



多压力系统气藏合采物理模拟研究进展评述

李奇贤 许江 彭守建 霍中刚 舒龙勇 闫发志

引用本文：

李奇贤, 许江, 彭守建, 等. 多压力系统气藏合采物理模拟研究进展评述[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(9): 149–159.
LI Qixian, XU Jiang, PENG Shoujian. Review on the progress for physical simulation for gas reservoirs co-production in multi-pressure system[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(9): 149–159.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2022-1225>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

叠置含气系统煤层气开采物理模拟试验方法研究

Study on physical simulation test method of coalbed methane production in superimposed gas-bearing system
煤炭科学技术. 2021, 49(1): 225–233 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2021.01.018>

不同层间压差条件下叠置含气系统的定产合采试验研究

Experimental study on commingled production with constant-rate of a multi-superimposed gas system under different interlayer pressure difference
煤炭科学技术. 2020, 48(1) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/5d4ddc63-d600-426f-8d62-41309d8b8e45>

多层叠置含气系统煤层气合采储层流体动态响应特征

Fluid dynamic response characteristics of CBM coproduction reservoir in MSGBS
煤炭科学技术. 2021, 49(11): 30–37. <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/112b61f3-51d3-4a0b-a07d-0eb26b17e1fb>

绒囊钻完井流体在煤系三气合采中对储层伤害的研究

Study on damage of follicle drilling with fuzzy-ball fluid in coal measures three gas combined production
煤炭科学技术. 2021, 49(3): 194–200 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2021.03.027>

沁水盆地煤系气含气层段发育特征及其地质控制效应

Distribution and geological controls on gas-bearing section of coal measure gases in Qinshui Basin
煤炭科学技术. 2023, 51(S2): 141–151 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2022-2081>

准噶尔盆地南缘急倾斜储层煤层气多层合采产出模拟研究

Simulation study of multilayer coalbed methane production in steeply inclined reservoirs in the southern edge of Junggar Basin
煤炭科学技术. 2022, 50(7): 199–205 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/a315fb4e-c911-45d0-8757-401a99ce2442>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

地球科学与测绘



李奇贤,许江,彭守建,等.多压力系统气藏合采物理模拟研究进展评述[J].煤炭科学技术,2023,51(9):149-159.

LI Qixian, XU Jiang, PENG Shoujian, et al. Review on the progress for physical simulation for gas reservoirs co-production in multi-pressure system[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(9): 149-159.

移动扫码阅读

多压力系统气藏合采物理模拟研究进展评述

李奇贤^{1,2},许江³,彭守建³,霍中刚²,舒龙勇²,闫发志⁴

(1. 煤炭科学研究院有限公司,北京 100013; 2. 煤炭科学技术研究院有限公司,北京 100013; 3. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室,重庆 400044; 4. 太原理工大学 安全与应急管理学院,山西 太原 030024)

摘要:多压力系统气藏合采是提高叠置含气系统开发效率的重要举措之一,但特殊成藏背景导致合采效果并不理想,多压力系统气藏合采与高效开发机理是制约叠置含气系统高效勘探开发的关键科学问题。本文聚焦于多压力系统气藏合采,将合采物理模拟类型详细划分为煤层气和非煤层气两个领域进行单独阐述,从试验装置功能与特色、合采认识、存在问题等方面明确了多压力系统气藏合采物理模拟研究现状。首先,分析了现有物理模拟试验装置功能与特色,发现大尺度物理模拟试验装置可以很好的消除或弱化由并联岩心夹持器方式构建合采模型所带来的储层试样单一,监测数据手段和应力加载形式单一等问题,多压力系统合采物理模拟试验装置的发展方向应为真三维非均布复杂地应力状态下大尺度非均质多类型储层试样,相邻储层之间流体压力的传递特性、层间窜流行为以及多相态天然气共生等特性应该被考虑;在此基础上,深入总结了多压力系统合采效果对储层物性的敏感性,层间压差、渗透性、有效应力、含水饱和度等因素差异均有可能诱发合采流体干扰和储层产气伤害,优化合采制度可能是降低合采流体干扰和储层产气伤害的途径。综上分析认为,下一步研究应重点关注为探究低孔低渗、气水两相渗流、多相态天然气共生和多类型储层共存等诸多特性耦合对合采流体干扰诱导储层-井筒合采流场动态演化规律的影响,明确不同相态流体侵入对合采储层的储层伤害及其作用机理,揭示考虑合采流体干扰效应的层间窜流与井筒管流耦合流动特征。

关键词:煤系气;多压力系统;叠置含气系统;合采;物理模拟

中图分类号:P618.11 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2023)09-0149-11

Review on the progress for physical simulation for gas reservoirs co-production in multi-pressure system

LI Qixian^{1,2}, XU Jiang³, PENG Shoujian³, HUO Zhonggang², SHU Longyong², YAN Fazhi⁴

(1. Chinese Institute of Coal Science, Beijing 100013, China; 2. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 3. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 4. College of Safety and Emergency Management Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The gas reservoirs co-production in multi-pressure system is one of the important measures to improve the development efficiency of the superposed gas-bearing systems. However, the co-production effect is not ideal due to the special reservoir forming background. The mechanism of co-production and high-efficient development of the multi-pressure system has become an key scientific problem, which restricts the efficient exploration and development of superposed gas-bearing systems. This paper focuses on the gas reservoirs co-production in multi-pressure system, and divides the physical simulation types of co-production into two separate fields: coalbed methane and non coalbed methane. It clarifies the current research status of gas reservoirs co-production in multi-pressure system from the as-

收稿日期:2022-10-30 责任编辑:黄小雨 DOI: 10.12438/cst.2022-1225

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05044-002);国家自然科学基金资助项目(52074047);中国博士后科学基金面上资助项目(2023M731491)

作者简介:李奇贤(1990—),男,河北邯郸人,博士。E-mail: liqixian0219@163.com

通讯作者:许江(1960—),男,湖南永兴人,教授,博士。E-mail: jiangxu@cqu.edu.cn

pects of device functions and characteristics, understanding of co-production, and existing problems. Firstly, the large-scale physical simulation test device can effectively eliminate or weaken the problems of homogeneous single-type reservoir samples, single monitoring data means and single stress loading form caused by paralleling multiple core grippers to build the physical simulation model. The development direction of the physical simulation for co-production in multi-pressure system should be to achieve true three-dimensional heterogeneous complex in-situ stress state of large-scale heterogeneous multi-type reservoir samples. The characteristics of fluid pressure transmission between adjacent reservoirs, the inter-layer crossflow, the multi-phase natural gas symbiosis should be considered. On this basis, the sensitivity of co-production of multi-pressure system to reservoir physical properties was deeply summarized. The differences in inter-layer pressure difference, permeability, effective stress, water saturation and other factors may induce the fluid interference and reservoir gas production damage, and optimizing co-production style may be a way to reduce the fluid interference and reservoir gas production damage. In totally, the next research should focus on exploring the influence of the coupling effect of low porosity and low permeability, gas water two-phase flow, multiphase gas symbiosis and coexistence of multiple types of reservoirs on the dynamic evolution law of reservoir-wellbore flow field induced by co-production fluid interference, clarifying the reservoir damage and its mechanism of different phase fluid intrusions on the reservoir, and revealing the coupling flow characteristics of inter-layer crossflow and wellbore pipe flow considering the fluid interference effect.

