李全贵, 邓羿泽, 胡千庭, 等. 煤岩水力压裂物理试验研究综述及展望[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 62−72.
LI Quangui, DENG Yize, HU Qianting, *et al*. Review and prospect of coal rock hydraulic fracturing physical experimental research[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 62−72.

移动扫码阅读

煤岩水力压裂物理试验研究综述及展望

李全贵[1,2], 邓羿泽[1,2], 胡千庭[1,2], 武晓斌[1,2], 王晓光[3], 姜志忠[4], 刘 乐[5], 钱亚楠[1,2], 宋明洋[1,2]
(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆大学 资源与安全学院, 重庆 400044; 3. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074; 4. 贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550025; 5. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710054)

摘 要: 水力压裂物理模拟是对压裂过程中裂隙演化及其动力学过程的近似再现，成为了煤岩压裂机理研究的重要手段。相似理论是现场原型与试验模型转换的理论基础，试验装置和相似材料是物理模拟试验的物质前提，监测方法及检测技术是评价水力压裂致裂效果的关键部分，从以上 3 点对水力压裂物理试验的相似理论发展、试验材料和装置的演变、常用监测检测方法的特点和适用范围等方面进行了总结。分析认为：水力压裂的相似准则已经初步成形，但需要结合煤岩物理力学特性进一步修正，并利用数值模拟手段探究相似准则推导中忽略的次要因素影响程度，提高经验方程的可靠性与适用性；针对煤岩的多种物理力学性质，现阶段已得出许多相似材料的经验配比方程，但仍需要一套详尽的配比试验规范及大量试验尝试，提升试验的可重复性，以建立更具普适化的相似材料配比经验方程数据库；压裂装置正向着模拟条件更多、模拟范围更广、模拟尺度更大的多场耦合方向发展，压裂方法也随着工程应用逐渐多样化，但压裂装置三轴加载精度有待进一步提高，以保证高应力条件下压裂试验的有效进行，降低试验操作对最终结果的影响；监测方法与检测技术对水力压裂致裂效果的评价各有优势，相似材料对监测方法与检测技术的有效性与准确性也影响显著，如何依据试验需求确定适合的相似材料、合理地选择和结合监测方法与检测技术，是应对微细观结构研究需求的关键。

关键词: 煤岩水力压裂; 物理模拟试验; 相似原理; 相似材料
中图分类号: TD712.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253−2336(2022)12−0062−11

Review and prospect of coal rock hydraulic fracturing physical experimental research

LI Quangui[1,2], DENG Yize[1,2], HU Qianting[1,2], WU Xiaobin[1,2], WANG Xiaoguang[3], JIANG Zhizhong[4], LIU Le[5], QIAN Yanan[1,2], SONG Mingyang[1,2]
(1. *State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control*, *Chongqing University*, *Chongqing* 400044, *China*; 2. *School of Resources and Safety Engineering*, *Chongqing University*, *Chongqing* 400044, *China*; 3. *School of Civil Engineering*, *Chongqing Jiaotong University*, *Chongqing* 400074, *China*; 4. *College of Mining*, *Guizhou University*, *Guiyang* 550025, *China*; 5. *Xi'an Research Institute of China Coal Technology and Engineering Group Corp*, *Xi'an* 710054, *China*)

Abstract: Physical simulation of hydraulic fracturing is an approximate representation of fracture evolution and its dynamic process, which represents an important direction of fracture evolution research. Similarity theory is the theoretical basis of the transformation between field prototype and experimental model. Test equipment and similar materials are the material premise of physical simulation experiment. Monitoring and detection technology is the key part to evaluate the fracturing effect of hydraulic fracturing. This paper summarizes the development of similarity theory of hydraulic fracturing physical experiments, the evolution of experimental materials and devices,

收稿日期: 2022−03−08 **责任编辑:** 黄小雨 **DOI:** 10.13199/j.cnki.cst.mcq22-08
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52074049); 国家科技重大专项资助项目(2016ZX05045004)
作者简介: 李全贵 (1986—), 男, 河南民权人, 副教授, 博士生导师。 E-mail: liqg@cqu.edu.cn
通讯作者: 邓羿泽 (1998—), 男, 甘肃兰州人, 硕士研究生。 E-mail: dengyize@foxmail.com

and the characteristics and application scope of common monitoring and detection methods from the above three aspects. The analysis shows that: the similarity criterion of hydraulic fracturing has been preliminarily formed, but it needs to be further modified according to the physical and mechanical properties of coal and rock. Numerical simulation method can be used to explore the influence degree of minor factors ignored in the derivation of similarity criterion, so as to improve the reliability and applicability of the empirical equation. In view of various physical and mechanical properties of coal and rock, many empirical formula equations of similar materials have been obtained at present, but a set of detailed experimental specification and a large number of experimental attempts are still needed to improve the repeatability of the experiments, so as to establish a more universal database of empirical equations of similar material matching. Fracturing devices are developing towards the direction of multi-field coupling with more simulation conditions, larger simulation scale and wider simulation range, and fracturing methods are gradually diversified with engineering applications. However, the accuracy of triaxial loading of fracturing devices needs to be further improved to ensure effective fracturing experiments under high stress conditions, and reduce the impact of experimental operations on the final results. Monitoring methods and detection technologies have their own advantages in evaluating the fracturing effect of hydraulic fracturing, and similar materials also have a significant impact on the effectiveness and accuracy of monitoring methods and detection technologies. How to rationally select and combine monitoring methods and detection technologies based on experiments is the key to meet the research needs of micro-structures.

Key words: coal rock hydraulic fracturing; physical simulation experiment; similarity principle; similar materials

0　引　　言

水力压裂技术是油气开发增产的核心技术之一，在煤炭开采领域主要体现在煤层增透、顶底板弱化等方面，其中压裂过程中裂隙演化过程及致裂机理是水力压裂技术研究的关键科学问题[1]。目前，煤岩水力压裂相关研究的主要手段包括理论分析、物理模拟试验、数值模拟和现场试验。理论分析是水力压裂技术研究的基础；物理模拟和数值模拟试验是检验理论正确与否的重要手段，可为现场试验提供技术支撑与参考；同时，物理模拟试验也是评估数值模拟结果可靠性的必要方法，现场试验与应用是科学研究的最终目的。由于物理模拟相较于数值模拟与现实存在更强的对应关系，有着比现场试验成本低、更加易于操作的特点，因此在水力压裂研究中扮演着重要角色，而更科学严谨的物理模拟试验设计对水力压裂致裂机理的探索是不可或缺的。目前物理模拟主要有压裂工艺参数[2]、压裂机理[3]、裂隙演化[4-5]、裂缝形态[6-7]及多物理场耦合[8]等方面，诸多成果已在工程试验中取得了良好印证[9-10]。

