



移动扫码阅读

胡海洋,赵凌云,陈捷,等.发耳矿区煤储层敏感性对煤层气排采影响及控制对策[J].煤炭科学技术,2020,48(7):334-340. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.07.037

HU Haiyang,ZHAO Linyun,CHEN Jie,*et al.*Influence of coal seam sensitivity on CBM drainage and control strategy in Faer Mining Area [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48 ( 7 ): 334 - 340. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2020.07.037

# 发耳矿区煤储层敏感性对煤层气排采影响及控制对策

胡海洋<sup>1</sup>,赵凌云<sup>1,2</sup>,陈捷<sup>1,2</sup>,颜智华<sup>1,2</sup>,李云魁<sup>1</sup>

(1.贵州省煤层气页岩气工程技术研究中心,贵州 贵阳 550081;2.贵州省煤田地质局,贵州 贵阳 550081)

**摘要:**为了降低煤储层敏感性对排采的影响,研究发耳矿区煤储层的敏感性特征,以期为该地区的煤层气井排采方法和控制策略提供参考,通过对发耳矿区16号煤层进行敏感性试验,测试不同流速下的渗透率、不同净应力下的渗透率及不同累计注入倍数下的渗透率,研究了煤层的流速敏感性、应力敏感性、水敏感性伤害特征,分析煤层气井的临界产水量、应力敏感临界值及煤储层敏感性伤害对排采的影响,提出发耳矿区煤层气井降低应力敏感伤害的控制策略。研究表明:发耳矿区16号煤层为中等偏强的速敏损害储层、强应力敏感损害储层、中等偏强的水敏损害储层;为降低煤层气井产水初期的速敏伤害,应降低煤层流体流速,试验煤层的产水量应不超过 $2.46\text{ m}^3/\text{d}$ ;试验煤层的应力敏感临界值为 $7\text{ MPa}$ ,当净应力值小于临界值时,煤层对应力变化的敏感性较强,随净应力值的增大,煤层渗透率快速下降;煤层气井产出水的矿化度越高,产出水对煤层的水敏性伤害呈快速增大的趋势,随着矿化度的降低,对煤层水敏性伤害增大的趋势逐渐减弱,研究结果和认识,对于该地区煤层气井降低压裂、排采过程中煤储层敏感性伤害具有重要指导意义。

**关键词:**煤储层;敏感性;煤层气井;渗透率;产水;煤层气排采

中图分类号:TE133;P618.11

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2020)07-0334-07

## Influence of coal reservoir sensitivity on CBM drainage and control strategy in Faer Mining Area

HU Haiyang<sup>1</sup>,ZHAO Linyun<sup>1,2</sup>,CHEN Jie<sup>1,2</sup>,YAN Zhihua<sup>1,2</sup>,LI Yunkui<sup>1</sup>

(1.Guizhou Research Center of Shale Gas and CBM Engineering Technology,Guiyang 550081,China;

2.Guizhou Provincial Coalfield Geological Bureau,Guiyang 550081,China)

**Abstract:**In order to reduce the impact of coal reservoir sensitivity on coal mining, studies were carried out to investigate the sensitivity characteristics of coal seam in Faer Mining Area, an attempt to provide guidance for controlling coal bed methane drainage in the area. Sensitivity experiments were carried out to No.16 coal seam in the Faer Mining Area, which studied the permeability under different flow rates, different net stresses and with different cumulative injection multiples, the flow velocity sensitivity, stress sensitivity and water sensitivity damage characteristics of coal reservoir were studied, and analysis was performed to assess the impact from the critical water yield, stress sensitive critical value and sensitivity damage of coal seam on drainage mining, a control strategy for reducing stress sensitive damage in coalbed methane well of Faer Mining Area was proposed at the end. The results indicate that coal reservoir of the No.16 coal seam in Faer Mining Area is subject to moderately strong speed-sensitive damage, strong stress-sensitive damage, and moderately strong water-sensitive damage. In order to reduce the speed-sensitive damage to CBM wells at the initial stage of water production, the fluid velocity of coal seam should be kept low, with the water production of experimental coal seam not exceeding  $2.46\text{ m}^3/\text{d}$ . The stress sensitive critical value of the experimental coal seam is  $7\text{ MPa}$ , when the net stress value is lower than the critical value, the coal seam is highly sensitive to stress changes, and the permeability of the coal seam decreases rapidly as the net stress value increases; the water-sensitive harm from the produced water on the coal seam increase at an accelerating rate with higher salinity of the produced water in CBM wells, and as the sa-

收稿日期:2020-01-25;责任编辑:曾康生

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05044005-006)

作者简介:胡海洋(1989—),男,湖北随州人,工程师,硕士。E-mail:997086919@qq.com

通讯作者:赵凌云(1986—),男,贵州铜仁人,工程师,本科。E-mail:zhaolinyun-554@163.com

linity decreases, the water-sensitive harm to the coal seam tends to decrease gradually. This study would provide important guidance for reducing fracture and sensitive damages to CBM wells throughout mining process.

