

煤层气排采产气通道适度携煤粉理论

张芬娜¹, 李明忠¹, 綦耀光¹, 朱洪迎¹, 孟尚志²

(1. 中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中联煤层气有限公司, 北京 100108)

摘要:考虑在煤储层中实际地层液混合流体中煤粉含量和煤粉颗粒群的悬浮分级, 建立煤粉颗粒在产气通道内悬浮运移模型, 给出煤粉悬浮排出的条件; 打破以往以防煤粉为主的思想, 基于液流携带建立煤层气排采产气通道内的适度携煤粉方法, 基于液固两相流理论建立液流携带煤粉运移模型, 并分析地层液参数和煤粉颗粒参数对适度携煤粉的影响。结果表明: 煤粉颗粒粒径越小, 地层液流速越大、黏度越大, 煤粉在产气通道截面上分布越均匀, 其悬浮排出能力越强, 煤粉较易被地层液携带排出; 煤层气井排采各个阶段(单相水流阶段、气水两相流阶段和单相气体流动阶段)地层液中气液固三相混合的比例不同导致地层液的黏度不同, 造成排采过程中地层液携带煤粉的能力随着产气量的变化而变化。合理控制地层液的参数有利于煤粉适度排出, 疏通产气通道增加其渗流能力, 提高煤层气井产气量。

关键词:煤层气井; 煤粉; 悬浮运移; 携煤粉能力

中图分类号:P 618.11 **文献标志码:**A

引用格式:张芬娜, 李明忠, 綦耀光, 等. 煤层气排采产气通道适度携煤粉理论[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2015, 39(2): 86-92.

ZHANG Fenna, LI Mingzhong, QI Yaoguang, et al. Analysis of pulverized coal migration during CBM production [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(2): 86-92.

Analysis of pulverized coal migration during CBM production

ZHANG Fenna¹, LI Mingzhong¹, QI Yaoguang¹, ZHU Hongying, MENG Shangzhi²

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. China United Coalbed Methane Company Limited, Beijing 100108, China)

Abstract: A model for migration of suspended pulverized-coals during coalbed methane (CBM) production in gas-channels was established with considerations of the suspending grade and content of pulverized-coals in the fluid mixture of CBM formations. The conditions for discharging the suspended pulverized-coals were described. The model was based on the liquid-solid two-phase flow theory and can be used to study the method for a moderate production rate of coal powders rather than to prevent it. The effects of different parameters on the carrying capability of pulverized coal by the formation liquid were analyzed, including the size of pulverized-coals, the velocity and viscosity of the formation fluid. Due to the differences of the gas-liquid-solid mixtures during different discharge-phases of CBM production, the apparent viscosity of the formation fluid is different, which has a great effect on the carrying capability of pulverized coal of the formation fluid, and being affected by the gas production rate. The gas production of CBM wells can be improved via moderately adjusting the flow behavior of the formation fluid for a proper discharging of pulverized coal, or increasing the percolation capacity of gas channels.

Keywords: CBM wells; pulverized coal; suspension migration; carrying capability

在煤层气开采各个阶段煤粉的产生不可避免^[1-6]。煤粉沉积堵塞煤层气井产气通道, 使煤层气

井稳产、高产困难,影响了煤层气的整体开发效益^[7]。解决煤粉的滞留对保障煤层气井产气量、延长稳产周期具有重要意义。近年来在防煤粉技术的基础上,借助油气田防砂方法基于阻挡煤粉进入井筒的思想形成了防煤粉方法^[8-12],主要有机械绕丝筛管防煤粉、绕丝筛管+砾石填充防煤粉方法。这对于出煤粉量少的煤层气井起到了一定的效果,但对于出煤粉量较大煤层气井,该防煤粉方法效果不明显。目前油气田适度出砂提高产能的研究已经很成熟,何冠军^[13]对疏松砂岩常规稠油油藏适度出砂提高产能基础进行了研究,周守为等^[14]对稠油油藏分支水平井适度出砂开发技术进行了研究,较大幅度地提高了油井产能,取得了较好的开发效果。何保生等^[15]对油田开发多枝导流适度出砂技术进行了研究,在研究多枝导流适度出砂油藏增产机制和产能评价方法的基础上,研发了多枝导流钻井技术、适度出砂完井技术及携砂采油技术,形成了一套海上稠油油田开发多枝导流适度出砂技术体系。笔者借鉴油气田适度出砂原理,基于液流携带煤粉颗粒,打破以往以防为主的思想,允许适度携煤粉排出,建立煤粉悬浮运移模型,给出煤粉悬浮运移排出的条件,并对地层液参数和煤粉颗粒参数对适度携煤粉的影响进行分析。

