



## 基于煤层气与煤炭协调开发的地面抽采工程部署关键技术进展

降文萍 柴建禄 张群 张培河 姜在炳

### 引用本文:

降文萍, 柴建禄, 张群, 等. 基于煤层气与煤炭协调开发的地面抽采工程部署关键技术进展[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 50–61.

JIANG Wenping, CHAI Jianlu, ZHANG Qun. Key technology progress of surface extraction project deployment based on coordinated development of CBM and coal[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 50–61.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.mcq22-25>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 煤矿区煤层气与煤炭协调开发机制模式及发展趋势

Progress and trend of key technologies of CBM development and utilization in China coal mine areas

煤炭科学技术. 2022, 50(12): 1–13 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.mcq2022-1641>

#### 倾斜碎软煤层群煤层气协调开发关键技术

Key technologies for coordinated development of coalbed methane in inclined soft coal seam groups: a case study of Aiweigou Mining Area

煤炭科学技术. 2024, 52(1): 211–220 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0005>

#### 倾斜煤层煤层气与煤炭地下气化协调开发技术构想

Conception of coordinated development technology system for coalbed methane and underground coal gasification in inclined coal seams

煤炭科学技术. 2024, 52(5): 152–165 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0265>

#### 晋城寺河井区煤矿采空区煤层气地面抽采关键技术研究

Study on key technology for surface extraction of coalbed methane in coal mine goaf from Sihe Wells Area, Jincheng

煤炭科学技术. 2021, 49(1): 240–247 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.01.020>

#### 新疆大倾角多煤组煤矿区煤层气开发利用进展与前景

Progress and prospects of coalbed methane development and utilization in coal mining areas with large dip angle and multiple coal groups in Xinjiang

煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 162–172 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.mcq2022-1325>

#### 晋城矿区废弃矿井采空区煤层气地面抽采研究进展

Research progress on surface drainage of coalbed methane in abandoned mine gobbs of Jincheng Mining Area

煤炭科学技术. 2022, 50(1): 204–211 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/6f9a3691-b7fb-4cfa-889f-363b9fadbf0c>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

降文萍, 柴建禄, 张 群, 等. 基于煤层气与煤炭协调开发的地面抽采工程部署关键技术进展[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 50–61.

JIANG Wenping, CHAI Jianlu, ZHANG Qun, *et al.* Key technology progress of surface extraction project deployment based on coordinated development of CBM and coal[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 50–61.

## 基于煤层气与煤炭协调开发的地面抽采工程部署 关键技术进展

降文萍, 柴建禄, 张 群, 张培河, 姜在炳

(中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710077)

**摘 要:** 煤矿区煤层气地面抽采具有煤炭安全开采效率高、清洁利用煤层气资源和减少瓦斯大气排放的多重效应, 其煤层气产量多年来占了全国总量的主要比例。“十一五”至“十三五”期间, 依托国家油气重大专项, 基于煤层气与煤炭协调开发的指导理念, 研究了煤矿区地面煤层气抽采工程部署的特点及存在问题, 按照受煤炭采动影响与否将煤矿区煤层气地面抽采分为预抽和采动抽采2种类型, 在对两种抽采类型的抽采对象、可抽采时间和空间特征研究基础上, 分别总结形成了煤层气地面预抽和采动抽采的工程部署方法体系。结合原始条件下煤层气开发模拟技术现状分析, 梳理了煤矿区煤层气地面预抽模拟技术体系; 在采动抽采技术特点及关键储层参数变化规律的研究基础上, 基于渗透性控制气体运移规律的认识, 提出了采动抽采效果预测模拟方法。根据煤矿区地面抽采具有安全效应特征, 提出了煤矿区地面煤层气抽采间接经济效益的评价指标, 即地面抽采前矿井瓦斯灾害治理费用与地面抽采后矿井瓦斯灾害治理费用的差值, 并建立了包含预抽和采动抽采的比较全面的地面煤层气抽采工程经济性评价方法。煤矿区地面抽采工程部署及相关技术是预判煤矿区地面煤层气低成本高回报效果、煤层气与煤炭资源协调开发的关键手段, 建议在煤矿区进一步推广应用。

**关键词:** 煤矿区; 煤层气; 协调开发; 地面抽采; 工程部署; 模拟预测; 经济评价

**中图分类号:** TD712.6

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-2336(2022)12-0050-12

### Key technology progress of surface extraction project deployment based on coordinated development of CBM and coal

JIANG Wenping, CHAI Jianlu, ZHANG Qun, ZHANG Peihe, JIANG Zaibing

(Xi'an Research Institute Co., Ltd., China Coal Technology & Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China)

**Abstract:** The surface extraction of CBM in coal mine area has the multiple effects of improving the efficiency of safe coal mining, using CBM resource cleanly and reducing gas emission. From the 11th five-year plan to the 13th five-year plan period, based on the national major oil and gas projects in coal mining areas, and based on the guiding principle of coordinated development of CBM and coal in coal mining areas, the characteristics and existing problems of surface CBM extraction and deployment in coal mining areas were studied, according to the influence of coal mining, the surface extraction of CBM in coal mining area is divided into two types: pre-extraction and mining extraction. Based on the study of the objects, time and space characteristics of the two kinds of extraction methods, the engineering deployment systems of ground pre-extraction and mining extraction are summarized respectively. Based on the analysis of the present situation of CBM development technology in non-coal mining areas, the technology system of CBM surface pre-extraction in coal mining areas is sorted out, and the characteristics of CBM extraction technology and the variation regularity of key reservoir parameters are studied based on the understanding of gas migration law of permeability control, the extraction simulation and prediction method of mining is formed. According to the safety effect of surface extraction in coal mining area, the evaluation index of indirect economic benefit of surface drainage in coal mining area is put forward, which is the difference between the cost of gas disaster treatment before surface extraction and the cost of gas disaster treatment after surface extraction, a comprehensive economic evaluation method for CBM surface extraction engineering is

收稿日期: 2022-05-24

责任编辑: 黄小雨

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.mcq22-25

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2011ZX05040, 2016ZX05045-002); 国家自然科学基金面上资助项目(41972167)

作者简介: 降文萍(1975—), 女, 山西介休人, 研究员, 博士。E-mail: Jwp1225@126.com

established. The surface extraction project deployment and related technology are the key means to predict the low-cost and high-return effect of surface CBM and the coordinated development of CBM and coal resources in coal mining area.

**Key words:** coal mining area; coalbed methane(CBM); coordinated development; surface extraction; engineering deployment; simulation prediction; economic evaluation

## 0 引 言

我国煤层埋深 2 000 m 以浅煤层气资源量达 36.81 万亿  $\text{m}^3$ , 其中国家发展改革委规划的 14 个煤炭基地煤层气资源量约 12 万亿  $\text{m}^3$ <sup>[1]</sup>。对煤矿区来说, 煤层气(煤矿瓦斯)储集丰富并不是有利条件, 一方面加大了煤炭生产过程中的安全隐患, 另一方面也大大增加了不同时期的瓦斯治理难度和投入。截至“十一五”之前, 煤矿企业将煤层气(煤矿瓦斯)主要作为一种灾害性因素对待, 一般通过井下高密度钻孔方式进行抽采防治, 投资成本高、施工困难、安全系数小, 甲烷浓度低、空气排放量大, 不仅造成了煤层气资源的极大浪费, 同时也加剧了矿区环境污染和温室效应。地面抽采具有煤层气资源回收大、时间超前、施工安全方便等优势, 2000 年以来国家就加强了煤矿区地面煤层气抽采的扶持力度, 2006 年发布的《国务院办公厅关于加快煤层气(煤矿瓦斯)抽采利用的若干意见》(国办发[2006]47 号)文件, 即要求煤矿区坚持采煤采气一体化, 提出“煤层中吨煤瓦斯含量高于规定标准且具备地面开发条件的, 必须统一编制煤层气和煤炭开发利用方案, 并优先选择地面煤层气抽采”。2007 年, 国家安全监管总局与国家煤矿安监局联合发布《关于加强煤矿瓦斯先抽后采工作的指导意见》, 提出煤矿区应加强先抽后采的力度、优先选择地面区域预抽方式。近年来, 基于我国以煤为主的能源禀赋现状及“双碳”背景形势需求, 国家相关部门相继提出了践行“双碳”目标的重大举措<sup>[2-3]</sup>。2008—2020 年, 为减少煤矿甲烷和二氧化碳大气排放, 助力国家“双碳”目标的实行, 国家科技部分别实施了“大型油气田及煤层气开发”重大专项科研项目, 从政策上和财政上鼓励支持煤矿区煤层气与煤炭协调开发的技术与装备攻关。