**Key words:** coal reservoir; sensitivity; CBM well; permeability; water production; CBM drainage

## 0 引言

煤层气井在全过程排采过程中,不同的排采阶段、不同排采控制措施下,煤层受到的敏感性伤害类型不同,而煤层伤害的直接后果是煤层气井产能下降。我国在20世纪90年代进行的大参1井,采用国外的快速排采方式,迅速降液面至煤层以下,并保持煤层处于裸露状态,虽然获得高产,但高产后产能迅速下降,分析认为是排水降压速率过快,导致煤层的速敏、应力敏感性伤害较大,煤层渗透率下降严重,影响产能<sup>[1]</sup>。由于流体流速的原因,导致煤层中的颗粒运移并堵塞孔裂隙通道,导致煤层导流能力降低的现象为速敏效应<sup>[2]</sup>,煤层流体流速过快,不仅会带动煤粉颗粒堵塞孔裂隙通道,而且还会将压裂裂隙中的支撑剂运移至井筒,导致煤层裂隙失去支撑而闭合,支撑剂进入井筒也增加了排采设备卡泵停抽的风险<sup>[3-5]</sup>。煤层气井在排采过程中,随着井底流压的下降,煤层由远及近至井筒处所受到的有效应力逐渐扩大,渗透率逐渐降低,影响煤层气、水产出,通过对煤层孔裂隙结构定性、定量研究,分析认为煤岩均具有应力敏感性<sup>[6-8]</sup>。煤层水敏试验研究表明,水敏损害率与黏土矿物含量、液体流速呈正相关关系,与煤岩渗透率呈负相关关系<sup>[9-10]</sup>。贵州地区多煤层发育,各煤层沉积环境差异,且层间流体存在相互流动的可能性<sup>[11]</sup>,增大了煤层气井排采控制的难度。

笔者对黔西水城发耳矿区16煤进行了煤储层敏感性测试,分析煤储层敏感性变化特征及敏感性产生机理,提出针对性排采对策,促进贵州省煤层气勘探开发。

## 1 试验样品、评价方法

### 1.1 试验样品

试验样品来源于贵州六盘水市水城发耳二矿的二叠系龙潭组16煤,煤厚1.09 m,宏观煤岩类型为半亮型煤,煤体结构主要为原生结构,块状为主,煤种为瘦煤。地面参数井测试的煤层含气量为11.63 m<sup>3</sup>/t,甲烷组分含量达到95%,含气饱和度为68%。压汞测试的孔径分布以小孔和微孔为主,体积超过70%。扫描电镜显示该煤层见微裂隙、粒间孔,且孔-裂隙未被任何矿物充填,具备较好的气体运移

通道。试井测试的原始渗透率为 $0.0318 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,属低渗透率储层,煤层渗透性较低、导流能力差。储层压力系数为0.73,属于欠压储层。发耳矿区参数井16煤物性参数见表1。

表1 发耳矿区参数井16煤的物性参数

Table 1 Physical parameters of No. 16 coal seam in parameter well of Faer Mining Area

参数	数值	参数	数值
煤厚/m	1.12	煤层底板深度/m	286.13
渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	0.031 8	临界解吸压力/MPa	5.01
含气量/( $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ )	11.63	储层压力/MPa	2.05
压力系数	0.73	兰氏压力/MPa	2.36
含气饱和度/%	68	兰氏体积/( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )	17.10

### 1.2 评价方法

根据石油天然气行业标准《储层敏感性流动试验评价方法》(SY/T 5358-2010)对煤样进行了敏感性测试,同时根据试验测试与煤层气井排采过程中的流体流动状态进行对比分析,对煤样流速敏感性、应力敏感性、水敏感性进行评价,研究煤样渗透率损害率、应力敏感性系数变化特征,确定煤层气井的临界产水量参数。试验测试采用的仪器为岩心敏感性流动试验装置,仪器型号HKY-6,试验前对测试设备进行校准。

1) 渗透率损害率。渗透率损害率反映了净应力变化过程中,岩心渗透率相对初始渗透率的变化情况。渗透率损害率越大,敏感性越强,其表达式为

$$D_{\text{stn}} = \frac{K_0 - K_n}{K_0} \times 100\% \quad (1)$$

2) 应力敏感性系数。应力敏感性系数反映了净应力变化过程中,净应力每个改变单位压力时,单位渗透率的改变值。指示煤层渗透率随应力变化的敏感程度,应力敏感性系数越大,储层敏感性越强<sup>[8,12]</sup>。其表达式为

$$\alpha_K = \left| \frac{1}{K_0} \frac{K_n - K_{n-1}}{P_n - P_{n-1}} \right| \quad (2)$$

