

文章编号: 1674-9057(2017)04-0580-07

doi:10.3969/j.issn.1674-9057.2017.04.004

煤储层微裂缝对煤层气采收率影响的数值分析

刘畅^{1,2}

(1. 中联煤层气有限责任公司, 北京 100011; 2. 中海石油(中国)有限公司 非常规油气分公司, 北京 100011)

摘要: 微裂缝作为重要的储集空间及渗流通道, 其发育程度对煤储层渗透性、气井产能及采收率变化等均有重要影响。本文结合沁水盆地煤样扫描电镜、压汞、吸附及生产数据, 综合分析了微裂缝对煤层气产能及采收率的影响。结果表明, 所研究煤岩孔隙形态具有均一化现象。煤岩中成岩割理缝多呈组系产出, 具有明显的方向性, 有效性较差; 而构造成因缝具有明显的张、剪性特征, 有效性较好。利用吸附曲线、储层压力及实测含气量确定了煤样的含气饱和度, 主要分布在 33.76% ~ 73.52%。利用压汞实验及基于产能数据的改进物质平衡方程, 探讨了微裂缝对煤层气采收率的影响, 两者分析结果具有一致性。微裂缝发育的煤储层在排采初期具有较高产能, 但产量递减快, 最终采收率要明显偏低。微裂缝相对欠发育煤储层的生产周期要明显长于微裂缝发育的煤储层。该盆地的煤层气采收率约为 50%, 按此计算, 煤层气垂直井的开发周期约为 9 ~ 14 a。煤储层理想最终采收率约为 70%, 煤层气单井(直井)达到该采收率所需时间为 15 ~ 20 a。微裂缝相对欠发育的煤储层达到理想最终采收率所需的时间明显长于微裂缝较为发育的煤储层, 但前者累计产量更高。

关键词: 微裂缝; 煤层气; 采收率; 数值分析

中图分类号: P554; P618.13

文献标志码: A

煤储层孔裂隙系统的定量表征是煤层气开发问题中的热点和难点^[1]。前人针对煤储层孔裂隙定量表征多有研究, 如: 邹明俊^[2]基于压汞、核磁共振及液氮吸附实验对沁水盆地煤岩的孔裂隙系统进行分类, 建立了三孔(扩散孔、渗流孔及裂隙)两渗(裂隙主导渗透率及渗流孔主导渗透率)煤层气孔裂隙模型, 归纳总结出扩散孔与渗流孔的分界点为 64 nm, 渗流孔与裂隙的分界点为 600 ~ 700 nm; 姚艳斌等^[3]利用核磁共振方法研究了煤岩中孔隙及微裂缝的 T_2 弛豫时间分布特征, 弛豫时间在 0.5 ~ 2.5、20 ~ 50 及 > 100 ms 范围分别代表煤中的微小孔、中大孔及微裂缝信息; 李伟等^[4]基于显微 CT 技术实现了对不同煤体结构煤的三维孔裂隙的可视化分析; 降文萍等^[5]研究了构造煤孔裂隙结构对煤层气井产能变化的影响, 认为煤层气井排采曲线的波动特征与气体阵发式产出

有关。显微镜下观察、统计同时联合各类实验测试技术, 是目前煤储层孔裂隙研究的主要方法^[6]。煤岩具有低孔、低渗及强非均质性特征, 微裂缝的存在对提高煤岩渗透性和产能均具有极为重要的作用^[7]。但大量在排采初期高产的煤层气井存在产能递减快的问题, 这说明高产井未必能够稳产^[8]。因此, 微裂缝作为煤岩中一类重要的储集空间及渗流通道, 深入探讨其对煤层气井产能变化规律的影响具有重要实践意义。本文结合煤岩扫描电镜、压汞、吸附及生产数据, 综合分析了微裂缝对煤储层产能及采收率的影响, 为煤层气高效开发提供参考。

1 实验测试

煤样品取自沁水盆地和顺区块, 为太原组 15 号煤。该地区地层整体向北西倾, 倾角 15°左右,

收稿日期: 2016-07-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372139; 41072098); 国家科技重大专项课题(2016ZX05046-003-001)

作者简介: 刘畅(1989—), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向: 沉积学与储层地质学, liuchang23@enooc.com.cn。

引文格式: 刘畅. 煤储层微裂缝对煤层气采收率影响的数值分析[J]. 桂林理工大学学报, 2017, 37(4): 580-586.

