

深部煤层气开发的机遇与挑战

方志明^{1,2}, 王润东^{1,2}, 杨晨龙^{1,2}

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 煤层气等非常规天然气资源的规模化开发与利用是我国能源结构向清洁能源高比重发展的重要过渡手段,是实现我国“3060”双碳战略目标的重要保障。我国深部煤层气资源非常丰富,据初步评估,埋深超过1 000 m的煤层气资源占总资源量的84.15%。自2019年大宁—吉县深部煤层气DJ3-7向2试验井开发成功以来,深部煤层气开发获得广泛关注。系统梳理了国内外深部煤层气开发进展,从国家政策、资源潜力、现有技术水平等角度讨论了我国深部煤层气开发面临的机遇与挑战。分析认为,我国煤层气开发多年积累的技术经验和实践成果为深部煤层气开发奠定了坚实的基础,深部煤层气开发契合国家与地方能源政策且受企业大力支持,丰富的资源量彰显巨大的开发潜力,呈现经济和战略双重价值,快速发展的示范项目展现出我国深部煤层气开发的广阔前景,这些都为我国深部煤层气开发提供了机遇。然而,区别于现有煤层气开发技术,高温、高压、高应力条件下,深部煤层气开发理论、技术与工程实践的有机结合不足、市场竞争压力大以及开发过程中存在的环保问题,是深部煤层气开发面临的主要挑战。

关键词: 深部煤层气;成藏机理;资源储量;高温、高压、高应力;压裂

中图分类号: P 618.13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1964(2025)01-0034-18

Opportunities and challenges in deep coalbed methane development

FANG Zhiming^{1,2}, WANG Rundong^{1,2}, YANG Chenlong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The large-scale development and utilization of unconventional natural gas resources such as coalbed methane (CBM) is an important transitional measure for China's energy structure to shift towards a high proportion of clean energy, and is an important guarantee for achieving China's "3060" dual carbon strategic goal. According to preliminary assessment, with 84.15% of CBM resources buried below 1 000 meters, China holds substantial deep CBM reserves. Since the successful 2019 pilot development of the DJ3-7X2 well in the Daning-Jixian field, deep CBM extraction has gained significant attention. This paper reviews recent advances in deep CBM development, both in China and internationally, and examines the associated opportunities and challenges from the standpoints of policy, resource potential, and current technology. Our analysis indicates that China's accumulated technical expertise and practi-

收稿日期: 2024-06-23 修回日期: 2024-09-19 DOI: 10.13247/j.cnki.jcumat.20240299

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点项目(U23A20671);内蒙古自治区中央引导地方科技发展资金项目(2022ZY0018)

通信作者: 方志明(1981—),男,湖北省黄冈市人,副研究员,工学博士,从事CO₂地质利用与封存、气体驱替煤层气等方面的研究。

E-mail: zmfang@whrsm.ac.cn Tel: 15972163362

引用格式: 方志明,王润东,杨晨龙.深部煤层气开发的机遇与挑战[J].中国矿业大学学报,2025,54(1):34-51.

FANG Zhiming, WANG Rundong, YANG Chenlong, et al. Opportunities and challenges in deep coalbed methane development[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(1): 34-51.

cal achievements over the years in CBM provides a solid foundation for deep CBM extraction. The development of deep CBM is in line with national and local energy policies and is strongly supported by enterprises. The abundant resources demonstrate enormous development potential, presenting dual economic and strategic value. The rapidly developing demonstration projects demonstrate the broad prospects of deep CBM development in China, providing opportunities for its development. However, unlike existing CBM development technologies, the lack of organic integration between deep CBM development theory, technology, and engineering practice under high temperature, high pressure, and high stress conditions, high market competition pressure, and environmental issues in the development process are the main challenges faced by deep CBM development.

Key words: deep CBM; accumulation mechanism; resource reserve; high temperature, high pressure, high stress; fracturing

深部煤层气资源勘探与开发是煤层气产业发展的重要内容之一。早期人们用绝对埋深直接划分浅、深部煤层气资源,如中华人民共和国地质矿产行业标准(DZ/T 0378—2021《煤层气资源评价规范》)中将800~1 200 m埋深的煤层气资源定义为中深部煤层气,将1 200 m埋深以深的煤层气资源定义为深部煤层气^[1-2]。近年随着对煤层气成藏效应和赋存特征认识的加深,深部煤层气出现更为精细的定义。文献[3]提出,深部煤层气的“深部”不仅描述的是煤层埋深,更描述的是煤层状态的变化,集中体现在含气能力降低、垂直主应力大于平均水平最大主应力以及渗透率急速衰减3个方面。“浅部”与“深部”煤层气的深度界限应由“临界地应力深度”和“临界吸附深度”共同界定。当两界限相同时,处于“临界地应力深度”和“临界吸附深度”之下的煤层气资源及其赋存和开发地质条件属于深部煤层气范畴。当两界限不同时,需分2种情况讨论,“临界地应力深度”比“临界吸附深度”深或“临界地应力深度”比“临界吸附深度”浅。此时,深度处于更浅者界限之上被称为浅部煤层气,处于两界限之间被称为过渡地带煤层气,处于更深者界限之下被称为深部煤层气。

总之,深部煤层气的定义目前尚无统一说法,但已形成了一些共识,普遍认为其煤储层具有高温、高压、高应力、高矿化程度、高游离气占比、高饱和度、低渗透率、低含水量等特点,在工程实践中要将游离气作为重要的勘探开发目标。

1 主要国家深部煤层气开发进展

1.1 美国、澳大利亚、加拿大

美国是煤层气产业的发源地,Piceance盆地和San Juan盆地超半数煤层气资源埋藏于1 524 m

以深,其中Piceance盆地是主要的深部煤层气开发区。美国深部煤层气开发历程按时间可分为3个阶段:技术探索阶段、商业化开发阶段、开发放缓阶段。技术探索阶段(20世纪70年代至20世纪90年代初):20世纪70年代,研究人员在Piceance盆地深部发现大量煤层气资源,但由于其渗透率过低、产能无法维持,人们普遍认为不具备开采价值。1978年,艾克森美孚公司在Piceance盆地Mesa县2 377~2 438 m深成功钻井并实现了 $1.1 \times 10^4 \sim 1.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的初期产能,成为最早的深部煤层气勘探试采项目之一。1981年,该地区一口深2 388~2 454 m的煤层气井实现 $28 317 \text{ m}^3/\text{d}$ 的稳定产能并持续2年,这是深部煤层气开发在规模上的一次重大突破^[4-5]。20世纪80年代末,随着Anadarko Petroleum Corp等公司分别在Piceance盆地和Uinta盆地1 524 m以深成功进行多次勘探试采试验(表1),深部煤层气的开发潜力逐步被认可^[6]。商业化开发阶段(20世纪90年代初至2008年):20世纪90年代初,美国在Piceance盆地Grand valley和Parachute地区首次实现深部煤层气商业化开采,开采深度达1 981 m^[7]。21世纪初,落基山脉各盆地已形成合计30口的深部煤层气商业化开采井群(平均井深超1 372 m),产能达 $6.06 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$ 。之后,随着水平井开采,煤层气、页岩气、致密砂岩气联合开采等技术的应用,深部煤层气开发的经济价值进一步提高,开发商在Uinta、Greater Green River、Hanna等盆地陆续落实一系列商业化开发项目^[5,8-10]。开发放缓阶段(2008年至今):2008年后,随着国际油气价格下跌、国内页岩气革命、相关财政补贴下调等形势变化,美国煤层气产量开始下降,深部煤层气开发热度逐渐降低。

澳大利亚深部煤层气开发主要集中于南澳昆士兰州的 Cooper 盆地,发展历程较为曲折,按时间可分为技术探索阶段、商业化尝试阶段。技术探索阶段(20 世纪 90 年代初至 2007 年):Cooper 盆地深部煤层气开发最早可以追溯到 20 世纪 90 年代初,其部分钻井与深部煤层相交。1998 年,研究人员在 Dorodillo-2 井首次进行了解吸试验^[11],并对解吸气进行了记录和分析。2007 年,在 Moomba77 井首次进行了水力压裂试验,初期产量达 $2\ 832\ \text{m}^3/\text{d}$,超过了当时美国最深煤层气井(位于 Piceance 盆地 Cameo 煤层 $2\ 479\sim 2\ 481\ \text{m}$ 深),初步证实此地深部煤层气具有商业化开发价值^[12]。商业化尝试阶段(2007 年至今):在此期间,虽深部煤层气井压裂试采试验不断在技术上突破,在产量上也实现了进步(Coonatie-25 井采用煤炭-致密砂岩 8 煤层同步压裂,初期产量达 $13\ 593.6\ \text{m}^3/\text{d}$),但一直没有达到商业化开发的水平。2018 年后,受国际天然气价格下跌和国内水力压裂相关的环境问题限制,天然气开发政策发生变化,相关的试验逐渐关闭,深部煤层气开发进程逐渐放缓。

加拿大深部煤层气开发主要集中于 Alberta

地区。其与美国地理位置临近,技术和商业交流便利,按时间可分为技术探索阶段、商业化尝试阶段,但商业化进程比美国要慢得多。技术探索阶段(20 世纪 70 年代至 21 世纪初):加拿大从 20 世纪 70 年代末开始进行煤层气勘探开发,但由于煤层气成藏效应、地质特征较美国差异性明显,开采技术不具备可复制性,直到 20 世纪 90 年代末,仍没有完成资源量勘探和商业化开发工作。1997 年,在国家碳中和政策背景下(加拿大承诺到 2000 年将温室气体排放量减少到 1990 年的水平),文献^[13]提出将 $\text{CO}_2\text{-EGR}$ (enhanced gas recovery) 技术应用于 Alberta 省深部煤层气领域的构想,开启了加拿大深部煤层气的研究与开发进程。商业化尝试阶段(21 世纪初至今):2004 年,CDX 公司在 Alberta 省 Oberlin 地区 $1\ 300\ \text{m}$ 以深低渗透性煤层成功钻进第一口煤层气水平井,初期产量 $28\ 000\ \text{m}^3/\text{d}$,达到商业化水平,成为加拿大深部煤层气商业化开发的标志性项目^[14]。在随后的几年里,加拿大深部煤层气开发项目进一步开展,总产量持续增加。但 2009 年后,受全球天然气价格波动、美国页岩气革命成功以及国内监管环境收紧影响,深部煤层气相关研究与开发逐渐放缓^[15-16]。