3) 临界产水量。流速敏感性试验测试过程中,径向流的流速 $v$ 与流量 $Q$ 之间存在下列关系<sup>[2,13]</sup>为

$$v = \frac{14.4Q}{2\pi rh\varphi} \quad (3)$$

将煤样测试过程中的流体流动过程运用到煤层气井的实际排采过程中,煤层气井井筒处的流体流

速最快,即 $r=r_w$ 时( $r_w$ 为井眼半径),径向流流速达到最大值 $v_m$ ,根据式(3),得

$$v_m = \frac{14.4Q}{2\pi r_w h \varphi} \quad (4)$$

为降低煤层气井排采过程中的速敏伤害,煤层的最大流体流速不应超过试验测试的得出的临界流速,即 $v_m \leq v_c$ ,公式(4)得出的临界产水量为

$$Q_c = \frac{2\pi r_w h \varphi v_c}{14.4} \quad (5)$$

式中: $D_{\text{sm}}$ 为渗透率损害率,%; $K_0$ 为初始净应力下的岩心渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $K_n$ 为不同净应力下的岩心渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $\alpha_k$ 为煤样应力敏感性系数; $K_n$ 、 $K_{n-1}$ 为相邻不同净应力下的岩心渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $P_n$ 、 $P_{n-1}$ 为试验过程中相邻不同净应力,MPa; $v$ 为径向流流速,m/d; $Q$ 为流量, $\text{m}^3/\text{d}$ ; $r$ 为测试煤样半径,cm; $h$ 为煤样长度,cm; $v_m$ 为最大径向流流速,m/d; $Q_c$ 为煤层气井临界产水量, $\text{m}^3/\text{d}$ ; $v_c$ 为径向流临界流速,m/d。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 流速敏感性试验结果及分析

根据煤岩样品在不同流量下测试的渗透率结果,计算渗透率损害率,绘制出了流量与渗透率及渗透率损害率之间的关系,如图1所示。

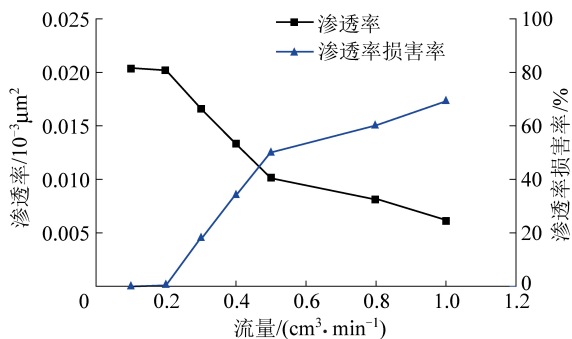


图1 渗透率及渗透率损害率与流量之间的关系

Fig.1 Relationship between permeability and permeability damage rate and flow rate

1) 发耳试验煤样随着流量(或流速)的增加,渗透率损害率呈上升的趋势,渗透率呈下降的趋势,流量与渗透率之间的拟合关系为 $K=0.024\ 0e^{-1.391\ 7Q}$ ,拟合系数0.963 5,根据试验测试的渗透率值,计算的速敏最大渗透率损害率为69.46%,测试的煤岩样品速度敏感性损害为中等偏强。

2) 根据渗透率及渗透率损害率可以看出,试验样品存在临界流速,其线性流量超过 $0.5\ \text{cm}^3/\text{min}$ 、径向流流速<sup>[2]</sup>超过 $9.614\ \text{m}/\text{d}$ 之后,煤岩样品的渗

透率损害率将超过50%,试验样品的渗透率下降趋势逐渐减缓,根据试验测试的临界流速,计算出试验煤岩样品煤层气井的产水量应控制在 $2.46\ \text{m}^3/\text{d}$ 。

3) 煤层气井排采过程中,产水量普遍呈单峰型(产水量“先升后降”)的变化趋势,煤层气井井筒附近储层的流体流速及渗透率损害率也呈现出“先升后降”的变化趋势,则煤层在产水初期的峰值产水前后的渗透率损害率最大,煤层的渗透率伤害最大。

4) 根据产水初期的流速与渗透率损害率之间的关系,为降低产水初期的渗透率伤害,应降低煤层流体流速,降低产水峰值的大小,采取缓慢降压压的方式,控制日产水量的大小。

煤层内流体流动过程中,由于不合理的流动状态,导致煤粉、气水在孔裂隙处沉降或形成气水界面影响流体的正常产出,对煤层造成速敏伤害。一般认为影响流体正常产出有以下几种机理<sup>[14-15]</sup>:①颗粒沉降,固体微粒在浮力、重力、静电力等综合作用下呈悬浮、下沉状态,当过量微粒出现聚集、粘结后形成的较大颗粒容易沉降,造成渗透率局部降低;②单孔堵塞,当流动中的固体颗粒直径接近或大于孔喉直径时,会直接堵塞孔喉通道,影响孔喉一侧流体正常产出,对孔喉通道造成永久性伤害;③气水界面张力封堵孔喉,气水流体流经孔喉,由于截面积变化,流体流速出现变化,容易在孔喉处出现气水界面,当流体流动难以克服气水界面张力封堵时,会影响气水连续稳定产出,通过加大排采强度,克服气水界面张力,能够降低气水界面张力封堵孔喉造成的速敏伤害。

### 2.2 应力敏感性试验结果及分析

根据煤岩样品在净应力增加、降低过程中测试的渗透率结果,计算渗透率损害率及应力敏感性系数,绘制出了净应力与渗透率及渗透率损害率之间的关系(图2),净应力与渗透率及应力敏感性系数之间的关系(图3)。从图2、图3可以看出:

