

地质与测量

柿庄地区 15 号煤层低渗透率影响因素分析

许启鲁^{1,2}, 黄文辉^{2,3}, 杨延绘^{2,3}, 刘 贝^{2,3}, 闫德宇^{2,3}, 陆小霞^{2,3,4}

(1. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083;
3. 中国地质大学(北京) 海相储层演化与油气富集机理教育部重点实验室, 北京 100083; 4. 中联煤层气有限责任公司, 北京 100011)

摘要: 为了探讨沁水盆地南部柿庄地区 15 号煤层低渗透率的原因, 以柿庄地区 15 号与 3 号煤层 2 层主采煤层的钻井和煤矿样品为研究对象, 采用低温液氮、压汞测试、扫描电镜、显微镜观察、X 射线衍射、全硫及形态硫分析方法, 并结合对钻井数据的分析, 对控制 15 号煤渗透率的孔隙结构特征、孔隙-裂隙发育特征和煤中矿物发育特征等煤体因素和沉积环境、埋深等煤层赋存条件进行了对比研究。结果表明: 15 号煤层具有孔隙结构较差、裂隙-孔隙充填严重、煤中矿物较发育、灰分高, 垂直应力较大等特征, 以上特征是导致 15 号煤层渗透率较低的主要原因。

关键词: 煤层渗透率; 柿庄地区; 裂隙-孔隙; 煤中矿物; 煤层气

中图分类号: TE122 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2016)11-0141-06

Analysis on factors affected to low permeability of No. 15 seam in Shizhuang Area

Xu Qilu^{1,2}, Huang Wenhui^{2,3}, Yang Yanhui^{2,3}, Liu Bei^{2,3}, Yan Deyu^{2,3}, Lu Xiaoxia^{2,3,4}

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. MOE Key Lab of Marine Reservoir Evolution and Hydrocarbon Accumulation Mechanism, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 4. China United Coalbed Methane Corporation Limited, Beijing 100011, China)

Abstract: In order to discuss the low permeability cause of No.15 seam in Shizhuang Area at the south part of Qinshui Basin based on the drilling and mine samples from two major seams of No.15 seam and No.3 seam in Shizhuang Area as the study objects, a cryogenic liquid nitrogen, pressurized mercury test, scanning electron microscope microscopy, X-ray diffraction, total sulfur and morphological sulfur analysis as well as other methods were applied to the comparison study on the pore structure features to control the permeability of No.15 seam, the pore-crack development features and mineral development features in coal and other seam factors as well as the sedimentary environment, buried depth and other seam formation conditions. The results showed that the pore structure of No.15 seam was poor and the pore-crack was seriously backfilled. The mineral development in coal, high ash content, high vertical stress and other factors were the causes to make the low permeability of No.15 seam.

Key words: seam permeability; Shizhuang Area; crack-pore; mineral in coal; coalbed methane

0 引 言

煤储层渗透率是煤层气开发的关键参数之一, 是对储层孔隙-裂隙系统优劣特征的综合反映, 其大小在一定程度上直接反映了煤储层的渗透性能并决定着煤层气运移和产出。柿庄地区位

于我国煤层气探勘开发最为活跃的沁水盆地南部地区, 主要包括柿庄南和柿庄北 2 个区块, 区内 3 号与 15 号煤层是煤层气勘探开发的主要目标煤层, 目前 3 号煤层已进入大规模开发阶段, 而随着该地区煤层气产业的不断发展, 作为下部主采煤层的 15 号煤层将是未来主要的勘探开发方向。

收稿日期: 2016-05-28; 责任编辑: 曾康生 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2016.11.027

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2011ZX05042-001-002); 国家重点基础研究发展计划(973 计划) 资助项目(2014CB238900)

作者简介: 许启鲁(1989—), 男, 山东泰安人, 博士研究生。Tel: 15652928164, E-mail: xuqiludream@163.com

引用格式: 许启鲁, 黄文辉, 杨延绘, 等. 柿庄地区 15 号煤层低渗透率影响因素分析[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(11): 141-146.

Xu Qilu, Huang Wenhui, Yang Yanhui et al. Analysis on factors affected to low permeability of No. 15 seam in Shizhuang Area[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(11): 141-146.

