



## 阳泉晋城矿区关闭煤矿煤层气资源特征及抽采模式

王阳 向杰 秦勇 陈尚斌 朱炎铭 黄曼莉 石莹

### 引用本文:

王阳, 向杰, 秦勇, 等. 阳泉晋城矿区关闭煤矿煤层气资源特征及抽采模式[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(12): 165–179.

WANG Yang, XIANG Jie, QIN Yong. Characteristics and drainage modes of coalbed methane resources in closed coal mines in Yangquan and Jincheng Mining Areas[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(12): 165–179.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1948>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 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>

#### 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>

#### 煤矿区煤层气“四区联动”井上下联合抽采模式与技术体系

Mechanism and technical system of ground and underground combined drainage of CBM in “four region linkage” in coal mining area

煤炭科学技术. 2022, 50(12): 14–25 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.mcq22-1076>

#### 关闭矿山地下空间资源定量评估与再利用途径

Quantitative evaluation and reuse path of underground space resources in closed mines

煤炭科学技术. 2022, 50(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/f13141f9-c696-4ae6-9001-904dcab58af7>

#### 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>

#### 平顶山矿区多煤层卸压立体抽采模式与工程示范

Extraction mode and engineering demonstration of pressure relief three-dimensional of multi-coal seams in Pingdingshan mining area

煤炭科学技术. 2024, 52(9): 162–172 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0742>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

地球科学与工程



移动扫码阅读

王阳, 向杰, 秦勇, 等. 阳泉-晋城矿区关闭煤矿煤层气资源特征及抽采模式[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(12): 165-179.

WANG Yang, XIANG Jie, QIN Yong, *et al.* Characteristics and drainage modes of coalbed methane resources in closed coal mines in Yangquan and Jincheng Mining Areas[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(12): 165-179.

## 阳泉-晋城矿区关闭煤矿煤层气资源特征及抽采模式

王阳<sup>1,2</sup>, 向杰<sup>1,2</sup>, 秦勇<sup>1,2</sup>, 陈尚斌<sup>1,2</sup>, 朱炎铭<sup>1,2</sup>, 黄曼莉<sup>1,2</sup>, 石莹<sup>1,2</sup>

(1. 中国矿业大学 煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室, 江苏 徐州 221008; 2. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:**受资源枯竭、淘汰落后、过剩产能等因素影响, 山西省关闭煤矿数量逐年增多, 关闭/废弃煤矿煤层气资源评价和开发逐渐受到重视。笔者以阳泉-晋城矿区关闭煤矿为研究对象, 通过资料整理、实验测试、数值模拟等手段, 探究了关闭煤矿煤层气资源特征, 预测了煤层气资源量, 总结了抽采模式。研究表明, 阳泉-晋城矿区 2009 年兼并重组前和兼并重组中关闭煤矿共 153 座, 基本为低瓦斯煤矿。2016—2020 年去产能关闭 37 座煤矿, 阳泉矿区分布较为集中, 以高瓦斯矿为主; 晋城矿区分布相对零散, 以低瓦斯矿井为主。关闭煤矿煤层气资源由采空区煤层气资源与原位煤层气资源组成。采空区煤层气以游离态为主赋存于采空区孔隙-裂隙中, 厚煤层采空区垮落带与裂隙带孔隙体积之和与工作面体积的比值  $I$  介于 0.53~0.73, 而中厚煤层采空区  $I$  值通常大于 0.90。原位煤层气主要以吸附态赋存于煤基质孔隙中, 15 号煤孔隙度介于 3.69%~5.45%, 微孔比表面积介于 97.58~120.76 m<sup>2</sup>/g, 微孔体积介于 0.017~0.022 cm<sup>3</sup>/g, 微孔最为发育。煤层埋深和局部构造控制原位煤层含气性, 而甲烷浓度作为采空区含气性的重要指标, 受控于煤层、储气空间结构及封闭条件。根据资源与关闭煤矿特征将关闭煤矿煤层气资源分为 3 类: 低瓦斯关闭煤矿采空区煤层气资源、高瓦斯关闭煤矿采空区煤层气资源和高瓦斯关闭煤矿原位煤层气资源。构建了关闭煤矿采空区煤层气资源量预测数学模型, 预测了采空区煤层气资源量; 采用体积法预测了原位煤层气资源量。在资源预测范围内, 阳泉-晋城矿区关闭煤矿采空区煤层气资源量合计 46 074.01×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>, 原位煤层气资源量达 146 388.12×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>, 其中, 阳泉三矿的资源量最大。此外, 总结了 4 种关闭煤矿煤层气抽采模式, 分别为地面直井抽采、L 型井抽采、采空区煤层气与水平邻近原位煤层气合采及过采空区下部煤层气抽采, 并针对各关闭煤矿提出了利用方向。

**关键词:** 关闭煤矿; 煤层气资源; 采空区; 资源量预测; 抽采模式

中图分类号: P618.13 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2024)12-0165-15

## Characteristics and drainage modes of coalbed methane resources in closed coal mines in Yangquan and Jincheng Mining Areas

WANG Yang<sup>1,2</sup>, XIANG Jie<sup>1,2</sup>, QIN Yong<sup>1,2</sup>, CHEN Shangbin<sup>1,2</sup>, ZHU Yanming<sup>1,2</sup>, HUANG Manli<sup>1,2</sup>, SHI Ying<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Coalbed Methane Reservoir & Reservoir Formation on Process, Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 2. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** Affected by factors such as coal resources exhaustion, elimination of outdated and excess capacity, the number of closed coal mines in Shanxi Province has increased year by year, and the evaluation and exploration of closed or abandoned coal mine coalbed methane resources has gradually received attention. In this study, the closed coal mines in Yangquan and Jincheng Mining Areas are taken as the research object. Through data collation, experimental test, numerical simulation and other means, the characteristics of coalbed methane

收稿日期: 2023-12-20 策划编辑: 宫在芹 责任编辑: 李雅楠 DOI: 10.12438/cst.2023-1948

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(42172156); 国家自然科学基金重点资助项目(42030810); 中国矿业大学英才培育工程专项资助项目(2022YCPY0201)

作者简介: 王阳(1989—), 男, 江苏镇江人, 副教授, 博士生导师, 博士。E-mail: wangy89@cumt.edu.cn

resources in closed coal mines are explored, the amount of coalbed methane resources is predicted, and the drainage modes are summarized. The research shows that 153 coal mines in Yangquan and Jincheng Mining Areas were closed before and during the merger and reorganization in 2009, whose were dominated by low-gas coal mine. From 2016 to 2020, 37 coal mines were closed due to capacity elimination. The closed coal mines in Yangquan Mining Area are concentrated and mainly high-gas mines. The distribution of closed coal mines in Jincheng Mining Area is relatively scattered with mainly low-gas mines. The coalbed methane resources in closed coal mine are composed of gob coalbed methane resources and in-situ coalbed methane resources. Gob coalbed methane mainly exists in the pore-fracture of gob as the free state. The ratio  $I$  of the sum of pore-fracture volume in the caving zone and fracture zone of gob to the working face volume in thick coal seam ranges from 0.53 to 0.73, while that in medium-thick coal seam is generally greater than 0.90. The in-situ coalbed methane is mainly adsorbed in the pores of coal matrix. The porosity of No.15 coal seam is between 3.69% ~ 5.45%, the specific surface area of micropores is 97.58 ~ 120.76 m<sup>2</sup>/g, and the volume of micropores ranges from 0.017 ~ 0.022 cm<sup>3</sup>/g, indicating that micropores are the most developed. The depth of coal seam and the local geological structure control the gas content of the in-situ coal seam, while as an important index of the gas content of the gob, methane concentration is controlled by the coal seam, gas storage space structure and sealing conditions. According to the characteristics of resources and closed coal mines, the closed coal mine coalbed methane resources are divided into three categories: gob coalbed methane resources in low-gas closed coal mine, gob coalbed methane resources in high-gas closed coal mine, and in-situ coalbed methane resources in high-gas closed coal mine. The amount of gob coalbed methane resources in closed coal mines was predicted by constructing a new mathematical model. Besides, the amount of the in-situ coalbed methane resources was predicted by the volume method. Within the range of resource prediction, the total amount of gob coalbed methane resources is 46 074.01 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>, and the amount of in-situ coalbed methane resources can reach 146388.12 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>, among which Yangquan No.3 Mine has the largest amount. In addition, four coalbed methane drainage modes in closed coal mines are summarized, including surface vertical well drainage, L-shaped well drainage, co-drainage of gob and horizontal adjacent in-situ coalbed methane resources, and coalbed methane drainage under gob. Furthermore, the utilization direction is proposed for each closed coal mine.

**Key words:** closed coal mines; coalbed methane resources; gob; resource estimation; drainage mode.

## 0 引 言

受能源结构优化调整、煤炭资源枯竭、淘汰落后、过剩产能等因素影响,我国关闭煤矿数量逐年增加<sup>[1]</sup>。关闭煤矿地面及井下资源丰富,可以分为土地资源、建(构)筑物、剩余煤炭资源、矿井水资源、地下空间资源及煤层气资源等,其二次开发利用,可以减少资源浪费,促进矿区经济发展<sup>[2-3]</sup>。与其他资源相比,关闭/废弃煤矿煤层气资源利用研究和实践开展较早,国外如英国、德国、美国等,基于完善的矿井甲烷监测数据,计算煤层气资源量,并通过预埋抽采管道及地面钻井抽采,取得了商业化开发成功<sup>[4-5]</sup>。国内针对高瓦斯生产矿井采空区丰富的煤层气资源,在铁法、松藻、呼鲁斯太等矿区形成了较成熟的抽采模式<sup>[6-8]</sup>。而随着我国关闭煤矿数量逐渐增多,关闭煤矿煤层气研究与资源化利用也逐渐深入。

学者们利用采空区甲烷碳氢稳定同位素分析,定量研究了关闭煤矿煤层气赋存状态、成因及来源<sup>[9-11]</sup>;探究了采空区煤层气圈闭条件<sup>[12]</sup>;提出了资源构构法、物质平衡法、下降曲线法、分区预测法等煤层气资源量预测方法、模型<sup>[13-15]</sup>;通过相似材料模拟及流场数值模拟手段,探讨了采空区煤层气运移富集规律<sup>[16-18]</sup>;基于层次分析、模糊评价等数学方法,建立了关闭煤矿采空区煤层气资源与选区评价体系<sup>[19-21]</sup>;

并结合采空区覆岩位移、变形特征,优化了采空区地面抽采井井身结构设计及钻井工艺<sup>[22-23]</sup>;总结了高浓度( $C(\text{CH}_4) > 30\%$ )和低浓度( $C(\text{CH}_4) \leq 30\%$ )煤层气分类利用体系<sup>[24]</sup>。

