

文章编号: 0253-2697(2025)02-0289-17 DOI:10. 7623/syxb202502001

深部煤层气产业升级与“八个一体化”体系的建立

徐凤银^{1,2,3} 熊先钺⁴ 侯 伟^{1,4} 王 峰^{1,4} 马鹏飞⁵ 张 雷⁴ 云 箭⁶ 喻岳钰^{1,4}
闫 霞^{1,4} 徐博瑞^{1,4} 李建伟⁴ 代由进⁴ 曾雯婷⁴ 王 勃⁷ 甄怀宾^{1,4}
王 渊^{1,4} 李忠百^{1,4} 邓钧耀^{1,4}

(1. 中联煤层气国家工程研究中心有限责任公司 北京 100095; 2. 成都理工大学能源学院(页岩气现代产业学院) 四川成都 610059;
3. 油气藏地质及开发工程全国重点实验室(成都理工大学) 四川成都 610059; 4. 中石油煤层气有限责任公司 北京 100028;
5. 中国石油冀东油田公司 河北唐山 063000; 6. 中国石油集团安全环保技术研究院有限公司 北京 102206;
7. 应急管理部信息研究院 北京 100029)

摘要:近年来,深部煤层气勘探开发取得重大突破,带动煤层气产业进入史上最佳发展时期,但其产业规模快速提升仍面临许多难题与挑战。为推动深部煤层气勘探开发全面升级,推进煤层气大产业发展战略,保障能源安全和实现“双碳”目标,系统分析了深部煤层气的产业现状、理论与技术进展、产业升级战略和面临挑战。研究认为,深部煤层气产业升级内涵包括理论技术成熟、开发效益提升、投资信心坚定和规模快速扩大 4 个方面,在政策支持与引导、技术创新与突破、基础设施建设与完善、人才培养与引进、产业链协同发展和环境保护与可持续发展 6 个方面具备基础条件,目前面临的主要挑战包括地质条件特殊性、理论技术难题增多、政策与经济性、安全生产与环境保护。从技术、经济与管理出发,针对深部煤层气产业升级系统提出了涵盖勘探开发、地质工程、理论技术、地下地面、产学研用、投资效益、大数据人工智能、战略策略的“八个一体化”战略体系。勘探开发与地质工程一体化可以实现地质勘探与工程设计紧密结合,优化勘探开发流程,提高勘探开发效率;理论技术与产学研用(科研生产)一体化可以实现理论研究与技术创新结合,促进科研成果的快速转化和生产应用,提升整体技术水平,增强技术创新能力;地下地上一体化可以实现地下开发与地面设施协调配合,确保全过程安全环保;投资效益与大数据人工智能一体化可以实现资源配置优化,降低开发成本;通过实践应用,可以实现勘探开发效率的明显提升;形成由政府组织、企业主导的运行机制,制定并执行一套协调一致、相互支撑的战略发展目标 and 对应策略,且实践效果显著。未来要实现深部煤层气产业升级,应做到“五强化、三落实”,即强化技术创新和研发投入、强化产业链上下游合作与协同、强化安全环保管理、强化国际合作与交流、强化政策支持和引导;持之以恒落实“以技术创新为主体,以资源、技术、人才、政策和投资五位一体、协同创新”协同配套,有效落实“深部煤层气革命”工程,逐步落实“八个一体化”战略体系,推动产业升级发展。

关键词:深部煤层气;勘探开发;地质工程;技术、经济与管理;一体化;产业升级

中图分类号: TE11

文献标识码: A

Upgrading of deep coalbed methane industry and establishment of the “Eight-in-One” system

Xu Fengyin^{1,2,3} Xiong Xian Yue⁴ Hou Wei^{1,4} Wang Feng^{1,4} Ma Pengfei⁵ Zhang Lei⁴ Yun Jian⁶
Yu Yueyu^{1,4} Yan Xia^{1,4} Xu Borui^{1,4} Li Jianwei⁴ Dai Youjin⁴ Zeng Wenting⁴ Wang Bo⁷
Zhen Huaibin^{1,4} Wang Yuan^{1,4} Li Zhongbai^{1,4} Deng Junyao^{1,4}

(1. China United Coalbed Methane National Engineering Research Center Co., Ltd., Beijing 100095, China; 2. College of Energy (College of Modern Shale Gas Industry), Chengdu University of Technology, Sichuan Chengdu 610059, China;
3. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Sichuan Chengdu 610059, China; 4. PetroChina Coalbed Methane Company Limited, Beijing 100028, China; 5. PetroChina Jidong Oilfield Company, Hebei Tangshan 063000, China; 6. CNPC Research Institute of Safety and Environment Technology Co., Ltd., Beijing 102206, China; 7. Information Research Institute of the State Administration of Work Safety, Beijing 100029, China)

Abstract: A major breakthrough has been made in exploration of deep coalbed methane (CBM) in recent years, leading the CBM industry to enter its best period in history. However, the rapid expansion of the industrial scale still faces many problems and challenges. To promote the comprehensive upgrade of deep CBM exploration and development, implement the development strategies for

基金项目:国家科技重大专项“煤层气高效增产及排采关键技术研究”(2016ZX05042)、中国石油天然气股份有限公司科技项目“深地煤岩气成藏理论与效益开发技术研究”(2023ZZ18YJ)和中石油煤层气有限责任公司科技项目“鄂东缘上古生界煤系基础地质研究”(2023-KJ-18)资助。
第一作者及通信作者:徐凤银,男,1964 年 4 月生,1993 年获中国矿业大学博士学位,现为成都理工大学教授、博士生导师,主要从事煤炭、煤层气、石油、天然气地质研究与管理工作。Email: xufy518@sina.com.cn

large-scale CBM industry, guarantee energy security, and achieve the “dual carbon” target, a systematic analysis was conducted on the current status, theoretical and technical progress, industry upgrading strategy, and challenges in the deep CBM industry. The study suggests that the connotation of upgrading the deep CBM industry can be summarized in four aspects, i. e., theoretical and technical maturity, improved development efficiency, strong investor confidence, and rapid scale expansion. The basic conditions for industry upgrading include six aspects, i. e., policy support and guidance, technological innovation and breakthroughs, infrastructure construction and improvement, talent training and introduction, coordinated development of industrial chains, safe production and environmental protection. For deep CBM industry upgrading, the study proposes a “Eight-in-One” technological, economic, and management system integrating exploration and development, geology and engineering, theories and technologies, underground and ground surface, research and production, investment and profitability, big data and artificial intelligence, as well as strategy and tactics. By integrating exploration and development with geology and engineering, it is feasible to achieve an integration of theoretical research and technological innovation, promote the rapid transformation of scientific research achievements and their applications in production, improve the whole technological level, and enhance technological innovative ability. Through the integration of underground and ground surface development, the coordinated development of underground resources and ground facilities can be achieved to ensure safety operation and environmental protection throughout the entire process. By integrating investment efficiency, big data and artificial intelligence, resource allocation can be optimized and development costs are reduced. Through practical applications, the CBM exploration and development efficiency has been significantly improved; an operation mechanism has been formed through government organization under the leadership of enterprises. A set of coordinated and mutually supporting strategic development goals and corresponding strategies have been formulated and implemented, achieving remarkable effects. To achieve the goal of deep CBM industrial upgrading in the future, it is required to strengthen five aspects and implement three programs, i. e., to strengthen the technological innovation and R & D investment, cooperation and coordination between upstream and downstream of the industrial chain, safety and environmental protection management, international cooperation and exchange, as well as policy support and guidance; adhering to the implementation of “technological innovation as the main body, resource, technology, talent, policy and investment as a whole, as well as coordinated and innovative development” in a coordinated and cooperative manner, to effectively implement the “deep coal seam gas revolution” project, gradually implement the “Eight-in-One” strategic system, and promote industrial upgrading and development.

Key words: deep coalbed methane; exploration and development; geological engineering; technology, economy and management system; integration; industrial upgrading

引用:徐凤银,熊先钺,侯伟,王峰,马鹏飞,张雷,云箭,喻岳钰,闫霞,徐博瑞,李建伟,代由进,曾雯婷,王勃,甄怀宾,王渊,李忠百,邓钧耀. 深部煤层气产业升级与“八个一体化”体系的建立[J]. 石油学报, 2025, 46(2): 289-305.

Cite: XU Fengyin, XIONG Xianyue, HOU Wei, WANG Feng, MA Pengfei, ZHANG Lei, YUN Jian, YU Yueyu, YAN Xia, XU Borui, LI Jianwei, DAI Youjin, ZENG Wenting, WANG Bo, ZHEN Huaibin, WANG Yuan, LI Zhongbai, DENG Junyao. Upgrading of deep coalbed methane industry and establishment of the “Eight-in-One” system[J]. Acta Petrolei Sinica, 2025, 46(2): 289-305.

深部煤层气一般是指赋存在埋藏深度大于 1 500 m 的煤储层(或夹矸)中、以甲烷为主要成分的烃类气体^[1-4],部分学者将深部煤层气称为深层煤岩气或煤岩气^[5-6]。自 2019 年深部煤层气的勘探开发获得重大突破以来,地质学家针对其地质特征、成藏模式和生产特征开展了大量研究^[1-4,7-9],取得了一系列创新认识与理论成果,推动煤层气产业进入史上最佳发展时期,并呈现出良好的发展态势,深部煤层气也成为当前地质与能源领域最为热门的研究课题之一。随着勘探开发的不断深化,深部煤层气产业面临诸多挑战,为实现深部煤层气产业的健康发展,构建全面、系统的深部煤层气勘探开发技术、经济与管理体制显得尤为重要与必要。近年来,油气田企业在勘探开发一体化、地质工程一体化以及大数据人工智能应用等领域开展了大量研究和有效实践,在提高油气资源开发效率和降低成本方面取得了显著效果,不仅优化了生产流程,还促进了

地质与工程技术的融合发展,为复杂油气藏、非常规油气藏的开发提供了新的解决方案^[10-15]。当前,勘探开发一体化管理体系的研究主要集中在如何通过一体化的方式加速勘探开发进程,以获取经济效益、控制成本并实现利益最大化。中国石油长庆油田公司通过实施勘探开发一体化,明显提高了油气资源的开发效率,优化了投资效益^[10]。地质工程一体化是对地质、工程技术、专业人员、经济等各要素进行统筹管理和集成优化,以实现工程科技与管理的融合,展现出强大的应用效果^[11-12]。中国石油西南油气田公司在川南页岩气勘探开发过程中逐步探索形成了三维地质建模、三维地质力学建模、地质工程一体化复杂缝网模拟和数值模拟 4 项关键技术,在页岩气全生命周期中开展“一体化研究、一体化设计、一体化实施和一体化迭代”,实现了高产量、高最终可采储量(EUR)和高采收率^[13]。大数据和人工智能可以为油气田的智能化发展提供动力,