通过对柿庄地区 22 口煤层气井的试井渗透率进行研究发现:一方面,对同一口井,15 号煤层的渗透率普遍低于 3 号煤层;另一方面,3 号煤层的渗透率为 $(0.004 \sim 2.230) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $0.48 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,15 号煤层渗透率为 $(0.01 \sim 1.52) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $0.26 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,整体上 15 号煤层渗透率也较低。有学者对 2 层主采煤层的渗透性做过较多研究,也指出了 15 号煤层低渗透率的特征,但研究主要集中于开发程度较高的 3 号煤层,对于渗透率控制因素的研究仅局限在 3 号煤层,对于 15 号煤层渗透率低的原因探讨不足^[1-4]。笔者从孔隙结构特征、孔隙-裂隙发育特征、矿物充填特征、沉积环境因素和埋深等方面对该区 2 层主采煤层进行对比研究,从而探讨 15 号煤层低渗透率的原因,为未来 15 号煤层的进一步勘探开发提供地质依据。

1 孔隙结构因素

煤储层中孔隙发育程度和孔隙结构对渗透

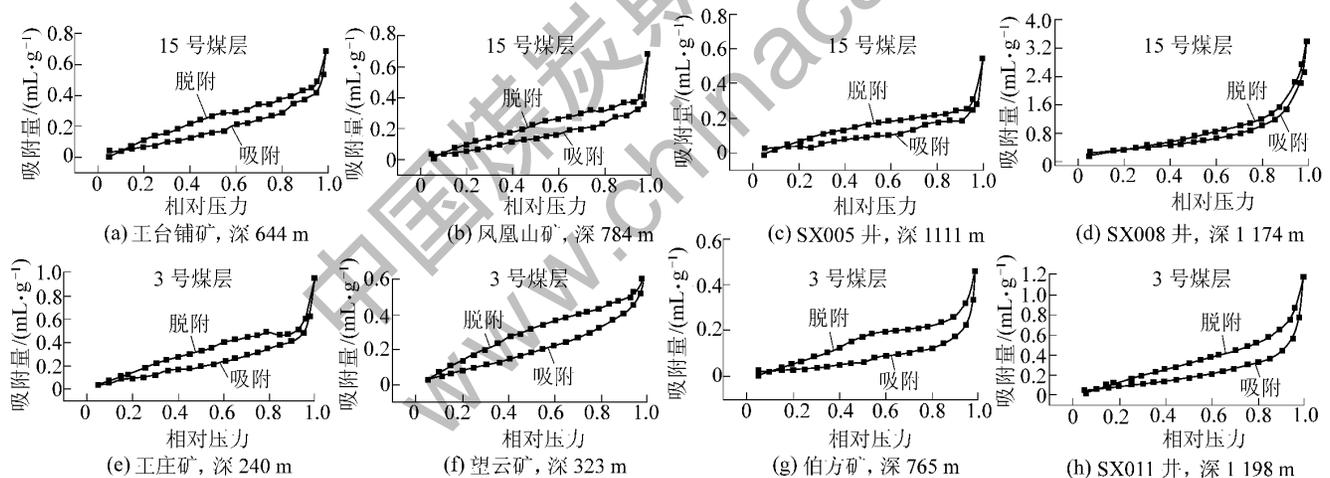


图 1 低温液氮吸附回线对比

Fig. 1 Comparison of low-temperature liquid nitrogen adsorption curves

1.2 压汞法测试

对柿庄地区 2 层煤的 21 个样品利用 Auto-poreIV9500 压汞仪进行了压汞法测试。首先对煤中各孔径段的孔隙配置与渗流通道的关系进行了研究,从图 2 可以发现:煤中不同孔径段孔隙对渗透率影响不同,大孔与渗透率的相关性最大,其对渗透率的贡献也最大,微小孔与渗透率的相关性最差,对渗透率的贡献也较小。测试显示 15 号煤层微小孔所占比例为 84%,中孔为 11%,起渗流作用的大孔所占比例仅为 5%,微小孔所占比例高对煤储层吸附作