1) 从净应力增加、降低过程中的渗透率及渗透率损害率可以看出,净应力增加过程中,渗透率降低,反之,渗透率增加。渗透率与净应力之间呈幂函数的关系,拟合关系为 $K=0.056P^{-1.700\ 2}$ ,拟合系数为0.978 5。净应力超过7 MPa之后,煤岩样品渗透率及渗透率损害率的变化趋缓。净应力达到7 MPa之前,孔裂隙快速闭合,渗透率快速下降,净应力变化对渗透率影响显著,达到7 MPa之后,渗透率下降缓慢,净应力变化对渗透率的影响逐渐减弱。



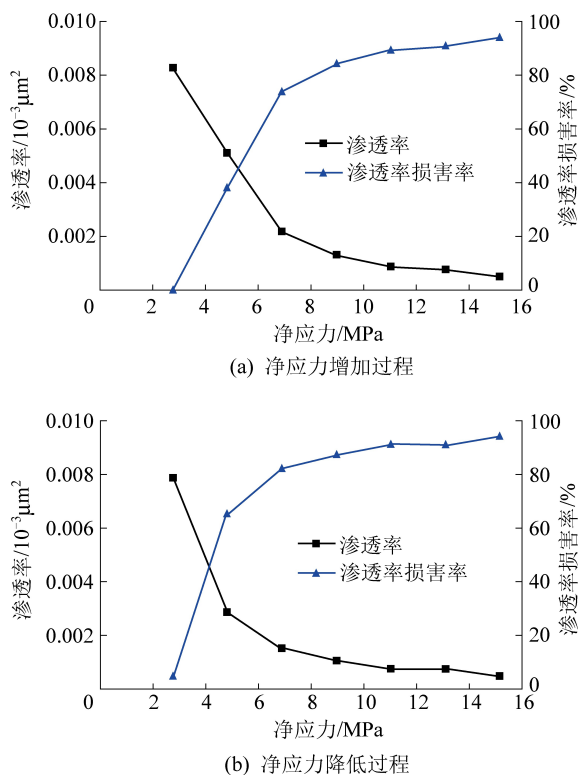


图2 渗透率及渗透率损害率变化散点图

Fig.2 Permeability plot of permeability and permeability damage rate

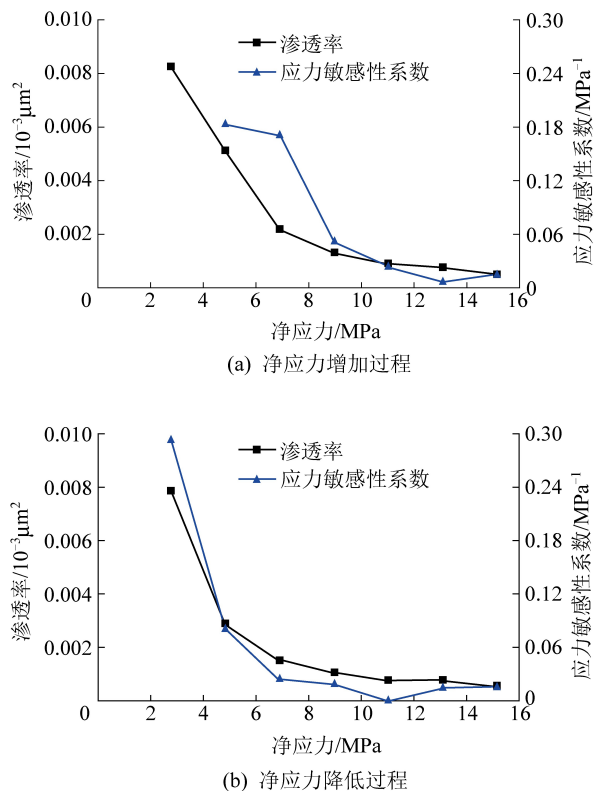


图3 渗透率及应力敏感性系数变化散点图

Fig.3 Scatter plot of permeability and stress sensitivity coefficient

2)在净应力增加、降低的过程中,应力敏感性系数与净应力之间负相关,两者呈幂函数的关系,拟

合关系为  $K = 24.451 \cdot 1P^{-2.8724}$ , 拟合系数为 0.8545。在净应力增加过程中,应力敏感性系数最大达到  $0.184 \text{ MPa}^{-1}$ ,从应力敏感性系数变化趋势可以看出,应力敏感性在  $7 \text{ MPa}$  之后出现转折,敏感性随净应力增大而增大的趋势减缓,与渗透率随净应力变化的转折点压力一致。

3)试验测试样品的应力敏感临界值为  $7 \text{ MPa}$ ,测试渗透率后计算的渗透率损害率最大值为  $93.95\%$ ,测试的 16 号煤层为强应力敏感损害储层,在测试煤层储层压力变化超过  $7 \text{ MPa}$  之前,应注意应力敏感对煤层造成的伤害。针对煤层气井而言,在测试煤层的储层压力降低超过  $7 \text{ MPa}$  之前,应控制井筒压力降幅,避免有效应力快速上升对煤层造成的应力敏感伤害。