山西省作为我国重要的能源重化工基地,截止2020年底,关闭煤矿累计约838处,包括2009年兼并重组前关闭、兼并重组中关闭及2016—2020年去产能关闭3类<sup>[1,25-26]</sup>。前两者的井田面积基本小于1 km<sup>2</sup>,煤层埋深浅,开采工艺落后,资料缺失或详实程度低。2016—2020年山西省关闭煤矿158座,总面积约1 120 km<sup>2</sup>,退出产能10 979万t。近年来,晋城、阳泉、西山等矿区开展了关闭煤矿采空区煤层气资源地面抽采利用,累计施工抽采井128口,运行53口,日产量约8.8万m<sup>3</sup><sup>[22]</sup>,反映出较为良好的资源潜力。然而,受限于关闭煤矿资料详实程度,目前对山西省关闭煤矿煤层气资源特征认识不够深入,开发利用单一,离关闭煤矿煤层气资源综合高效开发利用仍有一段距离。鉴于此,笔者以阳泉—晋城矿区关闭煤矿为研究对象,系统收集关闭煤矿的闭坑报告、储层核实报告、储量年报等资料,通过资料整理、室内测试、数值模拟等手段,探究了2个矿区关闭煤矿煤层气资源特征,构建了资源量预测数学模型,预测了煤层气资源量,提出了关闭煤矿煤层气资源利用方向。

### 1 阳泉-晋城矿区关闭煤矿概况

阳泉-晋城矿区 2009 年兼并重组前及兼并重组中关闭煤矿共 153 座。其中,阳泉矿区 2009 年兼并重组前关闭煤矿 50 座,地处矿区东缘阳泉市平定市、昔阳县及郊区境内,面积介于 0.10~3.13 km<sup>2</sup>;2009 年兼并重组中关闭煤矿 14 座,地处阳泉市郊区、昔阳县及左权县,分布相对零散,面积介于 0.35~3.23 km<sup>2</sup>,年产量基本小于 30 万 t(图 1)。晋城矿区 2009 年兼并重组前关闭煤矿 72 座,主要位于矿区东北缘高平市、陵川县、泽州县境内,面积介于 0.13~3.84 km<sup>2</sup>;2009 年兼并重组中关闭煤矿 17 座,主要位于晋城市泽州县和陵川县内,面积介于 0.37~1.75 km<sup>2</sup>,分布相对零散(图 2)。整体上,这些关闭煤矿基本开采浅部山西组 3 号煤层,处于瓦斯风化带中,煤层气含量低。此外,煤矿关闭时间较早,矿井相关资料缺失或详实程度低。

2016—2020 年去产能关闭煤矿共 37 座,其中 35 座煤矿收集资料较为完整(表 1)。11 座分布于阳泉矿区东部,较为集中(图 1)。除和泰荫营、万和兴及陈家庄煤矿为低瓦斯矿井外,其余皆为高瓦斯矿井,其相对瓦斯涌出量介于 14.49~41.64 m<sup>3</sup>/t。其中,南庄煤矿和阳泉三矿的瓦斯涌出量最大,分别为 41.64 m<sup>3</sup>/t 和 31.83 m<sup>3</sup>/t。整体上,随着煤层埋深增大,煤层气含量呈增加趋势。而低瓦斯矿井靠近沁水盆地边缘,埋深小于 300 m,大部分处于瓦斯风化带中。晋城矿区去产能关闭煤矿分布相对零散,大部分低

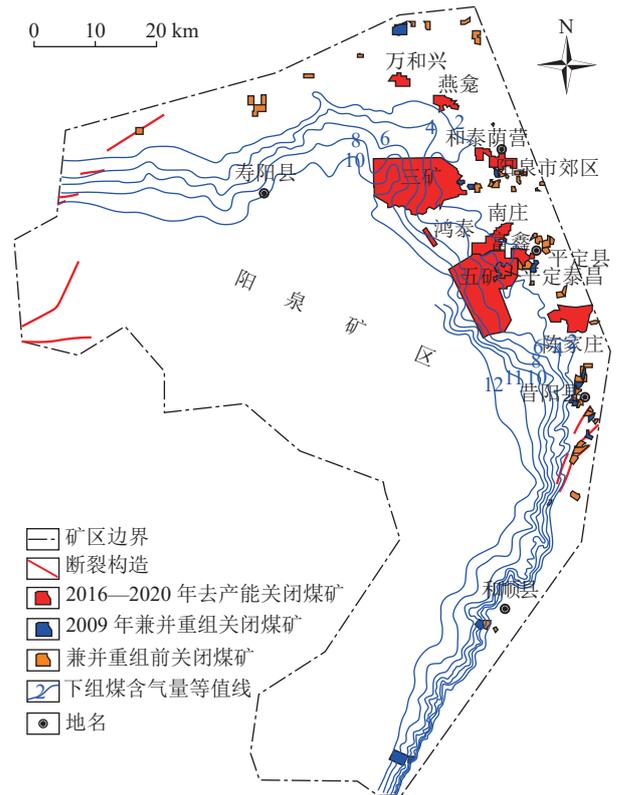


图 1 阳泉矿区关闭煤矿位置分布  
Fig.1 Location distribution map of closed coal mines in Yangquan Mining Area

瓦斯矿井位于晋城市城区至高平市一带,矿区面积大、分布较为集中,少数高瓦斯矿井位于矿区西南部阳城-泽州一带(图 2)。高瓦斯矿井相对瓦斯涌出量介于 4.88~44.62 m<sup>3</sup>/t(表 1),瓦斯主要来源为 3、15

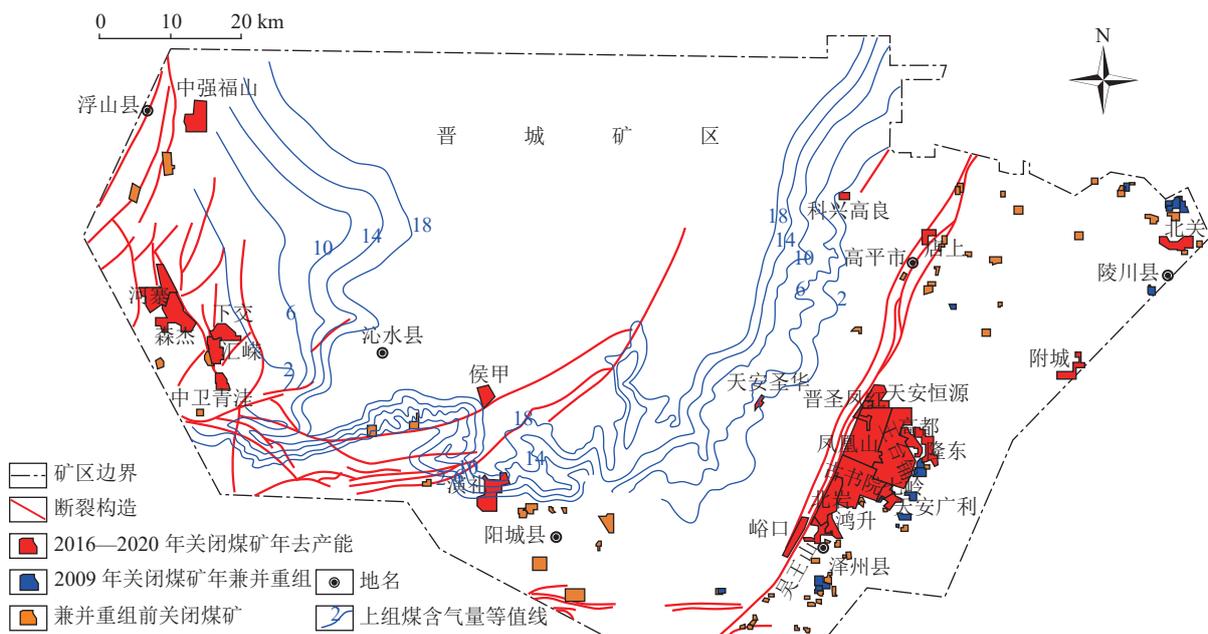


图 2 晋城矿区关闭煤矿位置分布  
Fig.2 Location distribution map of closed coal mines in Jincheng Mining Area

表1 阳泉-晋城矿区去产能关闭煤矿地质特征

Table 1 Geological characteristics of de-capacity closed coal mines in Yangquan and Jincheng Mining Areas

