

考虑煤层割理的多分支水平井煤层气开发数值模拟研究

徐加祥¹, 赵 洋², 董丹丹¹, 王玫珠², 杨焦生², 田丰华³

(1. 辽宁石油化工大学 石油天然气工程学院, 辽宁 抚顺 113001; 2. 中国石油勘探开发研究院 非常规研究所, 北京 100083; 3. 中石油煤层气有限责任公司勘探开发建设分公司, 陕西 西安 710082)

摘要: 开发煤层气的多分支水平井形态多样且在对开发过程中割理的作用认识不清, 有必要探究煤层中离散割理分布特征和多分支水平井形态对气井产能的影响。根据煤层中面割理和端割理的发育情况和正交特性, 采用随机方法在煤层中分别构建了低密度、中密度和高密度的离散割理系统, 并与等长型、纺锤型、交错型和哑铃型4种不同形态的多分支水平井结合, 构建出多分支水平井开发煤层气的物理模型。在考虑开发过程中煤层有效应力变化和基质收缩效应的条件下建立了煤层基质和割理系统的应力敏感模型, 并采用Langmuir定理计算煤层气的解吸附, 建立了一种可压缩煤层气在煤层基质-割理系统-多分支水平井耦合中流动的开发模型, 进而研究了多分支水平井形态和割理密度对煤层气开发的影响。结果表明: 煤层中的离散割理可以极大地增加多分支水平井在短时间内对煤层的动用范围, 但是仅限于与多分支水平井直接联通的割理及周围基质区域, 未与多分支水平井联通的部分则需要较长的开发时间, 这也是气井在较短的时间获得峰值产量并迅速减产的重要原因; 等长型多分支水平井控制的储层范围最大, 交错型、哑铃型和纺锤型的控制范围依次减小; 在煤层中割理密度相同时, 等长型多分支水平井的煤层气峰值日产量和20 a内的累积产量均高于其他3种类型的多分支水平井, 可以取得更好的开发效果; 增大多分支水平井主次井筒的夹角, 等长型多分支水平井开发效果更好, 同时纺锤型分支水平井的峰值日产量提高显著; 交错型和哑铃型多分支水平井的峰值日产量对分支数量更加敏感, 纺锤型多分支水平井的分支数量应不少于8条, 而哑铃型多分支井的分支数量不多于6条。

关键词: 煤层气; 多分支水平井; 煤层割理; 应力敏感; 产能分析

中图分类号: P618.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)07-3167-11

Numerical study on the development of coalbed methane in multilateral horizontal wells considering coal seam cleats

XU Jiaxiang¹, ZHAO Yang², DONG Dandan¹, WANG Meizhu², YANG Jiaosheng², TIAN Fenghua³

(1. College of Petroleum Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun 113001, China; 2. Unconventional Research Department, Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China; 3. Exploration, Development and Construction Branch of PetroChina Coalbed Methane Co., Ltd., Xi'an 710082, China)

Abstract: There are various forms of multilateral horizontal wells for developing coalbed methane, and the role of cleats in the development process is unclear. It is necessary to investigate the impact of the discrete cleat distribution in coal

收稿日期: 2023-08-03 修回日期: 2023-11-14 责任编辑: 韩晋平 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0937

基金项目: 中石油前瞻性基础性技术攻关资助项目(2121DJ2301); 辽宁省自然科学基金计划资助项目(博士科研启动计划)(2023-BS-188)

作者简介: 徐加祥(1991—), 男, 山东泰安人, 讲师, 博士。E-mail: shigong101121@163.com

通讯作者: 董丹丹(2000—), 女, 江苏盐城人, 硕士研究生。E-mail: pd_1810@163.com

引用格式: 徐加祥, 赵洋, 董丹丹, 等. 考虑煤层割理的多分支水平井煤层气开发数值模拟研究[J]. 煤炭学报, 2024, 49(7): 3167-3177.

XU Jiaxiang, ZHAO Yang, DONG Dandan, et al. Numerical study on the development of coalbed methane in multilateral horizontal wells considering coal seam cleats[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(7): 3167-3177.



移动阅读

seams and the multilateral horizontal well configuration on gas well productivity. Based on the density and orthogonal characteristics of face and butt cleats in coal seams, the low density, medium density, and high density discrete cleat systems in coal seams are constructed using random methods. Combined with four different forms of multilateral horizontal wells, namely equal-length type, spindle type, staggered type, and dumbbell type, a physical model for developing coal-bed methane using multilateral horizontal wells is constructed. The stress sensitive model of coal matrix and cleat system is established considering the effective stress change of coal seams and the matrix shrinkage effect in the development process. The desorption of coal-bed methane is calculated using Langmuir theorem, and a development model of compressible coal-bed methane flowing in the coupling of coal matrix, cleat system and multi branch horizontal wells is established. Furthermore, the influence of the cleat density and the configuration of multilateral horizontal wells on the development of coal-bed methane is studied. The results show that the discrete cleats in coal seams can greatly increase the drainage area of multilateral horizontal wells in a short period of development time, but are only limited to the cleats directly connected to multilateral horizontal wells and surrounding matrix areas. The parts that are not connected to multilateral horizontal wells require longer development time, which is also an important reason for gas wells to achieve peak production in a short period of time and quickly reduce production. The drainage area controlled by equal-length multilateral horizontal wells is the largest, while the drainage area of staggered type, dumbbell type, and spindle type decreases sequentially. When the cleat density is the same in the coal seams, the daily peak production and cumulative production within 20 years of the equal-length multilateral horizontal wells are higher than those of the other three types of multilateral horizontal wells, which can achieve better development results. By increasing the angle between the main and secondary wellbore of multilateral horizontal wells, the development effect of equal-length multilateral horizontal wells becomes much better, and the peak daily production of spindle multilateral horizontal wells is significantly improved. The peak daily production of staggered and dumbbell multilateral horizontal wells is more sensitive to the number of branches. The number of branches in spindle multilateral horizontal wells should not be less than eight, while the number of branches in the dumbbell multilateral wells should not be more than six.

Key words: coalbed methane; multilateral horizontal well; coal seam cleat; stress sensitivity; productivity analysis

在我国提出“双碳”目标的背景下,清洁安全的煤层气在保障国家能源战略安全方面具有重大的潜在优势^[1-3]。由于煤岩储层压力低且孔渗条件差,因此煤层气的开发多采用水力压裂、多分支水平井等手段^[4-5]。探究多分支水平井开发煤层气的物理过程并掌握其产能的主要影响因素对煤层气稳产增产具有重要意义。

在多分支开发煤层气的产能模拟方面,国内外学者开展了大量的研究工作。对于顶底封闭的煤层气藏,张辉等^[6]利用镜像反映和压力叠加原理,建立了多分支井压力分布方程。姜婷婷等^[7]建立了一种预测羽状水平井煤层气产能的模型,该模型考虑了主井筒变质量流和储层内气-水两相流。刘展等^[8]以鄂尔多斯盆地三交区块的煤层气开发为例,在对比区块地质特征和生产特征的基础上,分析了多分支水平井产能的主控影响因素。张福东等^[9]按照煤岩中煤层气解吸、扩散和渗流3个过程,建立了适用于羽状多分支水平井开发煤层气的非平衡拟稳态的产能模型。广泛发育的割理系统是煤层相较于其他类型的储层最为显著的特征之一^[10-12],也是影响煤层气开发效果的重要因素。姜瑞忠等^[13]建立了煤层气藏多分支水平井非