煤层应力敏感性是其固有属性,煤层应力变化受排采强度和原始应力状态共同影响。排采强度越大,一方面,快速降压导致煤层在原始应力状态下的弹性能量快速释放,裂隙闭合,渗透率降低,另一方面,快速降压导致煤层孔隙流体对煤岩骨架的支撑力快速下降,煤层有效应力快速上升<sup>[16-17]</sup>,且离井筒越近的煤层有效应力上升越明显,导致离井筒越近的煤层渗透率越低,煤层流体流动阻力增大,影响远端储层内的流体流向井筒。因此,针对应力敏感性较强的煤层,应控制排采强度,避免快速降压引起应力敏感伤害。

### 2.3 水敏感性试验结果及分析

根据煤岩样品的水敏性试验,试验流体流速为  $0.1 \text{ mL/min}$ ,测试在不同水样矿化度及累计注入倍数条件下的渗透率,模拟煤层气井的排采产水过程,绘制渗透率及渗透率损害率与累计注入倍数之间的关系(图4)。图中区间 I 试验测试注入水样矿化度为  $80\,000 \text{ mg/L}$ ,区间 II 矿化度为  $40\,000 \text{ mg/L}$ ,区间 III 矿化度为 0(蒸馏水)。从图4可以看出:

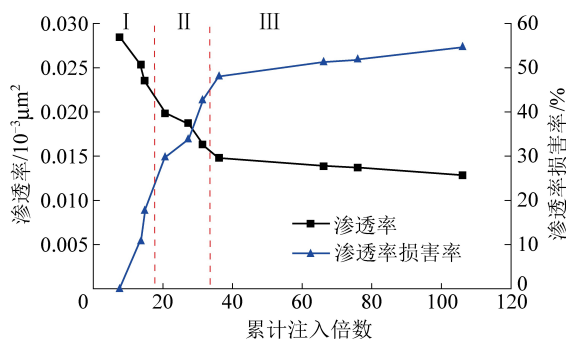


图4 渗透率及渗透率损害率与累计注入倍数之间的关系

Fig.4 Relationship between permeability and permeability damage rate and cumulative injection multiple

1)随着注入水样矿化度的降低,在累计注入倍数增大的过程中,煤岩样品的渗透率呈持续降低的趋势,即对煤样的水敏性伤害持续增大。根据发耳二矿16煤水敏性试验测试结果,渗透率损害率最大达到54.74%,测试的16煤为中等偏强的水敏伤害储层。

2)注入水样在相同的矿化度条件下,随着累计注入倍数增加,渗透率呈下降趋势,且矿化度越高,渗透率下降趋势越快,指示煤层气井产出水矿化度越高,产出水对煤层水敏性伤害快速增大,随着矿化度的降低,对煤层的水敏性伤害增大趋势逐渐减弱。

由于沉积环境水体中含有黏土矿物,其逐渐沉积、压实至煤岩基质植物细胞腔和煤岩裂隙中<sup>[10]</sup>,而黏土矿物含量越高,煤层的水敏性越强。煤层水敏性伤害分为静态渗透率伤害和动态渗透率伤害两种<sup>[9]</sup>:静态渗透率伤害是煤层孔裂隙表面的黏土矿物在原位遇水膨胀,造成裂隙半径减小,渗透率降低,局部导流能力降低,动态渗透率伤害是黏土矿物颗粒在运移过程中相互粘结、膨胀,造成孔喉堵塞,对煤层造成渗透率伤害,动态渗透率伤害比静态渗透率伤害对煤层孔裂隙的伤害更大。

### 3 煤储层敏感性对排采的影响及对策

根据敏感性试验结果及分析可以看出,不同的排采强度及流体介质状态下,煤层受到的敏感性伤害类型不同。

#### 3.1 对初始产水阶段的影响及控制对策

初始产水阶段产出流体为水,不合理的排采控制强度会引起速敏伤害,而该阶段煤层的有效应力上升较快,煤层的应力敏感伤害也显现出来,且产出水的矿化度相对较高,水敏伤害也会迅速增加。因此,在初始产水阶段,受到3种敏感性伤害的储层渗透率会出现迅速下降,则见套压之前的初始产水阶段是煤层气井产水的关键时期。

排采强度大小对速敏和应力敏感伤害都有影响。排采强度越大,煤层流体流速越快,对煤粉及支撑剂的携带能力越强,裂隙、吼道发生堵塞风险越高<sup>[18-19]</sup>。排采强度越大,煤层的有效应力快速上升,导致裂隙闭合、渗透率下降,影响煤层产水和压降半径。利用ECLIPSE软件模拟结果显示,在考虑应力敏感时,储层压降传播范围明显小于无应力敏感时的压降范围,产气量也远小于不考虑应力敏感模型时的产气量<sup>[20]</sup>。

煤层在初始产水阶段受速敏、应力敏、水敏的伤

害为不可逆伤害,因此,应采用矿化度较低的压裂液进行压裂,降低煤层水敏伤害,在见套压之前需要合理控制流压降幅,促进煤层产水,降低应力敏感对煤层的伤害,扩大煤层压降半径。根据发耳矿区煤层埋深情况,该阶段的流压控制体现在对液面的控制上,控制策略:①压裂煤层埋深不超过500 m,液面降速不超过2.5 m/d;②压裂煤层埋深介于500~800 m,液面降速不超过3.5 m/d;③压裂煤层埋深介于800~1 000 m,液面降速不超过5 m/d。整个降液面的过程中,流压降幅呈下降趋势。

