



平顶山矿区多煤层卸压立体抽采模式与工程示范

李延河 倪小明 贾晋生

引用本文:

李延河, 倪小明, 贾晋生. 平顶山矿区多煤层卸压立体抽采模式与工程示范[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(9): 162–172.
LI Yanhe, NI Xiaoming, JIA Jinsheng. Extraction mode and engineering demonstration of pressure relief three-dimensional of multi-coal seams in Pingdingshan mining area[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(9): 162–172.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2024-0742>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

倾斜厚煤层卸压瓦斯靶向区辨识及抽采关键技术

Key technologies for extraction and identification of gas target area for pressure relief in inclined thick coal seam
煤炭科学技术. 2023, 51(8): 105–115 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0414>

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>

淮南矿区煤层顶板分段压裂水平井抽采技术及效果研究

Study on technology and effect of gas extraction in horizontal well with segmental hydraulic fracture in roof of coal seam in Huainan mining area
煤炭科学技术. 2024, 52(4): 155–163 <https://doi.org/10.12438/est.2023-1937>

地面钻井抽采被保护层采动区卸压瓦斯技术研究

Study on pressure relief gas drainage technology in mining area of ground drilling in protected layer
煤炭科学技术. 2019(11) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/0d19c692-9246-45b1-b64d-5c0c524b2859>

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 gobs 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

李延河, 倪小明, 贾晋生. 平顶山矿区多煤层卸压立体抽采模式与工程示范[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(9): 162-172.

LI Yanhe, NI Xiaoming, JIA Jinsheng. Extraction mode and engineering demonstration of pressure relief three-dimensional of multi-coal seams in Pingdingshan mining area[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(9): 162-172.



李延河, 男, 河南修武人, 中共党员, 正高级工程师。曾获煤炭行业突出贡献总工程师。研究方向: 深部矿井资源安全高效开发及能源综合利用。主要成果: 长期奋战在企业安全生产、科技创新第一线, 重点针对制约煤炭行业高质量发展的各类共性难题, 开展了深入系统的长期研究, 累计荣获省部级与行业科技奖 10 项, 其中一等奖 4 项; 在核心期刊发表学术论文 27 篇, 其中第一作者 23 篇; 出版著作 4 部; 获得各类知识产权 52 项, 其中发明专利 23 项; 参与制定行业以上标准 2 项。

平顶山矿区多煤层卸压立体抽采模式与工程示范

李延河^{1,2}, 倪小明³, 贾晋生⁴

(1. 平顶山天安煤业股份有限公司, 河南 平顶山 467000; 2. 中国平煤神马控股集团有限公司, 河南 平顶山 467000; 3. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000; 4. 河南超蓝能源科技有限公司, 河南 平顶山 467000)

摘要: 平顶山矿区多煤层发育、含气层段多, 仅靠井下进行瓦斯治理工程量大、难度高。为了开辟平顶山矿区瓦斯抽采新模式, 达到“采一层抽多层”的目的, 采用气测录井与含气量测试相结合的方法精准判识了煤系主要含气层段和含气量; 采用体积法评价了东部 5 对矿井采动区和采空区的煤系气资源量。基于“O”形圈理论和“防-抗-让”思想, 分别优化设计了采动井、采空井的井位、层位和井身结构, 构建了采动区、采空区多煤层卸压立体抽采模式并进行了工程示范。结果表明: ①二₁煤层顶板 200 m 范围内存在四煤组、三煤组、二₁煤层顶板 60 m 范围内的砂岩/泥质砂岩互层段等 3 处主要含气段。平顶山矿区东部 5 对矿井的采动区和采空区资源量分别为 $26.36 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $20.00 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。②采动井最佳井位为 0.17~0.28 倍采长, 且靠近回风巷条带区域; 走向上, 采动井的间距一般为 80~100 m。创建了“大口径、避开岩体变形强烈区、P110 梯型扣套管”的采动直井稳孔技术体系和“下行水平轨迹+提高套管强度”的采动 L 型水平井稳产技术体系, 保证了产气通道的畅通性。采空井一般布置在距离回风巷 30~50 m 的区域, 完钻位置一般为二₁煤层顶板 40~60 m 的范围; 筛管布置在四煤段顶板至裂隙带底部。③建立了“地面采动直井/定向井-采动 L 型水平井-采空井”联作的卸压立体抽采模式, 实现了多气源立体抽采。截至 2024 年 4 月 30 日, 累计抽采纯量达 5 258.8 万 m^3 , 总利用量达到 3 735.4 万 m^3 , 率先在河南省实现了煤系气产业化开发, 示范和引领带动作用显著。

关键词: 煤系气; 多煤层卸压; 立体抽采模式; 采动区; 采空区; 平顶山矿区

中图分类号: TD712 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2024)09-0162-11

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

LI Yanhe^{1,2}, NI Xiaoming³, JIA Jinsheng⁴

(1. Pingdingshan Tian'an Coal Mining Co., Ltd., Pingdingshan 467000, China; 2. China Pingmei Shenma Energy and Chemical Group Co., Ltd., Pingdingshan 467000, China; 3. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 4. Henan Chaolan Energy Technology Co., Ltd., Pingdingshan 467000, China)

Abstract: There are many coal seams and gas-bearing strata in Pingdingshan mining area, and the amount of underground gas control

收稿日期: 2024-06-05 责任编辑: 宫在芹 DOI: 10.12438/cst.2024-0742

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42072189)

作者简介: 李延河(1973—), 男, 河南修武人, 教授级高级工程师。E-mail: 364629938@qq.com

project is large and difficult. In order to establish a new model of gas drainage in Pingdingshan and achieve the purpose of mining one layer and extracting multiple layers, the main gas-bearing layers and gas content of coal measures were accurately identified by combining gas logging and gas content testing. The coal measures gas resources in the mining area and goaf of five pairs of mines in the east are evaluated by the volume method. Based on the theory of “O-ring” and the concept of “prevent-allow-resist”, the positions of wells and the positions of layers, and wellbore structures of the mining wells and of goaf wells were optimized respectively. A multi-coal seam pressure-relieving three-dimensional extraction model of the active mining and goaf area constructed and an engineering demonstration was carried out. The results show that: ① There are three main gas bearing sections within 200 m of the roof of coal seam II_1 , including the fourth coal group, the third coal group, and the sandstone and mudstone interbedded section within 60 m of the roof of coal seam II_1 . The resources of mining area and goaf area in the eastern part of Pingdingshan mining area are $26.36 \times 10^8 \text{ m}^3$ and $20.00 \times 10^8 \text{ m}^3$ respectively. ② The optimal wells position are 0.17-0.28 times the length of the coal mining face and close to the return airway strip area. The spacing between mining wells is generally 80-100 m. A stable drilling technology system for mining vertical wells with “large diameter, avoiding areas of strong rock deformation, P110 ladder type casing” and a stable production technology system for mining L-shaped horizontal wells with “downward horizontal trajectory+ increasing casing strength” was established, which can ensure the smoothness of gas production channels. The goaf well is generally arranged in an area 30-50 m away from the return airway, and the drilling position is generally within the range of 40-60 m from the roof of the II_1 coal seam; The sieve tube is arranged from the top plate of the fourth coal section to the bottom of the fracture zone. ③ A long-term stable and efficient extraction technology system for ground wells in goaf areas was established, and a pressure-relieving three-dimensional extraction mode of “ground extraction vertical well/directional well-ground extraction L-shaped horizontal well-goaf well” and realizing multi-gas source three-dimensional extraction has been formed. Up to April 30th, 2024, the cumulative extraction volume reached 52.588 million m^3 , and the total utilization reached 37.354 million m^3 , taking the lead in realizing the industrial development of coal measures gas in Henan Province, and playing a significant role in demonstrating and leading.