| 序号 | 煤矿名称  | 面积/km <sup>2</sup> | 构造复杂程度 | 断层数/条 | 陷落柱数/个 | 绝对瓦斯涌出量/(m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> ) | 相对瓦斯涌出量/(m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> ) | 瓦斯鉴定等级 | 采空区层数 |
|----|-------|--------------------|--------|-------|--------|--|--|--------|-------|
| 1  | 南庄    | 12.5718            | 简单     | 40    | 85     | 76.92  | 41.64                                      | 高瓦斯    | 4     |
| 2  | 鸿泰    | 1.6093             | 简单     | —     | 1      | —  | 38.41                                      | 高瓦斯    | 1     |
| 3  | 燕龛    | 4.4234             | 简单     | —     | 34     | 8.93   | 25.02                                      | 高瓦斯    | 6     |
| 4  | 和泰荫营  | 8.9278             | 简单     | —     | 19     | 0.96   | 6.91                                       | 低瓦斯    | 4     |
| 5  | 三矿    | 40.4600            | 中等     | 428   | 316    | 235.03                                       | 30.83                                      | 高瓦斯    | 6     |
| 6  | 平定泰昌  | 3.9627             | 简单     | 5     | 14     | 9.69   | 21.46                                      | 高瓦斯    | 3     |
| 7  | 陈家庄   | 15.5737            | 简单     | 2     | 3      | 0.74   | 4.44                                       | 低瓦斯    | 1     |
| 8  | 富鑫    | 4.8455             | 简单     | —     | 22     | 1.67~3.63                                    | 14.49~26.94                                | 高瓦斯    | 2     |
| 9  | 万和兴   | 3.4253             | 简单     | 9     | 11     | 0.94   | 5.69                                       | 低瓦斯    | 3     |
| 10 | 古书院   | 25.4180            | 中等     | 164   | 27     | 28.23  | 3.81                                       | 低瓦斯    | 3     |
| 11 | 王台铺   | 33.7023            | —      | 145   | 8      | 10.41  | 4.50                                       | 低瓦斯    | 3     |
| 12 | 晋圣七岭  | 2.8776             | 简单     | —     | —      | 0.58   | 1.23                                       | 低瓦斯    | 2     |
| 13 | 北岩    | 10.1914            | 简单     | 2     | —      | 2.50   | 4.18                                       | 低瓦斯    | 2     |
| 14 | 晋圣鸿升  | 2.7544             | 简单     | —     | —      | 0.64   | 3.24                                       | 低瓦斯    | 3     |
| 15 | 凤凰山矿  | 29.3485            | 中等     | 116   | 53     | 22.87  | 5.45                                       | 低瓦斯    | 3     |
| 16 | 科兴高良  | 1.0396             | 简单     | 4     | 10     | 1.56   | 1.89                                       | 瓦斯     | 1     |
| 17 | 店上    | 2.1500             | 简单     | 2     | —      | 0.46   | 0.70                                       | 低瓦斯    | 1     |
| 18 | 崇安附城  | 3.5336             | 简单     | —     | —      | 0.28   | 0.76                                       | 低瓦斯    | 1     |
| 19 | 崇安北关  | 5.1407             | 简单     | —     | —      | 0.57   | 1.84                                       | 低瓦斯    | 1     |
| 20 | 演礼    | 9.9191             | 中等     | 7     | —      | 8.47~13.54                                   | 14.23~44.62                                | 高瓦斯    | 1     |
| 21 | 侯甲    | 3.6381             | 简单     | 2     | —      | 6.24   | —  | 高瓦斯    | —     |
| 22 | 天安高都  | 5.8638             | 简单     | —     | —      | 2.66   | 2.13                                       | 低瓦斯    | 2     |
| 23 | 天安广利  | 2.1348             | 简单     | 1     | —      | 0.27   | 1.46                                       | 低瓦斯    | 2     |
| 24 | 天安吴王山 | 4.1563             | 简单     | —     | —      | —  | —  | 低瓦斯    | 3     |
| 25 | 天安隆东  | 6.0748             | 简单     | —     | —      | 1.51   | 1.56                                       | 低瓦斯    | 2     |
| 26 | 天安恒源  | 5.3542             | 简单     | 1     | —      | 1.83   | 1.71                                       | 低瓦斯    | 3     |
| 27 | 晋圣凤红  | 3.0949             | 简单     | 1     | —      | 0.96   | 0.99                                       | 低瓦斯    | 3     |
| 28 | 天安圣华  | 1.0591             | 简单     | —     | —      | 7.96   | 10.48                                      | 高瓦斯    | 1     |
| 29 | 天安峪口  | 2.8814             | 简单     | 2     | —      | 1.62~9.82                                    | 4.88~10.37                                 | 高瓦斯    | 3     |
| 30 | 河寨    | 11.1109            | 简单     | 9     | —      | 0.55   | 1.26                                       | 低瓦斯    | 1     |
| 31 | 汇嵘煤业  | 5.3119             | 简单     | 9     | —      | 2.19   | 0.69                                       | 低瓦斯    | 2     |
| 32 | 森杰    | 13.0717            | 简单     | 4     | —      | 0.32~0.76                                    | 1.78~2.59                                  | 低瓦斯    | 2     |
| 33 | 下交    | 4.6543             | 简单     | 9     | —      | 1.69   | —  | 低瓦斯    | 2     |
| 34 | 中卫青洼  | 2.7658             | 简单     | 9     | —      | 0.83   | 1.47                                       | 低瓦斯    | 2     |
| 35 | 中强福山  | 8.4763             | 简单     | 5     | —      | 1.79   | 1.21                                       | 低瓦斯    | 2     |

号煤层。低瓦斯矿井以凤凰山矿、古书院矿、王台铺矿为代表,井田面积大,整体煤层埋深较浅,煤层含气量低。

## 2 关闭煤矿煤层气资源特征

关闭煤矿中未采出或损失的煤炭资源,称为残煤<sup>[16,27]</sup>。关闭煤矿中煤层气主要来源于残煤,以热成

因气为主,也存在部分生物成因来源<sup>[10]</sup>。按照煤层气来源及赋存空间,关闭煤矿煤层气资源可分为采空区煤层气资源和原位煤层气资源。前者为采动影响下开采煤层及卸压范围内邻近煤层吸附态煤层气解吸,通过采动裂隙运移至采空区中,形成以游离态为主赋存于采空区孔隙-裂隙中、以吸附态为辅赋存于卸压煤层中、以少量溶解态溶解于采空区积水的

煤层气<sup>[13,28]</sup>；后者主要以吸附态赋存于井田未卸压的原位煤层中。

### 2.1 储集空间

煤层开采后，在工作面从上而下发育垮落带、裂隙带和弯曲下沉带；在横向上，从垮落带向外，可分为应力恢复区、充分卸压区、应力集中区和原岩应力区<sup>[29]</sup>。“O”形圈内离层裂隙和竖向破断裂隙发育，气体渗透率最佳(图3)<sup>[29-30]</sup>。工作面开采作业完成后，通常采用永久密闭墙隔离通风，此时，采空区煤柱、上覆、下伏岩层围限下形成一个相对封闭的储气空间<sup>[12]</sup>。采空区遗煤、煤柱及邻近卸压煤层作为甲烷气体来源，采空区岩体孔隙-裂隙成为煤层气储集空间，主储气区域位于裂隙带内<sup>[13-15]</sup>，而煤柱、弯曲下沉带及之上地层的封盖性能决定了储气空间的封闭性。然而，采空区煤层气垂向赋存边界尚未统一。韩宝山<sup>[31]</sup>认为，邻近层残余瓦斯压力曲线斜率拐点对应的高度可作为采空区煤层气赋存的垂向界线；秦伟<sup>[29]</sup>研究表明，充分采动下，卸压解吸带高度将发育至主关键层以下；孟召平等<sup>[13]</sup>认为，采空区煤层气赋存范围是以裂隙带顶部及破断角延伸围限形成的梯形体区域。

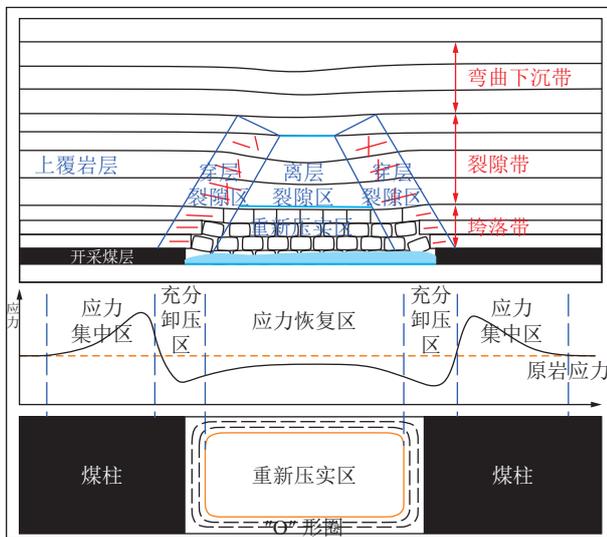


图3 采空区“三带”分布、应力分区示意<sup>[20]</sup>

Fig.3 “Three zones” distribution and stress zoning in goaf<sup>[20]</sup>

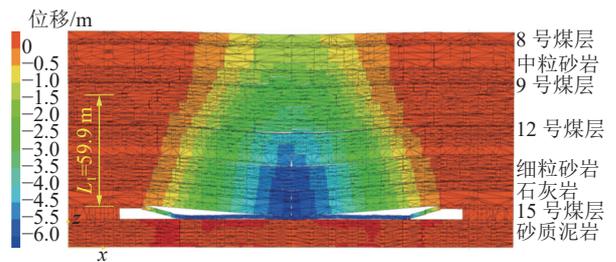
2009年兼并重组前和重组中关闭煤矿房柱式开采形成的采空区残留煤炭较多，并由于开采强度低，采动裂隙发育较差。而去产能关闭煤矿多数存在2层或3层采空区，部分煤矿采空区层数可达6层(表1)。从浅层至深层采空区，伴随着采煤方式的演化，从而形成复杂的储集空间。阳泉矿区15号煤层位于太原组下段，厚度介于0~11.26 m，平均5.20 m；晋城矿区山西组3号煤层平均厚度达5.28 m，15号煤层

厚0.80~7.07 m。当深部厚煤层长壁式开采后，裂隙带高度大，采动裂隙沟通浅层采空区时，形成统一的含气系统。

以阳泉三矿15号煤层K8206采空区为例，应用3DEC数值模拟软件，根据煤层开采实际地质条件，确定边界条件，进行了上覆岩层位移、变形模拟。根据邻近采空区钻孔柱状图确定顶底板及上覆地层岩性、厚度，设置力学参数并建立模型。采空工作面宽度在180 m左右，保安煤柱宽度约20 m，建立240 m×200 m×120 m的数值模型，垂向上划分为23个不同水平岩层，顶部距地表约为600 m，故在顶部边界施加-14.7 MPa的等效载荷。模拟计算结果显示15号煤层开采后，采动裂隙直接影响12号煤层，裂隙带高度 $L_1=59.90$  m，与上部9号、12号煤层采空区垂向连通(图4a)。采空区Z方向位移云图表现为梯形分布，向上位移量和影响范围逐渐减小，破断角约70°，8、9号煤层位于弯曲下沉带中，煤层卸压解吸(图4b)。



(a) 采空区Z方向位移变形结果



(b) 采空区Z方向位移变形云图

图4 阳泉三矿K8206采空区Z方向位移变形数值模拟

Fig.4 Numerical simulation of Z direction displacement deformation of K8206 goaf in Yangquan No.3 Mine

基于采空区垂向“三带”特征，采空区煤层气储集空间的估算模型相继被提出<sup>[13-14,28]</sup>。根据孟召平等<sup>[13]</sup>建立的采空区垮落和裂隙带内孔隙-裂隙体积模型，随时间变化的采空区垮落带岩体孔隙体积 $V_m(t)$ 为

$$V_m(t) = \frac{H_m}{6} [L_a L_b + a_1 b_1 + (L_a + a_1)(L_b + b_1)] n_m(t) \quad (1)$$

$$n_m(t) = 1 - \frac{1}{K'_p(t)} + S_0 \quad (2)$$

式中:  $L_a$  为工作面倾向长度, m;  $L_b$  为工作面走向长度, m;  $a_1$  为垮落带顶面沿倾向长度, m;  $a_1 = L_a - 2H_m \cot \varphi$ ,  $\varphi$  为岩层破断角, ( $^\circ$ );  $b_1$  为垮落带顶面沿走向长度, m,  $b_1 = L_b - 2H_m \cot \varphi$ ;  $H_m$  为垮落带高度, m;  $n_m(t)$  为压实过程中随时间变化的垮落带岩石孔隙率, %;  $S_0$  为顶板岩层原始孔隙率, %;  $K'_p(t)$  为随时间变化的垮落带岩石碎胀系数, 无量纲。