稳态产能数学模型,该模型考虑了割理系统应力敏感性和基质系统非稳态扩散。王保辉等^[14]建立了考虑煤岩面割理和端割理渗流性质正交各向异性的产能数学模型。GU等^[15]、CHEN等^[16]以及AN等^[17]在针对不同形态多分支水平井或井网的煤层气产能模拟研究中,均将割理系统视为规则网格,并以渗透率的各向异性表征其对产能的影响。由此可见,多数关于煤层气产能分析的模型没有考虑割理系统的影响或将割理系统以渗透率各向异性的形式简单地纳入双重介质模型,无法准确反映煤层中割理的正交特征和离散性对煤层气开发过程的影响。

为此,笔者利用随机函数构建了离散的正交割理模型,在考虑煤层基质应力敏感和割理系统不同方向应力敏感的基础上,建立了煤层基质-割理-水平井中煤层气解吸、扩散和渗流模型,探究了割理分布特征以及多分支水平井形态对其产能的影响。

1 煤层割理模型

根据割理系统中面割理和端割理彼此正交的特性,本研究利用相互垂直的2个平面表征割理。在割

理生成过程中,首先在预先设定的煤层范围内利用随机函数确定面割理位置,并在该位置构建长度和高度在一定范围内随机确定的平面作为面割理,再根据相邻面割理之间左侧面割理的展布范围随机确定端割理位置,并将相邻2个面割理之间的距离作为上限,

随机确定端割理的长度。割理的密度由整个煤层范围内割理总数决定,综合考虑煤层与割理尺度差异以及数值模拟计算成本,低、中、高3种割理密度的煤层模型中整个煤层内所构建的割理总数分别为2 084条、2 877条和3 754条,如图1所示。

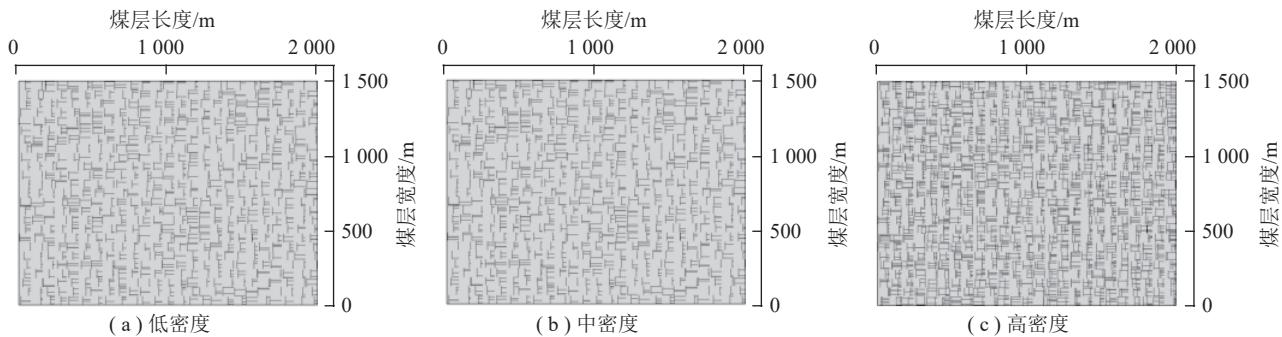


图1 不同割理密度的煤层割理模型

Fig.1 Coal seam cleat model with different cleat densities

为了探究多分支水平井形态对煤层气开发的影响,笔者设计了4种不同分支特征的水平井,分别是等长型、纺锤型、交错型和哑铃型,如图2所示。该4种多分支水平井中的分支井总长度相等,以规避其他因素对单一形态特征敏感性的分析。多分支水平具体的形态参数见表1,其中 α 为主井筒与分支井筒之间的夹角, L_i 为对应编号*i*的分支井筒长度。

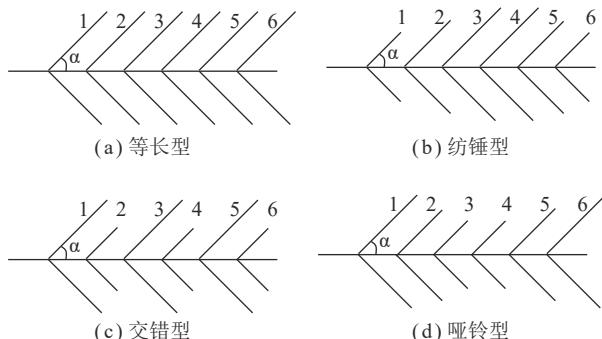


图2 不同形态的多分支水平井示意

Fig.2 Multilateral horizontal wells of different forms

表1 模拟中多分支水平井形态参数

Table 1 Morphological parameters of multilateral horizontal wells in simulation

参数	数值
主水平井长度/m	1 000
分支井与主井夹角 α (°)	20/40/60/80
井筒内半径/cm	6.213
等长型	$L_1=L_2=L_3=L_4=L_5=L_6=400$
纺锤型	$L_1=L_6=300$ 、 $L_2=L_5=400$ 、 $L_3=L_4=500$
交错型	$L_1=L_3=L_5=500$ 、 $L_2=L_4=L_6=300$
哑铃型	$L_1=L_6=500$ 、 $L_2=L_5=400$ 、 $L_3=L_4=300$

将上述构建的正交割理模型和多分支水平井模型结合,即可得到带割理煤层中多分支水平井开发概念模型。以等长型多分支井为例,对井位布置进行说明,如图3所示。整个煤层长度 L_m 为2 000 m,宽度 W_m 为1 500 m,厚度 H_m 为10 m。多分支井水平段位于煤层垂向的中间,其端部到2个边界的距离 L_x 和 L_y 均为500 m。

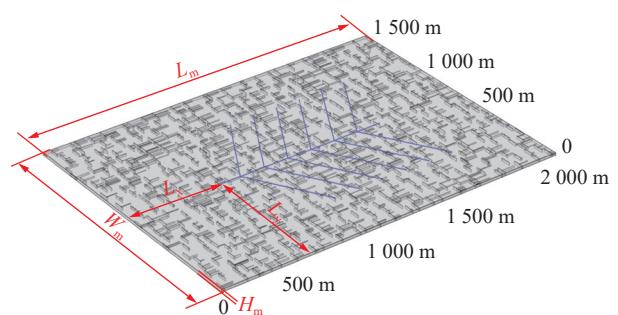


图3 带离散割理系统的煤层中多分支水平井几何模型

Fig.3 Geometric model of multilateral horizontal well in coal seam with discrete cleat system