Key words: coal bearing gas; pressure relief of multiple coal seams; three-dimensional extraction mode; active mining area; goaf area; Pingdingshan mining area

0 引言

中国具有富煤贫油少气的能源格局,煤炭能源依然会在未来较长时间内居于能源结构中的重要位置^[1]。我国废弃矿井的数量达1.2万处,到2030年将达1.5万处^[2-3],残留煤层气资源量将近 $5000 \times 10^8 \text{ m}^3$,大力开发煤层气既能有效弥补我国天然气缺口^[4-5],还可以有效缓解煤矿井下瓦斯突出、超限等问题^[6-7],促进煤层气与煤炭协调开采^[8]。2022年,河南省天然气需求量为 $128 \times 10^8 \text{ m}^3$,本省的天然气产量为 $3.9 \times 10^8 \text{ m}^3$,对外依存度高达98%。省内煤系气资源量超过 $6.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[9]。开发煤系气资源能进一步提升河南省天然气自主供应保障能力;同时,可以降低煤中甲烷气体的含量与压力,提高煤矿安全生产能力。“三区联动”抽采是煤矿区地面抽采煤层气的主要手段,其已在晋城、淮南、淮北和鸡西等多个矿区进行了产业化应用^[10-12]。但平顶山矿区具有煤层间距大、含气层段多、煤层透气性低等特点^[13],上述矿区的成功技术无法直接应用。笔者采用气测录井和含气量测试相结合方法,识别出主要含气层位,评价了东部5对矿井的采动区和采空区的煤系气资源量;构建了地面采动L型水平井-地面采动直井/定向井和地面采空直井联作的多煤层联合卸压立体抽采模式,进行了工程示范,以期为该区及相似地质条

件下多煤层卸压立体抽采利用煤系气提供参考和借鉴。

1 平顶山东部矿区煤系气资源量评价

1.1 研究区主要含气层判识

1.1.1 研究区概况

平顶山矿区位于河南省中部,东西长约40 km,南北宽约20 km,面积650 km²。大地构造位置处于华北古板块南缘,区内断块隆起,四周凹陷。矿区主体构造为李口向斜,轴向北西50°,走向290°~310°;两翼地层基本对称,倾角5°~15°,本文研究的东部5对矿井包括平煤八矿、十矿、十二矿、十三矿和首山一矿(图1)。

区内主要含煤沉积为石炭-二叠系含煤地层,包括太原组、山西组、下石盒子组和上石盒子组。主力煤层为山西组下部的 二_1 煤层和下石盒子组的 四_2 煤层,其平均厚度分别为6.15 m和2.64 m。 二_1 煤层埋深为700~1200 m, 四_2 煤层埋深为530~1050 m,2层煤的平均层间距为170 m(图2)。 二_1 煤层的镜质组最大反射率为1.41%~1.73%; 四_2 煤层的镜质组最大反射率为1.32%~1.65%。 二_1 煤层的实测含气量为 $1.05 \sim 26.00 \text{ m}^3/\text{t}$,平均为 $12.36 \text{ m}^3/\text{t}$; 四_2 煤层的实测含气量为 $2.00 \sim 16.21 \text{ m}^3/\text{t}$,平均为 $9.77 \text{ m}^3/\text{t}$ 。

1.1.2 主要含气层判识

PCK-01井的气测录井全烃值表明: 二_1 煤层顶

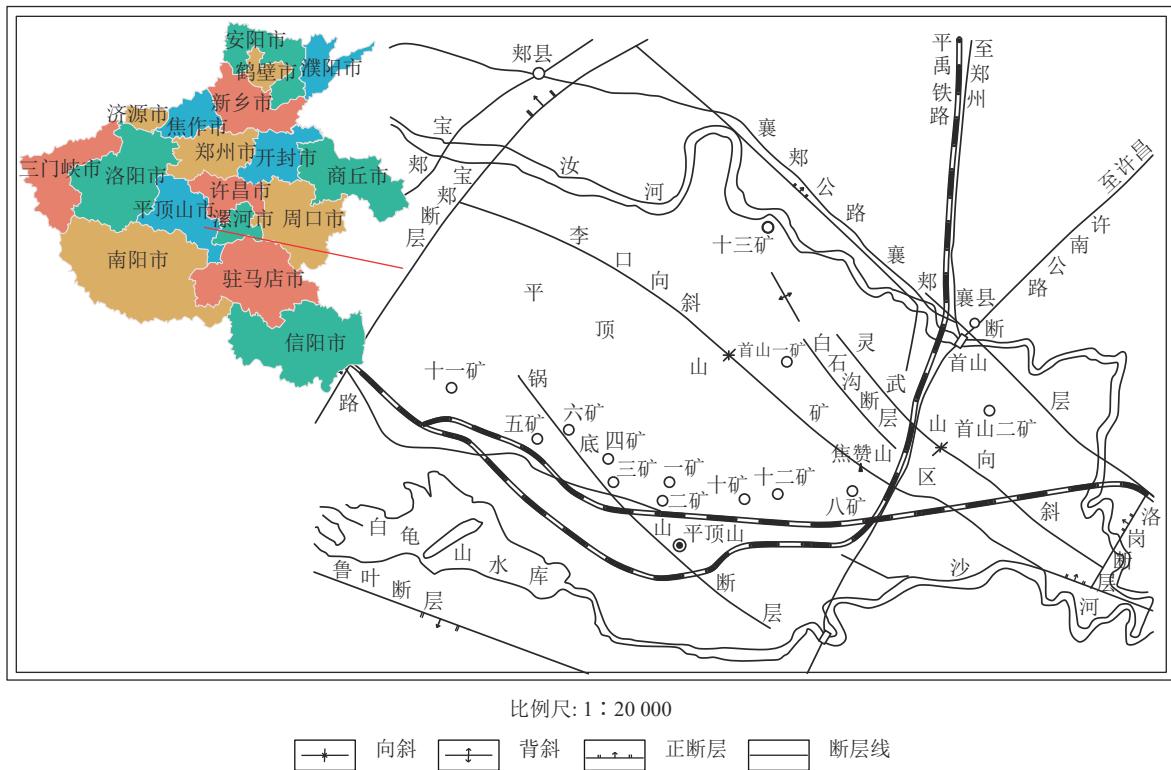


图 1 平顶山矿区地理位置及构造图^[14]

Fig.1 Geographical location and tectonic setting of Pingdingshan mining area^[14]

板 200 m 范围内存在 3 处主要含气段, 即: 四煤组、三煤组、二₁ 煤层顶板 60 m 范围内的砂岩/泥质砂岩互层段(图 3)。其中, 四煤组的钻时和全烃体积分数分别为 9~16 min/m 和 0.135%~0.643%, 全烃体积分数基值为 0.073 7%, 全烃体积分数与体积分数基值的比值介于 1.83~8.72, 平均为 5.02。