极大地推动油气田开发的智慧化发展^[14]。中国石油大港油田公司研制的“基于人工智能与云边协同的油井智能调控技术”,实现了“人工查井”向“智能巡检”的变革,显著提升了油井生产的智能化程度,降低了能耗,提高了生产效率^[15]。

在鄂尔多斯盆地大宁—吉县区块(大吉区块)深部煤层气勘探开发过程中,基于地质工程一体化研究,提出了“五位一体”井网优化设计技术,通过理论与技术的一体化探索,形成了深部煤层气成藏理论与高效开发的技术系列^[8-9]。

笔者以深部煤层气地质、技术、经济与管理一体化研究和勘探开发效益最大化为出发点,在简要分析深部煤层气的产业现状、产业升级战略及面临挑战的基础上,结合大吉区块的具体实践,提出涵盖勘探开发、地质工程、理论技术、地下地上、产学研用、投资效益、大数据人工智能、战略策略的深部煤层气产业“八个一体化”管理体系,重点阐述“八个一体化”管理体系的基本内涵和实施途径,最终形成一个完整的系统,以期对深部煤层气产业全面升级提供指导、发挥引领作用,优化资源配置,提高投资效率和效益,助力保障国家能源安全和实现“双碳”目标。

1 产业现状与理论技术进展

中国深部煤层气资源丰富,开发潜力大,自然资源部 2022 年统计数据显示,中国埋深 2 000 m 以浅的煤层气地质资源量约为 $30.05 \times 10^{12} \text{ m}^3$,初步评估 2 000 m 以深的煤层气地质资源量为 $40.71 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[16]。近年来,随着深部煤层气产量大幅度增加,优质资源基础进一步夯实,深部煤层气产业展现出突飞猛进的良好势头。

1.1 勘探开发持续取得重大突破

目前,中国深部煤层气勘探开发呈多点开花、重点突破态势,以鄂尔多斯盆地勘探开发效果最为突出。中国石油天然气集团有限公司(中国石油)在鄂尔多斯盆地东缘大吉区块部署实施的吉深 6-7 平 01 井获深部煤层气高产工业气流(产量为 $10.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$),拉开了中国深部煤层气勘探开发的序幕^[1,17]。截至 2024 年,大吉煤层气田已累计提交深部煤层气探明储量 $3\,050 \times 10^8 \text{ m}^3$,成为中国首个煤层埋深大于 2 000 m、储量超过 $1\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、高丰度的整装大型煤层气田。通过近年来的科技攻关和开发产建,大吉区块深部煤层气的产量不断提升,2023 年生产能力达 $15 \times 10^8 \text{ m}^3$,建成中国首个百万吨油气当量的深部煤层气田,目前产气量已突破 $1\,000 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,成为中国探明储量规模最大、生产规模最大的深部煤层气田。中国海洋石油集团有限公司(中国海油)在鄂尔多斯盆地东缘的神

府区块创新提出致密气与煤层气“互补式”立体勘探新理念,成功申报十亿立方米级深部煤层气田。目前,临兴—神府区块深部煤层气产量超 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ^[18-19]。中国石油化工集团有限公司(中国石化)在鄂尔多斯盆地大牛地气田实施的阳煤 1HF 井已连续稳产高产超过 1 年,平均产气量为 $6.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,累积产气量突破 $2\,300 \times 10^4 \text{ m}^3$,新增深部煤层气预测储量 $1\,226 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。此外,准噶尔、四川、吐哈、松辽等盆地正在积极推进深部煤层气勘探,并已在局部领域取得突破^[20]。

1.2 储量、产量快速增长

近年来,中国煤层气新增探明储量与产量快速增加,其中,深部煤层气新增探明储量超过 $4\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$,占比高达 90% 以上;2023 年煤层气产量达到 $117.7 \times 10^8 \text{ m}^3$,同比增长超过 20%,其中,深部煤层气贡献占比达到 20% 以上;2024 年煤层气产量达到 $138 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

1.3 理论与技术进展明显

经过多年持续深入研究,深部煤层气理论研究成果丰硕,特别是针对鄂尔多斯盆地东缘深部煤层气的地质特征、成藏演化、成藏模式、高产主控因素、开发规律、开发难点等方面取得了深入的理论认识和体会^[1-4,7-9,21-22]。

“十二五”(2011—2015 年)期间,依托国家科技重大专项和中国石油科技重大专项“煤层气勘探开发关键技术与示范”,总结出煤层气勘探开发六大技术系列。“十三五”(2016—2020 年)期间,依托国家科技重大专项项目“煤层气高效增产及排采关键技术”和示范工程“鄂东缘深层煤层气与煤系地层天然气整体开发示范工程”,提出煤层气勘探开发“二维地震向三维地震、定向井向水平井、中浅部向深部”三大拓展理念。2021 年以来,进一步加强探索与实践,在鄂尔多斯盆地东缘初步形成了包含地质工程“双甜点”评价、煤储层精细刻画、“五位一体”井网优化设计、产能评价与 EUR 预测、水平井低成本优快钻井、煤储层高效压裂、全生命周期气井举升、集输与数智化控制 8 个方面的深部煤层气勘探开发技术系列,不断完善深部煤层气“一体化”技术体系,实现了煤层气单井产量大幅度提高^[1-4,7-9,21-26]。

2 产业升级战略与挑战

经过 5 年多的探索与实践,中国深部煤层气勘探开发取得显著成就,已经具备产业升级发展的基础条件。

2.1 产业升级的内涵与基础

深部煤层气产业升级的内涵包括 4 个方面:理论技术成熟、开发效益提升、投资信心坚定和规模快速扩大。

当前,深部煤层气产业升级的基础条件可以概括为 6 个方面。

(1) 政策支持与引导。政府已出台多种激励政策,提供税收优惠、补贴等支持措施,鼓励企业加大深部煤层气勘探开发投入。以中国石油、中国石化、中国海油为代表的油气公司分别制定了深部煤层气产业发展规划,明确了发展目标和路径,引导产业有序发展。

(2) 技术创新与突破。针对深部煤层气勘探开发技术难题,油气企业加大研发投入,推动技术创新与突破;通过引进和研发先进的勘探开发技术装备与实验设备,不断提高开发效率和效益。

(3) 基础设施建设与完善。中国石油、中国石化、中国海油和地方油气公司持续优化地面工程系统布局,提高集输和处理能力,降低运营成本,推动数智化管理手段,提高管理效率和决策科学性。

(4) 人才培养与引进。油气公司通过引进国内外优秀人才和科研团队,不断提高专业人员的科学素质和技能水平。

(5) 产业链协同发展。深部煤层气勘探开发上下游产业链协同发展,形成了完整的产业链体系。通过加强与国际先进技术企业的合作与交流,大量引进先进技术,推动了深部煤层气产业的国际化发展。

(6) 环境保护与可持续发展。深部煤层气勘探开发周期中,采取严格的环保措施,以保护生态环境和水资源,实现了经济效益和环境效益的协调统一。

2.2 产业发展战略

煤层气开发理论与应用技术的复杂性和不确定性,提出适宜的产业发展战略目标和相应对策对产业可持续健康发展尤为重要。

科研人员针对中国煤层气发展战略和趋势开展了大量研究,并提出了系列发展建议^[27-31]。2021 年,徐凤银等^[30]提出了煤层气产业 10 年两步走的发展战略,并提出针对性强、可操作性强的对策:到 2025 年,理论与技术上实现新突破,实现“十四五”(2021—2025 年)煤层气年产量突破 $100 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的目标,坚定产业发展信心;到 2030 年,形成针对大部分地质条件的适用性勘探开发技术,煤层气年产量达到 $300 \times 10^8 \text{ m}^3$,在中国天然气总产量中占据重要地位。罗平亚等^[31]提出,煤层气产业的近期(10 年或以上)目标为建成年产千亿立方米级的煤层气大产业。

当前,深部煤层气已成为煤层气产业实现规模发展的重点领域和中国天然气产业的重要组成部分,是保障国家油气安全、实现“双碳”目标的重要接替资源之一。初步预测,至 2030 年中国石油、中国石化、中国海油等油气公司的矿权区累积新增深部煤层气探明地

质储量可达 $4 \times 10^{12} \text{ m}^3$,深部煤层气产量有望达到 $300 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 以上。

2.3 面临的主要挑战

深部煤层气的勘探开发面临多方面挑战,主要包括 4 个方面。

(1) 地质条件特殊性。与中—浅部煤层气相比,深部煤层气在地质条件、工程条件、生产特征等方面表现出显著差异。不同盆地的地质条件差异性较大,小断层、微褶皱、冲击地压等现象频发,不仅提高了深部煤层气勘探开发的工程难度,而且易引发安全事故。

(2) 理论技术难题增多。对深部煤层气的赋存特点、成因机制、富集规律、增产机理及开发规律等方面的认识还不够充分,增产稳产机理有待进一步深化。煤层气产业相关理论与技术的移植与适用性不强,针对不同地区深部煤层地质条件的适用性技术体系尚不成熟。在构造煤、多煤层、低阶煤、煤系气等发育的复杂地质条件的制约下,煤层气增产改造仍然存在许多重大技术瓶颈。比如,在鄂尔多斯盆地东缘创新并成功应用的技术难以移植应用到其他区块;常规水力压裂面临起裂压力高、闭合应力大、支撑剂高效嵌入难等难题。

(3) 政策与经济性挑战。受能源政策导向的影响,深部煤层气资源探明程度仍然较低,与加快煤层气产业化发展的要求差距很大。深部煤层气勘探开发投资大,需要政府和企业共同推动和支持。

(4) 安全生产与环境保护。深部煤层气开采面临高地应力、高压等安全风险,对安全生产的要求极为严格,且开采过程中可能造成地下水资源污染、废气排放等环境问题,需要妥善解决。

整体而言,深部煤层气的勘探开发需要政府、企业和科研机构共同努力,通过加强技术创新、政策支持和环境保护等工作,才能推动深部煤层气产业的健康发展与升级。

3 “八个一体化”体系的建立

针对深部煤层气的勘探开发现状、产业升级发展战略和面临挑战,为进一步促进多方面基础条件的共同作用,笔者将技术、经济与管理融为一体,提出“八个一体化”战略体系,涵盖了勘探开发、地质工程、理论技术、地下地上、产学研用、投资效益、大数据人工智能、战略策略,其最终目标是提高勘探开发效率、增强技术创新能力、确保安全环保、降低开发成本、推动产业全面升级。

3.1 勘探开发一体化

3.1.1 基本内涵

勘探开发一体化是指将深部煤层气勘探与开发两

个相对独立的阶段紧密结合,按照一个有机整体来安排部署。其核心在于打破勘探与开发之间的壁垒,促进信息共享,强化跨部门协同合作,提高勘探储量与开发产量的效率提升。勘探开发一体化的基本内涵包括 3 个方面(图 1):①勘探与开发协同,即勘探与开发紧密结合,实现勘探数据的转化,直接指导开发方案设计;②高效衔接流程,即通过地质与工程协同,优化勘探与开发过渡流程,缩短周期,提高整体效率;③风险共担机制,即建立勘探与开发阶段风险评估与分担机制,降低项目风险。