2 煤层气产能分析模型

煤层气在煤层中主要有游离态和吸附态2种赋存形式,在开发过程中不仅涉及到游离气的运动,还包括吸附气的解吸扩散,通过Langmuir定理将吸附态气体转化为游离态标准,然后进行计算。那么,煤层气的渗流连续性方程^[18-19]可表示为

$$\frac{\partial \left(\rho_g \phi + \rho_{ga} \rho_c \frac{V_L p}{p_L + p} \right)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \mathbf{u}_g) = Q_{g1} \quad (1)$$

式中, ρ_g 为气体密度, kg/m^3 ; ϕ 为煤层孔隙度; ρ_{ga} 为标准大气压下的气体密度, kg/m^3 ; ρ_c 为煤层密度, kg/m^3 ; V_L 为 Langmuir 体积常数, m^3/kg ; p_L 为 Langmuir 压力常数, MPa; p 为煤层气藏压力, MPa; \mathbf{u}_{g1} 为基质中气体渗流速度, m/s ; Q_{g1} 为基质中质量源汇项, kg/s ; t 为时间, s。

考虑到煤层气的可压缩性, 煤层气压力和密度之间的关系可表示为

$$\rho_g = \frac{M_g}{RT} p \quad (2)$$

式中, M_g 为气体的摩尔质量, g/mol ; R 为气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为气体温度, K。

忽略重力的影响, 煤层气运动方程表示为

$$\mathbf{u}_{g1} = -\frac{k}{\mu_g} \nabla p \quad (3)$$

式中, k 为煤层渗透率, 10^{-15} m^2 ; μ_g 为气体动力黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

结合式(1)~(3), 可以得到气体的质量守恒方程为

$$\left(\phi + \frac{\rho_c p_a V_L p_L}{p + p_L^2} \right) \frac{\partial p}{\partial t} + p \frac{\partial \phi}{\partial t} - \nabla \left(\frac{k}{\mu_g} \nabla p \right) = Q_{g1} \quad (4)$$

式中, p_a 为标准大气压, MPa。

在考虑煤层有效应力和基质收缩效应的条件下^[20~21], 煤层孔隙度和渗透率的应力敏感模型分别表示为

$$\phi = \phi_0 + c_m (p - p_0) + \varepsilon_l \left(\frac{K}{M} - 1 \right) \left(\frac{bp}{1+bp} - \frac{bp_0}{1+bp_0} \right) \quad (5)$$

$$k = k_0 \left(\frac{\phi}{\phi_0} \right)^3 \quad (6)$$

$$c_m = \frac{1}{M} - \left(\frac{K}{M} + f - 1 \right) \gamma, \quad \frac{K}{M} = \frac{1}{3} \left(\frac{1+v}{1-v} \right), \quad b = \frac{1}{p_L}$$

式中, ϕ_0 为煤层原始孔隙度, 无量纲; p_0 为煤层原始压力, MPa; ε_l 为 Langmuir 体积应变常数; K 为煤岩体积模量, MPa; M 为煤岩单轴模量, MPa; f 为经验常数, 取 0~1; γ 为煤颗粒压缩系数, MPa^{-1} ; k_0 为煤储层原始渗透率, 10^{-15} m^2 ; v 为煤层泊松比。

将割理视为裂缝, 那么煤层气在割理系统中渗流的连续性方程可以表示为

$$d_f \frac{\partial (\phi_f \rho_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (d_f \rho_g \mathbf{u}_{g2}) = d_f Q_{g2} \quad (7)$$

式中, d_f 为割理宽度, mm; ϕ_f 为割理孔隙度, 无量纲; \mathbf{u}_{g2} 为割理中气体渗流速度, m/s ; Q_{g2} 为割理中质量源

汇项, kg/s 。

煤层气在割理系统中的运动方程为

$$\mathbf{u}_{g2} = -\frac{k_f}{\mu_g} \nabla p \quad (8)$$

式中, k_f 为煤层割理渗透率, 10^{-15} m^2 。

煤层中割理系统的应力敏感性^[22~23]可以表示为

$$k_f = k_{f0} e^{-\beta \sigma} \quad (9)$$

式中, k_{f0} 为煤层割理初始渗透率, 10^{-15} m^2 ; σ 为由初始状态到某测试点的煤层有效应力, MPa; β 为割理应力敏感系数, MPa^{-1} 。

煤层气在多分支水平井中的流动过程由 Navier-Stokes 方程进行计算, 即

$$\frac{\partial \rho_g \mathbf{u}_{g3}}{\partial t} + \rho_g (\mathbf{u}_{g3} \cdot \nabla) \mathbf{u}_{g3} = \nabla \cdot \left[-p + \mu_g (\nabla \mathbf{u}_{g3} + (\nabla \mathbf{u}_{g3})^T) \right] \quad (10)$$

式中, \mathbf{u}_{g3} 为井筒中气体流动速度, m/s 。

采用上述模型进行压后煤层气产能模拟过程中, 通过对以往数值模拟和典型区块的调研^[24~26], 设置所需模拟参数见表 2。

表 2 数值模拟参数
Table 2 Parameters in simulation

参数	取值
煤层埋深/m	785
平均煤岩密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 420
煤层初始孔隙度	0.1
煤层初始渗透率/ 10^{-15} m^2	0.02
煤层割理初始渗透率/ 10^{-15} m^2	0.15
煤层初始压力/MPa	8
标准大气压下的煤层气密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	0.716
煤层密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 500
Langmuir 体积常数/($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	35
Langmuir 压力常数/MPa	2.5
Langmuir 体积应变常数	0.03
煤层气的摩尔质量/($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$)	16
煤层气动力黏度/($\mu\text{Pa} \cdot \text{s}$)	16.8
煤岩体积模量/MPa	1 000
煤岩泊松比	0.25
割理应力敏感系数	0.48
Biot 系数	0.91

为了验证本模型的准确性, 将数值模拟煤层气日产量与沁水煤层气田 FV-4 井的实际产量作对比, 如图 4 所示。该煤层埋深 500 m, 层厚 7 m, 含气量 $21 \text{ m}^3/\text{t}$, 孔隙度 4%, 渗透率 $0.5 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, 采用多分支水平井

开发。通过对比可以看出, 数值模拟结果与气井实际产量基本相符, 平均误差为 3.74%, 精度符合工程设计的要求。

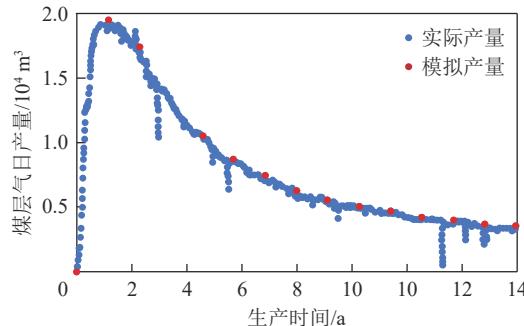


图 4 模型验证

Fig.4 Model validation

3 模拟结果

3.1 煤层压力变化

以煤层发育中密度割理为例, 展示 4 种类型的多分支井开发煤层气过程中储层压力的变化, 以分析多分支水平井对煤层的控制情况, 如图 5 所示。由图 5 可以看出, 多分支水平井可以在短时间(1 a)内控制井周围的区域, 但是后续控制区域的扩展需要较长时间。开发时间短则 5 a(图 5(b2), 纺锤型多分支水平井), 长则 20 a(图 5(a3), 等长型多分支水平井), 各分支水平井筒周围区域的压力才能逐渐稳定。煤层中割理系统的存在可以极大地增加多分支水平井的控制范围, 但是短时间内能够动用的煤层仅限于与多分支水平井直接联通的割理及周围基质区域, 未联通的割理