1 产气通道内煤粉悬浮颗粒运移条件

1.1 单个煤粉受力

脱落煤粉颗粒在地层流体中受力分析如图1所示。煤粉颗粒主要受运动阻力(F_d)、视质量力(F_m)、压力梯度力(F_p)、巴西特力(F_b)、马格努斯力(F_m)、萨夫曼力(F_{sl})、颗粒在液体中的重力(F_c ,浮重)。

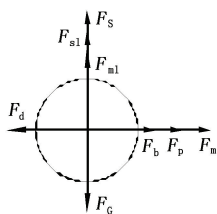


图1 悬浮煤粉受力分析

Fig. 1 Forces analysis of abrasive pulverized coal

(1)压力梯度力 F_p 。煤粉颗粒所受的压力梯度力与颗粒本身的运动无关,与静止颗粒所受的压力梯度力相同^[14],压力梯度力表达式为

$$F_p = \frac{4}{3} \pi r_s^3 \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1)$$

式中, r_s 为煤粉颗粒的半径; $\partial p / \partial x$ 为压力梯度,其方向与煤粉颗粒运动方向一致。

(2)运动阻力 F_d 。由于地层液有一定黏度,颗粒在地层液中运动时受到运动阻力为

$$F_d = \frac{1}{2} C_D \rho_l |v_1 - v_s| (v_1 - v_s) S \quad (2)$$

式中, ρ_l 为液体的密度; v_1 为地层液的流速; v_s 为煤粉颗粒运动速度; S 为煤粉颗粒迎流面积; C_D 为阻力系数。

煤粉颗粒的阻力系数与颗粒形态以及流体流态有关^[15]。

层流 ($0 < Re < 1$):

$$C_D = \frac{24\mu}{d_H v \rho_l};$$

过渡流 ($1 < Re < 1000$):

$$C_D = 30 \left(\frac{d_H v \rho_l}{\mu} \right)^{-0.625};$$

紊流 ($1000 < Re < 100000$):

$$C_D = 0.44.$$

式中, d_H 为等效产气通道直径; Re 为雷诺数; μ 为流体黏度; v 为流体流速。

(3)视质量力 F_m 。煤粉颗粒在相对于地层流体加速运动时,其周围地层液速度也随着煤粉颗粒速度增大而增大;使煤粉运动的力同时增加了煤粉颗粒及液流的动能,该力称为视质量力 F_m ,表达式为

$$F_m = K_m = \frac{2}{3} \pi r_s^3 \rho_{ml} \frac{d}{dt} (v_1 - v_s) \quad (3)$$

其中

$$K_m = 1.05 - \frac{0.066}{A_c^2 + 0.12}, \quad A_c = \frac{|v_1 - v_s|^2}{\left[2r_s \frac{d}{dt} (v_1 - v_s) \right]}$$

式中, ρ_{ml} 为煤粉颗粒在流体中的视密度; K_m 为视质量力系数,其值可由 Odar 经验公式^[16]得到。

(4)巴西特力 (Basset 力) F_b 。黏性流体内煤粉颗粒做非匀速运动时,煤粉表面的一部分流体随煤粉流动。由于惯性,当煤粉加速或减速时,这部分流体有一定的滞后;煤粉所受巴西特力是时间的函数,也与煤粉加速过程相关,可表示为

$$F_b = K_B \sqrt{\pi \mu \rho_{ml}^2} \int_{t_{s0}}^{t_s} \frac{1}{\sqrt{t_s - \tau}} \left[\frac{d}{dt} (v_1 - v_s) \right] d\tau \quad (4)$$