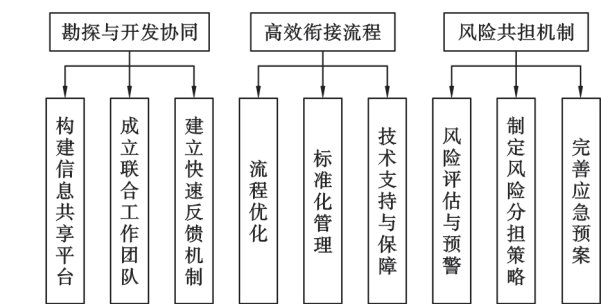


图 1 深部煤层气勘探开发一体化内涵

Fig. 1 Connotation of the integration of exploration and development for deep coalbed methane

3.1.2 实施途径

- (1) 勘探与开发协同
- 一是构建信息共享平台。建立勘探与开发之间的信息共享平台,确保勘探数据能够实时、准确地传递给开发团队。利用区域数据湖、云计算、大数据等技术,实现勘探数据的快速处理与分析,为开发方案设计提供支撑。
- 二是设立联合工作团队。成立由勘探领域和开发领域的技术人员组成的联合工作组,共同参与勘探方案制定、勘探数据解读、开发方案优化设计。通过跨部门协作,确保勘探与开发工作的无缝衔接。以大吉区块为例,其深部煤层气勘探开发过程中,多专业融合的一体化工作团队是地质工程甜点评价、重点评价井储层改造技术试验以及后期先导试验推广和 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ 产能建设等关键环节的保障与前提。
- 三是建立快速反馈机制。建立勘探与开发之间的快速反馈机制,对勘探阶段发现的新情况、新问题及时进行沟通和处理,确保开发方案能够及时调整和优化。
- (2) 高效衔接流程

- 一是流程优化。全面梳理和优化整个流程,减少不必要的环节,以提高整体效率。通过并行作业、提前介入等方式,缩短勘探与开发的时间间隔。
- 二是标准化管理。制定勘探与开发全过程的标准化管理流程和规范,确保各项工作有序进行。加强质

- 量管理和风险控制,确保勘探数据的准确性和开发方案的有效性。
- 三是技术支持与保障。加强技术研发和应用,为深部煤层气的勘探与开发全流程提供支撑。
- (3) 风险共担机制
- 一是风险评估与预警。建立勘探与开发阶段的风险评估体系,对可能存在的风险进行全面评估和预警。通过定期召开风险评估会议,确保项目风险得到及时识别和有效控制。
- 二是制定风险分担策略。根据各阶段的特点和风险类型,制定合理的风险分担策略。加强保险保障措施,降低项目风险。
- 三是完善应急预案。制定完善的应急预案并进行演练和培训,确保能有效应对突发事件或紧急情况。

3.2 地质工程一体化

3.2.1 基本内涵

地质工程一体化是指通过跨学科、跨领域的协同合作,实现地质研究与工程技术的深度融合,显著提升勘探开发的效率和成功率。其基本内涵包括 3 个方面(图 2):①深化地质研究,即对深部煤层气的地质构造、煤层特性及储层条件进行精细研究,揭示煤层气藏的形成机制、分布规律及开发潜力,为工程设计提供详实、准确的地质依据;②优化工程布局,即利用地质研究成果,合理规划井网布局,优化钻井、完井及开采方案,降低施工成本,并最大限度地保护储层,以提高单井产量;③建立动态调整机制,即建立地质与工程数据的实时反馈机制,实时监测勘探开发过程中的各项参数,及时发现问题并调整工程策略,以确保勘探开发顺利进行,提高整体效益。

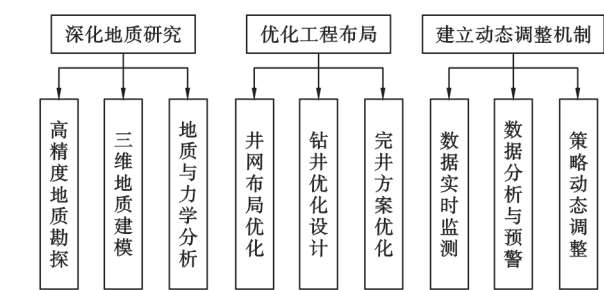


图 2 深部煤层气地质工程一体化内涵

Fig. 2 Connotation of the integration of geology and engineering for deep coalbed methane

3.2.2 实施途径

- (1) 深化地质研究
- 一是高精度地质勘探。采用高分辨率地震勘探、重力勘探、磁法勘探等综合地球物理技术,结合钻探和测井资料,获取详尽的地质信息。

二是三维地质建模。利用地质、三维地震数据,构建高精度三维地质模型,以直观展示煤层气藏的构造形态、煤层厚度、物性参数等信息。

三是地质与力学分析。通过开展地质测试和分析,评估储层岩石力学性质、地应力状态及裂缝发育情况,为工程设计提供力学参数指导。

(2) 优化工程布局

一是井网布局优化。根据地质模型及储层评价结果,结合经济效益分析,确定合理的井网密度和井位部署方案。例如,在大吉区块深部煤层气工程设计阶段,以井网控制 EUR 最大化为目标,井网布局指导理念由构建“单井工程”向“区域大缝网场体系”转变,打破缝网孤岛模式,形成了“地应力场、天然裂缝场、人工裂缝场、井型与方位、井网井距”五位一体的井网优化设计,通过深化应用三维地震各向异性反演、地应力场刻画、压裂缝网模拟等地质工程一体化技术,结合压裂裂缝监测、示踪剂监测、生产动态分析等结果,提出了“井距、排距、井台距、缝网间距”四距井位部署方法,构建了区域弥合缝网场体系,弥合程度提高了 20%。

二是钻井优化设计。采用水平井、多分支井等先进井型设计,结合随钻测井、地质导向等技术,确保钻井过程中能够精确中靶、保护储层。

三是完井方案优化。根据储层特性及开发目标,选择适宜的完井方式(如裸眼完井、射孔完井、割缝衬管完井等),优化套管尺寸、筛管规格、固井质量等完井参数,以提高完井质量及后期开采效果。例如,在大吉区块深部煤层气开发阶段,建立了 9 项关键地质要素(岩石力学性质、顶底板封盖条件、顶底板完整性、井眼轨迹、应力场、天然裂缝场、各向异性、储层敏感性、温度场)和 4 项工程配套要素(液体体系、工艺参数、工艺措施、功能材料)相结合的地质工程一体化差异化设计,压裂工艺由“注重规模提升改造效果”向“注重缝网均衡织密”转变,单井注入液量降低了 13.2%,加砂强度降低了 23.8%,取得良好的开采效果。

(3) 建立动态调整机制

一是数据实时监测。部署传感器网络,实时监测钻井、完井和开发过程中的钻井速度、井筒压力、产气量等参数。

二是数据分析与预警。利用大数据处理技术对实时监测数据进行快速处理,识别异常数据并发出预警信号。运用人工智能技术建立预测模型,对生产动态进行预判。

三是策略的动态调整。根据数据分析结果及时调整工程策略,确保勘探开发活动可以顺利进行并达到预期目标。

3.3 理论技术一体化

3.3.1 基本内涵

理论技术一体化是指将理论创新研究与技术应用紧密结合,形成一个相互促进、共同发展的有机整体。其目的是通过基础理论研究,为技术突破提供坚实的理论支撑;通过技术集成与持续研发,推动新技术、新工艺的推广应用,不断提出新的理论问题。通过加强基础理论研究、技术集成应用与持续研发驱动,推动新技术、新工艺的研发与应用,提高勘探开发效率(图 3)。

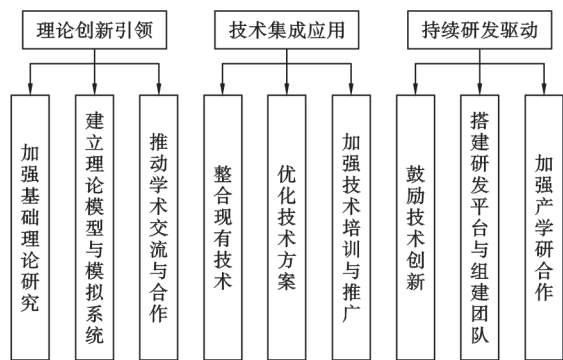


图 3 深部煤层气理论技术一体化内涵

Fig. 3 Connotation of the integration of theory and technology for deep coalbed methane

3.3.2 实施途径

(1) 理论创新引领

一是加强基础理论研究。针对深部煤层气的成藏理论、开发机理等关键科学问题,组织科研团队进行深入研究,揭示煤层气藏的形成、分布和开发规律,为勘探开发提供依据。

二是建立理论模型与模拟系统。基于基础理论研究,建立深部煤层气藏地质模型、流体动力学模型和开发模拟系统,为技术研发和方案设计提供理论支撑和模拟测试平台。

三是推动学术交流与合作。加强与国际和国内煤层气领域的学术交流与合作,引进和吸收先进理论成果,推动适用于不同区域的深部煤层气理论创新与应用。

(2) 技术集成应用

一是整合现有技术。对现有的直丛井、水平井、多分支井、压裂增产等煤层气开发技术进行全面梳理和评估,选择适应深部煤层气的开发技术集成应用,形成高效开发技术体系。例如,在大吉区块深部煤层气勘探与开发阶段,针对深部煤储层埋藏深、渗透率低、应力环境复杂等开发难题,通过理论创新与工程实践相结合,在“人造气藏”开发理论的指导下,建立了地质工程一体化背景下的深部煤层气高效开发技术体系(图 4)。

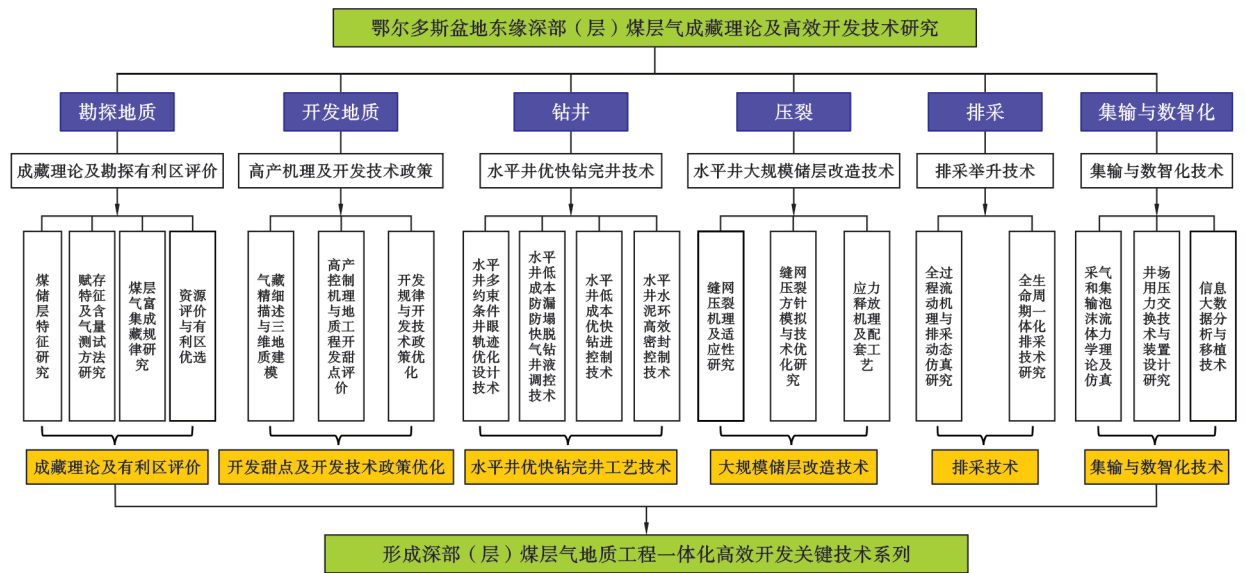


图 4 鄂尔多斯盆地东缘深部煤层气理论技术体系

Fig. 4 Theoretical and technical system of deep coalbed methane in the eastern margin of Ordos Basin