为一单斜构造, 断裂不发育^[9-11]。煤层 R_0 值主要分布在 1.8% ~ 2.5%, 为贫煤。15 号煤储层在该地区分布范围稳定, 厚度在 5 m 左右, 埋深在 300 ~ 1 000 m 范围内。宏观煤岩成分以亮煤或镜煤为主, 宏观煤岩类型主要为光亮型煤及半光亮型煤。对测试煤样进行了压汞、等温吸附、物性实验及扫描电镜观察。

1.1 压汞实验

压汞实验仪器型号为 AutoPore IV 9500 自动压汞仪, 实验步骤依据国家标准 GB/T 21650.1—2008。测试条件为: 汞表面张力 480 mN/m, 汞接触角 140°, 实际测量最大压力 228 MPa, 喉道半径测量范围 0.003 8 ~ 1 000 μm 。对 5 组煤样进行了压汞测试, 煤岩物性及压汞曲线所反映出的煤岩孔隙结构参数见表 1。该煤岩的入汞量主要分布在 33.55% ~ 75.69%, 退汞效率主要分布在 62.84% ~ 81.06%, 煤岩中以纳米孔为主。

1.2 等温吸附实验

研究区内 5 组测试煤岩样品的等温吸附实验测试结果见图 1。等温吸附的测试仪器为 AST-2000 吸附仪, 测试压力分布在 0 ~ 11 MPa。

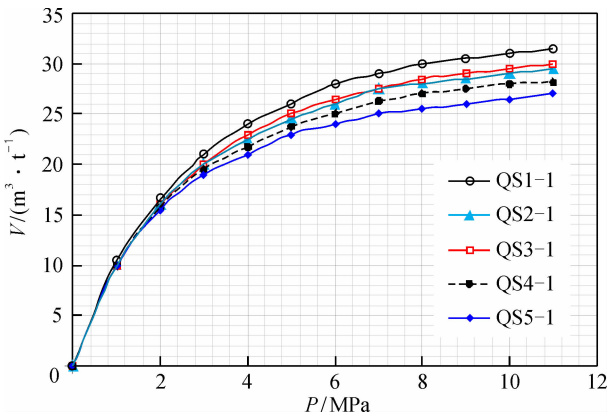


图1 所测试煤样的等温吸附曲线

Fig.1 Isothermal adsorption curves of the tested coal samples

1.3 扫描电镜观察

1.3.1 矿物组分特征 研究区煤储层经历了复杂的成煤作用, 如凝胶化作用及丝碳化作用、沉积成岩作用(压实、溶蚀、重结晶及胶结作用)及变质成岩作用(碳酸盐化、硅化、黄铁矿化、伊利石化及高岭石化)^[8, 12]。这些复杂成煤作用造成煤层中矿物组分组成复杂。镜下观察可以发现, 煤岩中除含有多种有机组分及粘土外, 还含有多类脉体(方解石脉)及蚀变矿物(石英、黄铁矿、伊利石及高岭石)。粘土、脉体及蚀变矿物对煤岩孔缝系统的充填, 造成煤岩渗透性急剧降低^[13]。

1.3.2 孔隙形态均一化 该地区煤岩主要为原生结构煤, 受构造影响较弱。但从微观图像中可以发现煤岩的煤体具有变形现象, 表明该煤层受弱构造变动的影响。在该弱构造运动影响作用下, 有助于一些新孔缝的产生^[12-14]。镜下观察发现, 煤岩中孔隙多呈圆形及椭圆形, 形态与圆形气泡或略微拉张的气泡类似。这种形态的孔隙在所研究高煤级煤岩中大量存在, 与深埋藏期煤岩强烈生烃作用有关^[14]。所研究煤岩中的孔隙虽然在大小上具有不同的尺度, 但却都表现为近似的形态特征, 即偏圆形, 表明这些孔隙具有均一化特征, 其在形成过程中具有类似的沉积环境及受力演化过程, 孔隙在形成过程中其表面的受力作用极为均匀。圆形孔隙的大量存在往往出现在经历过强压实及强胶结作用的成岩晚期岩石中^[15], 这主要是由于成岩早期的岩石内部具有较大的开放空间(孔隙度较大), 此时孔隙形态不规则。但随着压实及成岩作用的同步进行, 当岩石极为致密时, 一方面, 尺度越小, 孔隙间形态差异越小; 另一方面, 作用在孔隙周围的应力较为均匀, 孔隙逐渐扩展为圆形或椭圆形^[16]。从煤岩的应力-应变曲线中通常无法识别明显的屈服应力点, 表明历史时期该煤岩曾经受远远大于现今环境应力的

表1 煤样产出特征及压汞实验数据

Table 1 Basic information and mercury injection parameters of the tested coal samples

编号	取样深度/m	孔隙度/%	气测渗透率/mD	S_{H_2} /%	退汞效率/%	孔喉均值 Φ /nm	分选值	歪度	变异系数
QS1-1	365	14.04	0.219 2	46.06	62.84	14.807	3.646	-1.394	0.246
QS2-1	340	7.60	0.111 1	75.69	81.06	14.851	3.410	-1.634	0.230
QS3-1	355	12.67	0.001 1	33.55	64.81	16.031	1.962	-2.074	0.122
QS4-1	320	11.35	0.008 9	47.82	80.52	15.674	2.659	-2.145	0.170
QS5-1	300	14.24	0.009 6	36.19	74.09	15.962	2.573	-2.779	0.161