表 1 美国深部煤层气勘探试采试验情况

Table 1 Status of deep CBM exploration and test production in the United States

| 公司 | 年份 | 地区 | 钻井及深度 | 初期产量 |
|---|--------------------------|---------------------------------|---|--|
| Exxon ^[6] | 1978 | Piceance 盆地 Mesa 县 | Vega No. 2 Well $2\ 377\sim 2\ 438\ \text{m}$ | $1.13\times 10^4\sim 1.42\times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ |
| Barrett Resources ^[6] | 20 世纪 80 年代末 至 90 年代初 | Piceance 盆地 The Grand Valley | 大量深部井 $1\ 524\sim 2\ 438\ \text{m}$ | 累计 $5.83\times 10^7\ \text{m}^3$ |
| Cockrell Oil ^[6] | 20 世纪 90 年代初 | Uinta 盆地 | The 1 Colton, The 1 Scofield $2\ 256\sim 2\ 286\ \text{m}$ | 欠饱和、不可生产 |
| Anadarko Petroleum Corp ^[6] | 1991 | Piceance 盆地 Pinyon 岭 | Pinyon Ridge Federal A-1 $1\ 677\sim 1\ 759\ \text{m}$ | $2.72\times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ |
| Unocal Exploration Corp ^[6] | 1993 | Piceance 盆地 Mesa 县 | Buzzard Creek Unit 3-11M $2\ 424\sim 2\ 509\ \text{m}$ | $4.25\times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ |

1.2 中国

我国深部煤层气资源勘探开发主要集中在沁水盆地、准噶尔盆地、鄂尔多斯盆地,始于 20 世纪 90 年代,发展于 21 世纪初(表 2)。

20 世纪 90 年代,我国在滇东黔西、准噶尔盆地、鄂尔多斯盆地等地开展压裂试验并获得工业气流^[17-18]。1993 年,彩南地区 $2\ 500\ \text{m}$ 以深钻井试采成功是我国深部煤层气开发的首次突破^[19]。2005 年,中石油在白家海地区钻进彩 504 井取得初期高产,展现了我国深部煤层气的开发潜力^[20]。2015 年,沁水盆地 H6 井的突破形成了深部煤层气赋存条件可能优于浅部的新认知^[18]。2019 年,

大宁-吉县 DJ3-7 向 2 试验井投产即见气,上产速度快,成为标志性项目,推动深部煤层气勘探开发进一步发展^[21]。

2021 年是我国深部煤层气产业发展的重要节点,中石油、中石化、中海油分别在鄂尔多斯盆地大宁—吉县、延川南、临兴—神府等地区开展的多项深部煤层气攻关研究取得阶段性突破^[19,21-25],延川南和大宁—吉县煤层气田成为我国最早一批实现规模化开发的深部煤层气田,拉开了深部煤层气规模化开发的序幕。其中,延川南深部煤层气田井组在“选区评价—单井突破—小井组先导—大井组试验—整体开发”流程下实现日产气量 110 万

m³;大宁—吉县吉深 6-7 平 01 水平井在超大规模极限压裂技术下实现日产气量 10.1 万 m³,成为全国首个日产气量突破 10 万 m³ 的煤层气井。

近几年,受延川南、大宁—吉县深部煤层气项目成功开发影响,鄂尔多斯盆地其他地区(神府、石楼、三交北、宜川、乌审旗、佳县南、大牛地、榆林等地)、准噶尔盆地五彩湾地区、四川盆地东南部、

沁水盆地南部等地区深部煤层气项目相继实现产量突破^[26],相关理论技术也得到迅速发展。2023 年,中海油在神府深部煤层气田探明地质资源量超 1 100 亿 m³,是我国首个千亿立方米深部煤层气田;同年大宁—吉县试验区已投产水平井 53 口,日产气量突破 300 万 m³,初步实现商业化开发,推动深部煤层气资源勘探开发脚步迈上新台阶。

表 2 中国深部煤层气勘探开发进展情况

Table 2 Progress of deep CBM exploration and development in China

| 年份 | 地区 | 钻井及深度 | 初期产量 |
|-----------|-------------|--|--|
| 1993 | 准噶尔盆地彩南油田 | 彩 17 井、彩 19 井 ^[17,19] ,超 2 500 m | 2 000~4 000 m ³ /d |
| 2005 | 准噶尔盆地白家海地区 | 彩 504 井 ^[20] ,2 567~2 583 m | 7 300 m ³ /d |
| 2014—2016 | 鄂尔多斯盆地临兴—神府 | LX-4 井 ^[23] ,1 702~1 721 m | 13.3×10 ⁴ m ³ /d |
| 2015 前后 | 沁水盆地郑庄区块 | 郑 60 井 3 号煤 ^[19] ,1 337 m | 2 336 m ³ /d |
| 2015 前后 | 鄂尔多斯盆地三交北 | 某井 5 号煤 ^[19] ,2 036 m | 1.84×10 ⁴ m ³ /d |
| 2018 | 河北大城区块 | 大平 7 水平井 ^[27] ,1 950~2 045 m | 1.1×10 ⁴ m ³ /d |
| 2019 | 鄂尔多斯盆地大宁—吉县 | DJ3-7 向 2 井 ^[28] ,2 000 m 以深 | 5 791 m ³ /d |
| 2021 | 准噶尔盆地白家海地区 | 彩探 1H 井 ^[20] ,3 556 m | 最高 5.7×10 ⁴ m ³ /d, 稳定 2.0×10 ⁴ m ³ /d |
| 2021 | 四川南部古蔺—叙永 | LD1 泥页岩气井 ^[29] ,1 843 m | 4.08 m ³ /t(含气性试验) |
| 2021 | 鄂尔多斯盆地延川南 | 延川南煤层气田井群 ^[19,27] , 74%超 1 000 m | 单直井 0.8×10 ⁴ ~2.2×10 ⁴ m ³ /d, 单水平井 2.5×10 ⁴ ~5.5×10 ⁴ m ³ /d |
| 2021 | 鄂尔多斯盆地大宁—吉县 | 吉深 6-7 平 01 井 ^[25] ,2 000 m 以深 | 最高 10.1×10 ⁴ m ³ /d, 稳定 6.0×10 ⁴ m ³ /d |
| 2022 | 鄂尔多斯盆地临兴地区 | 超大规模水平井 ^[30] ,超 2 200 m | 5.7×10 ⁴ m ³ /d |
| 2022 | 鄂尔多斯盆地大牛地气田 | 大牛地煤层气田钻井群 ^[31] ,2 500 m 以深 | 20.68 m ³ /t(含气性试验) |
| 2022 | 吐哈盆地 | 柯新 1H 煤层气井 ^[30] ,4 531 m | 20 m ³ /t(含气性试验) |
| 2023 | 鄂尔多斯盆地神府地区 | 神府深煤层大气田井群 ^[32] , 约 2 000 m | 最高 1.2×10 ⁴ m ³ /d, 稳定 4 200 m ³ /d |
| 2023 | 鄂尔多斯盆地神木—佳县 | J54 井、JN-1H、JM-2H 水平井 ^[33] , 超 2 000 m | J54:6 560 m ³ /d, JN-1H:8.16×10 ⁴ m ³ /d, JM-2H:12.47×10 ⁴ m ³ /d |
| 2023 | 重庆市南川区 | 井阳 2 井 ^[34] ,超 1 900 m | 1.2×10 ⁴ m ³ /d |

2 我国深部煤层气开发的机遇

2.1 双碳目标下国家能源战略需求为深部煤层气开发提供了前所未有的发展机遇

一方面,深部煤层气开发既有利于提高国家天然气产量,保障国家能源安全,又有利于推进“煤改气”措施的落实,提高民生福祉。随着我国“3060”双碳目标的提出,天然气已成为唯一保持需求增长的化石能源^[25]。《中国天然气发展报告(2023)》指出^[35]:2022 年全国天然气消费量 3 646 亿 m³,产量 2 201 亿 m³,对外依存度 40%。BP 能源公司预计,到 2035 年,我国天然气对外依存度将提升至 55%^[36]。降低进口依赖,实现能源自给自足迫在眉睫;“煤改气”措施推行以来,全国已呈现煤炭消费比重逐年降低,清洁能源消费比

重逐年上升的总体趋势,在此背景下,部分省份出现冬季天然气能源短缺价格上涨问题。深部煤层气的开发,将有助于提升天然气供给量,缓解地方用气荒。

另一方面,国家及地方激励政策为深部煤层气开发提供了动力(表 3)。“十一五”以来,国家立足能源安全战略,从能源、产业、财经等方面发布一系列涉及煤层气产业发展的激励政策;“十四五”以来,随着深部煤层气勘探开发取得新进展,国家又发布了新一轮相关政策,对煤层气产业给予了新的支持;近年,越来越多的省份积极响应国家号召,立足本地现状,相继出台了一系列优惠政策,加强对本省深部煤层气产业发展的支持力度(表 4)。

表 3 “十一五”至“十四五”时期国家出台煤层气产业激励政策

Table 3 CBM industry incentive policies issued by the state during the “11th Five-Year Plan” to “14th Five-Year Plan” period

| 印发单位 | 印发年份 | 政策文件名称 | 支持深部煤层气发展的相关内容 |
|--------------------------------|-----------|--|--|
| 财政部、 海关总署、 国家税务总局 | 2006—2016 | 《关于煤层气勘探开发项目进口物资免征进口税收的规定》 ^[37] 《关于“十二五”期间煤层气勘探开发项目进口物资免征进口税收的通知》 ^[38] 《关于“十三五”期间煤层气勘探开发项目进口物资免征进口税收的通知》 ^[39] | 对我国进行煤层气勘探开发的项目免征进口关税和进口环节增值税 |
| 财政部、 国家税务总局、 国家发展 改革委 | 2007 | 《关于加快煤层气抽采有关税收政策问题的通知》 ^[40] | ①对煤层气抽采企业实行增值税先征后退政策； ②不征收企业所得税；③暂不增收资源税 |
| | 2007 | 《关于利用煤层气(煤矿瓦斯)发电工作的实施意见》 ^[41] | 煤层气发电补贴 |
| 财政部 | 2007—2016 | 《关于煤层气(瓦斯)开发利用补贴的实施意见》 ^[42] 《关于“十三五”期间煤层气(瓦斯)开发利用补贴标准的通知》 ^[43] | 煤层气价格补贴(0.3 元/m ³) |
| 财政部 | 2019 | 《关于〈可再生能源发展专项资金管理暂行办法〉的补充通知》 ^[44] | 补贴鼓励地方和企业增气上产,煤层气开采利用奖补气量比例系数按页岩气、致密气的 1.2 倍测量 |
| 财政部、海关总署、 国家税务总局 | 2021 | 《关于“十四五”期间能源资源勘探开发利用进口税收政策的通知》 ^[45] | 对我国进行煤层气勘探开发的项目免征进口关税和进口环节增值税 |
| 国家发展改革委、 国家能源总局 | 2022 | 《“十四五”现代能源体系规划》 ^[46] | 油气勘探开发技术中,深层煤层气勘探开发及应用应作为国家一批具有前瞻性、战略性的国家重大科技示范项目被落实 |
| 生态环境部、 市场监管总局 | 2023 | 《温室气体自愿减排交易管理办法(试行)》 ^[44] | 将煤层气(煤矿瓦斯)产生的国家核证自愿减排量纳入全国碳市场 |
| 自然资源部 | 2023 | 《自然资源部关于进一步完善矿产资源勘探开采登记管理的通知》 ^[47] | ①对探矿向深部发展提供改革便利 ②鼓励就矿找矿、综合勘察、评价,煤炭矿权可兼探煤层气 |