Key words: coal measures gas; multi-pressure system; superposed gas-bearing systems; co-production; physical simulation

0 引言

煤系叠置含气系统在我国鄂尔多斯盆地、沁水盆地、黔西—滇东地区广泛分布,天然气储量巨大,是近年来倍受关注的天然气勘探开发新领域^[1]。煤系叠置含气系统使储层总厚度较大、资源丰度较高,决定了多层合采技术成为多煤层发育地区提高煤系气开发效率、获取最佳经济效益的重要举措之一^[2-3]。另一方面,叠置含气系统表现为同一煤系内部垂向上发育2套及2套以上地层流体压力系统相互独立的含气系统^[4],多层叠置的资源禀赋致使多层合采条件下出现产气量发生大幅度衰减,同时现阶段煤系气开发工艺技术应用性差,限制了煤系气资源的释放^[5-6]。

现阶段,中国仍以单一气藏开发为主,煤系气合采尚处于探索阶段,鄂尔多斯盆地东缘韩城、延川南、吴堡、柳林以及沁水盆地南部潘庄、樊庄、成庄、北部寿阳、黔西-滇东地区等区块的煤层气合采案例整体开发效果也并不理想^[2]。煤系气泛指煤系中赋存的各类天然气,仅是一个基于储层成因类型或地质载体做出的矿产资源定义。煤系气以煤系内生内储腐殖型气为主,源储同层或源储异层,可概括为内生自储、内生它储两大基本类型,包括煤层气和煤系砂岩气、页岩气以及煤系碳酸盐岩气等^[7],我国煤系气尚未实现规模化商业开发突破^[8]。表明叠置含气系统合采致使煤系气产气过程中的兼容性差异明显、层间矛盾突出,合采工艺实施难度加剧^[9],多压力系统气藏合采与高效开发机理是制约煤系气高效勘探开发的关键科学问题之一。

目前,关于多压力系统合采的研究手段主要有物理模拟法、试井分析法和数值模拟法,三者手段各

有利弊,互相补充。煤系气地质条件比较复杂,试井分析开展具体研究存在一定困难,数值模拟中必然存在若干假设和因素缺省,也无法考虑不可预见的地质工程因素^[10],而物理模拟试验手段是研究工程问题的重要科学方法。尽管无法较为全面系统再现现场采现象,正是物理模拟的最大缺陷,需要数值模拟予以协同,但其具有易控制、可重复,且省人力、物力的优点。因此,多压力系统煤系气合采物理模拟手段成为探究煤系气合采工艺技术的重要技术手段。我国研究者围绕多压力系统气藏合采物理模拟开展了研究工作。立足于此,分析评述该领域物理模拟研究进展,以期深化汇总多压力系统气藏合采物理模拟试验装置成果,推动气藏合采理论发展和资源的高效开发利用。

1 多压力系统物理模拟试验装置

依据模拟类型,将相关物理模拟试验装置划分为煤层气领域(表1)与非煤层气领域2个类型(表2)。

1.1 煤层气领域

双层煤层气藏合采解吸模拟试验装置由气源供给系统、储层模拟系统、流量测量系统和井底压力模拟系统组成(图1)。该装置结合了多层煤层气藏特征和多层合采产特征,实现了对各合采储层和各储层井底压力的同时模拟^[11]。

双层煤层气合采物理试验装置由气源供给系统、压力调节系统、流量监测系统、储层模拟系统和井筒模拟系统5大系统组成(图2)。该装置中井筒模拟系统中的两条气体流通之路的汇合之处为层间干扰发生创造了场所,并通过正反向流量计监测上下层的正反向流量^[12-13]。

多层叠置气藏联合开发试验装置由注入子系统、

表1 煤层气领域多层合采物理模拟试验装置统计

Table 1 Statistics of physical simulation devices of multi-layer co-production in coalbed methane field

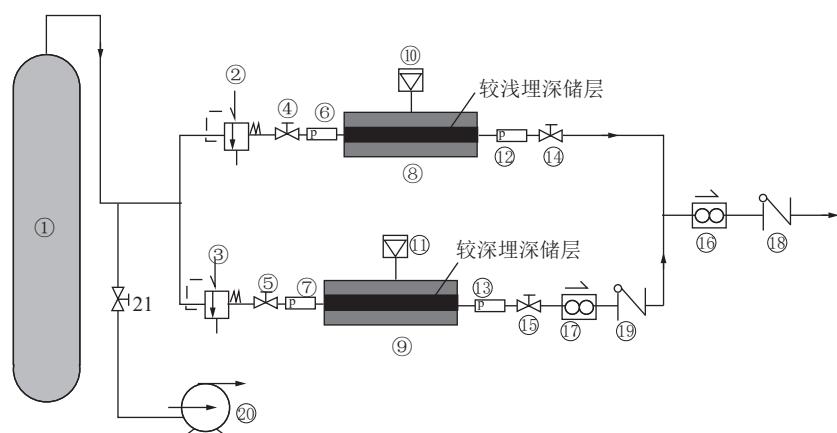
相关文献	模拟类型	研究区块	气藏类型	试件尺寸	监测数据
文献[11]		阜新刘家区煤层气田	煤层气藏	$\varnothing \times h: 25 \times 60$	f_g, P
文献[12-13]		滇东老厂区块	煤层气藏	$\varnothing \times h: 25 \times 50$	f_g, P
文献[14]		黔西织金区块	煤层气藏	$\varnothing \times h: 25 \times 50$	f_g, f_w, P
文献[15-16]	双层合采	滇东黔西地区	煤层气藏	$\varnothing \times d: 100 \times 50$	f_g, P
文献[17]		某气田	煤层气藏	$\varnothing \times h: 25 \times 60$	f_g, P
文献[18]		某气田	煤层气藏	小尺度	f_g, P
文献[19-20]		某气田	煤层气藏	小尺度	f_g, f_w, P
文献等[1,21-22]		沁水盆地	煤系气藏	$\varnothing: 25$ 和 38	f_g, P
文献等[23-29]	四层合采	贵州金佳煤矿	煤层气藏	$d \times w \times h: 1050 \times 400 \times 400$	f_g, P, S, D, T

注: \varnothing 、 d 、 w 和 h 分别为直径、长度、宽度、高度, 单位为mm; f_g 、 f_w 、 P 、 S 、 D 和 T 分别为气体流量、液体流量、压力、应力、变形、温度。

表2 非煤层气领域多层合采物理模拟试验装置统计

Table 2 Statistics of physical simulation devices of multi-layer co-production in non coalbed methane field

相关文献	模拟类型	研究区块	气藏类型	试件尺寸	监测数据
文献[30]		某气田	低渗气藏	$\varnothing \times h: 38 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$	f_g, P
文献[31]		鄂尔多斯盆地大牛地气田	低孔低渗气藏	$h: 250 \text{ mm}$	f_g, P
文献[32-34]	双层合采	鄂尔多斯盆地临兴地区	致密砂岩/页岩气藏	$\varnothing: 25 \text{ mm}$	f_g, P
文献[35]		鄂尔多斯盆地大牛地气田	致密砂岩气藏	$\varnothing \times h: 25 \text{ mm} \times 33 \text{ mm}$	f_g, P
文献[36]		苏里格气田	致密砂岩气藏	$\varnothing: 25 \text{ mm}$	f_g, P
文献[37]		鄂尔多斯盆地苏里格气田	致密砂岩气藏	$\varnothing \times h: 36 \text{ mm} \times 390 \text{ mm}$	f_g, f_w, P
文献[38-39]		柴达木盆地涩北气田	某类气藏	$\varnothing: 70 \text{ mm}$ 和 100 mm	f_g, P
文献[40-41]		鄂尔多斯盆地	致密砂岩气藏	$\varnothing \times h: 25 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$	f_g, P
文献[42-43]	三层合采	四川盆地安岳气田	缝洞型碳酸盐岩气藏	$\varnothing \times h: 25 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$	f_g, P
文献[44]		鄂尔多斯盆地临县地区	致密砂岩气藏	$\varnothing \times h: 25 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$	f_g, P
文献[45]		某气田	致密砂岩气藏	$\varnothing \times h: 65 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$	f_g, P
文献[46]	四层合采	某气田	致密砂岩气藏	$\varnothing \times h: 65 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$	f_g, P