挤压应力，该特征也是说明该地区煤层曾经发生强烈压实作用的有力证据。

1.3.3 微裂缝特征 煤岩中微裂缝的形成与其在成煤及成岩作用过程中所引起的基质收缩及各期次构造运动关系密切。通常可以划分为 2 组正交的裂隙割理及一些外生裂隙^[5-7]。镜下观察发现，煤岩中的微裂缝包括成岩缝及构造缝，成岩缝主要为割理缝；构造缝主要包括剪切缝及张性缝。成岩割理缝受成岩作用所引起的基质收缩作用控制，沿两组正交的优势方向分布，呈网状，且多被脉状方解石充填，有效性差。剪切缝和张性缝属构造成因裂缝，这两类微裂缝多未充填及半充填，则有效性好。构造裂缝较好的有效性与该地区在喜马拉雅期发生的强烈构造抬升作用有关^[9]。构造抬升造成应力的大幅度卸载，一方面使部分原来紧闭的微裂缝重新张开，另一方面则利于一些新微裂缝的产生。地层发生强烈隆升剥蚀过程中，煤岩储层内部处于相对闭塞的环境条件下，不利于压溶、胶结及重结晶等成岩作用的进行，这些因素也对煤储层物性的改善或提高产生了积极的影响。

通过扫描电镜观察及统计的方法，将 5 组测试岩样的微裂缝发育程度进行了分类。本文中所定义微裂缝是指用显微镜才能观察到的微尺度裂缝，其开度通常小于 10 μm，延伸长度通常小于 0.5 cm。镜下煤岩中可以观察到 2 组近乎垂直的主微裂缝和次级微裂缝（图 2）。QS1-1 组煤样定义为微裂缝发育煤样，其镜下微裂缝密度大于 1 条/cm。QS2-1 ~ QS5-1 组样品定义为微裂缝欠发育煤样，其镜下微裂缝密度小于 1 条/cm。微裂缝作为重要的渗流媒介，其发育程度与气测渗透率间具有较好的对应关系（表 1）。

2 微裂缝对采收率影响实验分析

2.1 原始含气饱和度

研究区 15 号煤储层中平均水分含量为 1.2%，因此认为煤岩中基本不含水。该地区 15 号煤储层的含气饱和度主要分布在 42.25% ~ 89.27%^[17-18]。区内除局部区域煤层的含气饱和度达到饱和状态外，各主要煤层大多处于未饱和状态。本文所测试煤样的人汞量分布在 33.55% ~ 75.69%，与前人测试的 15 号煤岩含气饱和度大体相当。煤储层的含

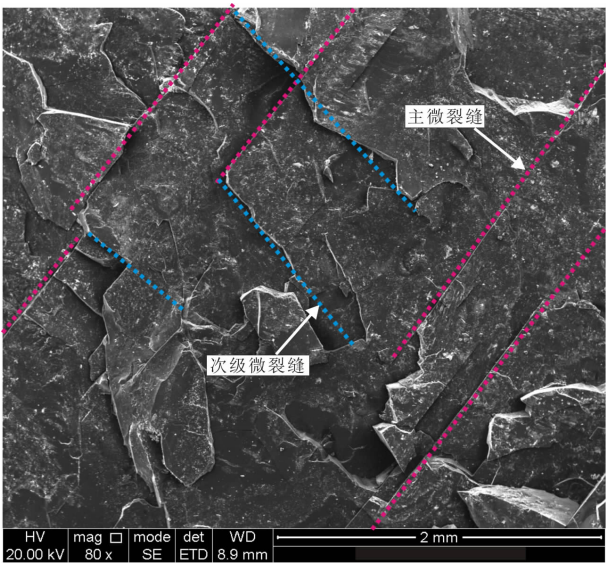


图 2 煤岩样品微裂缝
Fig. 2 Microfracture of the coal sample

气饱和度定义为一定压力、温度和平衡水等条件下，煤层气的吸附饱和程度，即实测含气量 (V_m) 与原始储层压力所对应的吸附气量 (V_p) 的比值^[17-18]。因此，可以从煤岩等温吸附曲线上读出压力为地层压力 (P_p) 时的吸附气量值 (V_p)，将实测含气量值与 V_p 作比值，可得出煤储层原始含气饱和度的近似值 (S_{gi})，如图 3 所示。实测含气量通常小于 V_p ，此时煤储层为未饱和状态；当实测含气量等于 V_p 时，煤储层为饱和状态，即含气饱和度等于 100%；当实测含气量大于 V_p 时，煤储层处于过饱和状态，即含气饱和度大于 100%。