表 4 “十四五”时期各省深部煤层气产业激励政策

Table 4 Incentive policies of deep CBM industry in each province during the “14th Five-Year Plan” period

| 印发单位 | 印发时间 | 政策文件名称 | 支持深部煤层气发展的相关内容 |
|----------------|-----------|--|--|
| 贵州省人民政府 | 2020 | 《加快推进煤层气(煤矿瓦斯)产业发展的指导意见(2019—2025)》 ^[48] | 推进深部低渗透性煤层增透机制等理论研究,加强相关科技攻关与应用 |
| 山西省人民政府 | 2023 | 《山西省煤层气资源勘查开发规划(2021—2025 年)》 ^[49] | ①将深部煤层气开发利用列入 2025 年科技创新板块目标和 2035 年远景目标; ②将 2 000 m 以深煤层气资源研究作为重点项目,完善产业支持政策,加快配套设施建设 |
| 新疆维吾尔自治区人民政府 | 2021—2022 | 《新疆维吾尔自治区国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》 ^[50] 《新疆维吾尔自治区煤层气(煤矿瓦斯)开发利用“十四五”配套方案》 《新疆维吾尔自治区矿产资源总体规划(2021—2025)》 ^[51] | 大力支持煤层气产业建设,以深部煤层气、煤系气为重点,布局新区资源调查评价,优选产业发展后备区块 |
| 新疆维吾尔自治区自然资源厅等 | 2023 | 《新疆维吾尔自治区战略性矿产找矿行动“十四五”实施方案》 ^[52] | 投入 3 800 万元,开展和什托洛盖煤田八道湾组深部煤层气普查等 4 个煤层气勘察项目(占总勘察项目 40%),预期提交煤层气资源量 300 亿 m ³ |
| 宁夏回族自治区人民政府 | 2021 | 《宁夏回族自治区自然资源保护和利用“十四五”规划》 ^[53] 《宁夏回族自治区能源发展“十四五”规划》 ^[54] | 实施重要煤矿区外围及深部资源勘查,重点推进开展煤层气调查评价和勘查选区 1~2 处 |
| 宁夏回族自治区自然资源厅等 | 2022 | 《宁夏回族自治区矿产资源总体规划(2021—2025 年)》 ^[55] | 鼓励支持开展矿山边坡深部找矿和综合勘察,重点开展石嘴山矿区、韦州矿区、四股泉矿区煤层气勘察 |
| 内蒙古自治区能源局 | 2021 | 《内蒙古自治区煤炭工业发展“十四五”规划煤层气(煤矿瓦斯)开发利用配套方案》 ^[56] | ①加强低渗透性煤层增透机制等重点课题研究; ②计划投资 9.36 亿元,推动白音华、牙石克-五九等中深部煤层气田和其他具备潜力的区域开展煤层气调查评价工作,建设示范区,保障就近城市天然气供应 |

2.2 资源潜力巨大使深部煤层气成为我国未来重点开发的清洁能源资源

据官方资源调查和学者评估^[31,36,57-60],全国煤层气埋深 2 000 m 以浅的资源面积为 41 万 km²,资源量 30.05 万亿 m³,且 1 000~2 000 m 资源量 18.87 万亿 m³,占比 62.80%。埋深在 2 000 m 以深的资源面积超 200 万 km²,资源量 40.47 万亿 m³。2 000 m 以深资源面积、资源量分别是 2 000 m 以浅的 4.88 倍和 1.35 倍,待勘探开发资源量潜力巨大。其中鄂尔多斯、准噶尔、吐哈—三塘湖、四川四大盆地是深部煤层气资源的主要赋存区,资源量达 55 万亿 m³,占深部煤层气资源总量的 78.0%^①(图 1)。

丰富的资源量彰显出我国深部煤层气巨大的开发潜力,使其成为我国未来重点开发的清洁能源资源,为我国发展深部煤层气产业提供了前提和保障。

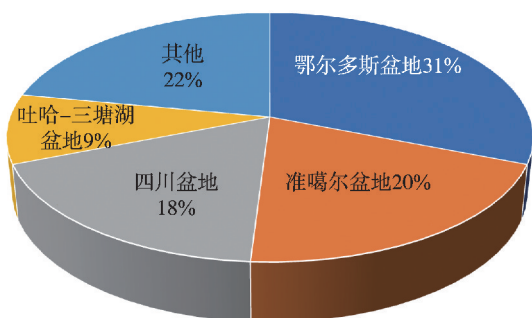


图 1 深部煤层气资源主要赋存区分布,修改自李五忠^①

Fig. 1 Distribution of major occurrence areas of deep coalbed methane resources, modified from LI Wuzhong

2.3 现有煤层气开发技术成果为深部煤层气开发奠定技术基础

2.3.1 煤层气开发理论、技术、工程现状

近年来,煤层气开发理论技术和工程实践水平快速发展并形成基本框架(图 2)。

理论技术方面,主要分为气藏类型划分与描述、成藏机理研究与有利区选取、井型选择与钻完井关键技术、储层改造、排采、效益管理六方面研究。

气藏类型划分与描述方面,在鄂尔多斯盆地、沁水盆地、三塘湖盆地等地区依据气饱和度、煤质、煤层埋深、煤层发育、地下水动力条件和边界、煤层气吸附状态、煤层气成因划分方案,提出十余种新型煤层气成藏模式^[61-63]。

成藏机理研究方面,受地层压力正效应和温

度负效应共同影响,深部相对浅部煤层有更强的温度补偿效应、变孔隙压缩效应,在此基础上对煤层气成因、储集、运移、保存等方面进行了广泛研究。成因方面,划分为有机、无机和混合成因气,认为生物成因和热成因是我国煤层气成因主要类型^[64];储集方面,基于 Langmuir 固-气等温吸附理论,提出固-液吸附解吸、复合吸附解吸模型与理论^[65];运移方面,基于 Fick 扩散定律提出单孔、多孔、时间相关扩散模型;保存方面,认为厚煤层、致密盖层、构造沉降、深埋深、弱构造变形、扭压性逆断层、压性向斜、水力封堵/封闭等条件有利于煤层气保存^[66-67]。

有利区选取方面,在云南、贵州、四川、山西、山东等地区盆地依据煤层气地质背景、煤体结构、储层含气性、储层发育特征、储层物性、合采系数等指标,运用多层次模糊数学计算法、关键指标法、灰色定权聚类法、机器学习等方法建立了多个甜点区评价模型^[68-69]。

井型选择与钻完井关键技术方面,在沁水盆地、鄂尔多斯盆地等地区创新研发一系列与当地储层配套的井型(丛式井、L 形、U 形、V 形、超短流、多分支水平井等)、钻井技术(单点定向钻井、地质导向钻井、无线随钻定向钻井、连续油管钻井、磁导向钻井等)、完井技术(裸眼完井、筛管完井、定向射孔完井、多分支水平井完井等)、钻井液(清水钻井液、聚合物/绒囊/可降解钻井液等)、固井技术(常规固井、双级/半程/泡沫固井等),呈现一井一方案情况,显著促进当地煤层气增产^[70-71]。

储层改造方面,在沁水盆地、鄂尔多斯盆地等地区开展一系列储层改造工程(超临界二氧化碳(ScCO₂)压裂、体积酸压、砂岩-煤层合压、直井多级压裂、水平井分段压裂等),创新研发多种新式压裂液(变黏滑溜水压裂液等活性水压裂液体系、ScCO₂ 压裂液等气体/气体泡沫压裂液体系、纳米清洁压裂液等清洁压裂液体系)、压裂配套工具(可溶式桥塞、智能式滑套、抗压抗温抗剪纳米材料封隔器、撬装式压裂机组等),实现显著增产;在室内和现场进行 CO₂/N₂ 驱替煤层气、微波注热法、火烧煤层法、等离子脉冲增透法、水平井造洞穴应力释放等新方法的模拟和试验,取得良好效果^[9,72-75]。

排采方面,在沁水盆地、鄂尔多斯盆地等地区,基于不同储层特征(煤阶、煤层数等),提出适配排采技术(适合碎软煤层的慢、控、稳、低套压分阶段精细化排采技术、适合双煤层的双泵三通道

① 李五忠于 2023 煤层气学术研讨会上发表的“深层煤层气勘探开发潜力分析”口头报告

分层控压合层排采技术、适合多煤层的双套管分层控压排采技术等)、创新排采设备(管式泵、顶驱螺杆泵、电潜螺杆泵、射流泵、水力管式泵等),有效提高煤层气产量^[76].

效益管理方面,随着产业规模的提升,在沁水盆地、鄂尔多斯盆地等地区,将大数据、机器学习方法应用于煤层气井布置、建设、排采、检测等方面,初步实现自动化,有效提高煤层气产量,降低

生产开发成本^[77-78].

归纳现有研究成果,总结各方向研究现状(表 5),认为研究已从早期的勘探评价导向发展为工程实践导向,地质-工程一体化、多气合采、多储层共同改造、大规模开发等概念被广泛应用,空间上由浅部向深部、布置上由井网向井群发展成为趋势.