三煤组的钻时、全烃体积分数分别为7~14 min/m和0.362%~0.581%，全烃体积分数基值为0.076 2%，全烃体积分数峰值与基值的比值介于4.75~7.62，平均为6.01。

二₁煤层顶板 60 m 左右的砂岩、泥质砂岩互层气测异常段的总厚度达 22 m, 其钻时和全烃体积分数分别为 5~13 min/m 和 3.128%~16.319%, 全烃体积分数基值为 2%, 全烃体积分数与体积分数基值的比值为 1.56~8.16, 平均为 4.57。

1.2 评价方法与结果

1) 资源量评价方法

平顶山东部 5 对矿井煤系气资源量由煤炭开采后井巷内的残留气、遗煤气、未采区及顶底板围岩气等组成。目前煤系气资源量计算方法主要包括物质平衡法、体积法、资源构成法、下降曲线法、气藏数值模拟法、类比法^[15-19]。本次采用体积法分别对采空区和采动区的煤系气资源量进行计算。

采空区煤系气资源量为采空区中游离气量、垮落带中游离气量、裂隙带中游离气量之和^[15-16]，即：

$$Q_c = Q_y + Q_k + Q_1 \quad (1)$$

式中, Q_c 为采空区煤系气资源量, 10^8 m^3 ; Q_y 为采空区空间游离气量, 10^8 m^3 ; Q_k 为垮落带中游离气量, 10^8 m^3 ; Q_l 为裂隙带中游离气量, 10^8 m^3 。

采空区游离气量受煤炭采出率和采煤过程中甲烷气体释放率控制。其中,煤炭采出率按 85% 计算^[20],采煤过程中遗留在采空区的甲烷气体释放率按 10% 计算。则:

$$Q_y = (1 - \eta_1 + \eta_2) S_c H_c D_c C_c / \cos \alpha / 10000 \quad (2)$$

式中, η_1 为煤炭采出率, 本次取 85%; η_2 为采煤过程中遗留在采空区的甲烷释放率, 本次取 10%。 S_c 为计算范围面积, 10^4 m^2 ; H_c 为平均厚度, m ; D_c 为平均容重, t/m^3 ; C_c 为平均瓦斯含量, m^3/t ; α 为含煤岩系倾角, $(^\circ)$ 。

本次垮落带和裂隙带的瓦斯量计算公式为

$$Q_m + Q_1 = \eta_3 Q_w \quad (3)$$

式中, η_3 为煤邻近层瓦斯排放率, 本次取平均值 40%; O_w 为围岩砂岩气资源量, 10^8 m^3 。

采动区资源量计算按照未采区体积法计算^[18-19]，煤系气资源量的计算公式为

$$Q_x = S_x H_x D_x C_x / \cos \alpha / 10\,000 \quad (4)$$

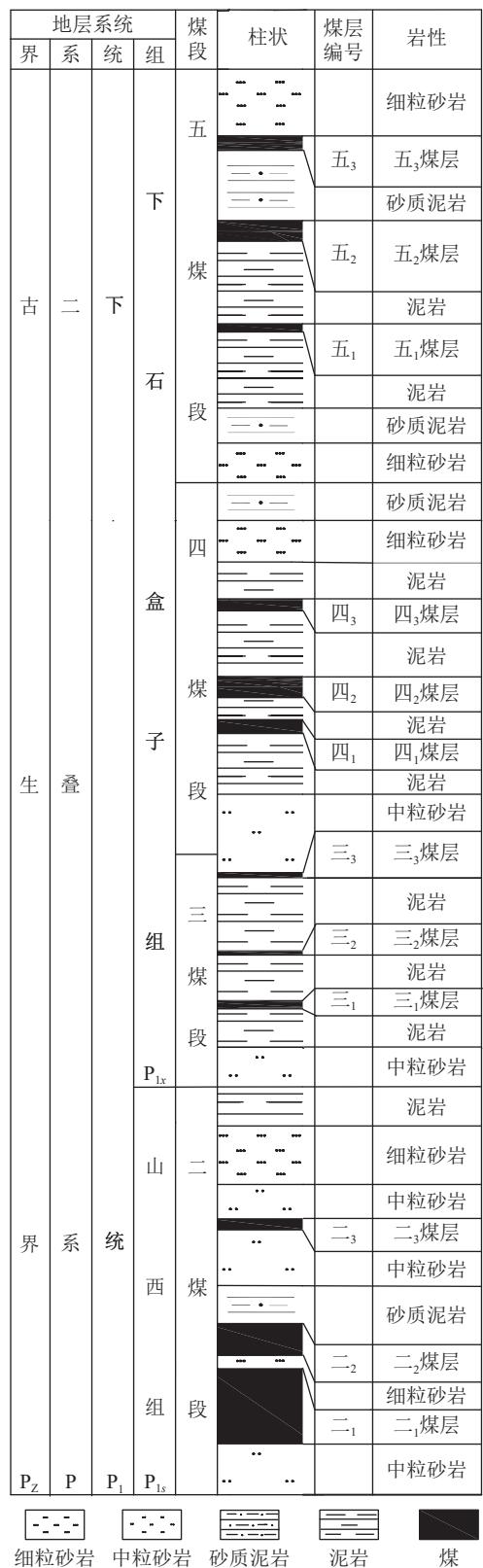
图 2 平顶山矿区含煤地层综合柱状图^[14]

Fig.2 Comprehensive columnar diagram of coal-bearing strata in Pingdingshan mining area^[14]

式中, Q_x 为煤系气资源量, 10^8 m^3 ; S_x 为煤系气计算范围面积, 10^4 m^2 ; H_x 为含煤岩系平均厚度, m ; D_x 为含煤岩系平均容重, t/m^3 ; C_x 为含煤岩系平均瓦斯含量, m^3/t 。