#### 3.2 对低产气阶段的影响及控制对策

1)见套压后低产气阶段的产出流体以水为主、气为辅,但产水明显低于初始产水阶段的产水量,煤层孔裂隙的流体流速降低,对煤粉、支撑剂等固体颗粒的携带能力降低,出现新的速敏伤害的风险降低。煤层气井见套压后,煤层经历有效应力快速上升阶段,且见套压前采取缓慢降流压的方式,有效应力上升缓慢,对煤层造成应力敏感伤害上升程度逐渐减弱<sup>[21-22]</sup>。随着返排率的逐渐上升,煤层产水的矿化度呈下降趋势,对煤层造成的水敏伤害变化趋势与速敏、应力敏感变化趋势相似。尽管煤层速敏伤害、应力敏感伤害、水敏伤害程度的上升趋势减缓,但初始产水阶段在煤层中形成的不可逆速敏伤害、应力敏感伤害及水敏伤害继续对煤层产水、产气造成影响,且各种敏感性伤害始终呈上升趋势。

2)见套压后低产气阶段,煤层孔裂隙中存在气、水两相流动,在煤层孔喉处出现气水界面的可能性增加,气水界面张力引起速敏伤害的可能性增加。在煤层气井正常排采中,当出现短时间内产水、产气快速下降,则煤层内可能出现气水界面张力引起的速敏伤害,可采取提高排采强度的措施,促进煤层内流体流动,来消除气水界面张力引起的速敏伤害。

3)在见套压后低产气阶段,仍需控制排采强度,避免出现速敏(颗粒沉降、单孔堵塞)、应力敏感的快速上升,同时采取合理的排采措施,降低煤层发生气水界面张力引起的速敏伤害。该阶段的井底流压控制体现在对液面及套压的控制上,对井底流压的控制策略如下:①采取先降液面后套压的方式,将液面稳定在上部煤层顶板以上20 m处,促进煤层优先产水,控制产气不超过300 m<sup>3</sup>/d;②压裂煤层埋深不超过500 m,套压不超过1.5 MPa;③压裂煤层埋深介于500~800 m,套压不超过2 MPa;④压裂煤层埋深介于800~1 000 m,套压不超过3 MPa;⑤见套压后液面降速不超过1.5 m/d,液面稳定后的套压降速不超过0.01 MPa/d。控制液面及套压稳定,

避免出现液面及套压的大幅波动对煤层的影响。

### 3.3 对稳定产气阶段的影响及控制对策

1) 稳定产气排采阶段产出的流体以气为主、水为辅,此过程中井底流压较低,产出水相对较少,气水稳定产出,煤层的压降漏斗向远端扩展,井筒附近煤层的“三敏”伤害接近稳定的状态,但井筒附近的煤层气体大量解吸,由于基质收缩效应的影响,渗透率上升。综合作用下,井筒附近的煤层在气体大量解吸产出的过程中,渗透率上升,井筒远端的煤层渗透率在“三敏”伤害的作用下,仍然呈下降趋势。

2) 井筒远端煤层中流体在生产压差的作用下,大量压裂液向井筒方向运移,其有效应力快速上升,渗透率快速下降,而井筒近端的渗透率相对较低,阻力较大,影响远端水的运移,导致产水相对较少<sup>[16]</sup>。井筒远端煤层储层压降小,煤层解吸气量小,煤层基质收缩效应引起的渗透率上升较小,以“三敏”效应对煤层伤害为主,渗透率呈下降趋势。

3) 在稳定产气排采阶段,煤层的“三敏”伤害接近稳定,但伤害仍然呈整体缓慢上升趋势,在排采过程中,合理控制压降速率,避免井筒远端的煤层出现严重的速敏、压敏伤害。此阶段产气量相对较高,煤层沉没度较低,合理控制排采强度及套压大小,采取低套压排采方式,降低煤层气相压力,促进气、水稳定产出,避免气、水流体在孔隙、吼道处出现气水界面张力引起的速敏伤害。该阶段的井底流压的控制策略如下:①井底流压降幅不超过 0.005 MPa/d,控制液面及套压稳定;②井筒套压不超过 0.3 MPa,扩大生产压差及压降漏斗,促进远端煤层解吸产气。

综上分析,煤层气井在压裂施工结束之后,不同排采阶段、不同位置处的渗透率分布规律如图 5 所示。

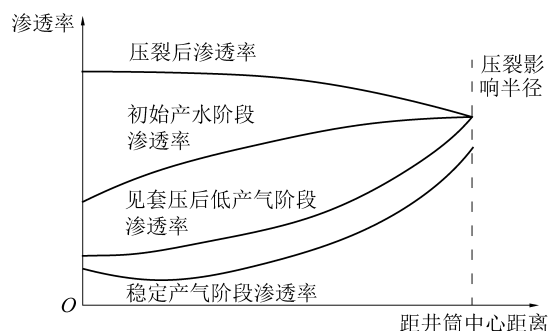


图 5 煤层压后及不同排采阶段渗透率分布示意

Fig.5 Schematic diagram of permeability distribution after coal storage lamination and different drainage stages