煤岩样品的等温吸附参数取值结果见表 2。表中： V_m 为实测含气量； P_p 为地层压力，根据压力梯度换算，该取样点煤储层的地层压力梯度为

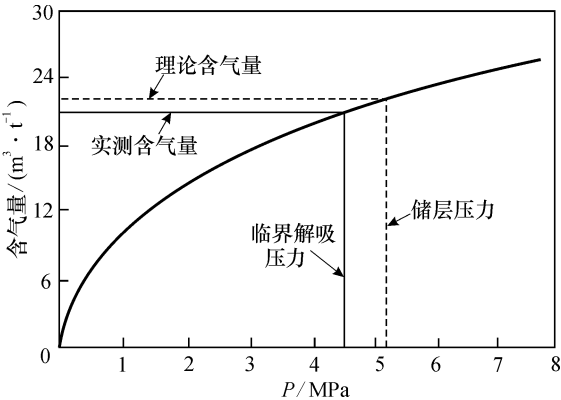


图 3 利用等温吸附曲线分析煤储层含气量
Fig. 3 Gas content analysis of coal reservoir by isothermal adsorption curve

表2 所测试煤储层含气量及等温吸附曲线分析结果

Table 2 Gas content and isothermal adsorption curve analysis results of the tested coal samples

编号	$V_m/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	$P_p/$ MPa	$V_L/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	$P_L/$ MPa	$V_p/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	$S_{gi}/$ %
QS1-1	9.10	3.36	33.33	2.20	20.14	45.18
QS1-1	15.30	3.13	38.46	2.65	20.81	73.52
QS3-1	7.43	3.27	37.04	2.52	20.92	35.52
QS4-1	8.96	2.94	35.71	2.43	19.56	45.81
QS5-1	6.85	2.76	40.00	2.68	20.29	33.76

0.92 MPa/100 m; V_L 为朗格缪尔体积; P_L 为朗格缪尔压力; V_p 为原始储层压力所对应的吸附气量; S_{gi} 为煤储层实测含气量与原始储层压力所对应的吸附气量的比值。利用该方法所确定的 S_{gi} 可大体表征煤储层原始含气饱和度, 主要分布在 33.76% ~ 73.52%。

2.2 最终采收率

计算最终采收率的方法有类比法、实验法、物质平衡法及数值模拟法等^[17-21]。煤层气采收率定义为在一定废弃压力条件下, 气体解吸量与原始储层压力条件下的总含气量的比值^[21]。汞与甲烷在煤层中的赋存特征不同, 二者的性状也存在较大差异, 这是本文存在的主要不足。但利用压汞实验的退汞阶段研究压降过程中汞逐渐从煤岩中排出的过程, 大体相当于天然气的采出过程, 对煤层气开发也具有一定参考价值。退汞结束后, 仍有部分汞残留在样品中。煤储层多采用抽水降压方式开发, 在煤储层压力由原始压力降低到较低水平的过程中, 均有产能。因此, 假设退汞结束时的 S_{Hg} 值为储层滞留气饱和度(S_{gr}), 则煤层气储层最终采收率或天然气可开采部分可以表示为: 最终采收率 = $(S_{gi} - S_{gr})/S_{gi} \times 100\%$ 。该定义适用于煤储层, 与储层工程师常用的采收率计算方法类似^[21], S_{gi} 取值结果见表 2。

各组煤样最终采收率计算结果见表 3。对于微

表3 测试煤样最终采收率计算结果

Table 3 Calculation results of ultimate recovery of the tested coal samples

煤样编号	退汞结束时 S_{Hg}	最终采收率
QS1-1	16.50	63.48
QS2-1	13.00	82.32
QS3-1	11.46	67.74
QS4-1	9.00	80.35
QS5-1	9.08	73.10

裂缝最为发育的 QS1-1 组煤岩, 其渗透率明显高于其他各组煤样, 因而初期产能较高。但其最终采收率却最低, 仅为 63.48%, 表明最终会有大量天然气被圈闭在微裂缝系统中, 即使压力降低到极低的水平也无法被开采。各组样品的最终采收率分布在 63.48% ~ 82.32%, 平均值约为 73%。

3 微裂缝对采收率影响数值分析

3.1 改进的物质平衡方程

为了计算达到上述理想采收率所需要的生产时间, 结合煤层气产能数据及改进的物质平衡方程进行数值分析。计算煤层气最终采收率的方法有类比法、实验法、物质平衡法及数值模拟法等。本文所采用的基于改进的物质平衡方法在美国各煤层气盆地多有应用, 适用于煤层气产能数据分析。首先, 常规物质平衡方程表达如下(式(1)、(2))所示^[22]。

$$GB_{gi} = (G - G_p)B_g,$$

$$\frac{p}{Z} = \frac{p_i}{Z_i} \left(1 - \frac{G_p}{G} \right).$$

式中: i 代表初始储层条件; G 为资源量, m^3 ; G_p 为累积产气量, m^3 ; B_g 为气体体积系数, m^3/m^3 ; Z 为压缩因子。

常规物质平衡方程的推导主要基于被气体占据储层的体积为一常数的假设, 即在任一储层压力条件下, 气体都可以膨胀并占据充满整个储层。因此在该种储层体积不变的条件下, 气体的压缩性成为唯一的生产机制^[23]。

