



移动扫码阅读

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 gobs of Jincheng mining area[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 204-211.

## 晋城矿区废弃矿井采空区煤层气地面抽采研究进展

孟召平<sup>1,2</sup>, 李国富<sup>2</sup>, 田永东<sup>2</sup>, 王宇红<sup>2</sup>, 李超<sup>2</sup>, 陈浩越<sup>1</sup>, 吴迪<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083; 2. 煤与煤层气共采国家重点实验室, 山西 晋城 048012)

**摘要:**废弃矿井煤层气资源丰富,抽采废弃矿井煤层气,已成为煤矿区煤层气的重要资源之一。基于山西晋城矿区废弃矿井煤层气抽采实际,系统介绍了废弃矿井采空区煤层气赋存特征及其地面抽采技术的研究进展,分析了废弃矿井采空区煤层气地面抽采研究现状和存在的问题,提出了目前我国废弃矿井采空区煤层气地面抽采研究面临的关键科学问题和研究内容。研究表明,煤炭开采形成的冒落-断裂带,为采空区煤层气赋存提供了储集空间。废弃矿井采空区煤层气主要来源于煤柱及残留煤层、临近未采煤层和围岩中的游离气和吸附气,基于体积法对废弃矿井采空区吸附气和游离气资源分别进行计算和评价。为有效解决采空区上部含水层涌水对钻井井身稳定性及抽采效果的影响,将采空区煤层气抽采井身结构由二开优化为三开结构,优先采用压缩空气潜孔锤钻井技术,用氮气取代空气作为循环介质安全揭露含气断裂带的井工艺技术;根据晋城矿区废弃矿井采空区煤层气井抽采过程中压力和日产气量的变化特征,将采空区煤层气井抽采划分为自由放喷、气量快速下降、稳压产气和定量产气 4 个阶段,并提出了适用于废弃矿井采空区煤层气抽采的“四段制”抽采控制方法;最后,指出了目前面临“废弃矿井煤层气赋存规律及其控制机理和废弃矿井煤层气抽采条件评价及抽采参数优化方法”2 个关键科学问题和“废弃矿井煤层气赋存规律及其控制机理、废弃矿井煤层气资源评价模型与方法及废弃矿井采空区煤层气抽采技术”等研究内容。

**关键词:**废弃矿井;采空区;煤层气;赋存特征;地面抽采

中图分类号:TD712.6

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2022)01-0204-08

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

MENG Zhaoping<sup>1,2</sup>, LI Guofu<sup>2</sup>, TIAN Yongdong<sup>2</sup>, WANG Yuhong<sup>2</sup>, LI Chao<sup>2</sup>, CHEN Haoyue<sup>1</sup>, WU Di<sup>1</sup>

(1. College of Geosciences and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;

2. State Key Laboratory of Coal and CBM Co-mining, Jincheng 048012, China)

**Abstract:** There are abundant coalbed methane (CBM) resources in abandoned coal mines, and the extraction of CBM from abandoned coal mines has become one of the important CBM resources in coal mining areas. Based on the practice of CBM extraction in abandoned mines in Jincheng mining area of Shanxi Province, this paper systematically introduced the occurrence characteristics of CBM resources in abandoned mine gob and its surface drainage technology, and analyzed the research status and existing problems of CBM surface drainage in abandoned mine gob. The current key scientific problems and research contents of surface drainage of CBM in abandoned mine gob in China have been put forward. The research shows that the caving-fracture zone formed by coal mining provides a reservoir space for the occurrence of CBM in the gob. The CBM in the abandoned mine gob mainly contains adsorbed gas and free gas which comes from the coal pillars, residual coal seams, adjacent unmined coal seams and surrounding rocks. Based on the volumetric method, the calculation methods of adsorbed gas and free gas resources are used to calculate and evaluate the CBM resources of abandoned coal mine. In order to effectively solve the influence of water inrush from the upper aquifer in the gob on the stability of the drilling well and the drainage effect, the wellbore structure of the CBM extraction well in the gob is optimized from second spud to third spud structure, and compressed air down-

收稿日期:2021-11-10;责任编辑:黄小雨

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42172190);山西省科技重大专项资助项目(20201102001,20191102001)

作者简介:孟召平(1963—),男,湖南汨罗人,教授,博士生导师,博士。E-mail: mzp@cumb.edu.cn

the-hole (DTH) hammerdrilling technology is preferentially used, and the nitrogen is used instead of air as the circulating medium to safely expose the well technology of the gas-bearing fracture zone. According to the variation characteristics of pressure and daily gas production in the extraction process of CBM in gob of abandoned mine in Jincheng mining area, the CBM extraction in gob is divided into four stages: free ejection, rapid gas decline, stable gas production and quantitative gas production, and a “four-stage” extraction control method suitable for coalbed methane extraction in abandoned mine gobs is proposed. Finally, it points out the two key scientific issues currently facing “the occurrence law of coalbed methane in abandoned mines and its control mechanism and the evaluation of coalbed methane extraction conditions in abandoned mines and the optimization of extraction parameters” and “the occurrence law of coalbed methane in abandoned mines and its research content such as control mechanism, CBM resource evaluation models and methods in abandoned mines, and CBM extraction technology in abandoned mine gobs.”

