

晋城煤层气藏成藏机制

王生维¹, 章泽军², 乌效鸣³, 唐江林¹, 张典坤¹, 杨青雄¹, 韩兵¹, 刘旺博¹, 徐娅玲²

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074

摘要: 通过晋城煤层气的规模开发、压裂煤层气井的解剖、井下煤层瓦斯抽放、构造地应力场研究、煤储层大裂隙系统“CT”式解剖与煤层气封闭保存条件研究, 发现 3[#] 煤储层内部存在大量煤层气包, 构造微破裂作用促使煤层气包之间广泛并联通, 煤层气包内部储层的非均质性弱化, 渗透率增加, 煤层气包内部的游离气体比例增加, 流体压力系统边界逐渐清晰并形成煤层气藏。揭示煤层气藏的成藏机制, 认识煤层气藏的内部细节特征, 促进了该区的煤层气开发技术进步, 提高了井下煤层瓦斯的抽放效率。

关键词: 晋城; 煤层气成藏机制; 构造微破裂作用; 煤层气藏; 煤层气包。

中图分类号: P618.11

文章编号: 1000-2383(2008)06-0807-06

收稿日期: 2008-06-12

Reservoir-Forming Mechanism of Coalbed Methane in Jincheng Anthracite

WANG Sheng-wei¹, ZHANG Ze-jun², WU Xiao-ming³, TANG Jiang-lin¹, ZHANG Dian-kun¹,
YANG Qing-xiong¹, HAN Bing¹, LIU Wang-bo¹, XU Ya-ling²

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: With the aim of studying reservoir-forming mechanism of coalbed methane (CBM) in the area of Jincheng, through the continuous development of coalbed methane in Jincheng, the dissection of fracturing coalbed methane wells, the extraction of underground coal seam gas, the study of tectonic stress field, the “CT”-dissection of the fracture system of coal reservoir and the study of closed preservation conditions on coalbed methane, we found that there are a lot of CBM packages in 3[#] coal reservoir and these CBM packages merge together because of micro-structural breakdown. As a result, the heterogeneity of reservoir in CBM packages becomes weak; the permeability increases; the proportion of free gas increases in CBM package and the fluid pressure system gradually clears. Eventually, the above factors jointly contribute to the formation of the border of coalbed methane reservoir. The study on the accumulation mechanism of coalbed methane and the characteristics of the internal details of coalbed methane reservoir promotes the development of coalbed methane exploiting technology and improves the efficiency of extracting the underground coal seam gas.

Key words: Jincheng; reservoir-forming mechanism of coalbed methane; micro-structural breakdown; coalbed methane reservoir; coalbed methane package.

1 煤层气藏的概念

随着我国无烟煤区煤层气产业的孕育与逐步发展壮大,随着煤层气基础理论研究的逐步深入,对于煤层气藏概念的认识也在不断深化.最早李明潮等(1996)认为煤层气藏是煤中甲烷在具备适当外界条件时相对集中在一定围限内,围限内的气体富集程度、压力一般都高于围限之外,围限内的煤岩体称之为煤层气藏.王生维等(1997)尽管没有直接给出煤层气藏的定义,但使用了煤层气藏的概念,同时着重阐述了煤层气藏的封闭保存问题.钱凯等(1997)认为煤层气藏是在压力(主要是水压)作用下,“圈闭”着一定气体的煤岩体.张新民等(2002)认为煤层气藏是指在地层压力(水压和气压)作用下保存有一定数量气体的同一煤层的煤岩体,并且有独立的构造形态.王红岩等(2005)认为煤层气藏是指煤层甲烷靠压力作用(主要是水压),以吸附作用为主,在具有相近地质条件、含气特征的煤层中富集成含气层,若干相近的含气层构成煤层气藏.宋岩等(2005)认为煤层气藏是保存有相当数量气体并受类似地质因素控制的煤岩体基本地质单元.秦勇(私人通信)认为煤层气藏是保存有相当数量气体,处于一个流体压力系统的煤岩体基本地质单元.

