

# 深部煤及煤层气勘探前景及发展方向

蒋曙鸿<sup>1,2</sup>, 师素珍<sup>3\*</sup>, 赵康<sup>4</sup>, 刘彦成<sup>5</sup>, 姚学君<sup>4</sup>, 时靖雪<sup>4</sup>, 谢东山<sup>4</sup>

1. 西安石油大学石油工程学院, 西安 710065
2. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028
3. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083
4. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083
5. 中联煤层气有限责任公司, 北京 100016

**摘要** 综述了国内外深部煤及煤层气勘探现状, 认为深部煤及煤层气开采已成为必然趋势。从深部煤层气角度出发, 认为深部特殊地质条件会影响深煤层气成藏机制与赋存状态, 因此需要建立适用于深部煤层气的勘探思想, 完善深部煤层气地质理论基础。阐述了深部多气共采、二氧化碳气体驱替煤层气及同步封存、深部煤层气智能排采等前沿工艺及相关技术难题。从深部煤炭勘探开发角度, 探讨了深部煤炭流态化开采、煤炭地下气化耦合二氧化碳捕捉与封存、深部煤炭和地热资源协同开采等目前较为先进的技术。深部煤及煤层气开采正在向自动化、智能化方向发展, 基础地质理论和勘探开发技术的不断进步将使深部成为未来勘探开发的主战场。

**关键词** 深煤层; 富集规律; 智能排采; 二氧化碳封存; 地下气化

随着浅层煤炭与矿产资源的逐步枯竭, 深部煤炭资源的利用已成为必然趋势。然而, 深部开采的环境复杂且充满挑战, 克服这些难题并获得经济收益则需要有重大的创新方案与现场实践<sup>[1]</sup>。

在深部煤层气勘探方面, 美国是最早开发深部

煤层气的国家之一<sup>[2]</sup>。Piceance 盆地 2/3 的煤层气处于深部, 1989 年美国在该盆地深达 1600~1981 m 的煤层中实现了煤层气的商业化开发<sup>[3]</sup>, 随后深煤层气与致密砂岩气共采试验获得成功, 展示出深部煤层气的开发潜力<sup>[4]</sup>。同时, 落基山脉 3 个盆地中

收稿日期: 2022-11-14; 修回日期: 2023-01-03

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(2022JCCXMT01); 煤炭资源与安全国家重点实验室开放基金项目(SKLCRSM19ZZ02); 深部高温地球物理场响应高端外国专家引进计划项目(G2021123004L); 中海石油(中国)有限公司重大科技专项(CNOOC-KJ 135 ZDXM 40)

作者简介: 蒋曙鸿, 工程师, 研究方向为海上平台总图方案设计、陆上油气田开发, 电子信箱: liuych@cnooc.com.cn; 师素珍(通信作者), 副教授, 研究方向为非常规油气田勘探, 电子信箱: ssz@cumtb.edu.cn

引用格式: 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; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.07.011

有30口井深超千米。随后,美国西部及加拿大西部部分盆地均有开展深层煤层气开发试验,部分地区在深部煤层中完成商业化开发。目前,美国、加拿大、澳大利亚等国家已实现煤层气规模化生产,煤层气成为这些国家重要的补充能源。中国深部煤层气资源总量丰富,是非常规天然气勘探开发的重要领域。20世纪90年代,中国在黔西、准噶尔、鄂尔多斯等地开展深部煤层气勘探试验<sup>[5]</sup>。1993年,中国在准噶尔盆地彩南地区东道海子北断裂附近对彩17、19井进行八道湾组2500 m以深煤层测试,并首次取得了进展。2005年,彩504井2567~2583 m煤层段水力压裂后产生自喷现象,日产量稳定在7300 m<sup>3</sup>左右<sup>[6]</sup>。2010年至今,延川南地区深部煤层气勘探开发不断取得突破,延川南煤层气田是中国第1个规模化投入商业开发的深部煤层气田<sup>[7]</sup>。到2018年,鄂尔多斯盆地东缘保德区块、大宁-吉县区块、韩城区块浅-中深层煤层气实现规模勘探开发突破,勘探深度扩大至1500 m<sup>[8]</sup>。2019年以后,在微构造控藏机制指导下,引导“地质-工程”一体化甜点评价,深部煤层气勘探深度突破2000 m<sup>[9]</sup>。在此期间,延川南区块、河北大城区块、准噶尔盆地五彩湾深层煤层气勘探均取得积极进展。