**Key words:** abandoned mine; gob; coalbed methane; occurrence characteristics; surface drainage

## 0 引言

我国是一个煤炭资源大国(煤炭资源量约为  $5.82 \times 10^{12}$  t),煤炭资源保有量为  $1.94 \times 10^{12}$  t,其中已利用资源量为  $0.40 \times 10^{12}$  t(约占 20.8%),尚未利用煤炭资源量为  $1.54 \times 10^{12}$  t(约占 79.2%)<sup>[1]</sup>。煤炭作为我国主要能源之一,对工业发展起着稳定支撑作用,是经济社会发展的有力保障。煤炭工业“十四五”高质量发展指导意见中明确提出“十四五”期间煤炭在我国能源结构中的主体地位不会改变。需深入贯彻落实新发展理念和能源安全新战略,加快建设清洁低碳、安全高效的现代煤炭工业体系,为我国如期实现碳达峰、碳中和战略目标奠定基础,推动形成煤炭高质量发展新格局。越来越多的生产矿井因煤炭资源枯竭而报废,也有部分落后产能矿井不符合目前国家安全生产的要求,或开采成本高、亏损严重,面临关闭或废弃<sup>[2-3]</sup>,据统计,“十二五”期间,我国淘汰落后煤矿 7 100 处,淘汰落后产能 5.5 亿 t/a,其中关闭煤矿产能 3.2 亿 t/a<sup>[3]</sup>。到 2020 年,我国废弃矿井数量将达到 1.2 万处,预计到 2030 年数量将到达 1.5 万处<sup>[2-3]</sup>,初步估计,目前废弃矿井煤炭资源高达 420 亿 t 以上,煤层气近 5 000 亿  $m^3$ 。山西省作为煤炭资源大省,新中国成立以来,已累计生产煤炭 200 亿 t 左右,积累了众多废弃矿井采空区。据统计,山西省共有 4 700 余处废弃矿井,有开发利用价值的废弃矿井采空区面积约 2 052  $km^2$ ,初步估算,残余煤层气资源量约 726 亿  $m^3$ 。针对这一资源,山西省自然资源厅与山西省能源局联合下发《关于开展煤炭采空区(废弃矿井)煤层气抽采试验有关事项的通知》(晋自然资发[2019]54 号),首次鼓励和引导各类市场主体积极参与、有序实施煤炭采空区(废弃矿井)煤层气抽采试验,为有效开发利用废弃矿井煤层气资源提供有利支持。

综上所述,煤炭作为我国主体能源,经过长期开

采,废弃矿井数量巨大,废弃矿井煤层气资源丰富,抽采废弃矿井煤层气对于推动我国煤矿区煤层气开发、消除采空区瓦斯溢出安全隐患、增加清洁能源供应、缓解常规油气供应紧张状况和保护大气环境等多方面均具有十分重要的意义。

## 1 废弃矿井采空区煤层气赋存特征

### 1.1 采空区煤层气赋存状态

废弃矿井采空区煤层气主要来源于已开采煤体、煤柱及残留煤层、邻近未采煤层和围岩中的吸附气和游离气(图 1)<sup>[4-5]</sup>。

煤层受到地下采掘扰动下,煤体产生采动裂隙,微观结构发生改变,煤炭开采导致采动煤岩体应力降低,当煤储层压力低到煤层甲烷的临界解吸压力以下时,煤中甲烷由吸附态转化为游离态。随着地下采煤范围的不断扩大,受到采动影响的煤(岩)层范围也不断扩大,直到矿井被废弃,这些解吸出的游离态甲烷一部分随着通风排放到大气中,一部分以游离态保存在煤(岩)体孔裂隙空间内,还有一部分溶解于矿井水中并随矿井排水系统排出。吸附态的甲烷主要分布在未开采煤层和开采后的残余煤柱中;游离态甲烷主要赋存于废弃矿井采空区垮落带及断裂带中。废弃矿井采空区垮落带及断裂带内煤层气富集,在一定程度上服从于常规天然气的构造控气规律;废弃矿井未开采煤层和开采后的残余煤柱内煤层气富集却可能更多地受控于煤储层的吸附特性和温度-压力条件。

采动裂隙是废弃矿井煤层气赋存规律研究的基础,控制着废弃矿井采空区地下水和煤层气渗流及其赋存分布。国内外学者在采动岩体结构及覆岩采动断裂带发育规律研究方面开展了大量工作,建立了采场岩层移动破断与采动裂隙分布的“横三区”、“竖三带”的总体认识<sup>[6-11]</sup>,为废弃矿井采空区煤层气赋存规律研究和资源量评价提供了理论依据。