随时间变化的采空区断裂带内岩体孔隙体积参数  $V_1(t)$  为

$$V_1(t) = \int_0^{H_1} [L_a - 2(h + H_m) \cot \varphi] \times [(L_b - 2(h + H_m) \cot \varphi)] n(h, t) dh \quad (3)$$

$$n(h, t) = 1 - \frac{1}{K'_p(t) - \lambda \ln(h + 1)} + S_0 \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{K'_p(t) - 1}{\ln(H_1 + 1)} \quad (5)$$

式中:  $h$  为距离垮落带顶界高度, m;  $H_1$  为裂隙带绝对高度, m;  $n(h, t)$  为断裂带范围内随时间变化的不同高度破裂岩体的孔隙率, %。

基于采空区数值模拟实验结果获取破断角参数, 根据闭坑报告中煤层采高、顶板岩性、力学性质按照水文地质“三带”经验公式计算垮落带和裂隙带高度, 对阳泉-晋城矿区南庄煤矿、三矿、天安圣华、古书院煤矿典型采空区开展了储集空间计算, 计算结果见表2。定义  $I$  为垮落带与裂隙带孔隙体积之和与工作面体积(工作面长度×宽度×采高)的比值, 其值介于 0.53 ~ 0.94。阳泉矿区 15 号煤和晋城矿区 3 号煤厚煤层采空区,  $I$  值基本小于 0.80, 介于 0.53 ~ 0.73, 而中厚煤层采空区  $I$  值通常大于 0.90(表2)。

表2 阳泉-晋城矿区关闭煤矿典型采空区储集空间

Table 2 Typical goaf storage space of closed coal mines in Yangquan and Jincheng Mining Areas

| 采空区名称       | 煤层 | 采高/m | 工作面长度×宽度/(m×m) | 破断角/( $^\circ$ ) | 垮落带高度/m | 裂隙带高度/m | 垮落带体积/ $10^4 \text{m}^3$ | 裂隙带体积/ $10^4 \text{m}^3$ | 垮落带孔隙体积/ $10^4 \text{m}^3$ | 裂隙带孔隙体积/ $10^4 \text{m}^3$ | $I$  |
|-------------|----|------|----------------|------------------|---------|---------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|------|
| 南庄2017年采空区  | 15 | 5.72 | 1 065×187      | 55               | 12.47   | 50.46   | 234.77                   | 555.30                   | 40.01                      | 43.37                      | 0.73 |
| 三矿7212工作面   | 3  | 2.30 | 370×150        | 60               | 5.09    | 32.10   | 37.19                    | 126.11                   | 3.52                       | 8.52                       | 0.94 |
| 三矿K8206工作面  | 15 | 6.20 | 1 640×250      | 70               | 12.87   | 59.90   | 516.67                   | 1 696.21                 | 65.05                      | 108.20                     | 0.68 |
| 天安圣华1302工作面 | 3  | 5.95 | 190×90         | 68               | 8.64    | 50.95   | 13.94                    | 46.70                    | 1.96                       | 3.38                       | 0.53 |
| 古书院15233工作面 | 15 | 2.05 | 1 000×175      | 58               | 7.60    | 54.86   | 128.72                   | 619.00                   | 8.81                       | 23.78                      | 0.91 |

中-浅层原位煤层气以吸附态为主赋存于煤基质孔隙中。阳泉-晋城矿区主采煤层以高煤阶贫煤、无烟煤为主, 前人对其储层孔-裂隙开展了较为详细的研究, 并揭示了其差异性发育特征<sup>[32-34]</sup>。阳泉-晋城矿区关闭煤矿剩余原位煤炭资源以 15 号煤层为主, 本次采集关闭煤矿相邻生产矿井五矿、成庄矿井下工作面采取块煤, 开展了孔-渗相关测试, 测试结果见表3。五矿 15 号煤层孔隙度介于 3.69% ~ 4.81%, 渗透率介于  $0.0044 \times 10^{-15} \text{m}^2 \sim 0.0200 \times 10^{-15} \text{m}^2$ , 而成庄矿 15 号煤孔隙度介于 4.11% ~ 5.45%, 渗透率介于  $0.0042 \times 10^{-15} \sim 0.0233 \times 10^{-15} \text{m}^2$ , 后者平均孔隙度和渗透率均大于前者, 这与矿区各煤层试井渗透率对比结果一致<sup>[34]</sup>。流体注入联测(低压  $\text{CO}_2$  吸附- $\text{N}_2$  吸附-高压压汞法)结果显示, 15 号煤孔隙发育程度相当, 微孔比表面积介于  $97.58 \sim 120.76 \text{m}^2/\text{g}$ , 微孔体积介于  $0.017 \sim 0.022 \text{cm}^3/\text{g}$ , 微孔贡献了主要的比表面积和孔体积(表3)。进一步分别绘制孔径分布曲线, 低压  $\text{CO}_2$  吸附揭示孔径 < 1.4 nm 范围内的孔

径分布, 煤样孔径分布曲线具有相似性, 呈多峰分布, 主峰位置在 1.15 nm 附近, 2 个次峰位于 0.6、1.25 nm 附近(图 5a)。液氮吸附揭示的介孔、大孔孔径分布(BJH 模型)曲线也呈多峰分布, 主峰位置在 2 nm 附近, 2 个次峰位于 2.2、3.2 nm 附近(图 5b)。压汞法揭示孔径分布曲线呈单峰分布, 小于 10 nm 的孔隙最为发育(图 5c)。整体来看, 15 号煤微孔十分发育、介孔次之, 大孔不发育。

## 2.2 含气性

作为后期二次运移富集形成的关闭煤矿采空区煤层气资源, 先天的资源条件决定其后期资源丰度。阳泉矿区整体构造相对简单, 地层以单斜构造为主, 大型断裂不发育, 太原-山西组煤层直接顶板多为泥岩、砂质泥岩, 封闭性能较好, 有利于气体保存, 埋深 300 ~ 1 000 m 间, 煤层含气量介于  $5 \sim 30 \text{m}^3/\text{t}$ <sup>[33-34]</sup>。煤层含气量整体表现为埋深控制, 从北东至南西方向, 呈现逐渐增加的变化趋势<sup>[33-34]</sup>(图 1)。晋城矿区断裂构造发育, 但集中于矿区西部及东部晋获断褶

表3 阳泉-晋城矿区太原组15号煤孔-渗及孔隙结构参数  
Table 3 Pore structure parameters of No.15 coal in Yangquan and Jincheng Mining Areas

| 样品编号 | 采样地点       | 孔隙率/% | 渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$ | CO <sub>2</sub> 吸附(0.5 ~ 1.4 nm)         |   | 液氮吸附(1.7 ~ 300 nm)                          |   | 压汞法(>7.35 nm)                             |         |
|------|------------|-------|------------------------------|--|---|---|---|---|---------|
|      |            |       |                              | 比表面积/ $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$ | 总孔体积/ $(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$ | BET比表面积/ $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$ | 总孔体积/ $(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$ | 总孔体积/ $(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$ | 平均孔径/nm |
| WK-1 |            | 4.81  | 0.015 0                      | 115.13                                   | 0.019                                     | 2.50  | 0.005                                     | 0.036                                     | 26.6    |
| WK-2 | 五矿83208工作面 | 3.93  | 0.020 0                      | 115.56                                   | 0.019                                     | 1.53  | 0.004                                     | 0.030                                     | 19.2    |
| WK-3 |            | 3.69  | 0.004 4                      | 116.95                                   | 0.019                                     | 2.03  | 0.004                                     | 0.026                                     | 20.4    |
| CZ-1 |            | 4.11  | 0.004 2                      | 97.58                                    | 0.017                                     | 2.42  | 0.005                                     | 0.028                                     | 23.7    |
| CZ-2 | 成庄矿3303工作面 | 4.59  | 0.023 3                      | 120.76                                   | 0.022                                     | 2.44  | 0.004                                     | 0.033                                     | 23.6    |
| CZ-3 |            | 5.45  | 0.010 0                      | 117.33                                   | 0.021                                     | 2.12  | 0.004                                     | 0.040                                     | 31.5    |

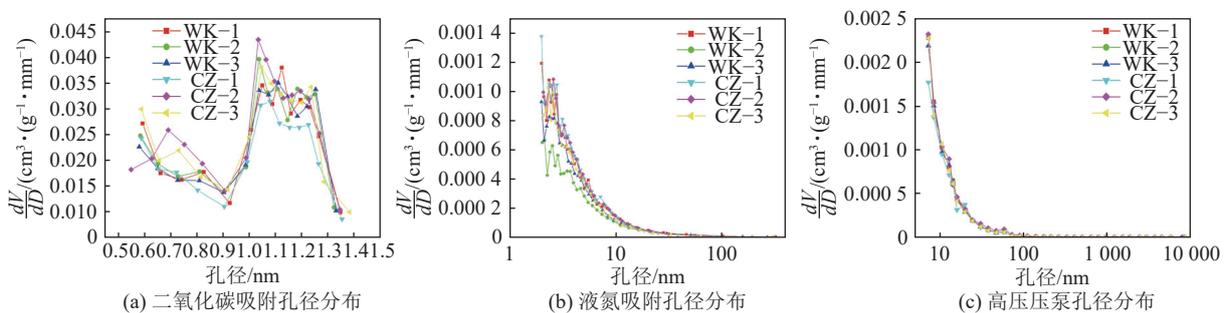


图5 阳泉-晋城矿区太原组15号煤孔径分布曲线

Fig.5 Pore size distribution curves of No. 15 coal in Yangquan and Jincheng Mining Areas

带。晋获断褶带以东,山西-太原组煤层埋藏浅,煤层气逸散严重,含气量较低,基本小于 $2 \text{ m}^3/\text{t}$ <sup>[35]</sup>。而向矿区中部,煤层埋深逐渐增大,含气量增加明显,煤层埋深300 m以上,其含气量一般介于 $15 \sim 20 \text{ m}^3/\text{t}$ ,平面上总体呈现出四周低,中部高的特点(图2)<sup>[33-34]</sup>。整体上,煤层埋深和局部构造是煤层含气性的主要控制因素,故阳泉-晋城关闭煤矿中的高瓦斯矿井主要分布于煤层埋深较深的矿区中部。

甲烷浓度作为关闭煤矿采空区含气性的直观指标,受控于煤层、储气空间结构及封闭条件。由于采空区残煤均经过不同程度的瓦斯抽放,采空区封闭后,采空区残煤煤层气含量越高,残煤量越大,煤层气富集区内的甲烷浓度越高<sup>[36]</sup>,具体受原位煤层含气量、瓦斯抽放率、采煤方法、工作面回采率4个条件影响。储气空间结构控制煤层气的空间分布,从下到上可分为甲烷高浓度区、甲烷过渡区、甲烷富集区和甲烷无流区<sup>[17,37]</sup>。采空区煤层气地面抽采实践表明,晋圣永安宏泰煤矿(高瓦斯矿井)3号煤层采空区钻孔显示甲烷浓度介于 $86.29\% \sim 95.19\%$ ,平均为 $91.48\%$ <sup>[13]</sup>;武安矿(关闭)施工的采空区煤层气钻孔采样结果显示,甲烷浓度为 $85\%$ ;晋城矿区侯村矿在其兼并重组的关闭矿井的3号煤层1992—1996年