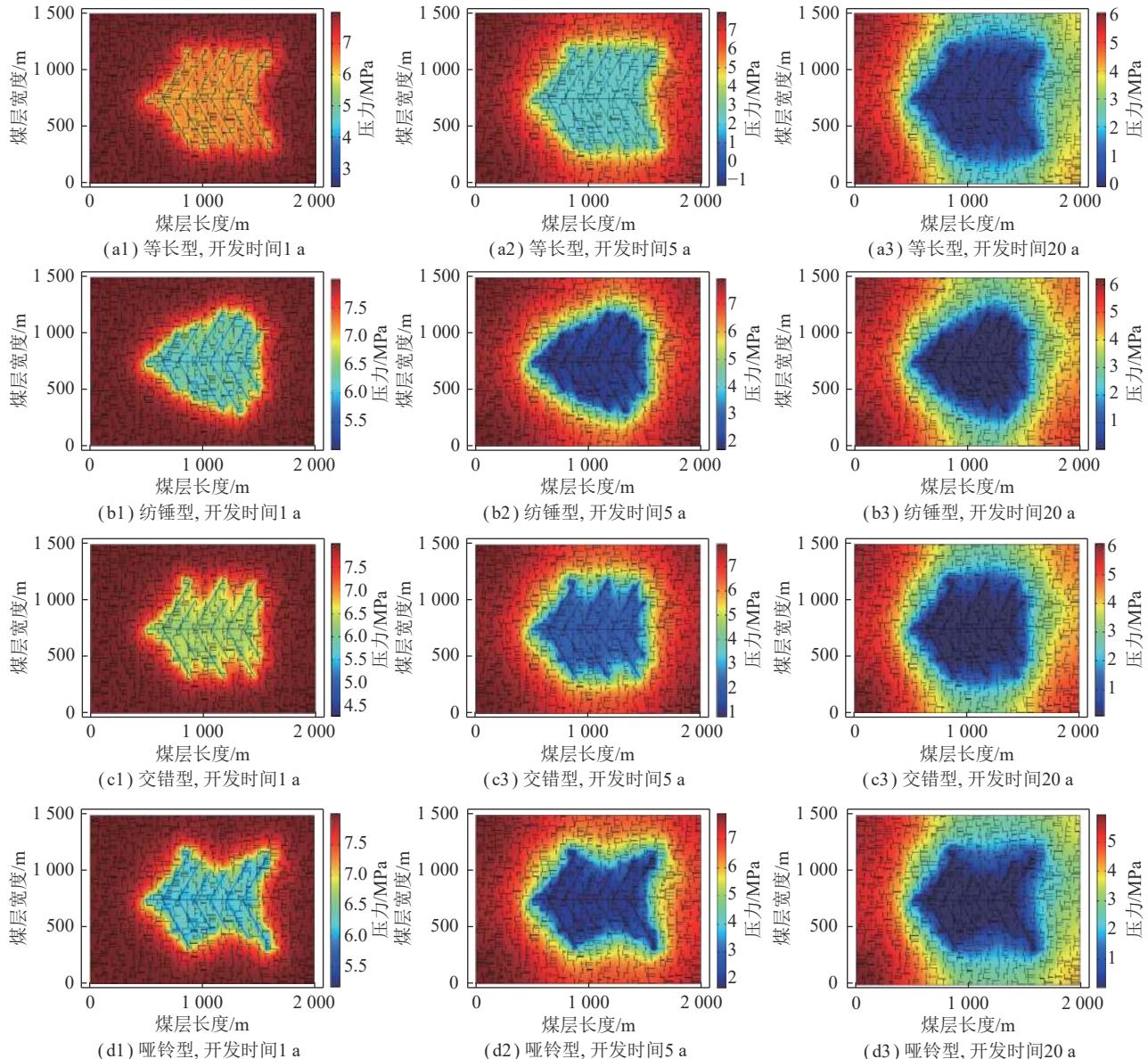


图 5 不同分支水平井开发煤层气时煤层压力变化

Fig.5 Pressure variation in coal seam when coalbed methane developed by different multilateral horizontal wells

部分的开发需要较长时间。在同样的煤层条件下,等长型多分支水平井控制的储层范围最大,交错型、哑铃型和纺锤型的控制范围依次减小。

3.2 水平井分支形态对日产量的影响

本研究中所设计的4种不同水平井分支形态条件下煤层气的日产量如图6所示,累计日产气量如图7所示,由于煤层中割理系统的构建具有一定的随机性,因此研究中对每种分支水平井形态均在每个割理密度条件下建立了12个割理系统模型,并将模拟得到的产能结果取均值,使结果更具代表性。

由图6、7可以看出,随着煤层中割理密度的增大,4种形态的多分支水平井的峰值日产量和累计产量均有所提高,且等长型分支水平井的提升效果最显著。但是高密度割理条件下日产量衰减更加迅速。当哑铃型多分支水平井的开发时间达到16 a(图6(d)),纺锤型多分支水平井的开发时间达到7 a(图6(b)),多分支水平井在高密度割理条件下的产能将低于中低密度割理,等长型和交错型多分支水平井介于上述两者之间。此外,在各割理密度条件下等长型分支水平井的峰值日产量均高于其他3种形态的分支水平井。