二是优化技术方案。根据深部煤层气地质特征和开发条件,对集成的技术方案进行优化设计,确保技术方案的科学性、合理性和可行性。

三是加强技术培训与推广。对技术人员进行培训,提高其对新技术、新工艺的掌握和应用能力。同时,加强技术推广,推动新技术、新工艺的广泛应用。

(3) 持续研发驱动

一是鼓励技术创新。制定相关政策与措施,鼓励企业和科研机构加大技术创新投入,推动新技术、新工艺的研发与应用。

二是搭建研发平台与组建团队。依托高校、科研院所和企业等创新主体,建设技术研发平台,组建专业研发团队,开展关键技术攻关和成果转化。

三是加强产学研合作。推动产学研用的深度融合,加强企业与高校、科研院所的合作,共同开展技术研发和成果转化工作,促进技术创新与产业升级的良性互动。

3.4 地下地上一体化

3.4.1 基本内涵

地下地上一体化是实现深部煤层气勘探开发产业升级的重要策略,是指在煤层气开发过程中,加强地下开采系统与地面配套设施的协同设计、优化运行。通过落实地下系统优化、地面设施配套、环境友好设计以及协同工作与优化等实施方案,实现煤层气资源的高效、安全、环保开发(图 5)。地下地上一体化不仅关注地下煤层气开采系统的优化,还注重地面设施的高效配套,同时还考虑开采活动对地面环境的影响,实施环境友好型设计与恢复措施。

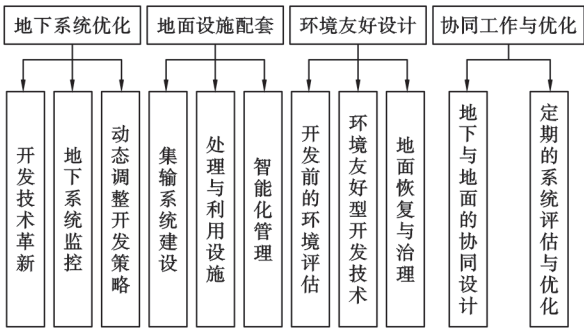


图 5 深部煤层气地下地上一体化内涵

Fig. 5 Connotation of the integration of underground and ground for deep coalbed methane

3.4.2 实施途径

(1) 地下系统优化

一是开发技术革新。当前,深部煤层气已经初步形成了地质综合评价、气藏开发优化、优快钻完井及体积压裂、高效排采集输等技术系列,在此基础上,还需不断引进和研发先进的煤层气开采技术,如长水平井、多分支井、多目的层钻井技术,多岩性高效体积压裂、CO₂ 减水压裂技术,智能完井、多层合采技术,微生物、二氧化碳驱替和注热及原位转化技术等,以综合提高深部煤层气的开发效率和采收率^[1]。

二是地下系统监控。强化地下系统监控,建立完善的地下系统监控体系。针对各层段压裂效果、裂缝分布认识不清,以及生产过程中各层段的气、水产出贡献不明确等问题,需应用高效技术手段来实时监测煤层气井的压裂施工过程、生产状态和地层压力、流体性质等参数,为优化开发方案提供依据。例如,应用

套管外永置式光纤监测等先进技术,将光纤随套管下入,并永久固定在套管外的水泥环内,监测煤层气井压裂和生产过程中水平段各段的压力、温度、流量等参数及其动态变化,实现各段压裂施工以及生产参数的全过程跟踪监测,及时分析评价各段的压裂效果及产出贡献。

三是动态调整开发策略。当前,深部煤层气开发现场“井多人少”的管理矛盾突出,措施实施和工作制度调整主要依赖人工经验,导致开发策略调整的及时性、准确性难以保证。此外,深部煤层的基质渗透率极低,受压敏、速敏、贾敏效应等因素影响,排采精细管控对保障深部煤层气井稳定生产、提高 EUR 至关重要^[23-24]。因此,需要推动储层-井筒-地面全过程流动的“实时跟踪、提前预判、及时调整”,结合地下系统监控数据进行生产动态智能分析,通过气举、射流泵等采气装置自动调参,调整注入压力、采气速度等,以实现智能动态调整,确保煤层气井的长期稳定生产,创建智慧气田生产管理模式。

(2) 地面设施配套

一是集输系统建设。建设集气站、输气管道、压缩机站等高效煤层气集输系统,确保煤层气从地下开发到地面集输顺畅。

二是处理与利用设施。配套建设煤层气处理厂并利用设施(如脱硫设备、脱水设备、加压站等)将煤层气处理成符合标准的燃气或化工原料,供用户使用或进一步加工。

三是智能化管理。利用智能化管理系统,对地面设施进行远程监控和智能调度,以提高运行效率和安全性。

(3) 环境友好设计

一是开发前的环境评估。在煤层气藏投入开发之前进行全面的环境评估,了解开发活动对地面生态、水文等环境的影响,并制定相应的环境保护措施。

二是环境友好型开发技术。采用环境友好型开发技术,如减少地层水的排放、控制开发过程中的噪声和振动等,降低开发活动对地面的影响。例如,在大吉区块深部煤层气开发过程中,通过深化采出液处理工艺的优选和评价,开展井场采出液处理及回用试验,提高重复利用率,支撑了大规模压裂用水需求,实现了降本增效。

三是地面恢复与治理。煤层气开发结束后,需要对地面进行植被恢复、土地平整、水土保持等恢复性治理,确保地面生态环境的可持续发展。

(4) 协同工作与优化

一是地下与地面的协同设计。地面建设的指导理

念从“地上服从地下”转变为“地上地下整体设计优化”,强化地下与地面的协同,实现投资的整体管控和深部煤层气的规模效益开发。在煤层气开发初期,应将地下开发系统与地面配套设施进行协同设计,确保两者的无缝对接和高效运行。同时,要强化全生命周期采气工艺的顶层设计,充分考虑其对地面系统的影响,避免因阶段性调整导致地面重复建设,采用一体化、撬装化、模块化工艺设计,并预留好接口,有利于及时调整优化。深部煤层气开发各阶段的生产参数变化大,要根据不同生产阶段的特点及压力范围,优化地面工艺流程。深部煤层气井高压期短,压力能的有效利用时间为 1~2 a,稳产压力为 0.5~1.0 MPa(图 6)。在大吉区块深部煤层气开发过程中,为充分利用地层能量,设计了中压和低压集输系统,将井场划分为“卫星井场”和“中心井场”(图 7),同一井场内各单井的深部煤层气藏处于同一开发层位、同一压力系统,并按照同步实施、同步投产的方式开发。根据生产规律和采气工艺的不同,将集输系统设计划分为自喷阶段和射流泵阶段。

二是定期的系统评估与优化。建立深部煤层气地下地面一体化协同工作技术路线(图 8)。在煤层气开发阶段,定期对地下开发系统和地面配套设施进行评估和优化,不断调整和完善系统设计和运行方案。

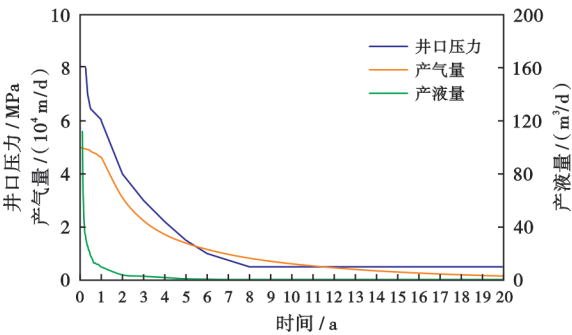


图 6 深部煤层气全生命周期生产参数预测

Fig. 6 Prediction of production parameters of deep coalbed methane throughout its life cycle

3.5 产学研用一体化

3.5.1 基本内涵

产学研用一体化是指通过科研创新平台建设、人才体系(团队)培养、技术应用示范以及协同创新与产业升级等方案的落实,推动产业创新、加速技术成果转化落实、提升产业核心竞争力(图 9)。其强调科研创新与产业需求的紧密结合,科研成果的快速转化,以及人才培养与产业发展的良性互动,目的是通过整合科研、教育、产业和应用 4 个方面的资源,形成一个协同创新的有机整体。

