



## 煤与天然气协同开采理论与技术构想

杨胜利 张燊 王旭东 张凯 辛德林 翟瑞昊

### 引用本文:

杨胜利, 张燊, 王旭东, 等. 煤与天然气协同开采理论与技术构想[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 50–68.

YANG Shengli, ZHANG Shen, WANG Xudong. Theoretical and technological concepts of synergistic coal and natural gas extraction[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 50–68.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1720>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 综采装备单机智能化向智能协同模式转型的探索研究

Exploration and research on transformation from intelligent single machine equipment to intelligent synergy in coal mine  
煤炭科学技术. 2021, 49(4): 169–175 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.04.020>

#### 天然气储层裂隙中气液两相流的流态转变条件数学模型

Mathematical model for flow regime transition conditions of gas–liquid two–phase flow in natural gas reservoir fracture  
煤炭科学技术. 2024, 52(6): 155–164 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1054>

#### 深地煤炭资源安全高效智能化开采关键技术与实践

Key technologies and practices for safe, efficient, and intelligent mining of deep coal resources  
煤炭科学技术. 2024, 52(1): 52–64 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1794>

#### 煤矿智能化开采新进展

New development of intelligent mining in coal mines  
煤炭科学技术. 2021, 49(1): 1–10 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.01.001>

#### 煤系碳酸盐岩天然气勘探前景初探——以华北太原组为例

Preliminary study on exploration prospect of carbonate gas in coal measures: a case study of Taiyuan Formation in North China  
煤炭科学技术. 2021, 49(12): 138–149 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e32c8895-1dae-483a-9619-93404efd170e>

#### 深部煤炭资源智能化开采技术现状与发展方向

Current situation and development direction of intelligent mining technology for deep coal resources  
煤炭科学技术. 2021, 49(1): 139–145 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.01.008>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

杨胜利, 张 桑, 王旭东, 等. 煤与天然气协同开采理论与技术构想[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 50–68.

YANG Shengli, ZHANG Shen, WANG Xudong, *et al.* Theoretical and technological concepts of synergistic coal and natural gas extraction[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 50–68.

## 煤与天然气协同开采理论与技术构想

杨胜利<sup>1,2,3</sup>, 张 桑<sup>1,2</sup>, 王旭东<sup>4</sup>, 张 凯<sup>5</sup>, 辛德林<sup>6</sup>, 翟瑞昊<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院, 北京 100083; 2. 厚煤层绿色智能开采教育部工程研究中心, 北京 100083; 3. 中国矿业大学(北京) 内蒙古研究院, 内蒙古 鄂尔多斯 017004; 4. 神华新街能源有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017200; 5. 煤炭开采水资源保护与利用全国重点实验室, 北京 102209; 6. 中煤科工集团武汉设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430061)

**摘要:**我国存在大量的煤炭与天然气重叠赋存资源, 出于对资源开采效率的要求, 大量的煤与天然气重叠资源需要在同一时空内同步开采, 传统的煤与天然气开采理论与技术难以满足协同开采出现的技术难题, 煤与天然气协同开采的进程受到了严重制约。基于此, 结合国内煤与天然气重叠赋存情况对煤与天然气协同开采进行了科学定义, 总结了已有可借鉴的煤与天然气开采技术和相关理论。建立了天然气井近场岩体力学理论、天然气近场围岩耦合损伤理论、“围岩-水泥环-套管”耦合损伤理论、煤与天然气协同开采垂直场围岩耦合损伤理论, 揭示了煤与天然气协同开采围岩的耦合损伤机理, 为煤与天然气技术体系的构建提供了理论基础。提出了“煤与天然气协同开采技术”“煤炭开采通过废弃井技术”和“天然气近场小煤柱留设技术”3项技术以及“协同开采分区规划系统”“透明地质与生产信息动态监测系统”和“煤与天然气协同区安全监测与评价系统”三大系统, 为煤与天然气协同开采提供技术支持, 提高煤炭与天然气资源的开采效率。在此基础上, 构建了煤与天然气协同开采的理论与技术体系, 明确了煤与天然气协同开采未来的研究重点, 提出了我国煤与天然气资源安全、绿色、高效协同开采的技术路径与研究方向。

**关键词:**煤与天然气; 重叠资源; 协同开采; 无人智能化; 耦合损伤

中图分类号: TD821; TE375 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2024)04-0050-19

### Theoretical and technological concepts of synergistic coal and natural gas extraction

YANG Shengli<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Shen<sup>1,2</sup>, WANG Xudong<sup>4</sup>, ZHANG Kai<sup>5</sup>, XIN Delin<sup>6</sup>, ZHAI Ruihao<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Mining, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. Coal Industry Engineering Research Center for Top Coal Mining, Beijing 100083, China; 3. Inner Mongolia Research Institute, China University of Mining and Technology-Beijing, Ordos 017004, China; 4. Shenhua Group Xinjie Energy Co., Ltd., Ordos 017200, China; 5. State Key Laboratory of Water Resource Protection and Utilization in Coal Mining, Beijing 102209; 6. Wuhan Design & Research Institute Co., Ltd., China Coal Technology & Engineering Group, Wuhan 430061, China)

**Abstract:** There are a large number of overlapping coal and natural gas resources in China, and due to the requirement of resource extraction efficiency, a large number of overlapping coal and natural gas resources need to be extracted synchronously in the same time and space, and the traditional coal and natural gas extraction theories and technologies are difficult to meet the technical problems arising from coordinated extraction, and the process of coordinated extraction of coal and natural gas has been seriously constrained. Based on this, a scientific definition of coal and natural gas synergistic mining is made based on the overlapping coal and natural gas resources in China, and the existing coal and natural gas mining technologies and related theories are summarised. We have established the near-field rock mechanics theory of natural gas wells, the coupled damage theory of natural gas near-field surrounding rock, the coupled damage theory of “surrounding rock-cement ring-casing”, and the coupled damage theory of vertical surrounding rock of coal and natural gas synergistic mining, which reveal the coupled damage mechanism of surrounding rock of coal and natural gas synergistic mining, and provide a theoretical basis for the construction of the technology system of coal and natural gas. It provides a theoretical basis for the construction of coal

收稿日期: 2023-11-01 责任编辑: 朱恩光 DOI: 10.12438/cst.2023-1720

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51934008, 51904304); 中央高校基本科研业务费资助项目(2023YQTD02)

作者简介: 杨胜利(1983—), 男, 内蒙古宁城人, 教授, 博士生导师。E-mail: yslcumtb@163.com

通讯作者: 张 桑(1998—)男, 河北石家庄人, 博士研究生。E-mail: zshencumtb@163.com

and natural gas technology system. The three technologies of “Coal and Natural Gas Cooperative Mining Technology”, “Coal Mining through Abandoned Wells Technology” and “Natural Gas Near-Field Small Coal Pillar Retention Technology” are proposed, as well as the “Coal and Natural Gas Cooperative Mining Zoning Planning Technology”. Three major systems, namely, “Coal and Natural Gas Cooperative Mining Zoning Planning System”, “Transparent Geological and Production Information Dynamic Monitoring System” and “Coal and Natural Gas Cooperative Zone Safety Monitoring and Evaluation System”, provide technical support for coal and natural gas cooperative mining, and improve the safety of coal and natural gas production. This system provides technical support for the synergistic mining of coal and natural gas and improves the mining efficiency of coal and natural gas resources. On this basis, the theoretical and technological system of coal and natural gas synergistic mining is constructed, the future research focus of coal and natural gas synergistic mining is clarified, and the technological path and research direction for the safe, green and high-efficiency synergistic mining of coal and natural gas resources in China are proposed.

**Key words:** coal and natural gas; overlapping resources; collaborative mining; unmanned intelligence; coupling damage

## 0 引言

我国资源和能源赋存条件较为复杂,存在煤炭与多种资源或能源共生<sup>[1-2]</sup>且在空间上相互重叠的区域<sup>[3]</sup>。早在《“十三五”国家科技创新规划》中就提出了重点开展煤炭安全绿色开采和煤系伴生资源协同开发理论与技术攻关目标<sup>[4]</sup>。煤炭资源或其他能源资源的优先单一开发模式势必会造成重叠资源的浪费,如何实现共赋资源空间上合理、时间上有序开采就显得尤为重要。

煤与天然气资源在空间上存在重叠的情况,天然气赋存区域深度为 2 000 ~ 3 000 m<sup>[5]</sup>,煤炭目前开采最深为 1 000 m 左右<sup>[6-7]</sup>,涉及的煤—气资源重叠区面积非常大<sup>[8-9]</sup>。在传统开采过程中,两者通常采用相互割离、互不影响的开采方式,造成人力、物力和时间上的额外投入,在开采成本提高的同时,开采效率降低;不同资源开采过程中的相互影响会产生安全隐患,造成人员伤亡以及安全事故等问题。在矿权重叠情况下,煤炭开采所导致的覆岩移动及围岩变形会影响天然气管线的铺设位置与铺设密度,而天然气钻井施工也会使得煤层及围岩应力产生变化,因此在开采过程中两者应被视为一个整体<sup>[10-12]</sup>,进行综合研究。

面对当前严峻的重叠区煤与天然气开采形势,亟需提出一种煤与天然气协同开采的技术体系,实现煤炭与天然气资源安全、高效、科学、合理的统筹开发。将煤炭及共生资源作为宝贵的资源加以保护、开采与利用,在保护环境的同时变废为宝,实现煤炭资源绿色开采<sup>[13]</sup>。

## 1 煤与天然气赋存和开采现状

### 1.1 煤与天然气赋存现状

我国西北部地区存在许多煤油气共生盆地,分布有大型优质煤田以及大型气田,矿区内煤炭与

天然气资源空间上重叠,以新街台格庙矿区为例<sup>[14]</sup>,新街台格庙矿区煤炭矿权与天然气矿权重叠,矿区中部、北部 68% 的面积与中国石油的苏里格气田(东区)天然气矿权重叠,重叠区面积 547.59 km<sup>2</sup>,南部约有 32% 的面积与中国石化的大牛地气田重叠,资源重叠引起的矿权问题较为突出。

煤层与天然气压覆区域特征为水平上相互重叠,垂直上相距较远,煤炭开采引起的覆岩移动以及围岩损伤变形影响天然气井的铺设位置,而天然气井、场站、管线等天然气配套设施同样也会引发矿区建设压覆煤炭资源以及开采过程中天然气泄漏等问题。我国近年煤炭与天然气消费总量及占比如图 1 所示<sup>[15]</sup>,天然气产量及消费量逐年上升,天然气产量仅为消费总量的 50% 左右,煤炭产量和消费量仍维持在一个较高水平,煤炭与天然气产量的提升迫在眉睫,然而实行互不影响的开采准则,大量的煤炭与天然气资源赋存重叠,势必会造成资源的开发速度减缓与资源浪费等问题。因此需进行煤与天然气协同开采系统理论以及有效开采技术的研究,保证煤与天然气双方的高效、安全开采。

### 1.2 存在的挑战与难题

随着我国经济的高速发展,对煤炭的需求量不断上升,煤炭开采过程中主要面临的问题如下<sup>[16-20]</sup>:随着浅部煤炭资源已近枯竭,煤炭开采向更深部进发,冲击地压的破坏范围与破坏程度逐渐增大,巷道大变形以及围岩冲击破坏等岩体灾害已成为煤矿开采不可忽视的安全问题;冲击地压可能会诱发瓦斯大量涌出现象,从而发生煤与瓦斯突出与瓦斯爆炸等灾害;煤炭开采导致地表沉降出现地裂缝的现象,对地面设施以及房屋建筑的安全造成威胁。天然气开采过程中常见的难题主要为以下几个方面<sup>[21-24]</sup>:地层压力异常,即压力在横向与纵向上地层压力相差大;井眼处围岩不稳定导致天然气井井壁失稳;地层产状以及各向异性导致井斜无法有效控制,使得

