

文章编号: 1001-1986(2016)03-0021-04

CO₂-ECBM 技术在河东煤田的潜力评估

段鹏飞

(山西省煤炭地质资源环境调查院, 山西 太原 030006)

摘要: 根据河东煤田地质构造、煤储层特性、含气性等煤层气地质条件的综合研究, 对利用 CO₂ 提高煤层气采收率技术(简称 CO₂-ECBM 技术)在河东煤田深部煤层(埋深 1 000~1 500 m)开采煤层气以及埋藏 CO₂ 的潜力进行了初步评估。结果表明, 利用 CO₂-ECBM 技术增产煤层气资源量为 $0.26 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 占煤层气总资源量的 32.1%; CO₂ 埋藏量为 $12.18 \times 10^8 \text{ t}$, 相当于山西省 2013 年 CO₂ 排放量的 3.2 倍。

关键词: CO₂-ECBM; 煤层气; 地质封存; 潜力评估; 河东煤田

中图分类号: P618.11 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2016.03.004

Potential assessment of CO₂-ECBM technique in Hedong coalfield

DUAN Pengfei

(Resources and Environment Survey Institute of Shanxi Coal Geology Bureau, Taiyuan 030006, China)

Abstract: On the basis of the integrated study of the geological conditions such as geological structures, properties of coal reservoir and gas-bearing properties in Hedong coalfield, the preliminary assessment of the potential for CBM extraction and concealing CO₂ was carried out by using CO₂-ECBM technique(for coal seams at depth from 1 000 m to 1500 m)in Hedong coalfield. The results show that CO₂-ECBM technique will increase $0.26 \times 10^{12} \text{ m}^3$ of CBM resources, accounting for 32.1% of the total CBM resources, and the quantity of CO₂ storage will be up to $12.18 \times 10^8 \text{ t}$, equivalent to 3.2 times of CO₂ emission in 2013 in Shanxi Province.

Key words: CO₂-ECBM; CBM; geological sequestration; potential assessment; Hedong coalfield

CO₂ 提高煤层气采收率技术(简称 CO₂-ECBM 技术)的核心机制是 CO₂ 吸附并驱替 CH₄ 的动力学过程。该技术的优势是有利于 CO₂ 地质封存, 可提高煤层气采收率, 具有一定的经济附加值。CO₂ 减排和 CH₄ 清洁能源开采的双重效益, 引起国内外学者开展了大量的研究^[1-13]。E Arril 等^[1]和于洪观^[2]对 CH₄-CO₂ 二元气体吸附特性和吸附量进行了研究, 结果表明 CO₂ 在煤的微表面可以有效地驱替 CH₄; 张洪涛等^[3]、刘延锋等^[4]和姚素平等^[5]对煤封存 CO₂ 地质条件以及煤封存 CO₂ 的潜力进行了研究; 刘占勇等^[6]和高莎莎等^[7]对煤储层渗透性及 CO₂ 注入煤层中渗透率变化规律进行了研究; 王烽等^[8]对利用 CO₂-ECBM 技术在沁水盆地开采煤层气和埋藏 CO₂ 的潜力进行了初步评价。目前, 美国、加拿大、日本和中国都进行了 CO₂-ECBM 技术微型先导性试验^[9-13]。多次试验的结论都认为, 向深部煤层中注入 CO₂ 提高煤层气的采收率同时实现 CO₂ 地

质封存在技术上是可行的。

河东煤田煤层气资源条件良好, 对河东煤田深部煤层利用 CO₂-ECBM 技术开采煤层气进行专门研究具有较强的示范意义和实用价值, 在分析研究河东煤田煤层气地质条件的基础上, 对利用 CO₂-ECBM 技术在河东煤田深部煤层开采煤层气以及埋藏 CO₂ 的潜力进行了初步评价。

1 河东煤田煤层气地质条件

从煤炭资源来说, 河东煤田主要含煤地层为上石炭统太原组和下二叠统山西组, 含煤 6~15 层, 可采 6~8 层, 煤层平均总厚度 7~28 m, 煤阶为长焰煤-无烟煤(图 1)。从煤层气资源来说, 河东煤田煤层气资源条件良好, 从北向南依次划分为保兴含气区、三交北含气区、三交-柳林含气区、石楼含气区、大宁-吉县含气区, 煤层气资源量达 $2.794 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[14]。埋藏 CO₂ 的煤层应具有不可开采性, 我国现阶段煤层开采

收稿日期: 2015-04-6

基金项目: 山西省国际科技合作计划项目(2010DFB90690-3)