从有关煤层气藏的理解中不难看出,煤层气藏必须具备 3 个条件:(1)含气煤岩体;(2)具有封闭条件(压力或者地质因素控制);(3)含气煤岩体存在某种边界.

笔者认为具有经济价值的煤层气藏是指具有相对一致流体压力,在波及范围内可解吸的煤中储气系统,它具有一定体积,其大小规模一般在几千万

m³ 以上,该系统的渗透率与含气饱和度达到地面经济开发的下限.而成熟度太低或者达不到经济开发规模者可以称之为煤层气包.

2 研究区煤层气储集特征

晋城 3[#] 煤储层厚度为 5.8~7.4 m(图 1),主要岩石类型为半亮—半暗煤.据武汉地质学院煤田教研室(1979)、杨起等(1979)和 Stach *et al.* (1982),其煤灰分产率为 7%~15%.该区无烟煤储层内大裂隙系统发育,主要裂隙类型为外生节理、气胀节理、内生裂隙与微裂隙(Wang *et al.*, 2005).局部发育有断距几 m 的小断层.该区的煤含气量变化比较大,为 10~15 m³/t.

晋城 3[#] 煤储层为典型的裂缝型低渗透储层.其中大裂隙系统是该储层渗透率的主要通道(侯光久等,2005; Wang *et al.*, 2005)(图 2).大量煤层瓦斯抽放钻孔与煤层气井生产井揭示 3[#] 煤储层内部的渗透性极不均一,大小悬殊.集中体现在相邻煤层瓦斯抽放钻孔与煤层气井的产能差别达到 10~15 倍.这表明该区 3[#] 煤储层内部存在相当数量的煤层气包(Wang *et al.*, 1996; 王生维等,1999).所谓煤层气包是指一定空间范围内,煤储层内部游离流体压力形成了相对一致的流体系统,其包括由储层主导裂缝系统沟通部分与次级裂缝以及流体压力影响控制解吸部分,煤层气包内部的游离流体比例与渗透率明显高于周围储层,其具有通过人工或者天然通道直接产出气体的潜能.煤层气包内煤层气(主要为游离气)总量一般为几十万 m³ 到几百万 m³ 不等.此外,晋城煤层气区也存在发育比较好且规模较大

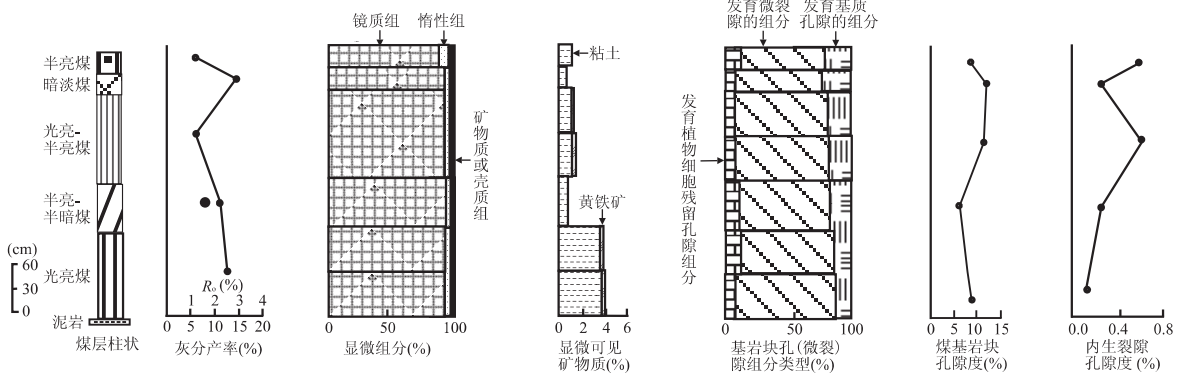
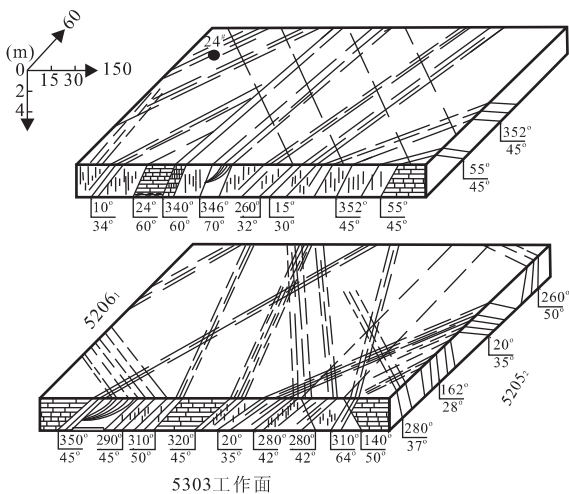


