3): 135-138.
WU Qiang, ZHANG Baoyong, WANG Yongjing. The possibility of coal seam gas hydrate exists[J]. *Journal of Heilongjiang Institute of Science and Technology*, 2006, 16(3): 135-138.
- [18] 于洪观, 宋吉勇, 李延席, 等. 煤层中甲烷水合物存在可能性探讨[J]. *天然气工业*, 2006, 26(8): 41-43.
YU Hongguan, SONG Jiyong, LI Yanxi, et al. Coal bed methane hydrate in the possibility to investigate[J]. *Journal of Natural Gas Industry*, 2006, 26(8): 41-43.
- [19] 李祥春, 何学秋, 聂百胜. 甲烷水合物在煤层中存在的可能性[J]. *天然气工业*, 2008, 28(3): 130-132.
LI Xiangchun, HE Xueqiu, NIE Baisheng. The possibility of the existence of methane hydrate in coal bed[J]. *Journal of Natural Gas Industry*, 2008, 28(3): 130-132.
- [20] 张保勇, 于洋, 高霞, 等. 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[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(11): 2283-2298.
ZHANG Baoyong, YU Yang, GAO Xia, et al. Permeability of mine gas hydrate bonded coal against loading-unloading of axial stress[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(11): 2283-2298.
- [21] 冯增朝, 赵阳升, 文再明. 煤岩体孔隙裂隙双重介质逾渗机理研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(2): 236-240.
FENG Zengchao, ZHAO Yangsheng, WEN Zaiming. Study on percolation mechanism of pore and fissure dual medium in coal and rock mass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(2): 236-240.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 压汞法和气体吸附法测定固体材料孔径分布和孔隙度, 第1部分: 压汞法: GB/T 21650.1—2008[S]. 2008.
- [23] 霍多特. 煤与瓦斯突出[M]. 宋士钊, 王佑安, 译. 北京: 中国工业出版社, 1966.
- [24] LIU Peisheng, MA Xiaoming. *Detection method of porous materials*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006.
- [25] COLLET T S, LEE M W, AGENA W F, et al. Permafrost associated natural gas hydrate occurrences on the Alaska North Slope[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(2): 279-294.
- [26] ERSHOV E D, YAKUSHEV V S. Experimental research on gas hydrate decomposition in frozen rocks[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1992, 20(2): 147-156.
- [27] 祝有海. 加拿大马更些冻土区天然气水合物试生产进展与展望[J]. *地球科学进展*, 2006, 21(5): 513-520.
ZHU Youhai. Progress and prospect of gas hydrate production in Mageng permafrost, Canada[J]. *Advance in Earth Science*, 2006, 21(5): 513-520.
- [28] 程远平, 雷杨, 杨斯杰. 煤与瓦斯突出相似模拟试验的能量原理[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(11): 4078-4096.
CHENG Yuanping, LEI Yang, YANG Sijie. Similar simulation experiment of coal and gas outburst of energy principle[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(11): 4078-4096.
- [29] 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(S1): 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(S1): 281-290.
- [30] 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): 2829-2835.
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): 2829-2835.
- [31] YONEDA J, OSHIMA M, KIDA M, et al. Consolidation and hardening behavior of hydrate-bearing pressure-core sediments recovered from the Krishna-Godavari Basin, offshore India[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 108: 512-523.
- [32] LUO Tingting, LI Yanghui, SUN Xiang, et al. Effect of sediment particle size on the mechanical properties of CH₄ hydrate-bearing sediments[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, 171: 302-314.
- [33] 吴起, 卢静生, 李栋梁, 等. 降压开采过程中含水合物沉积物的力学特性研究[J]. *岩土力学*, 2018, 39(12): 4508-4516.
WU Qi, LU Jingsheng, LI Dongliang, et al. Study on mechanical properties of hydrate-bearing sediments during depressurization[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(12): 4508-4516.
- [34] 吴强, 张保勇. 表面活性剂在瓦斯水合中的作用机理[J]. *煤炭学报*, 2006, 31(6): 716-720.
WU Qiang, ZHANG Baoyong. Effect mechanism of surfactant on

- gas hydration[J]. *Journal of China Coal Society*, 2006, 31(6): 716–720.
- [35] 张保勇, 于跃, 吴强, 等. NaCl 对瓦斯水合物相平衡的影响[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(12): 2425–2430.
ZHANG Baoyong, YU Yue, WU Qiang, et al. Effect of NaCl on gas hydrate equilibrium[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(12): 2425–2430.
- [36] 张强, 吴强, 张保勇, 等. 阻抗测试方法在瓦斯水合防突模拟实验中的应用[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(12): 3047–3053.