从式(2)可以看出, 常规物质平衡方程认为 p/Z 与 G_p 间存在线性关系, 该方程适用于符合前述假设的部分常规储层(图 4)。但对于其他特殊类

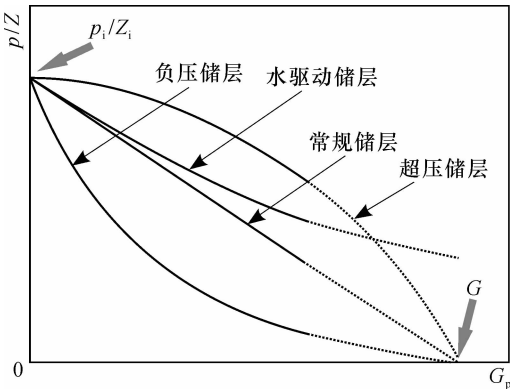


图4 不同类型储层 G_p 与 p/Z 关系

Fig. 4 Relationship of G_p and p/Z of different types of reservoirs

型储层而言,如负压储层、水驱动储层及超压储层, p/Z 与 G_p 间并不满足线性关系(图4),因此常规物质平衡方程应用受限。

Moghadam 等^[24]针对煤储层低渗及强非均质性特征,考虑了水侵、气体解吸、地层及滞留流体压缩性对地层原始含气量的影响,提出新的物质平衡简化方程

$$GB_{gi} = (G - G_p)B_g + \Delta V_{wip} + \Delta V_{ep} + \Delta V_d, \quad (3)$$

ΔV_{wip} 、 ΔV_{ep} 、 ΔV_d 分别为生产中水侵造成的气体体积变化量、地层及滞留流体膨胀引起的气体体积变化量、解吸造成的气体体积变化量。

$$\Delta V_{wip} = W_e - W_p B_w, \quad (4)$$

式中: W_e 为水侵量, m^3 ; W_p 为地表产水量, m^3 ; B_w 为地层水体积系数, m^3/m^3 。

$$\Delta V_{ep} = \frac{B_{gi} G}{S_{gi}} (c_f + S_{wi} c_w + S_{oi} c_o) (p_i - p), \quad (5)$$

式中: c_f 为地层压缩系数, MPa^{-1} ; c_w 为地层水压缩系数, MPa^{-1} ; c_o 为滞留油压缩系数,当地层不含油时去掉该项, MPa^{-1} 。

如果气体吸附过程满足 Langmuir 方程,此时,

$$\Delta V_d = \rho_B B_g \frac{B_{gi} G_f}{\varphi S_{gi}} \left(\frac{V_L p_i}{p_L + p_i} - \frac{V_L p}{p_L + p} \right), \quad (6)$$

式中: G_f 为原地游离气量; φ 为煤储层孔隙度,包含基质孔隙度(φ_m)和裂缝孔隙度(φ_f), $\varphi = \varphi_m + \varphi_f$ 。将式(4)~(6)代入式(3)可得新的物质平衡简化形式方程

$$\frac{p}{Z} (S_{gi} - c_{wip} - c_{ep} - c_d) = \frac{p_i}{Z_i} \left(1 - \frac{G_p}{G_f} \right) S_{gi}, \quad (7)$$

c_{wip} 、 c_{ep} 、 c_d 分别代表生产和水侵中气体体积相对变化、地层和滞留流体体积相对变化、气体解吸造成的体积相对变化。可以分别通过以下方程式(8~10)求取^[24]:

$$c_{wip} = \frac{5.615 (W_e - W_p B_w)}{G_f B_{gi} / S_{gi}}; \quad (8)$$

$$c_{ep} = (c_f + c_w S_{wi} + c_o S_{oi}) (p_i - p); \quad (9)$$

$$c_d = \frac{\rho_B B_g}{\varphi} \left(\frac{V_L p_i}{p_L + p_i} - \frac{V_L p}{p_L + p} \right). \quad (10)$$

从式(7)的物质平衡形式可以看出, $(p/Z) \cdot (S_{gi} - c_{wip} - c_{ep} - c_d)$ 与 G_p 间存在线性关系,根据其于横轴的交点可以确定 G_f ,而不是 G 。