相对于非煤矿区地面煤层气开发, 煤矿区地面抽采主要服务于煤炭安全高效开采, 兼顾煤层气资源的高效利用<sup>[4-6]</sup>, 抽采目标煤层和目标区都无可选择性, 抽采时间和空间也须与煤炭采掘进度相配合、协调<sup>[7-10]</sup>, 因此抽采工程部署设计和效果预判就显得尤为重要。“十一五”之前, 国内煤矿区煤层气抽采尚停留在小型化地面试验和井下抽采防治方面, 国外主要煤层气开发国家很少涉及到煤矿区域, 国内外

关于煤矿区煤层气地面抽采部署及效果预评价的技术及成果比较欠缺, 依托国家油气重大专项开展了较为全面的研究, 立足于煤层气与煤炭协调开发理念<sup>[7,9]</sup>, 现基本形成了比较系统的煤矿区地面煤层气抽采部署及效果评价方法体系。

## 1 煤矿区地面煤层气抽采工程部署特点

按照煤炭采掘规划和生产情况, 煤矿一般划分为规划区、准备区、生产区和采空区 4 个区段<sup>[11]</sup>, 其中生产区为正在进行煤炭开采活动的区域, 准备区一般为 2 a 内开采区, 规划区一般为 5 a 后开采区域, 采空区为某一煤层煤炭开采后区域。规划区和准备区基本未受煤炭开采影响, 煤层气储层特征为原始条件; 生产区和采空区则经历了不同程度的煤炭采动影响, 煤层含气量、储层压力、地应力和渗透性等都发生了巨大变化。不同区煤层气抽采虽都可以采用地面方式, 但因可抽时间和区内地质条件的差异、受煤炭采动影响与否及程度不同, 其地面抽采部署方法也相差很大。按照受煤炭采动影响与否, 将煤矿区煤层气地面抽采分为预抽和采动抽采 2 种类型, 预抽主要适用于规划区和准备区, 一方面降低煤层含气量(瓦斯含量)、最大程度预先解决瓦斯隐患, 满足先抽后建、先抽后掘、先抽后采等要求, 另一方面也最大化实现开采前的煤层气资源清洁利用; 采动抽采则应用于生产区和采空区, 主要解决开采中和开采后的瓦斯隐患与煤层气资源回收问题。

地面预抽和采动抽采工程部署均主要以满足煤炭安全开采为目的、抽采经济性为目标。在地面预抽方面, 晋城矿区寺河与成庄煤矿已形成了比较系统成熟的模式和技术<sup>[11-15]</sup>, 抽采区含气量年降低 1.36~2.4  $\text{m}^3/\text{t}$ 、含气量达标后区域采煤速度提高 1 倍以上及煤炭资源回收率提高 10% 以上, 并实现了矿井瓦斯零超限<sup>[11]</sup>; 在地面采动抽采方面, 淮南矿区和淮北矿区也积淀了完善的技术体系, 并取得了大范围的实际应用效果<sup>[16-21]</sup>。对于国内其他煤矿区来说, 煤层气地面抽采尚未开始或处于起步阶段, 是否能用地面抽采方式实现瓦斯治理和煤层气资源利用的双重效应, 还有待于进一步论证, 本文形成的地面煤层气抽采工程部署方法体系将为这些矿区开展下一步工作提供方法手段。



## 2 地面煤层气抽采工程部署方法

依托“十二五”国家油气重大专项课题“煤矿区煤层气抽采产能预测技术”,在煤层气与煤炭协调开发的指导思想<sup>[7,9]</sup>上,形成了煤矿区分区段、分类型的地面煤层气抽采工程部署方法。

### 2.1 未采动区——地面预抽

未采动区煤层气基本表现为原始条件特征,地面抽采部署参照非煤矿区技术和经验的程度高,不同点表现为2方面:①抽采区受控于煤矿采掘规划,可能为新建矿井的掘进巷道、首采工作面、首采区,也可能为在产矿井的准备区和规划区,抽采区大小虽差异很大,但都有明确的范围和界限;②地面预抽工程有抽采时间的严格规定和抽采后含气量等参数的上限规定。在此情况下,地面预抽工程部署更要体现合理性和经济性。

本次部署技术囊括了分区选择和全区覆盖、局部设计与全区布局、效果预测与经济评价等内容,凝练形成较全面完善的方法体系,已在晋城矿区、两淮矿区、黔北矿区、阳泉矿区等多个煤矿进行了应用。首先,分析抽采区乃至整个煤矿区煤层气地质条件,重点研究目标煤层的展布特征、与邻近煤层空间组合特征、含气性分布特征、储层压力及渗透性特征、煤层气资源及其他地质条件等,查明抽采区目标煤层的可抽采地质条件及资源赋存规律。其后,在比选类似地质条件开发经验基础上,确定区内具有代表性条件的区块进行不同抽采方案的设计,包括:抽采方式、井网类型、井间距和主要工艺等,并利用抽采模拟技术对不同方案效果预测,对满足要求方案的投入和产出进行比较,优选出最具有经济性的方案。最后,按照代表性区块抽采方案对全抽采区进行工程部署,并以规避地质构造和地形交通等影响对部分井微调,直至形成满足全区抽采要求的地面抽采工程部署方案(图1)。

图1中最关键部分是代表性区块的抽采方案设计,该环节搭建了全区煤层气地质储层条件与抽采工程方案优化配置的桥梁。抽采方案设计的主要内容为抽采方式、井间距和主要工艺,通过依次优选才能形成一套最优配置的方案体系。目前,国内地面煤层气抽采技术已比较成熟<sup>[22-25]</sup>,抽采方式主要有垂直井(含丛式井)、水平对接井(U或L型)、多分支水平井、分段压裂水平井等,可总体归纳为垂直井和水平井两类。选择抽采方式时应综合煤层气地质特

征、煤矿安全高效开采生产需求、地形交通等因素,如抽采目标层为单一煤层、煤层分布稳定、地质构造比较简单,一般优先选择水平井方式;在抽采层数为多层且煤层间距较大情况下,以垂直井方式为主,并可采用丛式井布置方式规避地形交通不利等因素。对煤矿区来说,地面煤层气预抽以满足建矿前、近期采掘或当前开采的安全需要为主要目标,目标煤层大部分为单一煤层要求,故垂直井和水平井抽采方式皆可考虑,在优选时需重点考虑的是哪种方式能在有限抽采时间内实现抽采效果,并兼顾资源与经济最大化效益。

抽采方式优选过程中,应基于代表性区块抽采工程全覆盖的规模上,这就涉及到了井网类型和井间距的优化设计环节。垂直井井网布置方式通常有不规则井网、矩形井网、五点式井网等,不规则井网是地形限制或地质条件发生强烈变化情况时一种布井方式;矩形井网是沿主渗透和垂直于主渗透两个方向垂直布井且相邻四口井呈一矩形的方式,具有规整性好和布置方便等优点,是目前常用的布井方式;五点式井网要求沿主渗透方向和垂直于主渗透两个方向垂直布井,且相邻四口井呈一菱形,矩形井网和五点式井网是相对的,主要与抽采区大小和工程规模相关。在实际工程部署时,通常不会仅采用一种井网类型,往往以两种或多种井网类型相结合的方式,并根据地质构造、煤层气储层、煤矿生产设施分布、地形交通等进行灵活调整。我国煤层气商业性开发的垂直井井间距通常在300 m以上,煤矿区井间距一般较小,如已形成煤层气规模化地面抽采的晋城矿区一般采用200~300 m井间距。在采用多组水平井时也存在井网、井间距优化问题,优化内容包括水平井长度、分支数及长度、水平段压裂段数、井间距等。无论垂直井还是水平井,井间距小,有利于短期实现井间干扰效应,各井提早高产,煤层含气量可均匀、快速的降低,但小井间距意味着井数增多、投资增加,且过小的井间距也有可能出现压裂和排采的负效应干扰等施工问题;井间距大,井间干扰效应时间延长,气井产气峰值低、稳定产气时间长,但煤层含气量下降较慢、且各地段下降幅度相差很大。煤矿区地面煤层气抽采要求一定时间内将抽采区煤层含气量和储层压力降到某一上限以下,故井间距和井数优化工作非常关键,这也是地面抽采工程部署中的核心内容。