采空区施工地面钻孔 WACK-01号,孔口气体中甲烷浓度 $85\%$ 。这些高瓦斯矿井煤层原始含气量高、采空区遗煤资源量大(采煤方法落后,回采率低)、采空区积水少,其采空区裂隙带甲烷浓度较高,通常介于 $80\% \sim 95\%$ 。然而,在南庄煤矿8824工作面2018年12月停采的采空区施工的GB-1井,气样无空气基组分测试结果显示,主要成分为甲烷( $57.14\%$ )和氮气( $42.51\%$ );在鸿泰煤矿3206工作面2017年采空区施工的GB-2井,气样无空气基组分测试结果显示,主要成分为氮气( $62.54\%$ )、甲烷( $37.24\%$ ),甲烷浓度相对较低。这是由于工作面采煤方法为走向长壁综采,工作面回采率通常大于 $90\%$ ,煤炭基本全部采出,采空区缺乏大量稳定的煤层气来源。此外,鸿泰煤矿奥灰水位标高高于3号煤层底板标高约50 m,采空区存在较严重积水,不利于煤层气保存。

时间尺度下,采空区甲烷浓度的演化主要受采空区封闭条件控制,主要包括地下水条件、三维封闭性、采空区封闭时间。煤矿关闭后,采空区地下水回灌,形成积水,长期积水可能造成大量残气溶解于水中,若径流条件较好,并造成溶解态煤层气运移<sup>[16,27]</sup>。而当采空区上覆基岩厚度小于裂隙带高度或裂隙带沟通浅层塌陷采空区时候,垂向封闭性丧失,煤层气

逸散严重,采空区甲烷浓度降低<sup>[19-20]</sup>。采空区封闭时间也是影响采空区甲烷浓度的重要因素,甲烷排放速率在煤矿关闭后显著下降并随着时间的推移趋于平稳<sup>[38]</sup>,而采空区并不能保持理想状态的绝对封闭,甲烷逸散不可避免<sup>[19-20]</sup>。

### 2.3 资源分类

整体来看,阳泉-晋城矿区关闭煤矿呈现出整体分布不均,局部集中的特点,综合考虑资料详实程度、原位煤层气含量、采空区等特征,关闭煤矿煤层气资源可分为3类。

1)低瓦斯关闭煤矿采空区煤层气资源。2009年兼并重组前及重组中低瓦斯关闭煤矿采空区埋深浅,面积小,煤层气逸散严重,难以预测及利用。数据统计显示去产能低瓦斯关闭煤矿相对瓦斯涌出量介于3.91~5.45 m<sup>3</sup>/t时,原位煤层气含量介于1.17~2.20 m<sup>3</sup>/t。以凤凰山矿、古书院矿等为代表的大面积多层采空的低瓦斯矿井仍然具有一定的资源潜力。

2)高瓦斯关闭煤矿采空区煤层气资源。高瓦斯关闭煤矿以去产能关闭煤矿为主,原位煤层气含量高,采空区甲烷浓度基本大于60%,并有很大一部分吸附气资源量,煤层气资源潜力大,可以确保负压抽采下能够持续生产。

3)高瓦斯关闭煤矿原位煤层气资源。进一步可分为低丰度、高丰度原位煤层气资源两类,前者原位煤层气含量<8 m<sup>3</sup>/t,一般介于4~6 m<sup>3</sup>/t,资源丰度较低,后者原位煤层气含量基本>8 m<sup>3</sup>/t,资源丰度高。阳泉矿区高丰度原位煤层气资源主要赋存于深埋的15号煤层中,以保护煤柱为主;晋城矿区主要赋存于3号、15号煤层中,以本煤层及深部未采煤层为主,一部分为保护煤柱。

## 3 关闭煤矿煤层气资源量预测

### 3.1 预测方法及范围

与传统煤层气资源量预测相比,关闭煤矿煤层气资源量预测方法显著不同,主要包括物质平衡法、资源构成法和下降曲线法<sup>[13-15]</sup>。资源构成法资料收集量及难度小,计算相对简单,是目前常用的资源量预测方法,可以分为采空区游离态煤层气和赋存于卸压/原位煤层中的吸附态煤层气,溶解态的煤层气量可以忽略不计<sup>[13]</sup>。

笔者研究基于资源构成法,构建了关闭煤矿采空区煤层气资源量预测模型,计算关闭煤矿采空区煤层气资源量;采用体积法,计算原位煤层气资源量。

资源量预测范围为资料收集完整的去产能高瓦

斯关闭煤矿和部分资源及封闭条件良好的低瓦斯关闭煤矿(表4)。当低瓦斯关闭煤矿中原位煤层气含量小于1.8 m<sup>3</sup>/t时,残煤吸附气量低,只计算游离态煤层气,吸附态煤层气忽略不计。此外,对于关闭煤矿来说,并不是所有的采空区及原位煤层都具备资源潜力,也存在资源不可预测区<sup>[19-20]</sup>,包含如下:

①采空区埋深浅、导水裂缝带沟通地表或地表大面积塌陷积水;②当高瓦斯矿井采空区距今40年以上时,低瓦斯矿井距今20年以上时,认为不可预测<sup>[19-20]</sup>。采空区距今时间越长,越不利于采空区煤层气资源的保存;③采空区积水情况严重;④采空区资料缺失或者不明确;⑤断裂、陷落柱密集发育的原位煤层区域。

表4 关闭煤矿煤层气资源量预测范围

Table 4 Forecast range of coalbed methane resources in closed coal mines

| 序号 | 矿区 | 煤矿名称 | 瓦斯等级 | 采空区甲烷浓度/% | 采空区充水系数K |
|----|----|------|------|-----------|----------|
| 1  |    | 鸿泰   |      | 37        | 0.50     |
| 2  |    | 平定泰昌 |      | 57        | 0.15     |
| 3  |    | 三矿   | 高瓦斯  | 62        | 0.10     |
| 4  | 阳泉 | 南庄   |      | 57        | 0.10     |
| 5  |    | 阳泉燕窠 |      | 37        | 0.10     |
| 6  |    | 富鑫   |      | 57        | 0.10     |
| 7  |    | 万和兴  | 低瓦斯  | 37        | 0.10     |
| 8  |    | 古书院  |      | 37        | 0.10     |
| 9  |    | 王台铺  | 低瓦斯  | 37        | 0.10     |
| 10 |    | 北岩   |      | 14        | 0.10     |
| 11 | 晋城 | 凤凰山  |      | 35        | 0.10     |
| 12 |    | 侯甲   |      | —         | —        |
| 13 |    | 演礼   | 高瓦斯  | 85        | 0.20     |
| 14 |    | 天安圣华 |      | 85        | 0.20     |

### 3.2 预测参数

采空区煤层气资源预测的基本单元为垂向、侧向导通的采空区群<sup>[19-20]</sup>。根据孟召平等<sup>[13]</sup>建立的采空区冒落带和裂隙带内孔隙-裂隙模型,垮落带与裂隙带孔隙体积之和与工作面粉积的比值 $I$ ,介于0.53~0.94之间,考虑到采空区积水及气体的压缩效应,则采空区游离气总量 $Q_{y1}$ 为

$$Q_{y1} = I S_c H_c g_{y1} (1 - K) \quad (6)$$

式中: $S_c$ 表示采空区面积, m<sup>2</sup>;  $H_c$ 为煤层采高, m;  $g_{y1}$ 表示采空区甲烷体积分数, %;  $K$ 为采空区充水系数, 无量纲。

采空区甲烷体积分数和充水系数取值见表4,前者取值基于已有采空区钻井井口甲烷浓度信息及已知相邻矿井采空区甲烷浓度数据,对于数据缺失的矿井,则参考高瓦斯矿井/低瓦斯矿井采空区甲烷浓度平均值,后者根据关闭煤矿闭坑报告采空区积水确定。

采空区吸附气资源量包括煤柱、采空区遗煤和邻近卸压煤层吸附气资源量<sup>[28]</sup>。采煤工作面经过综合开采,充分扰动后,采空区遗煤解吸严重,接近充分解吸后的残余气量 $q_{cy}$ 。因此,这部分资源量 $Q_{x1}$ 由以下公式计算:

$$Q_{x1} = M_y q_{cy} \quad (7)$$

式中: $Q_{x1}$ 为采空区遗煤吸附气资源量, $10^4 \text{ m}^3$ ;  $M_y$ 表示采空区工作面遗煤, $10^4 \text{ t}$ ,根据采区/工作面回采率计算; $q_{cy}$ 表示残余含气量, $\text{m}^3/\text{t}$ ,标准大气压条件下的实测吸附气含量,由收集矿井煤样相关吸附参数计算得出。

对于开采层煤柱中的吸附气资源量,煤层卸压不完全解吸,煤柱宽度按照根据采空区横向裂隙宽度确定,其资源量 $Q_{x2}$ 由以下公式计算:

$$Q_{x2} = M_z q_c \quad (8)$$

$$q_c = (1 - \eta)(q_0 - q_{cy}) + q_{cy} \quad (9)$$

式中: $M_z$ 为采空区煤柱资源量, $10^4 \text{ t}$ ;  $q_c$ 为残存含气量, $\text{m}^3/\text{t}$ ;  $\eta$ 为煤层气排放效率,%;  $q_0$ 表示煤层初始含气量, $\text{m}^3/\text{t}$ 。

同理,邻近卸压煤层吸附气资源量 $Q_{x3}$ 由以下公式计算:

$$Q_{x3} = M_x q_c \quad (10)$$

式中: $M_x$ 为采空区煤柱资源量, $10^4 \text{ t}$ ;  $q_c$ 由不同的煤层气排放效率 $\eta$ 确定, $\eta$ 根据与邻近煤层平均间距,按照《矿井瓦斯涌出量预测方法AQ 1018-2006》标准确定。

值得注意的是,由于关闭煤矿采空区众多,上部卸压煤层资源量 $M_{x3}$ 由以下公式计算:

$$M_x = S_c H_x \rho \quad (11)$$

式中: $H_x$ 为邻近煤层的厚度,m;  $\rho$ 表示邻近层煤层密度, $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