图 1 晋城煤区成庄矿 2314 工作面 3[#] 煤储层剖面图

Fig. 1 No. 3 coalseam profile of 2134 working face in Chengzhuang coalmine of Jincheng city



5303 工作面

图 2 晋城煤区成庄矿二盘区 3 煤储层节理裂隙系统实测图
Fig. 2 The joint fissure system of Erpan section of Chengzhuang coalmine of Jincheng city measured on the spot

的煤层气藏。

煤层气包与煤层气藏两者之间的主要差别为:

- (1) 规模不同;
- (2) 内部游离流体压力大小悬殊;
- (3) 由通道流体压力控制与影响的具有解吸潜能的煤层气总量与赋存空间大小悬殊。

3 煤储层大裂隙系统的发育与煤层气包演化

从泥炭成岩作用开始就伴随着煤层气的生成。随着煤级增高,成煤物质被进一步压实,煤的大分子结构中侧链断裂,煤层气进一步大量生成。煤的芳香度不断增加的同时,煤中的各种裂隙也同时发育,例如:气孔、微裂隙、内生裂隙以及反映流体集中从煤中向外逸散的气胀节理。值得指出的是上述地质作用过程时常伴随着构造作用,常常导致残留在煤层中的煤层气分布不均匀,尤其是游离流体分布极不均匀,这就为煤层气包的孕育提供了物质基础与储存空间。再加上由于成煤物质堆积分解的不均匀性,就为煤层气包的成长创造了有利的条件,显然在煤层气包孕育发展过程中存在由小煤层气包不断合并与连通的增大效应。

从最初的煤层气包雏形孕育到扩大以至煤层气包的成熟,其内部流体成分、流体压力特征、规模大小、煤层气赋存方式、以及相对应的储层物理特性等均发生了一系列的演化。具体可分为两个阶段:

- (1) 煤层气包孕育的雏形阶段。该阶段的主要地

质作用是随着埋藏深度增加伴生的煤热演化作用。在煤层气集中生成过程中,游离气比例开始显著增加。同时煤中的原生孔隙系统被压实改造,伴随煤层气生成而产生新的孔隙,特别是内生裂隙系统的发育。由于裂隙系统的规模普遍比孔隙大,特别是气胀节理的形成,从而增大了游离气体联通的范围。同时也加剧了煤储层内部渗透通道分布的不均匀性。煤储层裂缝型渗透特征逐渐显现与增强。

- (2) 煤层气包发育与成熟阶段。随着生气量的不断增加,特别是经过构造热事件导致的二次强烈生气阶段,煤层气包迅速发育长大,内部流体压力系统形成并强化,煤层气包内部结构趋于成熟。在此期间,煤层气包合并与联通成为煤层气包长大的一种重要方式。

随着煤层气包的不断成熟壮大,煤层气藏随即也开始孕育。但这也是一个煤层气藏建设与破坏并存的一个关键时期。目前有经济价值的煤层气藏是经过煤层气藏建设与破坏并存期后的残留煤层气藏。