在深部煤层开采方面,德国与苏联是世界上最早进入深井开采的国家。1960—1990年,德国煤矿勘探的平均深度从650 m增加到900 m以上,最大开采深度达到1500 m,并且建立了模拟试验台解决1600 m的深层开采问题<sup>[10]</sup>。20世纪90年代,仅俄罗斯斯巴顿矿区千米以上深井就达30余座,煤矿最大采深达1200~1400 m,并以每年10~12 m的速度递增。同时,波兰、英国、法国、日本等国的最大采煤深度也都达到千米以上<sup>[11]</sup>。中国深部煤炭开采方面,20世纪90年代,煤炭平均开采深度达600 m,且最大开采深度已达千米以上,其中较具代表性的为开滦赵各庄矿与孙村矿<sup>[12]</sup>。在2004年,基于矿山资源枯竭的现状,中国在原有300~500 m矿山开采深度的基础上,以“就矿找矿”为关键思路进行更深层次的开采<sup>[13]</sup>。到2014年,中国采深千米以上的矿山已有47座,其中孙村煤矿采深1501

m<sup>[14]</sup>。随着煤炭开采装备和技术的飞速发展,勘探深度也随之增加,吉林、江苏、山东、河北等省份许多煤矿的采深目前已超过1200 m,山西部分煤矿也向深部延伸。2020年,中国超千米深的煤矿达50余座<sup>[15]</sup>,开采深度以每年8~25 m的速度增加。预计未来几年内,中国深部矿井数量与产能比例会持续上升。

当前,煤层气与煤炭开采基本都已进入深部开采阶段,向深部要资源将是亟待解决的战略科技问题。

## 1 深部煤层气的发展方向和勘探前景

针对鄂尔多斯盆地,在其东缘大宁-吉县区块、神府区块、临兴区块、三交北区块、石楼区块等深部都具有饱和、超饱和煤储层的潜力<sup>[16]</sup>,这部分煤层气资源的勘探开发将全面推进中国煤层气产业的发展。目前国内外对煤层气的研究主要集中在1500 m以浅<sup>[8]</sup>,未来深部煤层气的开发将是大势所趋,资源开发前景广阔。

深部煤层气的发展方向和勘探前景聚焦在以下4个方面。

### 1.1 深部煤层气富集规律

在深部高温、高压和高地应力的复杂地质条件下,深部煤储层的物性发生显著变化,煤层气的“吸附—解吸—扩散—渗流”过程更为复杂,无法简单套用浅部煤层气的勘探开发理论。

深部煤层气赋存状态不同于经典煤层气吸附理论,煤层吸附能力受地应力正效应与地层温度负效应共同作用,存在“临界转换深度”,当煤层达到吸附饱和并超过此界限时,会形成饱和、超饱和煤层气<sup>[17]</sup>。由于不同地区地温和压力梯度不同,临界埋深会出现差异,异常高温、异常高压也会降低临界埋深<sup>[16]</sup>。同时,深部压力升高,有利于形成“干煤”煤层气。深部良好的煤结构保存有利于渗透率的保存和深部煤层气开发。美国圣胡安盆地<sup>[13]</sup>和中国鄂尔多斯盆地临兴区块<sup>[18]</sup>部分深部钻井出现无需排水降压,可直接产气的“干煤”煤层气藏特征。深部“干煤”煤层气生产潜力巨大,在国内具有

深煤层埋藏条件的盆地具有广阔勘探前景<sup>[19]</sup>。

与浅部煤层相比,深煤层气成藏机制、富集规律与赋存状态有显著差异,深煤层气富集成藏受控于煤岩力学性质、深部地应力场、储层温压等多种因素<sup>[20]</sup>,尚未形成能有效指导生产实践的成熟理论和技术。