然而，煤岩水力压裂物理模拟还面临很多问题亟待解决，如相似理论如何有效指导物理模拟试验，相似材料如何更真实地模拟煤岩性质，压裂装置如何还原煤岩赋存环境，监测技术如何提取、分析试验结果，物理模拟如何更好地为现场试验提供支撑等。针对以上问题，从理论研究到试验条件多方位综述了煤岩水力压裂物理模拟试验取得的进展，并对上述问题进行分析，提出一些展望，以期对煤岩水力压裂物理模拟试验的改进提供方向。

1　煤岩水力压裂相似理论与相似材料

1.1　相似理论

相似理论是现场原型与试验模型转换的理论基础[11]。其中，相似正定理是现象相似的必要条件；相似逆定理是现象相似的充分条件，也是物理模拟试验合理性的保障；相似 π 定理则是基于相似正定理和相似逆定理，通过量纲分析法导出现象的相似准则[12-13]，可为试验参数设计提供可靠的理论依据，结果更容易推广至现场试验。为了科学定量地进行水力压裂模拟试验，国内外学者从多角度提出了水力压裂的相似准则，在水力压裂致裂机理发展方面发挥了至关重要的作用。

DE 等[14]针对高黏度流体与低断裂韧性岩体，较早地开展了水力裂缝扩展模型的相似准则研究；柳贡慧等[15]基于 Clifton 等提出的裂缝延伸控制方程，通过方程分析法得出了水力压裂的相似准则；郭天魁等[16]以此为基础，考虑射孔井裂缝起裂压力方程，导出了射孔井水力压裂相似准则；YANG 等[17]考虑了压裂液的粘度、密度及流动速度等因素，提出以雷诺数作为压裂液模拟的相似准则。此外，对于松软煤（构造煤）储层，现有基于弹性力学推导的相似理论难以满足需求，煤岩材料更多体现的是非连续介质的特性，桑树勋等[18]引入了压缩模量的概念来描述煤岩体的变形特性。在上述相似准则的指导下，实现了对水力裂缝起裂及延伸的动态监测[19]、压裂后的裂缝形态分析[20]、煤岩应力释放区域预测等目标，有助于建立水力裂缝的起裂、扩展机理及多因素协同作用下煤岩失稳破坏模型[21]。然而，相似准则在指导煤岩水力压裂物理模拟试验时，仍有一些关

键点有待解决。

首先，相似准则对实际问题的简化可能改变试验结果的走向。在使用量纲分析法得到相似准数进行模拟试验时，常常只考虑主要参数，根据条件对问题进行简化，从而推导相似准则[22]，但对问题的简化一般基于经验总结，缺少必要的证明，使得模拟结果与实际问题有时出现较大偏差。其次，当前的水力压裂相似准则没有考虑煤体的特殊性。现有相似准则多是基于岩体导出的，分析对象为连续的线弹性体，在用于煤岩水力压裂时，需要考虑煤体孔隙度与割理结构等方面的差异性，结合实际煤体特性对相似准则进行修正。如孟尚志等[23]在探究复合储层水力压裂致裂机理时，基于柳贡慧等[15]导出的相似准则对试验参数进行了设计，但忽略了相似准则对于煤、砂岩、页岩 3 种材质的适用性。

1.2　相似材料

随着物理模拟试件尺寸的逐步增大，大尺寸试件的取样难度逐渐凸显出来，尤其是现场原煤取样尺寸受限，成型难，相似材料代替原煤进行模拟试验成为了常用的手段。而模拟试验的成功与否，关键在于选择合适的原材料并确定配比关系，使相似材料的物理、力学、渗流性质满足相似准则，尽可能还原煤的特性。在现有的研究中，相似材料的主体由骨料、胶结物和辅料 3 部分组成，骨料是起到骨架和填充作用的粒状材料；胶结物是胶结其他物料制成复合固体的物质；辅料是调节材料物理化学性状的辅助性物质。现阶段用于煤岩相似材料配制的原料及其产生的主要影响见表 1。

表 1　常见相似试验原材料及特性

Table 1　Common raw materials for similar experiments and their characteristics

组分	原料	共性	特性
骨料	煤粉	决定相似材料的密度、级配，主要影响材料强度	孔隙结构、容重、吸附性等与原煤相近
	细沙		调节材料孔隙度
胶结物	水泥	影响相似材料的强度及变形破坏特性	提高强度，增大材料脆性
	石膏		提高强度
	腐植酸钠水溶液		吸附性能与原煤相近，能渗入煤的微孔结构，可调节孔隙率，提高强度
	石灰		降低强度
	碳酸钙		降低强度
辅料	硼砂溶液	调节相似材料特定性能	缓凝剂
	磷酸二氢钠		缓凝剂
	甘油		保湿剂
	活性炭		减密剂，可调节孔隙率、吸附性
	重晶石粉		增密剂

相似试验原材料的选择可以结合试验需求与原料特性来确定，而配比关系的确定需要进行不断试验尝试。目前，相似试验的材料配比大都是基于前人成果，找寻合适的材料，然后通过试验得到配比。配制满足相似准则的相似材料需要定量地把控各因素对最终结果的作用，而目前的配比试验大多是定性地分析各因素对相似材料性质的影响，这些试验材料配比的成果难以为后续研究提供支撑和参考。针对这一问题，一些科研人员基于特定的原材料、煤岩力学参数，进行了大量的配比试验，考察原材料对相似材料物理力学性质、孔隙率、吸附性等影响，并得出相关经验公式，预测材料的特性，见表 2。

基于以上经验公式，相似材料的配制可以定量得到满足相似准则的试验配比，省去了长周期的配比试验[28]。但煤岩相似材料的配制试验仍旧存在一些问题。现阶段，相似材料配比试验缺少一套定量化的、统一的标准和规范。针对配比试验中的原料具体信息、成型模具选择、制作工艺，以及骨料的粒径分布、搅拌均匀程度、原浆的压实程度、振动台的震动时间和养护方式等，没有详细的说明，但这些因素会一定程度上影响相似材料的物理力学性质。由于这些操作因素的不确定性，导致根据现有研究配比数据得到的试件，性质却与现有研究成果不同，降低了前人研究成果对后人进行科研的参考价值。其次，煤岩相似材料模拟的精度也有待进一步深入，目前针对煤岩物理力学性质、渗流、吸附解吸、气固耦

合等方面已进行了大量的配比试验，但煤体固有的非均质性及其复杂的微细观结构却在相似材料中无法构建，但这些因素对煤岩水力裂缝的起裂与延伸起到关键性作用[29-30]。