率有着直接的影响。采用低温液氮吸附测试和压汞法测试来研究煤孔隙结构对渗透率的影响。

1.1 低温液氮吸附测试

低温液氮吸附反映的是煤储层孔隙结构的优劣性,可以根据孔隙形态及其是否产生吸附回线把孔隙分为 3 类^[5]:第 I 类为产生吸附回线的开放性透气性孔;第 II 类为不产生吸附回线、一端封闭的不透气性孔;第 III 类为产生吸附回线的细颈瓶孔(墨水状),孔虽然是一端封闭的却能产生吸附回线,且解吸分支有一个急剧下降的拐点。

通过对 2 层煤 14 个样品的测试分析发现,吸附回线越不明显,代表着开放性透气性孔越少,孔隙结构越差;吸附回线越明显,且吸附回线面积越大,代表开放性透气性孔越多,孔隙结构越好^[6-7]。通过样品测试结果可以看出(图 1),15 号煤层吸附回线相对于 3 号煤层普遍不明显,吸附回线面积较小,且随着深度增加有逐渐变化到 II 类孔的趋势,可见 15 号煤层开放性透气性孔较少,孔隙结构较差,从而导致 15 号煤层渗透率较低。

用有利,而大孔占比例很少,那么气体扩散的渗流通道就少,15 号煤层的这种孔隙配置关系对渗透率影响较大,严重破坏了煤储层的渗流通道。

孔喉对煤储层渗透性影响较大,压汞法测试得到的排驱压力和孔喉直径均值是对煤储层孔喉特征的直观反映。排驱压力为汞进入煤样最大孔道时的毛细管压力,其值越小,代表储层孔喉半径越大,煤储层渗透性越好。测试结果显示:3 号煤层排驱压力为 1.17~7.83 MPa,平均为 4.4 MPa,15 号煤层为 1.45~11.06 MPa,平均为 5.53 MPa,15 号煤层排驱

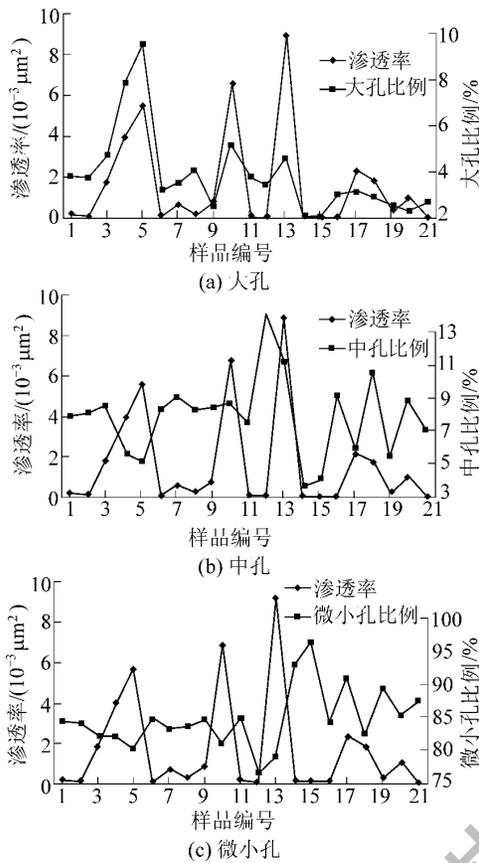


图 2 大孔、中孔和微小孔含量及其对渗透率的影响

Fig. 2 Influence of different size pore content on permeability
 压力明显大于 3 号煤层; 另外, 3 号煤层孔喉直径均值为 $0.05 \sim 0.25 \mu\text{m}$, 平均为 $0.1 \mu\text{m}$, 15 号煤层为 $0.03 \sim 0.19 \mu\text{m}$, 平均为 $0.09 \mu\text{m}$, 整体上 15 号煤层孔喉直径均值小于 3 号煤层; 排驱压力和孔喉直径均值的测试结果均表明 15 号煤层孔喉较小, 孔喉分布整体较差, 对 15 号煤层渗透性产生不利影响。另外测试结果也显示 15 号煤层退汞效率 (60%) 低于 3 号煤层 (68%), 一般退汞效率越低, 孔隙系统的连通性越差。总之, 低温液氮和压汞法测试的结果显示 15 号煤层开放性透气性孔较少, 孔隙结构较差, 孔喉较小, 大孔比例较低, 孔隙配置关系较差, 这些因素导致了 15 号煤层渗透率较低。