为了使气体物质平衡方程适用于煤层气储层,

引入修正的气体压缩因子 Z^{**} 来代替 King^[25]所提出方程的 Z^* ,此时,新的物质平衡方程一般表达式为^[24]

$$\frac{p}{Z^{**}} = \left(1 - \frac{G_p}{G} \right) \frac{p_i}{Z_i^{**}}, \quad (11)$$

Z^{**} 的表达式见式(12),表明 p/Z^{**} 与 G_p 间具有线性关系,纵轴开始于 p_i/Z_i ,横轴结束于 G 。

$$Z^{**} = \frac{p}{\left[\frac{1}{S_{gi}} \frac{p}{Z} (S_{gi} - c_{wip} - c_{ep} - c_d) + \frac{p_i}{Z_i} \left(\frac{G}{G_f} - 1 \right) \right] \frac{G_f}{G}} \quad (12)$$

当考虑基质中气体解吸时, G/G_f 可以表示为

$$\frac{G}{G_f} = 1 + \frac{B_{gi} \rho_B}{S_{gi} \varphi} \frac{V_L p_i}{p_L + p_i}. \quad (13)$$

图5为常规方法(p/Z)、式(7) ($(p/Z) (S_{gi} - c_{wip} - c_{ep} - c_d)$)及式(12)物质平衡方程对比。可以看出,常规方法并不是实际意义的线性形式,并认为气体的压缩系数是唯一的产生机制^[26],考虑因素不全面。式(7)虽然为线性形式,但拟合线与横轴的交点为 G_f ,并非 G 。式(12)可以根据累积产气量与 p/Z^{**} 间的关系对煤储层原始含气量 G 及不同采收率条件下的生产时间进行计算,且综合考虑了水侵、地层及流体压缩性、解吸气体体积变化及微裂缝等因素对气井产能的影响。

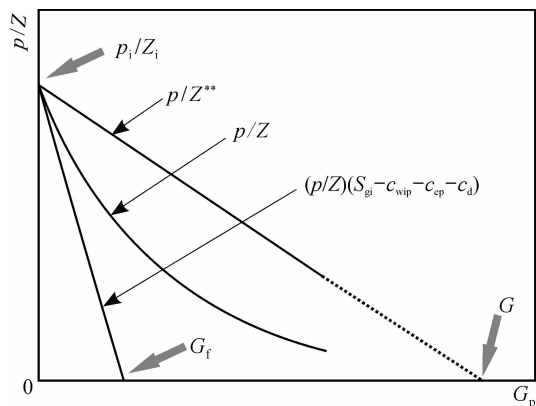


图5 不同物质平衡方程的 p/Z 与 G_p 间关系

Fig. 5 Relationship of p/Z and G_p of different material balance equations

3.2 结果分析

研究区内 X1 和 X2 煤层气井(直井)储层条件及基础参数数据较为接近:埋深 $H = 400$ m,初始地层压力 $p_i = 3.68$ MPa,煤层厚度 $h = 6$ m, $\varphi = 8\%$, $T = 307.15$ K, $\rho_B = 1.5$ g/cm³, $c_f = 0.3 \times 10^{-4}$

MPa^{-1} , $S_{\text{gi}} = 50\%$, $\mu_{\text{gi}} = 0.03 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, $Z_i = 0.96$; 当考虑解吸时, $V_{\text{L}} = 37 \text{ m}^3/\text{t}$, $p_{\text{L}} = 2.5 \text{ MPa}$ 。

其中 X1 井 15 号煤储层中微裂缝较为发育, φ_i 约为 2.5%, 而 X2 井 15 号煤储层中微裂缝相对欠发育, φ_i 约为 1%。基于这 2 口井在 2.5 a 内的排采生产数据, 利用式 (12) 分别计算了这 2 口井的 p/Z^{**} 与 G_{p} 间的关系, 见图 6。

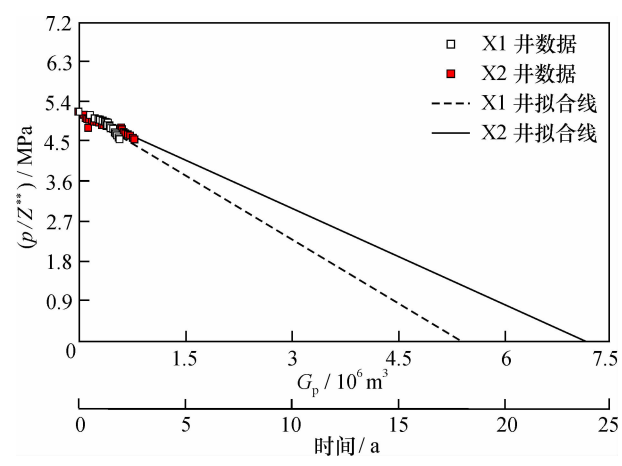


图 6 研究区 X1 井及 X2 井 p/Z^{**} 与 G_{p} 关系

Fig. 6 Relationship of p/Z^{**} and G_{p} of Well X1 and Well X2 in the study area