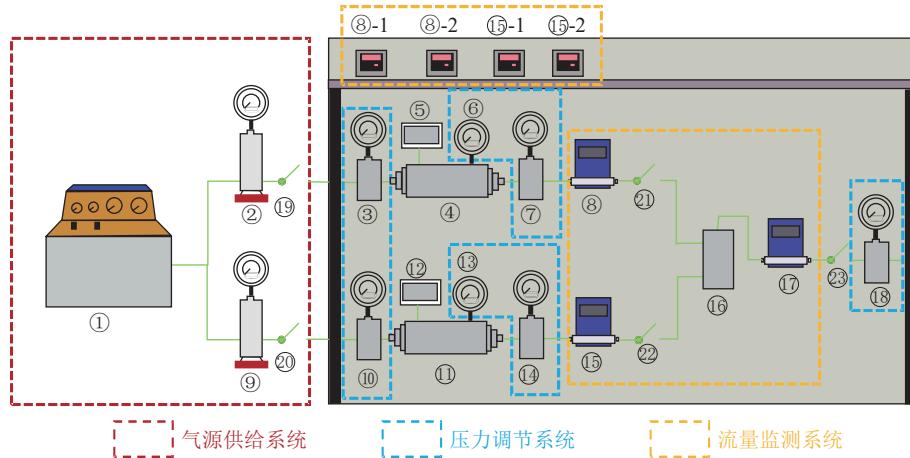


①—高压氮气瓶; ②③—减压阀; ④⑤⑪⑫⑯⑯—截止阀; ⑥⑦⑫⑬—压力传感器; ⑧⑨—岩心加持器; ⑩⑪—围压模拟系统; ⑯⑯—质量流量控制器; ⑯⑯—回压泵; ⑯—真空泵

图1 双层煤层气藏合采解吸模拟试验装置^[11]Fig.1 Physical simulation device for combined desorption of double-layer coalbed methane reservoirs^[11]

真空子系统、储层子系统、回压子系统、分离和计量子系统、温度与压力控制子系统和数据采集与处理

子系统组成(图3)。该装置可模拟高温高压条件下多层叠置气藏煤层气合采过程中的气体和水流动过



①—增压泵；②⑨—高压气瓶；③⑦⑩⑪⑬⑮—压力表；④⑪—夹持器；⑤⑫—温度计；⑥⑭—围压表；⑧-1、⑯-1—向流量表；⑧-2、⑯-2—反向流量表；⑯—井筒；⑰—总流量表；⑱—套压表；⑲⑳⑳⑳—阀门

图2 双层煤层气合采模拟试验装置^[13]

Fig.2 Physical simulation device for co-production of double-layer coalbed methane reservoir^[13]

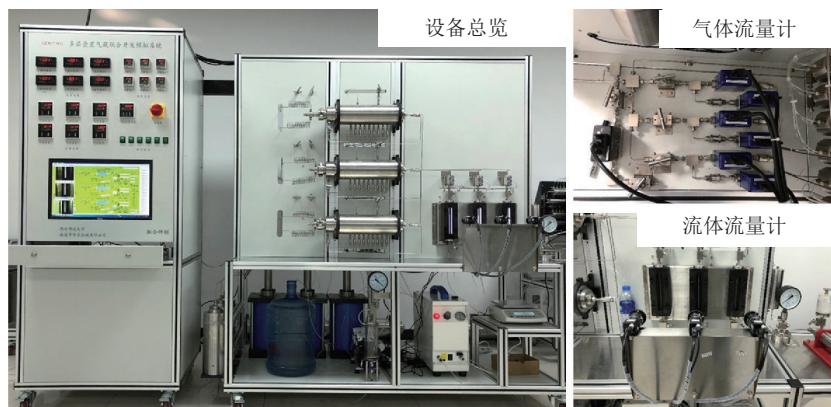


图3 多层叠置气藏联合开发模拟试验装置^[14]

Fig.3 Physical simulation device for co-production in superposed gas-bearing systems^[14]

程,实现了对流入和流出储层试件的气体流量和水流量单独测量^[14]。

多煤层组合开发物理模拟试验装置由轴压加载系统、围压加载系统、供气系统、采气系统、数据测量系统和数据采集系统6部分组成(图4),其为了更符合实际地层的情况,相邻煤层之间使用的透性材料使得层间窜流能够均匀地进行,可模拟多煤层气藏合采过程流体在单层内和多煤层之间的流动过程^[15-16]。

多储层产量伤害物理模拟系统以“等当气井产量”测试基准,由供气装置、岩芯柱塞夹持器组、压力表、流量表、温度表、连接管线、气体汇集容器以及数据存储计算机等组成,并形成了高压独立气源模块、独立岩样模块、井筒测试模块和可拆卸模块四大模块(图5),煤层气合采产量涉及储层压力、温度、流量等数据,都可以在系统中设置。该装置能够以恒压法或恒流量法替代传统渗透率测量,模拟多