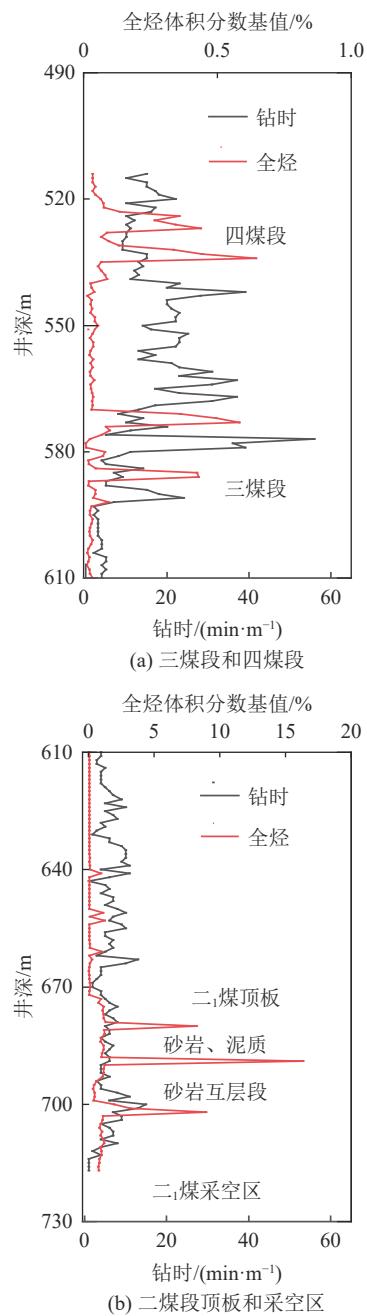


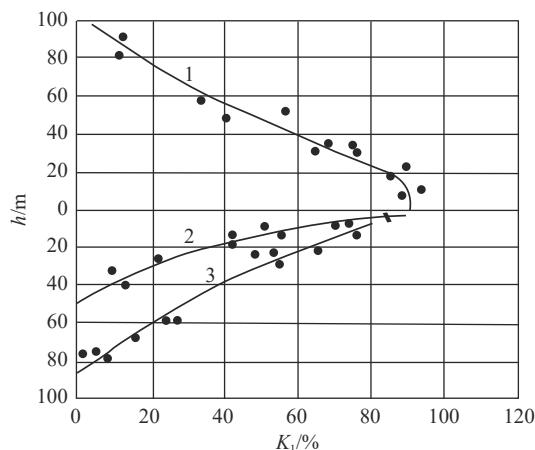
图 3 PCK-01 井气测录井全烃、钻时分布
Fig.3 Distribution of total hydrocarbon and drilling time in gas logging of Well PCK-01

垮落带和裂隙带中的游离气来自二₁煤层顶板 60 m 范围内的围岩气, 不同层间距和甲烷气体排放率的关系如图 4 所示。

计算面积由采掘工程平面图直接求出; 煤层及含煤岩系的容重为钻孔取心测试结果的平均值; 煤层及含煤岩系厚度为钻孔厚度平均值; 煤层含气量由实测含气量与埋深拟合关系得出; 煤系气含气量确定由气测录井全烃值与实测含气量拟合关系得出。

2) 资源量计算结果

平顶山矿区东部 5 对矿井采动区和采空区的煤



注: 1为上邻近层排放曲线; 2为近水平和缓倾斜煤层下邻近层排放曲线; 3为急倾斜煤层下邻近层排放曲线。

图4 层间距和甲烷气体排放率关系^[21]

Fig.4 Relationships between layer spacing and gas emission rate^[21]

系气总资源量为 $46.36 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。其中,采动区煤系气资源量为 $26.36 \times 10^8 \text{ m}^3$,采空区煤系气资源量为 $20.00 \times 10^8 \text{ m}^3$ (表1)。

2 平顶山矿区煤系气地面高效抽采模式与应用

2.1 地面高效抽采技术体系

2.1.1 采动井高效抽采技术体系

1) 采动覆岩三带分布

随着采煤工作面的推进,煤层顶板存在采动“三带”^[22-23]。《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留

设与压煤开采规程》中关于中硬岩层垮落带和裂隙带高度计算公式分别为

$$H_k = 6M + 5 \quad (5)$$

$$H_{li} = 20M + 10 \quad (6)$$

式中, H_k 为垮落带高度, m; M 为采煤厚度, m; H_{li} 为裂隙带高度, m。

根据研究区煤系地层分布特征和式(5)、式(6),计算出垮落带和裂隙带平均高度分别为 41.9 m 和 133 m, 垮裂带平均总高度为 174.9 m, 四煤段在采动影响范围内, 计算结果与首山一矿“垮裂带”实测结果基本吻合。其分布如图5所示^[24-25]。

2) 采动区井位、层位及井身结构优化

布井原则: 基于“地质-工程一体化”的指导思想, 避开断层及陷落柱构造, 首选甲烷气体富集区; 综合考虑井筒稳定性、气体抽采量和抽采浓度, 选择地形平缓且交通便利的位置, 同时避开井下巷道的影响范围。

布置区域: 根据文献[26]中建立的采动井沿倾向布置的位置计算式(7), 结合研究区地层和开采条件, 计算出采动井最佳井位水平投影应在 0.17~0.28 倍采长, 且靠近回风巷条带区域。根据前期先导性试验采动井抽采浓度与工作面距离变化趋势, 结合工作面周期来压步距 18~25 m, 避开周期来压整数步距以保证抽采效果。因此, 走向上采动井的井间距一般为 80~100 m(图6)。

$$L = b + H \cot \alpha \quad (7)$$

式中, L 为煤层气地面井落底位置距回风巷水平投影

表1 平顶山东部五矿采动区和采空区资源量

Table 1 Resources in active mining area and gob area of five mines in eastern Pingdingshan mining area

区域	矿井	资源量/ 10^8 m^3					占比/%
		二 ₁ 煤	二 ₁ 煤砂岩气	三煤段	四煤段	总计	
采动区	八矿	3.65	0.80	1.77	1.13	7.35	27.88
	十矿	2.85	0.68	0.25	3.07	6.85	25.99
	十二矿	1.90	0.76	0.22	—	2.88	10.93
	十三矿	1.61	0.16	0.05	—	1.82	6.90
	首山一矿	5.09	0.77	1.60	—	7.46	28.30
	小计	15.10	3.17	3.89	4.20	26.36	—
采空区	八矿	2.49	—	—	—	2.49	12.45
	十矿	3.02	—	—	3.99	7.01	35.05
	十二矿	3.03	—	—	1.61	4.64	23.20
	十三矿	3.36	—	—	—	3.36	16.80
	首山一矿	2.50	—	—	—	2.50	12.50
	小计	14.40	—	—	5.60	20.00	—
总计	—	29.50	3.17	3.89	9.80	46.36	—

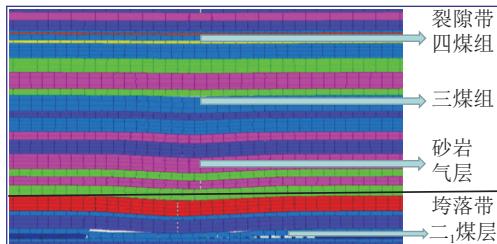


图 5 采动覆岩“垮裂带”示意

Fig.5 Schematic diagram of “collapse-fracture zone” of overburden caused by mining

距离, m; b 为“O”形圈中瓦斯浓度高、含气量大的区域距“O”形圈边界的距离, 一般取“O”形圈平均宽度的 $1/3 \sim 2/3$, m; H 为落底位置距煤层底板垂直距离, m; α 为覆岩卸压角, ($^{\circ}$)。

井身结构优化: 采动区井型主要有直井(定向井)和 L 型水平井。受采动影响, 采动区地面井易发生

剪切、拉伸、弯曲破坏, 造成井筒变形、气体运移通道堵塞^[27-29]。因此, 采动井井身结构优化的根本目的是保证井筒在采动影响下的稳定性和产气通道的畅通性。优化前后井身结构变化见表 2 和图 7。

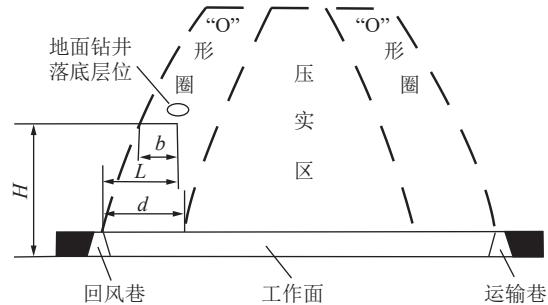


图 6 采动区最优井位、层位部署示意

Fig.6 Schematic diagram of optimal well position and layer deployment in mining area