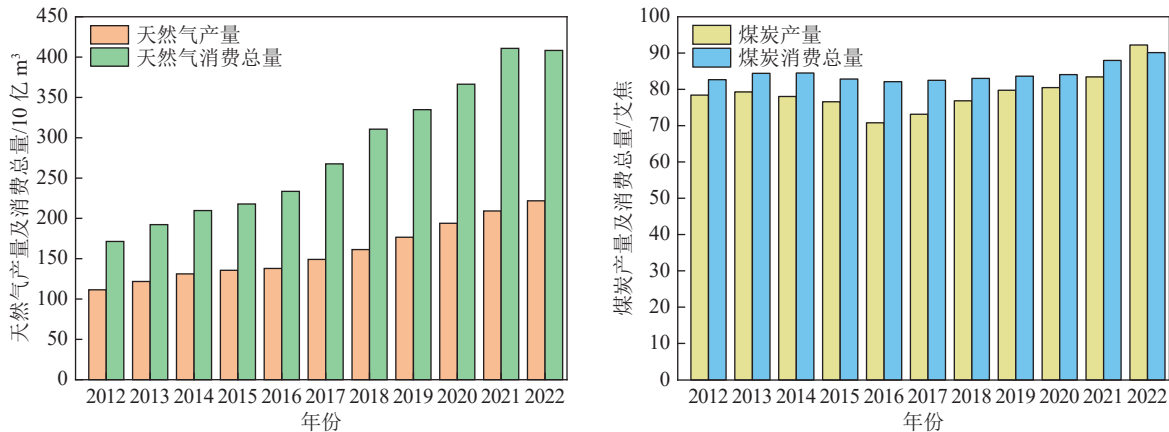


图1 近年煤炭与天然气消费总量及占比

Fig.1 Total consumption and proportion of coal and natural gas in recent years

井身轨迹偏移; 钻井过程中钻井液污染, 导致钻井液性能改变, 既降低了钻进效率与钻井液处理成本, 又带来了严重的安全问题; 固井过程中, 套管与围岩中的水泥环使三者成为组合体, 水泥环浇筑质量决定了套管使用年限, 水泥环缺失、偏心等问题会造成套管变形破坏, 影响正常生产; 套管于腐蚀性环境如H<sub>2</sub>S介质气体中工作时, 套管被腐蚀从而断裂, 造成经济上的损失同时, 天然气泄漏也会造成严重的安全问题。

天然气开采时天然气井筒会穿越煤层, 煤层采动导致的覆岩运移与地表沉陷会使天然气井筒与地面管线失稳导致破坏。郝一松<sup>[25]</sup>对在煤气重叠区煤炭开采时遇油气废弃井时提出留设保护煤柱保护油气井; 王文等<sup>[26-27]</sup>对煤气重叠区煤炭开采天然气井避让距离与地面管线变形演化进行理论计算与相似模拟试验。考虑工作面接续与保护煤柱留设位置与留设宽度对天然气井筒的稳定性影响, 在开采时间与空间上综合考虑煤炭与常规天然气开采工作年限及开采时相互影响情况, 合理规划煤与常规天然气协同开采。

煤与天然气开采面临的挑战与难题如图2所示, 在煤与天然气协同开采过程中需要考虑2种资源的赋存特性以及开采方案、开采装备和开采技术的区别。煤炭开采对地面以及工作面近场围岩扰动影响较大, 由于天然气为易燃易爆气体, 当地面管线破坏将会对环境造成重大污染<sup>[28]</sup>, 而天然气井筒在煤矿开采工作面内受到挤压变形导致损坏, 将会对煤矿开采带来极大的安全隐患。基于天然气井管线采动影响临界变形极限, 掌握天然气钻井施工与煤层采动对天然气井近场围岩的耦合损伤机制以及损伤范围是保证协同开采的重难点。为了保证天然气井及地面管线设施正常工作, 通常会在天然气井身及管线附近留设天然气走廊即保护煤柱, 但由于天然气井至集气站的管线呈复杂网状, 煤柱留设范围应当在保证安全生产的前提下, 最大限度减少煤炭资源压覆量, 且油气井的服务年限相较于煤矿开采时间较短, 因此, 当油气井开采结束后, 应尽可能的将保护煤柱的煤炭资源进行回收, 在留设煤柱时应统筹考虑, 不仅保证煤柱尽量整体回收, 也应考虑煤柱回收后形成孤岛工作面从而引发的矿压防治艰难的情

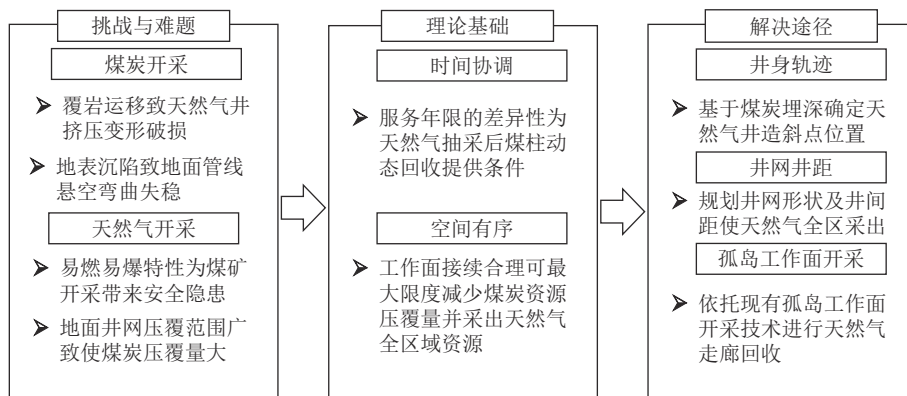


图2 煤与天然气开采面临的挑战及解决途径

Fig.2 Challenges and solution of coal and natural gas extraction

况,进行合理、安全的天然气井设施与煤柱留设位置及范围的布局。

## 2 煤与天然气协同开采定义与构想

### 2.1 煤与天然气协同开采定义

煤、气协同开采是指将煤炭与天然气矿权重叠区域进行整体开采规划,在资源重叠区域构建时空上合理、协调、有序的开采技术体系,煤与天然气协同开采示意如图3所示。

在时间、空间等方面综合考虑,充分利用井、巷及钻井工程<sup>[29-30]</sup>理论,选择合理的开发方式,减小采气与采煤的相互影响,充分发挥同采互利作用,实现对煤炭与天然气资源最大限度的开发,促进煤、气资源开采安全、高效发展,取得综合效益,开展资源重叠区煤与天然气协同开采理论研究与技术评价,构建煤与天然气资源协同开采的安全技术评价体系,减小天然气井及相关设施布置对矿区煤炭开发的影响,为矿区煤炭资源安全、高效开发提供理论与技术支撑。煤与天然气协同开采技术突破了传统煤气重叠资源互不干扰、相互避让的开采方式,使得开采周期大幅缩短,从根本上颠覆重叠资源的开采模式。

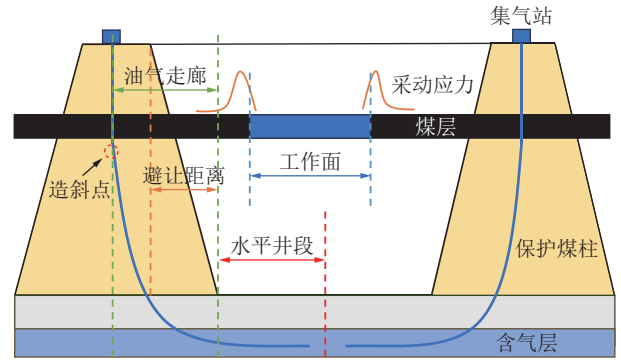


图3 煤与天然气协同开采示意

Fig.3 Schematic diagram of coal and natural gas co-mining

实现煤、气资源的协同开采,关键在于探索煤层采动对天然气井近远场围岩稳定性的影响、天然气管线空间位置、“围岩-水泥环-套管”井身组合体<sup>[31]</sup>临界变形特征等问题。

### 2.2 煤与天然气协同开采构想

煤与天然气协同开采技术路径如图4所示,包括以下主要技术流程:①煤、气一体化勘探。将煤炭与天然气作为一体进行地质勘探,得出水平上重叠区域范围、垂直上空间距离。②协同区域智能规划布局。建立煤、气协同开采动态储量数据库,形成资

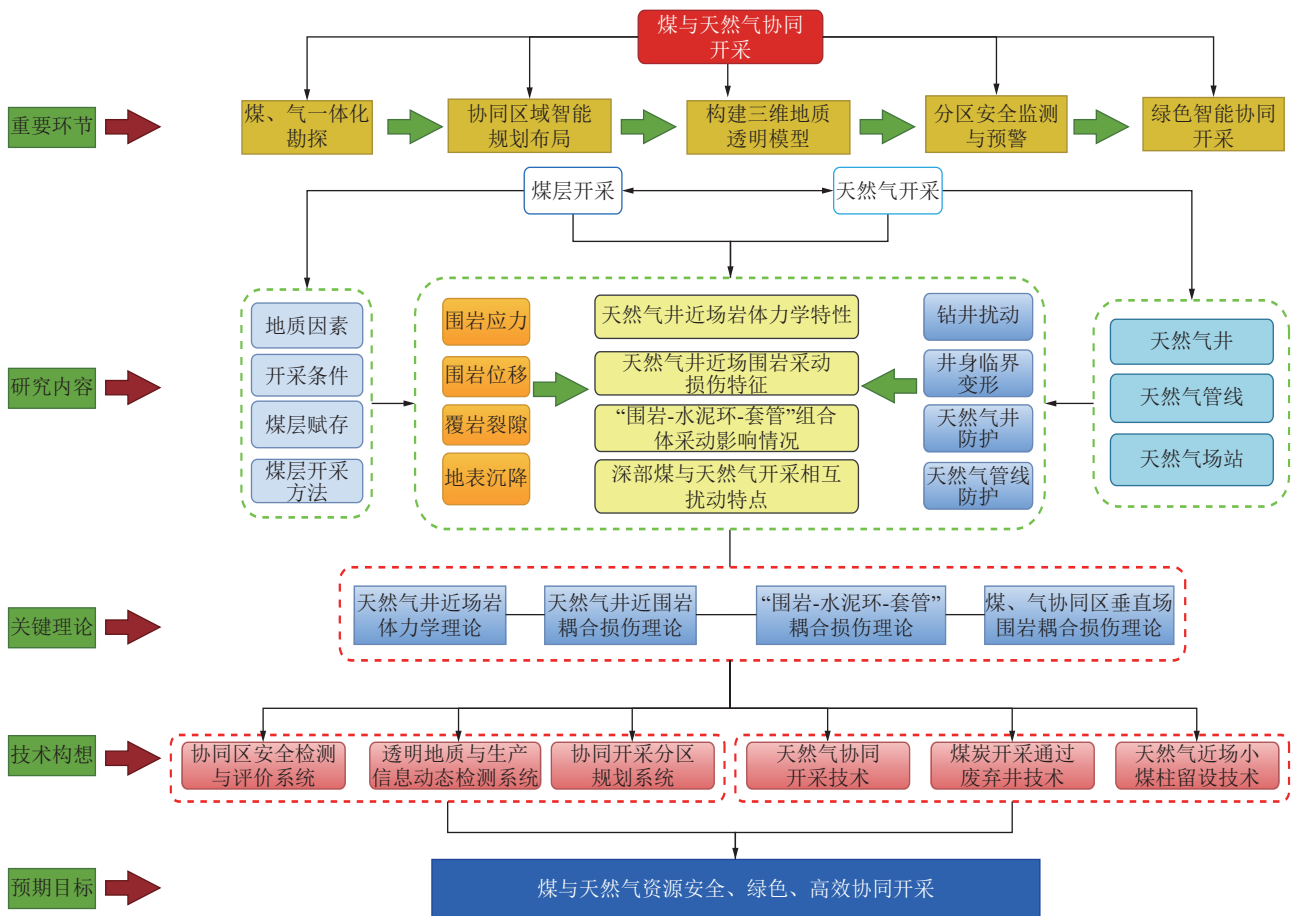


图4 煤与天然气协同开采技术路径

Fig.4 Technical path of coal and natural gas co-mining

源重叠区域煤、气动态生产信息监测与共享。③构建三维地质透明模型。基于煤炭储量动态数据资料,准确获得三维地质模型,为井网部署提供合理指导。④安全性评价系统。针对煤、气多因素影响分配合理权重,构建煤、气协同开采安全评价指标体系。⑤分区安全监测与预警系统。判别不同区域的监测等级,建立不同监测密度点位并明确重点监测区域,建立煤、气协同开采监测与安全预警系统。⑥绿色智能协同开采。构建地面设施一体化,智能决策优化地面管线布置、井型选择、井身位置,对废弃井进行优化改造为救援、物资通道实现废弃井再利用。

煤与天然气协同开采主要包括煤层开采与天然气开采及其相互影响,从煤层开采方面,不同的矿区地质因素、煤层赋存条件、开采条件及开采方法会对围岩应力与位移变化、覆岩裂隙及地表沉降产生不同的影响;从天然气开采方面,天然气主要设施包括天然气井、天然气管线及地面场站等,随着天然气钻井及抽采,钻井对围岩的扰动、井身的临界变形、天然气井及天然气管线的防护措施等是重要的研究内容。在煤与天然气协同开采时,两方面的影响会出现耦合现象,主要体现为天然气井近场岩体力学特性、天然气井近场围岩采动损伤特征、“围岩-水泥环-套管”组合体采动影响情况和深部煤与天然气开采相互扰动特点等方面。要解决这些重点问题,需要建立耦合影响下的煤与天然气协同开采理论,主要包括天然气井近场岩体力学理论、天然气井近场围岩耦合损伤理论、“围岩-水泥环-套管”耦合损伤理论和煤、气协同区垂直场围岩耦合损伤理论等,为煤与天然气协同开采重点问题提供理论支撑。在现象与理论研究的基础上,提出相应的技术构想,其中煤与天然气协同开采系统主要包括协同区安全监测与评价系统、透明地质与生产信息动态监测系统和协同开采分区规划系统;煤与天然气协同开采技术主要包括天然气井身井网优化技术、煤炭开采通过废弃井技术和天然气近场煤柱留设技术等,逐步落实解决实际问题,以实现煤与天然气资源安全、绿色、高效协同开采的目标。