针对深部特殊地质条件,研究煤储层高温高压下应力状态、含气性等随深度变化的临界性质,建立适用于深部煤层气的勘探思想,完善深部煤层气地质理论是亟需解决的基础问题<sup>[18]</sup>。要实现深部煤层气规模开发,还需要解决深部煤层气资源潜力评价、深部煤储层改造、深部煤层气开采适应性等关键技术<sup>[19]</sup>。进一步建立“地质-工程”一体化双甜点综合定量评价体系,进一步研究复杂多因素下深部煤层气成藏模式及成藏地质条件,进一步研究深部煤层气富集主控因素<sup>[21]</sup>,评价有利靶区,指导深部煤层气效益开发。

## 1.2 深部多气共采成为趋势

煤系地层在中国分布广泛,煤系地层煤层气、页岩气、致密气(简称“三气”)共生共存于海陆交互的含煤地层中。地层旋回性强,生烃能力大,“生储盖组合”交互出现,气层之间叠置共生的成藏机理使多气共采的开发前景极为可观<sup>[4]</sup>,三气赋存情况如图1所示。深部煤系“多气”共采可大幅提高单井产量,提高储层动用程度,降低单井开采成本<sup>[21]</sup>,是有效开发深部煤层气资源的一个重要方向。

通过分析煤系“三气”随着埋深增加含气性变化规律,发现共探共采的有利埋藏深度在1500~3500 m<sup>[22]</sup>,如Piceance盆地共采先导性试验的煤层

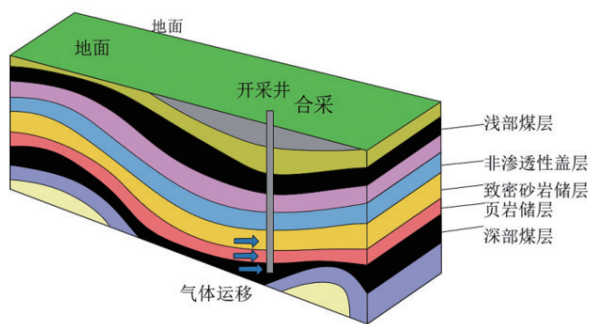


图1 煤系非常规天然气赋存示意

埋深在1560~2560 m,该深度一般已超过地应力状态转换和含气量转折的“临界深度”<sup>[23]</sup>。

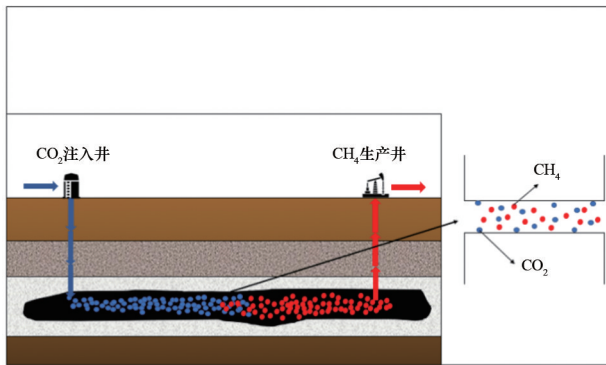
不同于煤层气或致密砂岩气多层共采,“三气”共采除了具有单种非常规天然气技术难点之外,也面临着复合气藏流动机制复杂、多套流体压力系统叠置共存、不同气藏开采技术差异明显等问题。上述难题归根结底都属于共采兼容性问题,是多气开采与深部煤层气开采面临的共性地质难点,解决该问题有利于提高深部煤层气井产量。

沉积层序、合采产层能量状态、产层物性等差异决定了煤系气合采的兼容性,进而决定不同产层能否联产。早期人们通过地质统计、数值模拟等方法探讨这些地质要素与合采兼容性之间的关系,但都存在一定的局限性。若想有效指导合采工程设计及生产管理,应基于相关工程的生产数据与理论开展全过程反演<sup>[24]</sup>。实现深层煤系“多气”共采,需要加强对煤系气叠置成藏机制、赋存状态、储层敏感性和多气藏相互作用及规律的认识,研究深部多气共采过程中的基础地质、勘探方法和开发工艺。