表 2 优化前后井身结构参数对比

Table 2 Comparison of wellbore structural parameters before and after optimization

井型	传统设计	优化后设计	优点
采动直井/定向井	①三开井身结构: 一开 $\varnothing 444.5$ mm+二开 $\varnothing 311.1$ mm+三开 $\varnothing 215.9$ mm 钻头及一开 $\varnothing 339.7$ mm 钢级 J55+二开 $\varnothing 244.5$ mm 钢级 P110+分级箍+ $\varnothing 219.1$ mm 钢级 P110 梯型扣套管; ②套管一般布置在煤层顶板 60 m 范围	①二开井身结构: 一开 $\varnothing 444.5$ mm+二开 $\varnothing 311.1$ mm 钻头及一开 $\varnothing 339.7$ mm 钢级 J55+二开 $\varnothing 244.5$ mm 钢级 P110+分级箍+ $\varnothing 219.1$ mm 钢级 P110 梯型扣套管; ②套管布置在四煤段顶板至裂隙带底部	①井身结构由三开优化为二开, 提高了钻进效率; ②在套管易变形段增加了孔径, 既降低了采动影响井筒断裂可能性, 又保证了井筒产气通道的畅通性; ③套管扣型由梯形扣替代长圆扣, 钢级由 P110 替换 N80, 提高了套管抗变形能力; ④实现了多气源共采
采动 L 型水平井	①在煤层顶板某一岩层中钻进; ②套管扣型为长圆扣; ③二开套管及三开筛管钢级为 N80	①水平段轨迹为微下行轨迹, 角度 $1^{\circ} \sim 3^{\circ}$; ②套管扣型为梯型扣; ③三开筛管钢级为 P110	①水平段轨迹优化为下行轨迹, 防止钻孔积水堵塞产气通道; ②套管扣型由梯形扣替代长圆扣, 钢级由 P110 替换 N80, 提高了套管抗变形能力

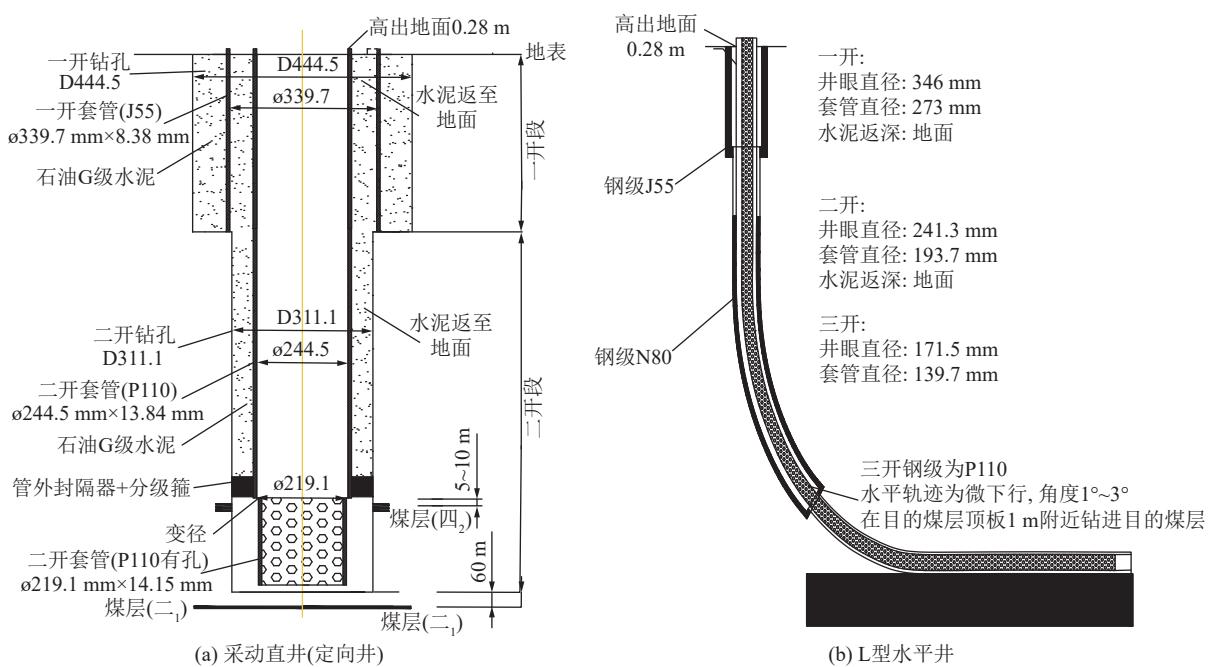


图 7 采动直井(定向井)、L型水平井井身结构

Fig.7 Well structure diagram of mining vertical well (directional well) and L-shaped horizontal well

2.1.2 采空区地面高效抽采技术体系

1) 采空区井位和层位优化设计

布井原则: 采空区井位部署需要综合考虑地面情况、地质方面和采空区瓦斯富集区等。地面情况选择与采动井一致, 地质方面避开断层及陷落柱构造, 根据采空区瓦斯运移规律, 在采空区上部易形成气体富集区域。

布置区域: 根据覆岩采动裂隙分布的“O”形圈特征及裂隙带横向分布规律可知, 裂隙带一般在回风巷和进风巷向采空区内倾 30~50 m 范围。采空区的甲烷气体主要集中在靠回风巷一侧。倾向上, 采空区井一般布置在距离回风巷 30~50 m 的区域; 垂向上, 一般距二₁煤层顶板 40~60 m 完钻。

井身结构优化: 传统采空井三开一般不下筛管; 若下入筛管, 一般布置在煤层顶板 60 m 范围内。本次固井封堵了平顶山砂岩含水层和四₂煤顶板砂岩裂隙含水层; 同时三开下入筛管, 筛管布置在四煤段顶板至裂隙带底部。优化后设计如图 8 所示。主要优点为: ①固井防止了平顶山砂岩含水层和四₂煤顶板砂岩裂隙水向井筒渗漏, 保证了产气通道的畅通性; ②三开下入筛管, 防止了煤层破碎坍塌掉块堵塞产气通道; 筛管布置在四煤段顶板至裂隙带底部, 实现了多气源共采。

2.2 立体抽采模式

为了达到“采一层抽多层”的效果, 基于采动井

布置原则, 具备地面施工条件区域, 在二₁煤层回采工作面前方采用三角形井网布置采动直井/定向井。不具备地面施工采动直井/定向井的区域, 利用已有的采动直井/定向井的井场, 分别布置二₁煤层和四₂煤层的采动 L 型水平井; 水平段分别位于二₁煤煤层顶板 40~60 m 范围和四₂煤层顶板 2 m 左右; 距进风巷和回风巷 0.17~0.28 倍采长平行布置 2 口二₁煤层和四₂煤层的水平井。基于采空井布置原则, 在采空区靠近回风巷布置采空井。通过采动区和采空区联合抽采, 保证工作面从回采初期至回采结束无抽采盲区和抽采的连续性, 实现了局部二区联动煤系气抽采(采空区、采动区)。当工作面推过采动井时, 原采动井逐步过渡为采空井抽采。同时, 利用采动卸压可有效抽采二₁煤层上覆的三煤组、四煤组的甲烷气体, 通过纵向上多层次采动卸压抽采和横向多种井型(直井、定向井、L 型水平井)无盲区抽采, 实现了多层次、多区、多气源地面瓦斯立体抽采(图 9)。