3.3 水平井分支角度对日产量的影响

不同水平井分支角度条件下的4种形态分支水

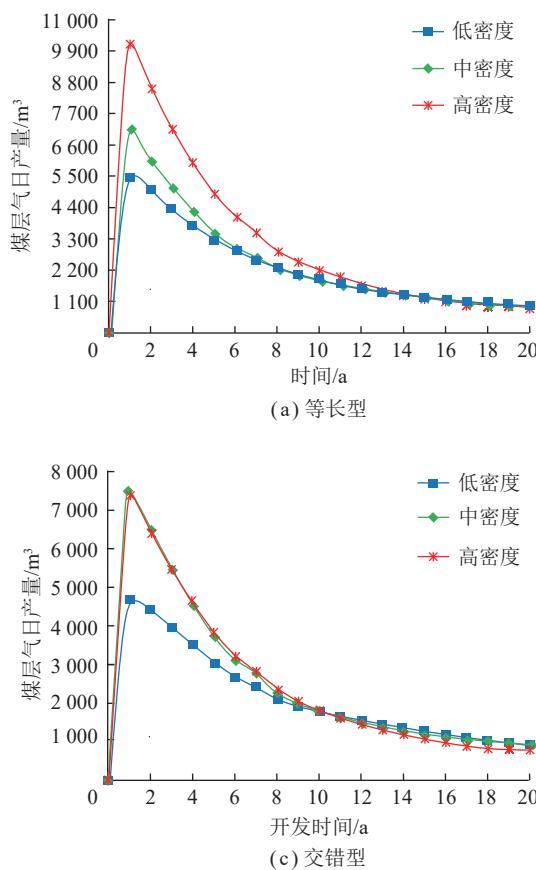


图6 不同水平井分支形态条件下的煤层气日产量

Fig.6 Daily productivity of multilateral horizontal wells of different forms

平井的煤层气日产量如图8所示,累计产量如图9所示。同样的,对每种形态分支水平井的每种分支角度构建12个割理模型,并将模拟结果取均值,以减小割理系统随机性的影响。

图8的模拟结果显示,随着各分支井与主井筒夹角的增大,分支水平井可以控制更大范围的煤层,因此各形态的分支水平井的煤层气峰值日产量均有所提高。其中,纺锤型分支水平井的分支角度由 60° 增加到 80° 时,煤层气峰值日产量提高了51%,峰值日产量增幅最为显著,而交错型分支水平井的峰值产能提高有限。同时,在分支井筒与主井筒夹角较大时,等长型和纺锤型多分支水平井的峰值日产量高于其他两种类型的多分支井,同时由图9也可以看出等长型多分支井的累计产量也较其他3种类型的多分支水平井更高,因此采用等长型多分支井对煤层气的开发更为有利。

3.4 水平井分支数量对日产量的影响

进一步分析4种形态的多分支水平井的分支数量对煤层气日产量和累计产量的影响分别如图10、11所示。可以看出,在水平井主井筒长度一定的条件下,随着分支井数量的增加,多分支水平井的煤层气峰值日产量不断提高。其中,等长型分支水平井的峰值日