Foundation item: International Technology Cooperation Plan Projects of Shanxi Province, China(2010DFB90690-3)

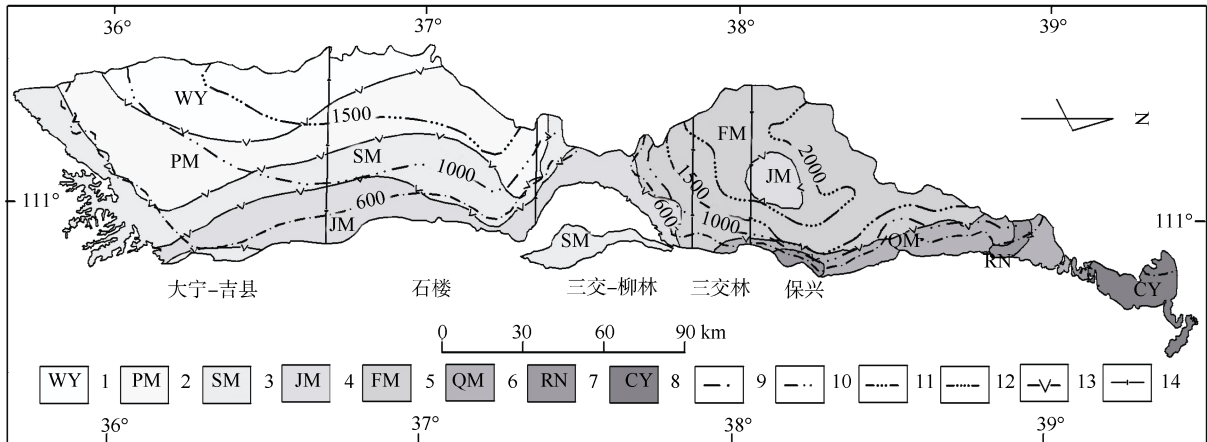
作者简介: 段鹏飞(1981—), 男, 山西长子人, 硕士研究生, 工程师, 从事基础地质、环境地质研究。E-mail: 511539920@qq.com

引用格式: 段鹏飞. CO₂-ECBM 技术在河东煤田的潜力评估[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(3): 21-24.

DUAN Pengfei. Potential assessment of CO₂-ECBM technique in Hedong coalfield[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(3): 21-24.

深度甚至已经达到 800 m，考虑到能源消费、开采成本以及开采技术的发展，结合前人研究成果^[15-17]，确

定以埋深 1 000~1 500 m 煤层气资源为研究对象，进行 CO₂-ECBM 技术增采煤层气潜力评价。



1—无烟煤；2—贫煤；3—瘦煤；4—焦煤；5—肥煤；6—气煤；7—弱粘煤；8—长焰煤；9—埋深 600 m 线
10—埋深 1 000 m 线；11—埋深 1 500 m 线；12—埋深 2 000 m 线；13—煤类分界线；14—含气区界线

图 1 河东煤田煤炭资源分布图

Fig.1 Coal resources distribution in Hedong coalfield

1.1 地质构造

河东煤田地质构造以褶皱为主，总体为走向 SN、向西倾斜的单斜，北部(临县以北)为走向近 SN、向西倾斜的单斜，中部为近 EW 向的“鼻状隆起”，其背斜轴部发育有 EW 向张性断裂，南部为走向 NE 向 NW 倾斜的单斜，并伴有次级褶曲。总的特征表现为南北分区，东西分带。河东煤田各含气区的构造样式、性质、组合及复杂程度等未造成煤层中气体的大量逸散，即构造环境有利于气体大面积、长期有效保存，煤层气含量普遍较高，为典型的封闭型构造环境。

1.2 煤层特征

河东煤田煤层从上至下可分为山西组的 1、2、3、4 号煤层和太原组的 5、8、9、10 号煤层。其中山西组 1、2、3 号煤层平均厚度为 0.56~1.36 m，为不稳定煤层，4 号煤层平均厚度为 4.50 m，为稳定煤层。太原组 5、8、9 号煤层平均厚度为 0.8~1.6 m，为不稳定-较稳定煤层，10 号煤层平均厚度为 3.5 m，为稳定煤层。山西组的 4 号煤层和太原组的 10 号煤层为埋藏 CO₂ 的优选煤层，这是因为厚煤层一方面可以提供更大的 CO₂ 储集空间，另一方面，厚煤层相对于不连续的薄煤层而言，具有较好的煤层连通性和稳定的渗透率，能够有效实现 CO₂ 对 CH₄ 的驱替，保障煤层气的采收率。