### 3 煤与天然气协同开采理论体系

现有的矿山压力与超前支承压力研究较为成熟<sup>[32-34]</sup>,可以实现一定程度煤层围岩损伤的控制研究,但天然气井在水平方向上位于煤层的较远端,且随着煤层采动表现为“围岩-水泥环-套管”组合体的整体力学变化,在天然气井钻井、天然气运输、天然

气井维护以及煤层开采时均会对该整体产生扰动,在损伤上具有耦合性,针对天然气井近场岩体力学、近场围岩耦合损伤理论、“围岩-水泥环-套管”耦合损伤理论与煤气协同区垂直场围岩耦合损伤理论研究,对煤炭与天然气资源协同开采理论体系的发展具有重要意义。

#### 3.1 天然气井近场岩体力学理论

煤炭与天然气资源开采过程中,开采扰动作用下的岩石受力遵循开采活动的空间应力变化路径,基于开采扰动的岩体力学理论是深地资源开采的重要理论基础<sup>[35-36]</sup>。当煤与天然气协同开采时,开采空间与开采扰动情况不再与常规的煤、气单独开采相同,随着煤炭资源的采出天然气井近场围岩会受到煤炭回采或巷道掘进的影响,天然气井近场围岩所受的扰动频率和扰动方式与天然气单独开采时有本质差异。天然气井近场岩体所受的扰动是多重的,初开井钻井时近场岩体便受到钻井影响,而钻井完毕进行天然气抽采时近场岩体会再次受到天然气开采的持续扰动,煤炭开采活动同样会对天然气井近场的岩体产生影响。天然气井近场岩体所受的扰动又是多变的,煤炭开采活动对天然气井近场岩体扰动的时间点不固定,可能会发生在初开井阶段,也可能发生在天然气开采或天然气井报废阶段,与常规的煤炭和天然气单独开采时有很大的差异,这都会影响天然气井近场岩体的损伤、变形和破坏规律,现有仅基于煤炭开采的岩体力学理论将不再适用,因此亟需构建天然气井近场岩体力学理论,理论构想如图5所示。

发展天然气井近场岩体力学理论的核心是研究受到不同扰动频率、扰动方式和不同深度的天然气井近场岩体的力学变化特征与规律,在此方面,原位保真取芯的理论与技术显得尤为关键。谢和平院士团队<sup>[37]</sup>在深部岩体的原位保真取芯与测试理论及技术方面进行了研究,这些研究成果可为天然气井近场岩体保真取芯提供借鉴,在煤炭与天然气协同开采过程中,为了全面理解和应对天然气井近场岩体受力特性,需要着重发展适用于该场景的岩体力学理论;同时,积极借鉴先进的原位保真取芯技术,对近场岩体进行准确的力学测试,为深部煤炭开采与天然气开采的协同发展提供有力的科学依据和技术支持。

#### 3.2 天然气井近场围岩耦合损伤理论

煤与天然气协同开采过程中,天然气井近场围岩受到多重扰动影响,除了天然气井本身在钻井和天然气抽采阶段所造成的扰动,还会受到煤炭开采

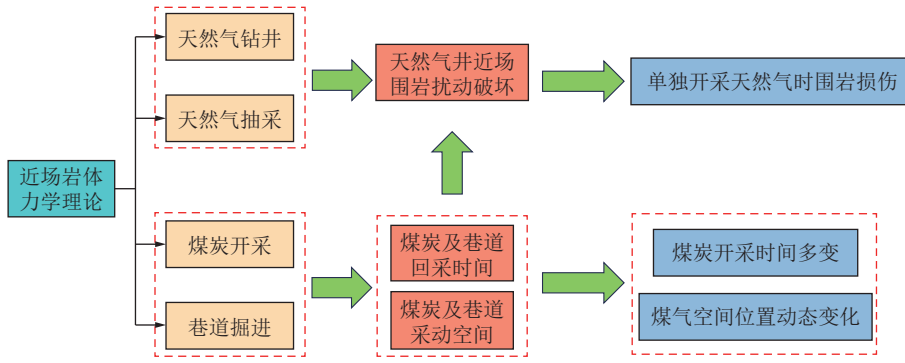


图5 近场岩体力学理论构想

Fig.5 Theoretical conception of near-field rock mass mechanics

的影响。一般情况下，天然气井固定于某一位置不发生变化，而煤炭的巷道掘进和工作面回采是动态变化的，此外还可能存在一个工作面回采过程中遭遇多个天然气井的情况，目前的采场矿压理论仅适用于煤炭井工开采，对同一时空内天然气井存在下的矿压显现规律以及天然气井近场围岩的破坏机理尚未研究。此外，煤与天然气协同开采过程中存在的实际工程问题，例如天然气井保护煤柱留设尺寸、天然气井身加固部位及参数设计<sup>[38]</sup>、安全监测系统的区域划分等亟需相关理论指导，因此构建天然气井近场围岩耦合损伤理论至关重要。

工作面与天然气井距离缩进时应力重叠情况如图6所示，天然气井近场围岩耦合损伤理论应包含：针对单一处于回采工作面周围的天然气井，在受到回采扰动影响和天然气抽采扰动的叠加扰动影响时，上覆岩层移动前后全过程天然气井近场围岩的应力场、位移场和裂隙场演变规律和分布特征；针对处于回采工作面周围的多个天然气井，天然气井互相扰动产生叠加扰动的临界距离以及重叠场内的应力场、位移场和裂隙场演变规律和分布特征；在受到回采扰动影响和多个天然气井抽采扰动的叠加影响时的“三场”演化规律及分布特征。

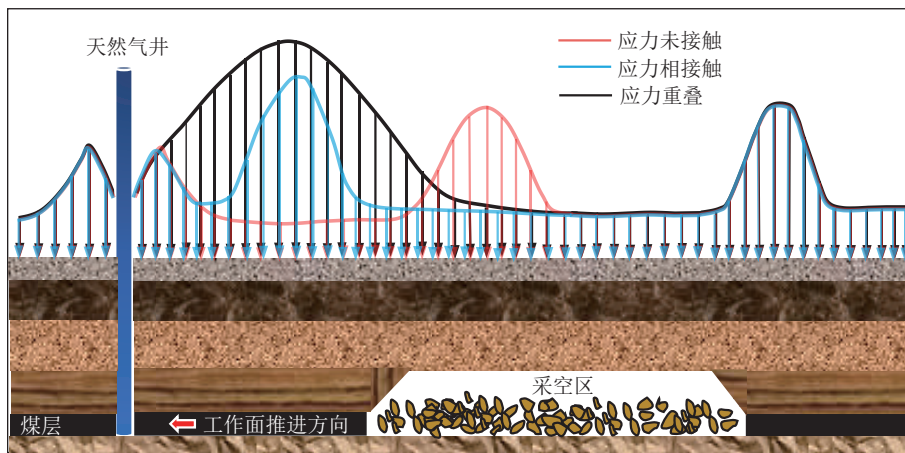


图6 工作面与天然气井距离缩进时应力重叠情况

Fig.6 Stress overlap when distance between working face and natural gas well is indented

### 3.3 “围岩-水泥环-套管”耦合损伤理论

研究发现<sup>[39-43]</sup>天然气井近场围岩力学变化主要与“围岩-水泥环-套管”形成的组合体<sup>[44]</sup>有关，组合体的损伤变化情况是天然气井损伤理论的重要内容。天然气资源开采过程中水泥环起到密封环空、延缓围岩挤压的作用，其状态是影响套管变形程度的重要因素<sup>[45]</sup>。影响水泥环状态的因素主要包括水泥环的物理性能和几何缺陷，其弹性模量和泊松比会随

着水泥环发生腐蚀、污染等状况而发生变化，水泥环缺失角度、缺失厚度是常见的几何缺陷现象，煤与天然气协同开采“围岩-水泥环-套管”组合体耦合损伤模型如图7所示。

套管是进行天然气运输的重要通道，套管内压力的变化会对水泥环及围岩塑性变化产生影响，“围岩-水泥环-套管”组合体塑性区模型是研究天然气井及其近场围岩损伤情况的重要力学模型。现有

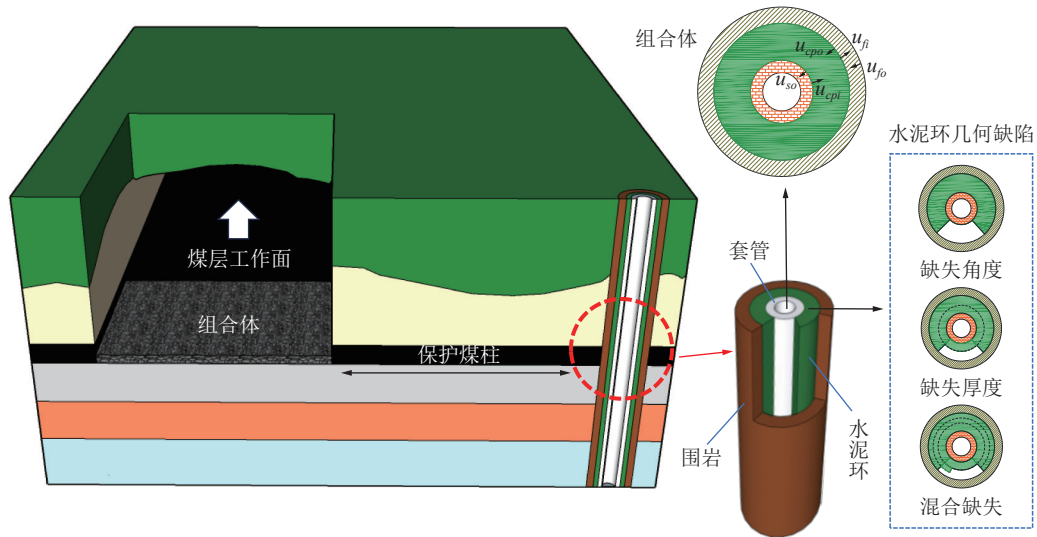


图7 “围岩-水泥环-套管” 组合体耦合损伤模型

Fig.7 Stress overlap during workover and gas well distance indentation

“围岩-水泥环-套管” 组合体塑性区计算公式<sup>[46]</sup> 为

$$u_{s0} = \frac{2(1+\nu_1)(1-\nu_1)r_1^2r_1}{E_1(r_1^2-r_1^2)}p_1 - \frac{(1+\nu_1)[r_1^2r_1+(1-2\nu_1)r_1^2]}{E_1(r_1^2-r_1^2)}p_1 \quad (1)$$

$$u_{cpi} = -\frac{(1+\nu_2)(1-2\nu_2)}{E_2}p_1r_1 + \frac{K}{r_1} \quad (2)$$

$$u_{cpo} = \frac{(1+\nu_1)(1-2\nu_1)C\cot\varphi}{E_2} \times \left[ 1 - \left( 1 + \frac{p_1}{C\cot\varphi} \right) \left( \frac{r_2}{r_1} \right)^{1-\nu_1} \right] r_p + \frac{K}{r_p} \quad (3)$$

$$u_{ni} = \frac{(1+\nu_2)[r_2r_0^2+(1-2\nu_2)r_2^2]}{E_3(r_0^2-r_2^2)}p_2 - \frac{2(1+\nu_3^2)(1-\nu_2)r_2r_2^2}{B_2(r_0^2-r_2^2)}A_1 \quad (4)$$

式中： $u_{s0}$  为套管外壁处的径向位移； $u_{cpi}$  为水泥环塑性区内边界位移； $u_{cpo}$  为水泥环塑性区外边界位移； $u_{ni}$  为井壁围岩内壁处径向位移； $\nu_1$ 、 $\nu_2$ 、 $\nu_3$  为套管、水泥环、围岩的泊松比； $r_0$  为井壁围岩外半径、 $r_1$  为水泥环内半径； $r_2$  为水泥环外半径； $r_i$  为套管内半径； $r_p$  为水泥环弹塑性边界； $C$  为水泥环内聚力； $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$  为套管、水泥环、围岩的弹性模量； $K$  为积分常数； $p_0$  为围岩近井地带外边界压力； $p_1$  为套管和水泥环界面处压力； $p_2$  为水泥环和围岩界面处压力； $p_i$  为套管内压力； $B$  为与主应力大小相关的中间参数； $\varphi$  为水泥石内摩擦角。