式中, t_{s0} 为煤粉初始加速时刻。

K_B 值可由 Odar 经验公式^[16]得到,

$$K_B = 2.88 + \frac{3.12}{(A_c + 1)^3}, \quad \text{取 } K_B = 0.6.$$

(5)马格努斯力 (Magnus 力) F_m 。煤粉颗粒受

到一个剪切转矩作用发生旋转,是地层液在孔隙中流动存在压力梯度和速度梯度以及壁面粗糙产生的涡旋引起的。由于其旋转带动球边缘流体运动,使球两侧流体速度不同而产生压力差;该压力差对球形颗粒产生一个垂直于流体方向的力称为马格努斯力^[16],其关系式为

$$F_{ml} = \pi r_s^3 \rho_1 \omega (v_1 - v_s) \tag{5}$$

(6) 萨夫曼力(Saffman力) F_{sl} 。煤粉颗粒在有速度梯度流场中运动时,受到由颗粒旋转所产生的升力作用,该作用力称为萨夫曼力,其计算式为

$$F_{sl} = 6.44 (\mu \rho_1)^{1/2} r_s^2 (v_1 - v_s) \left| \frac{dv_1}{dx} \right|^{0.5} \tag{6}$$

(7) 升力 F_s 。升力 F_s 的表达式为

$$F_s = \frac{1}{2} \pi r_s^2 \rho_1 C_L (v_1 - v_s)^2 \tag{7}$$

式中, C_L 为升力系数,若煤粉为球形颗粒则其升力系数 $C_L = 0$ 。在煤粉颗粒群中考虑各煤粉颗粒的随机性,其所受升力互相抵消,因此两相流中通常不考虑其影响。

1.2 产气通道内煤粉颗粒悬浮条件

在产气通道内裂缝上下壁之间距离很小,煤粉颗粒由于自身重力很容易就沉积到裂缝下壁,故垂直方向达到力平衡煤粉颗粒才能悬浮,即

$$F_{ml} + F_{sl} + F_s + F_G = 0 \tag{8}$$

对于球形颗粒升力为0,将各个力带入式(8)可得

$$\pi r_s^3 \rho_1 \omega (v_{cf} - v_s) + 6.44 (\mu \rho_1)^{0.5} r_s^2 (v_{cf} - v_s) \left| \frac{dv_{cf}}{dx} \right|^{0.5} - \frac{4}{3} \pi r_s^3 (\rho_s - \rho_1) g = 0 \tag{9}$$

其中,颗粒悬浮临界速度(v_{cf})为

$$v_{cf} = v_s + \frac{4 \pi r_s (\rho_s - \rho_1) g}{3 \pi r_s \rho_1 \omega + 19.32 (\mu \rho_1)^{0.5} \left| \frac{dv_{cf}}{dx} \right|^{0.5}} \tag{10}$$

式中, ρ_s 为煤粉密度。

设速度梯度为常数,即 $dv_{cf}/dx = C$,则可得流体的临界速度为

$$v_{cf} = v_s + \frac{4 \pi r_s (\rho_s - \rho_1)}{3 \pi r_s \rho_1 \omega + 19.32 (C \mu \rho_1)^{0.5}}$$

对于刚启动的煤粉颗粒, $v_s = 0$,故初始启动煤粉悬浮所需地层水的临界流速为

$$v_{cf} = \frac{4 \pi r_s (\rho_s - \rho_1)}{3 \pi r_s \rho_1 \omega + 19.32 (C \mu \rho_1)^{0.5}}$$