其次，相似材料配比经验方程的广度及可靠性亟待完善。配比试验经验方程所涉及的原料组合很有限，有时不能满足当前科研需求，且经验方程所给出的物理力学参数往往是很有限的，无法满足相似准则的需求。大多数经验方程是基于已有的试验结果进行多元拟合得到的，而受正交试验设计原则和试验工作量等因素的影响，配比试验所涉及的水平数和取值范围也是比较有限的，较少的水平数决定了较少的拟合点数，使经验方程的可靠性降低，有限的取值范围也使经验方程的适用范围减少。

表 2　配制煤岩相似材料的经验方程

Table 2　Empirical equation for preparing coal rock similar materials

文献来源	材料	因素	指标	经验公式
[24]	水泥、石膏、石英砂、硼砂、水	砂胶比X_1、水膏比X_2、石英砂粒径X_3	吸水率Y_1、软化系数Y_2、渗透系数Y_3	Y_1=0.126+0.010X_1−0.045X_2+0.039X_3; Y_2=0.498−0.004X_1+0.220X_2−0.011X_3; Y_3=−16.762+2.115X_1−7.898X_2+7.874e$^{0.548X_3}$
[25]	煤粉、水泥、沙子、水	水泥比例X_1、沙子比例X_2、成型压力X_3	单轴抗压强度Y_1、弹性模量Y_2、CH_4放散初速度Y_3、CO_2放散初速度Y_4、孔隙率Y_5	X_3=40.507−4.831Y_5; X_1=1.22+2.755Y_1−0.129X_3或 X_1=1.641+0.03Y_2−0.078X_3; X_2=94.675−0.739X_1−2.959Y_3或 X_2=88.697−0.861X_1−2.1Y_4
[26]	石膏、浮石、硅藻土、水	硅藻土水泥石膏比X_1、标准砂浮石比X_2、骨胶比X_3、重晶石骨料比X_4	单轴抗压强度Y_1、软化系数Y_2、密度Y_3、孔隙率Y_4	X_1=6.08Y_1−10.85Y_2+0.086Y_3+31.80Y_4−26.64; X_2=2.29Y_1−217.81Y_2−0.372Y_3+122.38Y_4+361.99; X_3=50.31Y_1−11.70Y_2+0.206Y_3−47.19Y_4−101.15; X_4=10.56Y_1+0.023Y_2+0.003Y_3−0.215Y_4−16.47
[27]	河沙、碳酸钙、水泥、液压油、滑石粉、凡士林	河沙骨料比A、碳酸钙、滑石粉比B、水泥凡士林比C、液压油用量D	密度ρ、单轴抗压强度σ_c、单轴抗拉强度σ_t、渗透率系数K	ρ=1.809 64-0.069 04A−0.004 56B+0.029 76C+0.009 24D; σ_c=−2.045 62+3.276A−0.130 9B+0.469 3C−5.75D; σ_t=−0.192 18+0.291A−0.007 8B+0.043C−0.424D; K=0.000 314 41−0.000 255 5A−0.000 027 66B−0.000 030 62C+0.000 279 41D

2　试验装置及压裂方式

水力压裂物理模拟试验装置一般由围压加载系统、泵注系统、数据采集系统等多部分组成。同时，传统水力压裂形式单一，不易控制，往往达不到施工要求，因此越来越多的研究者开始在实验室内进行不同压裂方式的物理模拟。表 3 统计了部分国内可进行水力压裂物理模拟试验的装置及其特性。

三轴加载系统的主要作用是模拟地应力状态，在经历手动杠杆系统、刚性机架试验机、电液伺服控制等阶段后，逐渐进入计算机控制的液压伺服加载时代[31]。依据对地应力的模拟程度将其划分为假三轴和真三轴两大类。如图 1 所示，假三轴水力压裂试验装置通过液压对圆柱试件进行加载，可以研究轴向、围压等参数的作用效果。经过数十年的发展，假三轴加载装置已经能够很好地融入渗流、蠕变、高低温环境、瓦斯赋存环境、声发射监测、超声检测等功能。而真三轴水力压裂试验装置的三向应力互相独立，能够更真实地模拟井下煤岩的受力状况，可以获得应力水平、应力状态等参数对压裂效果的影响，受到了各高校和科研院所的重视。真三轴装置逐步成为水力压裂模拟试验的主体，新装置的研发正在融合渗流[32]、声发射监测[33]、含瓦斯条件模拟[34] 等需求。而在围压加载方式方面，现阶段主要分为力控制和位移控制，动力主要由伺服电机或油缸提供。伺服电机由于其良好的机电特性，可以十分精准地控制围压，实现伺服过程，但由于其传动系统的限制，对于较大的围压条件难以实现；油缸由于其简单的力学结构，能很轻松地实现较高围压条件，但其精准度非常依赖控制系统。此外，表 3 所示，试件尺度逐渐由 100 mm×100 mm×100 mm[35] 过渡到 400 mm×400 mm×400 mm[36]，如重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室自主研制的深部多物理场耦合试验装置，试件尺寸达 1 800 mm×1 200 mm×1 200 mm；由中国矿业大学、山东大学、淮南矿业集团共同研发的大尺度真三维煤与瓦斯突出模拟试验系统[37]，试件尺寸达 730 mm×730 mm×1 300 mm，并在加载方式、密封方式、监测方法等方面进行了创新，实现了气压、温度、应力多参量耦合监测。上述大型试验装

表 3　水力压裂物理模拟试验装置统计

Table 3　Statistics of hydraulic fracturing physical simulation experimental device

三轴加载排式	压力	泵注类型，泵压范围/MPa，最大泵流量/(mL·min^{-1})	试件尺寸/mm	耦合性能	监测及检测	科研单位
拟三轴	轴压1 000 kN，围压60 MPa	泵压伺服增压器, 20, —	ϕ50×100 ϕ100×200	固, 液, 气, 温度	泵压, 流量, 温度, 气压, 轴向, 径向位移	重庆大学
	轴压480 kN，围压8 MPa	柱塞计量泵, 20, 66.67	100×100×100 150×150×150 200×200×200	固, 液	泵压, 应变, 流量	安徽理工大学
	轴压2 000 kN，围压80 MPa	伺服控制泵, 70, 600	ϕ100×200	固, 液	应变, 位移, 泵压, 流量	中科院武汉岩土力学研究所
真三轴	围压2 000 kN	脉动泵, 2, 40 000	100×100×100 200×200×200 300×300×300	固, 液	泵压, 流量	中国矿业大学
	围压13 MPa	电动恒压泵, 16, —	300×300×300	固, 液, 电	泵压, 超声, 电压	太原理工大学
	围压25 MPa	手动试压泵, 30, 60	200×200×200	—	泵压, 流量	辽宁工程技术大学
	围压20 MPa	高压水泵, 31.5, 200	300×300×300	固, 液, 气, 温度	应变, 气压, 流量, 泵压, 温度	重庆大学
	围压3 000 kN	恒速恒压泵, 40, 200	400×400×400	固, 液, 气, 温度	泵压, 温度, 流量, 应力应变	太原理工大学
	围压4 000 kN	液压稳压加载系统, 60, 2 500	300×300×300 500×500×500	固, 液	RSM声波仪, 位移, 泵压, 流量	中国矿业大学
	围压69 MPa	循环泵, 82, 180	762×762×914	固, 液	泵压, 流量, 应变片, 声波波速	中国石油勘探开发研究院
	围压40 MPa	高压平流泵, 100, 60	400×400×400	固, 液	泵压, 流量	中国石油大学(北京)
	围压3 000 kN	压裂泵伺服控制, 100, 9 000	800×800×800	固, 液	泵压, 流量	中科院武汉岩土力学研究所
	围压40 MPa	气液增压泵, 100, —	400×400×400	固, 液	泵压, 红外监测, 高速图像采集	辽宁工程技术大学