原位煤层气含量采用井下瓦斯测试或者钻井解吸数据,如果关闭煤矿该数据缺失,可以从相邻矿井资料中获取。根据《煤层气资源/储量规范》,阳泉-晋城矿区煤层气含气量的下限标准为 $8 \text{ m}^3/\text{t}$ 。原位煤层气资源量 $Q_{yw}$ 由下式计算:

$$Q_{yw} = M_T q_{yw} \quad (12)$$

式中: $q_{yw}$ 为原位煤层含气量, $\text{m}^3/\text{t}$ ;  $M_T$ 为未受采动、构造影响的原位煤炭资源量, $10^4 \text{ t}$ 。

### 3.3 预测结果

阳泉-矿区关闭煤矿煤层气资源量预测包括14个煤矿,其中9个为高瓦斯煤矿,根据采空区上下叠置及连通情况,将阳泉矿区关闭煤矿采空区共分为21个评价单元,将晋城矿区关闭煤矿采空区分为20个评价单元。以阳泉南庄煤矿为例,将12号、15号煤采空区划分为3个资源预测单元,分别为NZ-1、NZ-2、NZ-3。NZ-1单元包括垂向连通的12号、15号煤层采空区,采空区位置大致重合。NZ-2单元12、15号煤层采空区不完全重合,12号煤层部分卸压。NZ-3单元为矿区东缘的15号煤层采空区,上部12号煤层卸压。此外,根据原位煤层展布特征,将原位煤层分为NZ-4和NZ-5共两个资源量预测、评价单元(图6)。

南庄煤矿采空区煤层气资源量预测见表5。3个评价单元,合计的采空区游离气资源量为 $1\,282.79 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,采空区工作面遗煤吸附气资源量达 $1\,188.09 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,采空区煤柱吸附气资源量为 $2\,050.68 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,采空区卸压煤层吸附气资源量达 $1\,005.86 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,合计采空区资源量为 $5\,527.42 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,其中游离气资源所占比例为23.21%。NZ-4和NZ-5原位煤层位于NZ-2采空区北部和南部,基本为保护煤柱资源,原位煤层资源量为 $602.47 \times 10^4 \text{ t}$ ,原位煤层气资源量为 $5\,317.29 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。总的来说,南庄关闭煤矿煤层气资源量合计 $10\,844.71 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

经过计算,在资源预测范围内,阳泉矿区关闭煤矿游离气资源量为 $6\,266.89 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,吸附气资源量为 $27\,890.72 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,总计采空区煤层气资源量为 $34\,359.25 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,游离气资源量所占比例为18.24%,原位煤层气资源量达 $75\,063.18 \times 10^4 \text{ m}^3$ (表6)。晋城矿区关闭煤矿游离气资源量为 $2\,403.34 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,吸附气资源量为 $9\,611.42 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,合计采空区煤层气资源量为 $11\,714.76 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,游离气资源量所占比例为20.52%,原位煤层气资源量达 $71\,324.94 \times 10^4 \text{ m}^3$ (表6)。总的来说,阳泉-晋城矿区关闭煤矿采空区煤层气资源合计 $46\,074.01 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,原位煤层气资源量达 $146\,388.12 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。其中,阳泉三矿和南庄煤矿的资源条件最好,采空区体积、游离气与吸附气资源量及资源总量都远大于其他关闭煤矿。

## 4 抽采模式

目前,关闭煤矿煤层气抽采(图7)以地面钻井为

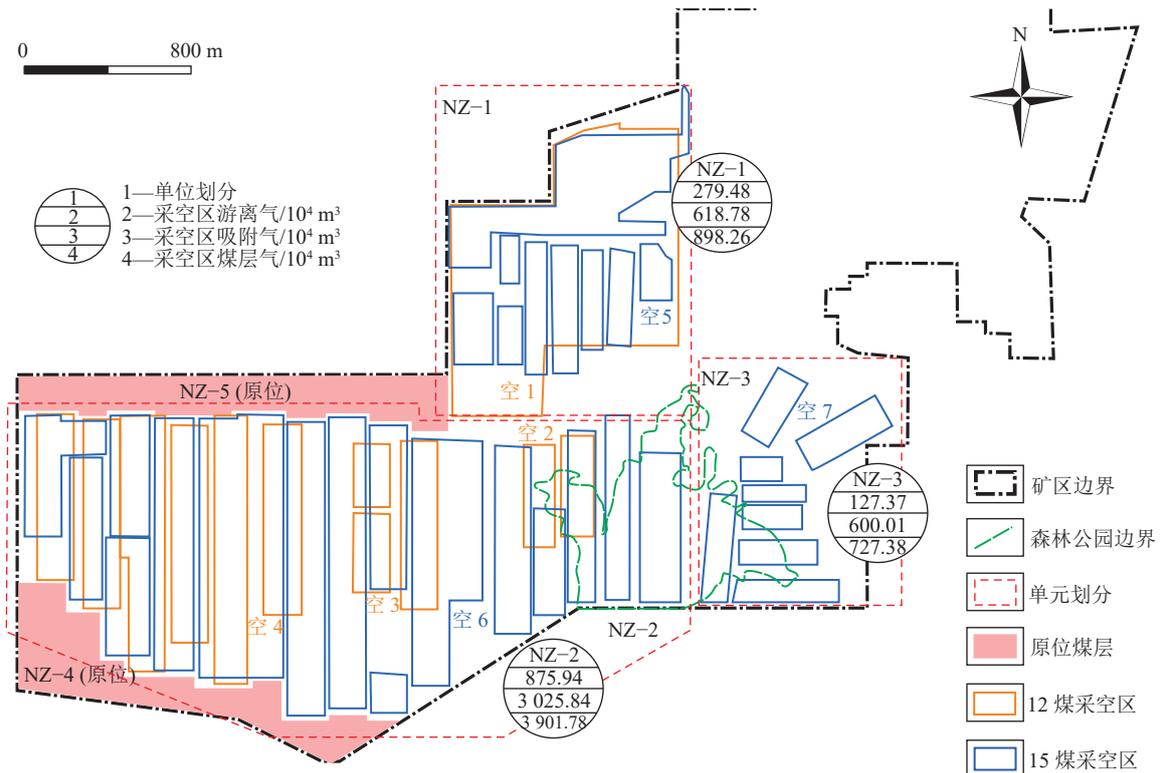


图6 南庄煤矿煤层气资源量预测单元

Fig.6 Plane distribution of coalbed methane resources prediction unit in Nanzhuang Coal Mine

表5 阳泉南庄煤矿采空区煤层气资源预测

Table 5 Prediction table of goaf coalbed methane resources in Yangquan Nanzhuang Coal Mine

| 预测单元 | 煤层    | 编号 | 采空区体积/<br>10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> | M <sub>v</sub> /10 <sup>4</sup> t | M <sub>f</sub> /10 <sup>4</sup> t | M <sub>x</sub> /10 <sup>4</sup> t | Q <sub>y</sub> /10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> | Q <sub>x1</sub> /10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> | Q <sub>x2</sub> /10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> | Q <sub>x3</sub> /10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> | 采空区煤层<br>气资源/(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ) |
|------|-------|----|--|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--|---|---|---|--|
| NZ-1 | 12    | 空1 | 103.46                                   | 36.48                             | 34.70                             |                                   | 53.08  | 48.89   | 56.56   |   | 158.52   |
|      | 15    | 空5 | 441.33                                   | 155.61                            | 187.00                            |                                   | 226.40   | 208.52  | 304.81  |   | 739.74   |
| NZ-2 | 12    | 空2 | 10.49                                    | 3.70                              | 10.68                             |                                   | 5.38   | 4.96  | 19.07   |   | 29.41  |
|      | 12    | 空3 | 55.63                                    | 19.61                             | 12.41                             |                                   | 28.54  | 26.28   | 24.89   |   | 79.71  |
|      | 12    | 空4 | 126.22                                   | 44.51                             | 83.48                             |                                   | 64.75  | 65.42   | 185.58  |   | 315.75   |
|      | 15    | 空6 | 1 515.15                                 | 534.25                            | 541.08                            |                                   | 777.27   | 715.89  | 1 112.46  |   | 2 605.62                                       |
|      | 12(邻) |    |  | 45.04                             |                                   | 75.07                             |  |   |   | 156.90  | 156.90   |
|      | 12(邻) |    |  |                                   |                                   | 30.74                             |  |   |   | 135.37  | 135.37   |
| NZ-3 | 12(邻) |    |  |                                   | 124.96                            |                                   |  |   |   | 579.01  | 579.01   |
|      | 15    | 空7 | 248.29                                   | 88.16                             | 168.92                            |                                   | 127.37   | 118.13  | 347.30  |   | 592.80   |
|      | 12(邻) |    |  | 30.20                             |                                   | 50.33                             |  |   |   | 77.41   | 77.41  |
|      | 12(邻) |    |  |                                   | 20.46                             |                                   |  |   | 57.16   | 57.16   |  |

主,主要包括地面直井抽采、L型井抽采、采空区煤层气与水平邻近原位煤层气合采及过采空区下部煤层气抽采<sup>[23,39-43]</sup>。采空区地面直井通常采用三开设计,两级固井,悬挂割缝完井的井身结构设计,三开并不穿过采空区,而是位于煤层上方裂隙带中<sup>[23,39-40]</sup>。井位布置应避免断层、陷落柱等不利的地质构造,并

错开主采空区上不连通的采空区,井位布置在采空区“O”型裂隙区范围内(图7a)。由于采空区岩层稳定性较差,存在水平、垂直向上的剪切位移,容易破坏井身结构,可在满足工程成本要求的基础上适度增大各级井段的钻井直径,保证井眼的有效畅通<sup>[23]</sup>。抽采方式包括地面负压抽采<sup>[39]</sup>和排水采气一体化抽