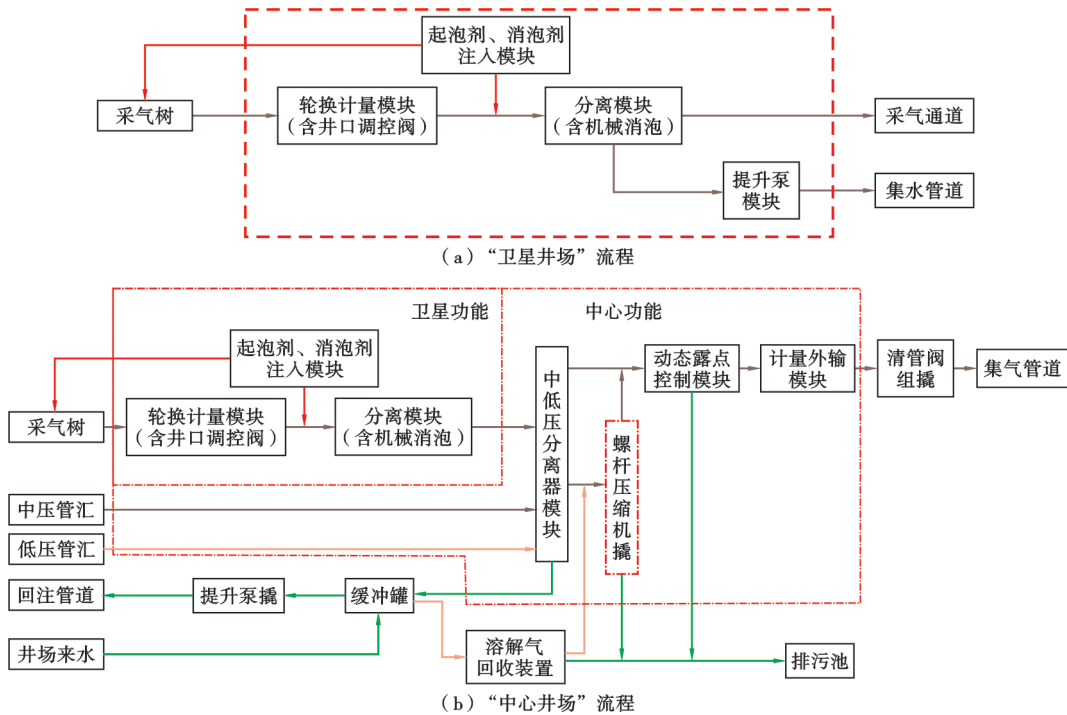


图 7 大吉区块卫星井场与中心井场流程

Fig. 7 Flowchart of satellite well site and central well site in Daji block

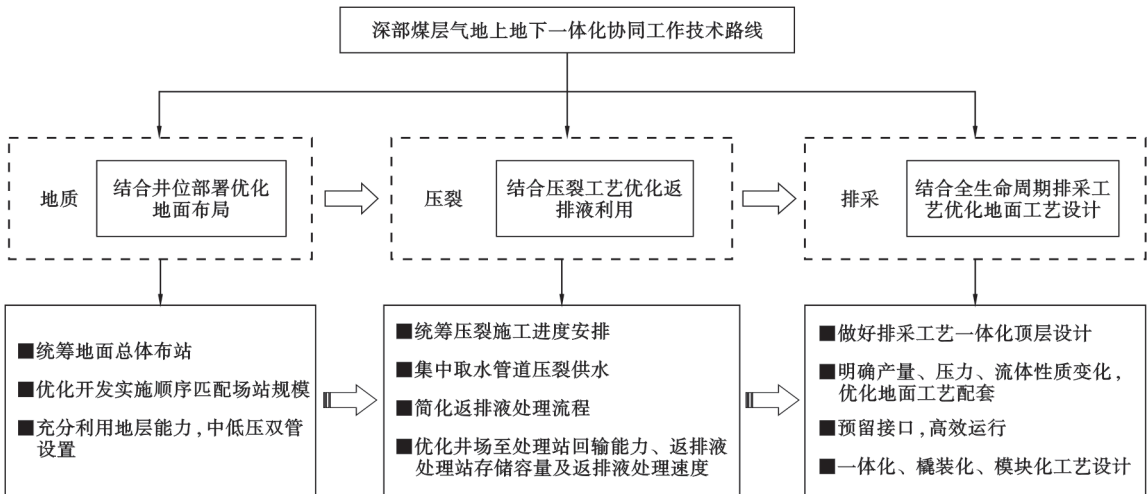


图 8 深部煤层气地下地面一体化协同工作技术路线

Fig. 8 Collaborative work technology roadmap of the integration of underground and ground for deep coalbed methane

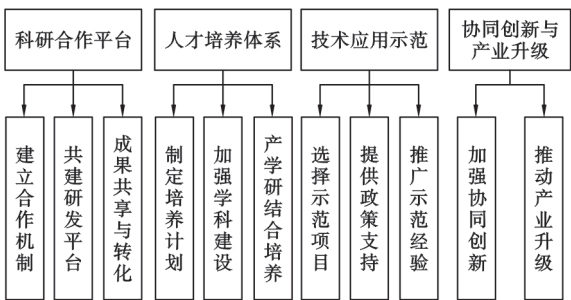


图 9 深部煤层气产学研用一体化内涵

Fig. 9 Connotation of the integration of production, teaching, researching and training for deep coalbed methane

3.5.2 实施途径

(1) 搭建科研合作平台

一是建立合作机制。高校、科研院所、企业等创新主体需建立紧密合作关系,明确各方的权利与义务,形成稳定的产学研合作机制。

二是共建研发平台。联合建立深部煤层气勘探开发技术研发平台,共享科研设施和资源,开展关键技术攻关和成果转化。

三是成果共享与转化。建立科研成果共享机制,确保科研成果在合作方之间得到及时、有效的传播和应用。同时,推动科研成果产业化,加速转化为实际生

产力。

(2) 完善人才培养体系

一是制定培养计划。根据勘探开发产业需求,制定学历教育、职业培训、实习实训等针对性的人才培养计划。

二是加强学科建设。支持高校和科研院所加强煤层气相关学科的建设,提升学科水平,培养高素质人才。

三是产学研结合培养。通过产学研合作项目,让相关专业的学生在实际项目中得到锻炼和提升,培养实践和创新能力。

(3) 强化技术应用示范

一是选择示范项目。根据产业发展的需要和技术创新成果,选择代表性、示范性项目进行技术应用示范。

二是提供政策支持。为示范项目提供政策支持和资金扶持,确保其得以顺利实施并取得预期效果。

三是推广示范经验。及时总结示范项目的经验和教训,通过组织交流会、培训班等方式,将大吉区块等

示范项目的经验推广到整个产业中,加速新技术的推广和应用。

(4) 推动协同创新与产业升级

一是加强协同创新,鼓励产学研用协同创新,共同开展研发、成果转化和升级,形成协同创新氛围;二是推动产业升级,通过产学研用一体化,提高产业的整体竞争力。

3.6 投资效益一体化

3.6.1 基本内涵

投资效益一体化贯穿于整个项目的投资决策、实施运营及回报评估全过程,是通过实施成本控制策略、经济效益评估、多元化融资渠道以及风险防控措施等,优化资源配置、提高项目管理水平、加强风险防控,以实现投资效益的最大化(图 10)。其核心是通过技术创新和管理优化来有效控制成本,结合定期经济效益评估,确保投资能够获得合理回报;目标是在保证安全环保的前提下,实现资源的高效利用和投资的收益最大化。

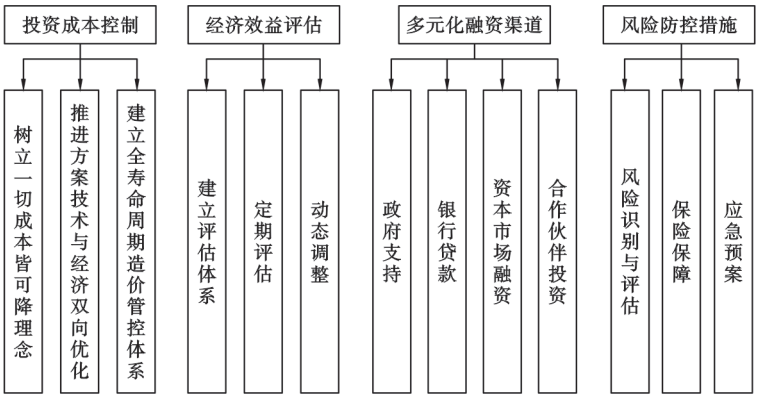


图 10 深部煤层气投资效益一体化内涵

Fig. 10 Connotation of the integration of investment and benefit for deep coalbed methane

3.6.2 实施途径

(1) 投资成本控制

一是树立“一切成本皆可降”理念。要牢固树立成本意识,谨记“今天的投资就是明天的成本”,坚持全员、全方位、全要素、全过程控制成本。推进生产上精耕细作、经营上精打细算、管理上精雕细刻、技术上精益求精,建立健全以市场为导向的成本倒逼机制,采取超常规思维,压降投资成本,打造企业低成本竞争力,并使其成为推动企业高质量发展的核心竞争力。

二是推进方案的技术与经济双向优化。为实现源头控制投资,以项目效益标准为目标倒算单井经济极限投资,并以单井经济极限投资倒逼技术方案优化,进而实现投资控制目标,促进方案整体优化及效益提升,

实现“经济指标倒逼技术方案优化、技术方案优化促进经济指标提升”的技术与经济双向优化^[32](图 11),形成“技术经济一体化”理念。

三是建立全生命周期造价管控体系。突破传统的全过程造价管理范围,以项目全生命周期成本最优为目标,实行项目建设与运行造价一体化管理,实现项目投资与运行成本的一体化控制(图 12)。以合理控制项目费用为目标,在项目全生命周期的重点环节持续强化管控。坚持市场化定价发展方向,持续完善市场化价格竞争机制,深入开展全过程、全要素现场写实,构建支撑高效建产的效益开发价格体系。通过压降投资成本、推进技术方案与经济的双向优化和实施全周期造价管控体系,大吉区块深部煤层气开发井的单井成本降低约 25%。