## 1.3 深部二氧化碳埋存与煤层气开采并举

CO<sub>2</sub>是温室气体的主要组成部分,是气候变化以及全球变暖、干旱等相关挑战的驱动因素,为减轻对环境的不利影响,迫切需要对CO<sub>2</sub>进行有效处置。碳捕获与封存(carbon capture and storage, CCS)技术对实现碳减排,缓解气候变化具有重要的战略意义<sup>[25]</sup>。CO<sub>2</sub>封存是CCS链的最后一步,目标地质体包括深部不可采煤层。

研究表明,煤介质的双重孔隙结构与吸附特征使其对CO<sub>2</sub>的吸附亲和性远大于CH<sub>4</sub>,中高煤阶的煤吸附CO<sub>2</sub>的体积约为CH<sub>4</sub>的2倍<sup>[26]</sup>。CO<sub>2</sub>注入煤层时,煤储层内发生CH<sub>4</sub>和CO<sub>2</sub>的竞争吸附,由于煤对CO<sub>2</sub>的吸附性强于CH<sub>4</sub>,原有CH<sub>4</sub>被CO<sub>2</sub>驱替并从生产井中排出,达到提高煤层气采收率的作用<sup>[27]</sup>。由于煤层埋藏深度较大,短期内不对其进行采掘利用,达到埋藏CO<sub>2</sub>以节能减排的目的。注CO<sub>2</sub>提高煤层气采收率(carbon dioxide sequestration in deep coal seams with enhanced coalbed methane recovery, CO<sub>2</sub>-ECBM)的深部煤层封存技术(图2)在深部煤层中的应用可以带来良性的能源循环机制,中国

图2 CO<sub>2</sub>驱替煤层气流程图示意

最早的CO<sub>2</sub>-ECBM先导试验是在沁水盆地的中加合作项目,并取得良好的效果,有较好的经济评价<sup>[28]</sup>。中国深部不可采煤层可处理30~50年的CO<sub>2</sub>排放量,尤其在华北聚气区潜力巨大<sup>[29]</sup>。

目前,CO<sub>2</sub>地质封存还有许多问题需要研究。例如,CO<sub>2</sub>在深煤层赋存和运移等处置机制研究,CO<sub>2</sub>封存机制和全生命周期安全性研究,对CO<sub>2</sub>在煤吸附/解吸最准确模型的研究,CO<sub>2</sub>对煤中矿物质的影响研究,气体吸附-解吸对煤基体积的力学效应研究,SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、CO<sub>2</sub>对碳封存过程的影响研究,评估煤层及盖层结构稳定性、CO<sub>2</sub>封存后潜在的安全风险等都将是未来的研究方向。

#### 1.4 深部煤层气智能排采

传统煤层气排采需要人工手动调参,存在开发周期长、生产成本低且效率低、劳动强度高且危险性大、无法实时反映排采关键数据等问题。现阶段的自动化排采虽控制精度高,易于维护,运营成本低,但排采控制制度及设备参数的设定仍需要手工调参,存在严重的不确定性<sup>[30]</sup>。同时,深部煤层气“吸附-解吸-扩散-渗流”平衡机制复杂,因此需要更高效的排采技术。

智能化排采技术将安防、巡井、电源供应与智能排采相结合,对煤层气井进行管理,使其能够在少人干预甚至无人干预的情况下,采用数字化自动抄录数据、调整生产参数与精度、形成生产报表,实现无人值守的智慧设备管理模式,最终实现降低成本、提高生产链数据流连续性,减员增效的目的<sup>[31]</sup>。排采综合管理系统如图3所示。