### 2.2 采动区——采动抽采

采动区地面煤层气抽采是煤矿区的特有方式,

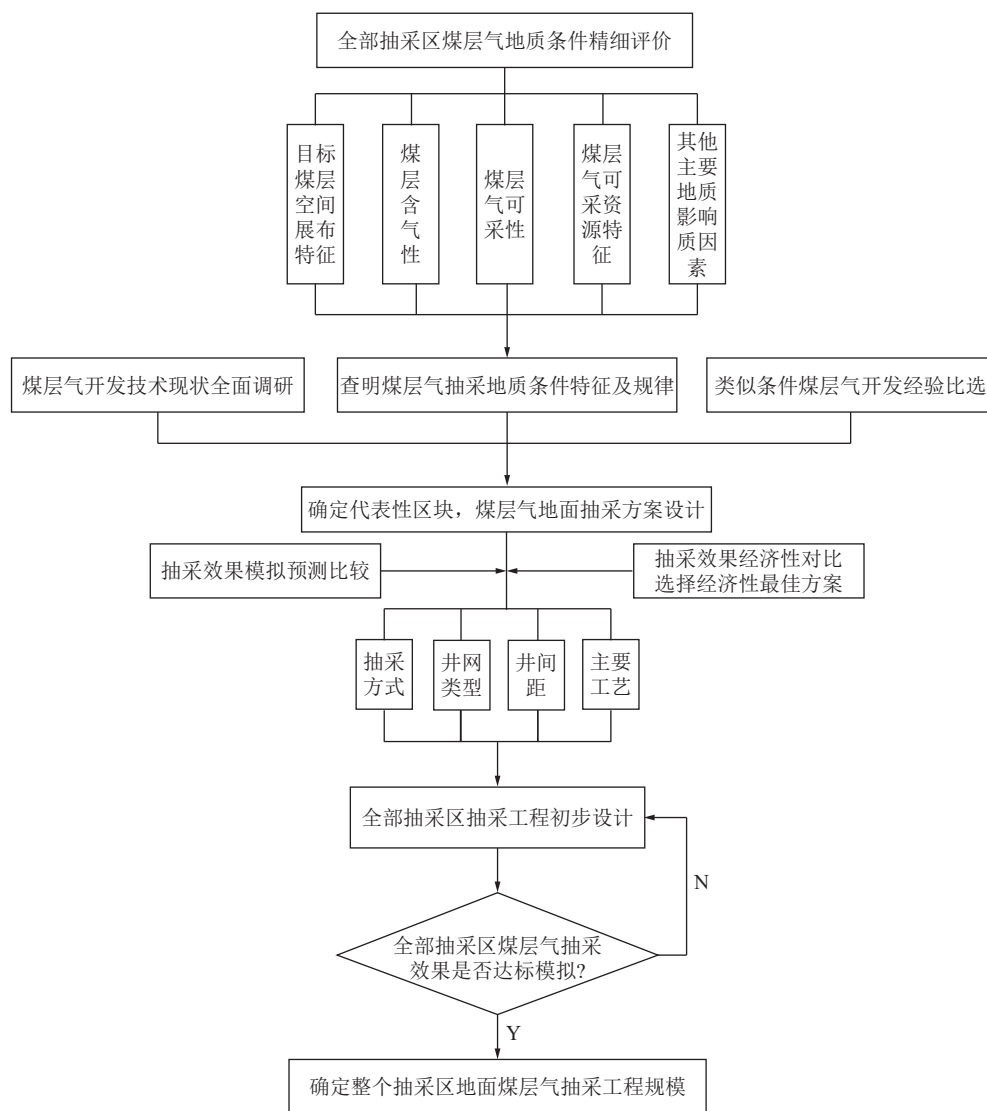


图 1 煤矿区煤层气地面预抽工程部署方法流程

Fig.1 Optimization design method of CBM pre-extraction engineering in coal mining area

利用煤层开采剧烈活动在煤岩层中产生的大量裂隙、煤岩层渗透性大大增强进行地面抽采<sup>[17-21,26-28]</sup>，主要用于回采工作面开采过程中和开采后的瓦斯抽采，该方式一般为负压抽采，具有时间短、气量大、甲烷浓度低的特点。根据“十二五”“十三五”期间研究成果，形成了工作面采动下地面抽采井的部署方法。首先，分析煤矿区开采煤层及其邻近层的煤层气地质条件，查明抽采工作面开采煤层与邻近煤层的组合关系；根据工作面空间布局、开采进度及规模等设计，确定开采煤层的垮落带、采动影响带和断裂带范围。其后，以工作面抽采全覆盖为指导思想分别设计垂直井和 L 型井部署方案，包括井数和井间距。最后，利用采动下抽采模拟技术比较分析不同方案的抽采效果，并采用经济评价方法对比工程投资与经济效益，优选出最经济合理的部署方案(图 2)。

目前，采动区地面抽采方式主要有垂直井和 L 型井 2 种(图 3)<sup>[12-15,19]</sup>，二者都可用于采动区本煤层和被保护层的卸压抽采。以两淮矿区和晋城矿区为例，L 型井水平段布置于开采煤层上部采动裂隙发育区和采动影响区，井身结构一般为三开结构，三开段采用裸眼或筛管完井；垂直井一般采用三开或四开井身结构，采动裂隙带下筛管不固井、开采煤层段采用木塞等堵孔方式。依据煤炭开采“O”型圈理论，采动区地面井井位布置已基本形成一致性认识，垂直井井位在距工作面巷道 30~80 m(图 4)，L 型井水平段则布置在该范围上部的断裂带。

采动地面抽采受煤炭开采实时动态影响，其抽采范围及边界具有时间和空间的双重动态变化特点，多井部署时需首先确定单井抽采范围及供气面积。“十二五”期间，以淮北矿区桃园煤矿、杨柳煤矿为对象进行了相关研究，开展了煤炭开采相似物理模

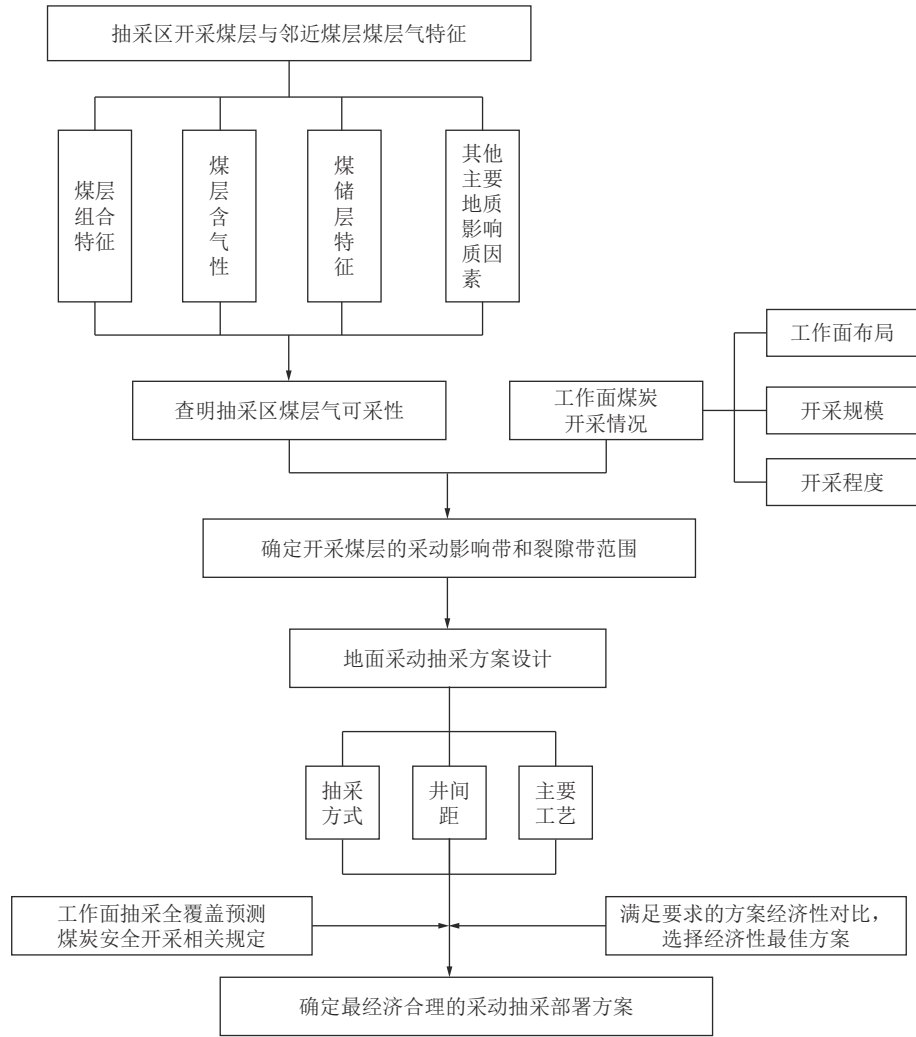


图 2 煤矿区煤层气地面采动抽采工程部署方法流程

Fig.2 Optimization design method of CBM mining extraction engineering in coal mining area