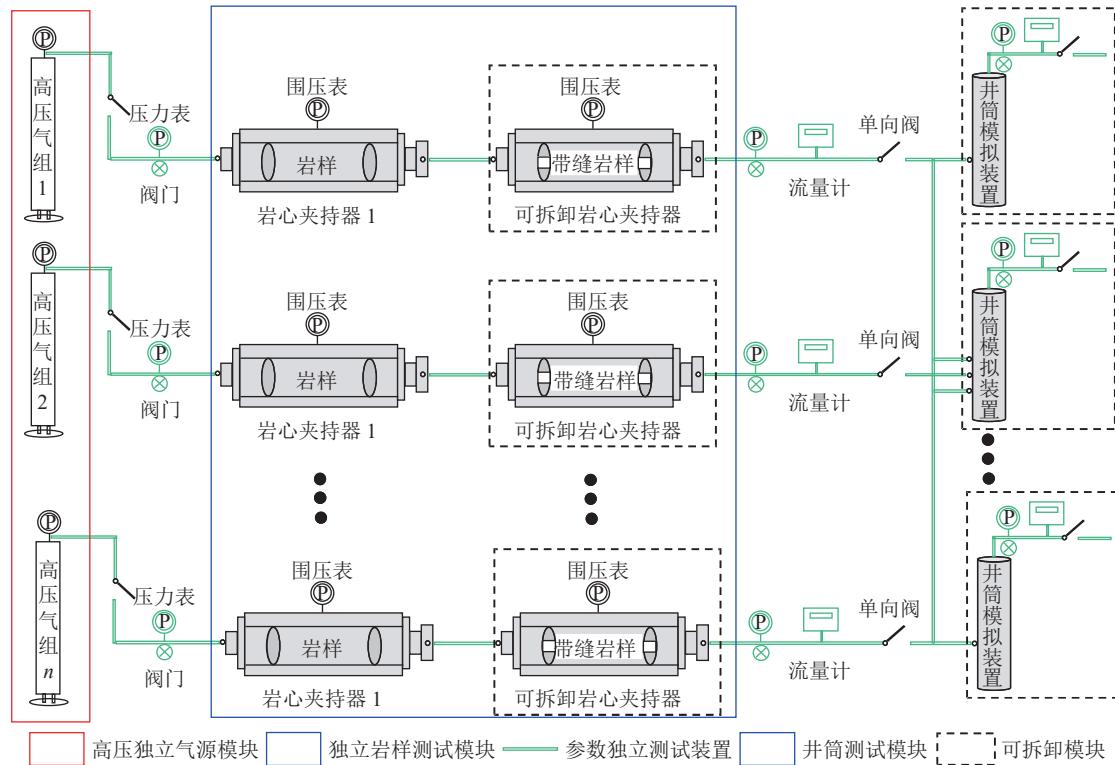
岩性储层不同压力下同时进入井筒的流体流动状态^[1,21-22]。

多场耦合叠置含气系统煤层气开采物理模拟试验装置主要由真三轴动力加载单元、试验控制与数据采集单元、煤储层模拟单元、独立注汽单元、煤层气开采单元和冷压成型单元组成(图6),其中,煤储

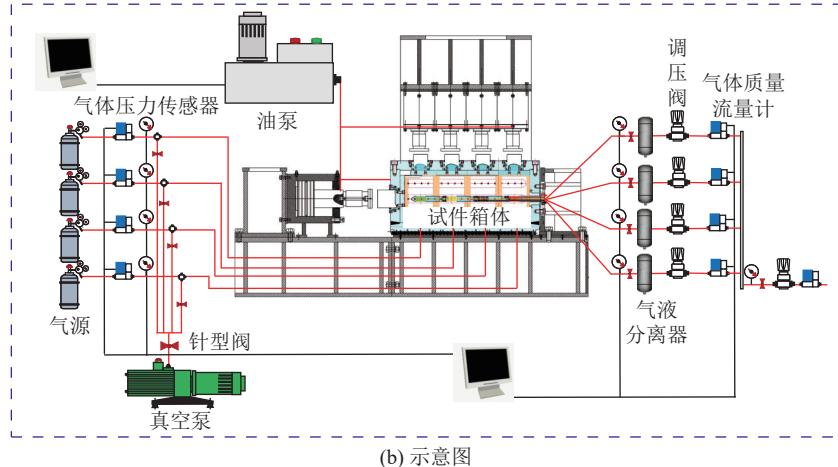


图4 多煤层组合开发物理模拟试验装置^[16]

Fig.4 Physical simulation device for multilayer co-production^[16]

图 5 多储层产量伤害模拟试验装置^[1]Fig.5 Simulation experiment device for multi-reservoir production damage^[1]

(a) 实拍图

图 6 叠置含气系统煤层气开采模拟试验装置^[24]Fig.6 Simulation experiment device for CBM co-production of superposed gas-bearing systems^[24]

层模拟单元和煤层气开采单元为该装置的核心单元,可实现对不同井型条件的叠置含气系统气藏与煤层气赋存条件的模拟,具有大尺度煤岩试件、真三轴应力加载、智能化数据监控、多用途集一体等功能优势。主要亮点为最大试件尺寸为400 mm×400 mm×1 050 mm,最多储层层数为4层,最大密封压力为6.0 MPa,可对试验过程中煤储层参数进行多层次、多方位、多种类的实时监测、显示及采集^[23-29]。

1.2 非煤层气领域

运用双岩心夹持器并联设计,配以给气源、提供压力的泵、压力传感器、气体流量计及数据采集系统等设备构建了一套双气层无窜流并联物理模拟试验装置(图7)。该类设备能够在一定程度上获取双气层合采过程中单层产气、压力变化和单层产量贡献演化规律^[30-36]。

复杂气藏双层流动多点测压开发模拟装置由多

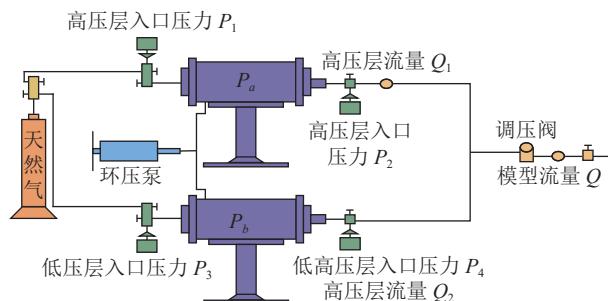


图7 双层合采模拟试验装置^[30]

Fig.7 Simulation experiment device for two layers co-production^[30]

点测压模拟岩心系统、双流体注入系统和综合数据采集系统3部分组成(图8),通过控制测点间阀门实现了储层间流体的交互流动。与常规多层并联合采实验不同,该装置能够保证层间流体的有效连通,以初步探究实际气藏多储层合采时层内渗流及层间越流规律^[37]。

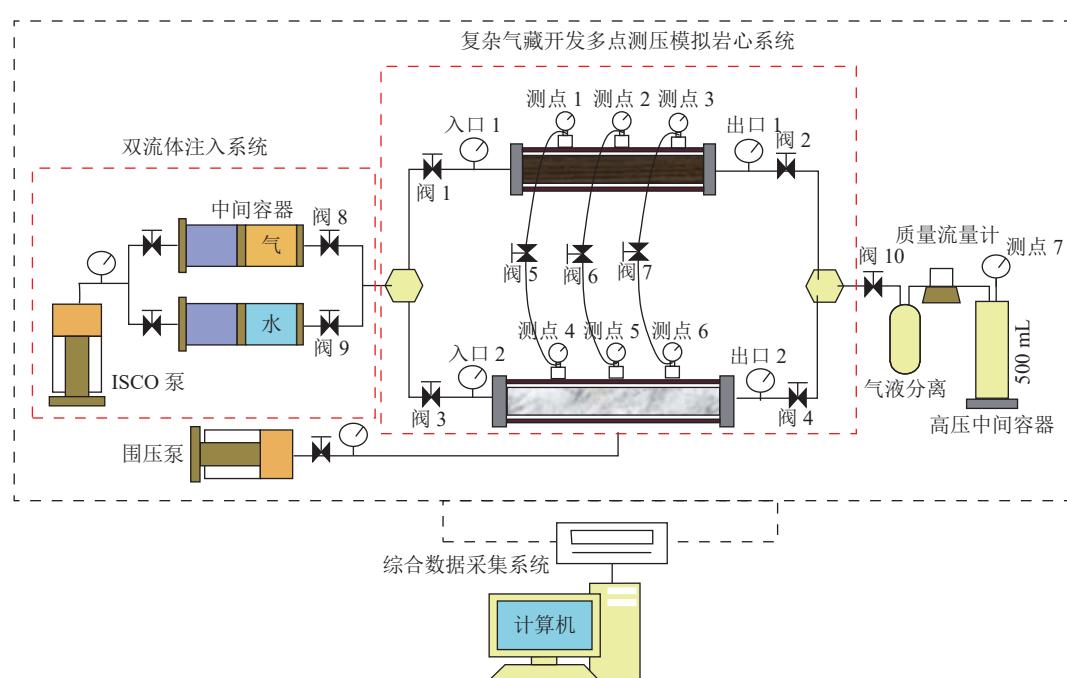


图8 复杂气藏双层流动多点测压开发模拟装置^[37]