表6 阳泉-晋城矿区关闭煤矿煤层气资源量预测结果

Table 6 Prediction results of coalbed methane resources in closed coal mines in Yangquan and Jincheng Mining Areas

| 矿区   | 煤矿名称      | 采空区体积/<br>10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> | 游离气资源量/<br>10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> | 吸附气资源量/<br>10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> | 采空区煤层气资源量/<br>10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> | 原位煤层气资源量/<br>10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> |
|------|-----------|--|---|---|--|---|
| 阳泉矿区 | 富鑫        | 394.24                                   | 202.25                                    | 1 033.49                                  | 1 235.74                                     | —   |
|      | 泰昌        | 729.85                                   | 353.61                                    | 2 313.57                                  | 2 667.18                                     | —   |
|      | 鸿泰        | 223.55                                   | 41.36                                     | 338.59                                    | 379.95                                       | 1 687.15                                    |
|      | 燕龛        | 268.72                                   | 89.48                                     | 718.03                                    | 807.52                                       | —   |
|      | 三矿        | 7 624.85                                 | 4 254.66                                  | 19 157.01                                 | 23 411.68                                    | 68 058.74                                   |
|      | 南庄        | 2 500.56                                 | 1 282.79                                  | 4 043.01                                  | 5 527.42                                     | 5 317.29                                    |
|      | 万和兴       | 128.34                                   | 42.74                                     | 287.02                                    | 329.76                                       | —   |
|      | 小计        | 11 870.11                                | 6 266.89                                  | 27 890.72                                 | 34 359.25                                    | 75 063.18                                   |
| 晋城矿区 | 演礼        | 117.90                                   | 80.17                                     | 522.78                                    | 602.95                                       | 26 824.70                                   |
|      | 天安圣华      | 67.25                                    | 45.73                                     | 287.68                                    | 33.41  | —   |
|      | 侯甲        | —  | —   | —   | —  | 44 500.24                                   |
|      | 古书院       | 2 613.11                                 | 870.17                                    | 4 180.46                                  | 5 050.62                                     | —   |
|      | 王台铺       | 1 028.60                                 | 342.52                                    | 834.06                                    | 1 176.59                                     | —   |
|      | 凤凰山       | 3 247.42                                 | 1 022.94                                  | 3 786.44                                  | 4 809.38                                     | —   |
|      | 北岩        | 298.65                                   | 41.81                                     | —   | 41.81  | —   |
|      | 小计        | 7 372.93                                 | 2 403.34                                  | 9 611.42                                  | 11 714.76                                    | 71 324.94                                   |
| 合计   | 19 243.04 | 8 670.23                                 | 37 502.14                                 | 46 074.01                                 | 146 388.12                                   |   |

采<sup>[40]</sup>。L型水平井在煤矿采动区煤层气地面抽采中应用广泛<sup>[41]</sup>，也被认为可用于关闭煤矿采空区煤层气抽采，适用于地质构造简单、基础资料准确、埋深适中的采空区群<sup>[42]</sup>。以采空区周边稳定的保安煤柱作为井位，一开钻至基岩下，二开钻至采空区裂隙带上方稳定岩层，造斜，三开大范围的揭露采空区空间，并采用割缝筛管护壁<sup>[42]</sup>（图7b）。连通采空区后，利用地面负压抽采设备进行负压抽采。关闭煤矿采空区地面直井抽采存在甲烷浓度和产量衰减快等问题<sup>[39]</sup>。通过采空区与水平邻近原位煤层（煤柱）合采，以便于煤层气井达到增产增效效果。可在距采空区水平距离130~170 m的煤柱上布设压裂井，在采空区“O”型圈上布设直井抽采井，通过压裂井压裂，将煤矿原位-采空区煤层气形成统一、连通的含气系统，可提高抽采效率（图7c）。此外，采空区下部卸压区中煤储层渗透率增加，解吸并赋存了大量的游离气<sup>[43]</sup>，通过对卸压区及卸压区下煤层施工过采空区钻井，并射孔压裂，见气时间短，产气较稳定，在晋城矿区寺河井区取得了良好的应用效果<sup>[43]</sup>，能够最大程度利用矿区煤层气资源（图7d）。

晋城矿区演礼、天安圣华等高瓦斯关闭煤矿采空区为3煤单层采空区，矿井面积及采空区面积小，

相对分散分布，采空区煤层气资源量有限，但深部15号未动用煤层原位煤层气资源较丰富，可以考虑采空区地面直井抽采或过采空区下部煤层气抽采。晋城矿区东部集中分布的凤凰山、古书院、王台铺3个低瓦斯关闭煤矿采空区煤层气资源量较大，垂向上存在3、9、15煤三层采空区，3煤采空区埋深主体介于100~200 m，9、15号煤采空区基本垂向叠置，面积大、相互连通，埋深主体介于200~400 m，15煤煤层气含量介于1.11~2.71 m<sup>3</sup>/t，处于氮气-甲烷带。可以选择错开3煤采空区，施工地面直井抽采9、15煤采空区煤层气资源。阳泉矿区富鑫、泰昌、燕龛高瓦斯关闭煤矿垂向上虽然存在多层采空区，但以15煤采空区为主，采空区面积小，分布相对分散，采煤方法落后，工作面回采率低，开展15煤采空区地面直井抽采为最佳选择。三矿、南庄煤矿3煤采空区时间久远(>30年)，逸散严重，12、15号煤层以长壁式综采为主，工作面回采率高，采空区连续分布，但甲烷浓度不高，可开展L型井负压抽采，沟通侧向采空区群，减少施工成本、提高抽采效率。此外，矿井中原位煤层气资源丰富，在靠近原位煤层的采空区，可考虑采空区煤层气与水平邻近原位煤层气合采。

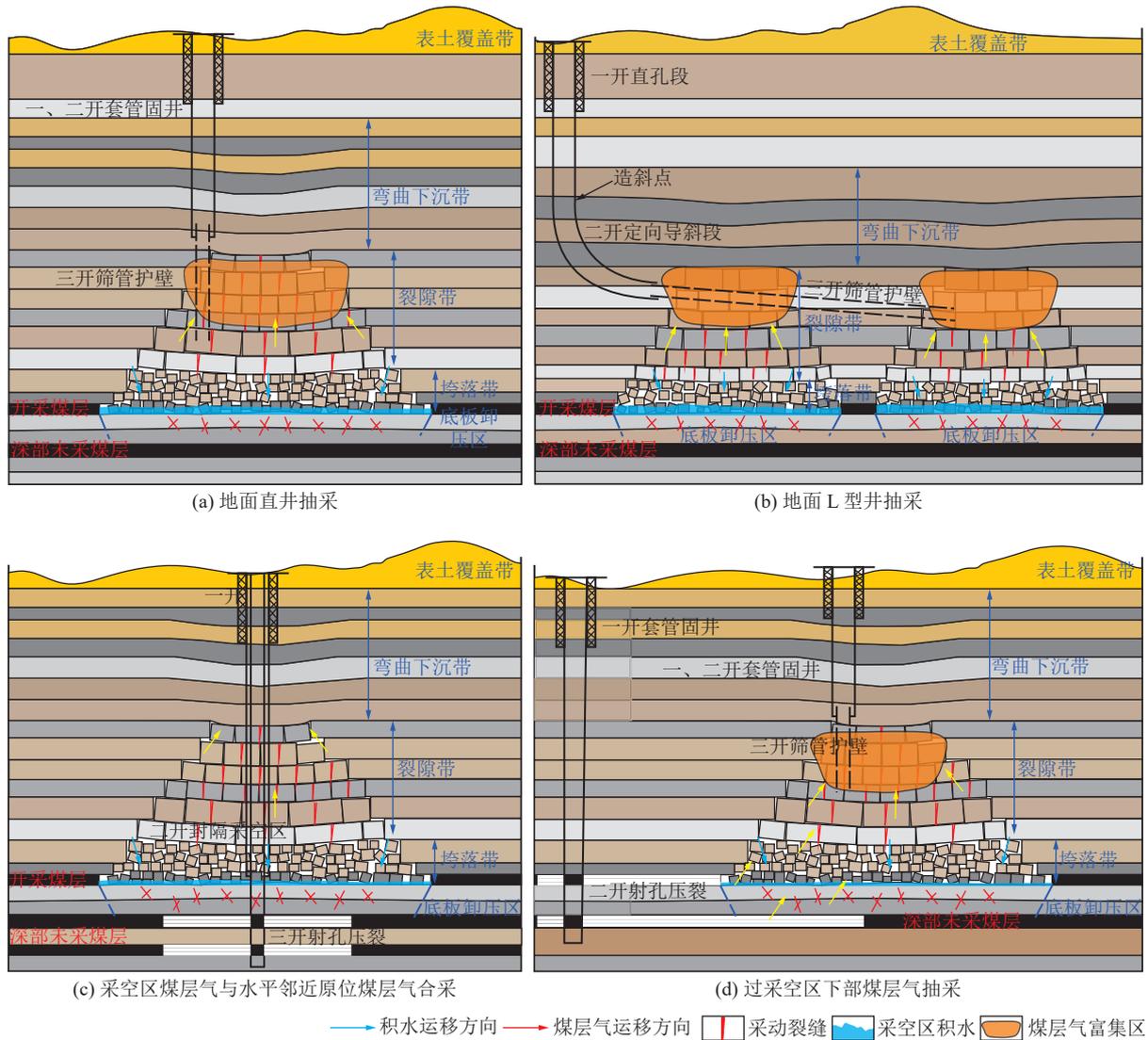


图7 关闭煤矿煤层气抽采模式

Fig.7 Drainage modes of coalbed methane in closed coal mine

### 5 结 论

1)阳泉-晋城矿区 2009 年兼并重组前和兼并重组中关闭煤矿共 153 座,煤层埋深浅,基本为低瓦斯煤矿。2016—2020 年去产能关闭煤矿 37 座,其中阳泉矿区关闭煤矿分布较集中,以高瓦斯矿为主,垂向上存在多层采空区;晋城矿区分布相对零散,以低瓦斯矿井为主,采空区多为单层或两层。

2)关闭煤矿煤层气资源由采空区煤层气资源与原位煤层气资源构成。采空区煤层气以游离态为主赋存于采空区孔隙-裂隙中,计算结果表明,厚煤层采空区垮落带与裂隙带孔隙体积之和与工作面体积的比值  $I$  介于 0.53 ~ 0.73,而中厚煤层采空区  $I$  值通常大于 0.90。原位煤层气主要以吸附态赋存于煤基质孔隙中,阳泉-晋城矿区 15 号煤孔隙度介于 3.69% ~ 5.45%,微孔比表面积介于 97.58 ~ 120.76  $m^2/g$ ,微孔

体积介于 0.017 ~ 0.022  $cm^3/g$ ,微孔最为发育。煤层埋深和局部构造是原位煤层含气性的主控因素,而甲烷浓度作为采空区含气性的重要指标,受控于煤层、储气空间结构及封闭条件。

3)根据资源与关闭煤矿特征将阳泉-晋城矿区关闭煤矿煤层气资源分为 3 类:低瓦斯关闭煤矿采空区煤层气资源、高瓦斯关闭煤矿采空区煤层气资源和高瓦斯关闭煤矿原位煤层气资源。构建了关闭煤矿采空区煤层气资源量预测数学模型,预测了采空区煤层气资源量;采用体积法,预测了原位煤层气资源量。在资源预测范围内,阳泉-晋城矿区关闭煤矿采空区煤层气资源量合计 46 074.01 $\times 10^4 m^3$ ,原位煤层气资源量达 146 388.12 $\times 10^4 m^3$ 。此外,总结了 4 种煤层气抽采模式,并针对各关闭煤矿提出了利用方向。