研究区成熟的煤层气包数量众多、大小悬殊、分布广泛,但规模比较大的煤层气藏却比较少。在此期间,伴随表生作用过程的构造微破裂扮演着至关重要作用。

4 无烟煤层气藏的成藏机制

促使煤层气包转化为煤层气藏的机制如下:(1) 在众多煤层气包之间建立联通渠道,促使其联合成为规模更大的煤层气包;(2) 进一步提高各个煤层气包的成熟度,在保持含气饱和度不变的前提下提高渗透率。该机制作用的主要结果表现为游离气体比例大幅度增加,游离气体的汇集效应突显,游离气体的压力显著增高,游离气体压力波及的解吸气体空间扩大,影响力加强,储层内部的游离流体的流动潜能显著增加,储层内部的非均一性大幅度降低。

3[#]煤层气藏解剖结果表明,达到上述目的的最显著特征是煤储层内大裂隙系统的配套与改善。而控制煤储层大裂隙系统发育与成熟的关键是伴随表生作用过程的构造微破裂作用(图 3)。

从成庄区块、潘庄区块已经揭露的 3[#]煤层气藏特征来看,尽管这种构造微破裂作用的规模与改造幅度在传统的构造地质作用中表现的微乎其微,有趣的是这种十分轻微的构造破裂作用促进了煤层气

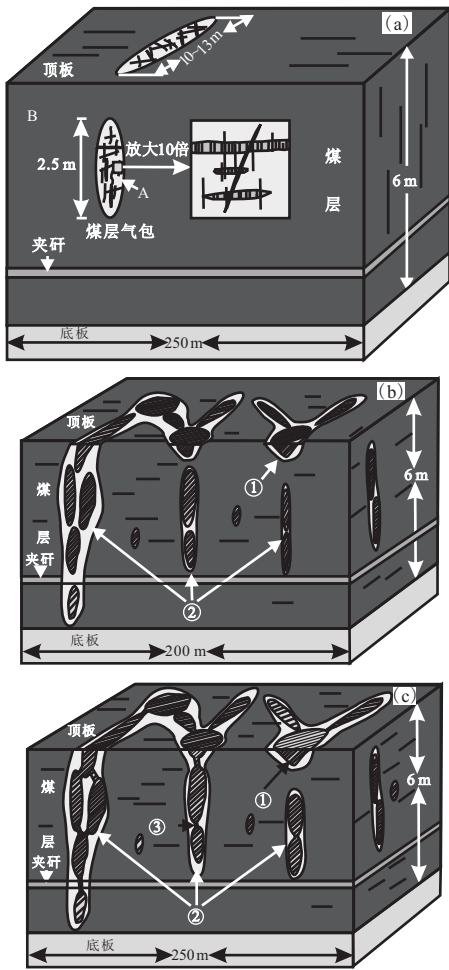


图 3 晋城无烟煤层气藏成藏机制示意图

Fig. 3 The mechanism mode of coalbed methane reservoir Jincheng anthracite

a. 孤立的煤层气包: A. 煤层气包内部裂隙系统发育, 外生节理发育、气胀节理十分发育、内生裂隙发育。内部流体压力比外围高。体积规模一般为几百—几千 m^3 ; B. 尚未发育煤层气包的部分。外生节理不发育、仅有少许内生裂隙、气胀节理欠发育。在一定的体积空间内尚未形成一致的流体压力系统。b. 构造微破裂作用促使煤层气包之间联合: ①煤层气包; ②成群成带的煤层气包。成群的煤层气包沿大裂隙系统中的主干节理成带发育。在两组节理相互交叉地带煤层气包联通变大。c. 构造微破裂作用促使煤层气包进一步扩大联合形成煤层气藏(水力压裂可以局部起到类似效果): ①煤层气包; ②成群成带的煤层气包; ③构造作用产生的通道

藏的发育与成熟。当然, 先期广泛发育的煤层气包是构造作用条件下煤层气藏发展成熟的重要前提。问题是这种煤层气包广泛发育的前提在沁水盆地的石炭—二叠系煤层中是广泛存在的, 而这种恰到好处的构造微破裂作用形成并保存良好的煤层气藏则相对比较少。