ZHANG Qiang, WU Qiang, ZHANG Baoyong, et al. Application of impedance test method in simulation experiment of gas hydration and outburst prevention[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(12): 3047–3053.
- [37] 张保勇, 李焕如, 高霞, 等. 饱和度对含瓦斯水合物煤体渗透率影响试验研究[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(S1): 122–129.
ZHANG Baoyong, LI Huanru, GAO Xia, et al. Experimental study on effect of saturation on the permeability of gas hydrate bearing coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(S1): 122–129.
- [38] 张保勇, 高橙, 高霞, 等. 高饱和度下含瓦斯水合物煤体应力-应变特性试验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2018, 35(2): 429–435.
ZHANG Baoyong, GAO Cheng, GAO Xia, et al. Experimental research on stress-strain behavior of gas hydrate-bearing coal with high saturation[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2018, 35(2): 429–435.
- [39] GAO Xia, YANG Tongchuan, YAO Kai, et al. Mechanical performance of methane hydrate-coal mixture[J]. *Energies*, 2018, 11(6): 1562.
- [40] XUE Yi, RANJITH P G, GAO Feng, et al. Mechanical behaviour and permeability evolution of gas-containing coal from unloading confining pressure tests[J]. *Journal of Natural Gas Science & Engineering*, 2017, 40: 336–346.
- [41] YIN Guangzhi, JIANG Changbao, WANG Jianguo, et al. Geomechanical and flow properties of coal from loading axial stress and unloading confining pressure tests[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 76: 155–161.
- [42] 尤明庆, 华安增. 岩石试样的三轴卸围压试验[J]. *岩石力学与工程学报*, 1996, 17(1): 24–29.
YU Mingqing, HUA Anzeng. Triaxial unloading confining pressure test of rock samples[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1996, 17(1): 24–29.
- [43] 张伏光, 蒋明镜. 胶结砂土强度特性的真三轴试验离散元分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(6): 1530–1539.
ZHANG Fuguang, JIANG Mingjing. True triaxial test discrete element analysis of strength characteristics of cemented sand[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(6): 1530–1539.
- [44] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. *Geotechnique*, 1979, 29(1): 47–65.
- [45] 王辉, 周子钰, 周博, 等. 颗粒抗滚动作用对水合物沉积物宏观及微观力学特性的影响[J]. *石油学报*, 2020, 41(7): 885–894.
WANG Hui, ZHOU Ziyu, ZHOU Bo, et al. Impact of rolling resistance effect of particles on macro/micro mechanical properties of hydrate-bearing sediments[J]. *Acta Petroli Sinica*, 2020, 41(7): 885–894.
- [46] 王楠楠, 高霞, 张吉哲, 等. 基于平行黏结模型的含瓦斯水合物煤体宏观力学性质研究[J/OL]. *煤炭学报*, 1-14[2024-01-15] DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0580.
WANG Nannan, GAO Xia, ZHANG Jizhe, et al. Macro-micro mechanical behavior research on gas hydrate bearing coal based on parallel bonding model[J/OL]. *Journal of China Coal Society*: 1-14[2024-01-15]DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0580.
- [47] 祝捷, 王学, 于鹏程, 等. 有效应力对煤体变形和渗透率的影响研究[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.
- [48] 许江, 曹偲, 李波波, 等. 煤岩渗透率对孔隙压力变化响应规律的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(2): 225–230.
XU Jiang, CAO Jie, LI Bobo, et al. Experimental research on Response law of permeability of coal to pore pressure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(2): 225–230.
- [49] 王环玲, 徐卫亚, 巢志明, 等. 致密岩石气体渗流滑脱效应试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(5): 777–785.
WANG Huanling, XU Weiya, CHAO Zhiming, et al. Experimental study on slippage effects of gas flow in compact rock[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(5): 777–785.
- [50] 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): 2487–2499.
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): 2487–2499.
- [51] 张保勇, 赵国建, 高霞, 等. 瓦斯压力对含水合物煤体渗透率及滑脱效应影响研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(11): 2655–2667.
ZHANG Baoyong, ZHAO Guojian, GAO Xia, et al. Experimental study on influence of gas pressure on permeability and slippage effect of gas hydrate bearing coal[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(11): 2655–2667.
- [52] 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.
- [53] 尹光志, 李文璞, 李铭辉, 等. 加卸载条件下原煤渗透率与有效应力的规律[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(8): 1497–1503.
YIN Guangzhi, LI Wenpu, LI Minghui, et al. Permeability and effective stress of raw coal under loading and unloading conditions[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(8): 1497–1503.