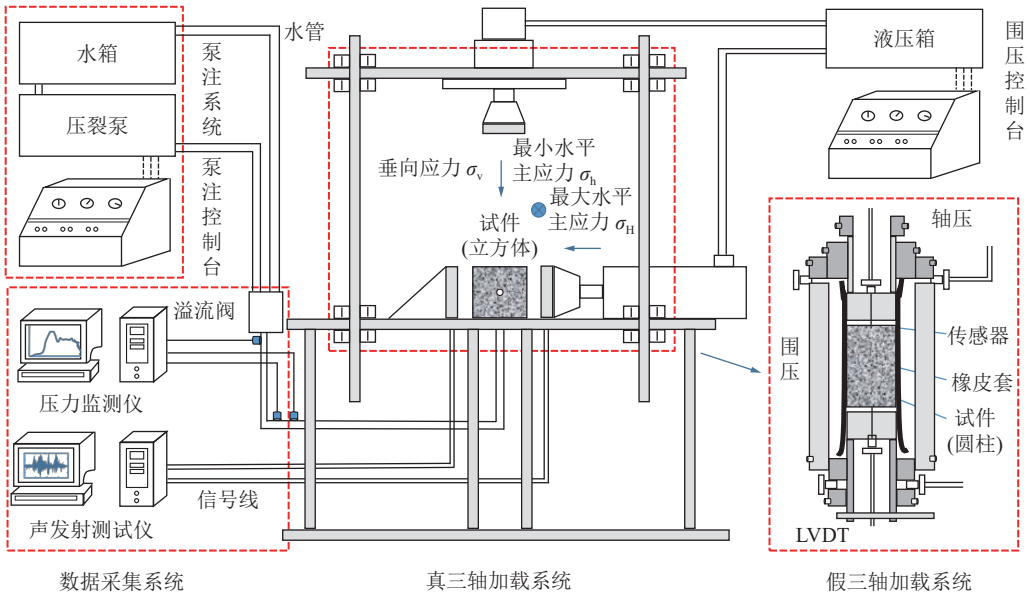


图 1　真(假)三轴水力压裂试验系统示意

Fig.1　True (false) triaxial hydraulic fracturing experiment system

置与压裂泵结合，能更大地扩展研究范围，尽可能地消除边界效应、尺寸效应的影响。

泵注系统是向试件泵注液体，模拟压裂液注入的重要设备，按照注液方式的不同可分为静压泵和脉动泵。静压泵多用于常规水力压裂试验，向试件提供恒定压力或恒定流量的压裂液；而脉动泵多用于脉动水力压裂试验，将具有一定频率的压裂液注入试件，通过周期性的脉动波促使煤岩发生疲劳破坏。目前，试验用压裂泵多采用伺服系统来调节流量、压力等关键性能参数；同时，这些参数的可调节范围也逐渐趋于多元化，以满足不同的试验需求。针对页岩、砂岩等高强度、低渗透性岩体的水力压裂

试验装置多采用较高的输出压力和较低的泵流量[38-39]；而针对煤体水力压裂的试验装置更倾向于较低的输出压力和较高的泵流量[40-41]。

数据采集系统的主要作用是采集、传输、显示和保存水力压裂过程中的煤岩物理力学特性参数及环境参数，一般包括三轴压力传感器、注水管路压力传感器、气体压力传感器、应变采集仪、流量传感器、时间及温度传感器等。目前，数据采集系统正朝着更大的采样范围、更多的采样形式、更高的采样频率与采样精度发展，以满足不断发展的水力压裂试验需求。

其次，随着设备向流、固、气多场耦合方向的发展趋势，含气设备的密封效果在试验中也起到至关重要的作用。现阶段压裂设备对试件的密封方式主要有油封密封、垫密封、密封胶密封等。如表 3 中重庆大学拟三轴压裂设备，在使用液压油进行围压加载的同时配合橡胶垫，可对试件进行密封，实现气体的渗流过程；中国矿业大学的大尺度真三维煤与瓦斯突出模拟试验系统，在内部数据线穿孔处采用密封胶密封，围压加载处采用反力密封单元，随着内部压力的升高密封效果也会随之加强。

随着煤岩开采深度的增加，高地应力、高瓦斯压力、高温等因素都会成为模拟试验难以实现的地质条件。当前，水力压裂物理模拟装置的耦合温度已经可以达到 200 ℃，瓦斯压力可以达到 6 MPa，基本实现了对千米深井温度和瓦斯压力的模拟。三轴压力传感器的采样范围达到了 150 MPa；管路压力传感器的采样范围达到了 160 MPa。

随着压裂装置的不断发展，压裂方式也逐渐多样，如定向压裂、分段压裂和脉动压裂等，更加贴近工程。

定向压裂是指在压裂孔处进行水力割缝或在相近区域钻进卸压孔，从而实现定向水力压裂。葛兆龙等[42] 针对传统水力压裂裂缝倾向于沿最大主应力方向传播与实际工程需求不一致的问题，进行了定向水力压裂的物理相似性模拟试验，得到了裂纹扩展规律和裂纹扩展控制机理，并验证了定向压裂技术可以实现沿所需方向的裂缝导向传播。

分段压裂是在煤层或顶底板进行长钻孔分段水力压裂、梳状钻孔水力压裂，从而提高煤层整体渗透性。姜在炳等[43] 运用声发射监测技术对煤层顶板长钻孔压裂时的裂缝扩展规律展开试验研究，得出施工排量、水平距离对压裂效果具有显著影响，最佳分孔间距是缝高 2~3 倍。张群等[44] 设计并建立了表征人工顶板—煤层—底板 3 层结构的三维相似材料物理模型，开展了围压作用下的顶板岩层水平井水力压裂物理模拟试验，为顶板岩层水平井分段压裂强化改造碎软低渗煤层的可行性提供了试验佐证。