## 参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 刘峰, 李树志. 我国转型煤矿井下空间资源开发利用新方向探讨[J]. 煤炭学报, 2017, 42(9): 2205-2213.  
LIU Feng, LI Shuzhi. Discussion on the new development and utilization of underground space resources of transitional coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(9): 2205-2213.
- [3] 刘汉斌, 张亚宁, 程芳琴. 山西关闭煤矿资源利用现状及开发利用建议[J]. 煤炭经济研究, 2019, 39(10): 78-82.  
LIU Hanbin, ZHANG Yaning, CHENG Fangqin. Utilization status and development suggestions on closed coal mine resources in Shanxi Province[J]. Coal Economic Research, 2019, 39(10): 78-82.
- [4] 桑逢云, 刘文革, 韩甲业, 等. 英国废弃煤矿瓦斯开发成功经验及对我国的启示[J]. 中国煤层气, 2019, 16(2): 3-5.  
SANG Fengyun, LIU Wenge, HAN Jiaye, et al. Enlightenment of China on successful experiences of abandoned mine methane development in Britain[J]. China Coalbed Methane, 2019, 16(2): 3-5.
- [5] KARACAN C Ö, WARWICK P D. Assessment of coal mine methane (CMM) and abandoned mine methane (AMM) resource potential of longwall mine panels: example from northern Appalachian Basin, USA[J]. International Journal of Coal Geology, 2019, 208: 37-53.
- [6] 秦跃平, 姚有利, 刘长久. 铁法矿区地面钻孔抽放采空区瓦斯技术及应用[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2008, 27(1): 5-8.  
QIN Yueping, YAO Youli, LIU Changjiu. Technology of surface boreholes for drainage of goaf gases and application in Tiefa Mining area[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2008, 27(1): 5-8.
- [7] 李日富. 松藻矿区采动稳定区煤层气地面井抽采试验及应用效果[J]. 矿业安全与环保, 2018, 45(2): 44-48.  
LI Rifu. Drainage test of CBM ground well in mining stability area of songzao coal mine[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2018, 45(2): 44-48.
- [8] 王勃, 朱庆忠, 刘文革, 等. 乌兰废弃煤矿瓦斯赋存地质特征及开发技术[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2022, 41(2): 10-17.  
WANG Bo, ZHU Qingzhong, LIU Wenge, et al. Geological characteristics of gas occurrence and technical countermeasures of Wulan abandoned coal mine[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2022, 41(2): 10-17.
- [9] 周伟, 袁亮, 张国亮, 等. 采空区瓦斯涌出来源量化判别方法: 以寺河矿为例[J]. 煤炭学报, 2018, 43(4): 1016-1023.  
ZHOU Wei, YUAN Liang, ZHANG Guoliang, et al. A new method for determining the individual sources of goaf gas emissions: A case study in Sihe coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(4): 1016-1023.
- [10] 刘超, 冯国瑞, 曾凡桂. 沁水盆地南部潘庄区块废弃矿井煤层气地球化学特征及成因[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(6): 67-72, 77.  
LIU Chao, FENG Guorui, ZENG Fangui. Origin and geochemical characteristics of coalbed methane in abandoned coal mines, Panzhuang block, southern Qinshui basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(6): 67-72, 77.
- [11] 梁文勳, 李江涛, 付巍, 等. 基于稳定同位素的混合瓦斯源识别技术研究与应用[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(3): 56-61.  
LIANG Wenxu, LI Jiangtao, FU Wei, et al. Research and application of mixed gas source identification technology based on stable isotope[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(3): 56-61.
- [12] LI D, SU X B, SU L N. Theory of gas traps in stope and its application in ground extraction of abandoned mine gas: Part 1—gas trap in stope and resources estimation[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 207: 109285.
- [13] 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.
- [14] 刘小磊, 闫江伟, 刘操, 等. 废弃煤矿瓦斯资源估算与评价方法构建及应用[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(4): 45-51.  
LIU Xiaolei, YAN Jiangwei, LIU Cao, et al. Construction and application of gas resource estimation and evaluation method in abandoned coal mines[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(4): 45-51.
- [15] CHENG M, FU X H, CHEN Z Y, et al. A new approach to evaluate abandoned mine methane resources based on the zoning of the mining-disturbed strata[J]. Energy, 2023, 274: 127307.
- [16] 尹志胜, 桑树勋, 周效志. 煤炭资源枯竭矿井煤层气运移及富集规律研究[J]. 特种油气藏, 2014, 21(5): 48-51, 153.  
YIN Zhisheng, SANG Shuxun, ZHOU Xiaozhi. Study on migration and enrichment regularities of CBM in exhausted coal resource wells[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(5): 48-51, 153.
- [17] FENG G R, ZHANG A, HU S Y, et al. A methodology for determining the methane flow space in abandoned mine gobbs and its application in methane drainage[J]. Fuel, 2018, 227: 208-217.
- [18] 李健. 地面钻井抽采对采空区瓦斯运移的控制特征研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.  
LI Jian. Research on the control characteristics of gas migration in gob by the drainage of surface borehole[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [19] 彭金刚. 鸡西、鹤岗矿区封闭采空区煤层气资源评价[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.  
PENG Jingang. Resource evaluation of closed gob CBM (coalbed methane) in Hegang and Jixi mining area[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.

- [20] 王波. 鸡西矿区封闭采空区煤层气开发甜点区优选及负压抽采工艺[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.  
WANG Bo. Sweet spots selection for coalbed methane development and negative pressure extraction technology from closed gob in Jixi Mining area[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [21] 杨明, 朱林, 金星苑, 等. 废弃煤矿采空区瓦斯抽采可行性评价模型构建及应用[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(7): 107-117.  
YANG Ming, ZHU Lin, QUAN Xingyuan, et al. Construction and application of feasibility evaluation model for gas extraction in goafs of abandoned coal mines[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(7): 107-117.
- [22] 赵向东. 山西省废弃矿井采空区煤层气地面抽采实践[J]. 中国煤层气, 2020, 17(1): 35-38, 34.  
ZHAO Xiangdong. Practice of coalbed methane surface extraction in goaf of abandoned mine in Shanxi Province[J]. *China Coalbed Methane*, 2020, 17(1): 35-38, 34.
- [23] 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.
- [24] 赵彦, 于志军, 陈广生, 等. 废弃煤矿低浓度瓦斯资源化利用方式探究[J]. 中国煤层气, 2019, 16(6): 44-46.  
ZHAO Yan, YU Zhijun, CHEN Guangsheng, et al. Research on resource utilization methods for low-concentration CMM in abandoned coal mines[J]. *China Coalbed Methane*, 2019, 16(6): 44-46.
- [25] 苏育飞, 张庆辉, 胡晓兵. 山西省关闭煤矿资源普查方法及资源开发利用重要性评述[J]. 中国煤炭地质, 2020, 32(9): 79-87.  
SU Yufei, ZHANG Qinghui, HU Xiaobing. Review on importance of prospecting method and exploitation, utilization for closed coalmine resources in Shanxi Province[J]. *Coal Geology of China*, 2020, 32(9): 79-87.
- [26] 张农, 阚甲广, 王朋. 我国废弃煤矿资源现状与分布特征[J]. 煤炭经济研究, 2019, 39(5): 4-8.  
ZHANG Nong, KAN Jiaguang, WANG Peng. Study on resources and distribution of abandoned mines in China[J]. *Coal Economic Research*, 2019, 39(5): 4-8.
- [27] 孙宏达. 煤炭资源枯竭矿井煤层气(瓦斯)资源分布规律及资源评价方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.  
SUN Hongda. Study on distribution and evaluation methodology of CBM (coal mine gas) resources in coal resource depleting mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [28] 胡长勤, 刘坤鹏. 废弃煤矿瓦斯资源量预测模型的构建与应用[J]. 能源与环境, 2020, 42(9): 1-6, 12.  
HU Changqin, LIU Kunpeng. Establishment and application of prediction model for gas resources in abandoned coal mines[J]. *China Energy and Environmental Protection*, 2020, 42(9): 1-6, 12.
- [29] 秦伟. 地面钻井抽采老采空区瓦斯的理论与应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.  
QIN Wei. Study on the theory and its application of gas drainage from abandoned gob by surface wells[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013.
- [30] 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.
- [31] 韩保山. 废弃矿井煤层气资源开发潜力评价方法研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2003.  
HAN Baoshan. Study on evaluation method of development potential of coalbed methane resources in abandoned mines[D]. Beijing: Chinese Institute of Coal Science, 2003.
- [32] 孙盛涛, 吴财芳, 付英娟, 等. 阳泉矿区15号煤层储层物性特征研究[J]. 煤, 2012, 21(11): 18-19, 27.  
SUN Shengtao, WU Caifang, FU Yingjuan, et al. Study characteristics of reservoir properties on No. 15 coal seam in Yangquan mining area[J]. *Coal*, 2012, 21(11): 18-19, 27.
- [33] 杨兆彪, 唐军, 李国富, 等. 山西省典型煤炭国家规划矿区煤层气储层物性对比[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(6): 34-39.  
YANG Zhaobiao, TANG Jun, LI Guofu, et al. Comparison of physical properties of coalbed methane reservoirs in typical national coal planning mining area of Shanxi Province[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(6): 34-39.
- [34] 唐军. 山西省重点煤矿区煤层气开发单元划分——以晋城和阳泉矿区为例[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.  
TANG Jun. The division of CBM development unit of key coal mining area in Shanxi Province—take Jincheng and Yangquan mining area as examples[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [35] 曹代勇, 钱光谟, 关英斌, 等. 晋获断裂带发育对煤矿区构造的控制[J]. 中国矿业大学学报, 1998, 27(1): 5-8.  
CAO Daiyong, QIAN Guangmo, GUAN Yingbin, et al. Development of Jinhua fault zone and its effect on the structures of coal mining districts[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1998, 27(1): 5-8.
- [36] 胡胜勇, 张甲雷, 冯国瑞, 等. 煤矿采空区瓦斯富集机制研究[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(2): 121-126.  
HU Shengyong, ZHANG Jialei, FENG Guorui, et al. Research on methane enrichment mechanism in coal mine goaf[J]. *China Safety Science Journal*, 2016, 26(2): 121-126.
- [37] FENG G R, HU S Y, LI Z, et al. Distribution of methane enrichment zone in abandoned coal mine and methane drainage by surface vertical boreholes: a case study from China[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 34: 767-778.
- [38] WILLIAMS J P, RISK D, MARSHALL A, et al. Methane emissions from abandoned coal and oil and gas developments in New Brunswick and Nova Scotia[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, 191(8): 479.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] 王争, 李国富, 周显俊, 等. 山西省废弃矿井煤层气地面钻井开发关键问题与对策[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(4): 86–95.
- WANG Zheng, LI Guofu, ZHOU Xianjun, et al. Key problems and countermeasures of CBM development through surface boreholes in abandoned coal mines of Shanxi Province[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(4): 86–95.
- [43] 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.