可以看出, 利用上述改进的物质平衡方程可以很好地对煤层气井进行生产数据拟合, 整体拟合效果非常好, 表明该方法有效。对于 X1 井, 煤储层中微裂缝较为发育。该井初期产能高于微裂缝相对欠发育的 X2 井, 表现为 X1 井在生产初期具有较高的 G_{p} 值。但随着生产时间的增加, 约在 1.25 a 之后, 其产能递减明显加快, 数据拟合线与 x 轴的交点值明显小于 X2 井。

X2 井在 2.5 a 内的生产数据拟合效果较为平稳, 压降幅度相对 X1 井要明显小一些。本文由压汞实验获得的该煤储层的最终采收率约为 70% (表 3), 根据图 6 计算结果可以得到, 当达到该理想采收率时, 所对应的单井 (垂直井) 开发时间大约为 15 ~ 20 a。微裂缝相对欠发育的煤储层达到该采收率所需的时间明显长于微裂缝较为发育的煤储层, 且前者累产更高。美国主要煤层气开发盆地的采收率主要分布在 50% ~ 80%, 而中国煤层气开发盆地的采收率主要分布在 40% ~ 54% 范围内, 平均值为 50% [26]。按此计算, 研究区煤层气垂直井的开发周期约为 9 ~ 14 a。

4 结 论

(1) 所研究煤储层的煤级较高, 孔隙形态具有均一化现象, 表现为孔隙大小具有不同尺度, 但形态具有高度一致性, 主要为圆形, 部分呈椭圆形。煤岩中成岩割理缝的有效性较差, 而构造成因缝的有效性较好。

(2) 利用吸附曲线及实测含气量确定了测试煤样的含气饱和度, 主要分布在 33.76% ~ 73.52%, 处于欠饱和状态。

(3) 利用压汞实验及基于产能数据的改进物质平衡方程探讨了微裂缝对煤层气储层采收率的影响, 两者分析结果具有一致性。微裂缝发育的煤储层在排采初期具有较高产能, 但产量递减快, 最终采收率要明显偏低。微裂缝相对欠发育煤储层的生产周期要明显长于微裂缝发育的煤储层。

(4) 由压汞实验获得的煤储层理想采收率约为 70%, 煤层气单井 (直井) 达到该采收率所需时间为 15 ~ 20 a。微裂缝相对欠发育的煤储层达到该采收率所需的时间明显长于微裂缝较为发育的煤储层, 且前者累产更大。

参考文献:

- [1] 姚艳斌, 刘大锰, 黄文辉, 等. 两淮煤田煤储层孔-裂隙系统与煤层气产出性能研究 [J]. 煤炭学报, 2006, 31 (2): 163 - 168.
- [2] 邹明俊. 三孔两渗煤层气产出建模及应用研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014: 1 - 16.
- [3] 姚艳斌, 刘大锰. 基于核磁共振弛豫谱的煤储层岩石物理与流体现征 [J]. 煤炭科学技术, 2016, 44 (6): 14 - 22.
- [4] 李伟, 要惠芳, 刘鸿福, 等. 基于显微 CT 的不同煤体结构煤三维孔隙精细表征 [J]. 煤炭学报, 2014, 39 (6): 1127 - 1132.
- [5] 降文萍, 张群, 姜在炳, 等. 构造煤孔隙结构对煤层气产气特征的影响 [J]. 天然气地球科学, 2016, 27 (1): 173 - 179.
- [6] 孟巧荣, 赵阳升, 胡耀青, 等. 焦煤孔隙结构形态的实验研究 [J]. 煤炭学报, 2011, 36 (3): 487 - 490.
- [7] Chen B, Wei X Y, Zong Z M, et al. Difference in chemical composition of supercritical methanolysis products between two lignites [J]. Apply Energy, 2012, 88: 4570 - 4576.
- [8] Paul S, Chatterjee R. Determination of in-situ stress direction from cleat orientation mapping for coal bed methane exploration in south-eastern part of Jharia coalfield, India [J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 87: 87 - 96.
- [9] Su X B, Lin X Y, Zhao M J, et al. The upper Paleozoic coal-bed methane system in the Qinshui Basin, China [J]. AAPG Bulletin, 2005, 89 (1): 81 - 100.
- [10] Shao L Y, Yang Z Y, Shang X X, et al. Lithofacies palaeogeography of the Carboniferous and Permian in the Qinshui Basin, Shanxi Province, China [J]. Journal of Palaeogeog-