脉动压裂是将稳定的静荷载形式转换为具有动态特征的脉动荷载形式，使得煤体裂隙承受脉动荷载的反复作用，从而发生疲劳破坏，促进微小裂隙最大程度地发育、扩展及贯通，形成丰富的裂隙网络，为瓦斯流动提供通道。翟成等[45] 研究了不同裂隙形态对脉动压力传播的影响，李全贵等[46-47] 利用物理试验探索了脉动频率对裂隙扩展的影响及不同频率组合的作用效果，得出脉动压裂时试样内部变化可分成脉动水充满原始裂隙、裂隙发育和扩展、裂隙贯通 3 个时期。

总体来说，水力压裂物理模拟试验装置能模拟的试件尺寸较为多样，能够实现的耦合性能、泵注条件与数据采集措施越来越完善，也能够实现不同压裂方式的模拟，基本满足当前煤岩水力压裂的试验需求。但随着开采深度的加深，面对更加复杂的开采环境以及对多场耦合的需求，水力压裂物理模拟试验装置还存在些许不足，其中最为明显的是煤岩试件在未正式压裂前容易受损。由于较大尺寸试件的三轴加载还很难完全实现同步加载，在围压加载过程中煤岩试件由于内部应力分布与真实状态不匹配，比较容易受损。其次是对深部开采环境的模拟还不够全面，深部煤岩伴随着高应力状态、高地温及高瓦斯压力等环境条件，如何模拟这些环境条件，是水力压裂物理模拟试验有效性的关键。

3　监测手段及检测技术

对水力压裂状态、效果的评价仅凭直观的压力、流量、应变等物理参量是远远不够的，往往需要结合其他技术手段对水力压裂的致裂效果进行综合评价。常用于水力压裂致裂效果评价的技术手段按照是否能动态采集水力裂缝的演化数据为基础，可分为监测手段和检测技术两大类。伴随着计算机、数字化与图像识别技术、神经网络及机电一体化的快速发展，监测手段逐渐多样，检测技术也获得了较大发展，呈现出智能化与精确化的趋势。监测及检测技术的快速发展为准确表征水力裂缝的演化提供了有力的保障，常用的水力压裂效果评价监测手段及检测技术见表 4。

除上述常用水力压裂的监测技术与检测手段，也有科研人员借助红外、成像仪（单轴）[57]、RSM 声

表 4　监测及检测技术对水力压裂的效果评价

Table 4　Effect evaluation of monitoring and testing technology on hydraulic fracturing

项目	信号来源	适用阶段	效果	要求	特点
声发射监测	试件破裂或变形产生的声波	实时动态、全过程监测	定位[48-49]、反映裂隙形成过程及严重程度	不受形状、大小及材料的限制	可提供缺陷随外参量变化的实时动态信息，但噪声干扰会影响结果
常规压裂参数监测	压力、应变、温度等环境因素的改变	实时动态、全过程监测	反映压裂过程中的压力、应变、温度等参数	不受试件限制	可实时采集、传输、显示、保存压裂过程中的压裂、环境参量，但无法直接描述试件缺陷
电阻率监测	电信号	实时动态、全过程监测	反映压裂过程裂隙扩展阶段及效果[50]	要求试件表面平整，不受材料限制	能高精度捕捉试样压裂过程的瞬态响应及水分变化情况，但电信号与破坏特征的对应关系较少，无法准确区分水力裂缝的详细扩展情况
数字图像相关DIC	光学信号	实时动态、全过程监测	重现压裂试件表面全场应变及位移	不受试件限制	对试验环境要求宽松，抗干扰能力强、测量精度高，但测量面不能有遮挡，无法施加围压
分布式光纤声波传感技术	光学信号	实时动态、全过程监测	反映压裂液的分布、压裂过程微地震信号、应变信号[51-52]	不受试件限制	无电子元件、不受电磁辐射的干扰、耐高温，但数据量巨大，且缺乏成熟的分析模型
CT检测	X射线 γ射线	点检测，压裂前后	重现三维形态[53]（包括位置、取向、大小、形状等）	尺寸的限制较大	可无损检测试样内部特征，但分辨率与试样尺寸成反比，金属成分会对图像产生干扰
超声波检测	超声波	点检测，压裂前后	定位、检测表面裂纹深度[54]	材质均匀、晶粒较小，形状规则，表面平整	灵敏度高，可检测内部尺寸很小的缺陷，但难以识别缺陷类型，且声束变向易造成信号误判
扫描电镜	二次电子信号	点检测，压裂前后	获取裂缝表面颗粒组成、起伏状况等细微观信息[55]	尺寸限制极大，仅限于表面	图像分辨率高，可清晰测量微观结构，放大率与扫描尺寸成反比
三维扫描	激光	面检测，压裂后	复建破裂面三维模型[56]	不受形状、材料及大小的限制	高精度、高分辨率，但对破裂面的检测需破坏试件

波仪和 TDS 微震采集系统[58]、视电阻率等技术对水力压裂的致裂效果、煤岩体的体积应变进行评价。声发射监测、应变监测、红外监测、声波检测及高速图像采集等，可以实时动态反映水力压裂过程中裂缝的起裂延伸等过程伴随的能量释放、微小尺寸变化、受载情况及表面的裂缝延伸情况信息，并生成与时间相关的动态曲线，结合管路压力-时间曲线，可对水力压裂全过程进行动态分析。而针对现有监测技术无法直观地反映试件内部水力裂缝的发育状况这个问题，谢和平团队[59]凭借 3D 打印技术，结合透明相似材料重构煤岩体，提出了应力冻结技术监测压裂过程的应力应变变化。

水力压裂致裂效果的综合评价除了水力裂缝的最终形态，还要掌握水力裂缝起裂和延伸的过程，这就要求在进行水力压裂试验时合理地配置监测技术与检测手段。如 SAMPATH 等[60]结合声发射定位信号和 CT 扫描呈现的煤体颗粒边界来确定水力裂缝的最优扩展路径。有效地结合监测手段与检测技术，对深入研究裂缝的起裂、扩展机理是必要的数据支撑。然而，相似材料多为颗粒状结构，在受到一定作用力时，容易发生晶粒间的错动产生噪声干扰，且孔隙结构相对发育的相似材料试件也不利于声发射信号的传播，信号衰减明显，对声发射信号的传播影响较大。且部分检测技术的设备精度落后于试验需求，随着对煤岩微细观结构的探索，高分辨率的技术手段更有利于探究水力压裂试验在微细观层面产生的影响，检测技术的发展应当超前于试验研究。这些问题依然制约着水力压裂分析手段的进一步发展。