在天然气单独开采时，天然气井围岩处位移主

要受套管应力影响，当煤与天然气共采时，煤层采动同样会对围岩产生扰动。其中，较大的煤层深度会引起冲击地压现象，煤层厚度会影响围岩的塑性区发育<sup>[47]</sup>，煤层倾角会对覆岩变形移动规律产生影响<sup>[48]</sup>。因此需研究不同煤层开采因素对围岩扰动产生的影响，建立煤与天然气协同开采“围岩-水泥环-套管” 组合体，为套管、水泥环及围岩塑性变化提供理论支撑。

### 3.4 煤气协同区垂直场围岩耦合损伤理论

目前煤炭开采深度多为千米以内，与天然气层在垂直方向上有较大距离，煤层采动造成的损伤主要出现在煤层近场围岩中，与天然气开采形成的围岩扰动耦合情况较少。而随着煤炭开采逐步向深部发展，煤层采动造成覆岩及底板岩层裂隙发育与破断，围岩应力、位移、裂隙场等发生变化，同时随着地下气化、液化等流态化开采技术不断发展，引起了温度场、渗流场的改变，深部煤层原位岩体受到开采扰动的影响会逐渐扩展至天然气层，两者在垂直方向上会出现岩体损伤耦合情况。

为了有效实现煤与天然气的协同开采，构建煤、气协同区垂直场围岩耦合损伤理论至关重要。该理论主要针对煤层底板以下和天然气储层以上的区域，通过揭示煤与天然气协同开采全过程内的垂直场围岩损伤、变形和破坏规律，确定煤层采动向下和天然气开采向上对围岩损伤的极限范围，帮助划定耦合损伤影响区。通过关键开采参数的综合划定，指导煤与天然气协同开采的参数选择，确保在煤与天然气垂直场内能维持安全的开采环境，这项理论的建立和应用将为煤炭与天然气共存开采提供坚实的科

学依据以及可持续发展的方向,煤、气垂直场时空示意如图8所示。

随着浅部煤层与天然气的协同开采结束,未来不可避免地会在该区域内进行深部煤炭开发。近70%的煤炭资源分布在2000 m以深<sup>[49]</sup>,且随着煤炭开采能力的不断提升,煤炭资源开采效率不断

提高,浅部资源逐渐趋向枯竭,煤炭资源深部开采是必然的趋势。然而,此时煤炭开采深度的围岩力学特征尚不清楚,在深井条件下,煤矿矿山压力、围岩支护、灾害预警等问题趋于复杂化<sup>[50]</sup>,瓶颈问题不断涌现,亟需新的技术与理论来解决深部开采的难题。

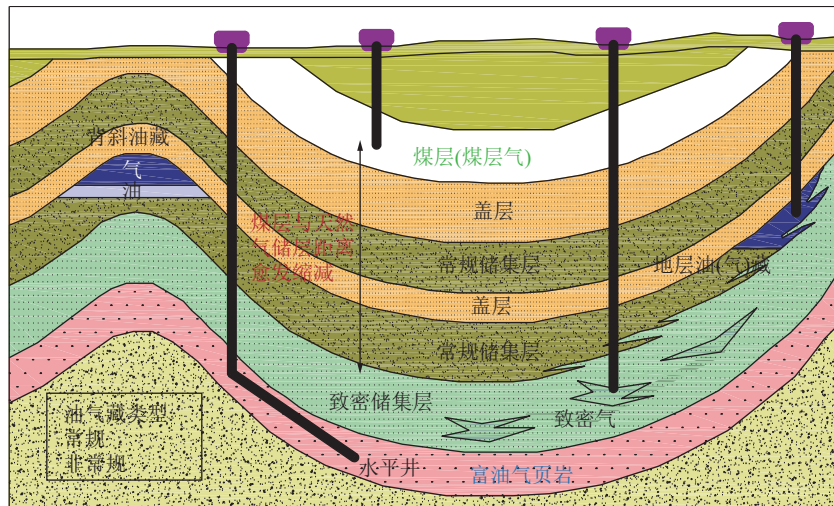


图8 煤、气垂直场时空示意图

Fig.8 Spatio-temporal diagram of coal and gas vertical fields

在这种情况下,需要进行深入的研究,探索深部煤炭开采的围岩力学性质和变化规律。通过先进的地质勘查技术、岩石力学试验和数值模拟分析,可以全面了解深部煤炭开采所涉及的地质构造、岩石类型以及地应力等因素的影响,这将为未来深部煤炭开采提供重要参考和指导。煤炭深部流态化开采是通过化学反应将煤炭转化为气、液及气液混合态,是煤炭资源深部开采的重要方向<sup>[51]</sup>。由于开采深度较大,矿难事故危险性较高,而煤炭地下气化是集建井、开采和转化于一体<sup>[52]</sup>,利用化学方法将深部固态煤炭直接转化为气态含能组分,通过进气和排气系统输送至地面,可以实现煤炭地下无人开采,减小人员伤亡。煤炭地下气化技术在贵州<sup>[53]</sup>等地已有较多可行性应用,同时地下气化可与二氧化碳实现储存利用联产<sup>[54]</sup>,与国家“双碳”目标相呼应。煤炭地下气化从本质上是多场耦合的问题,主要有流体动力学、热力学、材料应力和化学反应动力学等<sup>[55]</sup>问题,气化炉、气化剂和催化剂等也是重要的工程因素,就地气化及流态化转换过程对原位岩体产生一系列的损伤、变形与破坏<sup>[56]</sup>,与目前煤炭长壁、综放等常规开采的关键问题具有本质上的差异,需要进一步的研究探索,以实现深部煤炭资源的有效开采。

深度煤炭开采和天然气开采的协同发展是能源

领域的重要趋势,但需要充分考虑其对地质围岩的影响,通过建立煤、气协同区垂直场围岩耦合损伤理论,深入研究深部煤炭开采围岩力学特性及强化环境保护和安全生产措施,确保煤炭与天然气协同开采在未来可持续发展中取得突破。

#### 4 煤与天然气协同开采的关键技术

煤炭与天然气资源在平面上相互重叠,纵向上天然气位于煤层下方,天然气井需穿越煤层达到天然气靶区进行资源开采,由于煤炭工作面开采时的覆岩移动会影响到天然气井的稳定性,因此需将天然气井集中布置在天然气井保护煤柱中。天然气井分为直井、水平井以及定向井,其中定向井和水平井可以通过设置造斜点将以天然气井为中心一定范围内的天然气资源采出,因此造斜点的位置选取至关重要。若将造斜点布置于煤层以上,原定保护煤柱宽度将不能够完全保证天然气井井筒的安全性,此时需要考虑的情况将趋于复杂化;反之若将天然气井造斜点布置于煤层底板以下,当天然气井穿过煤层后才逐渐倾斜,在煤炭影响范围内天然气井形态仍呈竖直形态,使得预留设保护煤柱能够保证天然气井安全生产,同时使煤炭压覆资源最小化。

通过留设天然气井保护煤柱为两者提供安全生

产的距离,煤与天然气在各自安全的条件下进行开采,使得煤与天然气资源开采过程中具有同时性。其中煤炭开采所产生的围岩扰动影响更大,范围更广,覆岩运移更剧烈,而天然气钻井与抽采过程中仅影响井身周边小部分区域,因此主要讨论煤炭工作面在不同开采阶段对天然气井造成的影响程度,作为天然气井保护煤柱留设的主要依据。按照时间顺序两者在不同开采阶段所面对的技术难题也有所不同,首先在建设初期,根据天然气赋存情况选择天然气集气场站建设位置,并以此为基础进行天然气井保护煤柱留设;初期规划完成后,根据煤层埋深情况确定天然气井造斜点,天然气井造斜点应在煤层底板以下,保证天然气井垂直穿越煤层,从而实现天然气井保护煤柱留设距离最小,且对天然气井网井距的布置进行优化,以保障全区域的天然气资源开采;当天然气资源开采完成后,需要对留设的保护煤柱进行回收,在回收过程中会出现工作面前方遇天然气井废弃井的情况,对此提出工作面过废弃井技术,包括预测废弃井位置以及废弃井截割封堵技术。

#### 4.1 天然气井近场煤柱留设技术

煤与天然气协同开采区存在大量的天然气井、地面天然气管线和地面集气站等设施,工作面回采和巷道掘进都需要对现有的天然气井进行避让处理。留设安全煤柱是减小煤层采动对天然气井扰动的有效方法,根据煤矿“三下”开采规范进行煤柱距离的计算,可以得到安全煤柱的理论值,通过FLAC<sup>3D</sup>数值模拟软件分析不同煤柱距离下天然气井应力变化规律,并与实际井筒的抗变形能力对比,进行煤柱距离的验证与优化,现有煤炭开采会对井筒应力、位移等产生影响,但仍在井筒的安全范围内,可以实现煤炭与天然气的安全开采。当垂直空间上方存在地面天然气管线与集气站时也需要进行煤柱留设,造成大量煤炭资源的浪费,虽然后续可以对部分煤柱进

行回收,但回采结束后形成的孤岛煤柱回收困难<sup>[57]</sup>,面临着巨大的安全性和经济性问题,因此在留设煤柱之初便尽量缩减煤柱的尺寸至关重要。煤柱留设可划分为常规安全煤柱留设和小煤柱留设,天然气井近场煤柱留设技术构想如图9所示,下面对2种留设方法的理论和技术需求进行阐述:

1)常规安全煤柱留设。常规保护煤柱留设尺寸由综合建筑物下开采规范和天然气井临界允许变形指标确定,保证地面集气站和天然气井安全生产。煤柱的合理留设与煤炭开采对天然气井变形特征和变形部位的影响有关,可依据现有的研究成果,在后续的初开井钻井之初便对关键变形部位进行加固,进一步缩小煤柱留设尺寸,减少资源浪费。

2)小煤柱留设。此种煤柱留设方法可以借鉴已有的相关研究成果,综合考虑不同煤层厚度、倾角、埋深等地质因素以及工作面推进速度、工作面充填体密度与充填体材料、切顶卸压参数等开采因素,针对不同的工程背景设计合理的小煤柱留设方案。例如充填开采、条带开采、切顶卸压、离层注浆等都能有效控制矿压或上覆岩层移动,但在煤与天然气协同开采区应用需要进行新的理论研究,例如以缩小煤柱留设为目的时,对天然气井近场区域进行快速充填、条带开采、顶板离层注浆研究,其近场充填、条带开采和离层注浆关键位置和临界区域应以理论确定;而切顶卸压手段多样,当采用爆破卸压时需要考虑天然气井的承载能力,此外切顶的参数选择也有待研究。

#### 4.2 天然气井身井网优化技术

当天然气保护煤柱留设位置确定后,由于天然气赋存位置普遍比煤炭更深,因此天然气抽采时天然气井将穿过整个煤层达到天然气靶区,为了开采出更大范围的天然气资源,在某一位置会将天然气井井身倾斜,而倾斜的初始位置即为造斜点。天然

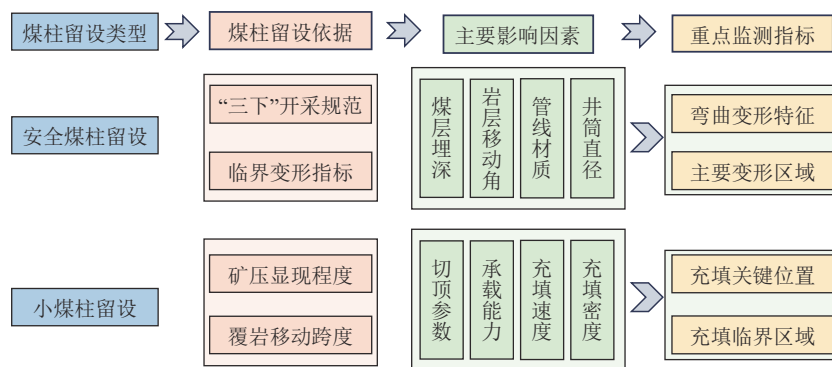


图9 天然气井近场煤柱留设技术构想

Fig.9 Technical concept of small coal pillar retention in near field of natural gas well

气单独开采时,只需考虑本身的安全性和经济性,而当煤与天然气协同开采时会出现许多新的问题,例如井网密度过高导致压覆煤炭资源过多、直井和水平井型的选择没有考虑煤炭开采的影响与井身造斜点可能会处于煤层上方等问题,这都会对煤与天然气协同开采造成安全和经济性风险,基于此提出天然气协同开采技术,通过对天然气的井网、井型和井身进行研究优化<sup>[58]</sup>,使煤与天然气协同开采更安全、高效和经济。

1)天然气井身优化(图10)。天然气井分为水平井和竖直井,2种井都存在造斜的过程,造斜点附近的围岩相较于其他位置完整性较差,造斜区域的井身加固难度也更大。煤炭回采主要影响煤层上方岩层移动,而对煤层底板区域影响程度较小,因此应尽量将天然气井的造斜点控制在煤层底板以下区域。