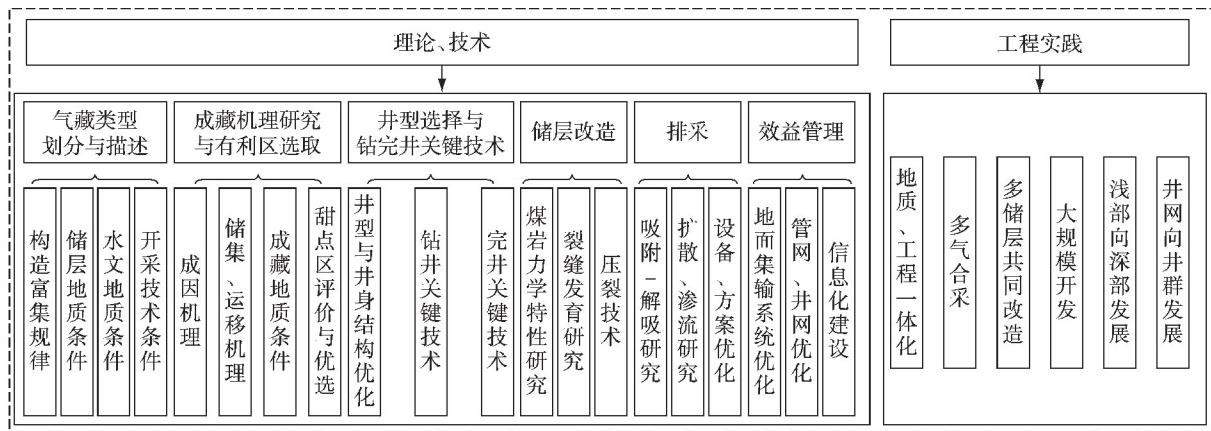


图 2 煤层气开发理论、技术、工程实践框架

Fig. 2 CBM development theory, technology, engineering practice framework

表 5 煤层气开发理论、技术研究现状

Table 5 CBM development theory and technology research status

| 研究方向 | 研究现状 |
|--------------|--|
| 气藏类型划分与描述 | 成藏因素主要考虑构造富集规律、储层地质条件、水文地质条件三方面 ^[79-80] |
| 成藏机理研究 | 成因和保存方面,将区域地质演化、储层构造、水文条件、微生物改造因素作为研究主要依据;储集和运移方面,以 Langmuir 等温吸附理论、达西、非达西渗透理论为基础,将煤储层物性参数时空演化作为研究主要对象 |
| 有利区选取 | 总策略是围绕地质和储层条件选取合适的参数,建立简洁有效评价体系,寻找“甜点”开发区,其中“甜点”选区由勘探向工程转变,依托于计算机技术的机器学习等算法被应用,储层可改造性、可采性等参数被重视 ^[81] |
| 井型选择与钻完井关键技术 | 总策略是优选最佳井型、钻井、完井技术与当地煤层气藏匹配.井型上以直井、丛式井、水平井为主,丛式井占比最高,水平井发展速度最快,钻完井关键技术上重视井筒与储层间作用关系、钻井与完井间技术配合,强调储层伤害最小化,呈现“工厂化”作业趋势 ^[60,82] |
| 储层改造 | 理论上,早期主要考虑储层特征参数(应力、温度、流体压力、煤阶、气体赋存状态等)与煤岩力学特性、裂缝发育的相互作用关系,现开始重视工程参数(气体注入参数、钻完井工程扰动)的影响;技术上,以压裂造缝相关技术(井况、井深、井作用、压裂施工规模、工艺原理、压裂液、支撑剂种类、裂缝扩展形态、压裂次数、压裂层数等)研发为主,其他储层增透技术(气体注入、热注入、脉冲干扰、应力释放等)研发迅速发展 ^[75] |
| 排采 | 理论上,早期主要进行常温下吸附-解吸、扩散、渗流机理研究,现逐渐重视高温、高应力、SeCO ₂ /N ₂ 气体注入等复杂赋存状态下的相关研究 ^[83-84] ;技术上,方案向绿色化、规模化、一体化(多气合采)发展,设备向自动化、精细化发展 |
| 效益管理 | 以降本增效为核心,工程学科理论(自动化、工程管理、大数据分析、机器学习等)与产业地面集输系统优化、管网/井网优化、信息化建设、人员/项目管理等方向紧密结合 |

2.3.2 浅、深部煤层气开发共同点

我国浅、深部煤层气开发均是理论技术与工程实践相互推动的结果.理论技术方面,深部煤层气作为浅部煤层气开发的延伸,在气藏类型划分

与描述、成藏机理研究、有利区选取方面有相似的研究方法,主要区别是储层赋存条件的差异.因此,浅部煤层气吸附-解吸机理、扩散/渗流机理和煤岩力学特性等研究方法对深部煤层气具有重要

参考价值。在很多地区,未经勘探的深部煤层气藏位于浅部煤层气藏正下方,其构造富集规律、储层地质等条件与深部有很强的关联性,基于浅部研究取得的地质勘探数据、数值建模方法等诸多研究成果,都可以作为当地深部煤层气研究的重要补充资料。工程实践方面,回顾浅部煤层气开发历史,我国高、中、低阶煤层气资源结构完整,高、低渗透率煤层类型丰富。如沁水、四川、鄂尔多斯等盆地以中高阶煤为主,含气量高,游离气占比高;二连、吐哈、准噶尔等盆地以中低阶煤为主,含气量低,游离气占比高;贵州以薄煤层为主,含气量高,渗透率低。这些工程项目积累了丰富的与深部煤层具有相似条件的(如高煤阶、低渗透率)开发经验,研发了一系列适用设备,对深部煤层气开发中的钻完井、储层改造、排采技术有重要借鉴价值,技术研发和设备优化时提供帮助,节省大量成本。

2.3.3 深部煤层气开发理论技术快速发展并取得丰富成果

目前,深部煤层气开发理论技术依托各深部煤层气试验井、开发井获得的新数据、新认识,取得了一系列成果。

气藏类型划分与描述方面,考虑各地区深部构造、沉积、水文地质等条件,提出鄂尔多斯盆地“源储一体、箱式封存、自生自储、常压”型、西北前陆盆地“古生新储、自生自储、断控、多源共储”型、四川盆地“自生自储、超压”型等多种深部煤层气成藏模式^[85]。

成藏机理研究方面,认为深部煤层气存在煤岩致密性大、含气量高、游离气占比大、含气系统类型多、饱和度差异大、储层温度场、压力场、应力场高、压缩性大、非均质性强等特点,提出“煤岩吸附性随深度减弱,深部煤层游离气含量相对浅部更多”、“应力随深度增大,煤层渗透率趋于急速衰减”等新认识,并在此基础上建立了“扩散受限”假说、“压力梯度和变质程度补偿效应”理论、“含校正系数的深部煤层气含气量计算”模型、“深煤层三维地震储层预测”技术等新假说、新理论、新模型、新技术,推动了深部煤层气藏解释、勘探与评价的发展^[25]。

有利区选取方面,将依托于计算机技术的新型算法应用于深部煤层气藏精细化描述与“甜点”评价,提升了气藏研究效率和工程决策有效性。文献^[3,86-87]在“四步阶梯”深部煤层气成藏效应耦合分析思路基础上,建立了一套以含气性、储层能

量、流动能力为关键要素,由产能方程约束的深部煤层气成藏综合效应模型和有利区选取方法,将其应用在鄂尔多斯盆地东部临兴/大宁—吉县、准噶尔盆地白家海凸起等地并获得良好的预测结果。

井型选择与钻完井关键技术方面,归纳沁水盆地南部中深部、鄂尔多斯盆地东缘深部等地区煤层气开发经验^[2,63]认为:①从式井和水平井因其较好的地形适应性和储层改造效果,在深部应用前景更大;②目前深部煤层钻完井关键技术主要参考借鉴页岩气开发,钻遇率、储存完整性和钻井周期是主要的考量指标。

储层改造方面,归纳已在沁水盆地、鄂尔多斯盆地等地区深部使用的一系列储层改造技术^[21-22,25,88-89](大规模极限压裂、CO₂泡沫压裂、ScCO₂增能压裂、水力波及压裂、间接穿层压裂、常规油管带压压裂、连续油管底封拖动压裂、少段多簇酸化压裂、体积酸压(水力压裂+溶液溶蚀)、填饱砂压裂、喷砂射孔压裂、多轮次压裂、水力割缝卸压、错位多割缝卸压、磨料射流钻孔卸压等)认为:①压裂观念方面向体积压裂发展;②压裂规模方面由常规压裂逐渐增大,向“工厂级”发展;③压裂液方面以低储层伤害为核心,向低含水、低成本、高黏度、低温破胶、无残渣、可回收方向发展;④工艺方面向多段、多簇、多次、多层、多轮次、多类型储层合压方向发展;⑤井特征方面由直井向水平井压裂方向发展。

排采方面,针对深部煤层气藏“气多水少”“多气共存”“气藏封闭条件好”等特点,提出稳定卸压恒采、多气共采、煤炭地下气化合采、注采协同等新型排采方案,并在数值仿真模拟下取得不错的预期结果^[90]。

2.4 深部煤层气开发示范项目快速发展并取得持续突破

我国深部煤层气开发项目呈现中石油、中石化公司主导,中海油等其他公司快速发展的态势。其中中石油、中石化研究较早,已初步实现商业化开发,中海油、山西蓝焰控股等公司正进行多项勘探开发试验并取得持续性突破。

2.4.1 中石油深部煤层气开发示范项目

2019年以来,中石油煤层气公司在2000 m以深开展地质综合研究和技术攻关试验,试采评价和先导试验均取得突破性进展,基本形成了深部煤层气高效开发的主体技术。2020—2021年在

1 121.62 亿 m^3 , 是国内首个埋深 2 000 m 以上、高丰度、大型深层煤层气田。2021—2022 在千亿立方米储量区内优选北部先导试验区和南部扩大试验区同步开展规模化开发先导试验, 吉深 6-1 平 01 井为深部煤层气首口大规模压裂先导试验水平井, 2021 年 12 月投产, 日产最高超 10 万 m^3 , 首年平均日产 5 万 m^3 , 是深部煤层气先导试验试采获得重大突破的标志。截至 2023 年 9 月 21 日, 中石油煤层气公司深部煤层气产气量达 400 万 m^3/d , 其中大宁—吉县地区深部煤层气水平井 62 口, 产能达 320.5 万 m^3/d , 平均单井产能 5.2 万 m^3/d , 为产能主力。根据预测, 按当日气价算, 内部收益率超 10%。

2.4.2 中石化深部煤层气开发示范项目

2008—2018 年在延川南建成产能 4.2 亿 m^3 气田, 形成一套简单、低成本技术系列, 此煤田成为国内首个 1 000 m 以深商业开发的煤层气田, 带动了全国深部煤层气开发进程。2019—2021 年实现了延川南效益稳定, 逆势上产。2022 年以来实现延川南薄煤层水平井产能突破 6 万 m^3/d 、南川阳 2 井自喷产能 1.2 万 m^3/d 、三交北阳煤 1HF 井试获产能 10 万 m^3/d 。

其中, 在重庆东南南川地区部署的超深煤层气井 NY1 直井, 2 层煤埋深 1 873~1 903 m, 厚度累计 6 m, 压裂后合排产能稳定在 2 800~3 000 m^3/d , 弥补了南方深部煤层气开发的空白, 在同区域部署的井阳 2 井实现稳定产能 1.2 万 m^3/d , 标志着南方深部煤层气开发的重大突破。

2.4.3 中海油深部煤层气开发示范项目

2017—2019 年试验 6 口井效果较差, 均未达到预期; 2020—2021 年选取致密气老井 2 口井开展试验, 获超 2 000 m^3 产量; 2022—2023 年完成 2 个示范区方案, 进入全面开发阶段。

目前, 中海油中联公司在临兴—神府取得突破性进展, 单直井平均产气量 4 500 m^3/d , “深煤一号”水平井实现 6 万 m^3 工业气流, 水平井稳定产能 1.5 万 m^3/d , 产能实现产气量 65 万 m^3/d , 2023 年预计建设 5 亿 m^3/a 产能。