4　结论与展望

1）国内外学者根据已有的水力压裂控制方程得出了可以指导当前水力压裂模拟试验的相似准则，然而随着水力压裂试验研究的深入，水力压裂相似理论还需要不断完善。在现有水力压裂相似准则的基础上，需针对煤岩的物理力学特性进行必要修正，得到关于煤岩的水力压裂相似准则；推导相似准则时，可采用数值模拟的手段对忽略掉的相似准数进行试验，探究次要因素对水力压裂相似准则结果的影响程度。

2)煤岩相似材料的配比试验在原料性质、试验配比等方面取得了许多研究成果，由于研究对象性质及制作规范等方面的差异，前人的研究成果很难为后人的试验研究提供支撑。煤岩相似材料的配制，需要一套详尽的、定量化的试验规范或标准，以避免他人进行重复试验时可能导致的结果差异；配比试验可结合数值模拟等手段，将经验方程囊括更广泛的原料组合、煤岩参数及正交水平，建立一套关于煤岩相似材料配比的经验方程数据库。

3)水力压裂物理模拟试验装置的研制以及多种压裂方式的模拟已取得一定成果，在之后的科学研究中，应针对深部煤岩的赋存状况，研发能模拟高地应力、高温及高瓦斯压力等复杂环境的水力压裂试验模拟装置。严格把控水力压裂的三轴加载精度，提高伺服控制系统的灵敏度和可靠性，并着力解决大尺寸试件三轴加载不同步的问题，尽可能保证煤岩试件在压裂外的不必要损伤，是高地应力条件下水力压裂试验有效进行的保障。

4)监测技术适用于动态反映水力压裂过程中环境、压裂参量的变化；检测手段更侧重对水力裂缝的描述，适当的结合监测技术与检测手段，可以更加全面地认识水力压裂的演化过程。一方面，相似材料制作时可以增加一定的成型压力，压缩颗粒间的孔隙，减少由于孔隙结构对声发射信号产生的影响。另一方面，未来的水力压裂试验中，监测手段与检测技术在设备精度、结构算法等领域均需要进一步的突破，以更好地应对微细观结构的研究。

参考文献(References)：

[1] ZHANG Yuebing, LI Quangui, HU Qianting, *et al*. Pore wetting process characterization of equal-sized granular coals by using LF-NMR technology[J]. Fuel, 2022, 313: 107887.

[2] LU Yiyu, CHENG Yugang, GE Zhaolong, *et al*. Determination of fracture initiation locations during cross-measure drilling for hydraulic fracturing of coal seams[J]. Energies, 2016, 9(5): 358.

[3] 王　海, 杨兆中, 李　岳, 等. 沁水盆地深部复杂结构煤储层钻完井及压裂工艺研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(9): 105−111.
WANG Hai, YANG Zhaozhong, LI Yue, *et al*. Study on drilling and fracturing technology for deep complex structure coal reservior in Qinshui Basin[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(9): 105−111.

[4] HU Qianting, JIANG Zhizhong, LI Quangui, *et al*. Induced stress evolution of hydraulic fracturing in an inclined soft coal seam gas reservoir near a fault[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2021, 88: 103794.

[5] WU Caifang, ZHANG Xiaoyang, WANG Meng, *et al*. Physical simulation study on the hydraulic fracture propagation of coalbed methane well[J]. Journal of Applied Geophysics, 2018, 150: 244−253.

[6] HU Qianting, LIU Le, LI Quangui, *et al*. Experimental investigation on crack competitive extension during hydraulic fracturing in coal measures strata[J]. Fuel, 2020, 265: 117003.

[7] 李全贵, 邓羿泽, 胡千庭, 等. 煤层水力压裂应力与裂隙演化的细观规律[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(6): 32−40.
LI Quangui, DENG Yize, HU Qianting, *et al*. Mesoscopic law of stress and fracture evolution of coal seams hydraulic fracturing[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(6): 32−40.

[8] WANG Haiyang, XIA Binwei, LU Yiyu, *et al*. Study on the propagation laws of hydrofractures meeting a faulted structure in the coal seam[J]. Energies, 2017, 654(10): 2−17.

[9] 李贤忠, 林柏泉, 翟　成, 等. 单一低透煤层脉动水力压裂脉动波破煤岩机理[J]. 煤炭学报, 2013, 38(6): 918−923.
LI Xianzhong, LIN Boquan, ZHAI Cheng, *et al*. The mechanism of breaking coal and rock by pulsating pressure wave in single low permeability seam[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(6): 918−923.

[10] 林柏泉, 孟　杰, 宁　俊, 等. 含瓦斯煤体水力压裂动态变化特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012(1): 106−110.
LIN Baiquan, MENG Jie, NING Jun, *et al*. Research on dynamic characteristics of hydraulic fracturing in coal body containing gas[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012(1): 106−110.

[11] 徐　挺. 相似理论与模型试验[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1982.

[12] 杨景贺. 相似材料模型试验应力测试装置的研制及应用[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(4): 114−119.
YANG Jinghe. Research and application of stress testing apparatus for similar material model test[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(4): 114−119.

[13] 袁　飞, 周佩玲, 黄志安, 等. 采空区氧化-升温耦合模拟相似准则及传热相似性研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(S2): 398−406.
YUAN Fei, ZHOU Peiling, HUANG Zhian, *et al*. Similarity criterion and heat transfer similarity of oxidation temperature coupled simulation in gob[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(S2): 398−406.

[14] DE PATER C J, WEIJERS L, CLEARY M P, *et al*. Experimental verification of dimensional analysis for hydraulic fracturing[J]. SPE Production and Facilities, 1992, 32(5): 230−238.

[15] 柳贡慧, 庞　飞, 陈治喜. 水力压裂模拟试验中的相似准则[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2000, 24(5): 45−48.
LIU Gonghui, PANG Fei, CHEN Zhixi. Similarity criteria in hydraulic fracturing simulation experiments[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 2000, 24(5): 45−48.

[16] 郭天魁, 刘晓强, 顾启林. 射孔井水力压裂模拟试验相似准则推导[J]. 中国海上油气, 2015, 27(3): 108−112.
GUO Tiankui, LIU Xiaoqiang, GU Qilin. Derivation of similarity criteria for hydraulic fracturing simulated experiments of perforated wells[J]. China Offshore Oil and Gas, 2015, 27(3): 108−112.

[17] YANG Chen, ZHOU Fujian, FENG Wei, *et al*. Plugging mechan-

ism of fibers and particulates in hydraulic fracture[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 176: 396−402.