事实上, 作者在晋城煤层气田内找到了由于构造破裂作用比较强而部分或者完全破坏了煤层气藏的封闭保存条件的区块, 结果是煤储层的渗透率显著增高, 但是煤层气藏的含气饱和度异常低。晋城煤层气田另一种常见的煤层气藏是构造微破裂作用更轻微以至煤储层的大裂隙系统欠发育, 煤储层的渗透率比较低。

5 煤层气藏与常规天然气藏的比较

杜尚明等(2004)和王允诚等(2004)认为气藏是指天然气在单一圈闭中的聚集。常规天然气藏是地壳中富集了一定数量天然气的地质体, 是天然气聚集的基本单元, 具有一定的面积和容积, 有一定的流体界面的单一压力系统。煤层内部规模较大的储集煤层气空间也具有相对一致的流体压力系统, 正是为强调这一共同特性, 以及开发煤层气必须对其进行描述研究的客观需要, 也将其称之为煤层气藏。

但是, 煤层气藏与常规天然气藏之间也存在明显差异。与常规天然气藏不同, 煤层气藏则不是煤中煤层气体聚集的基本单元, 它的基本单元是比煤层气藏规模更小、非均匀性更强的煤层气包。常规天然气藏的压力系统, 或者气水界面明显。煤层气藏不仅气水界面不清晰, 它还包括与其紧密共生的煤层气可解吸带, 其总体特征类似水封闭动态圈闭常规天然气藏的特征。即: (1) 内部流体压力系数小; (2) 具有相对一致流体压力部分的储集体物性好, 渗透率高; 而煤层气可解吸带的物性比较差; (3) 气源能不断补给; (4) 具有微弱渗流能力并具有良好的解吸潜能的气源带比较宽, 占据煤层气藏空间的大部分或者绝大部分。

常规天然气藏主要有孔隙型气藏与裂缝型气藏。从晋城煤层气的产能看, 该区的煤层气藏总体上属于具有裂缝型特征的低渗透气藏。

6 煤层气藏描述

煤层气藏描述对煤层气增产技术应用具有重要指导作用。众所周知, 煤层气井可以通过压裂改善煤储层的渗透性, 增加煤层气井的产能, 但是煤层气藏的人工干预与自然改造之间存在重大差别。集中表现在 3 个方面: 其一, 两者总能量极为悬殊; 其二, 构

造微破裂作用对于煤储层改造具有很强的透入性,而人工干预则在这方面几乎见不到明显的效果;其三,构造微破裂作用改造煤储层的规模巨大,而人工干预则特别有限.通过该区煤层气压裂井的直接开挖解剖,可以得出人为干预的影响规模远比预期的要小,效果远比预期差.因此,充分认识煤层气藏的特征,揭示其内部特征,创建煤层气藏描述的技术体系是有效增加煤层气产量的重要技术途径.

煤层气藏描述的内容包括:(1)储集体特征,具体包括煤层结构、煤的岩石类型,煤的灰分产率,煤基岩块特征,煤储层大裂隙系统发育特征,特别是主渗流通道的描述(王生维等,2000);(2)圈闭类型以及特征;(3)煤层气藏类型;(4)煤层气产能控制因素.

基于煤层气储层的特殊性,以及煤层气包对于煤矿安全生产与瓦斯抽放的重要性.采用探测手段检验煤层气包与煤层气藏意义重大.充分利用煤炭生产过程提供的探测与解剖煤层气包的客观有利条件,利用煤层瓦斯原位探测装置,在矿井工作面采用比较密集的水平钻孔进行煤层气压力、浓度、成分、温度以及相应储层孔裂隙等多参数的系统解剖.

7 煤层气藏研究意义

煤层气藏是地面煤层气开发阶段实施各种技术措施的最重要对象,是制定煤层气开发方案、选择开发技术的重要依据.