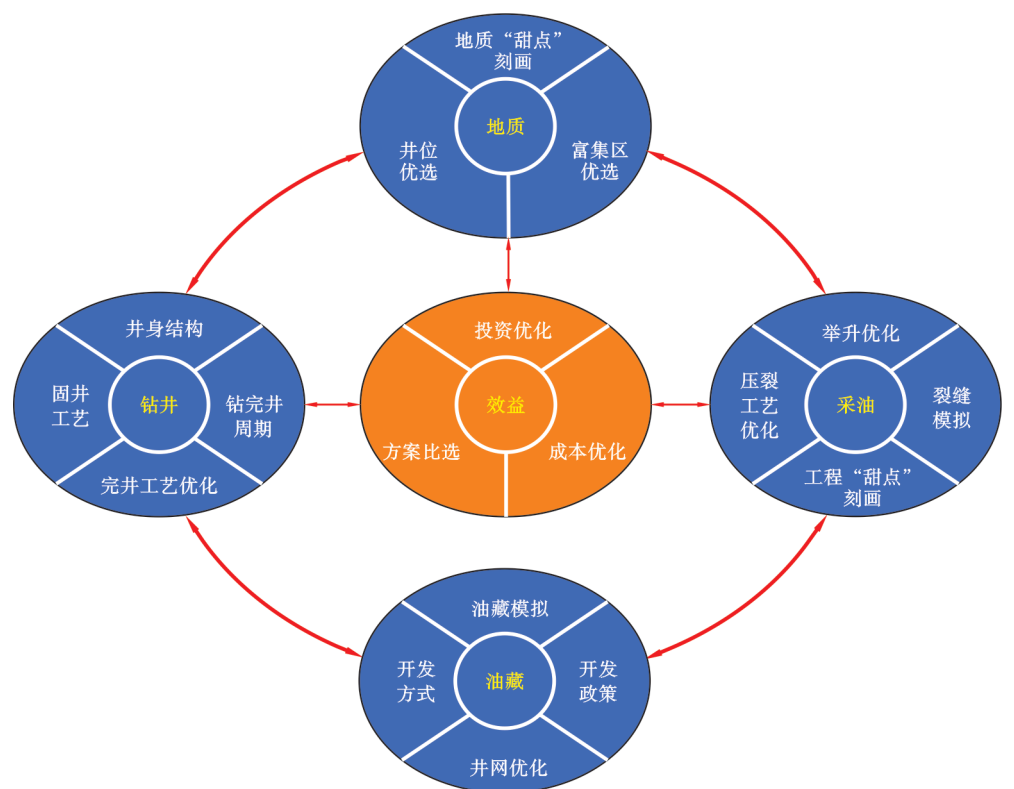


图 11 方案的技术与经济双向优化

Fig. 11 Bidirectional optimization for technical method and economics

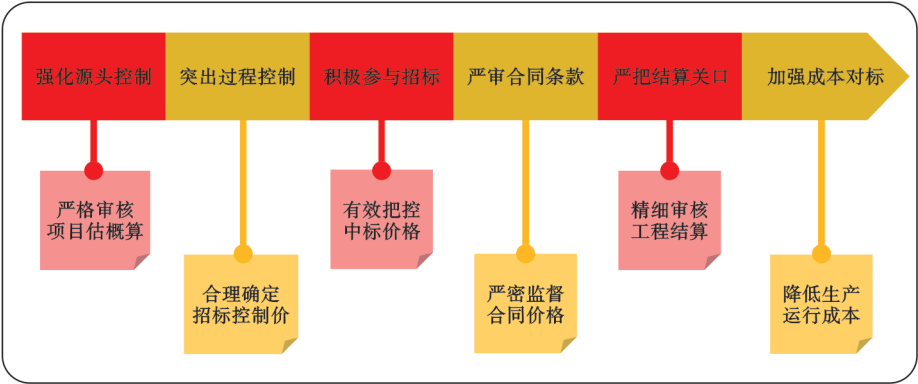


图 12 全生命周期造价管控体系示意

Fig. 12 Schematic of the cost control system throughout the life cycle

(2) 经济效益评估

一是建立评估体系。建立一套涵盖财务、市场、技术指标等多个维度的科学、全面的经济效益评估体系(图 13)。煤层气效益评估体系应包括涵盖技术、经济、风险、评价 4 大类参数的煤层气经济评价参数系列,以及涵盖投入预测、产出预测、效益评价、风险评价等 9 大方法的煤层气经济评价体系,目的是为煤层气项目的勘探-开发-生产全过程提供决策支撑。

二是定期评估。在项目实施的各个阶段,定期进行经济效益评估,及时发现并解决问题。

三是动态调整。根据评估结果,动态调整项目计划和投资策略,以实现投资效益的最大化。

(3) 多元化融资渠道

一是政府支持。积极争取政府项目审批、财政补贴、税收优惠等多方面的支持,以降低项目成本。

二是银行贷款。与商业银行建立稳定的合作关系,争取优惠的贷款条件和利率,为项目提供稳定资金支持。

三是资本市场融资。通过发行股票、债券等方式,在资本市场上筹集资金,以扩大项目资金来源。

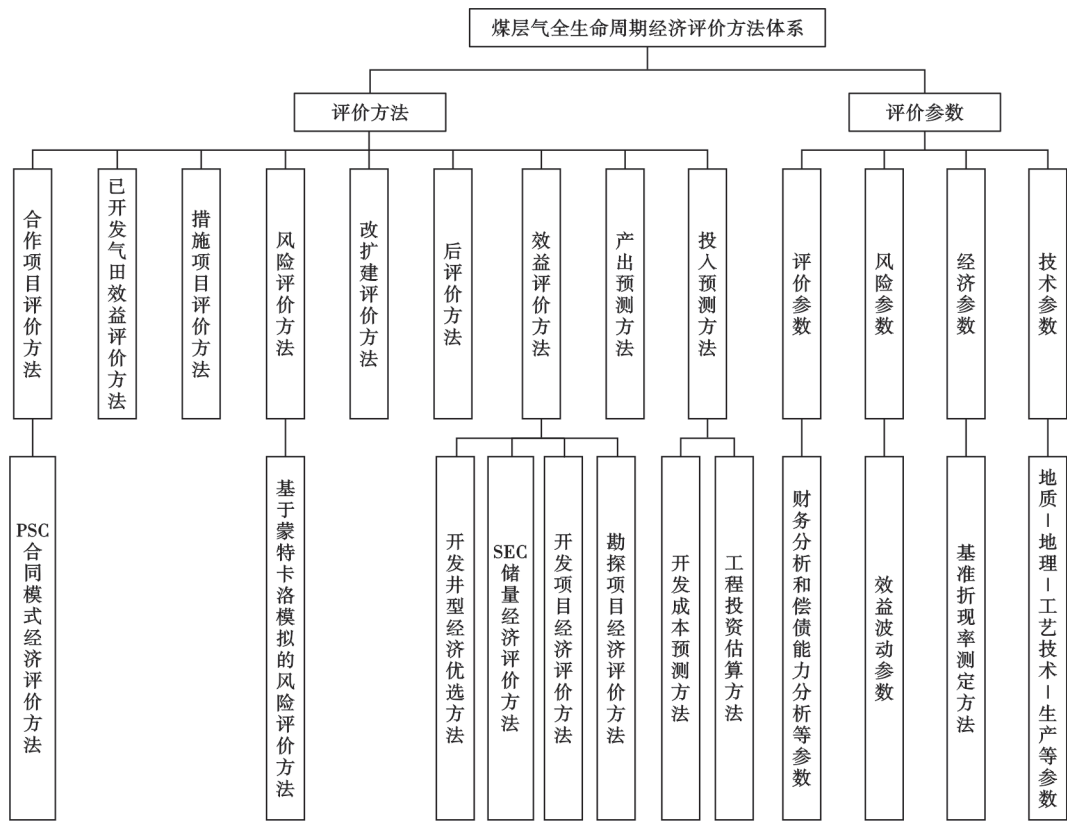


图 13 煤层气项目全周期经济评价方法体系

Fig. 13 Whole cycle economic evaluation method system for coalbed methane development project

四是合作伙伴投资。寻找有实力的合作伙伴，通过股权合作、共同投资等方式，共同承担风险，分享收益。

(4) 风险防控措施

一是风险识别与评估。在项目实施前，进行全面风险识别和评估，制定针对性的防控措施。

二是保险保障，为项目购买工程一切险、责任险等必要的保险，以降低意外事件影响。

三是应急预案。制定针对自然灾害、安全事故、市场变化等突发情况的应急预案，确保面临风险时能够迅速应对。

3.7 大数据人工智能一体化

3.7.1 基本内涵

油气勘探开发数据具有种类多、体量大、多模态、价值密度低等特点，且存在明显的专业知识壁垒，给人工智能在深部煤层气勘探开发决策的融合发展增加了难度。因此需要加强大数据与人工智能一体化协同推进(图 14)，利用海量的地质、工程、生产、市场等多源信息，通过数据处理与分析技术，充分挖掘数据价值，借助人工智能技术不断优化勘探开发方案，为深部煤层气的勘探开发提供科学、高效的决策依据(图 15)。

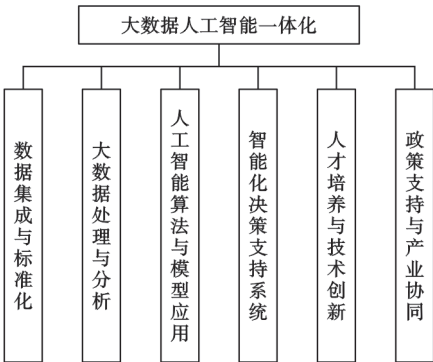


图 14 深部煤层气大数据人工智能一体化内涵

Fig. 14 Connotation of the integration of big data and artificial intelligence for deep coalbed methane

3.7.2 实施途径

(1) 数据集成与标准化

数据可能来自传感器、企业数据库、社交媒体等多种渠道，其格式和结构各异，需建立统一的数据管理平台，集成来自勘探、开发、生产、市场等多个环节的数据资源，并制定统一的数据标准和格式，确保数据具有可交换性和共享性。通过数据清洗、整合、转换等步骤，形成标准化数据集，为后续数据分析奠定基础。

(2) 大数据处理与分析

利用分布式计算、云计算等大数据技术，对海量数

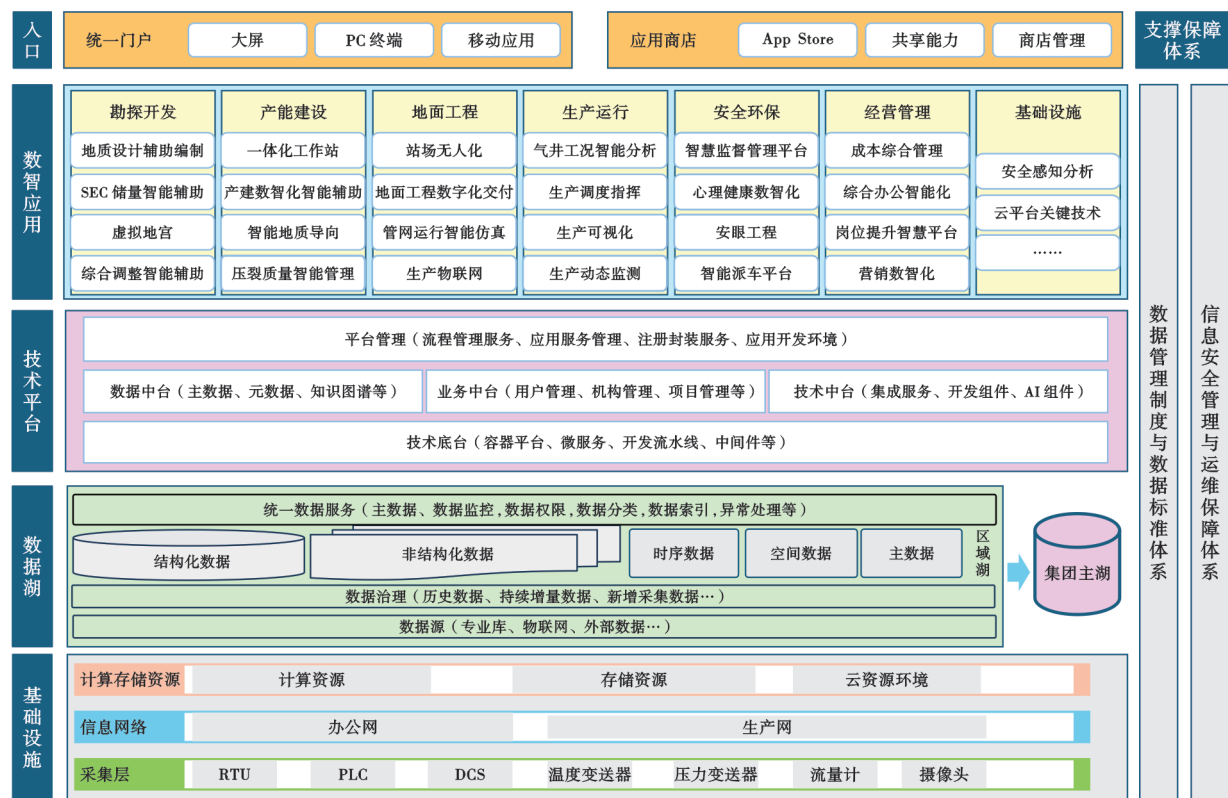


图 15 深部煤层气大数据人工智能一体化框架

Fig. 15 Framework of the integration of big data and artificial intelligence for deep coalbed methane