2.4.4 山西蓝焰控股等其他公司开发示范项目

山西蓝焰控股股份有限公司在沁水盆地北中部(武乡南区块、横岭区块、榆社东区块) 1 200 m 以深进行了勘探开发试验, 其中武乡南区块 20 井 15[#] 煤层垂直深度超过 1 400 m, 采用地质-工程一体化钻井技术, 最高产能达 7 300 m^3/d , 稳定产能为 5 000 m^3/d 左右, 已初

步达到商业化开采价值。

中澳煤层气能源有限公司在鄂尔多斯、四川、准噶尔等盆地取得进展, 已成功实施多口商业气井。

内蒙古煤勘新能源开发有限公司在白音华煤田进行深部煤层气试验尝试, 其初期开发效果不佳, 拟计划使用纵向整体动用、分段压裂方法进行储层改造, 进一步进行试验。

综上所述, 煤层气开发多年积累的技术和实践成果为我国深部煤层气开发奠定了坚实的基础, 快速发展的深部煤层气开发示范项目展现出我国深部煤层气开发的广阔发展前景。

3 我国深部煤层气开发的挑战及其应对

3.1 开发理论、技术与工程实践方面

煤岩是一种力学强度低、塑性变形强的有机岩体, 与浅部煤层气相比, 深部煤层气最大的区别在于其储层具有高温、高压、高应力的“三高”特点, 总体呈现特低渗透性、低孔隙度、高抗压强度、低裂缝扩展性特点。其高度依赖以有效改造为核心的压裂技术, 工程开发思路与浅部煤层气存在差异(表 6)。

气藏类型划分与描述方面, 现有成藏模式分析主要考虑基础地质的影响, 认识较为局限, 若使其与勘察地质、开发地质有机结合, 将对工程实践的开展起到更好的指导作用。

成藏机理研究方面, 现有理论研究成果与工程实践现象的匹配度还不够, 如有实践结果表明: ①延川南区块深部煤层气初期解吸效率低, 产气特点表明几乎不含游离气; ②烟煤加载模拟试验表明渗透率-深度非单调关系, 存在“高渗窗”; ③深部煤层吸附-解吸量差异显著大于浅部, 深部 CH_4 解吸率低于浅部。这与现有的深部煤层气成藏机理研究结果还存在矛盾与差异, 在未来, 应进一步强化深部多因素耦合下的赋存、扩散、流动、解吸等机理研究认识。

有利区选取方面, 虽在鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地等深部煤层气开发较早的地区进行了预测和评价工作, 但全国范围内的相关地质研究资料还比较少。如贵州、四川等地区深部煤层气与上述区块地质构造、储层条件并不完全相同, 有超声、超压、超饱和、储层薄等特点, 在借鉴鄂尔多斯等地区深部煤层气有利区选取方法时, 需进一步开展现场试验以对评价参数进行优化和创新。

井型选择与钻完井关键技术方面, 地质导向

技术、钻井液体系、钻进技术是深部煤层钻完井关键技术相对浅部的主要区别,提高钻遇率、保护储层、降低钻井周期是主要攻关技术难点.另一方面,如何形成有良好井间缝网特征的人造气藏也是一大难题,将钻完井技术与深部煤储层改造、排采等技术有机结合,既是提高资源动用效率和采收率的关键,也是挑战所在.

储层改造方面,理论上,缝网形成与扩展机理、仿真模拟等理论研究还停留在针对性的物理试验和数值模拟阶段,往往是基于某一地区具体工程数据形成的研究结论,不具备普遍性,进一步加深本质认识,提高结论可解释性,是下一步亟需展开的研究;技术上,规模化开发已成为普遍共

识,但其所消耗的水资源、人力、监测成本也会显著提高,资源消耗、成本控制是所面临的重要挑战.无水压裂技术、生物改造技术、资源回收技术是降低成本、减少资源浪费的重要研究方向.

排采方面,理论上,将设计方案与现场施工条件结合是一大挑战,要避免模拟可行但现有设备条件无法支持的情况发生.技术上,深部煤层气排水降压、排气降压难度大,在多层合采、注采协同等新方案下,装置的要求也更高,这对新工艺、新设备的研究形成了挑战.应以实地项目为研发单元,着重优化排采制度方案,以经济效益为动力,促进理论发展与技术更新.

表6 浅、深部煤层气开发理论与技术对比
Table 6 Comparison of theory and technology of shallow and deep CBM development

| 理论/技术 | 浅部煤层气 | 深部煤层气 | 深部煤层气开发亟需解决的问题 |
|------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------------|
| 地应力 | 低 | 高 | |
| 温度 | 低 | 高 | 深部应力、温度、流体压力耦合作用系统研究 |
| 流体压力 | 低 | 高 | |
| 孔隙度 | 大 | 小 | 深部高应力、水平和垂直叠加应力耦合作用下的孔隙系统发育机理研究 |
| 裂隙系统 | 宽 | 窄 | |
| 成藏机理研究 (储层参数) | | | 深部高温高压作用下煤岩吸附特性、吸附解吸模型研究 |
| 吸附性 | 高 | 低 | |
| 含气性 | 欠饱和、吸附气为主 | 饱和、吸附、游离气并存 | 考虑深部气体赋存特点后的含气量优化计算方法研究 |
| 渗透性 | 高 | 低 | |
| 力学性质 | 小弹性模量、低抗压强度 | 大弹性模量、高抗压强度 | 深部高应力、高温、高流体压力等多因素耦合作用下的煤储层各性质变化规律研究 |
| 含水性 | 强,水矿化程度低 | 弱,水矿化程度高 | |
| 煤岩成熟度 | 相对较低 | 相对较高 | |
| 井型选择 | 直井、水平井、丛式井 | 水平井、丛式井 | 匹配大规模储层改造的井型设计 |
| 钻完井关键技术 | 煤岩钻进完井难度低 | 煤岩钻进完井难度高 | 适合深部的钻井与完井设备开发 |
| 储层改造 | 可压性强 | 可压性弱 | 深部裂缝形成与拓展理论研究,新型低碳压裂设备、耗材研究 |
| 排采 | 井压低、井深小、运移能力相对强 | 井压高、井深大、运移能力相对弱 | 深部煤层数值模拟与工程实践组合研究,适合深部的排采设备开发 |

3.2 市场竞争方面

我国深、浅部煤层气开发进展显著受到国家政策 and 市场形势的影响,目前虽在政策上获得了国家支持,但在市场形势上仍面临很大压力.吸取美国、澳大利亚、加拿大煤层气发展历史经验,产业规模较小、天然气价格较低以及来自其他能源(如页岩气等)的竞争可能成为深部煤层气产业发展的阻碍.据统计,我国煤层气勘探投资强度在2012年达到高峰 6.36×10^4 元/ km^2 后即呈现下降趋势.“十四五”以来,自然资源部出台“自然资源

部关于进一步完善矿产资源勘探开采登记管理的通知”^[47]等一系列政策鼓励产业发展,但增长趋势仍然不明显.分析认为,较小产业规模(2021年全国煤层气产量仅占全国天然气总量4%^[25])、较长投资周期和较高初期投入资金是阻碍企业投资的三大因素,目前我国深部煤层气的开发仍主要集中在行业头部企业,长远来看,只有实现相对较高的经济效益,才能维持产业活力.规模化和建成相关的基础设施、管网运输系统则是降本增效的必要环节,这需要国家在政策上的具体落实和理论

技术持续突破带来的投资信心。

3.3 环保方面

深部煤层气的开发离不开储层改造,水力压裂是目前最主要的改造手段,但这一过程可能造成水资源浪费、交叉污染等环保问题。加拿大和澳大利亚的开发经验表明,建立配套污染处理设施是一种可行的办法,但这会让开发成本变高,阻碍产业发展^[16]。另一种思路是发展 ScCO₂ 压裂等新型储层改造手段,其一方面可以降低水的使用,减少水污染的可能,另一方面可将 CO₂ 埋藏于深部煤层,降低碳排放,非常适用于我国鄂尔多斯盆地等缺水地区,是更符合全球发展主题的一种方法。

4 结 论

1) 深部煤层气开发背景好,受国家政策和企业大力支持。目前,贵州、山西、新疆、宁夏、内蒙古等省份均在其“十四五”产业发展规划中提及支持深部煤层气开发的相关内容,并将深部煤层气开发作为煤层气产业发展的重要方向。中石油、中石化、中海油、山西蓝焰等煤层气领域头部企业的深部煤层气理论产出显著增多,项目突破愈加频繁。地方政府和企业释放的信号共同表明,深部煤层气的开发已成为新趋势。

2) 我国深部煤层气资源量丰富、可采性强,具有极大的开发潜力。据估计,我国 2 000 m 埋深以深的煤层气资源量达 40.47 万亿 m³,是 2 000 m 以浅资源量的 1.35 倍,且普遍存在游离气含量高、超饱和的特点,在克服理论、技术困难情况下,生产时甚至相对浅部见气更快,排采周期更短,其作为我国能源结构转型的重要过渡资源,也能填补潜在能源需求缺口,具有经济和战略双重价值。

3) 现有煤层气理论、技术、工程实践经验为深部煤层气开发的快速发展打下坚实基础。在成藏地质研究、吸附-解吸、扩散/渗流机理等研究上,浅部煤层气研究所形成的资源量估算方法(体积法、类比法等)、孔渗物性测试方法(压泵试验、吸附试验等)、地应力测试方法(注入/压降法、测井法等)、赋水特征测试方法(核磁共振等)等理论虽不能直接应用于深部,但在原理上有很强的借鉴价值。得益于我国浅部煤层类型丰富,高、中、低阶煤,高、低孔隙度、渗透率或饱和度,大、小厚度煤体系齐全,积累了丰富的钻完井(近钻头地质导向系统适用于薄煤层、多煤层;井壁

强化技术和强抑制性钻井液体系适用于碎软煤层;多分支水平井适用于高孔隙度、厚、简单构造煤层;筛管完井适用于高渗煤层,套管射孔完井适用于低渗煤层等)、储层改造(“大液量大砂量变排量”工艺适用于低压低渗低饱和煤层;顶底板间接压裂工艺适用于碎软煤层;高能气体压裂适用于脆性煤层等)、排采(负压排采技术适用于高渗透率煤层;合层排采技术适用于薄煤层、多煤层等)工程技术经验,其中高煤阶、低渗透率、高饱和度煤层的相关经验对深部煤层气开发有重要的参考意义。