发现无烟煤层气藏的成藏机制与所在的地质条件,可以预测与寻找新的煤层气藏.揭示煤层气藏的内部特征,特别是次级煤层气包的特征,对于指导该区矿井下大量煤层瓦斯抽放钻孔的施工,提高抽放效率也具有重要的指导作用.此外,通过解剖与描述各种类型的煤层气藏与煤层气包的内部特征,对于科学预报与有效防止煤与煤层瓦斯突出也具有重要价值.

人工干预或者采用各种增产措施的本质是促使煤层气藏增大的同时提高内部成熟度,改善内部品质.该区目前主要的有效增产措施是压裂与水平钻井技术.压裂的主要作用是增加井筒附近储层渗透性的同时,加长主裂缝通道以连接更多的煤层气包.而水平井的核心作用就是增长主裂缝通道与连通更多的煤层气包.

8 讨论与结论

(1)煤层气是一种以甲烷为主要成分,富集保存在煤中的天然气,若储集体具备一定的流体渗透条件并且具有相当规模,煤层气就可以富集成藏.煤层气成藏的重要基础是大量而广泛存在的煤层气包.所谓煤层气包是指一定空间范围内,煤储层内部游离流体压力形成了相对一致的流体系统,其包括由储层主导裂缝系统沟通部分与次级裂缝以及流体压力影响控制解吸部分,煤层气包内部的游离流体比例与渗透率明显高于周围储层,其具有通过人工或者天然通道直接产出气体的潜能.煤层气包内煤层气总量一般为几十万 m^3 到几百万 m^3 不等.而煤层气藏是指具有相对一致流体压力以及波及范围内可解吸的煤中储气系统,它具有一定面积和体积,其煤层气大小规模一般为几千万 m^3 以上,该系统的渗透率与含气饱和度达到地面经济开发的下限.

(2)地质条件下,由比较小而内部非均匀性强的煤层气包变成为规模比较大、内部非均匀性弱的煤层气藏形成过程中,最主要的控制因素是构造,特别是比较微弱的破裂构造作用对煤储层大裂隙系统的全面而深刻的改造.主要的形成机制是:①促使煤层气包之间的广泛合并与连通;②通过构造微破裂作用改造,进一步促使煤层气包内部储层的非均匀性弱化,渗透性显著增加;③在上述作用发生的同时,煤层气包或者煤层气藏内部的游离气体比例显著增加,流体压力系统边界逐渐清晰,煤层气藏逐步趋于成熟.

(3)煤层气藏是煤层气开发的基本单元.煤层气藏的描述是优选煤层气藏开发技术的重要前提.基于煤层气藏描述的客观需要,充分利用煤炭开采过程中大规模抽放煤层瓦斯的有利条件,通过探测技术创新并研制新设备,实施煤层气藏探测.煤层气藏描述的主要内容为:①储集体特征,除岩性外主要包括煤储层大裂隙系统发育特征,特别是主要的渗流通道的描述;②圈闭类型以及特征;③气藏类型;④煤层气产能控制因素.

(4)深化煤层气藏研究可促进煤层气开发与煤层瓦斯抽放技术的不断进步,促进煤层气产业的健康快速发展,为安全采煤提供新的技术支撑.