2.3 应用

PCD-01 井是首山一矿二₁煤层的采动定向井, 该井位于已₁₅₋₁₇-12100 工作面。2020 年 12 月开始排采, 最大日产气量 17 846 m³/d, 累计产气量 292.78×10⁴ m³, 平均产气量 6 640 m³/d, 平均甲烷体积分数 98.17%(图 10)。

PCDL-01 井是首山一矿二₁煤层的采动 L 型水平井, 该井位于已₁₅₋₁₇-12110 工作面。2022 年 2 月开

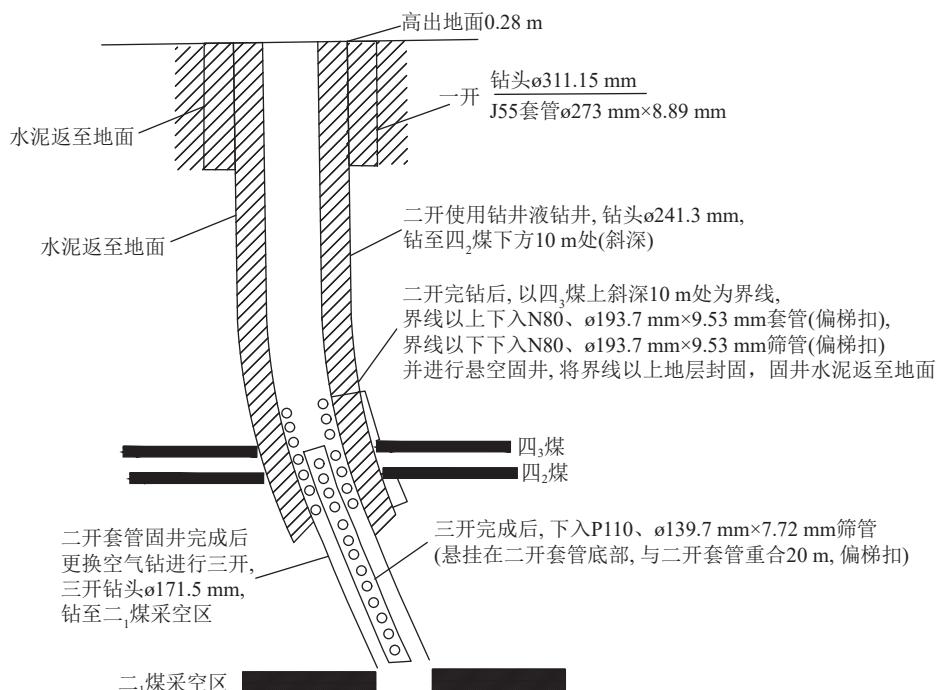


图 8 采空井井身结构
Fig.8 Structure diagram of goaf shaft

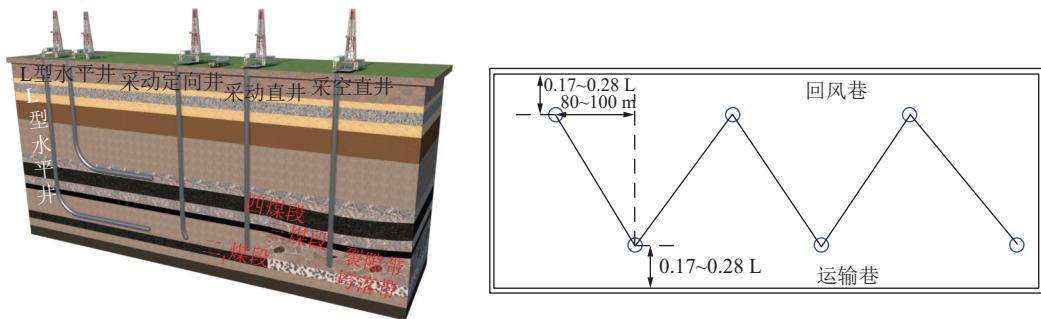


图 9 卸压立体抽采模式

Fig.9 Pressure relief three-dimensional extraction mode diagram

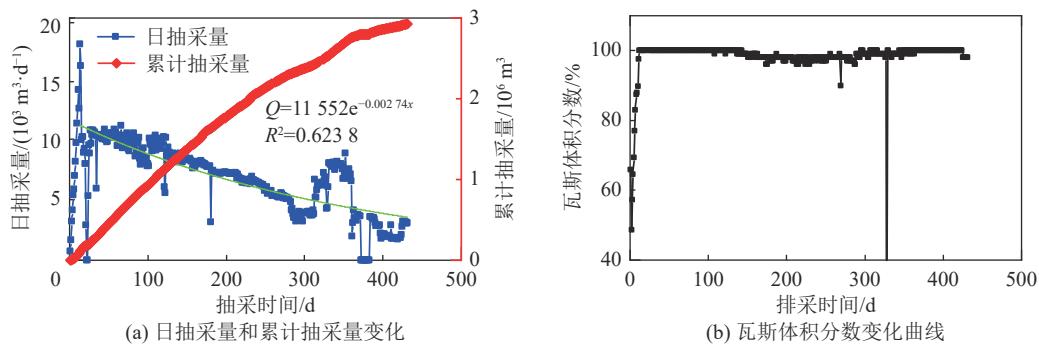


图 10 PCD-01 井瓦斯抽采变化曲线

Fig.10 Extraction curve of well PCD-01

始排采,最大日产气量 $14\ 613\text{ m}^3/\text{d}$,累计产气量 $335.52 \times 10^4\text{ m}^3$,平均产气量 $4\ 153.82\text{ m}^3/\text{d}$,平均甲烷体积分数 80.12%,平均井口负压为 -0.057 kPa 。近 30 d 日产气量 $2\ 494\sim2\ 873\text{ m}^3/\text{d}$,平均日产气量 $2\ 649\text{ m}^3/\text{d}$ (图 11)。

PCDL-02 井是首山一矿四₂煤采动 L 型水平井,该井位于己₁₅₋₁₇-12041 工作面,抽采受二₁组煤采动卸压影响后四₂煤层的煤系气。2022 年 12 月开始排采,最大日产气量 $21\ 003\text{ m}^3/\text{d}$,累计产气量 $295.20 \times 10^4\text{ m}^3$,平均产气量 $8\ 511\text{ m}^3/\text{d}$,平均甲烷体积分数 94.44%,平均井口压力 -8.27 kPa (图 12)。

PCK-01 井是首山一矿二₁煤层的采空井,该井

位于己₁₅₋₁₇-12041 工作面。2021 年 1 月开始排采,最大日产气量 $12\ 285\text{ m}^3/\text{d}$,累计产气量 $558.52 \times 10^4\text{ m}^3$,平均产气量 $5\ 312\text{ m}^3/\text{d}$,平均甲烷体积分数 70.69%,平均井口压力 -1.20 kPa 。近 30 d 日产气量 $2\ 467\sim6\ 275\text{ m}^3/\text{d}$,平均日产气量 $4\ 390\text{ m}^3/\text{d}$ (图 13)。