2 裂隙-孔隙发育因素

煤储层的裂隙-孔隙发育特征对渗透率的影响较大, 其在很大程度上决定着煤储层渗透率的高低, 并作用于煤层气解吸-扩散-渗流的整个产出过程。对煤储层中孔隙和裂隙不同尺度、不同产状和矿物充填情况的宏观和微观观察, 对煤储层渗透率的研究具有重要意义^[8]。

裂隙是煤中流体渗流的主要通道, 对渗透率贡献较大, 其发育特征直接影响到煤储层的渗透性。关于裂隙, 主要分为宏观裂隙观察和借助于荧光显微镜、扫描电镜的微观观察。手标本的宏观统计结果显示, 15 号煤裂隙较为发育, 面割理密度为 $16 \sim 50$ 条/(10 cm), 端割理密度为 $3 \sim 34$ 条/(10 cm), 均大于 3 号煤层的 $20 \sim 26$ 、 $5 \sim 16$ 条/(10 cm), 但是宏观手标本可轻易观察到 15 号煤层中矿物发育 (图 3)。微观裂隙观察方面, 通过荧光显微镜对煤岩光片进行微裂隙统计, 通过对比发现, 15 号煤层显微裂隙整体较发育, 密度为 41 条/(9 cm^2), 而 3 号煤层显微裂隙密度仅为 23 条/(9 cm^2), 但是 15 号煤层微观裂隙以代表微小裂隙的 C 型和 D 型裂隙最发育, 分别为 13 条/(9 cm^2) 和 28 条/(9 cm^2), 表明 15 号煤微观裂隙虽然较为发育, 但是其更为致密, 裂隙长度及宽度较小, 连通性较差, 导致渗透性较差; 另外利用扫描电镜观察也可以发现, 一方面, 15 号煤层样中显微裂隙较发育, 多为次生裂隙, 原生裂隙较少; 另一方面, 虽然裂隙发育, 但是裂隙闭合度较高, 多见充填物 (图 3)。

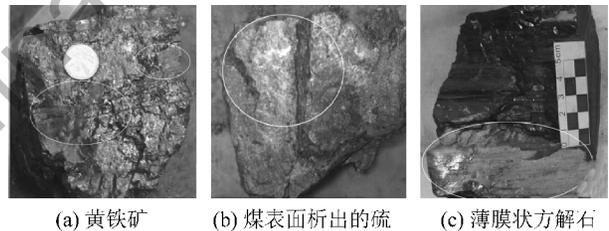


图 3 柿庄地区 15 号煤层矿物宏观照片

Fig. 3 Mineral pictures of No. 15 coal seam in Shizhuang Area

关于孔隙, 扫描电镜的微观观察结果也显示 (图 4), 15 号煤层孔隙充填情况更为严重, 观察到的孔隙几乎全被充填, 且充填矿物种类较多, 充填物有黄铁矿、方解石等, 矿物充填严重降低了孔隙连通性和结构优度, 对渗透性产生非常不利的影响。

总之, 无论宏观层面还是微观层面, 15 号煤层裂隙均较为发育, 这应该有助于提高 15 号煤层渗透性, 但是其渗透性却并未因此而有所改善, 究其原因可以解释如下: 一方面, 宏观和微观观察均可以看到 15 号煤层裂隙的充填情况非常严重, 仅有少部分处于开启状态, 由于矿物充填会对渗透性产生严重的负面影响, 矿物充填与否甚至会对渗透率产生 $1 \sim 2$ 个数量级的影响^[9], 所以矿物充填对裂隙影响较大; 另一方面, 虽然 15 号煤层裂隙较为发育, 但是其裂隙长度和宽度较小, 裂隙没有很好的延展性, 裂隙彼此间的连