4) 我国深部煤层气开发仍然面临多方面的挑战,亟需探讨解决。理论技术方面,主要存在理论研究与工程实践有机结合程度不够、可用地质勘探评价资料较少、研究结论普适性不强、钻完井和排采设备无法完全满足生产需求的问题。未来研究应首先聚焦于成藏机理和储层改造方面,以改变目前实现初期高产的深部煤层气井普遍不能长期维持、资源潜力未得到充分释放的情况;市场竞争方面,降本增效是提高竞争优势核心,规模化是实现降本增效的必经之路,目前的基础设施和管网运输系统建设并不完备。未来研究应聚焦于多气合采、注采协同等创新开发思路,将深部煤层气与其他煤系气开采、CO₂ 封存等理念结合,提高竞争力;环保方面,深部煤层气开发过程中,水力压裂等储层改造手段会造成水资源浪费、交叉污染等环境问题,未来研究应聚焦于环保型压裂液、可回收型设备仪器的研发。

参考文献:

- [1] LI S, QIN Y, TANG D Z, et al. A comprehensive review of deep coalbed methane and recent developments in China[J]. International Journal of Coal Geology, 2023, 279: 104369.
- [2] 桑树勋, 韩思杰, 周效志, 等. 华东地区深部煤层气资源与勘探开发前景[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(4): 403-415.
SANG Shuxun, HAN Sijie, ZHOU Xiaozhi, et al. Deep coalbed methane resource and its exploration and development prospect in east China[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(4): 403-415.
- [3] 秦 勇, 申 建. 论深部煤层气基本地质问题[J]. 石油学报, 2016, 37(1): 125-136.
QIN Yong, SHEN Jian. On the fundamental issues of deep coalbed methane geology[J]. Acta Petrolei Sini-

- ca, 2016, 37(1):125-136.
- [4] RICE D D. Composition and origins of coalbed gas [J]. *Hydrocarbons From Coal: AAPG Studies in Geology*, 1993, 38(1):159-184.
- [5] 李松, 汤达祯, 许浩, 等. 深部煤层气储层地质研究进展[J]. *地学前缘*, 2016, 23(3):10-16.
LI Song, TANG Dazhen, XU Hao, et al. Progress in geological researches on the deep coalbed methane reservoirs[J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(3):10-16.
- [6] KUUSKRAA V A, WYMAN R E. Deep coal seams: An overlooked source for long-term natural gas supplies[J]. *Proceedings of the Gas Technology Symposium*, 1993:587-596.
- [7] JOHNSON R C, FLORES R M. Developmental geology of coalbed methane from shallow to deep in Rocky Mountain basins and in Cook Inlet-Matanuska basin, Alaska, U. S. A. and Canada[J]. *International Journal of Coal Geology*, 1998, 35(1):241-282.
- [8] OLSON T M. White River Dome field: Gas production from deep coals and sandstones of the Cretaceous Williams Fork Formation[J]. *Piceance Basin*, 2003:155-169.
- [9] 申建. 论深部煤层气成藏效应[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(9):1599-1600.
SHEN Jian. CBM-reservoiring effect in deep strata [J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(9):1599-1600.
- [10] NELSON C R. Deep coalbed gas plays in the US rocky mountain region[C]// *Annual Meeting Expanded Abstracts*; American Association of Petroleum Geologists, 2003:127.
- [11] MENPES S, HILL A. Emerging continuous gas plays in the Cooper Basin, South Australia[J]. *The APPEA Journal*, 2012, 52(2):671.
- [12] SALMACHI A, RAJABI M, WAINMAN C, et al. History, geology, in situ stress pattern, gas content and permeability of coal seam gas basins in Australia: A review[J]. *Energies*, 2021, 14(9):2651.
- [13] GUNTER W, GENTZIS T, ROTTENFUSSER B, et al. Deep coalbed methane in Alberta, Canada: A fuel resource with the potential of zero greenhouse gas emissions[J]. *Energy Conversion and Management*, 1997, 38:217-222.
- [14] GENTZIS T, GOODARZI F, CHEUNG F, et al. Coalbed methane producibility from the Mannville coals in Alberta, Canada: A comparison of two areas [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2008, 74(3/4):237-249.
- [15] 孙钦平, 赵群, 姜馨淳, 等. 新形势下中国煤层气勘探开发前景与对策思考[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(1):65-76.
SUN Qinpeng, ZHAO Qun, JIANG Xinchun, et al. Prospects and strategies of CBM exploration and development in China under the new situation [J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(1):65-76.
- [16] MASTALERZ M, DROBNIAK A. Coalbed methane: Reserves, production, and future outlook[M]. Amsterdam: Elsevier, 2020:97-109.
- [17] 王屿涛, 兰文芳. 彩南油田油气成因及勘探方向[J]. *新疆石油地质*, 1994(1):30-36.
WANG Yutao, LAN Wenfang. Genesis of oil and gas in Cainan Oilfield and exploration directions [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 1994(1):30-36.
- [18] 李辛子, 王运海, 姜昭琛, 等. 深部煤层气勘探开发进展与研究[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(1):24-31.
LI Xinzi, WANG Yunhai, JIANG Zhaochen, et al. Progress and study on exploration and production for deep coalbed methane [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(1):24-31.
- [19] 吴聿元, 陈贞龙. 延川南深部煤层气勘探开发面临的挑战和对策[J]. *油气藏评价与开发*, 2020, 10(4):1-11.
WU Yuyuan, CHEN Zhenlong. Challenges and countermeasures for exploration and development of deep CBM of South Yanchuan [J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2020, 10(4):1-11.
- [20] 郭绪杰, 支东明, 毛新军, 等. 准噶尔盆地煤岩气的勘探发现及意义[J]. *中国石油勘探*, 2021, 26(6):38-49.
GUO Xujie, ZHI Dongming, MAO Xinjun, et al. Discovery and significance of coal measure gas in Junggar Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2021, 26(6):38-49.
- [21] 熊先钺, 甄怀宾, 李曙光, 等. 大宁-吉县区块深部煤层气多轮次转向压裂技术及应用[J]. *煤田地质与勘探*, 2024, 52(2):147-160.
XIONG Xianyue, ZHEN Huaibin, LI Shuguang, et al. Multi-round diverting fracturing technology and its application in deep coalbed methane in the Daining-Jixian block [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(2):147-160.
- [22] 杨兆彪, 李存磊, 郭巧珍, 等. 新疆准噶尔盆地白家海凸起深部煤层气不同赋存态分配规律[J/OL]. *中国矿业大学学报*, 1-11 [2023-11-13]. <https://doi.org/10.13247/j.cnki.jcmt.20240080>.
YANG Zhaobiao, LI Cunlei, GUO Qiaozhen, et al. Dis-

- tribution patterns of various occurrence states of deep coalbed methane in the Baijiahai Uplift, Junggar Basin, Xinjiang[J/OL]. Journal of China University of Mining & Technology, 1-11 [2023-11-13]. <https://doi.org/10.13247/j.cnki.jcmt.20240080>.
- [23] 米立军,朱光辉.鄂尔多斯盆地东北缘临兴—神府致密气田成藏地质特征及勘探突破[J].中国石油勘探,2021,26(3):53-67.
MI Lijun,ZHU Guanghui. Geological characteristics and exploration breakthrough in Linxing-Shenfu tight gas field, northeastern Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration,2021,26(3):53-67.
- [24] 蒋曙鸿,师素珍,赵康,等.深部煤及煤层气勘探前景及发展方向[J].科技导报,2023,41(7):106-113.
JIANG Shuhong,SHI Suzhen,ZHAO Kang,et al. Prospect and development direction of deep coal and coalbed methane exploration[J]. Science & Technology Review,2023,41(7):106-113.
- [25] 徐凤银,侯伟,熊先钺,等.中国煤层气产业现状与发展战略[J].石油勘探与开发,2023,50(4):669-682.
XU Fengyin,HOU Wei,XIONG Xianyue,et al. The status and development strategy of coalbed methane industry in China[J]. Petroleum Exploration and Development,2023,50(4):669-682.
- [26] 陈世达,侯伟,汤达祯,等.煤储层含气性深度效应与成藏过程耦合关系[J].煤田地质与勘探,2024,52(2):52-59.
CHEN Shida,HOU Wei,TANG Dazhen,et al. Effects of depth on gas-bearing properties of coal reservoirs and their coupling relationships with coalbed methane accumulation[J]. Coal Geology & Exploration,2024,52(2):52-59.
- [27] 周德华,陈刚,陈贞龙,等.中国深层煤层气勘探开发进展、关键评价参数与前景展望[J].天然气工业,2022,42(6):43-51.
ZHOU Dehua,CHEN Gang,CHEN Zhenlong,et al. Exploration and development progress,key evaluation parameters and prospect of deep CBM in China[J]. Natural Gas Industry,2022,42(6):43-51.
- [28] 徐凤银,闫霞,李曙光,等.鄂尔多斯盆地东缘深部(层)煤层气勘探开发理论技术难点与对策[J].煤田地质与勘探,2023,51(1):115-130.
XU Fengyin,YAN Xia,LI Shuguang,et al. Theoretical and technological difficulties and countermeasures of deep CBM exploration and development in the eastern edge of Ordos Basin[J]. Coal Geology & Exploration,2023,51(1):115-130.
- [29] 杨 帆,方 坤,罗 鹏,等.川南古叙地区 LD1 井龙潭组海陆过渡相泥页岩地质特征及其含气性[J].沉积与特提斯地质,2021,41(3):446-453.
YANG Xian,FANG Kun,LUO Peng,et al. Geological characteristics and gas bearing capacity of shale from transtional marine-continental facies of ongtan formation:A case study from the Well LD1 in Gulin-Xuyong southern Sichuan[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology,2021,41(3):446-453.
- [30] 秦 勇.煤系气地质调查若干问题思考与探讨[J].中国地质,2023,50(5):1355-1374.
QIN Yong. Thinking and discussion for some problems of geological survey of coal measures gas[J]. Geology in China,2023,50(5):1355-1374.
- [31] 何发岐,董昭雄.深部煤层气资源开发潜力:以鄂尔多斯盆地大牛地气田为例[J].石油与天然气地质,2022,43(2):277-285.
HE Faqi,DONG Zhaoxiong. Development potential of deep coalbed methane:A case study in the Daniudi gas field, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology,2022,43(2):277-285.
- [32] 陕西省人民政府.陕西发现我国首个千亿立方米深煤层气田[EB/OL].(2023-10-24)[2023-11-09].http://www.shaanxi.gov.cn/xwsxyw202310/t20231024_2304501.html.
The People's Government of Shanxi Province. Discovery of China's first deep coalbed methane field exceeding 100 billion cubic meters in Shanxi[EB/OL].(2023-10-24)[2023-11-09].http://www.shaanxi.gov.cn/xwsxyw202310/t20231024_2304501.html.
- [33] 李国永,姚艳斌,王 辉,等.鄂尔多斯盆地神木-佳县区块深部煤层气地质特征及勘探开发潜力[J].煤田地质与勘探,2024,52(2):70-80.
LI Guoyong,YAO Yanbin,WANG Hui,et al. Deep coalbed methane resources in the Shenmu-Jiaxian block, Ordos Basin, China: Geoloaica characteristics and potentia for exploration and exploitation[J]. Coal Geology & Exploration,2024,52(2):70-80.
- [34] 杨 漾.井深超 1900 米,中国西南深层煤层气勘探再获突破[EB/OL].(2023-08-02)[2023-11-09].https://m.thepaper.cn/newsDetail_forward_24088053.
YANG Yang. The well depth exceeded 1900 meters,breakthrough in deep coalbed methane exploration in southwest China[EB/OL].(2023-08-02)[2023-11-09].https://m.thepaper.cn/newsDetail_forward_24088053.
- [35] 国家能源局.中国天然气发展报告(2023)[R].北