对于定流量生产的井,假设渗流裂缝截面积一定,则液体流速为常数,即 $dv_{cf}/dx = 0$,萨夫曼力为

0,流体的临界速度为

$$v_{cf} = \frac{4(\rho_s - \rho_1)}{3\rho_1\omega}$$

1.3 不同形状煤粉颗粒的悬浮临界流速确定

考虑煤粉颗粒不规则性对其进行修正,可用等体积法计算等效直径^[3],由于不规则颗粒所受升力不为0,故计算悬浮状态力平衡时须考虑升力。达到悬浮状态所满足的力平衡方程为

$$\pi r_s^3 \rho_1 \omega (v_{cf} - v_s) + 6.44 (\mu \rho_1)^{0.5} r_s^2 (v_{cf} - v_s) \left| \frac{dv_{cf}}{dx} \right|^{0.5} + \frac{1}{2} \pi r_s^2 \rho_1 C_L (v_{cf} - v_s)^2 - \frac{4}{3} \pi r_s^3 (\rho_s - \rho_1) = 0 \tag{11}$$

令

$$A = 0.5 \pi r_s^2 \rho_1 C_L,$$

$$B = \pi r_s^3 \rho_1 \omega + 6.44 (\mu \rho_1)^{0.5} r_s^2 \left| dv_{cf}/dx \right|^{0.5},$$

$$E = 4 \pi r_s^3 (\rho_s - \rho_1) / 3.$$

则式(11)可以表示为

$$A(v_{cf} - v_s)^2 + B(v_{cf} - v_s) - E = 0.$$

解方程可得悬浮临界速度,取其正解,则不规则煤粉临界悬浮速度为

$$v_{cf} = v_s - (\pi r_s \rho_1 \omega + 6.44 (\mu \rho_1)^{0.5} \left| dv_{cf}/dx \right|^{0.5}) / \pi \rho_1 C_L + \sqrt{[\pi r_s \rho_1 \omega + 6.44 (\mu \rho_1)^{0.5} \left| dv_{cf}/dx \right|^{0.5}]^2 + 8 \pi^2 r_s \rho_1 C_L (\rho_s - \rho_1) / 3} / \pi \rho_1 C_L.$$

假设速度梯度为常数,即 $dv_{cf}/dx = C$,等体积球直径为 d' ,刚启动煤粉颗粒 $v_s = 0$,则可得流体的临界速度为

$$v_{cf} = \frac{\sqrt{[0.5 \pi d' \rho_1 \omega + 6.44 (C \mu \rho_1)^{0.5}]^2 + 4 \pi^2 d' \rho_1 C_L (\rho_s - \rho_1) / 3}}{\pi \rho_1 C_L} + \frac{0.5 \pi d' \rho_1 \omega + 6.44 (C \mu \rho_1)^{0.5}}{\pi \rho_1 C_L}$$

1.4 煤粉颗粒群悬浮运移地层液临界速度

当地层液中煤粉颗粒含量较多时,煤粉颗粒间的摩擦和碰撞对其悬浮运移有一定影响,由于粒径不同的煤粉颗粒所需的悬浮动力不同产生悬浮分级,需要在煤储层中实际地层液混合流体中煤粉含量和煤粉颗粒群的悬浮分级。

考虑煤粉颗粒占据产气通道一定截面使产气通道内实际的流通截面积减少,煤粉颗粒周围地层液流速增加,使地层液流体对煤粉颗粒产生附加流体动力;依据产气通道分级运移模型可将煤粉颗粒含量和悬浮分级对煤粉颗粒悬浮的影响认为是产气通道截面空间尺寸的变化对其产生的影响;对煤粉颗粒悬浮运移的临界速度进行修正可得受煤粉含量和悬浮分级影响的临界速度为

$$v'_{cf} = v_{cf} [1 - (d'_s/D)^m]. \quad (12)$$

式中, D 为产气通道等效截面直径; d'_s/D 为煤粉颗粒占据空间系数; m 为影响指数, 依据前人研究结果一般 $m=2$ 。

1.5 悬浮煤粉排出条件

在裂隙内, 脱落后的煤粉受到水动力作用, 被水动力携带至井筒内, 当液体速度小于煤粉颗粒悬浮临界速度时, 煤粉颗粒一边随着液体向井筒运移, 一边向下沉积到裂隙壁; 故由上述对流体中煤粉受力分析可知, 当液体速度大于煤粉颗粒临界悬浮速度时, 颗粒在液体中处于悬浮状态, 并随液体流向井筒, 煤粉颗粒能排出。