[18] 桑树勋, 周效志, 刘世奇, 等. 应力释放构造煤煤层气开发理论与关键技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2531−2543.
SANG Shuxun, ZHOU Xiaozhi, LIU Shiqi, *et al*. Research advances in theory and technology of the stress release applied extraction of coalbed methane from tectonically deformed coals[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2531−2543.

[19] 侯振坤. 龙马溪组页岩水力压裂试验及裂缝延伸机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
HOU Zhenkun. Research on hydraulic fracturing tests and mechanism of crack extension of longmaxi shale[D]. Chongqing : Chongqing University, 2018.

[20] 谭　鹏, 金　衍, 侯　冰, 等. 煤岩定向井水力裂缝起裂及非平面扩展试验[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(3): 439−445.
TAN Peng, JIN Yan, HOU Bing, *et al*. Experimental investigation on fracture initiation and non-planar propagation of hydraulic fractures in coal seams[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(3): 439−445.

[21] 邓广哲, 王世斌, 黄炳香. 煤岩水压裂缝扩展行为特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 27(20): 3489−3493.
DENG Guangzhe, WANG Shibin, HUANG Bingxiang. Study on the behavior of hydraulic fracture propagation in coal and rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 27(20): 3489−3493.

[22] HOU Jirui, ZHENg Zeyu, SONG Zhaojie, *et al*. Three-dimensional physical simulation and optimization of water injection of a multi-well fractured-vuggy unit[J]. Petroleum Science, 2016, 13(2): 259−271.

[23] 孟尚志, 侯　冰, 张　健, 等. 煤系“三气”共采产层组压裂裂缝扩展物模试验研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 221−227.
MENG Shangzhi, HOU Bing, ZHANG Jian, *et al*. Experimental research on hydraulic fracture propagation through mixed layers of shale tight sand and coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 221−227.

[24] 史小萌, 刘保国, 亓　轶. 水泥石膏胶结相似材料在固-流耦合试验中的适用性[J]. 岩土力学, 2015, 36(9): 2624−2630.
SHI Xiaomeng, LIU Baoguo, QI Yi. Applicability of similar materials bonded by cement and plaster in solid-liquid coupling tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(9): 2624−2630.

[25] 孙海涛, 朱墨然, 曹　偈, 等. 突出煤层相似材料配比模型构建的正交试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(8): 116−122.
SUN Haitao, ZHU Moran, CAO Jie, *et al*. Orthogonal experimental study on proportioning model construction of similar materials of outburst coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(8): 116−122.

[26] 刘金辉, 李文泉, 刘宇森, 等. 多孔含水岩层的相似材料配比研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(2): 657−664.
LIU Jinhui, LI Wenxiao, LIU Yusen, *et al*. A method for determining the ratio of similar material to simulate porous water-bearing stratum[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(2): 657−664.

[27] LIU Shiliang, LIU Weitao. Experimental development process of a new fluid–solid coupling similar-material based on the orthogonal test[J]. Processes, 2018, 6(11): 211.

[28] 史小萌, 刘保国, 肖　杰. 水泥和石膏胶结相似材料配比的确定方法[J]. 岩土力学, 2015(5): 1357−1362.
SHI Xiaomeng, LIU Baoguo, XIAO Jie. Amethod for determining the ratio of similar materials with cement and plaster as bonding agents[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015(5): 1357−1362.

[29] 石欣雨, 文国军, 白江浩, 等. 煤岩水力压裂裂缝扩展物理模拟试验[J]. 煤炭学报, 2016, 41(5): 1145−1151.
SHI Xinyu, WEN Guojun, BAI Jianghao, *et al*. A physical simulation experiment on fracture propagation of coal petrography in hydraulic fracturing[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(5): 1145−1151.

[30] HUANG Bingxiang, LIU Jiangwei. Experimental investigation of the effect of bedding planes on hydraulic fracturing under true triaxial stress[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(10): 2627−2643.

[31] 张　彤. 旋转式三轴加载液压伺服系统的研制[D]. 天津: 天津工业大学, 2017.
ZHANG Tong. Development of rotary three-axis loading hydraulic servo system[D]. Tianjin: Tiangong University, 2017.

[32] 尹光志, 李铭辉, 许　江, 等. 多功能真三轴流固耦合试验系统的研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2015(12): 2436−2445.
YIN Guangzhi, LI Minghui, XU Jiang, *et al*. Development and application of multifunctional true triaxial fluid-solid coupling test system[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015(12): 2436−2445.

[33] 王维德. 煤体水力压裂声发射监测及失稳破裂特征试验研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2016.
WANG Weide. Experimental study on acoustic emission monitoring and fracture instability characteristic during hydraulic fracturing in coal[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2016.

[34] 肖晓春, 丁　鑫, 潘一山, 等. 含瓦斯煤岩真三轴多参量试验系统研制及应用[J]. 岩土力学, 2018, 39(S2): 451−462.
XIAO Xiaochun, DING Xin, PAN Yishan, *et al*. Development and application of true triaxial and multiparameter experimental system for coal rock containing methane[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(S2): 451−462.

[35] 马衍坤, 刘泽功, 成云海, 等. 煤体水力压裂过程中孔壁应变及电阻率响应特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016(S1): 2862−2868.
MA Yankun, LIU Zegong, CHENG Yunhai, *et al*. Laboratory test research on borehole strain and electrical resistivity response characteristic of coal samples in hydraulic fracture process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016(S1): 2862−2868.

[36] 姜玉龙, 梁卫国, 李治刚, 等. 煤岩组合体跨界面压裂及声发射响应特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(5): 875−887.
JIANG Yulong, LIANG Weiguo, LI Zhigang, *et al*. Experimental study on fracturing across coal-rock interface and the acoustic emission response characteristics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(5): 875−887.

[37] 袁　亮, 王　伟, 王汉鹏, 等. 巷道掘进揭煤诱导煤与瓦斯突出模拟试验系统[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(2): 205−214.
YUAN Liang, WANG Wei, WANG Hanpeng, *et al*. A simulation system for coal and gas outburst induced by coal uncovering in roadway excavation[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(2): 205−214.

[38] 周　彤. 层状页岩气储层水力压裂裂缝扩展规律研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017.
ZHOU Tong. Investigation of hydraulic fracture propagation mechanism in laminated shale gas reservoirs[D]. Beijing : China University of Petroleum, Beijing , 2017.

[39] 解经宇, 蒋国盛, 王荣璟, 等. 射孔对页岩水力裂缝形态影响的物理模拟试验[J]. 煤炭学报, 2018, 43(3): 776−783.
XIE Jingyu, JIANG Guosheng, WANG Rongjing, *et al*. Experimental investigation on the influence of perforation on the hydraulic fracture geometry in shale[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(3): 776−783.