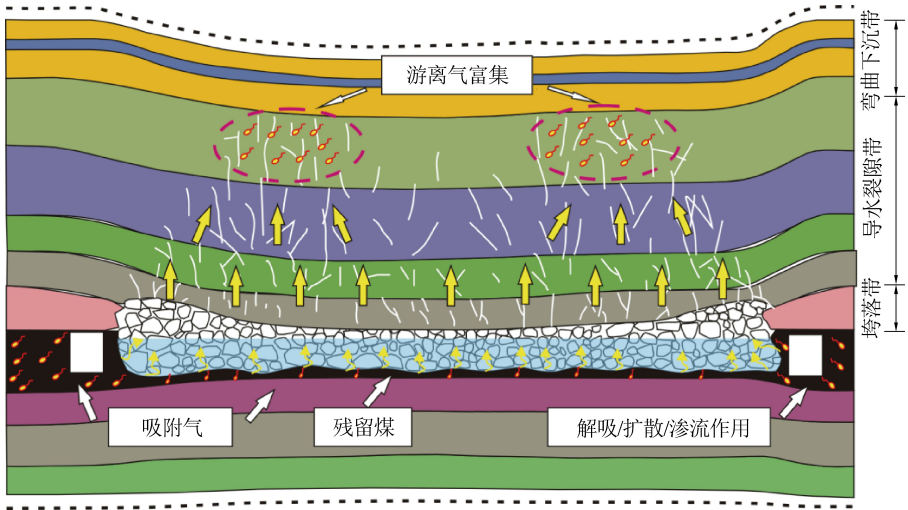


图 1 废弃矿井采空区煤层气赋存分布模式<sup>[4]</sup>

Fig.1 Occurrence and distribution mode of CBM in gob<sup>[4]</sup>

1.2 采空区煤层气成分

废弃矿井采空区中煤层气与未开采煤层煤层气在气体成分上也存在一定差异性,其中废弃矿井采空区中 CH<sub>4</sub>含量相对较低,且会含有一定量

的 N<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>等成分(表 1)。废弃矿井采空区煤层甲烷浓度变化主要是因采煤方法和采空区密闭性所致,这些因素对资源量的计算和煤层气抽采产生影响。

表 1 采空区煤层气成分检测结果<sup>[4]</sup>

Table 1 Detection results of CBM composition in gob<sup>[4]</sup>

采空区	试验井编号	体积分数/%						总量
		CH <sub>4</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	重烃	
晋圣	1 号	86.29	1.68	10.07	1.50	—	0.052	99.59
	2 号	93.40	0.55	4.72	0.62	—	0.064	99.35
	3 号	91.06	0.35	5.03	0.70	0.000 3	—	—
	4 号	95.19	0.11	1.11	0.76	0.000 4	—	—
寺河	5 号	94.74	0.33	2.20	0.70	—	0.075	98.05
	6 号	38.89	11.80	48.33	0.68	—	0.010	—
	7 号	45.15	9.14	43.16	0.61	—	0.022	—
岳城	8 号	3.60	—	—	—	—	—	—
	9 号	5.97	20.20	72.60	0.27	—	0.050	—
	10 号	73.00	0.47	24.40	0.01	—	0.021	—

与相似煤阶(或有机质成熟度)常规储层中的煤层气相比,废弃矿井采空区煤层气稳定碳同位素偏轻,反映煤层气存在运移效应,采空区煤层气富集所要求的“圈闭”条件与常规天然气富集条件更趋接近。碳同位素偏轻的现象多是煤层气在生成之后发生解吸—扩散—运移过程的客观反映<sup>[12-15]</sup>。

由于废弃矿井采空区地质条件复杂,煤层气资源相对分散不均,煤层气富集规律和资源状况不清,其评价理论与方法不完善,煤层气勘探开发存在着较大的盲目性。因此开展废弃矿井煤层气赋存机理、富集规律和资源状况的研究尤为重要。

1.3 采空区煤层气资源评价

废弃矿井煤层气资源是废弃矿井抽采设计的基础,针对这一问题,相关学者开展了废弃矿井煤层气资源评价研究<sup>[16-19]</sup>。根据物质平衡原理,废弃矿井煤层气资源量应该等于采矿活动前储集在整个受采矿影响范围内的煤层气资源量减去整个矿井开采活动过程中损失的煤层气资源量以及采矿活动结束后直到开始进行废弃矿井煤层气开发之前所有损失的资源量。通常采用物质平衡法来估算废弃矿井煤层气资源量,并建立了采空区煤层气资源评价计算模型,为废弃矿井煤层气资源抽采提



供了理论依据,韩保山等<sup>[16]</sup>结合残余瓦斯压力理论,探讨了废弃矿井煤层气资源量的计算范围和方方法;李日富等<sup>[17]</sup>分析了采动稳定区煤层气资源量评估与传统煤层气资源量评估的联系及区别,构建了采动稳定区煤层气资源量评估模型;CHEN等<sup>[18]</sup>建立了有关于采空区气体体积与组分的流管模型和守恒方程,通过对气体浓度场模拟,得到了采空区气体的分布规律。文光才等<sup>[19]</sup>通过分析煤层气的来源、赋存空间和关键影响因素,建立了基于“间接减法”理念的采动稳定区(废弃矿井或老采空区)煤层气资源评估模型,提出了采动稳定区煤层气资源评估方法。孟召平等<sup>[5]</sup>在对煤炭开采覆岩变形破坏规律研究的基础上,通过理论分析和数学推导,建立了废弃矿井煤层气吸附气与游离气资源量评价模型和方法,对山西晋煤集团晋圣煤矿采空区煤层气资源进行了评价。以上研究为废弃矿井煤层气抽采奠定了基础和条件。