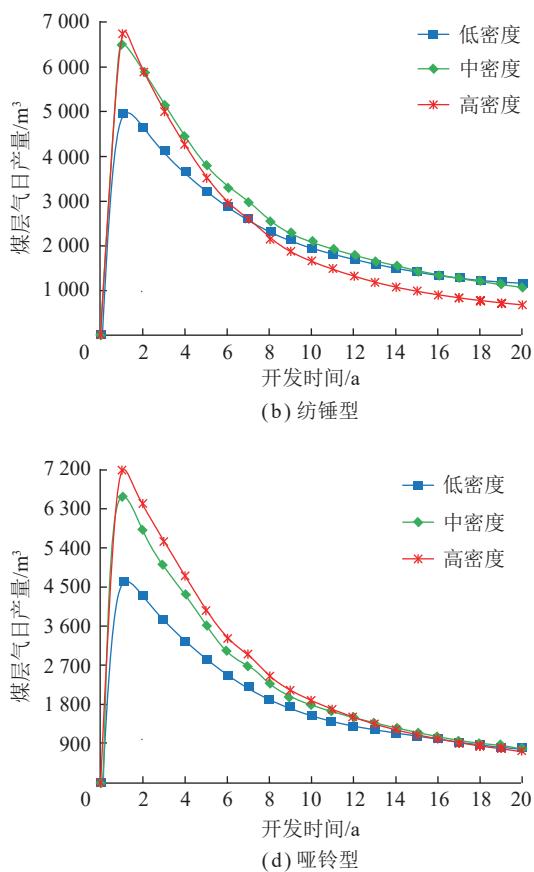


图6 不同水平井分支形态条件下的煤层气日产量

Fig.6 Daily productivity of multilateral horizontal wells of different forms

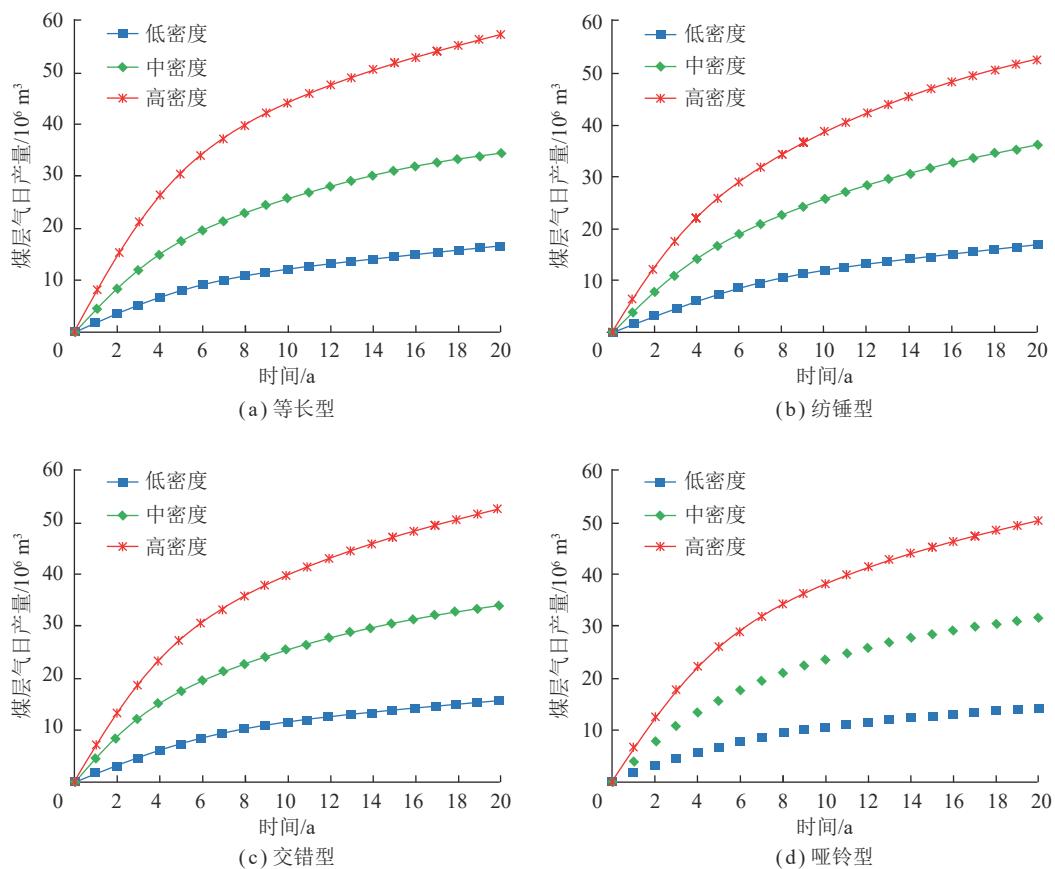


图7 不同水平井分支形态条件下的煤层气累计产量

Fig.7 Cumulative production of multilateral horizontal wells of different forms

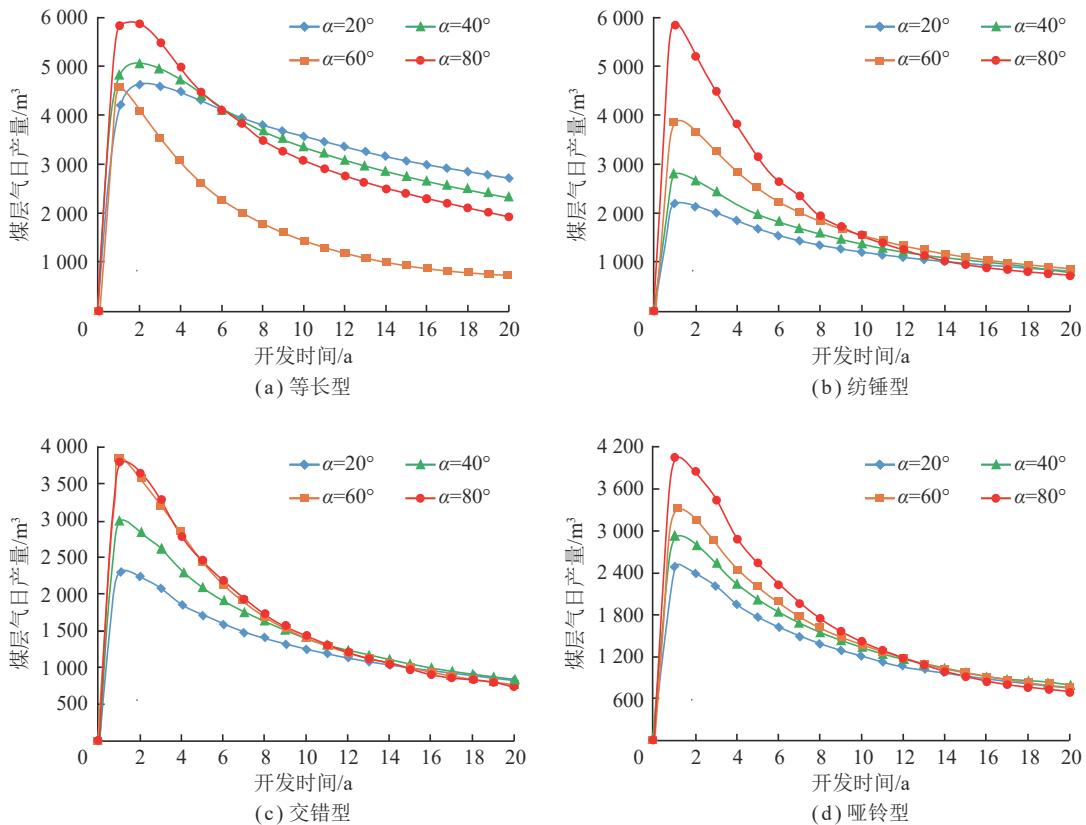


图8 不同水平井分支角度条件下的煤层气日产量

Fig.8 Daily productivity of multilateral horizontal wells with different angles between main and branch wellbores

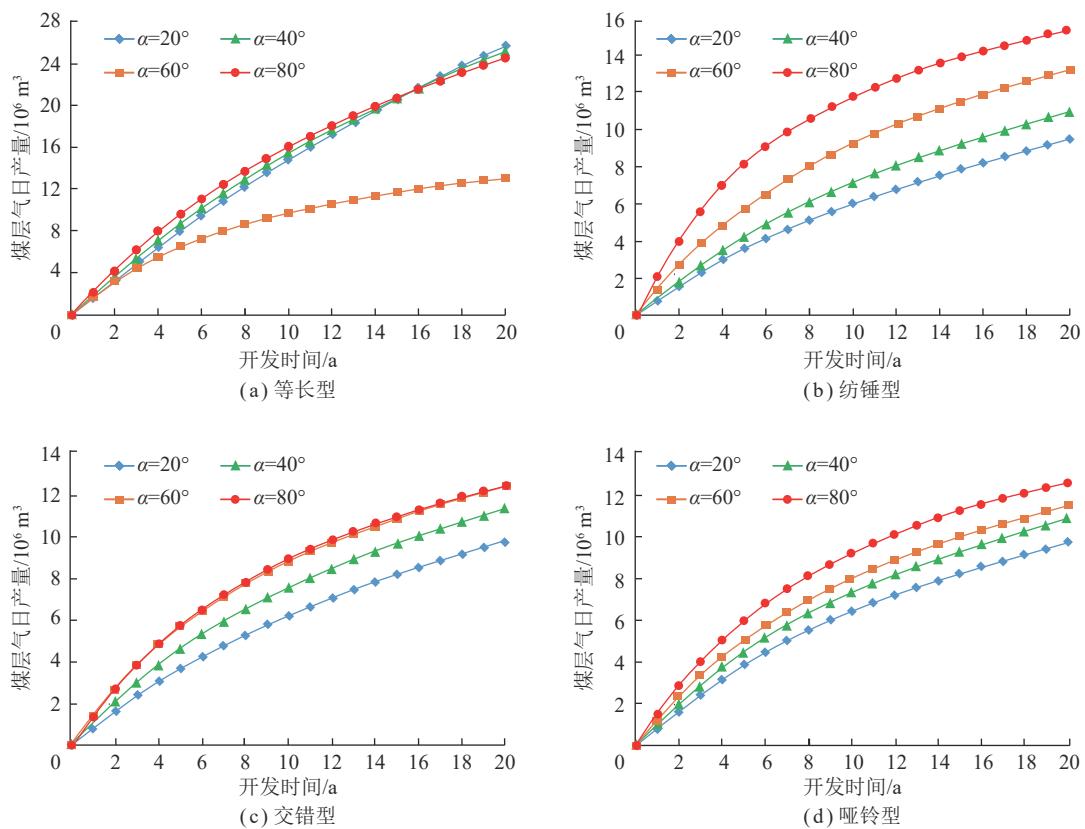


图9 不同水平井分支角度条件下的煤层气累计产量

Fig.9 Cumulative production of multilateral horizontal wells with different angles between main and branch