- 京:国家能源局,2023.
National Energy Administration. China natural gas development report(2023)[R]. Beijing: National Energy Administration,2023.
- [36] 秦勇,申建,史锐.中国煤系气大产业建设战略价值与战略选择[J].煤炭学报,2022,47(1):371-387.
QIN Yong, SHEN Jian, SHI Rui. Strategic value and choice on construction of large CMG industry in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1):371-387.
- [37] 财政部,海关总署,国家税务总局.关于煤层气勘探开发项目进口物资免征进口税收的规定[R].北京:财政部,2006.
Ministry of Finance, General Administration of Customs, State Taxation Administration. Provisions on duty-free import of goods for coalbed methane exploration and development projects[R]. Beijing: Ministry of Finance, 2006.
- [38] 财政部,海关总署,国家税务总局.关于煤层气勘探开发项目进口物资免征进口税收的管理规定[R].北京:财政部,海关总署,国家税务总局,2011.
Ministry of Finance, General Administration of Customs, State Taxation Administration. Provisions on the administration of exemption from import tax on imported materials for coal-bed methane exploration and development projects[R]. Beijing: Ministry of Finance, General Administration of Customs, State Taxation Administration, 2011.
- [39] 财政部,海关总署,国家税务总局.关于煤层气勘探开发项目进口物资免税进口税收的管理规定[R].北京:财政部,海关总署,国家税务总局,2016.
Ministry of Finance, General Administration of Customs, State Taxation Administration. Regulations on the administration of duty-free import tax on imported materials for coalbed methane exploration and development projects[R]. Beijing: Ministry of Finance, General Administration of Customs, State Taxation Administration, 2016.
- [40] 财政部,国家税务总局.关于加快煤层气抽采有关税收政策问题的通知[EB/OL].(2007-02-07)[2023-11-13]. <https://fgk.chinatax.gov.cn/zcfgk/c102416/c5203214/content.html>.
Ministry of Finance, State Taxation Administration. About the tax policies to speed up the CBM extraction notice[EB/OL].(2007-02-07)[2023-11-13]. <https://fgk.chinatax.gov.cn/zcfgk/c102416/c5203214/content.html>.
- [41] 国家发展改革委.关于利用煤层气(煤矿瓦斯)发电工作实施意见的通知[EB/OL].(2007-04-16)[2023-11-13]. https://www.gov.cn/zwgk/2007-04/16/content_583702.htm.
National Development and Reform Commission. Notice on issuance of implementation opinions on utilizing CBM (coal mine methane) for power generation[EB/OL].(2007-04-16)[2023-11-13]. https://www.gov.cn/zwgk/2007-04/16/content_583702.htm.
- [42] 国家能源局.财政部出台煤层气(煤矿瓦斯)开发利用补贴的实施意见[EB/OL].(2007-05-10)[2023-11-13]. http://www.nea.gov.cn/2007-05/10/c_131109779.htm.
National Energy Administration. Implementation opinions on subsidies for coalbed methane (coal mine methane) development and utilization issued by the ministry of finance[EB/OL].(2007-05-10)[2023-11-13]. http://www.nea.gov.cn/2007-05/10/c_131109779.htm.
- [43] 财政部.关于“十三五”期间煤层气(瓦斯)开发利用补贴标准的通知[EB/OL].(2016-02-14)[2023-11-13]. http://www.mof.gov.cn/gp/xxgkml/jjss/201603/t20160301_2512190.htm.
Ministry of Finance. Notice on subsidy standards for CBM (coal mine methane) development and utilization during the “13th Five-Year Plan” period[EB/OL].(2016-02-14)[2023-11-13]. http://www.mof.gov.cn/gp/xxgkml/jjss/201603/t20160301_2512190.htm.
- [44] 国家能源局.关于政协第十三届全国委员会第四次会议第1246号(资源环境类133号)提案的答复的函[EB/OL].(2021-07-28)[2023-11-10]. http://zfxgk.nea.gov.cn/2021-07/28/c_1310498252.htm.
National Energy Administration. Reply letter regarding proposal No. 1246 (category of resources and environment, No. 133) of the fourth session of the thirteenth national committee of the Chinese people's political consultative conference (CPPCC)[EB/OL].(2021-07-28)[2023-11-10]. http://zfxgk.nea.gov.cn/2021-07/28/c_1310498252.htm.
- [45] 财政部,海关总署,国家税务总局.关于“十四五”期间能源资源勘探开发利用进口税收政策的通知[EB/OL].(2021-04-12)[2023-11-13]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-04/30/content_5604214.htm.
Ministry of Finance, General Administration of Customs, State Taxation Administration. Notice on im-

- port tax policies for energy and resource exploration and development during the “14th Five-Year Plan” period-state council departmental documents [EB/OL]. (2021-04-12) [2023-11-13]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-04/30/content_5604214.htm.
- [46] 国家发展改革委, 国家能源局. “十四五”现代能源体系规划[R]. 北京: 国家发展改革委, 国家能源局, 2022.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. “14th Five-Year Plan” modern energy system planning[R]. Beijing: National Development and Reform Commission, National Energy Administration, 2022.
- [47] 自然资源部. 关于进一步完善矿产资源勘查开采登记管理的通知[EB/OL]. (2023-05-06) [2023-10-23]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202305/content_6857567.htm.
Ministry of Natural Resources. Notice on further improving the registration administration of mineral resources exploration and exploitation [EB/OL]. (2023-05-06) [2023-10-23]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202305/content_6857567.htm.
- [48] 贵州省人民政府. 省人民政府关于加快推进煤层气(煤矿瓦斯)产业发展的指导意见(2019—2025年)(黔府办发[2019]33号)[EB/OL]. (2020-01-20) [2023-10-23]. https://www.guizhou.gov.cnzwgkzcfg/szfwjqfbf202001/t20200117_70473690.html.
The People’s Government of Guizhou Province. Guiding opinions from the general office of the provincial people’s government on accelerating the development of CBM (coal mine methane) industry (2019-2025) (Qianfu Office [2019] No. 33) [EB/OL]. (2020-01-20) [2023-10-23]. https://www.guizhou.gov.cnzwgkzcfg/szfwjqfbf202001/t20200117_70473690.html.
- [49] 山西省人民政府办公厅. 关于印发山西省 2021—2025 年矿产资源总体规划和煤层气资源勘查开发规划的通知[EB/OL]. (2023-01-19) [2023-10-23]. https://zrzt.shanxi.gov.cnzwgkzgwkjbmzcfgkzggll/202302/t20230213_7973924.shtml.
The People’s Government of Shanxi Province. Notice on issuing the general plan of mineral resources and the exploration and development plan of CBM resources of Shanxi province from 2021—2025 [EB/OL]. (2023-01-19) [2023-10-23]. https://zrzt.shanxi.gov.cnzwgkzgwkjbmzcfgkzggll/202302/t20230213_7973924.shtml.
- [50] 国家发展和改革委员会. 新疆维吾尔自治区国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要[R]. 北京: 国家发展和改革委员会, 2021.
National Development and Reform Commission. The 14th Five-Year Plan for the national economic and social development of Xinjiang Uygur Autonomous Region and the outline of the long-range goals to 2035[R]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2021.
- [51] 新疆维吾尔自治区人民政府. 新疆维吾尔自治区矿产资源总体规划(2021-2025年)[R]. 乌鲁木齐: 新疆维吾尔自治区人民政府, 2022.
The People’s Government of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Master plan of mineral resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region (2021-2025) [R]. Urumqi: Xinjiang Uygur Autonomous Region People’s Government, 2022.
- [52] 新疆维吾尔自治区自然资源厅. 自治区部署实施新一轮战略性矿产找矿行动[EB/OL]. (2023-01-13) [2023-11-27]. <http://zrzt.xinjiang.gov.cn/xjgtzygzdt202301/7af3022c8208435ba4d1daa6facbab49.shtml>.
Department of Natural Resources, Xinjiang Uygur Autonomous Region. The autonomous region deployed and implemented a new round of strategic mineral exploration actions [EB/OL]. (2023-01-13) [2023-11-27]. <http://zrzt.xinjiang.gov.cn/xjgtzygzdt202301/7af3022c8208435ba4d1daa6facbab49.shtml>.
- [53] 宁夏回族自治区人民政府. 宁夏回族自治区自然资源保护和利用“十四五”规划[R]. 银川: 宁夏回族自治区人民政府, 2021.
The People’s Government of Ningxia Hui Autonomous Region. The “14th Five-Year Plan” for the protection and utilization of natural resources of Ningxia Hui Autonomous Region [R]. Yinchuan: Ningxia Hui Autonomous Region People’s Government, 2021.
- [54] 宁夏回族自治区人民政府. 宁夏回族自治区能源发展“十四五”规划[R]. 银川: 宁夏回族自治区人民政府, 2022.
The People’s Government of Ningxia Hui Autonomous Region. Ningxia Hui Autonomous Region energy development “14th Five-Year Plan” [R]. Yinchuan: Ningxia Hui Autonomous Region People’s Government, 2022.
- [55] 宁夏回族自治区自然资源厅. 宁夏回族自治区矿产资源总体规划(2021-2025)[R]. 银川: 宁夏回族自治区自然资源厅, 2022.
Department of Natural Resources, Ningxia Hui Au-