目前,中国煤层气智能排采整体处于起步阶

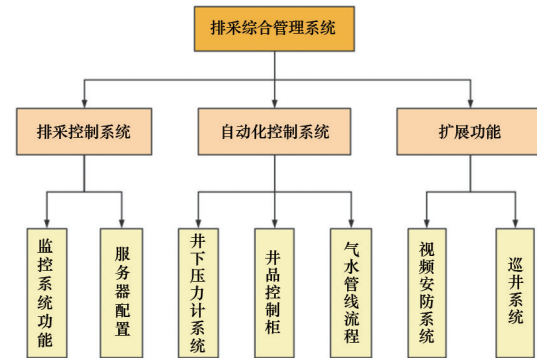


图3 排采综合管理系统示意

段,应将现代信息技术与排采相结合,充分采用云计算、人工智能、大数据等技术对煤层气智能排采关键支撑技术进行突破,未来实现远程调控、无人值守的目标。

## 2 深部煤炭勘探前景及发展方向

经过70多年的煤炭开发,中国浅部煤炭资源大幅度减少,煤矿开采深度逐渐增大。中国深部煤炭资源丰富,埋深超2000 m的煤炭资源占已有煤炭资源总量的70%以上,目前中国很多煤矿开采已进入1000~1500 m深度范围,加强深部煤炭资源开发是保障中国能源安全的必然战略选择,现有的煤炭开采理论、技术及方法难以解决深部开采遇到的技术难题。

深部煤层的发展方向 and 勘探前景聚焦在如下3个方面。

### 2.1 深部煤层流态化开采

为解决2000 m甚至更深部煤炭资源开采问题,谢和平院士结合流态化、智能化、无人化技术体系,提出了煤炭深部原位开采的科学技术构想,即将深部煤炭原位转化为气、液或气液固混合态物质,在井下实现智能无人的采选充、热电气一体化开采与转换,技术体系如图4,从而克服煤炭资源开采深度的限制,改变生产效率低、危险性高、生态破坏严重、运输过程损耗大等诸多问题<sup>[32]</sup>。

目前,流态化开采仍处于基础理论研究阶段,为开展深部煤炭资源流态化开发,谢和平等<sup>[33]</sup>提出在2025年完善基础理论、2035年搞好技术攻关、

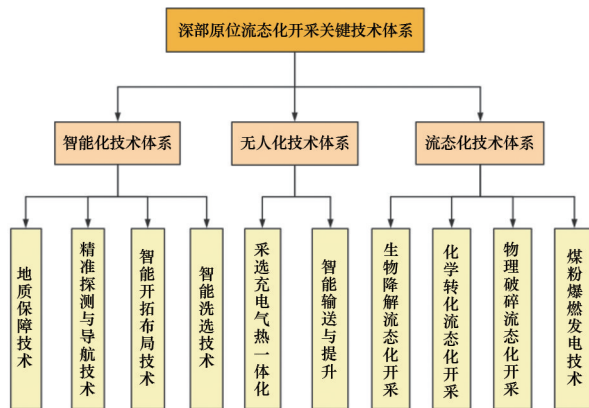


图4 深部煤炭流态化开采关键技术体系示意

2050年完成集成示范的战略路线。随着现有技术的发展,流态化开采将成为一种完整可行的技术体系。

## 2.2 深层煤炭地下气化

煤炭地下气化集建井、煤炭开采、地下气化于一体,属于煤炭原位开采技术,指通过工程、技术和工艺手段对地下埋藏的煤炭进行控制燃烧,产生的气体在地面净化后用于发电或合成化学品<sup>[34]</sup>。由于浅煤层中压力较低,可能导致热损失较大、气体质量低,对地下水造成污染,因此不适合地下气化。煤炭地下气化(underground coal gasification, UCG)技术主要用于深部或急倾斜的不可开采煤层中,该技术有望使全球可用的煤炭储量增加至少3倍<sup>[35]</sup>。

UCG技术变传统的物理采煤为化学采煤,无需开采、加工(运输和储存)煤炭,煤炭中的大部分灰烬留在地下,从而避免对空气造成污染。该技术可合理调节煤炭燃烧速度,大大提高了煤层气的利用效率<sup>[36]</sup>。不同于常规开采后地面燃烧,UCG技术会产生更少的温室气体,并具备地质碳储存的优点。由于不需运输CO<sub>2</sub>,地下气化同时为低成本的CCS技术提供了机会,因此可将UCG技术与CCS技术进行联合应用(图5)。