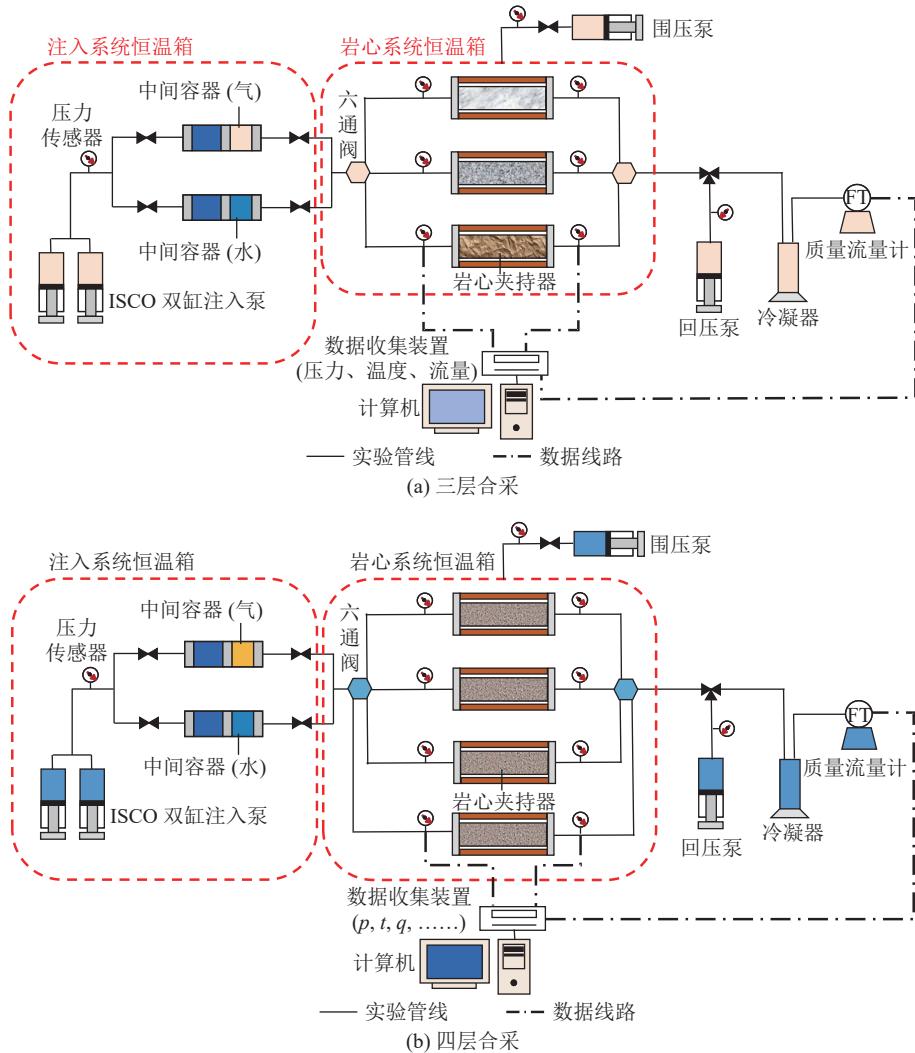
Fig.8 Simulation experiment device for depletion development of complex gas reservoir with double-layer flow and multi-point pressure measurement^[37]

针对常规驱替试验装置与管线不能满足特定气藏的高温高压环境,高温高压气藏多层合采物理试验装置被设计,该试验装置由注入系统、岩心系统和测量系统3部分组成(图9),其中注入系统包括ISCO双缸注入泵、中间容器、压力传感器、恒温箱及数个阀门。岩心系统包括高压围压泵、回压泵、岩心夹持器、回压阀及恒温箱;测量系统包括气液分离

装置、气体质量流量计、数据收集装置和计算机,具有承受高温高压、保温性好、密封性强、实验效率高等特点^[42-43,45-46]。

2 多压力系统合采研究认识进展

与常规油气开发不同,煤系气多压力系统合采技术尚处于摸索试验阶段,相关物理模拟成果研究

图9 高温高压气藏多层合采模拟试验装置^[42-43, 45]Fig.9 Physical test system for multilayer co-production of high temperature and high pressure gas reservoir^[42-43, 45]

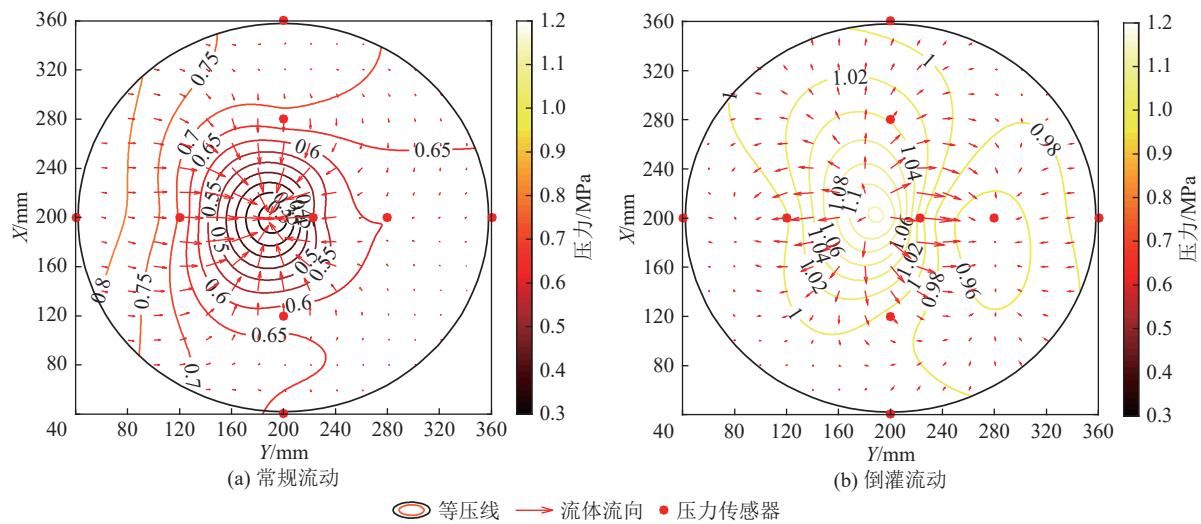
较小,但仍有效指导了合采工艺优化和技术创新。目前已取得的共性认识:多压力系统合采条件下,井眼贯穿作用导致各储层之间流体能量动态平衡状态遭受破坏,形成合采流体干扰现象,当不同储层之间流体能量差异显著时,流体会从高势储层向低势储层转移,以屏蔽或封堵较低势储层中流体向井眼方向的流动,甚至造成对低能势储层的“倒灌”^[6],许江团队利用物理模拟试验手段再现了“倒灌”形态^[24](图10)。与此同时,多储层来源气体从不同压力系统汇入井筒内相互干扰,反作用于储层中气体流动,引发储层产量伤害,降低储层产气能力^[1]。

总结现有物理模拟成果,发现多压力系统合采对储层物性条件与合采模式较为敏感,层间压差、渗透性、有效应力、含水饱和度等因素差异均有可能诱发合采流体干扰和储层产气伤害,定压合采、定产合采、接替和递进开采制度与控制生产压差可能是降低合采流体干扰和储层产气伤害的办法(表3)。

目前主要认识包括:

1)储层渗透率大小影响其自身的产能贡献率,合采初期主要以相对高渗层产气为主,而相对低渗层则会被逐渐动用^[12,35,38];储层压力是储层内流体能量大小的反映指标,层间压差越大,各储层之间的初始流体能量差异增加,层间干扰剧烈程度越大^[23];储层物性差异越大,各分层在不同时期的产气贡献差异越大^[38];有效应力增加加剧了储层间供气能力差异,渗透率相对较低储层产气贡献明显下降,相对高渗储层增加^[40];储集层纵向非均质性、含水层含水饱和度、开发方式差异等影响合采时两相交互越流强烈程度,决定了气藏采收率的最终大小^[37]。