煤粉排到井筒须满足:

$$\begin{cases} F_{m1} + F_{s1} + F_s + F_G = 0, \\ F_b + F_p + F_m > F_d. \end{cases} \quad (13)$$

假设煤粉颗粒加速瞬间完成, 不考虑煤粉加速过程, 则煤粉颗粒所受巴西特力可以忽略。煤粉运移条件为

$$F_p + F_m > F_d. \quad (14)$$

对于刚启动煤粉颗粒, $v_s = 0$, 式(14)可简化为

$$\frac{4}{3} \pi r_s^2 \frac{\partial p}{\partial x} + K_m \frac{2}{3} \pi r_s^3 \rho_{ml} \frac{dv_1}{dt} - \frac{1}{2} C_D \rho_1 v_1^2 S > 0. \quad (15)$$

2 液流携带煤粉颗粒运移模型

液流携带煤粉在产气通道内的运移可等效为含煤粉地层液固液两相流在水平圆管中的运动。对煤粉和地层液组成固液两相流动采用 Eulerian 模型, 满足基本质量守恒方程和动量守恒方程。

煤粉颗粒固相的连续性方程可表示为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s v_s) = 0. \quad (16)$$

式中, α_s 为煤粉颗粒固相体积分数。

地层液相连续性方程可表示为

$$\frac{\partial}{\partial t} ((1-\alpha_s) \rho_1) + \nabla \cdot ((1-\alpha_s) \rho_1 v_1) = 0. \quad (17)$$

煤粉颗粒固相动量守恒方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s v_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s v_s v_s) = & -\alpha_s \nabla p - \nabla F_s + \nabla \tau_s + \\ & \beta_{ls} (v_1 - v_s) + \alpha_s \rho_s g. \end{aligned} \quad (18)$$

式中, ∇p 为产气通道两端压降; F_s 为由于煤粉颗粒间碰撞产生的附加应力; β_{ls} 为液体对煤粉的拖拽系数; τ_s 为煤粉颗粒的剪切应力。

地层液相动量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} ((1-\alpha_s) \rho_1 v_1) + \nabla \cdot ((1-\alpha_s) \rho_1 v_1 v_1) =$$

$$-(1-\alpha_s) \nabla p + \nabla \tau_1 + \beta_{ls} (v_s - v_1) + \alpha_1 \rho_1 g. \quad (19)$$

式中, τ_1 为地层液的剪切应力。

煤粉颗粒和地层液间的拖拽力采用水平圆管中颗粒群拖拽力经验公式^[75], 其拖拽系数可表示为

$$\beta_{ls} = N_s C_D \rho_1 \frac{\pi d_s^2 |v_1 - v_s|}{4} \left(1 + \frac{d_s}{2\sqrt{k_s}} + \frac{d_s^2}{12k_s} \right). \quad (20)$$

其中

$$\begin{aligned} N_s &= \frac{6\alpha_s}{\pi d_s^3}, \quad C_D = \frac{4gd_s(\rho_s - \rho_1)}{3v_{s\infty}^2 \rho_1}, \\ k_s &= \frac{d_s^2}{72} \left(3 + \frac{4}{\alpha_s} - 3 \left(\frac{8}{\alpha_s} - 3 \right)^{0.5} \right). \end{aligned}$$

式中, d_s 为煤粉颗粒的粒径; $v_{s\infty}$ 为煤粉颗粒沉降末速度, 方向向下。

将单相流的标准 $k-\varepsilon$ 模型扩展到两相流湍流模型, 将单相流的压力速度耦合 SIMPLEC 算法扩展至两相流动中可对产气通道内固液两相流进行数值分析, 通过连续性方程、两相动量方程以及 k 方程和 ε 方程, 得到封闭方程组。