压裂之后,从井筒至远端的煤层渗透率呈下降趋势,井筒近端煤层渗透率基本一致,远端改造效果不如井筒附近煤层的改造效果。初始产水阶段,由于“三敏”效应对煤层的渗透率伤害严重,导致井筒

附近煤层的渗透率快速下降,低于井筒远端煤层的渗透率。见套压后低产气阶段,井筒附近煤层的“三敏”效应伤害趋于稳定,但井筒中-远端煤层的“三敏”效应伤害快速增加。稳定产气阶段,井筒近端煤层的基质收缩效应导致渗透率上升<sup>[23]</sup>,而“三敏”效应对煤层渗透率的伤害基本稳定,导致井筒附近煤层渗透率出现升高,但井筒远端煤层渗透率的影响以“三敏”效应为主,渗透率呈下降趋势。

## 4 结论及建议

1) 根据试验测试分析的渗透率损害率,发耳二矿 16 号煤层为中等偏强的速敏损害储层、强应力敏感损害储层、中等偏强的水敏感损害储层。该区块开发 16 号煤层的煤层气井,需注意控制排采强度,降低初始产水阶段的速敏和应力敏感伤害;

2) 随着试验的流速增加,渗透率呈指数函数形式降低,煤层在低速流体流动过程中渗透率伤害小,流速越快,对煤层的伤害越大。煤层气井在初始产水阶段产水量高,流体流速快,合理控制产水量,降低煤层流速过快引起的速敏伤害;

3) 随着试验的净应力增加,渗透率呈幂函数的形式降低,在低净应力阶段,随着净应力的增加,渗透率快速下降。煤层气井储层有效应力持续增大,在初始产水阶段的有效应力较低,需控制排采强度,延长初始产水阶段的持续时间,促进煤层产水,扩大返排率,降低煤层的应力敏感伤害;

4) 试验测试的矿化度水样越高,对煤样的水敏伤害越大,随着矿化度的降低,对煤样的水敏伤害增大的趋势逐渐减弱。煤层气开发优选黏土矿物含量低的煤层进行压裂,采用低矿化度的压裂液进行压裂,降低煤层的水敏伤害。

## 参考文献 (References):

- [1] 赵庆波,孙锦锦,李五忠. 中国煤层气勘探的新思路[J]. 天然气工业,1996,16(5):25-28.  
ZHAO Qingbo, SUN Fenjin, LI Wuzhong. New theory for coalbed gas exploration in china[J]. Nature Gas Industry, 1996, 16(5): 25-28.
- [2] 孟召平,侯安琪,张 鹏,等. 沁水盆地典型煤矿区煤的流速敏感性试验及控制机理[J]. 煤炭学报,2017,42(10):2649-2656.  
MENG Zhaoping, HOU Anqi, ZHANG Peng, et al. Experimental study on flow rate sensitivity of coal in typical coal Mining Area of Qinshui Basin and its control mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(10): 2649-2656.
- [3] 张永平,杨艳磊,唐新毅,等. 沁南地区高煤阶煤层流速敏感性及其影响因素[J]. 煤田地质与勘探,2015,43(4):36-40.  
ZHANG Yongping, YANG Yanlei, TANG Xinyi, et al. Velocity