- raphy, 2015, 4 (4): 384–412.
- [11] 夏大平, 郭红玉, 马俊强, 等. 生物甲烷代谢对煤孔隙结构的影响[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(7): 1097–1102.
- [12] 王红岩, 万天丰, 李景明, 等. 区域构造热事件对高煤阶煤层气富集的控制[J]. 地学前缘, 2008, 15 (5): 364–369.
- [13] 刘洪林, 李贵中, 王烽, 等. 沁水盆地煤层割理系统特征及其形成机理[J]. 天然气工业, 2008, 28(3): 36–39.
- [14] Li W, Zhu Y M, Chen S B, et al. Research on the structural characteristics of vitrinite in different coal ranks [J]. Fuel, 2013, 107: 647–652.
- [15] Cook J E, Goodwin L B, Boutt D F. Systematic diagenetic changes in the grain-scale morphology and permeability of a quartz-cemented quartz arenite [J]. AAPG Bulletin, 2011, 95 (6): 1067–1088.
- [16] Cook J E, Goodwin L B, Boutt D F, et al. The effect of systematic diagenetic changes on the mechanical behavior of a quartz-cemented sandstone [J]. Geophysics, 2015, 80 (2): D145–D160.
- [17] 付玉通, 徐志丹, 崔彬, 等. 沁水盆地和顺区块和6井组产能影响因素分析[J]. 煤田地质与勘探, 2015, 43 (6): 29–31, 35.
- [18] 龙胜祥, 李辛子, 叶丽琴, 等. 国内外煤层气地质对比及其启示[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(5): 696–703.
- [19] 韩文学, 查明, 高长海. 致密油成藏主控因素对比及意义——以鄂尔多斯盆地长7段与松辽盆地扶余油层为例[J]. 桂林理工大学学报, 2014, 34 (4): 629–634.
- [20] 田艳红, 刘树根, 赵异华, 等. 川中地区下寒武统龙王庙组优质储层形成机理[J]. 桂林理工大学学报, 2015, 35 (2): 217–226.
- [21] 朱苏阳, 李传亮, 杜志敏, 等. 考虑逸散过程的煤层气藏采收率计算模型[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45 (5): 891–900.
- [22] Rahman N M A, Mattar L, Anderson D M. New, rigorous material balance equation for gas flow in a compressible formation with residual fluid saturation [C]//SPE Gas Technology Symposium. Society of Petroleum Engineers, 2006: 15–17.
- [23] Klinkenberg L J. The permeability of porous media to liquids and gases [J]. API Drilling & Production Practice, 1941, 2 (2): 200–213.
- [24] Maghadam S, Jeje O, Mattar L. Advanced gas material balance in simplified format [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2011, 50 (1): 90–98.
- [25] King G R. Material-balance technology for coal-seam and Devonian shale gas reservoirs with limited water influx [J]. Spe Reservoir Engineering, 1993, 8 (1): 67–72.
- [26] 李明宅, 孙哈森. 煤层气采收率预测技术[J]. 天然气工业, 2008, 28 (3): 25–29.

Numerical analysis of microfractures effect on coal-bed methane reservoir ultimate recovery

LIU Chang^{1,2}

(1. China United Coalbed Methane Corporation Ltd., Beijing 100011, China;

2. Unconventional Oil & Gas Branch, CNOOC China Ltd., Beijing 100011, China)

Abstract: Microfractures are important space and seepage channel in coal reservoir, and important influence in its development on coal reservoir permeability, well production capacity and the change of recovery. In this paper, based on the scanning electron microscopy, mercury injection, adsorption test and production data, the effect of microfractures on coal reservoir productivity was comprehensively analyzed. The results show that the pore morphology of coal reservoir has the characteristics of homogenization because of the high coal rank, which is characterized by the pore size with different scales, but with a highly consistency (circular) shape. The two groups of diagenesis cleats in the coal rocks have obvious directivity, and their effectiveness is poor. The tectonic fractures in coal mainly contain the tensile and shear fractures, and their effectiveness is better. The gas saturation of coal samples was determined by the adsorption curve, formation pressure and the measured gas content data, they are mainly distributed in the range of 33.76% and 73.52%. The effect of microfractures on coal bed methane reservoir ultimate recovery was discussed by the mercury injection experiment data and the improved material balance equation based on the production data. These two results are consistent with each other. Coal-bed reservoir microfractures are developed with a higher capacity at the beginning of the production process, but declines fast later, and the ultimate recovery is lower. The production cycle of the coal reservoir where microfractures are relatively undeveloped is significantly longer than coal reservoir where microfractures are well developed. The recovery efficiency of coal-bed reservoir in this basin is about 50%, according to the calculation, the development cycle of the vertical CBM well is about 9–14 years. The ideal recovery efficiency of the coal-bed reservoir obtained by the mercury injection experiment is about 70%, the needing time of this recovery is about 15–20 years. It takes a longer time for the coal-bed reservoir where microfractures are less developed to reach the ideal recovery than coal-bed reservoir where microfractures are well developed, and the cumulative gas production of the former is larger.

Key words: microfracture; coal-bed methane; ultimate recovery; numerical simulation