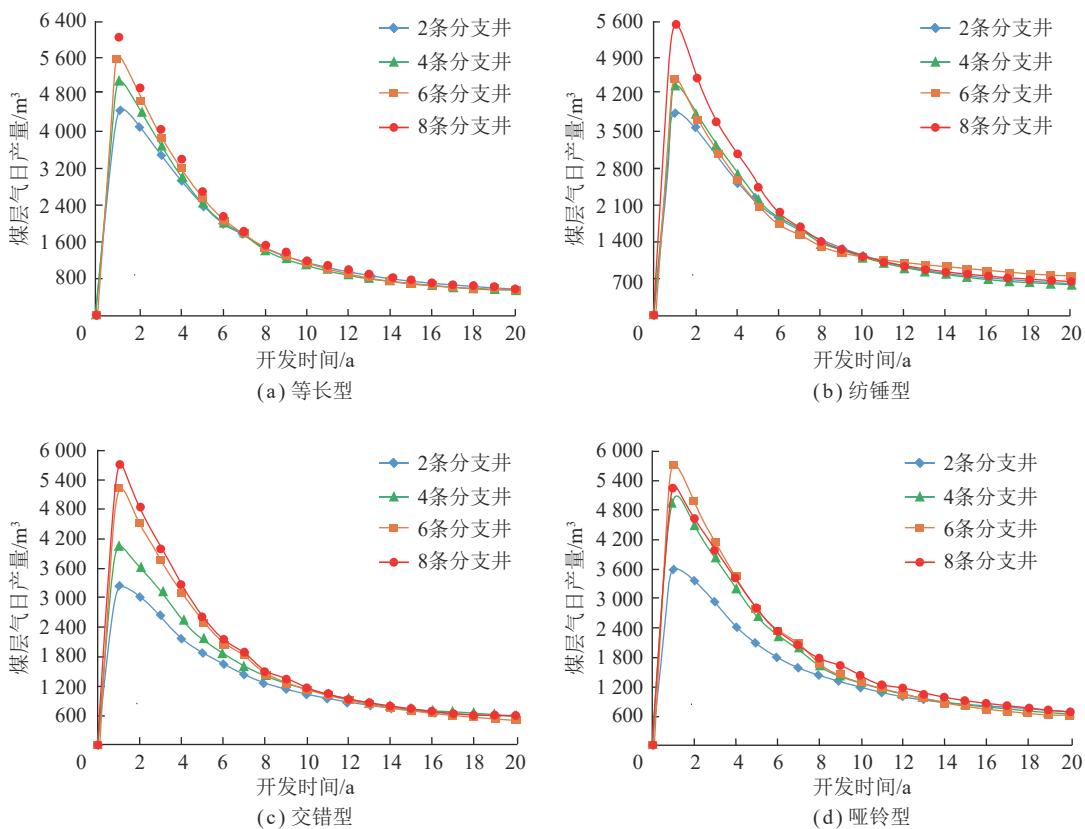


图10 不同水平井分支数量条件下的煤层气日产量

Fig.10 Daily productivity of multilateral horizontal wells with different branch numbers

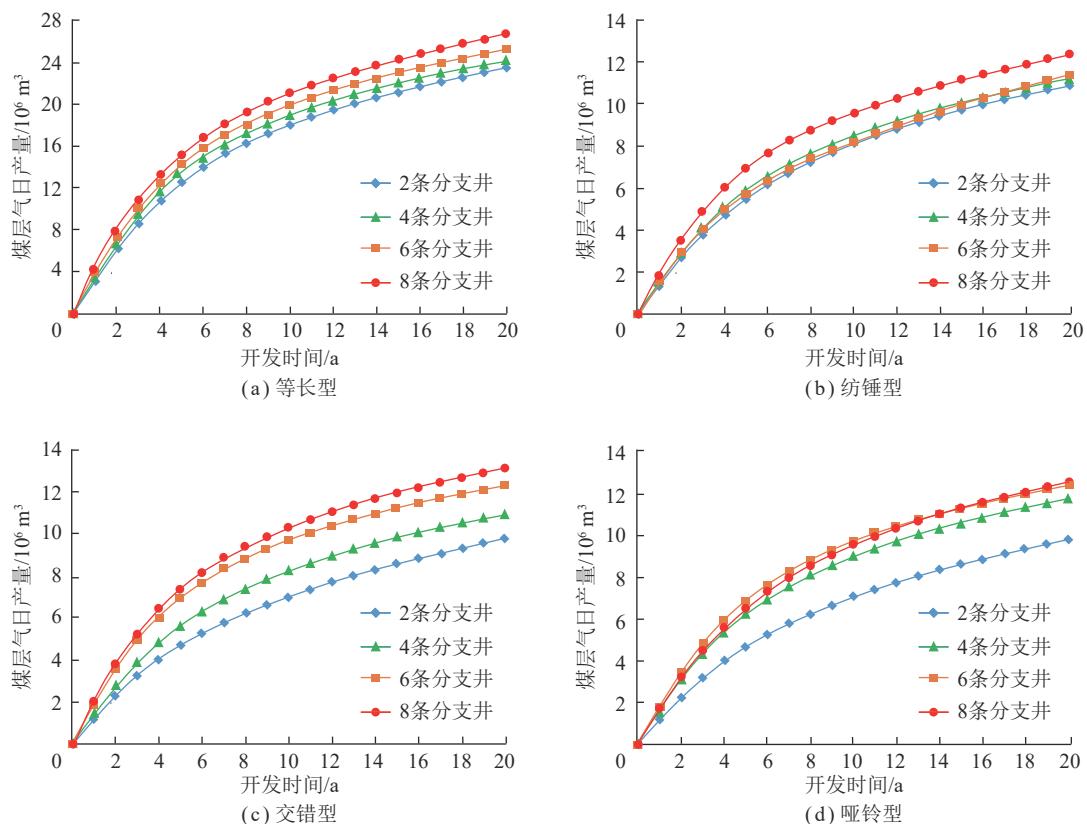


图 11 不同水平井分支数量条件下的煤层气累计产量

Fig.11 Cumulative production of multilateral horizontal wells with different branch numbers

产量在分支井数量增加后增加的较为均匀且增幅较小(图 10(a))。交错型和哑铃型多分支水平井在分支井数量较少时,增加分支井数量能大幅提高峰值产量(图 10(c)、(d))。而纺锤型多分支水平井的峰值日产量在分支数量由 6 条提高到 8 条时有大幅增加(图 10(b))。由图 11 展示的 4 种类型多分支水平井 20 年内的累计产量进行考虑,纺锤型多分支井的分支数量应不少于 8 条,而哑铃型多分支井的分支数量不多于 6 条。

4 结 论

(1) 煤层中直接与多分支水平井联通的割理可以极大地提高多分支水平井的控制范围,而未联通割理的开发需要较长时间,这也是多分支水平井可以短时间达到峰值日产量,而后迅速衰减的原因。

(2) 在本研究中的割理密度条件下,等长型多分支水平井的峰值日产量相较于哑铃型、纺锤型和交错型多分支水平井,在不同分支井夹角和数量条件下均具有一定优势。

(3) 多分支水平井中分支井筒与主井筒夹角较大时,采用等长型多分支水平井可以获得更高的峰值日产量和累计产量,对煤层气的开发更为有利。

(4) 由 20 a 内煤层气累计产量可以看出纺锤型多分支水平井的分支数量应不少于 8 条,而哑铃型多分支井的分支数量不多于 6 条。

参考文献(References):

- [1] 徐凤银, 闫霞, 林振盘, 等. 我国煤层气高效开发关键技术研究进展与发展方向[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(3): 1–14.
XU Fengyin, YAN Xia, LIN Zhenpan, et al. Research progress and development direction of key technologies for efficient coalbed methane development in China[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(3): 1–14.
- [2] TAO S, PAN Z J, TANG S L, et al. Current status and geological conditions for the applicability of CBM drilling technologies in China: A review[J]. International Journal of Coal Geology, 2019, 202: 95–108.
- [3] 张千贵, 李权山, 范翔宇, 等. 中国煤与煤层气共采理论技术现状及发展趋势[J]. 天然气工业, 2022, 42(6): 130–145.
ZHANG Qiangui, LI Quanshan, FAN Xiangyu, et al. Current situation and development trend of theories and technologies for coal and CBM co-mining in China[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(6): 130–145.
- [4] LIU Y K, WANG F J, TANG H M, et al. Well type and pattern optimization method based on fine numerical simulation in coal-bed