通性较差;可见,对于裂隙的观察,矿物充填和裂隙的长度、宽度观察同样重要。整体上,15号煤层的裂隙和孔隙发育特征均不利于煤储层的渗透性。

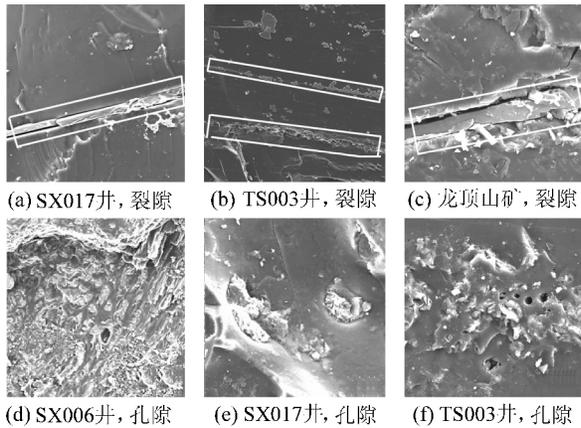


图4 15号煤层储层裂隙-孔隙扫描电镜矿物充填情况

Fig. 4 Mineral filling in pores and fractures of No. 15 coal seam in SEM pictures

3 沉积环境因素

柿庄地区太原组15号煤层为一套滨海平原环境下形成的海陆交互相含煤沉积,聚煤作用发生在泻湖被逐渐淤浅的滨岸沼泽上,为典型的高硫潮坪煤,后期晚石炭世太原组沉积早期发生了第一次特大型海侵,由于潮坪平坦广阔,导致大面积海侵,发育较大面积的碳酸盐台地;山西组3号煤层形成在以三角洲平原亚相沉积为主的三角洲沉积基础上,为三角洲前缘沉积,远离河口,为典型的低硫淡水煤,后期在顶部发育一套以细、粉砂岩及泥岩为主的盖层^[10-11]。2层煤不同的沉积环境对渗透性的影响具体体现为煤中灰分和煤中矿物对渗透性的影响。

3.1 灰分

沉积环境之所以对煤储层的储集和渗透性能有控制作用,是因为沉积环境对煤层中的灰分有控制作用^[11],灰分在整体上也可以表征煤中矿物的发育情况。对柿庄地区28个样品的工业分析结果显示15号煤灰分为12.52%~23.37%,平均16.38%,而3号煤为9.04%~19.19%,平均10.13%,15号煤灰分明显较高;另外从图5可以看出灰分与渗透率呈明显的负相关关系,灰分越大渗透率越低。可见15号煤层的高灰分是导致其渗透率较低的一个原因。

沉积环境对渗透率的影响很大程度上表现为灰分的影响,灰分在本质上反映的是煤中矿物的发育程度,沉积环境对灰分的影响可归结为以下2方面:

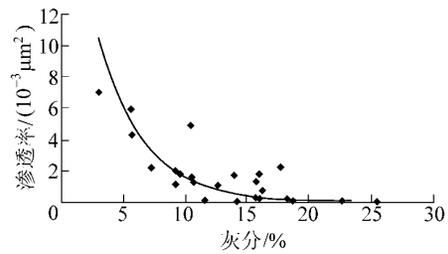


图5 柿庄地区灰分与渗透率的关系

Fig. 5 Relationship between ash content and permeability in Shizhuang Area

一方面反映在煤层形成过程中,15号煤层形成于海陆交互相沉积,水流带来的陆源碎屑物质较多,这些陆源碎屑物质常以夹层形式、透镜体形式充填于煤层孔隙之中,是灰分的主要组成部分,对渗透性产生不利影响,而3号煤层为三角洲前缘沉积,远离河口,带来的碎屑物质相对较少,灰分相对就小。另一方面反映在后生作用过程中,表现为后期顶板水溶液对煤质的改造,通过对柿庄地区50口钻孔分析得出,15号煤层顶板钻孔中灰岩段占78%,泥岩、粉砂质泥岩段占20%,少量为砂岩,3号煤层顶板钻孔中泥岩或粉砂质泥岩段占80%,其余为砂岩,15号煤层的顶板灰岩富含 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Si^{4+} 、 Mg^{2+} 等,极易与煤层热演化过程中形成的以有机相为主的 HCO_3^- 、 HS^- 和 SO_4^{2-} 离子发生反应,灰岩被溶蚀后伴随着地下水流入煤层,发生化学沉淀,充填了煤层的孔隙-裂隙系统,从而对渗透率产生非常不利的影响。