煤炭地下气化耦合二氧化碳捕捉与封存技术(UCG-CCS技术)除了可将地下气化过程中产生的CO<sub>2</sub>副产品注入相邻的深部煤层中,地下气化空腔、裂缝与钻孔还可以提供额外的CO<sub>2</sub>储存能力。为更准确预测后续CO<sub>2</sub>储存对环境的影响,需要开

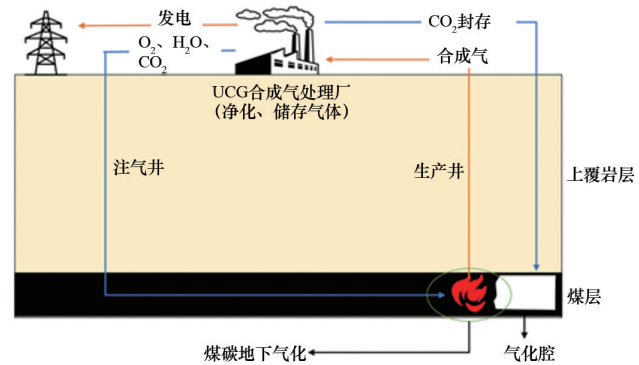


图5 UCG-CCS技术示意

展相关试验、长期监测、开发更高效的集成模型<sup>[37]</sup>。该方法目前仍处于室内研究阶段,但随着UCG技术与CCS技术的日益成熟,将展现出极大的潜力。

## 2.3 深部煤层地热开发

矿井开采深度逐步递增伴随着地温的增加,未来煤炭开采面临高温环境将是常态。深部矿山热量储量丰富,属于煤炭开采中伴生的可再生能源<sup>[38]</sup>。

深部煤层地热开发技术利用热泵系统对煤层液态工质中携带的废热进行开发,以90℃为临界温度,对低温储层和中温储层采取不同热泵进行废热开发,既变“热害”为“热利”,又减少了采矿降温需要的经济成本。除利用伴生地层水在排水阶段携带的高温废热外,还可以转化废井为地热井进行开发,充分利用深层煤层气井资源的同时降低钻井成本<sup>[39]</sup>。

早期深部矿山地热开采主要集中于余热、废热的利用,没有将煤炭与地热资源这两者视为一个系统进行开发研究。张吉雄等<sup>[38]</sup>创新了深部矿山地热资源与煤炭资源协同开发的思路(图6),将矿山地热资源视为与煤炭同等重要,在资源勘探时同步进行勘探规划、开拓系统布置时优化地热开采系统、采后空间维护持续开采地热能,从而达到资源的综合开发利用。

除此之外,激光破岩技术、等离子脉冲激励技术、CO<sub>2</sub>爆破增透技术、注热开采煤层气技术、地下储气库技术、CO<sub>2</sub>输送及地面集输工艺、煤层注气驱替机理、基于物联网的UCG监测系统、微生物增

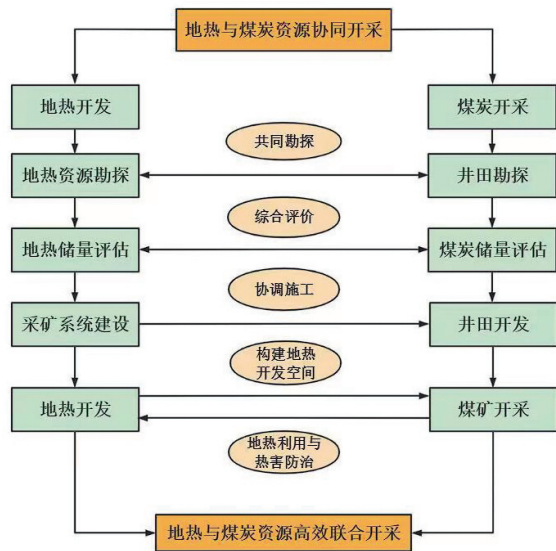


图6 地热与煤炭资源协同开发

强生物煤层气技术等新兴交叉性学科相关的理论与技术的研究也是未来的研究方向。

### 3 结论

1) 中国浅部煤炭资源逐渐枯竭且开采深度逐年递增,向深部要资源将是亟待解决的战略科技问题。针对深部复杂的煤层地质条件,现有开采理论、技术与方法无法有效解决深部煤及煤层气开采技术难题,需破解传统开采理念,应用创新的理论、方法和技术。