据进行高效处理和分析。通过数据挖掘、关联分析、聚类分析等方法,发现数据之间的潜在联系和规律。针对深部煤层气的勘探开发特点,重点关注地质构造、储层物性、流体运移规律等数据分析。

(3) 人工智能算法与模型应用

基于大数据分析结果,构建适用于深部煤层气勘探开发的人工智能算法与模型,包括初至波自动拾取、地震层位自动解释、抽油机井工况诊断、测井油气层识别等,通过机器学习、深度学习等技术手段,实现勘探开发全过程的智能化管理和优化。

(4) 智能化决策支持系统

利益链集成专家系统、知识库等智能工具,将数据分析结果与专家经验相结合,为勘探开发提供全面、准确的决策支持。并通过实时监控和反馈机制,不断调整和优化决策方案。

(5) 人才培养与技术创新

通过校企合作、产学研用结合等方式,培养具备跨学科知识背景和创新能力的复合型人才。鼓励企业加大研发投入,推动技术创新和成果转化。

(6) 政策支持与产业协同

争取国家相关政策的支持和引导,加强与上下游产业的协同合作,形成产业联盟或创新联合体。通过资源共享、优势互补等方式,实现产业链上下游、各环节的协同发展。

3.8 战略策略一体化

3.8.1 基本内涵

战略策略一体化是深部煤层气勘探开发产业升级中的核心策略,强调在产业升级过程中,从国家和企业两个层面,根据发展实际和内外部环境,制定并执行一套协调一致、相互支撑的战略和策略。具体而言,战略策略一体化是通过实施长期发展规划、政策环境适应、国际合作交流以及资源整合与优化、风险评估与防控等方案,推动产业整体升级,提升产业竞争力(图 16),其目的是通过整合企业内外资源,明确发展目标,推动产业整体升级。实施战略策略一体化,需要政府和企业同时发力,尤其是大型能源企业,应具备全局观念、长远眼光和战略思维,在复杂多变的市场环境中保持清醒头脑,坚定发展方向。

3.8.2 实施途径

(1) 制定长期发展规划

一是制定规划。无论是国家还是企业,都要根据深部煤层气勘探开发的产业现状和未来趋势,制定涵盖技术创新、市场拓展、人才培养、环境保护等领域的长期发展规划,明确发展目标和路径。

二是滚动更新。根据产业发展实际和外部环境变化,及时调整发展目标和路径,确保规划的时效性和指导性。

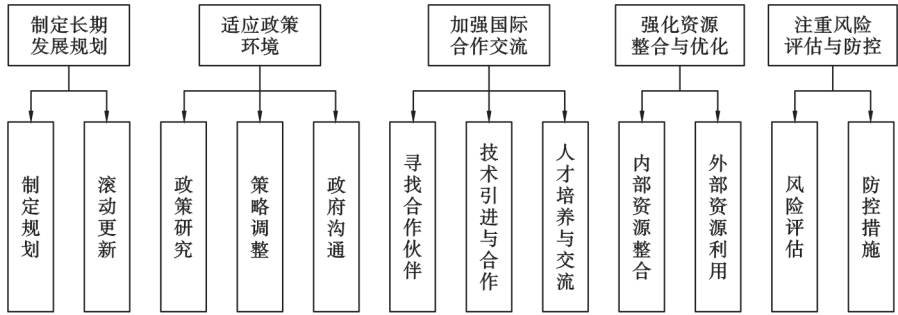


图 16 深部煤层气战略策略一体化内涵

Fig. 16 Connotation of the integration of strategy and tactic for deep coalbed methane

(2) 适应政策环境

一是政策研究。企业应加强对国家政策的研究和解读,了解政策导向和扶持措施,贯彻落实好《2024—2025 年节能降碳行动方案》等重要指导方针^[33],及时有效地释放政策红利。

二是策略调整。根据政策变化,及时调整深部煤层气产业的发展策略,确保深部煤层气产业与政策能够有效对接和协同发展。

三是政府沟通。加强与政府的沟通和协调,争取在项目审批、资金扶持、税收优惠、土地利用等方面得到支持,创造良好的政策环境。

(3) 加强国际交流合作

一是寻找合作伙伴。积极寻找与国际先进企业的合作机会,了解前沿技术和管理经验,为中国深部煤层气产业升级提供借鉴和参考。

二是技术引进与合作。通过技术引进、合作研发等方式,引进国际先进技术和管理经验,提升中国深部煤层气产业的技术水平和创新能力。

三是人才培养与交流。人才是中国深部煤层气产业升级的关键,要构建与国际先进企业的人才培养与交流合作机制,吸引和培养具有国际视野和创新能力的高素质人才,为深部煤层气产业升级提供人才支持。

(4) 强化资源整合与优化

一是内部资源整合。对企业内部的资源进行整合和优化,以提高资源利用效率,降低运营成本。

二是外部资源利用。积极利用科研机构、高校、行业协会(学会)等外部资源,加强产、学、研、用等领域的合作与交流,推动技术创新和成果转化。

(5) 注重风险评估与防控

一是风险评估。对深部煤层气产业升级过程中可能面临的风险进行全面评估,主要包括市场风险、技术风险、政策风险等。

二是防控措施。根据风险评估结果,制定针对性的防控措施,确保深部煤层气产业在升级过程中能够稳健发展。

4 实践应用

鄂尔多斯盆地东缘的大吉区块是深部煤层气产业“八个一体化”理念探索形成的主战场和成功实践的示范区。“八个一体化”体系的有效实践,整体提高了大吉区块的单井产量,实现了深部煤层气田的效益开发,2024 年,大吉区块深部煤层气的产量达 $19.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。“八个一体化”体系的应用,不仅保障了大吉区块深部煤层气生产过程的安全环保,而且持续孵化了理论创新和技术革新,有力支撑了国家能源局 4 个国家级深部煤层气示范项目的启动实施。

4.1 提高勘探开发效率

通过实施勘探开发一体化及地质工程一体化,可以实现地质勘探与工程设计的紧密结合,优化勘探开发流程,提高勘探精度和开发效率。地质工程一体化是大吉区块深部煤层气勘探开发阶段的关键技术之一,通过地质和工程的紧密结合,建立了该区深部煤层气地质-工程-开发甜点评价标准、煤储层精细评价技术、地质工程一体化导向技术,以及“地应力场、天然裂缝场、人工裂缝场、井型与方位、井网井距”五位一体井网优化设计技术,通过地质条件的深入分析和工程措施的精确设计,实现了该区深部煤层气资源的有效动用和采收率的最大化。

4.2 增强技术创新能力

通过实施理论与产学研用(科研生产)一体化,可以实现理论研究与技术创新的结合,促进科研成果的快速转化和生产应用,提升整体技术水平。针对大吉区块深部煤层气勘探开发理论与技术难题,中联煤层气国家工程研究中心有限责任公司、中国石油勘探开发研究院等科研机构,与中国石油大学(北京)、中国地质大学(北京)、中国矿业大学(北京)等高等院校,联合开展基础研究和攻关,共同推动了技术创新和成果转化,充分体现了产学研用一体化的成功实践。

4.3 确保安全环保

通过实施地下地上一体化,可以实现地下开发与

地面设施建设的协调配合,确保全过程的安全环保性。根据大吉区块深部煤层气的开发规律和集输等特征,结合当前人工智能技术进展,探索形成了集地质、工程、地面等多专业一体化协同环境下的集输和数智化技术,通过地上设施和地下资源的协调统一,确保了地面设施能够有效地支持地下资源的开采。

4.4 降低开发成本

通过实施投资效益与大数据人工智能一体化,可以实现资源配置优化,降低成本、提高效益。大吉区块在深部煤层气开发先导试验和产能建设阶段,强调投资决策的科学性和成本控制的有效性,通过压降投资成本、推进方案的技术与经济双向优化和实施全周期造价管控,使单井成本降低约 25%,实现了该区深部煤层气开发经济效益的最大化。

4.5 企地和谐共赢

在大吉区块深部煤层气勘探开发过程中,探索形成了一套由政府组织、企业主导的协调统一的发展机制,践行了相互支撑的共同发展目标和策略,政府和企业实现协作与共赢,既发挥各自优势,承担产业链中的不同角色,又紧密合作,共同推动了这一重要能源项目的顺利运行。政府通过政策支持和监管,为企业创造良好的发展环境;企业则通过技术创新和高效管理,推动区块的可持续发展。政府与企业共同努力,不仅促进了煤层气资源的有效利用,也推动了区域经济的发展,这一良好局面对于实现深部煤层气资源的高效利用和区域经济的可持续发展具有重要意义。

4.6 发展前景广阔

深部煤层气作为重要的天然气资源接替领域,其勘探开发产业具有广阔的发展空间。“八个一体化”创新理念必将逐步得到推广应用,带动深部煤层气勘探开发全面升级。但不同区块的地质条件差异性明显,导致大吉区块探索形成的深部煤层气理论技术体系无法完全移植到其他地区,“八个一体化”体系的推广应用将面临更大、更多挑战。

推动产业升级发展,产业规模不断扩大,最终实现煤层气大产业战略目标,应做到“五强化、三落实”,即强化技术创新和研发投入,强化产业链上下游合作与协同,强化安全环保管理,强化国际合作与交流,强化政策支持和引导,以及持之以恒落实“以技术创新为主体,以资源、技术、人才、政策和投资五位一体、协同创新”协同配套,有效落实“深部煤层气革命”工程,逐步落实“八个一体化”战略体系的宣传与实践。持续优化“八个一体化”体系,积极推动产业全面升级发展,助力中国煤层气实现大产业、大发展,是保障中国能源安全、实现“双碳”目标的重要支撑。

5 结 论

(1) 经过多年探索,中国深部煤层气勘探开发取得重大突破,理论与技术均取得明显进展,但产业发展仍然面临地质条件特殊性、理论技术难题增多、政策与经济性、安全生产与环境保护 4 个方面的挑战。

(2) 深部煤层气产业升级的内涵包括理论技术成熟、开发效益提升、投资信心坚定和规模快速扩大。当前,中国深部煤层气产业在政策支持与引导、技术创新与突破、基础设施建设与完善、人才培养与引进、产业链协同发展和环境保护与可持续发展 6 个方面具备升级发展的基础。

(3) “八个一体化”战略体系集技术、经济与管理于一体,涵盖了勘探开发、地质工程、理论技术、地下地上、产学研用、投资效益、大数据人工智能、战略策略。其最终目标是提高勘探开发效率、增强技术创新能力、确保安全环保、降低开发成本、推动中国深部煤层气产业全面升级。

(4) 深部煤层气产业升级发展应坚持“五强化、三落实”:强化技术创新和研发投入,强化产业链上下游合作与协同,强化安全环保管理,强化国际合作与交流,强化政策支持和引导;持之以恒落实“以技术创新为主体,以资源、技术、人才、政策和投资五位一体、协同创新”的协同配套,有效落实“深部煤层气革命”工程,逐步落实“八个一体化”战略体系。

参 考 文 献

[1] 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.