3.2 煤中矿物

煤中矿物的发育特征取决于其沉积环境的变化,不同的沉积环境必然会导致的不同的矿物发育特征^[12],为了对2层煤中矿物进行研究,对研究区煤中矿物进行了X射线衍射分析、全硫及形态硫分析(表1),结果表明:煤中矿物大多为硅酸盐矿物,主要为高岭石,其次为碳酸盐矿物、硫化物矿物,2层煤矿物发育差别较大,15号煤中的方解石和黄铁矿的含量较高,平均为38%和13%,明显大于3号煤层;3号煤全硫含量为0.38%~0.45%,平均全硫含量0.39%,为低硫煤,15号煤层全硫含量为1.88%~4.29%,平均全硫含量2.24%,为中-高硫煤,形态硫中以黄铁矿形式存在的硫化物硫含量丰富;由此可见作为中-高硫煤的15号煤层相对于3号煤层不仅硫含量较高,而且方解石、黄铁矿含量也较高。另外通过对15号煤层宏观和微观观察(图3、图4)可以发现:一方面在15号煤层中可以轻易观察到黄铁矿、方解石和硫等矿物,可见其特别发

育; 另一方面不同于其他矿物的赋存状态, 黄铁矿和方解石在煤中呈层状或透镜体形式填充于煤层中, 其在煤中的这种填充式的赋存状态使其直接阻塞了

煤中渗流通道, 对煤储层渗透性产生较大的影响。可见 15 号煤层中黄铁矿和方解石不仅含量丰富而且对煤储层渗透性的影响也最为严重。

表 1 X 射线衍射分析和全硫及形态硫测试结果

Table 1 Results of X-ray diffraction, total sulfur and sulfur forms analysis

煤层	矿物含量/%									$w(S)_{\text{rad}}/\%$	$w(S)_{\text{pad}}/\%$	$w(S)_{\text{oad}}/\%$
	高岭石	伊利石	绿泥石	石英	方解石	菱铁矿	铁白云石	白云石	黄铁矿			
3号	63.0	5.76	0	1	18	0	1	9.3	1.35	2.24	0.92	1.32
15号	38.4	1.9	4.9	1.9	38	2.2	0	0	13	0.39	0.01	0.39

4 埋深因素

地应力是煤层渗透性最主要的影响因素之一, 许多国内外学者均指出煤层渗透率随地应力增加呈指数减小^[3,9,13-14]。地应力可分为垂向应力和水平应力, 垂向应力为上覆岩层埋深增加而引起的, 而水平应力主要受构造应力作用控制^[15]。Hoek 等^[16]认为垂向应力与水平应力存在临界转换深度, 他们根据全球不同地区现代地应力测量结果, 拟合出了平均水平最大主应力与垂向应力的比值 k 与埋深 H 的关系为

$$100/H + 0.30 \leq k \leq 1500/H + 0.50 \quad (1)$$

k 值临界深度以上的地应力状态以水平方向为主; 在临界深度以下区域, 地应力迅速转换成以垂向应力为主, 且主导作用十分明显。可见在埋深较大情况下, 地应力对渗透率的影响主要为埋深控制的垂向应力的影响。杨彬等^[17]通过渗透率敏感试验发现上覆岩层产生的垂向应力与渗透率呈幂指数关系, 吕玉民等^[18]通过对煤样渗透率敏感试验指出围压特别是垂向应力对煤层渗透率有较大影响, 渗透率在 3~12 MPa 压力条件下呈指数关系下降。可见, 在临界深度以下, 随深度的增加会导致垂向应力占据主导地位, 而渗透率敏感试验显示垂向应力对渗透率作用更为明显, 也就是对处于临界深度以下的煤层来说, 埋深对于渗透率的影响显著, 这与图 6 的统计结果一致, 渗透率随着埋深增加呈现明显的下降趋势。

柿庄地区后期的构造作用对煤层的影响不是很大, 煤层分布稳定, 结构简单, 产状平缓, 水平应力影响相对较弱。钻孔资料显示柿庄地区 15 号煤层位于 3 号煤层以下 60~100 m, 埋藏普遍较深, 可达 800~1500 m, 而秦勇等^[19]根据实测资料确定出沁水盆地南部的地应力状态转换临界深度平均约为 400

m。基于以上理论, 可见柿庄地区 15 号煤地应力受垂向应力比水平应力影响更为显著, 随着埋深的增加垂向应力增大, 主应力差不断增大, 裂隙趋于闭合, 渗透率变差。