2) 深部煤层气开采理论与技术目前仍面临巨大挑战。针对复杂地质条件,理论上应强化深煤层气“地质-工程”一体化评价模式、成藏机制及富集规律等方面问题研究;技术上开展深部煤层气多气共采、智能排采、注气增产前沿工艺技术攻关,为中国深部煤层气产业发展提供理论依据与技术支撑。

3) 深部煤炭开采受生产效率低、危险性高、生态破坏严重、运输过程损耗大等诸多问题牵制,开采问题始终难以有效解决。而流态化开采、UCC-CCS技术、矿热共采等技术的研究将有效解决深部煤炭开采难题,有助于中国煤炭资源的全面开发。

### 参考文献 (References)

- [1] Pathegama G R, Zhao J, Ju M H, et al. Opportunities and challenges in deep mining: A brief review[J]. Engineering, 2017, 3(4): 250-261.
- [2] 张用德, 唐书恒, 张淑霞. 国外煤层气开发对我国的启示[J]. 中国矿业, 2013, 22(增刊1): 4-6, 16.
- [3] Johnson R C, Flores R M. Developmental geology of coal-bed 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 孙平, 刘洪林, 巢海燕, 等. 低煤阶煤层气勘探思路[J]. 天然气工业, 2008(3): 19-22, 135.
- [7] 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, 141.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803-2813.
- [11] 胡社荣, 彭纪超, 黄灿, 等. 千米以上深矿井开采研究现状与进展[J]. 中国矿业, 2011, 20(7): 105-110.
- [12] 俞东风, 刘听成. 煤矿开采深度现状及发展趋势[J]. 煤, 1997(6): 37-40.
- [13] 曹晓明, 周贤旭, 钟浩. “就矿找矿”的认识与实践[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2011, 34(1): 51-56.
- [14] 谢和平. “深部岩体力学与开采理论”研究构想与预期成果展望[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(2): 1-16.
- [15] 黄炳香, 张农, 靖洪文, 等. 深井采动巷道围岩流变和结构失稳大变形理论[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 911-926.
- [16] 叶建平, 侯淞译, 张守仁. “十三五”期间我国煤层气勘探开发进展及下一步勘探方向[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(3): 15-22.