## 2 废弃矿井采空区煤层气地面抽采国内外研究现状

长期以来,在煤炭地下开采过程中煤层气被视为有害气体,大多进行井下抽放,利用率很低,从资源的角度对煤层气的认识较少。直到20世纪80年代,美国率先成功利用钻井水力压裂和排水降压等地面煤层气开发技术实现了煤层气的商业化生产,从而使煤层气作为一种非常规天然气资源,日益受到世人关注。废弃矿井煤层气抽采是继井下瓦斯抽放、地面垂直井开采、地面采动区井抽采之后发展起来的一种新的煤层气开发方式,即将废弃矿井采空区和残留、聚集在地下巷道、岩层和煤层中的煤层气抽取出来并加以利用。

在采动岩体变形破坏研究的基础上,开展了废弃矿井煤层气抽采技术及试验研究,英国煤炭开采历史悠久,早在1954年就开始对废弃矿井煤层气进行开发利用,随后,德国、美国和我国也相继开展了废弃矿井煤层气抽采研究与应用<sup>[20-24]</sup>。

1)英国从20世纪50年代开始在北威尔士郡进行大规模的废弃矿井瓦斯抽放与利用,开发了废弃矿井煤层气抽放和利用技术<sup>[23]</sup>。英国废弃矿井瓦斯抽放方式大体有2种:①没有充填的废弃矿井或平硐抽放瓦斯;②在废弃矿井采空区或井下卸压地区采用大直径地面钻孔抽放采空区煤层气。采出的甲烷用来发电以供地方工业或国家电网使用,或用作工业燃气。通过对废弃矿井煤炭开采变形破坏的研究,揭示了长壁工作面以上150~200 m和以下40~70 m的

煤层都可能被卸压,压力降低将产生裂隙,导致开采层周围含煤岩层的渗透性增加,从而解吸出受开采扰动影响地层中的吸附气,并认为越远离开采煤层,受采动影响越小。目前英国的Alkane能源公司、Octagon能源公司、Edinburgh石油与天然气公司、Evergreen资源公司(英国)和stataGas煤层气公司等Markham、Steetly、Shirebook、Silverdale、HemHealth、Bersham等6个废弃矿井建立了商业化地面煤层气开发基地,并取得了好的应用效果。

2)德国从20世纪开始对鲁尔煤矿区废弃矿井煤层气进行抽采试验研究<sup>[23]</sup>,在煤炭开采过程中为采空区煤层气开发预留专门的管道,连通地面抽采利用设施进行采空区煤层气抽采;在没有预埋管道的采空区,采用地面钻井抽采采空区煤层气,均取得了很好的效果。目前,德国在鲁尔区和萨尔州等矿区开展了废弃矿井煤层气抽采,其中规模最大的斯蒂亚格新能源公司年抽采利用废弃矿井煤层气抽采浓度15%~70%,约3亿m<sup>3</sup>(折纯),年发电量约10亿kW·h、同时供热4.4亿kW·h。

3)美国开展了废弃煤矿煤层气抽采利用商业化,美国环保署组织开展了废弃矿井煤层瓦斯涌出量预测与评价方法研究,通过现场测定和理论分析方法,完整描述了废弃矿井煤层瓦斯涌出量及其衰减特征,为废弃矿井煤层气抽采提供了基本参数<sup>[23]</sup>。据《2013美国温室气体排放清单》数据,2011年美国共建设38个废弃煤矿煤层气抽采利用项目,利用煤层气总量约1.6亿m<sup>3</sup>,其中近60%的项目分布在伊利诺伊州的煤盆地中。

4)我国煤矿区煤层气开发主要是以抽采生产矿井的未采或卸压煤层中瓦斯为主,废弃矿井煤层气开发研究始于20世纪90年代后期,主要开展了废弃矿井采空区煤层气来源及赋存状态、废弃矿井采空区煤层气资源量评价等方面的探索研究,废弃矿井煤层气开发技术尚处于探索阶段<sup>[4]</sup>。辽宁铁法矿区通过改进封闭工艺,在已封闭区上施工地面抽采钻井,进行了采空区定向抽采,使采空区抽采瓦斯纯度占总供气量的8%~10%。焦煤集团、阳煤集团和淮南矿业集团建立了低浓度瓦斯发电站(厂),可满足本集团内部部分生产用电需要。山西省政府为了引导各类市场主体积极参与、有序实施煤炭采空区(废弃矿井)煤层气抽采试验,出台了一系列政策,明确立足不同地区煤炭矿业权主体情况,分类施策,积极稳妥开展采空区(废弃矿井)煤层气资源抽采试验。

### 3 晋城矿区废弃矿井煤层气地面抽采研究

#### 3.1 研究区抽采概况

晋城矿区位于沁水盆地南部,开采石炭-二叠系煤层,主要可采煤层有 3 层:二叠系山西组 3 号煤层、石炭系太原组 9 号煤层和 15 号煤层,煤种为优质无烟煤。矿区煤炭资源丰富,煤层含气量高,是目前我国煤层气勘探开发程度最高的区域。目前,晋城矿区拥有 6 对生产矿井,核定生产能力为 3 060 万 t。废弃矿井采空区主要分布在这些矿井的浅部。初步估算,晋城矿区废气矿井采空区煤层气资源量占山西省废气矿井煤层气资源量的 1/4。