[2] 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.

[3] 徐凤银,王成旺,熊先钺,等. 鄂尔多斯盆地东缘深部煤层气成藏演化规律与勘探开发实践[J]. 石油学报,2023,44(11):1764-1780.

XU Fengyin,WANG Chengwang,XIONG Xianyue,et al. Evolution law of deep coalbed methane reservoir formation and exploration and development practice in the eastern margin of Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica,2023,44(11):1764-1780.

[4] 秦勇. 中国深部煤层气地质研究进展[J]. 石油学报,2023,44(11):1791-1811.

QIN Yong. Progress on geological research of deep coalbed methane in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(11): 1791-1811.

[5] 李明宅, 曹毅民, 丁蓉, 等. 大宁—吉县区块深层煤岩气赋存产气特征与储量估算方法指标探讨[J]. *中国石油勘探*, 2024, 29(4): 142-155.

LI Mingzhai, CAO Yimin, DING Rong, et al. Gas occurrence and production characteristics of deep coal measure gas and reserve estimation method and indicators in Daning-Jixian block[J]. *China Petroleum Exploration*, 2024, 29(4): 142-155.

[6] 李国欣, 张水昌, 何海清, 等. 煤岩气: 概念、内涵与分类标准[J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(4): 783-795.

LI Guoxin, ZHANG Shuichang, HE Haiqing, et al. Coal-rock gas: concept, connotation and classification criteria[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(4): 783-795.

[7] 李曙光, 王成旺, 王红娜, 等. 大宁—吉县区块深层煤层气藏特征及有利区评价[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(9): 59-67.

LI Shuguang, WANG Chengwang, WANG Hongna, et al. Reservoir forming characteristics and favorable area evaluation of deep coalbed methane in Daning-Jixian block[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(9): 59-67.

[8] 徐凤银, 聂志宏, 孙伟, 等. 鄂尔多斯盆地东缘深部煤层气高效开发理论技术体系[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(1): 528-544.

XU Fengyin, NIE Zhihong, SUN Wei, et al. Theoretical and technological system for highly efficient development of deep coalbed methane in the eastern edge of Erdos Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(1): 528-544.

[9] 聂志宏, 徐凤银, 时小松, 等. 鄂尔多斯盆地东缘深部煤层气开发先导试验效果与启示[J]. *煤田地质与勘探*, 2024, 52(2): 1-12.

NIE Zhihong, XU Fengyin, SHI Xiaosong, et al. Outcomes and implications of pilot tests for deep coalbed methane production on the eastern margin of the Ordos Basin[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(2): 1-12.

[10] 王秀娟, 李涛. 勘探开发一体化系统分析及长庆油田的管理实践[J]. *中小企业管理与科技*, 2014(9): 29-32.

WANG Xiujuan, LI Tao. Exploration and development integration system analysis and management practice of Changqing oil-field[J]. *Management & Technology of SME*, 2014(9): 29-32.

[11] LI Yang, ZHAO Qingmi, XUE Zhaojie. Management mode and application of geoscience-engineering integration[J]. *Engineering*, 2022, 18(11): 12-16.

[12] 李贵红, 赵佩佩, 吴信波. 煤层气地质工程一体化平台的建设构想[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(9): 130-136.

LI Guihong, ZHAO Peipei, WU Xinbo. Construction concept of integrated geological engineering platform for coalbed methane[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(9): 130-136.

[13] 何骁, 周鹏, 杨洪志, 等. 页岩气地质工程一体化管理实践与展望[J]. *天然气工业*, 2022, 42(2): 1-10.

HE Xiao, ZHOU Peng, YANG Hongzhi, et al. Management practice and prospect of shale gas geology-engineering integration[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(2): 1-10.

[14] 李阳, 廉培庆, 薛兆杰, 等. 大数据及人工智能在油气田开发中的应用现状及展望[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2020, 44(4): 1-11.

LI Yang, LIAN Peiqing, XUE Zhaojie, et al. Application status and prospect of big data and artificial intelligence in oil and gas field development[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2020, 44(4): 1-11.

[15] 殷绪江. 大港油田研制“基于人工智能与云边协同的油井智能调控技术”[EB/OL]. (2024-07-15)[2024-12-25]. <https://www.hqkjw.cn/index.php/zhinenghuanqiu/26758.html>.

YIN Xujiang. Dagang oilfield has developed the “Intelligent Control Technology for Oil Wells Based on Artificial Intelligence and Cloud-Edge Collaboration”. [EB/OL]. (2024-07-15)[2024-12-25]. <https://www.hqkjw.cn/index.php/zhinenghuanqiu/26758.html>.

[16] 申建. 我国主要盆地深部煤层气资源量预测[R]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.

SHEN Jian. Prediction of deep coalbed methane resources in major basins in China[R]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.

[17] 杨秀春, 徐凤银, 王虹雅, 等. 鄂尔多斯盆地东缘煤层气勘探开发历程与启示[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(3): 30-41.

YANG Xiuchun, XU Fengyin, WANG Hongya, et al. Exploration and development process of coalbed methane in eastern margin of Ordos Basin and its enlightenment[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(3): 30-41.

[18] 朱光辉, 季洪泉, 米洪刚, 等. 神府深部煤层气大气田的发现与启示[J]. *煤田地质与勘探*, 2024, 52(8): 12-21.

ZHU Guanghui, JI Hongquan, MI Honggang, et al. Discovery of a large gas field of deep coalbed methane in the Shenfu block and its implications[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(8): 12-21.

[19] 刘建忠, 朱光辉, 刘彦成, 等. 鄂尔多斯盆地东缘深部煤层气勘探突破及未来面临的挑战与对策——以临兴—神府区块为例[J]. *石油学报*, 2023, 44(11): 1827-1839.

LIU Jianzhong, ZHU Guanghui, LIU Yancheng, et al. Breakthrough, future challenges and countermeasures of deep coalbed methane in the eastern margin of Ordos Basin: a case study of Linxing-Shenfu block[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(11): 1827-1839.

[20] 兰浩, 杨兆彪, 仇鹏, 等. 新疆准噶尔盆地白家海凸起深部煤层气勘探开发进展及启示[J]. *煤田地质与勘探*, 2024, 52(2): 13-22.

LAN Hao, YANG Zhaobiao, CHOU Peng, et al. Exploration and exploitation of deep coalbed methane in the Baijiahai uplift, Junggar Basin: progress and its implications[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(2): 13-22.

[21] 徐凤银, 闫霞, 林振盘, 等. 我国煤层气高效开发关键技术研究进展与发展方向[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(3): 1-14.

XU Fengyin, YAN Xia, LIN Zhenpan, et al. Research progress and development direction of key technologies for efficient coalbed methane development in China[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(3): 1-14.

[22] 曾雯婷, 徐凤银, 张雷, 等. 鄂尔多斯盆地东缘深部煤层气排采工

艺技术进展与启示[J]. 煤田地质与勘探,2024,52(2):23-32.

ZENG Wenting, XU Fengyin, ZHANG Lei, et al. Deep coalbed methane production technology for the eastern margin of the Ordos Basin: advances and their implications[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(2): 23-32.

[23] 曾雯婷,葛腾泽,王倩,等. 深层煤层气全生命周期一体化排采工艺探索——以大宁—吉县区块为例[J]. 煤田地质与勘探,2022,50(9):78-85.

ZENG Wenting, GE Tengze, WANG Qian, et al. Exploration of integrated technology for deep coalbed methane drainage in full life cycle: a case study of Daning-Jixian block[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(9): 78-85.

[24] 闫霞,熊先钺,李曙光,等. 深层煤岩气水平井各段产出贡献及其主控因素——以鄂尔多斯盆地东缘大宁—吉县区块为例[J]. 天然气工业,2024,44(10):80-92.

YAN Xia, XIONG Xianyue, LI Shuguang, et al. Production contributions of deep CBM horizontal well sections and their controlling factors: a case study of Daning-Jixian area, eastern Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(10): 80-92.

[25] 王登海,刘军,刘银春,等. 深层煤岩气开发地面工程面临的挑战及对策建议[J]. 天然气工业,2024,44(10):209-217.

WANG Denghai, LIU Jun, LIU Yinchun, et al. Surface engineering of deep coal-rock gas development: challenges and solutions [J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(10): 209-217.

[26] 李曙光,王红娜,徐博瑞,等. 大宁—吉县区块深层煤层气井酸化压裂产气效果影响因素分析[J]. 煤田地质与勘探,2022,50(3):165-172.

LI Shuguang, WANG Hongna, XU Borui, et al. Influencing factors on gas production effect of acid fractured CBM wells in deep coal seam of Daning-Jixian block[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(3): 165-172.

[27] 郑司建,桑树勋. 煤层气勘探开发研究进展与发展趋势[J]. 石油物探,2022,61(6):951-962.

ZHENG Sijian, SANG Shuxun. Progress of research on coalbed methane exploration and development[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2022, 61(6): 951-962.

[28] 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 Qinp ing, 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.

[29] 门相勇,娄钰,王一兵,等. 中国煤层气产业“十三五”以来发展成效与建议[J]. 天然气工业,2022,42(6):173-178.

MEN Xiangyong, LOU Yu, WANG Yibing, et al. Development achievements of China’s CBM industry since the 13th Five-Year Plan and suggestions [J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(6): 173-178.

[30] XU Fengyin, YAN Xia, WANG Fenglin, et al. Development strategy and countermeasures of China’s CBM industry under the goal of “carbon peak and neutrality”[J]. Journal of Earth Science, 2023, 34(4): 975-984.

[31] 罗平亚,朱苏阳. 中国建立千亿立方米级煤层气大产业的理论与技术基础[J]. 石油学报,2023,44(11):1755-1763.

LUO Pingya, ZHU Suyang. Theoretical and technical fundamentals of a 100 billion-cubic-meter-scale large industry of coalbed methane in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(11): 1755-1763.

[32] 李兴科,孙超,许建国. 大井丛集约化效益建产开发方案优化与技术应用[J]. 特种油气藏,2018,25(2):169-174.

LI Xingke, SUN Chao, XU Jianguo. Development program optimization and technology application in multi-well cluster intensification benefit production [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(2): 169-174.

[33] 国务院. 国务院关于印发《2024—2025 年节能降碳行动方案》的通知[EB/OL]. (2024-05-29)[2024-12-25]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202405/content_6954323.htm.

State Council. Notice of the State Council on issuing the “2024 - 2025 Energy Conservation and Carbon Reduction Action Plan” [EB/OL]. (2024-05-29)[2024-12-25]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202405/content_6954323.htm.

(收稿日期 2024-12-04 改回日期 2025-01-13 编辑 雷永良)