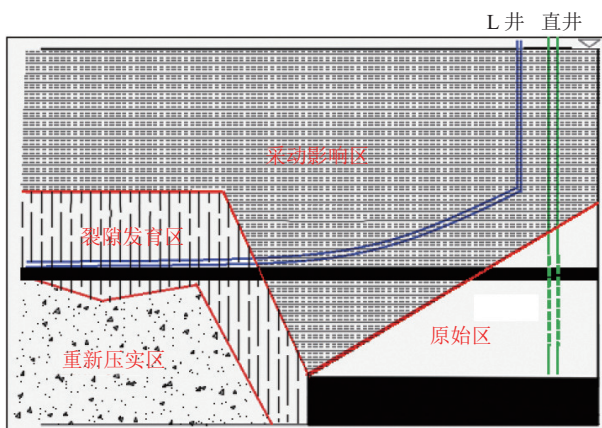


图 3 煤矿区地面煤层气采动抽采技术示意

Fig.3 Schematic diagram of surface CBM mining extraction technology

拟实验(图 5)、工作面开采工程中应力分布规律 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟(图 6)、地面采动抽采井现场动态实时监测(图 7)等工作, 现场利用电缆将直流式压力计放入井底监测井底流压, 流压计位于开采煤层上

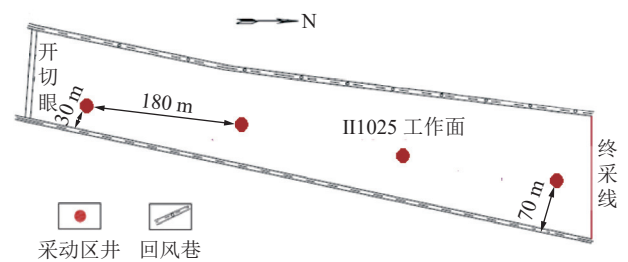


图 4 煤矿区地面采动垂直井位部署示意图(桃园煤矿为例)

约 10 m 位置; 地面测试仪器为便携式智能控制箱, 测试端与抽采井管路连接, 控制箱气体流量计、压力变送器分别监测抽采量和抽采负压(图 7)。根据模拟实验及监测结果(图 8), 将采动影响区域划分为 7 个区段, 开采位置前方 4 个区段: 强卸压区段(工作面开采位置至前方 15 m 左右)、应力集中区段(前方 15~45 m)、弱卸压区段(45~65 m)、近原始条件区段(>65 m); 开采后方划分为 3 个区段, 从开采位置向后依次为: 强卸压区段(开采位置~40 m)、应力恢





图 5 煤炭开采相似物理模拟实验

Fig.5 Similar physical simulation experiment of coal mining

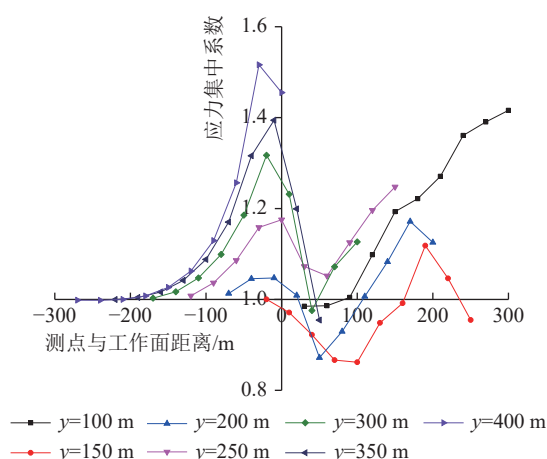


图 6 开采过程中应力集中系数数值模拟结果

Fig.6 Numerical simulation result of stress concentration coefficient

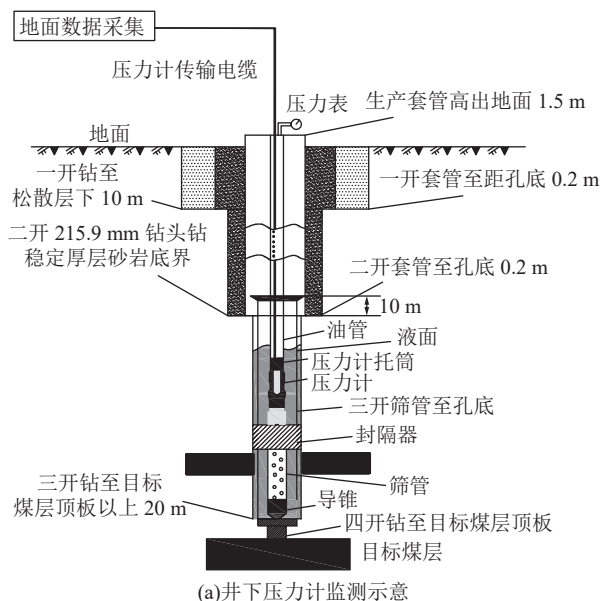
复区段(-40~-250 m)、压实后稳定区段(>-250 m) (图 9)。综合分析,认为采动区地面垂直井在煤层走向上的供气边界约为 250 m,为确保抽采效果,垂直井井间距设计在 200 m 左右。考虑到 L 型井施工难度,水平段最大一般不超过 1 000 m,在工作面长度较长时可沿走向方向增加井数实现全工作面抽采。

### 3 地面井抽采效果预测模拟技术

抽采效果预测模拟技术是煤层气地质与开发工程的纽带,也是预估煤矿区煤层气与煤炭资源协调开发效果的唯一手段。依托“十二五”油气重大专项课题“煤矿区煤层气抽采产能预测技术”,开展了煤矿区煤层气地面预抽模拟技术的梳理与采动抽采预模拟模拟技术的研究工作。

#### 3.1 地面预抽模拟技术

煤矿区煤层气地面预抽模拟技术及流程与原始条件下煤层气开发基本相同,主要包括几方面工作:建立地质模型、分析工程参数、制定排采制度、模拟计算、分析结果等<sup>[29-30]</sup>(图 10)。建立地质模型时,首先分析模拟区及邻区煤与煤层气地质资料,掌握整



(a)井下压力计监测示意



(b)地面监测现场

图 7 地面采动抽采井现场动态实时监测

Fig.7 On-site dynamic monitoring of CBM mining extraction well

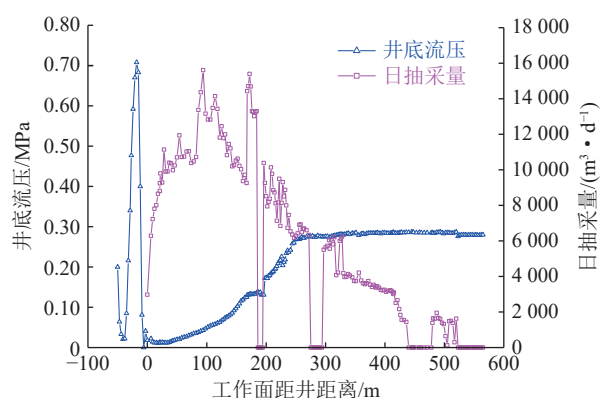


图 8 工作面开采过程中抽采井监测参数变化情况

Fig.8 Variation of parameters in CBM mining extraction well

个模拟区目标煤层的分布情况,重点分析影响煤层气产出的关键参数如煤层厚度、含气量、渗透率、储层压力、埋深等。地质模型所用参数一般应采用实际测试数据,缺乏实测数据时可借鉴邻区数据或采用间接法、经验法、类比法等求取。