产气通道入口边界为速度入口, 入口速度范围依据煤粉颗粒群悬浮运移地层液临界速度计算结果以及目前现场排采条件下地层液流速设定。

3 实例计算与结果分析

以某煤层气井进行分析, 其参数如下: 5#煤层厚度 10.4 m, 储层压力 4.2 MPa, 煤层渗透率 $2.59 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 裂缝开度 3.4 m, 裂缝截面宽度 0.06 m, 裂缝半长 50 m, 井底流压 1.1 MPa, 煤层气黏度 0.017 mPa·s, 井液黏度 0.79 mPa·s, 煤层气相对密度 0.59, 井液密度 1016 kg/m³, 煤密度 1400 kg/m³; 其悬浮运移的临界速度和煤粉粒径的关系如图 2 所示。

煤层气井远井产气通道可等效为水平圆管模型, 煤粉在远井产气通道内运移可作为含煤粉地层液固液两相流在水平圆管中的运动研究, 采用 KNG $k-\varepsilon$ 湍流模型, 建立模型并划分网格, 产气通道入口边界设为速度入口, 其出口边界设定为自由流出边界, 产气通道壁面处采用无滑移边界条件, 煤粉颗粒均匀分布在产气通道入口截面上。用 Fluent 模拟煤粉在远井产气通道运移, 产气通道等效直径为 20 mm, 地层液中含煤粉颗粒粒径为 0.1 mm, 初始入口处地层液中含煤粉体积分数为 0.2, 不同入口速度下产气通道截面煤粉颗粒体积分数分布如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 产气通道上部煤粉颗粒体积分数小于初始体积分数 0.2, 产气通道中部保持

原体积分数,下部体积分数大于0.2,说明煤粉在产气通道内开始沉积;中部体积分数0.2的范围越大,煤粉在产气通道内均匀分布的区域越大。地层液速度越大,煤粉颗粒在产气通道截面分布越均匀,当地层液流速减少时产气通道上部含煤粉颗粒体积分数减少;底部含煤粉颗粒体积分数增加,地层液速度越小,产气通道底部含煤粉颗粒体积分数越高;说明当地层液速度减小时煤粉开始沉积。维持地层液的流速及使用定量排采的方式可以减少煤粉的沉积。

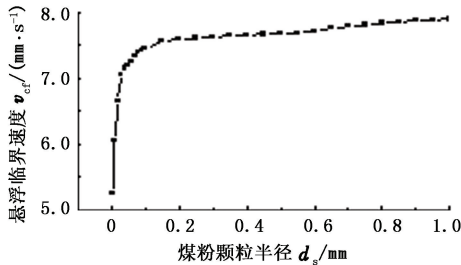


图2 悬浮临界流速与煤粉粒径的关系

Fig. 2 Relationship between suspension critical flow velocity and pulverized coal grain diameter

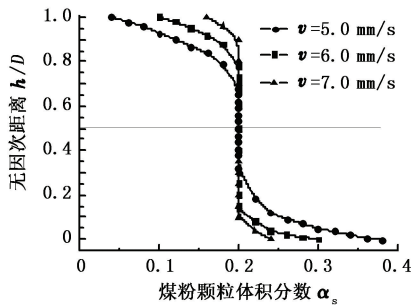


图3 不同入口速度下截面煤粉颗粒体积分数分布

Fig. 3 Distribution of section pulverized coal grain volume fraction at different entrance velocity

图4为煤粉颗粒粒径不同时产气通道截面煤粉颗粒体积分数分布,在其他条件不变的情况下,煤粉颗粒粒径越小,煤粉颗粒在产气通道截面上分布越均匀,说明煤粉颗粒越大越不易被携带排出。

图5为地层液黏度不同时产气通道截面煤粉颗粒体积分数分布,携煤粉地层液黏度越大,煤粉颗粒在产气通道截面上分布越均匀,说明地层液黏度越大其携带煤粉颗粒的能力越强。在煤层气井排采过程中经历单相水流、气水两相流和单相气体流动阶段,各阶段中由于地层液是气液固三相混合物,其混合比例不同导致地层液黏度不同,在排采的过程中地层液携带煤粉的能力随产气量的变化而变化。