2)定压合采模式下,压力存在差异的各个储层和井筒之间形成一种“动态压力平衡”关系,在压力平衡的作用下,来自高初始流体能量储层内流体被向低初始流体能量储层流动,定压值适当增加则会弱化储层属性差异性,优化兼容性^[24];定产合采模式

图 10 流体流场对比^[24]Fig.10 Comparison of flow field chart^[24]

下,稳产期内各储层之间会形成一种“动态分配”产气模式,即当高初始流体能量储层产气量过大,并超越定产值时,致使一部分来自高初始流体能量储层的流体向低初始流体能量储层反向注入,增加定产值有助于减小合采流体干扰剧烈程度^[24,30,38];接替合采和递进开采合采可以通过储层压力、临界解吸压力和产气压力等参数来调整不同储层开启时间,有效减弱高压层对低压层产气能力的抑制,避免倒灌现象的发生,提高低压层采收率^[27,29,34-35,45-46];合理的

生产压差下,各储层之间可以达到“动态补给平衡”供气状态,生产压差过大或者过小都会打破这种动态平衡,影响单层供气能力^[42]。

综上可知,上述研究认识是通过对比不同试验条件下得而到合采过程中储层压力与产气特征动态规律差异分析获取的。尽管通过此类方式获取的研究认识能够在一定程度上还原多压力系统合采过程中的储层参数与产气特征参数的动态响应规律,然而目前针对煤系气特殊地质背景研究较少,煤系气

表 3 多层合采物理模拟的认识统计

Table 3 Conclusion statistics of physical simulation experiments of multi-gas reservoirs co-production

研究者	合采模式	主要结论
胡勇等 ^[30] , 王文举等 ^[36] , 朱华银等 ^[38]	定产衰竭	①倒灌气量的大小受配产、层间压差和储层物性的影响; ②储层物性和层间压差的差异越大,各小层在不同时期的产气贡献差异越大,该差异随气井的配产增加而减小; ③减小层间压差和储层物性差异、增大初期配产,有助于减小层间干扰
闫长辉等 ^[31]	定产降压	①层间压差越大,层间干扰越严重; ②高压层物性越差,倒灌延续时间越短,层间干扰越小 ①井口压力越大,渗透率比值越小,层间干扰越大; ②渗透率级差是影响合采产层产能贡献率的主要因素;
冯毅等 ^[32-33] , 王子威等 ^[12-13] , 游利军等 ^[40]	定容衰竭	③储层流体压力差异控制上部储层的受干扰强度; ④产层间距和储层压力共同控制下部储层的干扰强度; ⑤有效应力与含水饱和度增加将进一步加剧分层产量贡献差异
谢英刚等 ^[34] , 谭玉涵等 ^[35] , 徐小虎等 ^[45] , 王璐等 ^[46] , 许江等 ^[27,29]	递进、接替合采	①优化不同储层开启时间,有效减弱了高压层对低压层产气能力的抑制; ②接替压力越大,干扰程度越低,采出程度也随之降低。
李奇等 ^[37]	气水交互越流	储集层纵向非均质性、含水层含水饱和度、开发方式差异等影响合采时两相交互越流强烈程度,决定了气藏采出率的最终大小
廖毅等 ^[41]	定容变回压	①回压相同时,渗透率差越大,倒灌量和开始倒灌时间越长; ②渗透率差相同时,回压越大,开始倒灌时间越短。
王璐等 ^[42-43]	定容定压	①储层渗透率的绝对大小影响自身的产能贡献率; ②合理的生产压差下各储层之间可以达到“动态补给平衡”供气状态
许江等 ^[24-25]	定压、定产	①定压合采模式下,各个储层系统和井筒之间形成一种“动态压力平衡”关系; ②定产合采模式下,稳产期内各储层之间会形成一种“动态分配”产气模式; ③应适当增加定产值或定压值,减弱各储层受到扰动的程度

合采过程中的储层和产气动态与常规油气藏差异较大, 导致现有多压力系统合采物理模拟研究成果对认识煤系气多压力系统合采的局限性较大。

3 存在问题及研究方向

3.1 存在的问题

尽管多压力系统合采物理模拟结果已经应用于现场, 对煤系气合采具有一定的借鉴和参考价值, 但仍存在一定的局限性:

1) 监测手段和数据展示形式单一, 仅提供压力和流量等基础数据, 未实现对储层-井筒内流体流动行为的可视化表征, 忽略了多物理场耦合作用对合采过程中储层-井筒参数响应特征的影响。

2) 现有物理模拟试验装置一般建立在各储层之间具有良好的隔水阻气层的假设条件下, 以并联多个岩心夹持器的方式来构建, 仅考虑了井筒间流体交叉流动行为, 忽略了相邻储层之间流体压力的传递特性和窜流行为。

3) 受现有物理模拟试验系统的限制, 试样以均质煤岩样为主, 应考虑真三维非均布复杂地应力状态下大尺度非均质储层。

4) 相比于常规天然气, 煤系气合采具有特殊性, 体现为低孔低渗、气水两相渗流、多相态天然气共生和多类型储层共存等诸多方面, 对多压力系统合采产出的流体产出机理差异性和水气相互影响特征具有明显影响。

3.2 研究方向

目前以多压力系统合采物理模拟试验装置为基础, 对合采流体干扰问题进行了初步探究, 但理论研究与现场实际条件存在一定差距, 以下方向待发展完善:

1) 合采流体干扰诱导储层-井筒合采流场动态演化规律。应进一步强化对低孔低渗、气水两相渗流、多相态天然气共生和多类型储层共存等诸多特性的考虑, 多因素耦合对合采流体干扰诱导储层-井筒合采流场动态演化规律的影响机制需深入探讨。

2) 不同相态流体侵入对储层伤害及其作用机理。合采流体干扰在特定条件下会诱导流体侵入储层, 需研究侵入流体对储层-井筒内流动流动和储层产气造成的伤害, 建立合采流体干扰对储层及井筒内流体流动和产能影响的判断依据。

3) 考虑合采流体干扰效应的层间渗流与井筒管流耦合流动机理。目前, 研究多参数耦合作用下储层及井筒之间的气水两相流动特征, 阐明合采流体干扰效应的层间窜流与井筒管流耦合流动机理。

4 结 论

1) 物理模拟试验装置发展方向为真三维非均布复杂地应力状态下大尺度非均质多类型储层试样, 考虑相邻储层之间流体压力的传递特性、层间窜流行为以及煤系气赋存态的多样性对多压力系统合采过程中流体产出机理差异性的影响, 应进一步深化物理模拟试验系统, 为推动我国煤系气产业加速发展提供理论支撑。

2) 多压力系统合采对储层物性较为敏感, 层间压力差、渗透性、有效应力、含水饱和度等因素差异均有可能诱发合采流体干扰和储层产气伤害, 优化合采制度有助于降低合采流体干扰和储层产气伤害。

3) 多压力系统物理模拟合采研究应进一步强化对低孔低渗、气水两相渗流、多相态天然气共生和多类型储层共存等特性耦合对合采流体干扰诱导储层-井筒合采流场动态演化规律的影响, 明确不同相态流体侵入对合采储层的储层伤害及其作用机理, 揭示考虑合采流体干扰效应的层间窜流与井筒管流耦合流动特征。