工程参数应利用实际施工数据,包括钻井、储层改造和排采工程等。制定模拟排采制度时,结合实

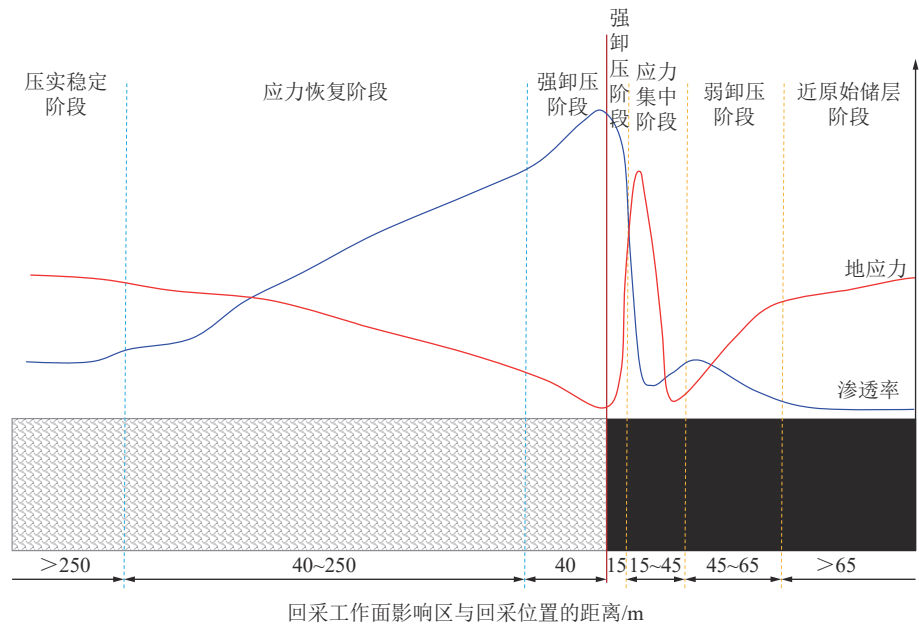


图9 采动影响范围分带变化特征

Fig.9 The zonal variation characteristics of mining influence area

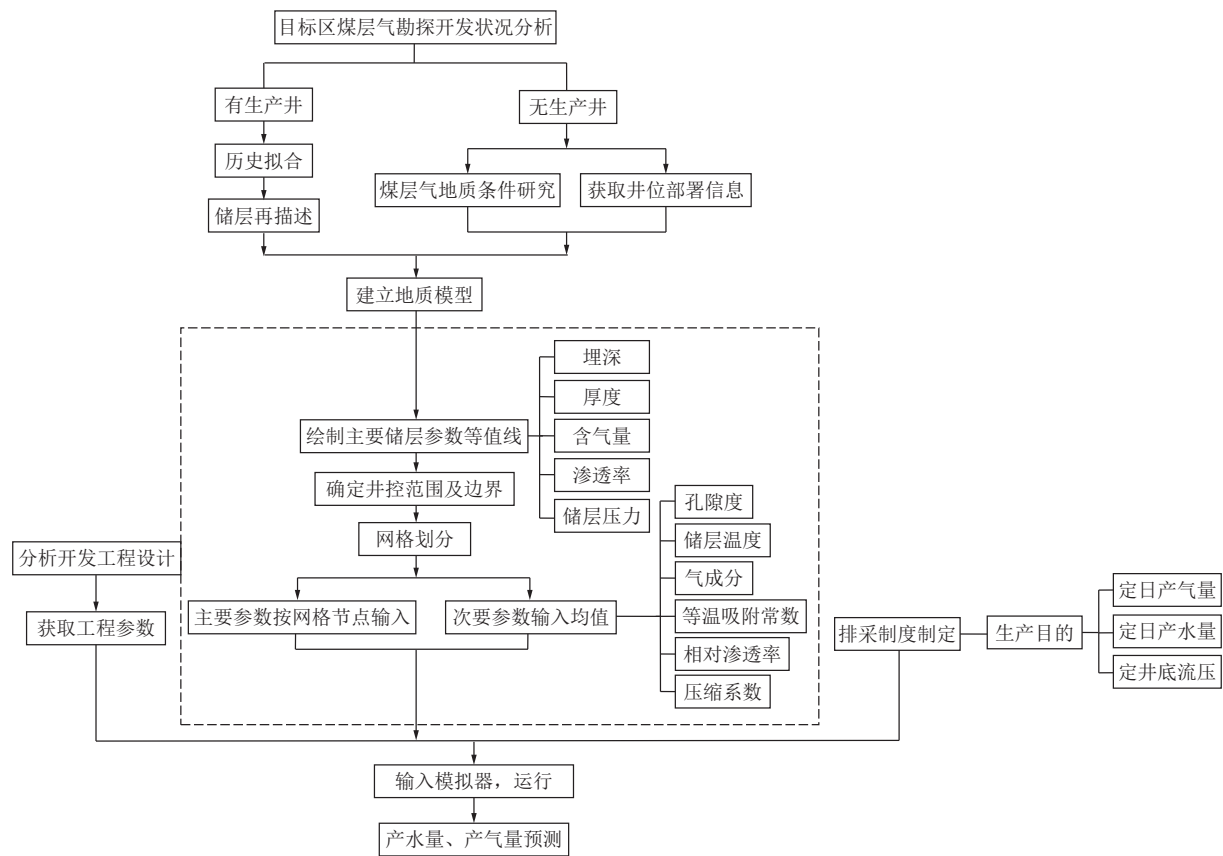


图10 非采动区地面煤层气抽采模拟方法流程

Fig.10 Flow chart of surface CBM pre-extraction simulation method

际情况选用定压或定产制度<sup>[29,31]</sup>,分时间节点设置模拟步长,时间节点精细程度依据不同情况及需求设计。最后将地质与工程参数输入模拟软件进行日产

气及累计产气量等预测、含气量与储层压力等变化模拟。需要强调一点的是,对于孔隙度、渗透率等测试准确度较低参数,应参考邻区或相似地质条件下



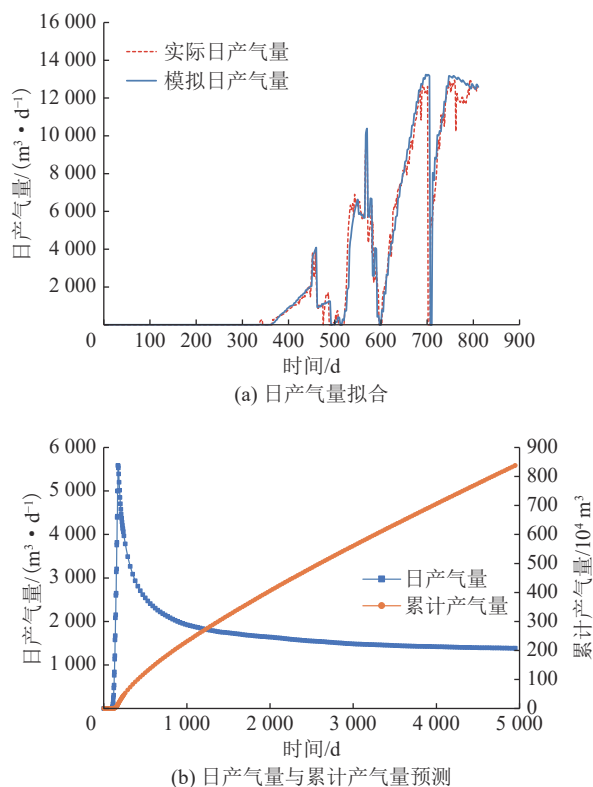


图 11 彬长矿区某矿地面直井抽采模拟结果

Fig.11 Simulation results of well extraction of a mine Bin-chang Mining Area

抽采情况利用产量拟合方法进行参数修正(图 11)。

### 3.2 采动区地面抽采模拟技术

煤炭高强度采动能极大增强煤层的渗透性,如淮南矿区 11-2 煤层开采后 13-1 煤层渗透率增幅达 2 880 倍<sup>[17]</sup>,高渗下煤层气赋存运移规律发生了巨大变化<sup>[26]</sup>,采动过程中煤层气处于动态运移中,抽采模拟范围及边界也处于时间和空间的双重变化中,研究及模拟的难度都非常大,本文基于气体运移受控于产出通道畅通程度的认识,以抽采井产气特征来反演渗透性变化规律,进而确定动态过程中的抽采范围。在两淮矿区部分煤矿代表性采动抽采井数据统计分析基础上(图 12),将采动区地面抽采分为 3 个阶段:初始产气阶段、高产阶段、产气衰减阶段,初始产气阶段约在煤炭开采位置,之后快速上升并约在开采后方 50~100 m 达到产气高峰,在开采后方 100 m 后抽采量缓慢下降直至稳定,整个日抽采量曲线呈正偏态分布特点,即高峰前曲线比正态分布曲线更陡、高峰后曲线则比较平缓,尾线无限延伸直至不变(图 13)。工作面开采推进方向的每一位置基本都表现出一个完整的产气曲线形态,全部工作面开采完毕后的整个抽采曲线为各个位置时刻的组合(图 13)。