[40] 刘　东, 许　江, 尹光志, 等. 多场耦合煤层气开采物理模拟试验系统的研制和应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2014(S2): 3505−3514.
LIU Dong, XU Jiang, YIN Guangzhi, *et al*. Development and application of multi-field coupling test system for coal-bed methane(CBM) exploitation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014(S2): 3505−3514.

[41] 程玉刚. 煤层水压裂缝导向扩展控制机理及方法[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
CHENG Yugang. The mechanism and method of direction hydraulic fracturing in coal seam[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.

[42] CHENG Yugang, LU Yiyu, GE Zhaolong, *et al*. Experimental study on crack propagation control and mechanism analysis of directional hydraulic fracturing[J]. Fuel, 2018, 218: 316−324.

[43] 姜在炳, 李浩哲, 方良才, 等. 紧邻碎软煤层顶板水平井分段穿层压裂裂缝延展机理[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S2): 922−931.
JIANG Zaibing, LI Haozhe, FANG Liangcai, *et al*. Fracture propagation mechanism of staged through-layer fracturing for horizontal well in roof adjacent to broken-soft coal seams[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S2): 922−931.

[44] 张　群, 葛春贵, 李　伟, 等. 碎软低渗煤层顶板水平井分段压裂煤层气高效抽采模式[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 150−159.
ZHANG Qun, GE Chungui, LI Wei, *et al*. A new model and application of coalbed methane high efficiency production from broken soft and low permeable coal seam by roof strata-in horizontal well and staged hydraulic fracture[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 150−159.

[45] ZHAI Cheng, YU Xu, XIANG Xianwei, *et al*. Experimental study of pulsating water pressure propagation in CBM reservoirs during pulse hydraulic fracturing[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 25: 15−22.

[46] 李全贵, 林柏泉, 翟　成, 等. 煤层脉动水力压裂中脉动参量作用特性的试验研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(7): 1185−1190.
LI Quangui, LIN Baiquan, ZHAI Cheng, *et al*. Experimental study on action characteristic of pulsating parameters in coal seam pulse hydraulic fracturing[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(7): 1185−1190.

[47] 李全贵, 武晓斌, 翟　成, 等. 脉动水力压裂频率与流量对裂隙演化的作用[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(6): 1067−1076.
LI Quangui, WU Xiaobin, ZHAI Cheng, *et al*. Effect of frequency and flow rate of pulsating hydraulic fracturing on fracture evolution[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2021, 50(6): 1067−1076.

[48] 梁天成, 刘云志, 付海峰, 等. 多级循环泵注水力压裂模拟试验研究[J]. 岩土力学, 2018(S1): 355−361.
LIANG Tiancheng, LIU Yunzhi, FU Haifeng, *et al*. Experimental study of hydraulic fracturing simulation for multistage circulating pump injection[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018(S1): 355−361.

[49] 吴晶晶, 张绍和, 孙平贺, 等. 煤岩脉动水力压裂过程中声发射特征的试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(7): 1866−1874.
WU Jingjing, ZHANG Shaohe, SUN Pinghe, *et al*. Experimental study on acoustic emission characteristics in coal seam pulse hydraulic fracturing[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(7): 1866−1874.

[50] 郭跃辉, 雷东记, 张玉贵, 等. 水力压裂煤体复电阻率频散特征试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(5): 198−202.
GUO Yuehui, LEI Dongji, ZHANG Yugui, *et al*. Experimental study on dispersion characteristics of complex resistivity of hydraulic fracturing coal[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(5): 198−202.

[51] 武绍江, 王一博, 梁　兴, 等. 页岩气储层水平井压裂分布式光纤邻井微振动监测及震源位置成像[J]. 地球物理学报, 2022, 65(7): 2756−2765.
WU Shaojiang, WANG Yibo, LIANG Xing, *et al*. Distributed fiber optic micro-vibration monitoring in offset-well and microseismic source location imaging during horizontal well fracturing in shale gas reservoir[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2022, 65(7): 2756−2765.

[52] 隋微波, 刘荣全, 崔　凯. 水力压裂分布式光纤声波传感监测的应用与研究进展[J]. 中国科学:技术科学, 2021, 51(4): 371−387.
SUI Weibo, LIU Rongquan, CUI Kai. Application and research progress of distributed optical fiber acoustic sensing monitoring for hydraulic fracturing[J]. Scientia Sinica(Technologica), 2021, 51(4): 371−387.

[53] 鲍先凯, 杨东伟, 段东明, 等. 高压电脉冲水力压裂法煤层气增透的试验与数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2017(10): 2415−2423.
BAO Xiankai, YANG Dongwei, DUAN Dongming, *et al*. The experiment and numerical simulation of penetration of coalbed methane upon hydraulic fracturing under high-voltage electric pulse[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017(10): 2415−2423.

[54] 武鹏飞. 煤岩复合体水压致裂裂纹扩展规律试验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
WU Pengfei. Experimental investigation on the crack propaga-

tion of hydraulic fracturing in coal-rock combination[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017.

[55] 倪冠华. 脉动压裂过程中瓦斯微观动力学特性及液相滞留机制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
NI Guanhua. Microscopic kinetics characteristics of methane under pulsating hydraulic fracturing and mechanism of liquid retention effect[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.

[56] 马 耕, 张 帆, 刘 晓, 等. 裂缝性储层中水力裂缝扩展规律的试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2017(5): 993−999.
MA Geng, ZHANG Fan, LIU Xiao, *et al*. Experimental study on hydraulic fracture propagation in fractured reservoir[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017(5): 993−999.

[57] 刘 奇. 天然页岩水力压裂过程中裂缝起裂方式及扩展规律试验研究[D]. 辽宁: 辽宁工程技术大学, 2019.
LIU Qi. Experimental study on fracture initiation mode and propagation law of natural shale during hydraulic fracturing[D]. Liaoning : Liaoning Technical University, 2019.

[58] 程庆迎. 低透煤层水力致裂增透与驱赶瓦斯效应研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
CHENG Qingying. Research on permeability improvement and methane driven effect of hydraulic fracturing for low permeability coal seam[D]. Xuzhou : China University of Mining and Technology, 2012.

[59] 鞠 杨, 谢和平, 郑泽民, 等. 基于3D打印技术的岩体复杂结构与应力场的可视化方法[J]. 科学通报, 2014, 59(32): 3109−3119.
JU Yang, XIE Heping, ZHENG Zemin, *et al*. Visualization of the complex structure and stress field inside rock by means of 3D printing technology[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(32): 3109−3119.

[60] SAMPATH K H S M, PERERA M S A, ELSWORTH D, *et al*. Effect of coal maturity on CO_2-based hydraulic fracturing process in coal seam gas reservoirs[J]. Fuel, 2019, 236: 179−189.