参考文献(References):

- [1] 郑力会, 陶秀娟, 魏攀峰, 等. 多储层产量伤害物理模拟系统及其在煤系气合采中的应用[J]. 煤炭学报, 2021, 46(8): 2501-2509.
ZHENG Lihui, TAO Xiujuan, WEI Panfeng, et al. Multi-reservoir production damage physical simulation system and its application in coal-measure gas production[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(8): 2501-2509.
- [2] 郭晨, 秦勇, 易同生, 等. 煤层气合采地质研究进展述评[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(3): 42-57.
GUO Chen, QIN Yong, YI Tongsheng, et al. Review of the progress of geological research on coalbed methane co-production[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(3): 42-57.
- [3] 张先敏, 吴浩宇, 冯其红, 等. 多层合采煤层气井动态响应特征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2020, 44(6): 88-96.
ZHANG Xianmin, WU Haoyu, FENG Qihong, et al. Dynamic characteristics of commingled coalbed methane production in wells with multi-layer coal seams[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2020, 44(6): 88-96.
- [4] 秦勇, 熊孟辉, 易同生, 等. 论多层叠置独立含煤层气系统: 以贵州织金-纳雍煤田水公河向斜为例[J]. 地质论评, 2008, 54(1): 65-70.
QIN Yong, XIONG Menghui, YI Tongsheng, et al. On unattached multiple superposed coalbed-methane system: In a case of the Shuigonghe syncline, Zhipin-Nayong coalfield, Guizhou[J]. Geological Review, 2008, 54(1): 65-70.
- [5] 傅雪海, 葛燕燕, 梁文庆, 等. 多层叠置含煤层气系统递进排采的压力控制及流体效应[J]. 天然气工业, 2013, 33(11): 35-39.
FU Xuehai, GE Yanyan, LIANG Wenqing, et al. Pressure control and fluid effect of progressive drainage of multiple superposed

- CBM system[J]. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(11): 35–39.
- [6] 秦勇, 申建, 沈玉林. 叠置含气系统共采兼容性—煤系“三气”及深部煤层气开采中的共性地质问题[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 14–23.
- QIN Yong, SHEN Jian, SHEN Yulin. Joint mining compatibility of superposed gas-bearing systems: A general geological problem for extraction of three natural gases and deep CBM in coal series[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(1): 14–23.
- [7] 秦勇. 煤系气聚集系统与开发地质研究战略思考[J]. 煤炭学报, 2021, 46(8): 2387–2399.
- QIN Yong. Strategic thinking on research of coal measure gas accumulation system and development geology[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(8): 2387–2399.
- [8] 桑树勋, 周效志, 刘世奇, 等. 岩石力学地层理论方法及其煤系气高效勘探开发利用基础述评[J]. *地质学报*, 2022, 96(1): 304–316.
- SANG Shuxun, ZHOU Xiaozhi, LIU Shiqi, et al. A review of mechanical stratigraphy methodology and its application in high-exploration and development of coal measure gas[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(1): 304–316.
- [9] 毕彩芹, 胡志方, 汤达祯, 等. 煤系气研究进展与待解决的重要科学问题[J]. *中国地质*, 2021, 48(2): 402–423.
- BI Caiqin, HU Zhifang, TANG Dazhen, et al. Research progress of coal measure gas and some important scientific problems[J]. *Geology in China*, 2021, 48(2): 402–423.
- [10] 秦勇, 吴建光, 申建, 等. 煤系气合采地质技术前缘性探索[J]. 煤炭学报, 2018, 43(6): 1504–1516.
- QIN Yong, WU Jianguang, SHEN Jian, et al. Frontier research of geological technology for coal measure gas joint-mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(6): 1504–1516.
- [11] 梁冰, 石迎爽, 孙维吉, 等. 层间距对双层煤层气藏合采解吸影响实验[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(1): 54–61.
- LIANG Bing, SHI Yingshuang, SUN Weiji, et al. Experiment on influence of inter layer spacing on combined desorption of double-layer coalbed methane reservoir[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2020, 49(1): 54–61.
- [12] 王子威, 秦勇. 物理实验研究CBM共生产: 一个云南临沧案例[J]. *Fuel*, 2019, 239: 964–981.
- WANG Ziwei, QIN Yong. Physical experiments of CBM coproduction: A case study in Laochang district, Yunnan Province, China[J]. *Fuel*, 2019, 239: 964–981.
- [13] 王子威. 煤层气合采干扰模拟与地质-数学模型[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- WANG Ziwei. Simulation and geological-mathematical models of CBM co-production interference: a case of Longtan formation in western Guizhou and eastern Yunnan, China[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [14] 郭晨, 秦勇, 孙雪阳, 等. 物理模拟评价多煤层CBM共生产: 对于叠置CBM系统的启示[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 204: 108702.
- GUO Chen, QIN Yong, SUN Xueyang, et al. Physical simulation and compatibility evaluation of multi-seam CBM co-production: Implications for the development of stacked CBM systems[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 204: 108702.
- [15] 汪志明, 王小秋, 叶建平, 等. 一种多煤层煤层气合采实验装置[P]. 中国: ZL 201710317364.6, 2017–09–01.
- [16] 刘靓倩. 滇东黔西地区多煤层气藏合采层间窜流实验研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2019.
- LIU Liangqian. Experimental study on interlayered crossflow of multilayered CBM reservoir in eastern Yunnan and western Guizhou[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2019.
- [17] 石迎爽, 梁冰, 薛璐, 等. 多层煤层气藏合采特征及物理模拟实验方法研究[J]. *实验力学*, 2019, 34(6): 1010–1018.
- SHI Yingshuang, LIANG Bing, XUE Lu, et al. Study on the characteristics of multi-layer CBM reservoir mining and the experimental method of its physical simulation[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2019, 34(6): 1010–1018.
- [18] 黄红星, 彭宏钊, 周劲辉, 等. 一种煤层气多层合采实验装置[P]. 中国: ZL202010639765.5, 2020–09–25.
- [19] 李松, 汤达祯, 许浩, 等. 一种多煤层煤层气井排采物理模拟装置及其实验方法[P]. 中国: 201710045989.1, 2017–06–09.
- [20] 李松, 汤达祯, 许浩, 等. 一种多煤层煤层气合采物理模拟实验装置[P]. 中国: 202110685539.5, 2021–08–03.
- [21] 郑力会, 魏攀峰, 孙昊, 等. 天然气储层多层合采产能模拟实验装置[P]. 中国: CN106481338A, 2017–03–08.
- [22] 郑力会, 李秀云, 苏关东, 等. 煤层气工作流体储层伤害评价方法的适宜性研究[J]. *天然气工业*, 2018, 38(9): 34–45.
- ZHENG Lihui, LI Xiuyun, SU Guandong, et al. Applicability of working fluid damage assessment methods for coalbed methane reservoirs[J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(9): 34–45.
- [23] 许江, 李奇贤, 彭守建, 等. 不同层间压差条件下叠置煤储层的定产合采试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(1): 46–53.
- XU Jiang, LI Qixian, PENG Shoujian, et al. Experimental study on commingled production with constant-rate of a multi-superimposed gas system under different interlayer pressure difference[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(1): 46–53.
- [24] 许江, 李奇贤, 彭守建, 等. 定产定压条件下叠置煤储层煤层气合采试验研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(8): 2510–2523.
- XU Jiang, LI Qixian, PENG Shoujian, et al. Experimental study on CBM coproduction in superposed gas-bearing systems under constant gas production rate and constant wellbore pressure[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(8): 2510–2523.
- [25] 李奇贤, 许江, 彭守建, 等. 合采条件下低压储层内流体运移特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(S1): 351–363.
- LI Qixian, XU Jiang, PENG Shoujian, et al. Physical simulation experiment on flow characteristics in a low-pressure reservoir under co-production[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(S1): 351–363.
- [26] 许江, 李奇贤, 彭守建, 等. 叠置煤储层煤层气开采物理模拟试验方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(1): 225–233.
- XU Jiang, LI Qixian, PENG Shoujian, et al. Study on physical simulation test method of coalbed methane production in superimposed gas-bearing system[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(1): 225–233.
- [27] 许江, 张超林, 彭守建, 等. 多层叠置煤层气系统合采方式及其优化[J]. 煤炭学报, 2018, 43(6): 1677–1686.
- XU Jiang, ZHANG Chaolin, PENG Shoujian, et al. Multiple layers superposed CBM system commingled drainage schedule and its optimization[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(6): 1677–1686.
- [28] 彭守建, 贾立, 许江, 等. 煤层瓦斯抽采多物理场参数动态