1.3 煤储层特征

1.3.1 煤储层的渗透性

煤储层渗透性主要取决于煤层的裂隙系统，包括内生裂隙(割理)和外生裂隙(构造)。此外，煤体结构、地层压力和原地应力也与煤层渗透性有关。孙亮等^[18]提出为保证 CO₂ 地质封存，煤层渗透率至少

需要 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。目前，根据收集到的矿区煤层资料(埋深<800 m)评价分析可知，三交-柳林含气区山西组 4 号煤层渗透率为 $(1.2\sim 4.2) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，太原组 8 号煤层平均渗透率为 $3.68 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，10 号煤层平均渗透率为 $2.37 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。同等条件下，煤层渗透率随煤层埋深增大而降低。另外，研究成果表明向煤层注入 CO₂ 后，煤体中矿物质与 CO₂ 及水反应后会提升煤体的渗透率，弱酸溶液对中等渗透率煤体改善效果较好^[7]。

1.3.2 煤储层围岩的封盖条件

煤储层围岩是指煤层的顶板和底板，它们构成煤层气的盖层。在长期地史演化中，河东聚气盆地地壳稳定下沉，接受沉积埋藏较深，盖层较厚，且盖层普遍发育透气性较差的致密岩层，如泥质岩类，整个煤储层气体处于原始保存状态，后期构造变形微弱，煤层气体得以长期保存。如石楼、大宁-吉县含气区石炭二叠系主采煤层不仅厚度大，分布广，在 1 000 m 以深区段构造变形微弱，且盖层以透气性差的泥质岩占优势，气体埋藏保存条件好。

1.4 煤层含气性特征

河东煤田煤层变质程度较高，煤田北部以肥煤为主，中南部为焦煤、瘦煤、贫煤和无烟煤，煤层气含量较大，煤层气丰度也相应较高，为 $2.48 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。河东煤田(聚气盆地)煤层含气量主要受埋深控制，埋深与煤层含气量的关系总体上表现为煤层含气量随埋深的加大而增大，表现为自盆地周边煤层露头向盆地腹地煤层含气量逐渐增大，最高达 $24 \text{ m}^3/\text{t}$ ^[19]。丰富的煤层气资源提高了 CO₂ 埋藏的经济效益。

以上研究表明, 河东煤田煤层变质程度较高, 煤层气含量较大, 煤层气丰度也相应较高, 煤储层渗透率较好, 具有良好的盖层条件, 其中山西组的4号煤层和太原组的10号煤层为埋藏 CO₂ 的优选煤层, 埋藏环境为典型的封闭型构造环境, 这些条件的具备为在河东煤田深部煤层利用 CO₂-ECBM 技术增采煤层气奠定了基础。

2 CO₂-ECBM 技术潜力预测

以2007年山西省煤层气地质研究及资源评价结果^[11]为基础, 对河东煤田深部煤层(埋深1 000~1 500 m)CO₂-ECBM 技术潜力进行了初步评价。评价内容包括3部分: 初次可采资源量、CO₂-ECBM 技术增产资源量和 CO₂ 埋藏量。

2.1 计算方法及参数选取

2.1.1 煤层气初次可采资源量

依据目前国内外煤层气勘探开发现状, 采用常规方法可开采的资源量称为初次可采资源量。目前常规煤层气开采多在1 500 m 以浅, 煤层气初次可采资源量计算公式如下:

$$G_{\text{CBM}} = G \times R_0 \quad (1)$$

式中 G_{CBM} 为初次可采资源量, m³; G 为埋深1 000~1 500 m 煤层气资源量, 约为 0.81×10^{12} m³; R_0 为平均采收率, %, 其取值与煤储层特征、储层原始压力、临界解吸压力、钻井、完井及排采工艺密切相关。叶建平等^[20]根据我国部分煤层气试井数据, 计算得出我国煤层气的采收率变化区间为 8.9%~74.5%, 平均值为 35%。本次评价参考最新资评数据, R_0 取值 37%。

2.1.2 CO₂-ECBM 技术增产资源量

利用 CO₂-ECBM 技术煤层气增产资源量计算公式如下:

$$G_{\text{ECBM}} = (G - G_{\text{CBM}})AR \quad (2)$$

式中 G_{ECBM} 为注 CO₂ 煤层气增产资源量, m³; A 为面积平衡因子, 本次取值 100%; R 为 CO₂-ECBM 采收率, %。由于原始煤储层压力、现场注入时间等条件限制, CO₂-ECBM 采收率不可能达到 100%。煤层气采收率随煤阶增高而降低, 变化范围为 50%~100%^[4]。用 COMET2 对不同煤阶 CO₂-ECBM 产量进行模拟, 得出各煤阶中煤层气的采收率, 其中气煤、肥煤为 55%~61%, 肥煤以上煤阶均为 50%^[10]。河东煤田煤阶较高, 埋深 1 000~1 500 m 贫煤、瘦煤、焦煤占 80%, 肥煤占 19%, 气煤占 1%, 同时考虑到深部煤层渗透率降低等因素, R 取值为 51%。