在其他条件相同时改变入口处初始含煤粉颗粒体积分数,产气通道截面上煤粉颗粒体积分数分布

如图6所示。从图6中可以看出,不同初始含煤粉颗粒体积分数下,截面煤粉颗粒体积分数分布曲线是一组平行曲线族。

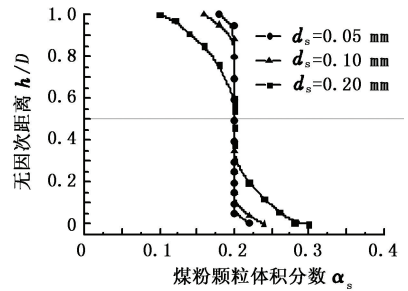


图4 不同颗粒粒径下截面煤粉颗粒体积分数分布
Fig. 4 Distribution of section pulverized coal grain volume fraction at different grain diameter

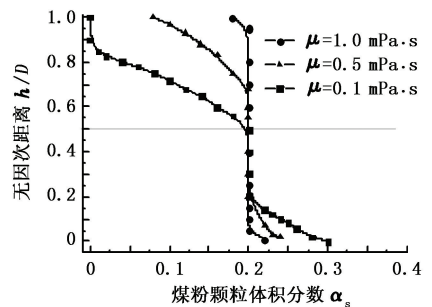


图5 不同地层液黏度下截面煤粉颗粒体积分数分布
Fig. 5 Distribution of section pulverized coal grain volume fraction at different formation fluid viscosity

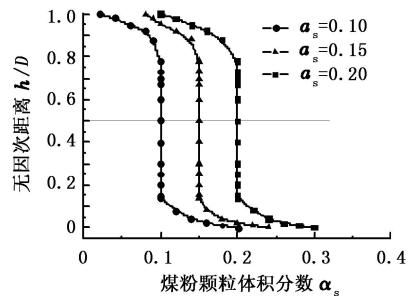


图6 不同初始值下截面煤粉颗粒体积分数分布
Fig. 6 Distribution of section pulverized coal grain volume fraction at different entrance grain volume fraction

4 结论

(1)煤粉颗粒粒径越大,使其悬浮需要的地层液临界流速越大;煤粉颗粒粒径越小,地层液流速和黏度越大,煤粉在产气通道截面上分布越均匀,其悬浮排出能力越强,煤粉较易被地层液携带排出。

(2)地层液速度越小,产气通道底部含煤粉颗粒体积分数越高,煤粉越易沉积。地层液流速的波动不利于煤粉的排出,进而影响煤层气井的产气量。

(3)煤层气井排采各阶段地层液中气液固三相混合比例不同,地层液黏度不同,地层液携带煤粉的能力不同,携带煤粉能力随产气量变化而变化。

(4)适度携煤粉受地层液参数和煤粉颗粒自身参数影响,合理控制地层液参数有利于煤粉适度排出。

参考文献:

- [1] 刘新福,綦耀光,胡爱梅,等.煤层气井气水两相流入动态关系研究[J].中国矿业大学学报,2011,40(4):561-565.
LIU Xinfu, QI Yaoguang, HU Aimei, et al. Inflow performance relationship in two-phase CBM wells [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011,40(4):561-565.
- [2] 张松航,汤达祯,唐书恒,等.鄂尔多斯盆地东缘煤层气储集与产出条件[J].煤炭学报,2009,34(10):1297-1304.
ZHANG Songhang, TANG Dazhen, TANG Shuheng, et al. Preservation and deliverability characteristics of coalbed methane in east margin of Ordos Basin [J]. Journal of China Coal Society, 2009,34(10):1297-1304.
- [3] 李明忠,陈会娟,张贤松,等.煤层气多分支水平井井筒压力及入流量分布规律[J].中国石油大学学报:自然科学版,2014,38(1):92-97.
LI Mingzhong, CHEN Huijuan, ZHANG Xiansong, et al. Wellbore pressure and inflow rate distribution of multilateral horizontal well for coalbed methane [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014,38(1):92-97.
- [4] 刘升贵,张新亮,袁文峰.煤层气井煤粉产出规律及排采管控实践[J].煤炭学报,2012,37(2):412-415.
LIU Shenggui, ZHANG Xinliang, YUAN Wenfeng. Regularity of coal powder production and concentration control method during CBM well drainage [J]. Journal of China Coal Society, 2012,37(2):412-415.
- [5] 刘冰,杜继芸,綦耀光,等.抽油机井杆管环空瞬态流场煤粉颗粒排出研究[J].中国石油大学学报:自然科学版,2014,38(1):117-123.
LIU Bing, DU Jiyun, QI Yaoguang, et al. Research on coal particle carrying out in unsteady flow field of rod pumped well annulus [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38 (1): 117-123.
- [6] 綦耀光,张芬娜,刘冰,等.煤层气井产气通道内煤粉运动特征分析[J].煤炭学报,2013,38(9):1627-1632.
QI Yaoguang, ZHANG Fenna, LIU Bing, et al. Calcula-