山西蓝焰煤层气集团有限责任公司对研究区废弃矿井采空区煤层气进行了抽采技术探索,地面采空区煤层气井抽采是通过真空泵、螺杆增压机等设备进行负压抽采。截至 2019 年底,已在晋城、西山和阳泉矿区实施废弃矿井采空区煤层气井 129 口,投运 71 口,单井抽采量(混量)在 500~5 000 m<sup>3</sup>/d,多数抽采量在 1 000~3 000 m<sup>3</sup>/d;抽采甲烷体积分数在 30%~90%,多数煤层气井甲烷浓度在 80%以上,日产气量约 11 万 m<sup>3</sup>,累计利用量 1.28 亿 m<sup>3</sup>(折纯量),累计创造产值 2.18 亿元,其中在晋城矿区晋圣永安宏泰、岳城和侯村等废弃煤矿,从 2014—2019 年钻井抽采煤层气纯量分别为 409.6、881.6、1 317.1、1 683.4、2 181.7 万 m<sup>3</sup>和 2 238.5 万 m<sup>3</sup>。通过废弃矿井地面煤层气抽采工程的实施,山西蓝焰煤层气集团有限责任公司已形成包括采空区井位优选、抽采井设计、安全钻井、地面抽采、管网集输、分级利用的完整开发利用体系,实现了一定规模商业性生产和销售利用,产生了良好的经济效益和社会效益,发挥了显著的产业示范引领作用。

#### 3.2 废弃矿井采空区煤层气抽采工艺与技术

采空区煤层气抽采工艺与技术包括在采空区煤层气井身结构、钻井工艺与技术、抽采设备及抽采控制等方面的研究<sup>[23-24]</sup>,并在实践中得到了广泛应用。

1) 井身结构。废弃矿井采空区地面煤层气井的井身结构为三开结构:一开结构的钻进深度应穿过表土覆盖层及风化带岩层,并进入基岩下 10 m;二开结构的钻进深度一般深入到距目标煤层最近一层含水层位置;三开结构的钻进深度应该深入到目标煤层顶板以上采空区断裂带,并根据现场施工的漏浆(风)情况决定最终止深,如图 2 所示。

当三开钻进至采空区上部裂隙发育区,选择压缩氮气作为井内循环介质,氮气介质相比空气介质可抑制甲烷爆炸,极大地提高了钻井安全性。

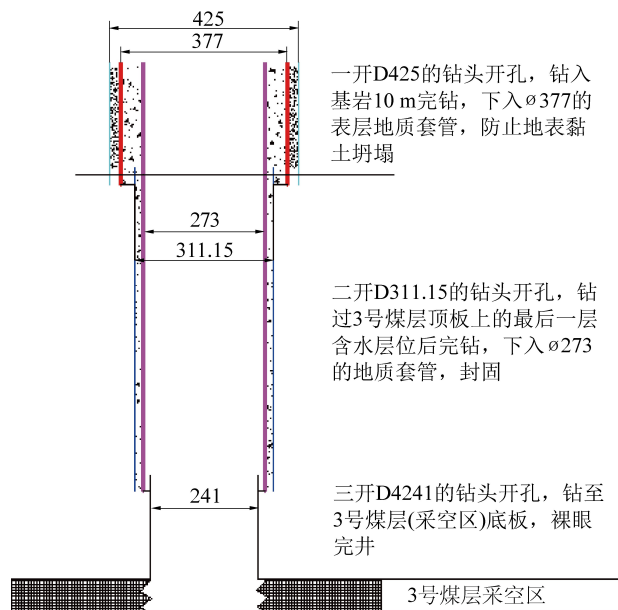


图 2 煤层气井井身结构示意图

Fig.2 Schematic of wellbore structure of CBM well in gob

2) 钻井工艺与技术。为提高钻井施工效率、避免液体钻井液堵塞采空区顶板断裂带产气通道,废弃矿井采空区地面钻井应优先采用压缩空气潜孔锤钻井技术,气体钻井由于循环介质的比重大大低于泥浆,利用气体钻井的特点,可以大幅度降低成本、提高产量、提高勘探开发总体效益。与常规钻井技术相比,该技术主要优点如下:①气体密度低,降低了井底的压力,有利于提高机械钻速;②气体对不稳定低渗煤层气储层有保护作用;③气体循环流速快,能够迅速将井底岩屑气吹至地面,利于准确判断井底情况;④气体介质容易制备,在井漏、供水困难的钻探施工区可降低成本;⑤压缩空气除在井内循环外,还可作为动力源实现冲击回转钻进,可大幅提高钻井速度,降低钻井成本。

3) 废弃矿井采空区地面抽采技术。废弃矿井采空区地面抽采是通过地面钻井直接连通采空区,再利用地面负压抽采设备进行负压抽采(图 3)。

针对采空区煤层气赋存特点,煤层气井抽采采用专用螺杆增压机组包括真空泵、螺杆增压机等设备进行的负压抽采。机组设有独立安装的油气冷却器系统,采用风冷方式,由电机单独驱动风扇运转,通过风扇将冷却器的热量带走。机组的进气流量调节根据进气压力采用变频调节,排气流量调节采用旁路自带调节的方式。机组设有安全阀,当机组发生故障,出现不正常超压时,安全阀将跳开,使高压气体引至高空放空,保护机组。