- sensitivity and its influencing factors of high-rank coal reservoirs in southern Qinshui basin[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2015, 43(4): 36-40.
- [4] 李金海, 苏现波, 林晓英, 等. 煤层气井排采速率与产能的关系[J]. *煤炭学报*, 2009, 34(3): 376-380.
- LI Jinhai, SU Xianbo, LIN Xiaoying, *et al.* Relationship between discharge rate and production of coalbed methane wells [J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(3): 376-380.
- [5] 刘岩, 苏雪峰, 张遂安. 煤粉对支撑裂缝导流能力的影响特征及其防控[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(3): 687-693.
- LIU YAN, SU Xuefeng, ZHANG Suian. Influencing characteristics and control of coal powder to proppant fracture conductivity [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(3): 687-693.
- [6] 刘大锰, 李振涛, 蔡益栋. 煤层孔-裂隙非均质性及其地质影响因素研究进展[J]. *煤炭科学技术*, 2015, 43(2): 10-15.
- LIU Dameng, LI Zhentao, CAI Yidong. Study progress on pore-crack heterogeneity and geological influence factors of coal reservoir [J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(2): 10-15.
- [7] 薛培, 郑佩玉, 徐文君, 等. 有效应力对不同阶煤渗透率影响的差异性分析[J]. *科技导报*, 2015, 33(2): 69-73.
- XUE Pei, ZHENG Peiyu, XU Wenjun, *et al.* Influence of effective stress on permeability of different rank coals [J]. *Science & Technology Review*, 2015, 33(2): 69-73.
- [8] 孟雅, 李治平. 覆压下煤的孔渗性试验及其应力敏感性研究[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(1): 154-159.
- MENG Ya, LI Zhiping. Experimental study on the porosity and permeability of coal in net confining stress and its stress sensitivity [J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(1): 154-159.
- [9] 耿昀光, 汤达祯, 许浩, 等. 安泽区块煤层孔裂隙特征及水敏效应损害机理[J]. *煤炭科学技术* 2017, 45(5): 175-180.
- GENG Yunguang, TANG Dazhen, XU Hao, *et al.* Pore cracking features of coal reservoir in Anze Block and water sensitive effect failure mechanism [J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(5): 175-180.
- [10] 左银卿, 张学英, 周骛, 等. 沁南地区高煤阶煤层水敏效应及其控制因素[J]. *油气地质与采收率*, 2014, 21(5): 107-110.
- ZUO Yinqing, ZHANG Xueying, ZHOU Rui *et al.* Water sensitivity and its controlling factors on high-rank coal reservoirs in southern Qinshui basin [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2014, 21(5): 107-110.
- [11] 胡海洋, 陈捷. 贵州西部超压煤层临界解吸压力的确定及应用[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(1): 220-225.
- HU Haiyang, CHEN Jie. Determination and application of critical desorption pressure in overpressure seam of Western Guizhou [J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(1): 220-225.
- [12] 王培玺, 刘仁静. 低渗透储层应力敏感系数统一模型[J]. *油气地质与采收率*, 2012, 19(2): 75-78.
- WAN Peixi, LIU Renjing. Universal model of stress sensitive coefficient for low permeability reservoir [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2012, 19(2): 75-78.
- [13] 敖坤, 刘月田, 秦冬雨. 微裂缝岩芯不同应力下的速敏效应[J]. *大庆石油学院学报*, 2010, 34(6): 64-67, 71.
- AO Kun, LIU Yuetian, QIN Dongyu. Speed sensitive effect on micro fracture rocks under different stress [J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2010, 34(6): 64-67, 71.
- [14] 宋金星, 于世耀, 苏现波. 煤层速敏伤害机理及防速敏试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2018, 46(6): 173-177.
- SONG Jinxing, YU Shiyao, SU Xianbo. Study on velocity sensitivity damage mechanism and its proof test of coal reservoir [J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(6): 173-177.
- [15] 魏迎春, 李超, 曹代勇, 等. 煤层气洗井中煤粉分散剂对煤岩的影响[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(7): 1951-1958.
- WEI Yingchun, LI Chao, CAO Daiyong, *et al.* Effect of pulverized coal dispersant on coal in the CBM well-washing technology [J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(7): 1951-1958.
- [16] 许小凯. 煤层气直井排采中煤层应力敏感性及其压降传播规律[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2016.
- [17] 苏雪峰, 刘岩, 崔周旗, 等. 降压速率对沁水盆地樊庄区块高阶煤产气能力影响[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(3): 1-9.
- SU Xuefeng, LIU Yan, CUI Zhouqi, *et al.* Influence of depressurization rate on gas production capacity of high rank coal in Fanzhuang Block of Qinshui Basin, China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(3): 1-9.
- [18] 贾慧敏, 胡秋嘉, 刘忠, 等. 裂缝应力敏感性对煤层气井单相流段产水影响及排采对策[J]. *中国煤层气*, 2017, 14(5): 31-34.
- JIA Huimin, HU Qiujia, LIU Zhong, *et al.* Influence of fractures stress sensitivity on water production law for the single-phase flow of CBM wells and drainage countermeasures [J]. *China Coalbed Methane*, 2017, 14(5): 31-34.
- [19] 马立涛, 黄政华, 刘玉明, 等. 应力敏感性条件下储层参数对煤层气井单相流段产水量影响研究[J]. *煤矿安全*, 2018, 49(7): 147-150.
- MA Litao, HUANG Zhenghua, LIU Yuming, *et al.* Effect of reservoir parameters on water yield of single phase flow in coalbed methane wells under condition of stress sensitivity [J]. *Safety in Coal Mines*, 2018, 49(7): 147-150.
- [20] 郭春华, 周文, 孙哈森, 等. 考虑应力敏感性的煤层气井排采特征[J]. *煤田地质与勘探*, 2011, 39(5): 27-30.
- GUO Chunhua, ZHOU Wen, SUN Hansen, *et al.* The relationship between stress sensitivity and production of coalbed methane wells [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2011, 39(5): 27-30.
- [21] 鲍清英, 东振, 张义, 等. 低煤阶应力敏感性机理及其对产气的影响: 以二连盆地为例[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(3): 671-679.
- BAO Qingying, DONG Zhen, ZHANG Yi, *et al.* Stress sensitivity mechanism of low-rank coal and its influence on gas production: a case study from Erlian Basin [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(3): 671-679.
- [22] 程乔. 沁南煤层气井排采储层伤害的耦合机理[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2015.
- [23] 胡海洋, 倪小明, 朱阳稳, 等. 煤层气井渗透率时空变化规律研究及应用[J]. *特种油气藏*, 2016, 23(5): 106-110.
- HU Haiyang, NI Xiaoming, ZHU Yangwen, *et al.* Spatial-temporal permeability and its application in CBM well [J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2017, 45(7): 85-92.