2.1.3 CO₂ 埋藏量

CO₂ 埋藏空间包括两部分, 一部分为采用常规

技术初次开采煤层气产生的储存空间, 另一部分为利用 CO₂-ECBM 技术置换 CH₄ 的存储空间。事实上, 计算 CO₂ 埋藏量, 初次开采煤层气产生的储存空间与注入 CO₂ 驱替 CH₄ 的效果是一致的。CO₂ 埋藏潜力计算公式如下:

$$S = \rho(G_{\text{CBM}}A + G_{\text{ECBM}})R_{\text{ER}} \quad (3)$$

式中 S 为 CO₂ 的可埋藏量, kg; ρ 为标准压力和温度条件下的 CO₂ 密度, 取 1.977 kg/m³; R_{ER} 为 CO₂/CH₄ 置换比, 不同煤阶的吸附能力不同, CO₂/CH₄ 置换比也不同。研究表明随着煤阶增大, CO₂/CH₄ 置换比由 10:1 逐渐降到 1:1^[4], 参考于洪观等^[2]的研究成果, 综合河东煤田煤阶、煤层吸附能力等因素, 本次确定 R_{ER} 为 110%。

2.2 评价结果

将相关计算参数(表 1)代入式(1)~式(3)对初次开采煤层气资源量、CO₂-ECBM 技术增产资源量、CO₂ 埋藏量进行计算。

表 1 计算参数表
Table 1 Calculation parameters

G /10 ¹² m ³	R_0 /%	R /%	A /%	R_{ER} /%	ρ /(kg·m ⁻³)
0.81	37	51	100	110	1.977

河东煤田深部煤层(埋深 1 000~1 500 m)煤层气总资源量为 0.81×10^{12} m³, 通过常规技术可开采煤层气 0.30×10^{12} m³, 采收率达到 37%。利用 CO₂-ECBM 技术增产煤层气资源量为 0.26×10^{12} m³, 为煤层气总资源量的 32.1%。通过初次抽采和利用 CO₂-ECBM 技术开采可使煤层气可采资源量达 0.56×10^{12} m³, 约为总资源量的 69%。CO₂ 埋藏量为 12.18×10^8 t, 相当于山西省 2013 年 CO₂ 排放量^[21] 的 3.2 倍。

3 结论

a. 河东煤田煤变质程度较高, 煤层气含量较大, 煤储层渗透率较好, 具有良好的盖层条件, 埋藏环境为典型的封闭型环境, 这些条件的具备为在河东煤田深部煤层利用 CO₂-ECBM 技术增采煤层气奠定了基础。

b. 河东煤田深部煤层(埋深 1 000~1 500 m)煤层气总资源量为 0.81×10^{12} m³, 通过常规技术可开采煤层气 0.30×10^{12} m³, 利用 CO₂-ECBM 技术增产煤层气资源量为 0.26×10^{12} m³, 为煤层气总资源量的 32.1%, CO₂ 埋藏量为 12.18×10^8 t。