- methane reservoir[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(10): 5877–5890.
- [5] 杨长鑫, 杨兆中, 李小刚, 等. 中国煤层气地面井开采储层改造技术现状与展望[J]. *天然气工业*, 2022, 42(6): 154–162.
YANG Changxin, YANG Zhaozhong, LI Xiaogang, et al. Status and prospect of reservoir stimulation technologies for CBM surface well production in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(6): 154–162.
- [6] 张辉, 于洋, 高德利, 等. 煤层气多分支井形态分析[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2011, 33(4): 101–106, 194.
ZHANG Hui, YU Yang, GAO Deli, et al. Analysis on configuration of multi-lateral well for coalbed methane[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2011, 33(4): 101–106, 194.
- [7] 姜婷婷, 杨秀娟, 闫相祯, 等. 分支参数对煤层气羽状水平井产能的影响规律[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(4): 617–623.
JIANG Tingting, YANG Xiujuan, YAN Xiangzhen, et al. Influences of branch parameters on productivity of CBM pinnate horizontal well[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(4): 617–623.
- [8] 刘展, 张雷, 蒋轲, 等. 煤层气多分支水平井产能影响因素及增产稳产对策——以鄂尔多斯盆地三交区块为例[J]. *天然气工业*, 2018, 38(S1): 65–69.
LIU Zhan, ZHANG Lei, JIANG Ke, et al. Influencing factors of productivity of multi-branch horizontal wells in coalbed methane and countermeasures for increasing and stabilizing production—Taking Sanjiao Block in Ordos Basin as an example[J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(S1): 65–69.
- [9] 张福东, 吴晓东. 煤层气羽状水平井的开采优化[J]. *天然气工业*, 2010, 30(2): 69–71, 142.
ZHANG Fudong, WU Xiaodong. Optimization of pinnate horizontal multilateral wells for coalbed gas recovery[J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 30(2): 69–71, 142.
- [10] 余杰, 李利, 秦瑞宝, 等. 基于电阻率测井的高阶煤层割理孔渗评价方法及效果分析[J]. *中国海上油气*, 2021, 33(5): 80–86.
YU Jie, LI Li, QIN Ruibao, et al. Evaluation method and effect analysis of cleat porosity and permeability in high-rank coal bed based on resistivity logging[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2021, 33(5): 80–86.
- [11] 贾建称, 张泓, 贾茜, 等. 煤储层割理系统研究: 现状与展望[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(9): 1621–1628.
JIA Jianchen, ZHANG Hong, JIA Qian, et al. Status and prospect: study on the cleat system in coal reservoir[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(9): 1621–1628.
- [12] 郭亚静, 巩红林, 陈亮. 铁法矿区主要煤层割理的发育特征[J]. *煤炭技术*, 2010, 29(4): 150–151.
GUO Yajing, GONG Honglin, CHEN Liang. Main coal steam cutting vein development features in Tiefang coal mine[J]. *Coal Technology*, 2010, 29(4): 150–151.
- [13] 姜瑞忠, 刘秀伟, 王星, 等. 煤层气藏多分支水平井非稳态产能模型[J]. *油气地质与采收率*, 2020, 27(3): 48–56.
JIANG Ruizhong, LIU Xiuwei, WANG Xing, et al. Unsteady productivity model for multi-branched horizontal wells in coalbed methane reservoir[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2020, 27(3): 48–56.
- [14] 王保辉, 闫相祯, 杨秀娟. 基于煤岩割理正交各向异性的煤层气产能预测[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(32): 229–232.
WANG Baohui, YAN Xiangzhen, YANG Xiujuan. Production prediction with the consideration of the orthotropic permeability of coal seam[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(32): 229–232.
- [15] GU F G, CHALATURNYK R. Permeability and porosity models considering anisotropy and discontinuity of coalbeds and application in coupled simulation[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2010, 74(3–4): 113–131.
- [16] CHEN D, PAN Z J, LIU J S, et al. Characteristic of anisotropic coal permeability and its impact on optimal design of multi-lateral well for coalbed methane production[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2012, 88: 13–28.
- [17] AN H, WEI X R, WANG G X, et al. Modeling anisotropic permeability of coal and its effects on CO₂ sequestration and enhanced coalbed methane recovery[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2015, 152: 15–24.
- [18] 耿玉林, 亓宪寅, 贾善波. 考虑吸附-解吸效应的气固耦合模型[J]. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 35(1): 40–48.
GENG Yulin, QI Xianyin, JIA Shapo. Gas-solid coupling model by considering desorption effect[J]. *Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 35(1): 40–48.
- [19] 王志荣, 温震洋, 陈玲霞. 水力压裂条件下裂隙性煤储层垂直试验井产能预测[J]. *天然气地球科学*, 2021, 32(4): 465–471.
WANG Zhirong, WEN Zhenyang, CHEN Lingxia. Productivity prediction of vertical test well for fractured coal reservoir under hydraulic fracturing[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(4): 465–471.
- [20] 孟召平, 张纪星, 刘贺, 等. 考虑应力敏感性的煤层气井产能模型及应用分析[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(4): 593–599.
MENG Zaoping, ZHANG Jixing, LIU He, et al. Productivity model of CBM wells considering the stress sensitivity and its application analysis[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(4): 593–599.
- [21] 李明忠, 陈会娟, 张贤松, 等. 煤层气多分支水平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 multi-lateral horizontal well

- for coalbed methane[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(1): 92–97.
- [22] 刘齐, 陈强, 孙中光, 等. 煤层不同类型裂缝应力敏感性实验——以阜新盆地煤样为例[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(3): 437–446.
- LIU Qi, CHEN Qiang, SUN Zhongguang, et al. Stress sensitivity of coal seam with different fractures: Case study of Fuxin Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(3): 437–446.
- [23] 任飞, 李辛子, 张遂安. 鄂尔多斯盆地不同割理方向煤岩应力敏感性研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(11): 21–25.
- REN Fei, LI Xinzi, ZHANG Suiyan. Study on coal rock stress sensitivity of different cleat directions in Ordos Basin[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(11): 21–25.
- [24] 徐凤银, 张伟, 李子玲, 等. 鄂尔多斯盆地保德区块煤层气藏描述与提高采收率关键技术[J]. 天然气工业, 2023, 43(1): 96–112.
- XU Fengyin, ZHANG Wei, LI Ziling, et al. Coalbed methane reservoir description and enhanced recovery technologies in Baode Block, Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(1): 96–112.
- [25] 田永净, 吕玉民, 王存武, 等. 开发中后期煤层含气量反算技术及其在储量复算中的应用——以沁水盆地潘庄气田3号煤层为例[J]. 中国海上油气, 2022, 34(6): 110–116.
- TIAN Yongjing, LYU Yumin, WANG Cunwu, et al. Inverse calculation technique for gas content of coal seams in late stage of development and application in reserve recalculation: A case study of No. 3 coal seam in Panzhuang CBM field, Qinshui Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(6): 110–116.
- [26] 刘一楠, 吴翔, 李勇, 等. 古交矿区太原组煤层气开发地质特征及产能优化[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(8): 125–132.
- LIU Yinan, WU Xiang, LI Yong, et al. Geological characteristics and development optimization of coalbed methane in the Taiyuan Formation of Gujiao Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(8): 125–132.