根据 4 口典型煤系气井产气曲线,结合落底位置对其产气规律和差异进行分析,分析结果见表 3。

截至 2024 年 4 月 30 日,平顶山矿区煤层气地面井累计抽采纯量达 $5\ 258.8 \times 10^4\text{ m}^3$,其中发电利用 $741.5 \times 10^4\text{ m}^3$ 、管输利用 $3\ 017.5 \times 10^4\text{ m}^3$ 、CNG 利用 $717.9 \times 10^4\text{ m}^3$ 、尼龙城利用 $25.3 \times 10^4\text{ m}^3$,总利用量达到 $3\ 735.4 \times 10^4\text{ m}^3$,率先在河南省实现了商业化。首

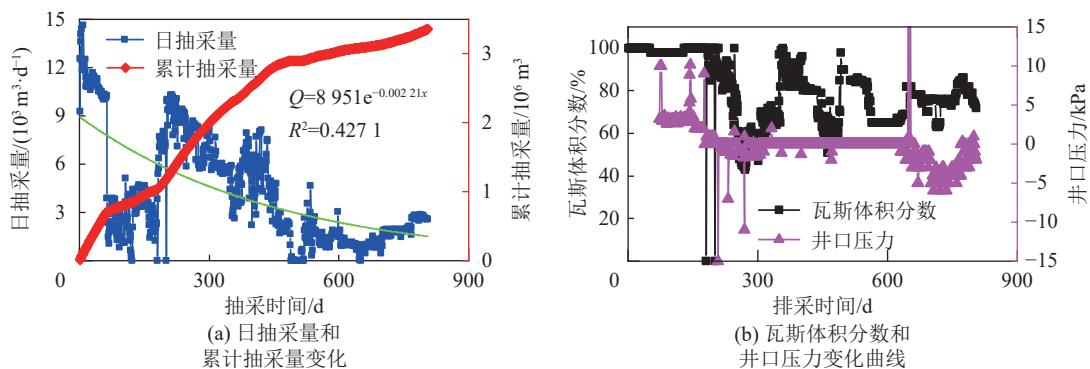


图 11 PCDL-01 井瓦斯抽采变化曲线

Fig.11 Extraction curve of well PCDL-01

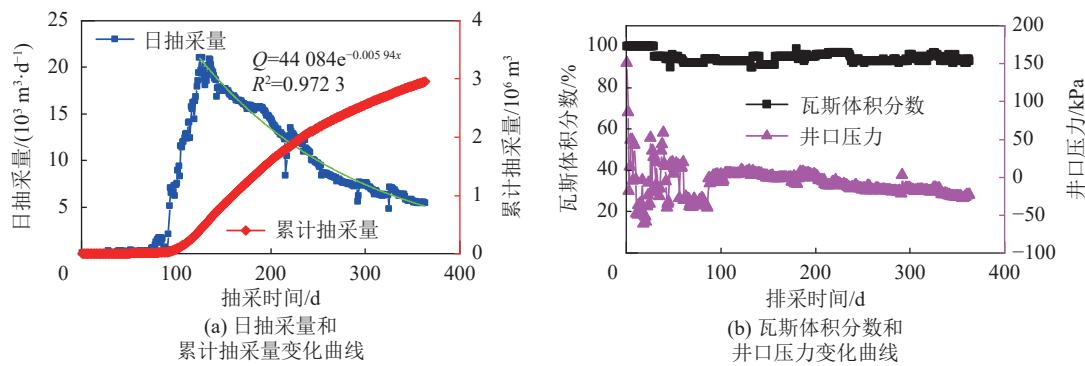


图 12 PCDL-02 井瓦斯抽采变化曲线
Fig.12 Extraction curve of well PCDL-02

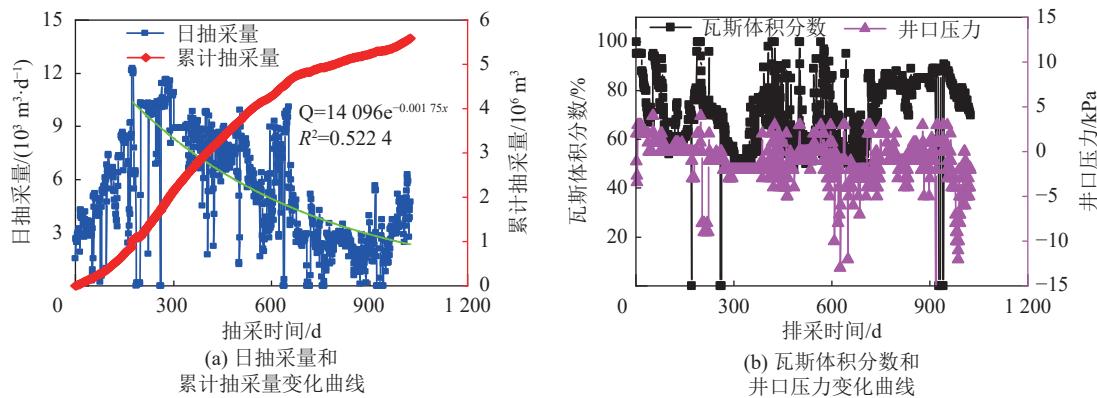


图 13 PCK-01 井瓦斯抽采变化曲线
Fig.13 Extraction curve of well PCK-01

表 3 典型井的产气规律和产气差异

Table 3 Gas production patterns and differences in typical wells

井型(井号)	落底位置	产气规律	产气差异
采动直/定向井 (PCD-01)	垂向上, 距二 ₁ 煤层顶板66 m; 倾向上, 距回风巷0.25倍采长	急速达到产气高峰后呈负指数函数下降; 最大日产气量17 846 m ³ ; 平均甲烷体积分数98.17%	抽采二 ₁ 煤层及裂隙带中上部至四煤组的煤系气, 气源广, 产气量高, 甲烷浓度高
采动L型水平井 (PCDL-01)	垂向上, 距二 ₁ 煤层顶板50~55 m; 倾向上, 距回风巷0.17倍采长; 水平段长316 m	产气初期波动, 达到高峰后呈负指数下降; 最大日产气量14 613 m ³ ; 平均甲烷体积分数80.91%	初期裂隙存在“形成—变窄—进一步扩大”过程, 产气量呈现由高到低再到高峰的变化; 主要抽采二 ₁ 煤层的卸压气, 气源单一, 空气的混入导致甲烷浓度降低
采动L型水平井 (PCDL-02)	垂向上, 距四 ₂ 煤层顶板2 m; 倾向上, 距回风巷0.28倍采长; 水平段长529 m	达到产气高峰后呈负指数下降; 最大日产气量21 003 m ³ ; 平均甲烷体积分数94.44%	主要抽采裂隙带中上部三煤组和四煤组煤系气, 气源较广, 甲烷浓度高
采空直井 (PCK-01)	垂向上, 二 ₁ 煤层底板完钻; 倾向上, 距回风巷0.28倍采长	初期产气量逐渐升高, 达到产期高峰后负指数下降; 最大日产气量12 285 m ³ ; 平均甲烷体积分数70.69%	初期裂隙通道不畅通, 随着抽采进行, 裂隙通道变得畅通, 产气量上升; 抽采二 ₁ 煤层及裂隙带中上部至四煤组的煤系气, 气源广; 但落底层位低, 混入空气较多导致甲烷浓度降低

山一矿已₁₅₋₁₇-12110 工作面地面采动直井最高日产气量达到 $4.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 打破了河南省地面钻井单日甲烷气体抽采纪录。

3 结 论

1) 通过气测录井与含气量测试等手段, 精准判识了煤系主要含气层段和含气量, 并采用体积法计算出平顶山矿区东部五矿采动区和采空区煤系气资

源量分别为 $26.36 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $20.00 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

2) 基于“O”型圈理论和“防-抗-让”的思想, 创建了大口径、避开岩体变形强烈区和提高套管强度的采动区稳孔技术体系。

3) 构建了采空区地面井长周期稳产高效的抽采技术体系, 形成了“地面采动直井/定向井-地面采动L型水平井-采空井”联作的立体卸压抽采模式, 实现了多气源立体抽采。

参考文献(References):

[1] 王家琛, 杨兆彪, 秦勇, 等. 废弃矿井遗留煤层气资源次生富集成藏研究现状及展望[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(4): 35–44.
WANG Jiachen, YANG Zhaobiao, QIN Yong, *et al.* Research status and prospects of secondary enrichment and accumulation of residual coalbed methane resources in abandoned mines[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(4): 35–44.