- [17] 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.
- [18] 孙斌, 杨敏芳, 杨青, 等. 准噶尔盆地深部煤层气赋存状态分析[J]. 煤炭学报, 2017, 42(增刊1): 195-202.
- [19] 皇甫玉慧, 康永尚, 张兵, 等. 鄂尔多斯盆地临兴区块深部“干煤”和“湿煤”煤层气共存机理探讨[C]//中国煤层气勘探开发与产业化发展战略-2019年煤层气学术研讨会论文集. 北京: 中国地质出版社, 2019: 217-229.
- [20] 周梓欣, 李瑞明, 张伟. 新疆深部煤层气资源勘探潜力[J]. 中国煤炭地质, 2018, 30(7): 28-31, 39.
- [21] 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, 262.
- [22] 梁冰, 石迎爽, 孙维吉, 等. 中国煤系“三气”成藏特征及共采可能性[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 167-173.
- [23] 宋儒, 苏育飞, 陈小栋. 山西省深部煤系“三气”资源勘探开发进展及研究[J]. 中国煤炭地质, 2019, 31(1): 53-58.
- [24] 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.
- [25] Dycl A, Gc B, Mv B. An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 39: 426-443.
- [26] Sakurovs R, Day S, Weir S. Relationships between the sorption behaviour of methane, carbon dioxide, nitrogen and ethane on coals[J]. Fuel, 2012, 97: 725-729.
- [27] 周来, 冯启言, 李向东, 等. 深部煤层对CO<sub>2</sub>地质处置机制及应用前景[J]. 地球与环境, 2007, 35(1): 9-14.
- [28] Wong S, Macdonald D, Andrei S, et al. Conceptual economics of full scale enhanced coalbed methane production and CO<sub>2</sub> storage in anthracitic coals at South Qinshui basin, Shanxi, China[J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 82(3/4): 280-286.
- [29] 吴建光, 叶建平, 唐书恒. 注入CO<sub>2</sub>提高煤层气产能的可行性研究[J]. 高校地质学报, 2004, 10(3): 463-467.
- [30] 刘斌, 杜海为, 崔金榜, 等. 煤层气井排采控制技术发展现状与展望[J]. 石油钻采工艺, 2019, 41(4): 489-493.
- [31] 赵旭生, 马国龙. 煤矿瓦斯智能抽采关键技术研究进展及展望[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(5): 27-34.
- [32] 谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深地煤炭资源流态化开采理论与技术构想[J]. 煤炭学报, 2017, 42(3): 547-556.
- [33] 谢和平, 鞠杨, 高明忠, 等. 煤炭深部原位流态化开采的理论与技术体系[J]. 煤炭学报, 2018, 43(5): 1210-1219.
- [34] 滕吉文, 王玉辰, 司芴, 等. 煤炭、煤层气多元转型是中国化石能源勘探开发与供需之本[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(22): 9169-9193.
- [35] Bhutto A W, Bazmi A A, Zahedi G. Underground coal gasification: From fundamentals to applications[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2013, 39(1): 189-214.
- [36] 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.
- [37] Yang D M, Koukourzas N, Green M, et al. Recent development on underground coal gasification and subsequent CO<sub>2</sub> storage[J]. Journal of the Energy Institute, 2016, 89(4): 469-484.
- [38] 张吉雄, 汪集暘, 周楠, 等. 深部矿山地热与煤炭资源协同开发技术体系研究[J]. 工程科学学报, 2022, 44(10): 1682-1693.
- [39] 张彦廷, 张皓, 王林, 等. 深部煤层伴生废热新模式开发及适用性分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(14): 5957-5962.

## Prospect and development direction of deep coal and coalbed methane exploration

JIANG Shuhong<sup>1,2</sup>, SHI Suzhen<sup>3\*</sup>, ZHAO Kang<sup>4</sup>, LIU Yancheng<sup>5</sup>, YAO Xuejun<sup>4</sup>, SHI Jingxue<sup>4</sup>, XIE Dongshan<sup>4</sup>

1. College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China
2. CNOOC Research Institute Company Limited, Beijing 100028, China
3. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China
4. School of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China
5. China United Coalbed Methane Corporation., Ltd., Beijing 100016, China

**Abstract** To clarify the status of deep exploration technology, find solutions to related problems, and explore the future direction of development, this paper reviews at first the deep coal and coalbed methane exploration status at home and abroad and points out that deep mining has become an inevitable trend. Secondly, from the perspective of deep coal-bed methane, the paper argues that the deep special geological conditions will affect the accumulation mechanism and occurrence state of deep coalbed methane, it is thus necessary to establish an exploration idea suitable for deep coal-bed methane and improve the theoretical basis of deep coalbed methane geology. Then frontier technologies and re-related technical problems such as deep multi-gas co-mining, carbon dioxide gas displacement of coalbed methane and synchronous storage, deep coalbed methane intelligent drainage are elaborated. Finally, from the perspective of deep coal exploration and development, the current advanced technologies such as deep coal fluidized mining, coal under-ground gasification coupled carbon dioxide capture and storage, deep coal and geothermal resources collaborative mining are discussed. As deep mining is developing towards automation and AI, continuous progress of basic geo-logical theory and exploration and development technology will make deep coal and coalbed methane become the main battlefield of future exploration and development.

**Keywords** deep coal seam; enrichment regularity; intelligent drainage; carbon dioxide storage; under-ground coal gasification



(责任编辑 刘志远)