综合煤炭开采相似物理模拟实验与数值模拟、工作面开采中参数现场监测等结果(图 5、图 6、图 8),初步揭示了采动下煤岩层渗透率变化特征,即在工作面开采位置前方约  $<15$  m 范围渗透率达到峰值、15~45 m 范围渗透率急速下降后再小幅上升、45~65 m 范围渗透率又缓慢降低、 $>65$  m 后渗透率趋于稳定并接近原始渗透率状态;工作面开采位置后方渗透率呈单峰后逐渐衰减的特征(图 9)。依据此特征,地质模型采用动边界和动态参数赋值方法,按照工作面开采进度分时间节点和网格节点分别给每个网格渗透率赋值,并通过差异化控制渗透率来间接反映不同时间和不同空间的含气量分布规律(图 14)。设计排采制度时,需按照工作面回采进度分时段进行精细设计,按照工作面开采进度及与抽采井距离,按照初始产气、高产、产气衰减 3 个阶段分别对渗透率、

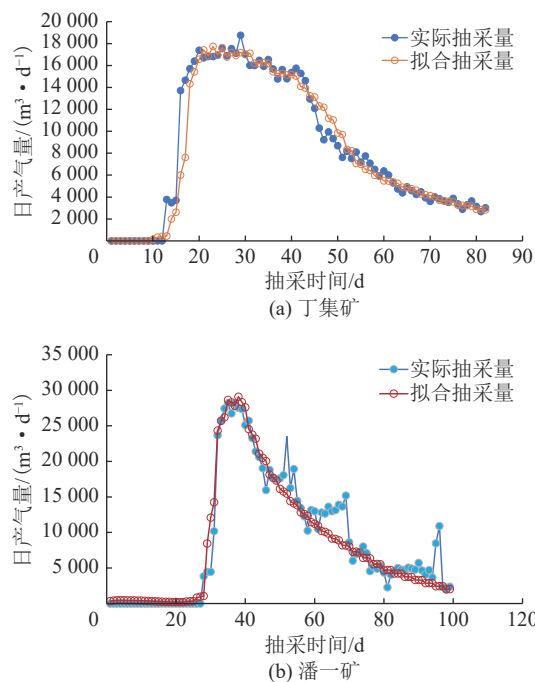


图 12 淮南矿区煤矿采动区直井抽采模拟曲线

Fig.12 Simulation curve of straight well extraction in mining area of Huainan Mining Area

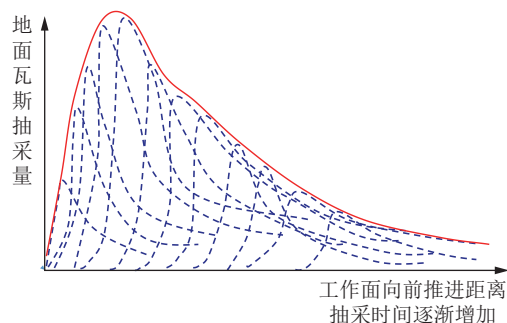


图 13 采动区煤层气地面抽采特征

Fig.13 Characteristics of surface CBM extraction in mining area

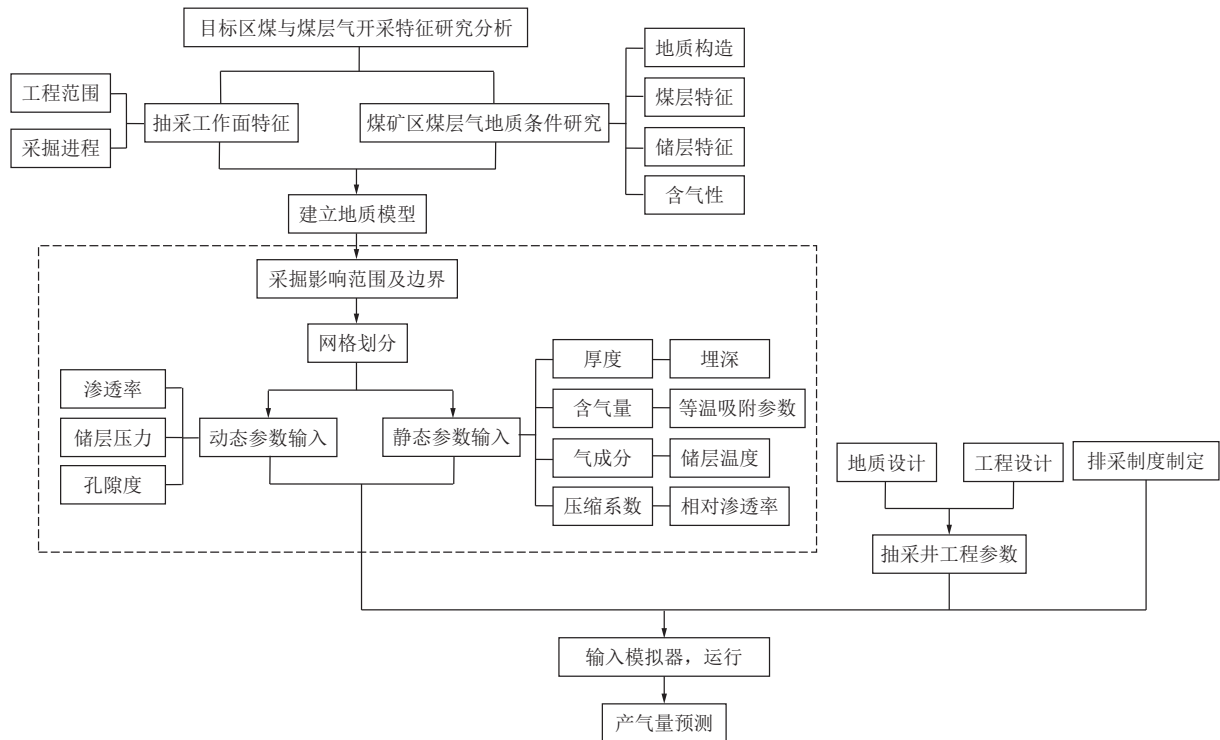


图 14 采动区地面煤层气抽采模拟方法流程

Fig.14 Flow chart of surface CBM mining extraction well simulation method

孔隙度等参数赋值来体现排采制度的分阶段设计。

地质建模中需要进行网格化处理,一般来说所有的地质参数都应采取不同网格不同赋值的精细方法,但考虑到个别参数测试数据少且差异小、模拟效率等方面,主要对煤层厚度、埋深、含气量、渗透率等进行网格化赋值,其它参数则都采用平均值的均一化处理。建模时应根据垂直井间距大小、水平井水平段长度等,在布井区域采用小网格或局部加密方式;采动抽采则依据工作面开采进度将整个抽采范围网格加密,单个网格大小一般不大于3 d的采掘推进距离。

#### 4 煤层气抽采经济效益评价方法

煤矿区地面煤层气抽采兼有资源和安全效应,更延伸一点的话还包含了减少瓦斯排放的温室效应,故其抽采效益不仅仅体现在产气收入的直接经济效益方面,更重要的在地面抽采后煤矿瓦斯治理难度和投资成本降低、煤炭开采效率提高、煤炭资源采收率增加等意义上。直接经济效益主要为产气收入及其他财政补贴等,其构成和获取方法相对比较简单,可借鉴非煤矿区地面开发方法,但间接经济效益的评价方法截至“十一五”基本未见系统的报道。