tion on discharge flow of pulverized coal in gas production channel for coalbed methane well [J]. Journal of China Coal Society, 2013,38(9):1627-1632.

- [7] 张芬娜,綦耀光,徐春成,等.煤粉对煤层气井产气通道的影响分析[J].中国矿业大学学报,2013,42(3):428-435.
ZHANG Fenna, QI Yaoguang, XU Chuncheng, et al. Analysis of the impact of gas production channel for coalbed methane well by pulverized coal [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42 (3): 428-435.
- [8] DENISE M E, CARL W S, ANDERSON S A, et al. Real-time monitoring of sand control completions [R]. SPE 134555, 2010.
- [9] SPURLOCK J W, DEMSKI D B. A new approach to the sand control problem: a multi-layer, wire-wrapped sand screen [R]. SPE 4014, 1972.
- [10] GUMPERTZ B. Screening effect of gravel on unconsolidated sands [J]. Trans AIME, 1960, 211 (6): 265-274.
- [11] GILLESPIE G, DEEM C K. Screen selection for sand control based on laboratory tests [R]. SPE 64398, 2000.
- [12] MONDAL S, SHARMA M M, CHANPURA R A, et al. Numerical simulations of screen performance in standalone screen applications for sand control [R]. SPE 134326, 2010.
- [13] 何冠军.疏松砂岩常规稠油油藏适度出砂提高产能基础研究[D].成都:西南石油大学石油工程学院,2005.
HE Guanjun. The basic research of unconsolidated sand reservoir producing with limited sand to improve capacity [D]. Chengdu: College of Petroleum Engineering in Southwest Petroleum University, 2005.
- [14] 周守为,孙福街,曾祥林,等.稠油油藏分支水平井适度出砂开发技术[J].石油勘探与开发,2008,35(5):630-635.
ZHOU Shouwei, SUN Fuxie, ZENG Xianglin, et al. Application of multilateral wells with limited sand production to heavy oil reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008,35(5):630-635.
- [15] 何保生,曹砚锋,曾祥林,等.海上稠油油田开发多枝导流适度出砂技术研究[J].中国海上油气,2013,25(6):82-87.
HE Baosheng, CAO Yanfeng, ZENG Xianglin, et al. Research on moderate sand production technology with multilateral well in offshore heavy oilfield exploitation [J]. China Offshore Oil and Gas, 2013,25(6):82-87.

- [16] 郑绍强. 疏松砂岩气藏多层合采气井出砂携砂产能研究[D]. 成都:西南石油大学石油工程学院,2006.
ZHENG Shaoqiang. The research of production for sanding of unconsolidated sand reservoir [D]. Chengdu: College of Petroleum Engineering in Southwest Petroleum University, 2006.
- [17] 董长银, 栾万里, 周生田, 等. 牛顿流体中的固体颗粒运动模型分析及应用[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2007,31(5):55-60.
- DONG Changyin, LUAN Wanli, ZHOU Shengtian, et al. Analysis and application of model for solid particle movement in Newton fluid[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science),2007, 31(5): 55-60.
- [18] 郭烈锦. 两相与多相流动力学[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2002.

(编辑 李志芬)