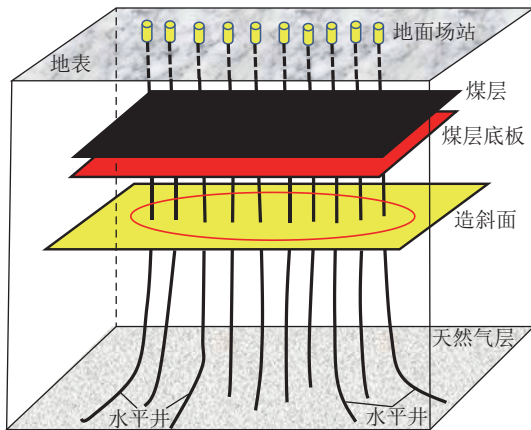


图10 天然气井身优化示意

Fig.10 Schematic diagram of natural gas wellbore optimization

2)天然气井网优化。不同天然气井之间、天然气井与地面集气站之间、集气站与集气站之间、集气站与天然气加工站之间存在不同等级的管线,每种管线所要求的防护等级、对地面沉陷的承受值都是不同的,天然气管线压覆回采工作面区域的面积大小决定了留设煤柱的宽度,因此应依据回采工作面的合理划分对天然气管线的相对位置进行规划,保证天然气管线处于地表沉陷缓慢区,减少煤柱的留设的同时保证天然气管线安全性。

### 4.3 煤炭开采通过废弃井技术

煤炭与天然气资源开采过程中,在天然气抽采的同时,开采天然气井保护煤柱之外的煤炭资源。由于天然气生产年限与煤炭生产存在时间差,因此当天然气抽采完成后,继续回收天然气保护煤柱,一旦采煤机与废弃井发生碰撞将带来气体泄漏等安全问题,对此提出煤炭开采通过废弃井技术。

煤与天然气协同区域内煤层和天然气井垂直交叉分布,工作面回采或巷道掘进过程中不可避免的会遇到天然气井,如图11所示。当遇到生产井和初开钻井时通过留设保护煤柱进行规避,确保天然气和煤炭资源安全开采,而遇到天然气废弃井<sup>[59]</sup>时留设保护煤柱便不再经济,更好的做法是对废弃天然气井进行揭露切割,进而继续正常的巷道掘进或回采工作。目前对于煤炭开采通过废弃井方面的研究较为匮乏,对于废弃井存在的情况下煤层近场围岩应力变化的研究较少,过废弃井工艺和技术体系较不成熟,基于此提出煤炭开采通过废弃井技术。

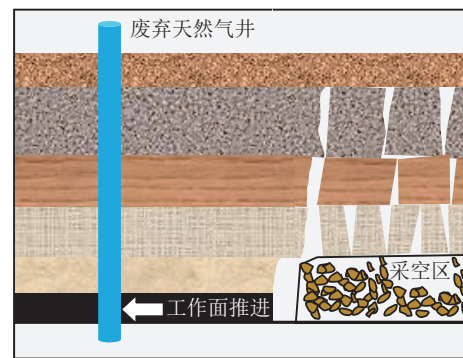


图11 工作面回采过废弃井

Fig.11 Working face passes through abandoned well

煤炭开采通过废弃井分为巷道掘进和工作面回采2种类型。当工作面回采前方煤体内存在天然气废弃井时,通过透明地质监测系统提供的精确坐标,在工作面两巷距天然气井更近的一巷进行超前钻巷,揭露天然气废弃井并进行截割。在巷道掘进线路上遇到天然气废弃井时,可以直接揭露并截割,进而继续掘进,如图12所示。

同时,上述煤炭开采通过废弃井技术的制定需要有新的矿压理论作为指导,也对天然气井的封堵工艺提出了新的要求,下面对其进行阐述:

1)当掘进巷道遇到天然气井时,天然气井近场围岩的应力分布规律有待研究,依据研究的成果提出针对性的掘进通过废弃井安全保障技术。

2)在工作面前方巷道钻巷揭露并截割天然气废弃井前后,回采工作面、工作面两巷以及钻巷内的矿压显现规律的变化还有待研究,开发工作面超前钻巷通过废弃井技术,同时应研究该钻巷在揭露并截割天然气废弃井后是否能发挥积极的作用,逐步改善工作面和两巷道超前段应力过大的问题。

3)目前天然气废弃井的封堵方式多为两端封堵,煤炭开采经过区域大多属于空洞状态,而煤炭开采揭露截割的废弃井为实心封堵时更为安全,因此在

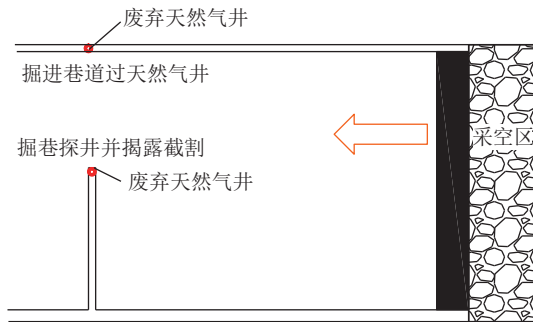


图12 废弃井处理方法示意

Fig.12 Schematic diagram of the disposal method of the abandoned well

煤与天然气协同开采区需要制定新的天然气井封堵标准,具体封堵的工艺也有待研究。对于已经对两端封堵完毕的天然气废弃井应进行二次封堵,保障煤炭开采安全通过废弃井。

#### 4.4 协同开采分区规划系统

煤气协同开采的目标是在同一时空关系内将煤炭资源和天然气资源有序、安全、高效的采出,需要考虑安全性、经济性、资源效益性3个关键性问题,煤与天然气协同区根据双方开采的进度可以划分为整体规划区、部分规划区和有限规划区(图13)。

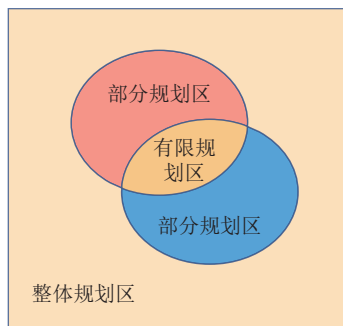


图13 协同开采分区规划示意

Fig.13 Schematic of zoning plan for co-mining

1)整体规划区:煤矿井巷和天然气井站都还未布置,可以充分的进行整体规划。此时的规划可以对安全性、经济性和资源效益性3方面因素进行整体考虑。整体规划具备规避安全性风险的能力,使煤炭和天然气的开采处于相对安全的环境中,在三者中彼此之间的影响程度最低,投入的安全监测成本较低,同时避免了过多煤柱留设,资源采出率高,使双方获得更大的经济效益。

2)部分规划区:煤矿的井巷或天然气井站部分布置,但还有一定的余量可以进行规划。此时后续的布置应注意煤炭与天然气开采的时序问题,合理的时序规划可以使后续双方生产处于良性协同环境

之中,此时合理规划经济效益增加的部分多为避免过多天然气井保护煤柱的留设,防止后续回收产生孤岛煤柱增加成本以及产生新的安全性问题。

3)有限规划区:煤矿的井巷和天然气井站已布置充分,进行规划的空间十分有限。此时的规划重点为保证双方开采的安全性,确定煤炭和天然气的安全开采边界尤为关键,利用上述的安全监测系统对开采过程进行安全监测。

#### 4.5 透明地质与生产信息动态监测系统

相较于常规的煤炭或天然气单独开采,煤炭与天然气的协同开采对空间距离的控制尤为重要。煤炭回采和巷道开挖在矿区内形成大范围的应力扰动和岩层运移影响区域,而在天然气井抽采过程中,套管的稳定性成为决定生产可行性的主要因素,如果不妥善控制两者之间的距离,可能引发严重的安全隐患。煤炭的回采形成采空区,导致天然气井随着岩体的移动,进而在煤层等软弱岩层处形成剪切破坏<sup>[60]</sup>,破坏天然气井筒的完整性,导致天然气泄漏,甚至引发重大安全事故。因此,煤炭与天然气井之间的合理安全距离的确立显得尤为重要。为确保煤炭与天然气井之间的精准距离把控,可以采用先进的技术手段提高信息监测能力。

实现煤与天然气透明地质与生产信息动态监测需要解决以下技术难点<sup>[61-62]</sup>:需深入研究地质模型与地质环境演化机理动态融合理论基础;改进现有地质勘探设备以满足透明地质构建需求,提高动态地质测量获取以及监测能力;开发地质建模适用的建模算法,实现地质模型精度与实际工程条件相吻合;优化地质模型动态更新数据共享与融合处理能力,提升数据的时效性、准确性以及可靠性。

首先,可以利用“四随”地质信息获取技术<sup>[63-64]</sup>,通过对地质条件的全方位、多层次、实时监测,获取准确的地质信息;其次,运用三维建模技术,将矿山的地质结构和空间布局进行立体化重建,为决策提供直观、可视化的数据支持;在实现多元数据信息融合的基础上,开展物探一体化装备的研发,将多种探测手段融合在一起,实现更全面、精确的数据采集;通过不断地改进技术手段,能够及时掌握地下矿层和天然气储层的变化情况,从而更好地预测可能发生的地质灾害,降低事故风险。

为了实现更高效、更直观的信息管理,构建透明地质软件平台。这个平台将整合并可视化地呈现采矿区内的地质信息,包括工作面的布置、天然气井的

位置,以及它们之间的相对距离等关键数据,透明地质平台能够为决策者提供一目了然的信息,使其能够及时做出科学合理的决策,降低人为因素对安全距离把控的影响。

“三场”透明可视化构想如图 14 所示,通过这些

措施的综合应用,不仅能够有效地确保煤炭与天然气井之间的安全距离,同时还能极大地缩小时间成本和人工成本,保证其准确性。在煤炭与天然气协同开采过程中发挥积极作用,为能源开采的安全性和可持续发展提供强有力的支撑。

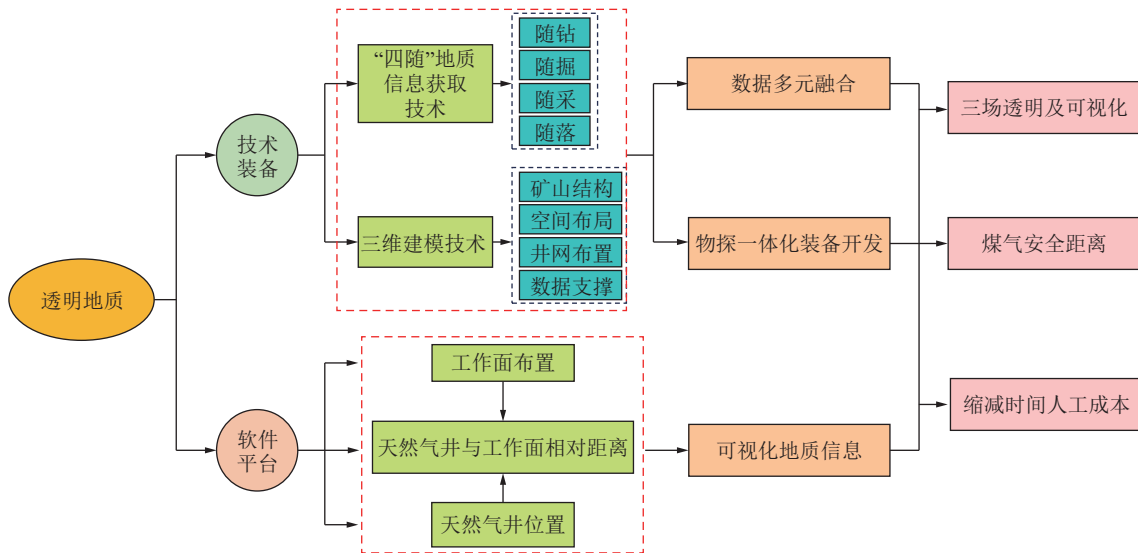


图 14 三场透明可视化构想

Fig.14 Three transparent visualization ideas

目前大多数煤矿整体或者局部回采工作面一定程度实现了透明化、智能化开采<sup>[65-66]</sup>,而天然气开采本身就属于地下无人的开采模式,地质透明化、智能化开采发展的更为成熟,透明地质示意图与生产信息监测如图 15 所示。

如今资源重叠区矿产资源的开发多为相互避让开发,避让开发时资源开发方之间不需要过多的

沟通与配合,只需明确区域的开发时序即可,而这样的开发时序的量级大多以年为单位。当煤与天然气资源协同开采时,煤炭开采和天然气开采处于同一时空关系内,相互之间会影响彼此,这时简单的沟通机制便不再适用,需要更加频繁地将彼此的生产信息情况进行沟通。构建畅通的沟通机制有利于煤炭企业和天然气企业双方在同一空间内更