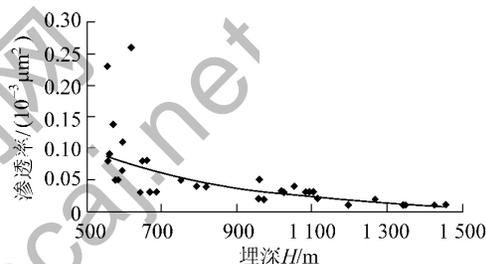


图 6 柿庄地区埋深与渗透率关系

Fig. 6 Relationship between buried depth and permeability in Shizhuang Area

5 结 论

1) 15 号煤层开放性透气性孔较少, 起渗流作用的大孔含量较低, 孔隙配置关系较差, 孔喉较小, 孔隙结构较差, 开发过程中应注意水平井压裂方法的运用, 努力实现各孔隙之间的沟通, 从而进行排水降压, 实现煤层气的开采。

2) 15 号煤层中矿物较为发育, 宏观和微观层面上均可看到煤中矿物严重充填了孔隙-裂隙系统, 这也严重降低了煤层裂隙发育对渗透率的贡献程度, 开发过程中应注意缓释溶液的添加, 对矿物进行一定程度的溶解, 从而实现孔隙-裂隙的沟通, 减弱矿物充填对渗透率的影响。

3) 高灰分对渗透性有明显的抑制作用, 15 号煤层沉积环境对渗透率的影响表现为灰分对渗透率的影响: 一是海陆交互沉积环境使煤层原生矿物较为发育, 灰分较高; 二是沉积环境史决定了其顶部 K_2 灰岩广泛分布, 灰岩的含水性、易溶性和化学沉淀作用导致煤层后生矿物充填较为严重, 灰分较高。

4) 15 号煤层埋深普遍处于临界深度以下, 随

埋深增大,垂向应力作用明显,地应力与主应力差增大,渗透率减小较为明显。但也可以看到柿庄地区煤层埋深与渗透率并未呈指数关系,说明该地区渗透率非单一因素主导,是多种影响因素共同作用的结果。

参考文献(References):