致谢:该研究过程中曾经得到晋煤集团领导及各矿与煤层气公司工程技术人员的大力支持和帮助,特别是贺天才教授级总工程师、姜铁明、李海贵、

鲁风光、王德璋、徐玉胜、王保玉、张红军等专家领导的大力支持与帮助,在此表示衷心感谢。

References

- Coal Staff Room of Wuhan Institute of Geology, 1979. Coal geology. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Du, S. M., Hu, G. C., Li, J. M., et al., 2004. Natural gas resources exploration. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Hou, G. J., Wang, S. W., Zhang, X. J., 2005. Investigation on joints in the coalbeds in Chengzhuang coal mine of Jincheng coal-bearing district and its significance. *Nature Gas Industry*, 25(1): 41–43 (in Chinese with English abstract).
- Li, M. C., Liang, S. Z., Zhao, K. J., 1996. Exploration and development of coalbed methane. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Qian, K., Zhao, Q. B., Wang, Z. C., et al., 1996. Coalbed methane exploration and development theory and experimental and measuring technique. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Song, Y., Liu, S. B., Hong, F., 2005. Forming geological conditions of coalbed methane reservoir and types of gas reservoir. In: Reservoir-forming mechanism of coalbed methane and theoretical foundation of economic exploitation. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Stach, E., Mackowsky, M. T. H., Teichmüller, M., 1982. Stach's textbook of coal petrology, 3rd. Gebrüder Borntraeger, Stuttgart, Berlin.
- Wang, H. Y., Liu, H. L., Zhao, Q. B., et al., 2005. Enrichment and reservoiring laws of the coalbed methane. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Wang, S. W., Chen, Z. H., Zhang, M., et al., 1997. Coal reservoir petrophysical used in the coalbed methane exploration and selecting districts; As an example to a certain number of coal mining in North China. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Wang, S. W., Duan, L. X., Chen, Z. H., et al., 1999. Research into coalbed methane pool trap and its significance; An example of carboniferous-permian coalbed methane pool trap in North China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 24(1): 49–53 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. W., Duan, L. X., Zhang, M., et al., 2000. Parameters and flow chart for coalbed methane pool analysis. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 25

(6): 613–616 (in Chinese with English abstract).

- Wang, S. W., Hou, G. J., Zhang, M., 2005. Analysis of the visible fracture system of coal seam in Chengzhuang coalmine of Jincheng city, Shanxi Province. *Chinese Science Bulletin*, 50(Suppl.): 45–51.
- Wang, S. W., Zhang, M., Zhuang, X. L., 1996. On the trap types of coalbed methane pools. Proceedings of international mining tech'96 symposium, 257–266.
- Wang, Y. C., Kong, J. X., Li, H. P., et al., 2004. Geology of gas reservoir. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Yang, Q., Han, D. X., Ren, D. Y., 1979. Coal geology (list). Coal Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Zhang, X. M., Zhuang, J., Zhang, S. A., 2002. Coalbed methane geology and resource evaluation in China. Science Press, Beijing (in Chinese).

附中文参考文献

- 杜尚明, 胡光灿, 李景明, 等, 2004. 天然气资源勘探. 北京: 石油工业出版社.
- 侯光久, 王生维, 张先进, 2005. 晋城成庄矿煤层中节理研究及其意义. *天然气工业*, 25(1): 41–43.
- 李明潮, 梁生正, 赵克镜, 1996. 煤层气及其勘探开发. 北京: 地质出版社.
- 钱凯, 赵庆波, 汪泽成, 等, 1996. 煤层甲烷气勘探开发理论与实验测试技术. 北京: 石油工业出版社.
- 宋岩, 柳少波, 洪峰, 2005. 煤层气成藏地质条件及气藏类型. 见: 煤层气成藏机制及经济开采理论基础. 北京: 科学出版社.
- 王红岩, 刘洪林, 赵庆波, 等, 2005. 煤层气富集成藏规律. 北京: 石油工业出版社.
- 王生维, 陈钟惠, 张明, 等, 1997. 煤储层岩石物理研究与煤层气勘探选区, 以华北若干煤区为例. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 王生维, 段连秀, 陈钟惠, 等, 1999. 煤层气藏的封闭及其研究意义——华北石炭—二叠系煤层气藏封闭特征. *地球科学——中国地质大学学报*, 24(1): 49–53.
- 王生维, 段连秀, 张明, 等, 2000. 煤层气藏分析的参数与流程. *地球科学——中国地质大学学报*, 25(6): 613–616.
- 王允诚, 孔金详, 李海平, 等, 2004. 气藏地质. 北京: 石油工业出版社.
- 武汉地质学院煤田教研室, 1979. 煤田地质学(上). 北京: 地质出版社.
- 杨起, 韩德馨, 任德贻, 1979. 中国煤田地质学(上册). 北京: 煤炭工业出版社.
- 张新民, 庄军, 张遂安, 2002. 中国煤层气地质与资源评价. 北京: 科学出版社.