c. 建议在河东煤田中、北部选择合理区块开展 CO₂-ECBM 技术微型先导性试验研究。

参考文献

- [1] ARRIL E, YEE D, MORGAN W D, et al. Modeling coalbed methane production with binary gas sorption[R]. USA: SPE Rocky Mountain Regional Meeting, 1992.
- [2] 于洪观. 煤对 CH₄、CO₂、N₂ 及其二元混合气体吸附特征、预测和 CO₂ 驱替 CH₄ 的研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2005.
- [3] 张洪涛, 文冬光, 李义连, 等. 中国 CO₂ 地质埋存条件分析及有关建议[J]. 地质通报, 2005, 24(12): 1107-1110.
ZHANG Hongtao, WEN Dongguang, LI Yilian, et al. Conditions for CO₂ geological sequestration in China and some suggestions[J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24(12): 1107-1110.
- [4] 刘延锋, 李小春, 白冰. 中国 CO₂ 煤层储存容量初步评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2947-2952.
LIU Yanfeng, LI Xiaochun, BAI Bing. Preliminary estimation of CO₂ storage capacity of coalbeds in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 1107-1110.
- [5] 姚素平, 汤中一, 谭丽华, 等. 江苏省 CO₂ 煤层地质封存条件及潜力评价[J]. 高校地质学报, 2012, 18(2): 203-214.
YAO Suping, TANG Zhongyi, TAN Lihua, et al. The CO₂ geological sealing conditions and potential evaluation in coal seams in Jiangsu province[J]. Geological Journal of China Universities, 2012, 18(2): 203-214.
- [6] 刘占勇, 郑柏平, 丁述理, 等. 河东煤田白额勘探区煤储层渗透性及其影响因素[J]. 中国煤炭地质, 2012, 24(6): 15-17.
LIU Zhanyong, ZHENG Baiping, DING Shuli, et al. Coal reservoir permeability and its contributing factors in Baie exploration area, Hedong coalfield[J]. Coal Geology of China, 2012, 24(6): 15-17.
- [7] 高莎莎, 王延斌, 倪小明, 等. CO₂ 注入煤层中煤储层渗透率变化规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(2): 54-57.
GAO Shasha, WANG Yanbin, NI Xiaoming, et al. Study on laws of coal seam permeability change in CO₂-ECBM[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(2): 54-57.
- [8] 王烽, 汤达祯, 刘洪林, 等. 利用 CO₂-ECBM 技术在沁水盆地开采煤层气和埋藏 CO₂ 的潜力[J]. 天然气工业, 2009, 29(4): 117-120.
WANG Feng, TANG Dazhen, LIU Honglin, et al. Analysis on the potential of the carbon dioxide-enhanced coalbed methane(CO₂-ECBM) recovery in Qinshui basin[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(4): 117-120.
- [9] VAN BERGEN F, PAGNIER H J M, VERDER MEER L G H, et al. Development of a field experiment of CO₂ storage in coal seams in the upper Silesian basin of Poland[C]// Proceedings of 6th Conference on Greenhouse Gas Control Technologies. Kyoto, Japan, 2002.
- [10] REEVES S R. The coal-seq project: key results from field. Laboratory and Modeling Studies[C]//Proceedings of 7th Conference on Greenhouse Gas Control Technologies. Vancouver, BC, Canada, 2004.
- [11] 叶建平, 冯三利, 范志强, 等. 沁水盆地南部注二氧化碳提高煤层气采收率微型先导性试验研究[J]. 石油学报, 2007, 28(4): 77-80.
YE Jianping, FENG Sanli, FAN Zhiqiang, et al. Micro-pilot test for enhanced coalbed methane recovery by injecting carbon dioxide in south part of Qinshui basin[J]. Acta Petroleologica Sinica, 2007, 28(4): 77-80.
- [12] 方志明, 李小春, 李洪, 等. 混合气体驱替煤层气技术可行性研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3223-3229.
FANG Zhiming, LI Xiaochun, LI Hong, et al. Feasibility study of gas mixture enhanced coalbed methane recovery technology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(10): 3223-3229.
- [13] FANG Zhiming, LI Xiaochun, HU Haixiang. Gas mixture enhanced coalbed methane recovery technology: Pilot tests[J]. Energy Procedia, 2011, 4(4): 2144-2149.
- [14] 张亮. 山西省煤层气资源评价及开发利用[M]. 太原: 山西经济出版社, 2007, 153-159.
- [15] BACHU S. Carbon dioxide storage capacity in uneconomic coalbeds in Alberta, Canada: Methodology, Potential and Site Identification[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2007, (03): 374-385.
- [16] KAIDI J G, GIBSON-POOLE C M. Storage capacity estimation, siteselection and characterization for CO₂ storage projects[R]. Canberra: CO₂CRC, 2008. Report No: PRT08-1001.
- [17] 沈平平, 廖维新. 二氧化碳地质埋存与提高石油采收率技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009: 100-111.
- [18] 孙亮, 陈文颖. CO₂ 地质封存选址标准研究[J]. 生态经济, 2012(7): 33-38.
SUN Liang, CHEN Wenying. A review of selection criteria for the geological sequestration of CO₂[J]. Ecological Economy, 2012(7): 33-38.
- [19] 李贵红. 鄂尔多斯盆地东缘煤层气有利区块优选[J]. 煤田地质与勘探, 2015, 43(2): 28-32.
LI Guihong. Selection of the favorable coalbed methane(CBM) blocks in eastern Ordos basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2015, 43(2): 28-32.
- [20] 叶建平, 等. 中国煤层气资源[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998.
- [21] 张鹏. 山西省碳排放量以及影响因素研究[D]. 太原: 山西财经大学, 2013.

(责任编辑 范章群)