- 响应特征及其耦合规律[J]. 煤炭学报, 2022, 47(3): 1235–1243.
- PENG Shoujian, JIA Li, XU Jiang, et al. Dynamic response characteristics and coupling law of multi physical field parameters in coal seam gas drainage[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(3): 1235–1243.
- [29] 张超林. 叠置含气系统煤层气开采制度优化及注二氧化碳增产机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- ZHANG Chaolin. Optimization of CBM drainage schedule and mechanism of CO₂-ECBM recovery for superposed gas-bearing system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [30] 胡勇, 李熙皓, 万玉金, 等. 高低压双气层合采产气特征[J]. 天然气工业, 2009, 29(2): 89–91.
- HU Yong, LI Xizhe, WAN Yujin, et al. Gas producing property of commingled production for high-low pressure double gas reservoir[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(2): 89–91.
- [31] 闫长辉, 李正健, 郑军, 等. 大牛地气田低孔低渗气藏合采时机分析[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(9): 109–112, 168.
- YAN Changhui, LI Zhengjian, ZHENG Jun, et al. Analysis on optimal time of commingled production in the low permeability and porosity gas reservoir[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(9): 109–112, 168.
- [32] 冯毅, 魏攀峰, 段长江, 等. 室内定量试验评价临兴地区致密砂岩气两层合采产量变化[J]. 非常规油气, 2017, 4(6): 40–44.
- FENG Yi, WEI Panfeng, DUAN Changjiang, et al. Quantitative evaluation on the change of dual reservoir commingled production of tight sandstone gas in Linxing area through indoor experiment[J]. Unconventional Oil & Gas, 2017, 4(6): 40–44.
- [33] 冯毅, 孟尚志, 魏攀峰, 等. 临兴地区砂岩与页岩两层合采效果试验探究[J]. 非常规油气, 2017, 4(2): 73–77.
- FENG Yi, MENG Shangzhi, WEI Panfeng, et al. Experimental study on the effect of two layers commingled production of sandstone gas and shale gas Linxing area[J]. Unconventional Oil & Gas, 2017, 4(2): 73–77.
- [34] 谢英刚, 段长江, 魏攀峰, 等. 临兴地区砂岩两层合采接替时机优选实验[J]. 非常规油气, 2017, 4(1): 63–66.
- XIE Yinggang, DUAN Changjiang, WEI Panfeng, et al. Experimental optimization on favorable access time in dual reservoirs commingled production of sand gas in Linxing area[J]. Unconventional Oil & Gas, 2017, 4(1): 63–66.
- [35] 谭玉涵, 郭京哲, 郑峰, 等. 气井多层合采渗流特征及接替生物理模拟[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(6): 1009–1015.
- TAN Yuhan, GUO Jingzhe, ZHENG Feng, et al. Physical simulation on seepage features of commingled production and right time of production conversion for gas wells[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(6): 1009–1015.
- [36] 王文举, 潘少杰, 李寿军, 等. 致密气藏高低压多层合采物理模拟研究[J]. 非常规油气, 2016, 3(2): 59–64.
- WANG Wenju, PAN Shaojie, LI Shoujun, et al. Physical simulation of high-pressure and low-pressure multilayer production of tight gas reservoir[J]. Unconventional Oil & Gas, 2016, 3(2): 59–64.
- [37] 李奇, 高树生, 刘华勋, 等. 致密砂岩气藏多层合采气水交互越流模拟实验[J]. 天然气工业, 2022, 42(1): 133–145.
- LI Qi, GAO Shusheng, LIU Huaxun, et al. Simulation experiment on the gas-water interaction crossflow during the multi-layer commingled production of tight sandstone gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(1): 133–145.
- [38] 朱华银, 胡勇, 李江涛, 等. 柴达木盆地涩北多层气藏合采物理模拟[J]. 石油学报, 2013, 34(S1): 136–142.
- ZHU Huayin, HU Yong, LI Jiangtao, et al. Physical simulation of commingled production for multilayer gas reservoir in Sebei gas field, Qaidam basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(S1): 136–142.
- [39] 朱华银, 胡勇, 朱维耀, 等. 气藏开发动态物理模拟技术[J]. 石油钻采工艺, 2010, 32(S1): 54–57.
- ZHU Huayin, HU Yong, ZHU Weiyao, et al. Physical simulation technology for gas reservoir development behavior analysis[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2010, 32(S1): 54–57.
- [40] 游利军, 李雷, 康毅力, 等. 考虑有效应力与含水饱和度的致密砂岩气层供气能力[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(4): 764–769.
- YOU Lijun, LI Lei, KANG Yili, et al. Gas supply capacity of tight sandstone in considering effective stress and water saturation[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(4): 764–769.
- [41] 廖毅. 致密砂岩气藏多层合采实验模拟及矿场应用[D]. 成都: 西南石油大学, 2014.
- LIAO Yi. Experimental simulation of multi-layer co-production in tight sandstone gas reservoirs and application in the mine[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2014.
- [42] 王璐, 杨胜来, 刘义成, 等. 缝洞型碳酸盐岩气藏多层合采供气能力实验[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(5): 779–787.
- WANG Lu, YANG Shenglai, LIU Yicheng, et al. Experiments on gas supply capability of commingled production in a fracture-cavity carbonate gas reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(5): 779–787.
- [43] 王璐. 深层碳酸盐岩气藏特殊渗流规律及储量可动性研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
- WANG Lu. Investigation on special seepage law and reserves mobility of deep carbonate gas reservoirs[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2019.
- [44] LIU Guangfeng, MENG Zhan, LUO Dayong, et al. Experimental evaluation of interlayer interference during commingled production in a tight sandstone gas reservoir with multi-pressure systems[J]. Fuel, 2020, 262: 116557.
- [45] 徐小虎, 王亚, 蔺景德, 等. 多压力系统致密气藏合采特征及开发方式优化实验[J]. 大庆石油地质与开发, 2020, 39(1): 153–161.
- XU Xiaohu, WANG Ya, LIN Jingde, et al. Cmingled production characteristics of multi-pressure-system tight gas reservoirs and experiment of the developing mode optimization[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020, 39(1): 153–161.
- [46] WANG Lu, HE Yongming, WANG Qian, et al. Improving tight gas recovery from multi-pressure system during commingled production: An experimental investigation[J]. Natural Resources Research, 2021, 30: 3673–3694.