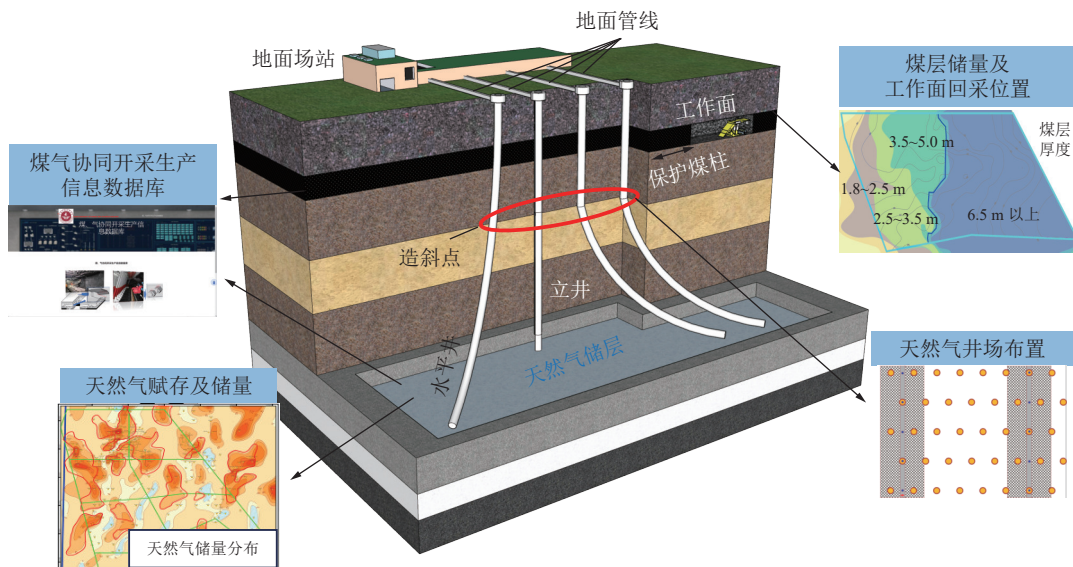


图 15 透明地质示意与生产信息监测

Fig.15 Transparent geological diagram and production information monitoring map

加有序、安全、高效的将资源采出,避免沟通不及时造成不必要的煤炭和天然气资源的浪费。这时对双方的透明化、智能化开采提出了更高的要求,基于此提出煤气协同开采透明地质与生产信息动态监测系统,该系统在原有各自透明化、智能化的基础上对部分需要互通的重要信息进行整合,形成统一的透明地质与生产信息动态监测系统,如图16所示

该系统的实现分为3个步骤:

1)煤炭资源与天然气资源一体化地质勘探,减少重复性钻探工作,根据勘探数据反演建立煤与天然气重叠区一体化三维透明地质模型。此种一体化勘探方式可以减少重复性的钻探工作,实现一个钻

孔两方受益,更具经济性,是未来重叠资源协同开采的重要发展趋势。

2)相异于煤炭稳定的赋存环境,天然气储存于岩层之中的储量是有差异的,因此需对天然气储层进行精细化解剖,系统分析砂层沉积特征和储层内部结构和空间组合特征,建立天然气储层精细三维储量模型。

3)在建立一体化透明地质模型的基础上,对煤炭的生产信息(巷道布置、工作面回采、煤炭采出进度)和天然气的生产信息(天然气储量、天然气井布置、抽采速率)进行同步整理,建立煤与天然气生产信息动态更新系统,实时监测协同开采区域内煤与天然气的开采进度。

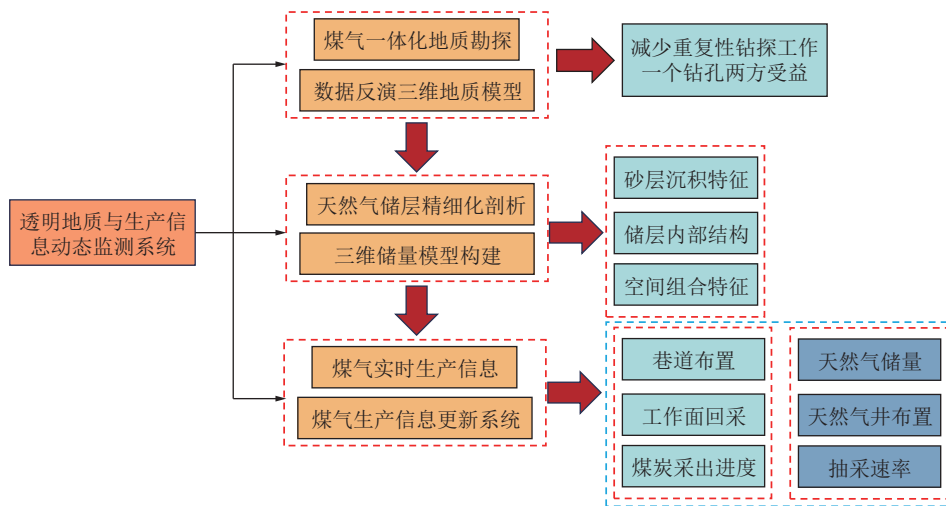


图16 透明地质与生产信息动态监测系统构想

Fig.16 Concept of dynamic monitoring system for transparent geological and production information

#### 4.6 协同区安全监测与评价系统

相较于单一的煤层开采和天然气开采,当煤与天然气在同一时空内共同开采时两者之间会互相影响,从而产生很多新的安全性风险问题,例如煤炭开采过程中会遇到报废的天然气井<sup>[67]</sup>、遭遇天然气开采的扰动影响及天然气等有害气体大量涌入的风险,同时煤炭开采导致上覆岩层移动进而造成天然气井和地面输送管道的变形,产生天然气井和地面输送管道破裂的风险。上述风险一旦发生都属于重大的安全性事故,因此煤与天然气协同开采的前提是保证两者开采对彼此的影响降至最低,对关键的风险指标时刻进行安全性监测,保证煤与天然气协同开采在安全的环境中进行。煤气协同区安全监测系统构想如图17所示,煤与天然气协同开采过程中所产生的风险依据影响的对象可分为单向风险和双向风险:

1)单向风险。煤炭或天然气开采对另一方造成安全性风险而不会反过来影响自身的风险属于单向风险。单向风险主要包含2方面:当煤炭回采或巷道掘进遇到天然气废弃井时,需要对天然气废弃井进行揭露处理,在揭露过程中和揭露后近场围岩的应力情况会发生改变,而且天然气废弃井附近的围岩通常伴随着裂隙发育,完整度较低,同时也会有矿井水和有毒气体涌入的风险;随着煤炭资源的采出,直接顶冒落与上覆岩层移动导致地表沉陷,此时铺设在地表的天然气输送管道和地面集气站会受到影响而产生变形或裂隙,严重至管道和集气站破裂。

2)双向风险。开采过程中影响对方使对方的生产环境变的更差,从而反过来影响自身的安全生产风险属于双向风险。煤炭开采遇到天然气生产井和新开井施工时所产生的安全性风险属于双向风险,在同一时空关系内,煤炭开采的扰动和开采过程中

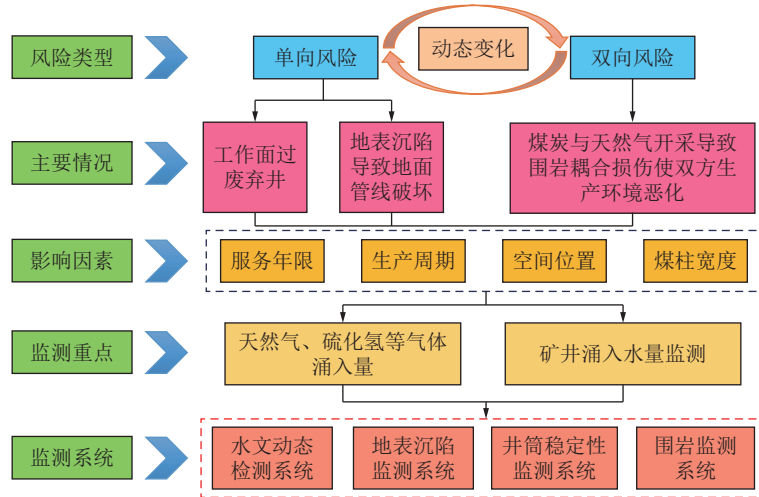


图 17 协同区安全监测系统构想

Fig.17 Concept of safety monitoring system in the coordination area

伴随的上覆岩层移动会造成天然气生产井发生变形破坏, 会有矿井水和有害气体涌入煤矿的风险; 相较于初开井, 天然气生产井由于处于生产过程中, 不断有天然气的采出, 同时天然气开采过程中会产生一定的扰动, 因此天然气生产井相较于废弃井对煤炭开采会造成更大的安全性隐患。虽然生产井一般会处于煤柱当中, 但天然气井附近的围岩以及煤层会受到钻井和天然气抽采的双重扰动影响, 影响天然气井近场围岩的完整性, 产生裂隙, 为天然气、硫化氢和一氧化碳等气体涌入煤矿创造条件。因此在生产井附近应监测其天然气、硫化氢和一氧化碳等气体的涌摄入量。当上覆岩层中有含水层时还会遇到顶板突水的风险, 因此对涌入水量的监测也较为重要。

依据上述的风险性分析, 煤与天然气协同开采时安全监测区域应是距离天然气井较近的煤矿采场、巷道和天然气井近场围岩, 具体的监测距离划分需要理论指导。安全监测区域划分为重点安全监测区和普通安全监测区, 其中重点安全监测区的安全监测传感器密度设置也亟需研究, 同时煤炭开采的空间关系是随时间改变的, 重点安全监测区和普通安全监测区的划分也是动态变化的, 将不随时空关系改变的安全监测区划分为常态化监测区。需要监测的内容主要有矿井水、天然气等有毒气体涌入量和围岩的应力、变形和裂隙情况, 因此安全性监测系统包含煤-天然气井一体化实时水文动态监测系统、地表沉降监测系统、天然气井稳定性监测系统、围岩监测系统。

### 5 工程案例

某矿区规划总面积 681.03 km<sup>2</sup>, 煤炭资源量约

122.98 亿 t, 可采煤层 15 层, 煤层赋存条件较好, 煤层基本都在 1 000 m 以浅, 煤层较厚, 赋存稳定, 煤质优良, 为高、特高热值煤, 开采技术条件简单。目前矿区内共有天然气井 315 口, 其中中石油 210 口、中石化 105 口; 集气站 7 座, 中石油 4 座、中石化 3 座; 各类输气管线约 200 km, 且未来随着采气量的增加, 采气设施也将不断增加。

以可采煤层 2-2 上煤层为例, 利用“三下”开采规范计算得天然气井保护煤柱宽度为 400 m, 利用 FLAC<sup>3D</sup> 模拟研究煤矿工作面采动影响下天然气井应力演化特征, 煤矿工作面与天然气井位置如图 18 所示。

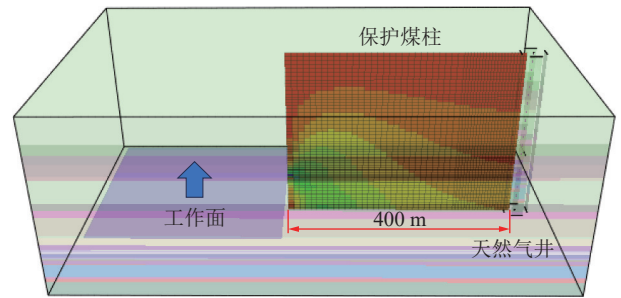


图 18 煤矿工作面与天然气井位置示意

Fig.18 Schematic diagram of coal mine working face and gas well location

以天然气井套管中常见的 J55 型套管为例, 天然气井抗剪切强度约为 310 MPa, 工作面开采见方后套管应力未达到屈服应力, 因此设计 400、300、200 m 保护煤柱宽度, 分析可知通过“三下”开采的规范留设天然气井保护煤柱能够使天然气井应力在安全范围内并且留有较多安全余量。煤炭工作面开采套管应力峰值变化如图 19 所示。

煤层开采产生采空区引起围岩的应力重新分布、

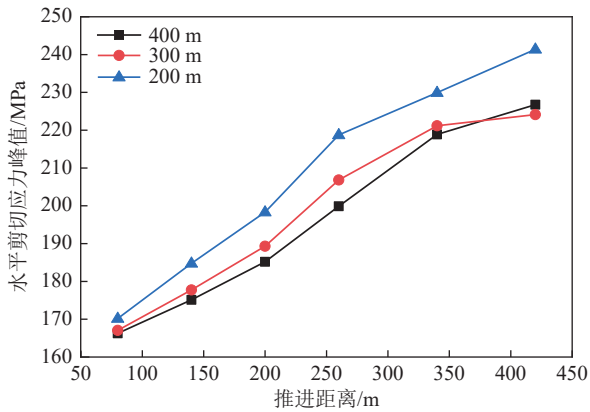


图19 煤炭工作面开采套管应力峰值变化

Fig.19 Peak stress variation in casing for coal working face mining

岩层变形与运移,进而对天然气设施产生剪切与弯曲影响,因此煤层采动是问题的源头,从根源出发可对采空区进行充填,通过充填材料与充填方式的合理选择,可以一定程度上减小采动对顶板破断的影响,从而减小采动对天然气设施的影响。也可进行条带开采,间隔一定的采空区留设煤柱,可以有效对顶板进行支撑,从而减小顶板的变形破断程度。同时利用充填开采、离层注浆等方式最大限度的开采煤炭资源,减小地表沉陷,保证地面设施的稳定性。根据天然气设施受采动影响较严重区域,进行加强保护,并进行稳定性监测。图20为天然气设施稳定性控制技术体系。