- onomous Region. The master plan of mineral resources of Ningxia Hui Autonomous Region(2021-2025) [R]. Yinchuan: Department of Natural Resources, Ningxia Hui Autonomous Region, 2022.
- [56] 内蒙古自治区能源局. 内蒙古自治区煤炭工业发展“十四五”规划和内蒙古自治区煤炭工业发展“十四五”规划煤层气(煤矿瓦斯)开发利用配套方案[R]. 呼和浩特: 内蒙古自治区能源局, 2022.
Inner Mongolia Autonomous Region Energy Bureau. Inner Mongolia Autonomous Region coal industry development “14th Five-Year Plan” and Inner Mongolia Autonomous Region coal industry development “14th Five-Year Plan” coal-bed methane (coal mine gas) development and utilization plan [R]. Hohhot: Inner Mongolia Autonomous Region Energy Bureau, 2022.
- [57] 傅雪海, 张小东, 韦重韬. 煤层含气量的测试、模拟与预测研究进展[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(1): 13-31.
FU Xuehai, ZHANG Xiaodong, WEI Chongtao. Review of research on testing, simulation and prediction of coalbed methane content[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(1): 13-31.
- [58] 庚勳, 陈浩, 陈艳鹏, 等. 第4轮全国煤层气资源评价方法及结果[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(6): 64-68.
GENG Meng, CHEN Hao, CHEN Yanpeng, et al. Methods and results of the fourth round national CBM resources evaluation [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(6): 64-68.
- [59] 秦勇, 申建, 李小刚. 中国煤层气资源控制程度及可靠性分析[J]. 天然气工业, 2022, 42(6): 19-32.
QIN Yong, SHEN Jian, LI Xiaogang. Control degree and reliability of CBM resources in China[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(6): 19-32.
- [60] 高德利, 毕延森, 鲜保安. 中国煤层气高效开发井型与钻完井技术进展[J]. 天然气工业, 2022, 42(6): 1-18.
GAO Deli, BI Yansen, XIAN Baoan. Technical advances in well types and drilling & completion for high-efficient development of coalbed methane in China[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(6): 1-18.
- [61] 李勇. 鄂尔多斯盆地东缘煤层气富集成藏规律研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
LI Yong. Coalbed methane accumulation and reservoiring in eastmargin of Ordos basin, China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2021.
- [62] 邹瑞, 王璐, 罗瑞兰, 等. 深层碳酸盐岩气藏不同类型储层全尺寸孔径分布及其分形特征: 以四川盆地高磨地区震旦系灯四段为例[J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(6): 1218-1236.
ZOU Rui, WANG Lu, LUO Ruilan, et al. Full-range pore throat radius distribution and fractal characteristics of different types of reservoirs in deep carbonate gas reservoirs: A case study of Deng-4 Member in Gaoshiti-Moxi Area, Sichuan Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(6): 1218-1236.
- [63] 涂志民, 王兴刚, 车延前, 等. 三塘湖盆地低阶煤层气成藏主控因素[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(6): 683-689.
TU Zhimin, WANG Xinggang, CHE Yanqian, et al. Controlling factors on CBM accumulation in low-rank coal in Santanghu Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(6): 683-689.
- [64] 唐淑玲, 汤达祯, 孙斌, 等. 富(含)CO₂煤层气多源多阶成因研究进展及勘探开发启示[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(3): 58-68.
TANG Shuling, TANG Dazhen, SUN Bin, et al. Research progress of multi-source and multi-stage genesis of CO₂-enriched CBM and the enlightenments for its exploration and development[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(3): 58-68.
- [65] 邵先杰, 朱明, 武宁, 等. 煤层气聚集理论研究进展综述[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(26): 156-164.
SHAO Xianjie, ZHU Ming, WU Ning, et al. Research progress and review on coal-bed methane accumulation theory[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(26): 156-164.
- [66] 彭英明, 邵先杰, 李锋, 等. 煤层气达西、非达西渗流理论和扩散理论的研究进展综述[J]. 煤炭工程, 2019, 51(6): 28-33.
PENG Yingming, SHAO Xianjie, LI Feng, et al. Research progress and review on Darcy and Non-Darcy flow theory and diffusion theory of coalbed methane [J]. Coal Engineering, 2019, 51(6): 28-33.
- [67] 孙丽娟. 不同煤阶软硬煤的吸附-解吸规律及应用[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013.
SUN Lijuan. Soft and hard coal adsorption-desorption law of different coal rank and it's application [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2013.
- [68] 张亚飞, 张松航, 邓志宇, 等. 基于层次分析-灰色定权聚类的煤层气开发甜点预测方法: 以柿庄北区块为例[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(5): 166-175.

- ZHANG Yafei, ZHANG Songhang, DENG Zhiyu, et al. A prediction method for coalbed methane development sweet spots based on hierarchical analysis and grey fixed-weight clustering: Taking Shizhuangbei block as an example[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(5): 166-175.
- [69] 李克文, 周广悦, 路慎强, 等. 一种基于机器学习的有利区评价新方法[J]. *特种油气藏*, 2019, 26(3): 7-11.
- LI Kewen, ZHOU Guangyue, LU Shenqiang, et al. A new method for favorable zone evaluation based on machine learning[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2019, 26(3): 7-11.
- [70] 余海棠, 庄严, 梁利喜, 等. 基于岩石力学特性的钻井液优选研究: 以鄂尔多斯盆地长 7 页岩地层为例[J]. *石油地质与工程*, 2023, 37(5): 109-114.
- YU Haitang, ZHUANG Yan, LIANG Lixi, et al. Optimization of drilling fluid based on rock mechanics characteristics: By taking the Chang 7 shale formation in the Ordos Basin as an example[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2023, 37(5): 109-114.
- [71] 陈金宏, 王静, 黄益, 等. 近钻头地质导向在煤层气水平井的应用[J]. *中国煤层气*, 2019, 16(4): 27-30.
- CHEN Jinhong, WANG Jing, HUANG Yi, et al. Application of near-bit geosteering in coalbed methane horizontal wells[J]. *China Coalbed Methane*, 2019, 16(4): 27-30.
- [72] 谌伦建, 徐冰, 叶云娜, 等. 煤炭地下气化过程中有机污染物的形成[J]. *中国矿业大学学报*, 2016, 45(1): 150-156.
- CHEN Lunjian, XU Bing, YE Yunna, et al. Formation of organic contaminants during underground coal gasification[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2016, 45(1): 150-156.
- [73] 苏二磊. 超临界 CO₂ 作用下烟煤结构响应及对力学和渗透特性的影响机理[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- SU Erlei. Structural response of bituminous coal under supercritical CO₂ and its influence mechanism on mechanical and permeability properties [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [74] 耿哲. 液氮作用对煤力学特性影响的试验研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2020.
- GENG Zhe. Experimental study on the effect of liquid nitrogen on mechanical properties of coal[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2020.
- [75] 杨兆中, 袁健峰, 朱静怡, 等. 煤层气注热增产研究进展[J]. *油气藏评价与开发*, 2022, 12(4): 617-625.
- YANG Zhaozhong, YUAN Jianfeng, ZHU Jingyi, et al. Thermal injection stimulation to enhance coalbed methane recovery[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2022, 12(4): 617-625.
- [76] 王荣松, 高宇, 常王洁, 等. 沁水盆地南部煤层气排采管理发展研究及展望[J]. *中国煤层气*, 2023, 20(2): 23-26.
- WANG Rongsong, GAO Yu, CHANG Wangjie, et al. Research and prospect on development of coalbed methane drainage and production management in south Qinshui Basin[J]. *China Coalbed Methane*, 2023, 20(2): 23-26.
- [77] 薛丹. 基于大数据分析的煤层气井排采参数关系研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021.
- XUE Dan. Research on the relationship of drainage parameters in CBM wells based on big data analysis [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2021.
- [78] 梁龙军, 易旺, 陈捷, 等. 六盘水煤田煤层气水平井优快钻井技术[J]. *石油钻采工艺*, 2023, 45(3): 275-283.
- LIANG Longjun, YI Wang, CHEN Jie, et al. Optimal and fast drilling technology for coalbed methane horizontal wells in Liupanshui Coalfield [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2023, 45(3): 275-283.
- [79] 王敏. 鹤岗、鸡西矿区原位煤层气藏开发类型认识研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- WANG Min. Study on the development types of CBM reservoir in Hegang Basin and Jixi Basin [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [80] 李勇, 孟尚志, 吴鹏, 等. 煤层气成藏机理及气藏类型划分: 以鄂尔多斯盆地东缘为例[J]. *天然气工业*, 2017, 37(8): 22-30.
- LI Yong, MENG Shangzhi, WU Peng, et al. Accumulation mechanisms and classification of CBM reservoir types: A case study from the eastern margin of the Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(8): 22-30.
- [81] 郑长东. 长岗向斜煤层气开发甜点区优选预测[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- ZHEN Changdong. Optimal selection and prediction of sweet spots for CBM development in Changgang Syncline, Northern Guizhou, China [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [82] MA T S, LIU J H, FU J H, et al. Drilling and completion technologies of coalbed methane exploitation: An overview[J]. *International Journal of Coal*

- Science & Technology, 2022, 9(1): 1-31.
- [83] 张凯飞. 煤层气排采过程中甲烷解吸与扩散过程的分子模拟研究[D]. 太原: 中北大学, 2020.
ZHANG Kaifei. Molecular simulation study of methane desorption and diffusion process in coalbed methane drainage[D]. Taiyuan: North University of China, 2020.
- [84] 朱苏阳, 杜志敏, 李传亮, 等. 煤层气吸附-解吸规律研究进展[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2017, 39(4): 104-112.
ZHU Suyang, DU Zhimin, LI Chuanliang, et al. The adsorption and desorption of coal bed methane: A review[J]. Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition), 2017, 39(4): 104-112.
- [85] 徐凤银, 王成旺, 熊先钺, 等. 深部(层)煤层气成藏模式与关键技术对策: 以鄂尔多斯盆地东缘为例[J]. 中国海上油气, 2022, 34(4): 30-42.
XU Fengyin, WANG Chengwang, XIONG Xianyue, et al. Deep (layer) coalbed methane reservoir forming modes and key technical countermeasures: Taking the eastern margin of Ordos Basin as an example[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(4): 30-42.
- [86] 秦勇, 申建, 王宝文, 等. 深部煤层气成藏效应及其耦合关系[J]. 石油学报, 2012, 33(1): 48-54.
QIN Yong, SHEN Jian, WANG Baowen, et al. Accumulation effects and coupling relationship of deep coalbed methane[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(1): 48-54.
- [87] 申建, 秦勇, 陈刚. 煤层气成藏效应量化表征及类型判识[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(5): 831-836.
SHEN Jian, QIN Yong, CHEN Gang. Quantitative models of coalbed methane accumulation effect and type recognition[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(5): 831-836.
- [88] 王绪性, 郭布民, 袁征, 等. 深煤层 CO₂ 泡沫压裂技术及适用性研究[J]. 煤炭技术, 2019, 38(1): 108-110.
WANG Xuxing, GUO Bumin, YUAN Zheng, et al. CO₂ foam fracturing technology and applicability in deep coal seam[J]. Coal Technology, 2019, 38(1): 108-110.
- [89] 薛海飞, 朱光辉, 张健, 等. 深部煤层气水力波及压裂工艺研究及应用[J]. 煤炭技术, 2019, 38(5): 81-84.
XUE Haifei, ZHU Guanghui, ZHANG Jian, et al. Research and application of hydraulic networks fracturing technology in deep coalbed methane[J]. Coal Technology, 2019, 38(5): 81-84.
- [90] 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.

(责任编辑 宋爽 全腾)