4) 废弃矿井采空区煤层气井抽采阶段及其控制方法。根据晋城矿区废弃矿井采空区煤层气井抽采过程中压力和日产气量的变化特征,将采空区煤层气

井抽采划分为 4 个阶段:即 I 自然放喷阶段、II 气量快速下降阶段、III 稳压产气阶段和 IV 定量产气阶段

(图 4 和表 2),针对不同阶段分别采用不同的控制方法,保证气井稳产与高产。

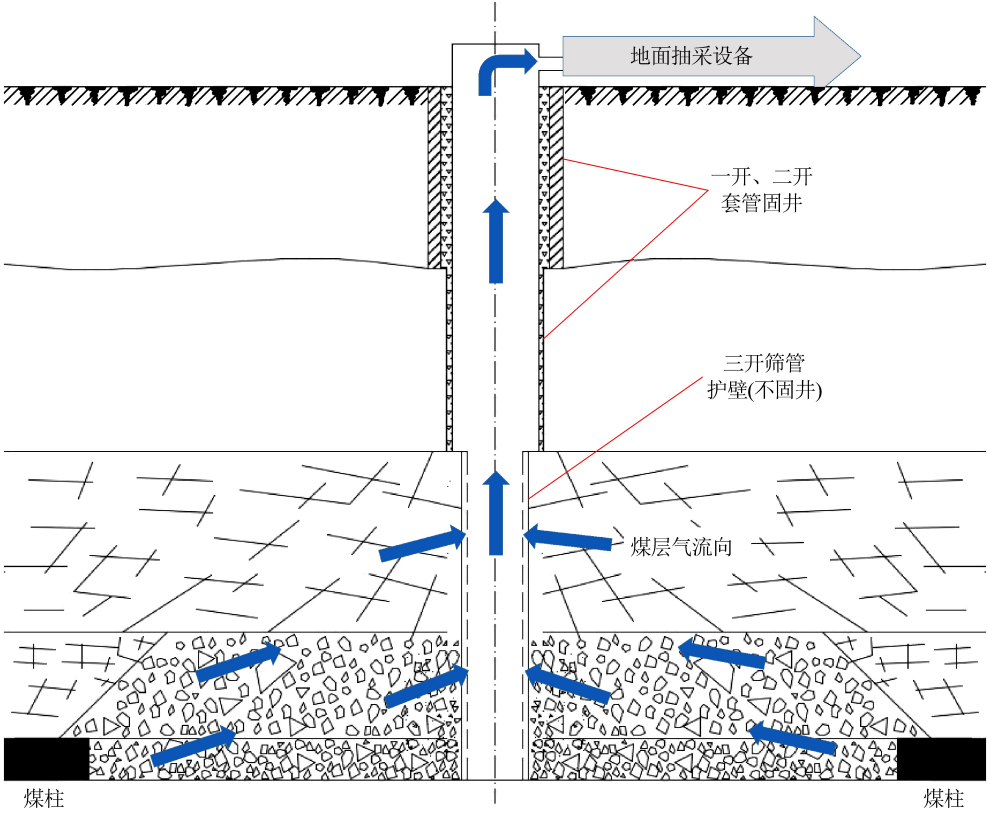


图 3 废弃矿井采空区煤层气地面抽采示意

Fig.3 Schematic of surface drainage of coalbed methane in gob of abandoned mine

表 2 废弃矿井采空区煤层气抽采不同阶段及其控制方法

Table 2 Different stages of CBM drainage in gob of abandoned mine and their controlling methods

序号	抽采阶段	井口压力变化	排采控制
I	自然放喷阶段	无/不明显	自然放喷阶段,井口压力波动极小或不波动
II	气量快速下降阶段	0.1~0.2 kPa	压力快速下降,缓慢提高抽采强度,上调运行频率 1~2 Hz/周
III	稳压产气阶段	0~0.01 kPa	压力相对稳定,稳定抽采强度,固定频率运行,井口压力-5~-10 kPa
IV	定量产气阶段	缓慢下降,<0.01 kPa	压力低,提高抽采强度,上调运行频率,井口压力低于 10 kPa

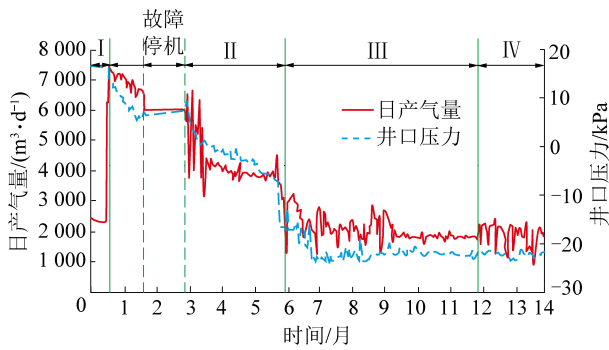


图 4 废弃矿井采空区煤层气井抽采阶段划分

Fig.4 Drainage stages of coalbed methane wells in gob of abandoned mine

4 关键科学问题与研究内容

4.1 关键科学问题

国内外学者尽管在废弃矿井煤层气抽采研究方面有所成就,由于废弃矿井采空区地质条件复杂,针对晋城矿区废弃矿井采空区煤层气地面抽采实际,有许多理论及实践问题有待于深入探讨与揭示:

1)由于废弃矿井采空区煤层气赋存地质条件的复杂性,废弃矿井采空区煤层气富集规律不清,其赋存条件及其受控机制有待揭示。

2)由于废弃矿井煤层气受温度、压力、采空区特征、残余煤层和煤柱的煤岩煤质及含水情况等因



素影响,前人在建立废弃矿井煤层气资源计算模型时,未能全面和系统考虑这些因素,致使废弃矿井煤层气资源不清,其评价理论与方法需要建立和完善。

3) 废弃矿井煤层气抽采条件复杂,有关采空区岩体渗流特性的认识不足,缺乏废弃矿井煤层气抽采地质条件评价及抽采参数优化方法,导致钻井成功率仅50%,且采空区地面煤层气井产量普遍存在衰减快、不稳定和抽采控制困难等问题。

基于上述研究现状,废弃矿井采空区煤层气抽采目前面临以下2个方面的关键科学问题:①废弃矿井煤层气赋存规律及其控制机理:由于煤层气赋存条件及控制机理不清楚,煤层气赋存规律和资源状况不明。因此,揭示废弃矿井煤层气赋存规律及其控制机理,是废弃矿井煤层气抽采急需解决的关键科学问题;②废弃矿井煤层气抽采条件评价及抽采参数优化方法:废弃矿井煤层气抽采条件复杂,目前其抽采条件评价与抽采参数优化方法缺乏,导致钻井成功率不高,煤层气井排采控制不合理,煤层气开发存在着较大盲目性。因此,建立废弃矿井煤层气抽采条件评价及抽采参数优化方法,也是当前急需解决的关键科学问题。

## 4.2 研究内容

针对这些需要解决的关键科学问题,主要研究内容如下:

1) 废弃矿井煤层气赋存规律及其控制机理研究。从煤层采动变形破坏分析入手,研究废弃矿井采空区孔隙-裂隙空间分布特征,揭示不同采煤方法和开采地质条件下煤炭开采围岩变形-破坏规律及其渗透性分布特征;研究废弃矿井采空区及其采空区下煤层气赋存状态(吸附、游离、水溶)及其富集规律;分析采空区煤层气的化学组分及甲烷浓度分布特征,剖析废弃矿井采空区的密闭性、含水性和含气性及其对煤层气富集的控制作用,揭示采空区煤层气赋存规律及控制机理。

2) 废弃矿井煤层气资源评价模型与方法研究。基于采动岩体变形破坏特征,建立采动岩体孔隙体积模型;结合煤层气资源在废弃矿井采空区中赋存特征,并考虑煤炭开采采空区积水情况,建立采空区积水量计算和含水饱和度计算模型;基于采空区煤层气成分、浓度、压力等参数的测试数据,分析废弃矿井煤层气资源构成,建立废弃矿井采空区及采空区下煤层气资源(游离气和吸附气)的计算方法。

3) 废弃矿井采空区煤层气抽采技术研究。查明煤炭开采后应力场、渗流场及其形成的应力降低区和裂隙发育区等抽采条件及影响因素,建立废弃

矿井煤层气抽采条件评价及抽采优化布置方法(井位和层位)。结合废弃矿井采空区煤层气井实际,分析采空区煤层气井抽采量和抽采气体浓度与抽采参数(抽采负压和抽采速率等)之间的相关关系,揭示废弃矿井采空区煤层气井的抽采特征及采空区煤层气产出机制,形成适应废弃矿井采空区煤层气地面抽采技术。

## 5 结 语

由于废弃矿井采空区地质条件复杂,废弃矿井采空区煤层气资源相对分散不均,煤层气富集规律和资源状况不清,其评价理论与方法不完善,在煤层气抽采基础研究方面也相对薄弱,煤层气井产量衰减快、不稳定和抽采控制困难等问题,煤层气勘探开发存在着较大的盲目性。因此,有必要针对目前存在的问题,拟解决“废弃矿井煤层气赋存规律及其控制机理和废弃矿井煤层气抽采条件评价及抽采参数优化方法”2个关键科学问题,深入开展煤炭开采围岩变形破坏特征,剖析废弃矿井采空区密闭性、含水性和含气性,揭示废弃矿井煤层气赋存规律及其控制机理;分析废弃矿井煤层气资源构成,建立废弃矿井采空区及采空区下煤层气资源(游离气和吸附气)的计算方法和废弃矿井煤层气抽采条件评价及抽采优化方法,揭示废弃矿井采空区煤层气井的抽采特征及采空区煤层气产出机制,形成废弃矿井煤层气地面抽采工艺和技术,为我国废弃矿井煤层气开发提供理论依据。

## 参考文献(References):

- [1] 彭苏萍,张 博,王 佟,等.煤炭资源与水资源[M]. 北京:科学出版社,2014.
- [2] 袁 亮,姜耀东,王 凯,等.我国关闭/废弃矿井资源精准开发利用的科学思考[J].煤炭学报,2018,43(1):14-20.  
YUAN Liang,JIANG Yaodong,WANG Kai,et al.Precision exploitation, and utilization of closed/abandoned mine resources in China [J]. Journal of China Coal Society,2018,43(1):14-20.
- [3] 袁 亮,杨 科.再论废弃矿井利用面临的科学问题与对策[J].煤炭学报,2021,46(1):16-24.  
YUAN Liang,YANG Ke.Further discussion on the scientific problems and countermeasures in the utilization of abandoned mines [J].Journal of China Coal Society,2021,46(1):16-24.
- [4] 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 coal mine goaf from Sihe wells area,Jincheng[J].Coal Science and Technology, 2021,49(1):240-247.