“十二五”期间,依托国家油气重大专项支持研

究了煤矿区地面抽采间接收入的构成。地面抽采降低了抽采区煤层的含气量和压力,这一方面会降低后期煤矿井下瓦斯治理的工程量和投资,另一方面也会提高煤炭开采效率和利用率、缩短煤炭采掘和回采时间,前者在时间和定量评价上容易实现,后者受煤矿管理、采煤方法和人为因素等影响难以评估<sup>[32]</sup>。为便于不同条件下的分类比较,确定间接效益收入指标时只考虑地面抽采前后井下瓦斯治理投入的变化,主要包括矿井通风、井下抽采系统、防治煤与瓦斯突出和瓦斯超限事故等费用,间接效益收入指标即为地面抽采后这些投入的减少值。首先,根据原始条件下煤层含气量及压力分布特征,设计满足煤炭安全掘采的井下瓦斯治理工程,计算其各项工程投入;根据地面抽采工程后区内煤层含气量模拟或测试情况,重新分析煤层含气量分布规律,再次设计并计算满足煤炭掘采安全要求的井下瓦斯治理工程量和投入;前后2次工程投入差值,即为地面煤层气抽采工程的间接经济效益。假设某一煤与瓦斯突出矿井一开采单元,预估井下瓦斯治理费用约1.5亿元。该单元实施了一定时间的地面煤层气抽采工程后,煤层含气量及瓦斯含量有了大幅度的下降,井下瓦斯治理费用降到了0.8亿元,那么减少的0.7亿元即为地面抽采工程产生的间接效益。在实际评估中,一般将井下瓦斯治理费用换算到1 m<sup>3</sup>

气的经验值,其与该单元内地面煤层气总抽采量乘积即认为是地面抽采工程的全部间接效益。例如某矿井地面抽采后井下瓦斯治理费用经验值为每方气减少 0.65 元,该矿井一开采单元地面煤层气抽采总量为 2 亿  $\text{m}^3$ ,则该单元地面抽采工程产生的全部间接效益为 1.3 亿元。

根据矿区煤层气地面抽采工程设计和抽采期评估,计算地面全部抽采工程总投资和工程成本,再依据全抽采期内的产气量模拟结果,结合产出气利用方式和销售价格情况,计算产气收入;根据间接经济效益计算结果,综合开展地面煤层气抽采工程的经济性评价(图 15)。

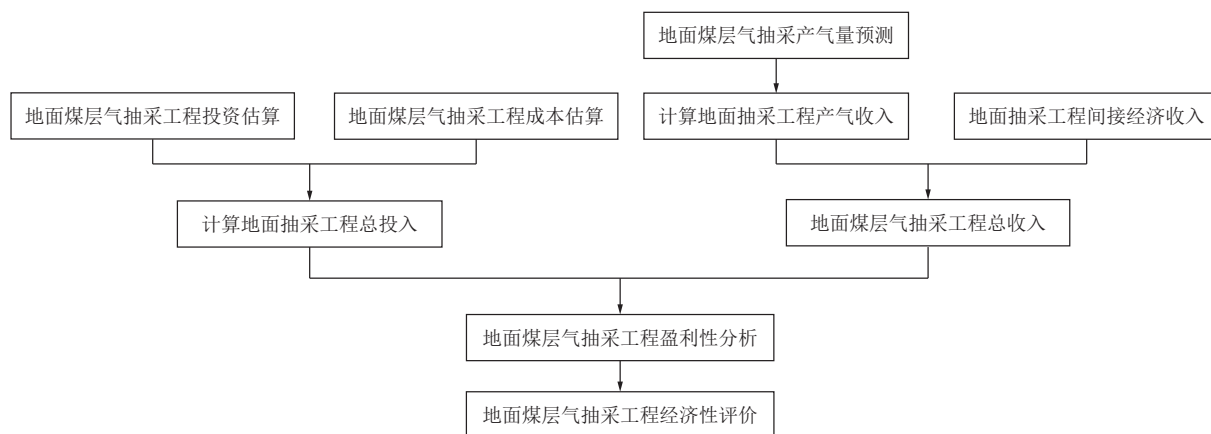


图 15 煤矿区煤层气地面抽采工程经济性评价方法

Fig.15 Economic evaluation method of surface extraction of CBM in coal mining area

间接经济效益对煤矿区煤层气抽采工程的盈利性具有比较大的影响。假设某一煤矿设计地面煤层气抽采井约 300 口,煤炭开采前可抽采年限 10 a,建设工程期 2 a,地面实际抽采时间共 8 a,采用抽采模拟方法预测 8 a 产气量约 9 亿  $\text{m}^3$ ,售气收入与财政补贴共折合 1.5 元/ $\text{m}^3$ ,间接效益收入按照 0.65 元/ $\text{m}^3$  计算。

煤矿地面煤层气抽采盈利性计算结果为:

地面煤层气全部工程投资/万元	82 000
地面抽采 8 a 成本费用/万元	8 100
地面抽采 8 a 产气量/ $\text{m}^3$	$90\,000 \times 10^4$
1.5 元/ $\text{m}^3$ 计算,产气收入/万元	135 000
0.65 元/ $\text{m}^3$ 经验值,间接效益收入/万元	58 500
税后财务内部收益率(无间接效益)/%	1.40
税后财务内部收益率(含间接效益)/%	9.24

以上经济盈利性分析显示,不包含间接效益时,300 口抽采井的税后财务内部收益率仅 1.4%,纳入间接效益的税后财务内部收益率达到 9.24%,按照财务内部基准收益率 8% 评估,增加间接效益指标后地面煤层气抽采工程实现了盈利,这也充分体现了煤层气与煤炭协调开发的正效应。

## 5 结 语

1) 依托“十一五”“十二五”“十三五”国家油气

重大专项,基于煤矿区煤层气与煤炭协调开发指导理念,研究了煤矿区地面煤层气抽采部署的特点,按照受煤炭采动影响与否分为地面预抽和采动抽采两种类型,在对两种类型抽采对象、可抽采时间和空间特征研究基础上,分别形成了地面预抽和采动抽采的工程部署方法体系。

2) 煤层气抽采效果预测模拟是实现煤矿区煤层气与煤炭协调开发的关键技术,本次梳理形成了煤层气地面预抽模拟技术体系;查明了采动抽采下关键煤储层参数变化规律,基于渗透性主控气体运移规律的认识建立了采动抽采预测的模拟方法。

3) 提出了煤矿区地面煤层气抽采间接经济效益的评价指标,即地面抽采前后抽采区井下瓦斯灾害治理投入的差值,并建立了地面煤层气抽采工程的经济性综合评价方法。

## 参考文献(References):

- [1] 刘成林,朱 杰,车长波,等.新一轮全国煤层气资源评价方法与结果[J]. *天然气工业*, 2009, 29(11): 130-132.  
LIU Chenglin, ZHU Jie, CHE Changbo, *et al.* Methodologies and results of the latest assessment of coalbed methane resources in China[J]. *Nature Gas Industry*, 2009, 29(11): 130-132.
- [2] 王国法,任世华,庞义辉,等.煤炭工业“十三五”发展成效与“双碳”目标实施路径[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(9): 1-8.  
WANG Guofa, REN Shihua, PANG Yihui, *et al.* Development achievements of China's coal industry during the 13<sup>th</sup> Five Year