[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] 谢和平, 高明忠, 高峰, 等. 关停矿井转型升级战略构想与关键技术[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(6): 1355–1365.
XIE Heping, GAO Mingzhong, GAO Feng, *et al.* Strategic conceptualization and key technology for the transformation and upgrading of shut down coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(6): 1355–1365.

[5] 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.

[6] 李回贵, 王军, 李晓龙, 等. 瓦斯压力对突出煤层煤样力学特征影响规律的研究[J]. *矿业安全与环保*, 2022, 49(4): 129–134.
LI Huigui, WANG Jun, LI Xiaolong, *et al.* Study on influence law of gas pressure on mechanical characteristic of coal samples in outburst coal seam[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2022, 49(4): 129–134.

[7] 张士岭, 和树栋. 瓦斯压力对煤体应力及失稳破坏特性影响分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2022, 39(4): 847–856.
ZHANG Shiling, HE Shudong. Analysis of the influence of gas pressure on coal stress and instability failure characteristics[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2022, 39(4): 847–856.

[8] 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.

[9] 秦勇, 申建, 李小刚. 中国煤层气资源控制程度及可靠性分析[J]. *天然气工业*, 2022, 42(6): 19–32.
QIN Yong, SHEN Jian, LI Xiaogang. Control degree and reliability of CBM resources in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(6): 19–32.

[10] 张群, 孙四清, 降文萍. 碎软低渗煤层煤矿区煤层气勘探开发关键技术及发展方向[J]. *石油学报*, 2024, 45(5): 855–865.
ZHANG Qun, SUN Siquing, JIANG Wenping. Key technologies and development direction of CBM exploration and development in coal mine area of fractured soft and low permeability coal seams[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2024, 45(5): 855–865.

[11] 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/OL]. *煤炭科学技术*, 1–15[2024–08–17]. DOI: 10.12438/cst.2023-1948.
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*, 1–15[2024–08–17]. DOI: 10.12438/cst.2023-1948.

[12] 张志刚, 李日富. 煤矿重复扰动“采动—采空”地面井抽采技术及应用[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(10): 91–97.
ZHANG Zhigang, LI Rifu. Research and application of “mining-gob” surface well extraction under repeated disturbance in coal mines[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(10): 91–97.

[13] 许耀波. 煤层气井合层开发层间干扰分析与合采方法探讨: 以平顶山首山一矿为例[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(3): 112–117, 127.
XU Yaobo. Analysis of interlayer interference in combined development of coalbed methane wells and discussion on combined production methods: a case study of Shoushan No. 1 Coal Mine in Pingdingshan[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(3): 112–117, 127.

[14] 李延河, 王保玉, 刘顺喜, 等. 河南平顶山矿区含煤地层沉积环境及其对煤系气成藏的控制[J]. *古地理学报*, 2024, 26(6): 1–15.
LI Yanhe, WANG Baoyu, LIU Shunxi, *et al.* Sedimentary environment of coal-bearing strata and its control on accumulation of coal measure gas in Pingdingshan mining area, Henan Province[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2024, 26(6): 1–15.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 张江华, 秦勇, 李国富, 等. 煤炭采空区下伏煤层气资源潜力及抽采效果: 以山西省晋城西部矿区为例[J]. *天然气工业*, 2022, 42(6): 146–153.
ZHANG Jianghua, QIN Yong, LI Guofu, *et al.* Potential and extraction effect of CBM resources underlying coal goafs: A case study on the western Jincheng mining area in Shanxi Province[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(6): 146–153.

[18] 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.

[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] 李延河. 地面井分区式瓦斯抽采技术体系及工程实践[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(3): 100–108.
LI Yanhe. Surface well partition gas extraction technology system and engineering practice[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(3): 100–108.

[21] 国家安全生产监督管理总局. 矿井瓦斯涌出量预测方法: AQ 1018—2006[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2006.

[22] 钱鸣高, 许家林. 覆岩采动裂隙分布的“O”形圈特征研究[J]. 煤炭学报, 1998, 23(5): 466–469.
QIAN Minggao, XU Jialin. Study on the “O-shape” circle distribution characteristics of mining-induced fractures in the overlaying strata[J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(5): 466–469.

[23] 张为, 李兵, 张永成. 低瓦斯矿井高产高效工作面瓦斯地面抽采技术[J]. 煤矿开采, 2019, 24(1): 136–139.
ZHANG Wei, LI Bing, ZHANG Yongcheng. Coalbed methane surface drainage technology of high output and efficiency working face of low methane coal mine[J]. Coal Mining, 2019, 24(1): 136–139.

[24] 王亮, 程远平, 蒋静宇, 等. 巨厚火成岩下采动裂隙场与瓦斯流动耦合规律研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(8): 1287–1291.
WANG Liang, CHENG Yuanping, JIANG Jingyu, *et al.* The coupling laws between fissure field and gas flow field under an extremely thick igneous rock[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(8): 1287–1291.

[25] 许满贵, 魏攀, 李树刚, 等. “三软”煤层综采工作面覆岩运移和裂隙演化规律实验研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(S1): 122–127.
XU Mangui, WEI Pan, LI Shugang, *et al.* Experimental study on overburden migration and fracture evolution law of “three soft” coal seam fully mechanized working-face[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(S1): 122–127.

[26] 彭小亚, 许家林, 吴仁伦, 等. 工作面采高对O形圈分布规律的影响研究[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(1): 8–11.
PENG Xiaoya, XU Jialin, WU Renlun, *et al.* Study on coal mining height of coal mining face affected to O ring distribution law[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(1): 8–11.

[27] 付军辉. 采动区瓦斯地面井井身结构设计及安全防护研究[J]. 煤炭工程, 2020, 52(5): 48–53.
FU Junhui. Study on structure design and safety protection of gas surface well in mining area[J]. Coal Engineering, 2020, 52(5): 48–53.

[28] 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.

[29] 李延河, 倪小明, 王保玉, 等. 基于上覆岩层应力场和裂缝场演化的采动井套管破断特征及防控对策[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 221–231.
LI Yanhe, NI Xiaoming, WANG Baoyu, *et al.* Breakage characteristics of casing and prevention and control measures in mining wells based on the evolution law of stress and crack fields in overlying strata[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 221–231.