- [5] 孟召平,师修昌,刘珊珊,等.废弃煤矿采空区煤层气资源评价模型及应用[J].煤炭学报,2016,41(3):537-544.  
MENG Zhaoping, SHI Xiuchang, LIU Shanshan, *et al.* Evaluation model of CBM resources in abandoned coal mine and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(3): 537-544.
- [6] PALCHIK V. Influence of physical characteristics of weak rock mass on height of caved zone over abandoned subsurface coal mines[J]. Environmental Geology, 2002, 42(1): 92-101.
- [7] YAVUZ H. An estimation method for cover pressure reestablishment distance and pressure distribution in the goaf of long wall coal mines[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, 41: 193-205.
- [8] 国家煤炭工业局制定. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程[M]. 北京:煤炭工业出版社, 2000.
- [9] 刘天泉. 矿山岩体采动影响与控制工程学及其应用[J]. 煤炭学报, 1995, 20(1): 1-5.  
LIU Tianquan. Influence of mining activities on mine rock mass and control engineering[J]. Journal of China Coal Society, 1995, 20(1): 1-5.
- [10] MENG Zhaoping, SHI Xiuchang, LI Guoqing. Deformation, failure and permeability of coal-bearing strata during longwall mining. Engineering Geology, 2016, 208: 69-80.
- [11] 张金才, 刘天泉, 张玉卓. 裂隙岩体渗透特征的研究[J]. 煤炭学报, 1997, 22(5): 481-485.  
ZHANG Jincai, LIU Tianquan, ZHANG Yuzhuo. Study on the permeability of fractured rock mass[J]. Journal of China Coal Society, 1997, 22(5): 481-485.
- [12] MENG Zhaoping, YAN Jiwei, LI Guoqing. Controls on gas content, carbon isotopic abundance of methane in Qinnan-East Coal Bed Methane Block, Qinshui Basin, China[J]. Energy & Fuels, 2017, 31, 1502-1511.
- [13] 戴金星, 戚厚发, 宋岩. 鉴别煤成气和油型气等指标的初步探讨[J]. 石油学报, 1985, 6(2): 31-38.  
DAI Jinxing, QI Houfa, SONG Yan. On the indicators for identifying gas from oil and gas from coal measure[J]. Acta Petrolei Sinica, 1985, 6(2): 31-38.
- [14] 秦勇, 唐修义, 叶建平, 等. 中国煤层甲烷稳定碳同位素分布与成因探讨[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(2): 113-119.  
QIN Yong, TANG Xiuyi, YE Jianping, *et al.* Characteristics and origins of stable carbon isotope in coalbed methane of China[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2000, 29(2): 113-119.
- [15] LI W, SU E L, CHENG Y P, *et al.* Analysis and prediction of gas recovery from abandoned underground coal mines in China[J]. Environmental & engineering Geosciences, 2017, 23(4): 331-342.
- [16] 韩保山, 张新民, 张群. 废弃矿井煤层气资源量计算范围研究[J]. 煤田地质与勘探, 2004, 32: 29-31.  
HAN Baoshan, ZHANG Xinmin, ZHANG Qun. Theoretical study on calculation limits of CBM resource of abandoned coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2004, 32: 29-31.
- [17] 李日富, 文光才. 采动影响稳定区煤层气资源量分源叠加评估模型[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(10): 116-121.  
LI Rifu, WEN Guangcai. Divided resource overlay evaluation model of coalbed methane resource quantity in mining affected stable block[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(10): 116-121.
- [18] CHEN S, SUN L, ZHANG Y H. Research on the distributing law of the gas in the gob area based on Flow-Tube Model[J]. Procedia Engineering, 2011, 26(4): 1043-1050.
- [19] 文光才, 孙海涛, 李日富, 等. 煤矿采动稳定区煤层气资源评估方法及其应用[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 160-167.  
WEN Guangcai, SUN Haitao, LI Rifu, *et al.* Assessment method and application of coalbed methane resources in coal mining stability area[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 160-167.
- [20] QU Qingdong, GUO Hua, LONEY Michael. Analysis of longwall goaf gas drainage trials with surface directional boreholes[J]. International Journal of Coal Geology, 2016, 156: 59-73.
- [21] KUNZ E, RALPH S. Abandoned mine methane in Germany-Gas Potential Assessment and Drilling Experiences[C]// The 5th International Symposium on CBM/CMM in China & "Methane to Markets Partnership" regional workshop in China, Beijing, 2005: 233-237.
- [22] 张江华, 李国富, 孟召平, 等. 过采空区煤层气井地面抽采关键技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2552-2561.  
ZHANG Jianghua, LI Guofu, MENG Zhaoping, *et al.* Key technology of surface extraction for coalbed methane wells crossing goaf[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2552-2561.
- [23] 李超. 晋圣废弃矿井采空区煤层气开发条件与抽采技术研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2016.  
LI Chao. Study on development conditions and extraction technology of coalbed methane in goaf of Jinsheng abandoned mine[D]. Beijing: China University of Mining and Technology - Beijing, 2016.
- [24] 孟召平, 刘世民. 煤矿区煤层气开发地质与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2018.