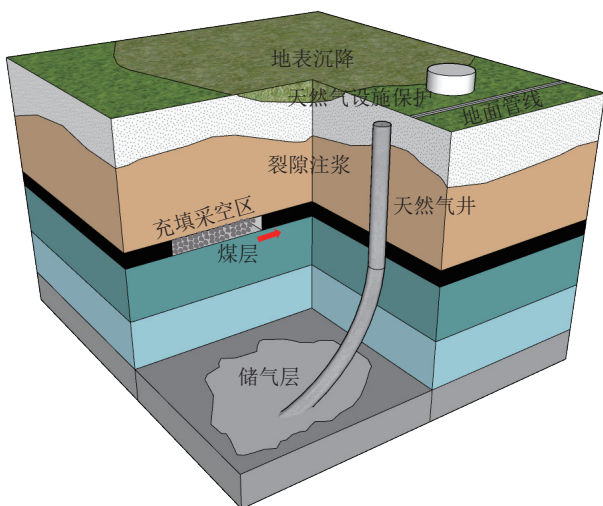


图20 天然气设施稳定性控制技术体系

Fig.20 Stability control technology system for natural gas facilities

为了有效管理和利用这些资源,需建立动态储量数据库,如图21所示,对数据库结构、数据采集、数据分析和数据分析等方面进行合理设计。由于矿

区资源分布情况比较复杂,煤、气协同开采生产信息数据库将煤气田名称、所属地区、地理位置、开发阶段等信息作为煤气田基本信息进行归纳,整理煤气储量中的储量类型、储量估算方法、储量估算年份以及储量估算结果。



图21 煤-气协同开采数据库示意

Fig.21 Coal-gas synergistic mining database schematic

备份相关生产数据,对相应煤气田的煤层厚度、煤层含气量、煤层渗透率等地质条件数据进行整合归纳。对储量数据进行分析,了解煤气资源重叠区的储量分布情况、储量变化趋势等。对生产数据进行分析,了解煤气资源重叠区的生产情况、生产效率等。通过对地质数据进行分析,了解煤气资源重叠区的地质特征、地质条件等。最终可对煤气资源重叠区进行实时监测与管控,具备一定的工程指导意义。

## 6 结 论

1)煤与天然气协同开采是一个具有重要意义的领域,它将对国家能源供应、环境保护和可持续发展产生深远影响。提出了煤与天然气协同开采的定义,并介绍了一系列技术路线和构想,为该领域的发展奠定了指导方针。

2)提出了4项煤与天然气系统开采理论。包括天然气井近场岩体力学理论、天然气井近场围岩耦合损伤理论、“围岩-水泥环-套管”耦合损伤理论、煤气协同区垂直场围岩耦合损伤理论等,这些理论为协同开采提供了重要的理论基础,有助于更好地理解地下复杂环境,并指导实践中的开采工作。

3)提出了“三大”技术与“三大”系统。“三大”技术包括天然气井近场煤柱留设技术、天然气井身井网优化技术、煤炭开采通过废弃井技术;“三大”系统包括协同分区规划系统、透明地质与生产信息动态监测系统、协同区安全监测与评价系统。这些技术构想与系统构建在实践中有望提高煤与天然气的开采效率,并降低环境风险,随着技术的不断创新

和科技进步,煤与天然气协同开采领域将得到进一步发展,智能化和自动化技术的应用将提高开采效率和安全性,同时,更严格的环保要求将促使开采过程更加注重环境保护,确保可持续发展。

4)煤与天然气协同开采的未来展望非常光明,通过技术创新和科技进步,该领域有望在能源供应、环境保护和可持续发展方面发挥更大的作用,同时也需要加强监管与管理,确保协同开采能够安全、高效地推进,并为社会经济发展做出积极贡献。

#### 参考文献(References):

- [1] 吕超贤,孙文,宋关羽,等. 煤矿能源资源高效利用发展研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(5): 136-145.  
LYU Chaoxian, SUN Wen, SONG Guanyu, *et al.* Efficient utilization of energy resources in coal mines [J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(5): 136-145.
- [2] 崔艳. 我国煤系共生矿产资源分布与开发现状[J]. 洁净煤技术, 2018, 24(S1): 27-32.  
CUI Yan. Distribution and exploration of associated resources occurred in Chinese coal-bearing series [J]. *Clean Coal Technology*, 2018, 24(S1): 27-32.
- [3] 黄炳香,赵兴龙,张权. 煤与煤系伴生资源共采的理论与技术框架[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(4): 653-662.  
HUANG Bingxiang, ZHAO Xinglong, ZHANG Quan. Framework of the theory and technology for simultaneous mining of coal and its associated resources [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2016, 45(4): 653-662.
- [4] 袁亮. 煤及伴生资源精准开采科学问题与对策[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 1-9.  
YUAN Liang. Scientific problem and countermeasure for precision mining of coal and associated resources [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(1): 1-9.
- [5] 郭旭升,胡东风,黄仁春,等. 四川盆地深层—超深层天然气勘探进展与展望[J]. 天然气工业, 2020, 40(5): 1-14.  
GUO Xusheng, HU Dongfeng, HUANG Renchun, *et al.* Deep and ultra-deep natural gas exploration in the Sichuan Basin: Progress and prospect [J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(5): 1-14.
- [6] 王家臣,唐岳松,王兆会,等. 千米深井综采工作面覆岩微震显现特征与损伤度计算方法[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(3): 417-431.  
WANG Jiachen, TANG Yuesong, WANG Zhaohui, *et al.* Characteristics of microseismic events and damage degree calculation method in kilometer deep fully mechanical longwall panel [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2023, 52(3): 417-431.
- [7] 王兆会,唐岳松,李辉,等. 千米深井超长工作面支架阻力分布特征及影响因素研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(1): 1-10.  
WANG Zhaohui, TANG Yuesong, LI Hui, *et al.* Distribution and influence factors of support resistance in longwall panel with large face length of a kilometer-deep coal mine [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2023, 40(1): 1-10.
- [8] 杨伟利,王毅,王传刚,等. 鄂尔多斯盆地多种能源矿产分布特征与协同勘探[J]. 地质学报, 2010, 84(4): 579-586.  
YANG Weili, WANG Yi, WANG Chuangang, *et al.* Distribution and co-exploration of multiple energy minerals in Ordos Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(4): 579-586.
- [9] 郝秀强,常振恒,俞珠峰. 鄂尔多斯盆地煤与天然气的协调开发及综合评价[J]. 煤炭经济研究, 2017, 37(11): 63-67.  
HAO Xiuqiang, CHANG Zhenheng, YU Zhufeng. Coordinated development and comprehensive evaluation on coal and natural gas in Ordos Basin [J]. *Coal Economic Research*, 2017, 37(11): 63-67.
- [10] 王文,杨昆,何云,等. 煤—气交叉开采区天然气井防碰撞预警技术研究[J]. 矿业科学学报, 2022, 7(4): 490-497.  
WANG Wen, YANG Kun, HE Yun, *et al.* A study on collision warning of gas wells in coal-gas cross mining area [J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2022, 7(4): 490-497.
- [11] 刘云鹏. 气煤重叠区交叉开采安全技术研究[J]. 当代石油石化, 2019, 27(1): 27-31.  
LIU Yunpeng. Safety technology research of cross mining for gas and coal overlap area [J]. *Petroleum & Petrochemical Today*, 2019, 27(1): 27-31.
- [12] 任建东,赵毅鑫,孙中博,等. 气煤叠置区埋地管道的保护煤柱优化设计及多参量演化规律研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(9): 2679-2695.  
REN Jiandong, ZHAO Yixin, SUN Zhongbo, *et al.* Protective coal pillar optimization and multi-parameter evolution characteristics of buried pipeline in gas-coal superposition area [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(9): 2679-2695.
- [13] 王文,任建东,王付斌,等. 鄂尔多斯盆地“煤气走廊”开采模式研究[J]. 金属矿山, 2019(10): 23-31.  
WANG Wen, REN Jiandong, WANG Fubin, *et al.* Study on the mining mode of “gas corridor” in Erdos Basin [J]. *Metal Mine*, 2019(10): 23-31.
- [14] 倪炜,孙宝东,郝秀强,等. 新街台格庙矿区高质量开发路径及关键问题研究[J]. 煤炭工程, 2023, 55(5): 1-7.  
NI Wei, SUN Baodong, HAO Xiuqiang, *et al.* High quality development path and key issues of Xinjie Taigemiao Mining Area [J]. *Coal Engineering*, 2023, 55(5): 1-7.
- [15] BP. BP Statistical Review of World Energy 2023[M]. London: BP plc, 2023.
- [16] 袁亮. 煤炭精准开采科学构想[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 1-7.  
YUAN Liang. Scientific conception of precision coal mining [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(1): 1-7.
- [17] 姜耀东,潘一山,姜福兴,等. 我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 205-213.  
JIANG Yaodong, PAN Yishan, JIANG Fuxing, *et al.* State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(2): 205-213.
- [18] 康红普,徐刚,王彪谋,等. 我国煤炭开采与岩层控制技术发展40 a及展望[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2019, 1(2): 7-39.

- KANG Hongpu, XU Gang, WANG Biaomou, *et al.* Forty years development and prospects of underground coal mining and strata control technologies in China[J]. *Journal of Mining And Strata Control Engineering*, 2019, 1(2): 7-39.
- [19] 袁 亮. 深部采动响应与灾害防控研究进展[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(3): 716-725.
- YUAN Liang. Research progress of mining response and disaster prevention and control in deep coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(3): 716-725.
- [20] 王家臣. 基于采动岩层控制的煤炭科学开采[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2019, 1(2): 40-47.
- WANG Jiachen. Sustainable coal mining based on mining ground control[J]. *Journal of Mining And Strata Control Engineering*, 2019, 1(2): 40-47.
- [21] 杨 莉, 姚建华, 罗平亚. 钻井液常见污染问题及处理方法探讨[J]. *钻井液与完井液*, 2012, 29(2): 47-50, 93.
- YANG Li, YAO Jianhua, LUO Pingya. Discussion on common contamination problems and treatment methods for drilling fluid[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2012, 29(2): 47-50, 93.
- [22] 杨勋尧. 四川天然气深井钻井主要工程地质问题及对策[J]. *钻采工艺*, 2004(2): 9-11, 3.
- YANG Xunyao. Engineering geology problems of deep drilling and its strategy in Sichuan natural gas well[J]. *Drilling & Production Technology*, 2004(2): 9-11, 3.
- [23] 宋 明, 杨凤香, 宋胜利, 等. 固井水泥环对套管承载能力的影响规律[J]. *石油钻采工艺*, 2002(4): 7-9, 82.
- SONG Ming, YANG Fengxiang, SONG Shengli, *et al.* Influencing tendencies of cement sheath on casing retaining capacity[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2002(4): 7-9, 82.
- [24] 冯 琦, 仝少凯, 徐晓航, 等. 高浓度 H<sub>2</sub>S 天然气井中射孔段套管的应力腐蚀[J]. *腐蚀与防护*, 2013, 34(5): 417-422.
- FENG Qi, TONG Shaokai, XU Xiaohang, *et al.* Stress corrosion of perforating casing in solution of high H<sub>2</sub>S gas well[J]. *Corrosion & Protection*, 2013, 34(5): 417-422.
- [25] 郝一松. 煤-气交叉开采油井保护煤柱采动应力演化及泄漏甲烷运移规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- HAO Yisong. Evolution of mining induced stresses within the coal protective pillar and the transport characteristics of leaked methane in co-extraction of coal and deep natural gas[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [26] 王 文, 任建东, 李小军, 等. 开采沉陷区天然气井避让距离控制预测方法研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2021, 50(5): 943-954.
- WANG Wen, REN Jiandong, LI Xiaojun, *et al.* Research on prediction method of natural gas well avoidance distance control in mining sinkhole area[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2021, 50(5): 943-954.
- [27] 王 文, 任建东, 董 淼, 等. 采动影响下天然气管道变形演化模拟试验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2020, 37(4): 777-787.
- WANG Wen, REN Jiandong, DONG Miao, *et al.* A simulation experimental study on deformation evolution of natural gas pipeline under mining influence[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2020, 37(4): 777-787.
- [28] 朱庆杰, 赵 晨, 陈艳华, 等. 埋地天然气管道泄漏的影响因素及保护措施[J]. *环境工程学报*, 2018, 12(2): 417-420.
- ZHU Qingjie, ZHAO Chen, CHEN Yanhua, *et al.* Influencing factors and protective measures of buried natural gas pipeline leakage[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2018, 12(2): 417-420.
- [29] 石 林, 汪海阁, 纪国栋. 中石油钻井工程技术现状、挑战及发展趋势[J]. *天然气工业*, 2013, 33(10): 1-10.
- SHI Lin, WANG Haige, JI Guodong. Current situation, challenges and developing trend of CNPC's oil & gas drilling[J]. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(10): 1-10.
- [30] 聂 臻, 夏朝辉, 吴波鸿, 等. 中东地区碳酸盐岩油藏钻井工程技术现状及发展趋势[J]. *石油钻探技术*, 2024, 52(1): 8-16.
- NIE Zhen, XIA Zhaohui, WU Bohong, *et al.* Status and the future perspective of drilling engineering technologies in middle east carbonate reservoirs[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2024, 52(1): 8-16.
- [31] 刘硕琼, 李德旗, 袁进平, 等. 页岩气井水泥环完整性研究[J]. *天然气工业*, 2017, 37(7): 76-82.
- LIU Shuoqiong, LI Deqi, YUAN Jinping, *et al.* Cement sheath integrity of shale gas wells: A case study from the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(7): 76-82.
- [32] 宋振琪, 文志杰, 蒋宇静, 等. 采动力学与岩层控制关键理论及工程应用[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(1): 16-35.
- 4-01-02]. SONG Zhenqi, WEN Zhijie, JIANG Yujing, *et al.* The theory and application of mining mechanics and strata control[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(1): 16-35.
- [33] 钱鸣高, 许家林. 煤炭开采与岩层运动[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(4): 973-984.
- QIAN Minggao, XU Jialin. Behaviors of strata movement in coal mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(4): 973-984.
- [34] 缪协兴, 陈荣华, 浦 海, 等. 采场覆岩厚关键层破断与冒落规律分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005(8): 1289-1295.
- MIAO Xiexing, CHEN Ronghua, PU Hai, *et al.* Analysis of breakage and collapse of thick key strata around coal face[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005(8): 1289-1295.
- [35] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(5): 1283-1305.
- XIE Heping. Research review of the state key research development program of China: Deep rock mechanics and mining theory[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(5): 1283-1305.
- [36] 李夕兵, 周 健, 王少锋, 等. 深部固体资源开采评述与探索[J]. *中国有色金属学报*, 2017, 27(6): 1236-1262.
- LI Xibing, ZHOU Jian, WANG Shaofeng, *et al.* Review and practice of deep mining for solid mineral resources[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2017, 27(6): 1236-1262.
- [37] 谢和平, 张国庆, 罗 通, 等. 月球大深度保真取芯探矿机器人系统构想与设计[J]. *工程科学与技术*, 2020, 52(2): 1-9.
- XIE Heping, ZHANG Guoqing, LUO Tong, *et al.* Scheme and