- Plan period and implementation path of "dual carbon" target[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(9): 1-8.
- [3] 刘峰. 双碳背景下煤炭安全区间与绿色低碳技术路径[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(1): 1-15.
- LIU Feng. Research on coal safety range and green low-carbon technology path under the dual-carbon background[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 1-15.
- [4] 张群. 关于我国煤矿区煤层气开发的战略性思考[J]. *中国煤层气*, 2007, 4(4): 3-5.
- ZHANG Qun. Strategic thinking on coal mine methane development in China[J]. *China Coalbed Methane*, 2007, 4(4): 3-5.
- [5] 王刚, 杨曙光, 张寿平, 刘学良. 新疆煤矿区瓦斯抽采利用技术现状及展望[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(3): 154-161.
- WANG Gang, YANG Shuguang, ZHANG Shouping, LIU Xueliang. Status and prospect of coal mine gas drainage and utilization technology in Xinjiang Coal Mining Area[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(3): 154-161.
- [6] 谢和平, 周宏伟, 薛东杰, 等. 我国煤与瓦斯共采: 理论、技术与工程[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(8): 1391-1397.
- XIE Heping, ZHOU Hongwei, XUE Dongjie, *et al.* Theory, technology and engineering of simultaneous exploitation of coal and gas in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(8): 1391-1397.
- [7] 刘见中, 沈春明, 雷毅, 等. 煤矿区煤层气与煤炭协调开发模式与评价方法[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(5): 1221-1229.
- LIU Jianzhong, SHEN Chunming, LEI Yi, *et al.* Coordinated development mode and evaluation method of coalbed methane and coal in coal mine area in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(5): 1221-1229.
- [8] 刘见中, 孙海涛, 雷毅, 等. 煤矿区煤层气开发利用新技术现状及发展趋势[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(1): 258-267.
- LIU Jianzhong, SUN Haitao, LEI Yi, *et al.* Current situation and development trend of coalbed methane development and utilization technology in coal mine area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 258-267.
- [9] 矿区煤层气开发项目组. 煤层气与煤炭协调开发理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [10] 张千贵, 李权山, 范翔宇, 等. 中国煤与煤层气共采理论技术现状及发展趋势[J]. *天然气工业*, 2022, 42(6): 130-145.
- ZHANG Qiangui, LI Quanshan, FAN Xiangyu, *et al.* Current situation and development trend of theories and technologies for coal and CBM co-mining in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(6): 130-145.
- [11] 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.
- ZHAO Xusheng, MA Guolong. Research progress and prospect of key technology of intelligent gas drainage in coal mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(5): 27-34.
- [12] 李国富, 付军辉, 李超, 等. 山西重点煤矿采动区煤层气地面抽采技术及应用[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(12): 83-89.
- LI Guofu, FU Junhui, LI Chao, *et al.* Surface drainage technology and application of CBM in key mining areas of Shanxi Province[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(12): 83-89.
- [13] 孟召平, 李国富, 杨宇, 等. 晋城寺河井区煤矿采空区煤层气地面抽采关键技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(1): 240-247.
- MENG Zhaoping, LI Guofu, YANG Yu, *et al.* Study on key technology for surface extraction of coalbed methane in coalmine goaf from Sihe wells area, Jincheng[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(1): 240-247.
- [14] 孟召平, 李国富, 田永东, 等. 晋城矿区废弃矿井采空区煤层气地面抽采研究进展[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(1): 204-211.
- MENG Zhaoping, LI Guofu, TIAN Yongdong, *et al.* Research progress on surface drainage of coalbed methane in abandoned mine goafs of Jincheng mining area[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(1): 204-211.
- [15] 周显俊, 李国富, 李超, 等. 煤矿采空区煤层气地面开发技术及工程应用-以沁水盆地晋城矿区为例[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(5): 66-72.
- ZHOU Xianjun, LI Guofu, LI Chao, *et al.* Ground development technology and engineering application of CBM in coal mine goafs: A case study of Jincheng mining area in Qinshui Basin[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(5): 66-72.
- [16] 许家林, 钱鸣高. 地面钻井抽放上覆远距离卸压煤层气试验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2000(1): 78-81.
- XU Jialin, QIAN Minggao. Evolution of mine-induced stress concentration shell and stress relief body and its gas migration[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2000(1): 78-81.
- [17] 袁亮. 松软低透煤层群煤层气抽采理论与技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004.
- [18] 梁云培. 淮南矿区地面钻井瓦斯抽采技术实践[J]. *采矿与安全工程学报*, 2007(4): 409-413.
- LIANG Yunpei. Practice of methane drainage by surface well drilling in Huainan Mining Area[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2007(4): 409-413.
- [19] 袁亮, 郭华, 李平, 等. 大直径地面钻井采空区采动区瓦斯抽采理论与技术[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(1): 1-8.
- YUAN Liang, GUO Hua, LI Ping, *et al.* Theory and technology of goaf gas drainage with large-diameter surface boreholes[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(1): 1-8.
- [20] 陈金华, 胡千庭. 地面钻井抽采采动卸压瓦斯来源分析[J]. *煤炭科学技术*, 2009, 37(12): 38-42.
- CHEN Jinhua, HU Qianting. Analysis on mining released gas sources for surface borehole drilling and gas drainage[J]. *Coal Science and Technology*, 2009, 37(12): 38-42.
- [21] 袁亮. 卸压开采抽采瓦斯理论与煤与瓦斯共采技术体系[J]. *煤炭学报*, 2009, 34(1): 5-12.
- YUAN Liang. Theory of pressure-relieved gas extraction and technique system of integrated coal production and gas extraction[J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(1): 5-12.
- [22] 张群, 葛春贵, 李伟, 等. 碎软低渗煤层顶板水平井分段压裂煤层气高效抽采模式[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(1): 150-159.
- ZHANG Qun, GE Chungui, LI Wei, *et al.* A new model and application of coalbed methane high efficiency production from



- broken soft and low permeable coal seam by roof strata-in horizontal well and staged hydraulic fracture[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(1): 150–159.
- [23] 徐凤银, 肖芝华, 陈 东, 等. 我国煤层气开发技术现状与发展方向[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(10): 205–215.  
XU Fengyin, XIAO Zhihua, CHEN Dong, *et al.* Current status and development direction of coalbed methane exploration technology in China[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(10): 205–215.
- [24] 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.  
YE Jianping, HOU Songyi, ZHANG Shouren. Progress of coalbed methane exploration and development in China during the 13th Five-Year Plan period and the next exploration direction[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(3): 15–22.
- [25] 高德利, 毕延森, 鲜保安. 中国煤层气高效开发井型与钻完井技术进展[J]. *天然气工业*, 2022, 42(6): 1–18.  
GAO Deli, BI Yansen, XIAN Bao'an. Technical advances in well types and drilling & completion for high-efficient development of coalbed methane in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(6): 1–18.
- [26] 董钢锋, 胡千庭, 王 振, 等. 工作面采动瓦斯流场分布规律研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2012, 29(4): 581–585.  
DONG Gangfeng, HU Qianting, WANG Zhen, *et al.* Study on distribution of gas flow fields in working face under the condition of mining[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2012, 29(4): 581–585.
- [27] 降文萍, 张 群, 姜在炳, 等. 基于产气量模拟的采动影响下煤层渗透性变化规律[J]. *煤矿安全*, 2016, 47(11): 19–22.  
JIANG Wenping, ZHANG Qun, JIANG Zaibing, *et al.* Research on the permeability change of coal seam under the mining influence based on the gas production simulation[J]. *Safety in Coal Mines*, 2016, 47(11): 19–22.
- [28] JIANG Wenping, ZHAO Long, CHENG Bin. Variation characteristics of coal rock layer and gas extraction law of surface well under mining pressure relief[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14: 297–306.
- [29] 张 群. 煤层气储层数值模拟模型及应用的研究[D]. 西安: 煤炭科学研究总院西安分院, 2002.  
ZHANG Qun. Study of coal seam gas reservoir simulation numerical model and application[D]. Xi'an: Xi'an Branch of Coal Research Institute, 2002.
- [30] 张 群. 国外煤层气储层数值模拟技术的现状及发展趋势[J]. *煤田地质与勘探*, 2004, 32(S): 18–24.  
ZHANG Qun. Present situation and development trend of CBM reservoir numerical simulation in foreign countries[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2004, 32(S): 18–24.
- [31] 赵兴龙, 汤达祯, 张 岩. 延川南煤层气田深部煤层气藏排采制度的建立与优化[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(6): 251–257.  
ZHAO Xinglong, TANG Dazhen, ZHANG Yan. Establishment and optimization of drainage system for deep coalbed methane in South Yanchuan CBM Field[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(6): 251–257.
- [32] 黄 鹤. 煤矿区煤层气抽采经济评价技术与应用[J]. *煤炭经济研究*. 2019, 12: 76–79.  
HUANG He. Economic evaluation technology and application of CBM extraction in coal mine area[J]. *Coal Economic Research*. 2019, 12: 76–79.