- [1] 张培河,刘钰辉,王正喜,等.基于生产数据分析的沁水盆地南部煤层气井产能控制地质因素研究[J].天然气地球科学,2011,2(5):909-914.
Zhang Peihe, Liu Yuhui, Wang Zhengxi, et al. Geological factors of production control of CBM well in South Qinshui Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 2(5): 909-914.
- [2] 孙梦迪,于炳松,朱华,等.山西沁水盆地南部3号煤层储集空间特征与变质程度的关系[J].中国煤炭地质,2011,23(11):31-35.
Sun Mengdi, Yu Bingsong, Zhu Hua, et al. Relationship between No.3 coal seam reservoir space characteristics and degree of coal metamorphism in Southern Qinshui Basin, Shanxi[J]. Coal Geology of China, 2011, 23(11): 31-35.
- [3] 傅雪海,秦勇,李贵中.沁水盆地中—南部煤储层渗透率主控因素分析[J].煤田地质与勘探,2001,29(3):16-19.
Fu Xuehai, Qin Yong, Li Guizhong. An analysis on the principal control factor of coal reservoir permeability in Central and Southern Qinshui Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2001, 29(3): 16-19.
- [4] 陆小霞,黄文辉,敖卫华,等.沁水盆地南部3号与15号煤层产气量差异因素[J].石油天然气学报,2013,35(3):30-35.
Lu Xiaoxia, Huang Wenhui, Ao Weihua, et al. Reason analysis of different gas yield of No.3 and No.15 coal seam in Southern Qinshui Basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2013, 35(3): 30-35.
- [5] 陈萍,唐修义.低温氮吸附法与煤中微孔隙特征的研究[J].煤炭学报,2001,26(5):552-556.
Chen Ping, Tang Xiuyi. The research on the adsorption of nitrogen in low temperature and micro-pore properties in coal[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(5): 552-556.
- [6] 陈亮.煤层渗透性评价模型研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2009.
- [7] 李玲,汤达祯,许浩,等.柳林地区煤层渗透率影响因素及模糊综合评价[J].洁净煤技术,2013,19(5):105-111.
Li Ling, Tang Dazhen, Xu Hao, et al. Influencing factors of coal seam permeability and its fuzzy comprehensive evaluation in Liulin Area[J]. Clean Coal Technology, 2013, 19(5): 105-111.
- [8] 陶树,王延斌,汤达祯,等.沁水盆地南部煤层孔隙-裂隙系统及其对渗透率的贡献[J].高校地质学报,2012,18(3):522-527.
Tao Shu, Wang Yanbin, Tang Dazhen, et al. Pore and fracture systems and their contribution to the permeability of coal reservoirs in Southern Qinshui Basin[J]. Geological Journal of China Universi-
- ties, 2012, 18(3): 522-527.
- [9] 孙立东,赵永军.沁水盆地煤储层渗透性影响因素研究[J].煤炭科学技术,2006,34(10):74-78.
Sun Lidong, Zhao Yongjun. Research on permeability influence factors of coal deposit layer in Qinshui Basin[J]. Coal Science and Technology, 2006, 34(10): 74-78.
- [10] 赵伟伟.沁水盆地南部地质条件及其煤层气成藏优势分析[J].中国煤炭地质,2009,21(1):19-21.
Zhao Weiwei. Geological conditions and CBM accumulation predominance analysis in Southern Qinshui Basin[J]. Coal Geology of China, 2009, 21(1): 19-21.
- [11] 汤达祯,王生维.煤储层物性控制机理及有利储层预测方法[M].北京:科学出版社,2010:100-123.
- [12] 程伟,杨瑞东,张翥,等.毕节地区晚二叠世煤中微量元素的分布赋存规律及控因分析[J].煤炭学报,2013,38(1):103-113.
Chen Wei, Yang Ruidong, Zhang Zhao, et al. Distribution characteristics, occurrence modes and controlling factors of trace elements in late Permian coal from Bijie City, Guizhou Province[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(1): 103-113.
- [13] 秦勇,张德民,傅雪海,等.山西沁水盆地中、南部现代构造应力场与煤储层物性关系之探讨[J].地质论评,1999,45(6):576-583.
Qin Yong, Zhang Demin, Fu Xuehai, et al. A discussion on correlation of modern tectonic stress field to physical properties of coal reservoirs in Central and Southern Qinshui Basin[J]. Geological Review, 1999, 45(6): 576-583.
- [14] McKee. Stress dependent permeability and porosity of coal[R]. Rocky Mountain Association of Geologist, 1998: 143-153.
- [15] 景兴鹏.沁水盆地南部储层压力分布规律和控制因素研究[J].煤炭科学技术,2012,40(2):116-120,124.
Jing Xingpeng. Study on pressure distribution law and control factors of coal bed methane reservoir in South Part of Qinshui Basin[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(2): 116-120, 124.
- [16] Hoek E, Brown E T. Empirical strength criterion for rock masses[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1980, 106(9): 1013-1035.
- [17] 杨彬,侯大力,龙刚,等.低渗透储层应力敏感实验研究及应用[J].油气藏评价与开发,2012,2(5):41-45.
Yang Bin, Hou Dali, Long Gang, et al. Research and application of stress sensitive experiment on low permeable reservoir[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2012, 2(5): 41-45.
- [18] 吕玉民,汤达祯,许浩,等.韩城地区煤储层孔渗应力敏感性及其差异[J].煤田地质与勘探,2013,41(6):31-34.
Lyu Yumin, Tang Dazhen, Xu Hao. Stress sensitivity and difference of porosity and permeability in coal reservoirs in Hancheng CBM Block[J]. Coal Geology & Exploration, 2013, 41(6): 31-34.
- [19] 秦勇,申建,王宝文,等.深部煤层气成藏效应及其耦合关系[J].石油学报,2012,33(1):48-54.
Qin Yong, Shen Jian, Wang Baowen, et al. Accumulation effects and coupling relationship of deep coalbed methane[J]. Acta Petroleologica Sinica, 2012, 33(1): 48-54.