- design of a lunar large-depth and in-situ condition-holding coring robot system[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, 52(2): 1-9.
- [38] 史配铭, 李晓明, 倪华峰, 等. 苏里格气田水平井井身结构优化及钻井配套技术[J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(6): 29-36. SHI Peiming, LI Xiaoming, NI Huafeng, *et al.* Casing program optimization and drilling matching technologies for horizontal wells in sulige gas field[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(6): 29-36.
- [39] 黄熠, 陈浩东, 郑浩鹏, 等. 套管偏心对压裂井水泥环力学完整性的影响研究[J]. *中国海上油气*, 2022, 34(6): 135-141. HUANG Yi, CHEN Haodong, ZHENG Haopeng, *et al.* Influence of casing eccentricity on mechanical integrity of cement sheath in fractured wells[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2022, 34(6): 135-141.
- [40] 杨钊, 孙锐, 梁飞, 等. 基于裂缝诱导应力场的套管应力影响因素分析[J]. *石油机械*, 2023, 51(4): 135-143. YANG Zhao, SUN Rui, LIANG Fei, *et al.* Analysis on influential factors of casing stress based on fracture induced stress field[J]. *China Petroleum Machinery*, 2023, 51(4): 135-143.
- [41] 闫炎, 管志川, 阎卫军, 等. 水力压裂过程中水泥环裂缝扩展的数值模拟[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(32): 13673-13680. YAN Yan, GUAN Zhichuan, YAN Weijun, *et al.* Crack propagation simulation of perforated cement sheath during hydraulic fracturing[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(32): 13673-13680.
- [42] 李勇, 纪宏飞, 邢鹏举, 等. 气井井筒温度场及温度应力场的理论解[J]. *石油学报*, 2021, 42(1): 84-94. LI Yong, JI Hongfei, XING Pengju, *et al.* Theoretical solutions of temperature field and thermal stress field in wellbore of a gas well[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(1): 84-94.
- [43] 杨永明, 孙梦珂. 三轴应力下孔隙水泥环的压裂破坏机制[J]. *高压物理学报*, 2022, 36(6): 92-102. YANG Yongming, SUN Mengke. Fracturing failure mechanism of porous cement sheath under triaxial stress[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2022, 36(6): 92-102.
- [44] THIERCELIN M J, DARGAUD B, BARET J F, *et al.* Cement design based on cement mechanical response[J]. *SPE Drill & Compl*, 1998, 13(4): 266-273.
- [45] 张智, 王嘉伟, 吴优, 等. 页岩气水平井固井水泥环状态对套管力学完整性的影响[J]. *石油学报*, 2022, 43(8): 1158-1172. ZHANG Zhi, WANG Jiawei, WU You, *et al.* Effect of cement sheath condition on casing mechanical integrity in shale gas horizontal wells[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(8): 1158-1172.
- [46] 初纬, 沈吉云, 杨云飞, 等. 连续变化内压下水泥环-围岩组合体微环隙计算[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(3): 379-385. CHU Wei, SHEN Jiyun, YANG Yunfei, *et al.* Calculation of micro-annulus size in casing-cement sheath-formation system under continuous internal casing pressure change[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(3): 379-385.
- [47] 姜福兴, 冯宇, KOUAME K J A, 等. 高地应力特厚煤层“蠕变型”冲击机理研究[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(10): 1762-1768. JIANG Fuxing, FENG Yu, KOUAME K J A, *et al.* Mechanism of creep-induced rock burst in extra-thick coal seam under high ground stress[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(10): 1762-1768.
- [48] 叶子昂, 黄瑞萱, 师晓达, 等. 大倾角特厚煤层开采地表沉降规律数值模拟研究[J]. *煤炭技术*, 2023, 42(10): 40-45. YE Ziang, HUANG Ruixuan, SHI Xiaoda, *et al.* Numerical simulation of surface subsidence patterns in large inclination extra-thick coal seam mining[J]. *Coal Technology*, 2023, 42(10): 40-45.
- [49] 谢和平, 鞠杨, 高明忠, 等. 煤炭深部原位流态化开采的理论及技术体系[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(5): 1210-1219. XIE Heping, JU Yang, GAO Mingzhong, *et al.* Theories and technologies for in-situ fluidized mining of deep underground coal resources[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(5): 1210-1219.
- [50] 张庆贺, 王晓蕊, 袁亮. 煤炭地下气化多场耦合数值模拟程序开发及多场演化规律[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(6): 2506-2518. ZHANG Qinghe, WANG Xiaorui, YUAN Liang. Development of multi-field coupled numerical simulation program for underground coal gasification and multi-field evolution laws[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(6): 2506-2518.
- [51] 于海洋, 许永彬, 陈智明, 等. 双碳目标下煤炭深部流态化开采及前景[J]. *洁净煤技术*, 2023, 29(1): 15-32. YU Haiyang, XU Yongbin, CHEN Zhiming, *et al.* Deep fluidized coal mining and its prospect under the target of carbon peak and carbon neutralization[J]. *Clean Coal Technology*, 2023, 29(1): 15-32.
- [52] 王家臣, 杨胜利, 刘淑琴, 等. 急倾斜煤层开采技术现状与流态化开采构想[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(1): 48-59. WANG Jiachen, YANG Shengli, LIU Shuqin, *et al.* Technology status and fluidized mining conception for steeply inclined coal seams[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(1): 48-59.
- [53] 周泽, 易同生, 秦勇, 等. 煤炭地下气化的敏感性地质因素探讨[J]. *煤田地质与勘探*, 2024, 52(3): 24-36. ZHOU Ze, YI Tongsheng, QIN Yong, *et al.* Exploring geological parameters sensitive to underground coal gasification[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(3): 24-36.
- [54] 秦勇, 易同生, 杨磊, 等. 中国煤炭地下气化现场试验探索历程与前景展望[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(7): 17-25. QIN Yong, YI Tongsheng, YANG Lei, *et al.* Underground coal gasification field tests in China: history and prospects[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(7): 17-25.
- [55] 刘曰武, 方惠军, 李龙龙, 等. 煤炭地下气化关键力学问题的数值研究进展[J]. *力学学报*, 2023, 55(3): 669-685. LIU Yuewu, FANG Huijun, LI Longlong, *et al.* Recent progress on numerical research of key mechanical problems during underground coal gasification[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2023, 55(3): 669-685.
- [56] 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.

- XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, *et al.* Theoretical and technological conception of fluidization mining for deep coal resources[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(3): 547-556.
- [57] 卢文斌, 杨永杰, 郝以瑞. 深部孤岛工作面沿空掘巷小煤柱留设及巷道支护设计[J]. *煤矿安全*, 2015, 46(5): 208-211.  
LU Wenbin, YANG Yongjie, HAO Yirui. Small coal pillar leaving and roadway support design for gob-side entry driving at deep isolated island coal face[J]. *Safety in Coal Mines*, 2015, 46(5): 208-211.
- [58] 刘茂森, 付建红, 白 璟. 页岩气双二维水平井轨迹优化设计与应用[J]. *特种油气藏*, 2016, 23(2): 147-150, 158.  
LIU Maosen, FU Jianhong, BAI Jing. Optimization of shale gas dual-2D horizontal-well trajectories and its application[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2016, 23(2): 147-150, 158.
- [59] 黎金明, 陈在君, 陈 磊, 等. 苏里格气田废弃钻井液固液分离及回用研究[J]. *钻采工艺*, 2018, 41(4): 89-91, 11.  
LI Jinming, CHEN Zaijun, CHEN Lei, *et al.* Research on solid-liquid separation and recycling of waste drilling fluid at sulige gas-field[J]. *Drilling & Production Technology*, 2018, 41(4): 89-91, 11.
- [60] 张其朋, 问小江, 谭东升, 等. 岩层倾角对钻井套管剪切变形的影响分析[J]. *煤矿安全*, 2020, 51(5): 183-186.  
ZHANG Qipeng, WEN Xiaojiang, TAN Dongsheng, *et al.* Analysis of influence of strata dip angle on shear deformation of drilling casing[J]. *Safety in Coal Mines*, 2020, 51(5): 183-186.
- [61] 王国法, 张建中, 薛国华, 等. 煤矿回采工作面智能地质保障技术进展与思考[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(2): 12-26.  
WANG Guofa, ZHANG Jianzhong, XUE Guohua, *et al.* Progress and reflection of intelligent geological guarantee technology in coal mining face[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(2): 12-26.
- [62] 李 梅, 毛善君, 赵明军. 煤矿智能地质保障系统研究进展与展望[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(2): 334-348.  
LI Mei, MAO Shanjun, ZHAO Mingjun. Research progress and prospects of coal mine intelligent geological guarantee systems[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(2): 334-348.
- [63] 王国法. 煤矿智能化最新技术进展与问题探讨[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(1): 1-27.  
WANG Guofa. New technological progress of coal mine intelligence and its problems[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(1): 1-27.
- [64] 袁 亮, 张平松. 煤矿透明地质模型动态重构的关键技术与路径思考[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(1): 1-14.  
YUAN Liang, ZHANG Pingsong. Key technology and path thinking of dynamic reconstruction of mine transparent geological model[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(1): 1-14.
- [65] 毛明仓, 张孝斌, 张玉良. 基于透明地质大数据智能精准开采技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(1): 286-293.  
MAO Mingcang, ZHANG Xiaobin, ZHANG Yuliang. Research on intelligent and precision mining technology based on transparent geological big data[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(1): 286-293.
- [66] 杨胜利, 王家臣, 李 明. 煤矿采场围岩智能控制技术路径与设想[J]. *矿业科学学报*, 2022, 7(4): 403-416.  
YANG Shengli, WANG Jiachen, LI Ming. Technology path and assumptions of intelligent surrounding rock control at longwall working face[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2022, 7(4): 403-416.
- [67] 刘 鹏, 李 云, 郭 祥, 等. 北海油田废弃井处置标准对我国的借鉴意义[J]. *石油工程建设*, 2020, 46(S1): 266-272.  
LIU Peng, LI Yun, GUO Xiang, *et al.* Disposal standards for abandoned wells in north sea oilfields and enlightenment to China[J]. *Petroleum Engineering Construction*, 2020, 46(S1): 266-272.