

《煤层透气性系数新的计算方法》

编制说明

1 工作简况

1.1 任务来源

本标准由中国矿业大学（北京）根据煤层透气性系数测定方法完善及顺层钻孔现场应用需求提出，联合有关高校、科研院所和煤矿企业共同起草。

1.2 起草单位、参编单位

起草单位：中国矿业大学（北京）

参编单位：太原理工大学、太原科技大学、煤炭科学研究总院有限公司、山西兰花科技创业股份有限公司。

1.3 主要起草人

秦跃平，中国矿业大学（北京），负责钻孔模型推导、透气性系数计算公式拟合等工作；

刘佳，太原理工大学，负责模型解算及模拟结果分析等工作；

赵振保，太原科技大学，负责现场测试和煤层参数实验室测定等工作；

齐庆杰，煤炭科学研究总院有限公司，负责技术方案制定等工作；

吴锦旗，山西兰花科技创业股份有限公司，负责现场施工验证，数据采集等工作；

苏向云，中国矿业大学（北京），负责现场试验、数据分析和标准文本编制等工作。

2 制定标准的必要性和意义

现行标准用抛物线方程近似计算瓦斯含量，简化了求解问题的同时也导致计算误差，同一钻孔在成孔后不同测试时间得到的透气性系数结果存在差异。本标准基于朗格缪尔式瓦斯含量构建瓦斯流动模型，提高了解算精度；进一步完善无因次参数定义和分段反演关系，更加准确地描述无因次流量随无因次时间的变化关系，通过分段线性拟合建立新的透气性系数反演算法。

拓展了透气性系数计算方法的适用范围，在顺层钻孔抽采过程中，钻孔周围瓦斯压力降低区具有明显的时间演化特征，存在符合径向流动模型的稳定期。本标准通过现场验证，论证了顺层钻孔瓦斯流量具备用于反算煤层透气性系数的理论条件。

3 主要起草过程

资料收集与调研。钻孔瓦斯抽采模型的瓦斯含量问题存在已久，前人采用抛物线式计算煤层瓦斯含量，将非线性偏微分方程转换为线性方程以求解。

拟稿过程。起草人团队采用朗格缪尔瓦斯含量式建立了新的钻孔瓦斯模型。通过对结算结果的拟合，得到了新的透气性系数计算公式。并提出在顺层钻孔中使用的方案。

实验论证。为验证新方法的正确性和顺层钻孔测透气性系数的可行性，开展煤矿现场的透气性系数测定实验。得到了钻孔的透气性系数稳定期，证明方案可行。

征求意见。

处理意见。

审查。

批准发布。

4 制定标准的原则和依据

本标准遵循科学性、先进性、适用性和可操作性原则，以煤层瓦斯径向流动理论、朗格缪尔吸附理论及相关标准为依据，并经模型解算和现场试验验证。

5 与现行有关法律、法规和标准的关系

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 23561.4—2009 煤和岩石物理力学性质测定方法 第4部分：煤和岩石孔隙率计算方法

GB/T 482 煤层煤样采取方法

GB/T 217 煤的真相对密度测试方法

GB/T 6949 煤的视相对密度测定方法

NB/T 10888—2021 煤的高压等温吸附试验方法 重量法

AQ/T 1047 煤矿井下煤层瓦斯压力的直接测定方法

6 标准主要内容说明

6.4 煤层透气性系数测试方法的原理

6.4.1 模型建立

以朗格缪尔吸附理论计算煤层瓦斯含量，以达西定律计算瓦斯流量，在此基础上建立钻孔瓦斯径向流动模型。

煤层的瓦斯含量符合朗格缪尔理论：

$$X = \frac{abp}{1+bp} + Enp \quad (2)$$

式中， X 为单位质量煤的瓦斯含量， m^3/t ； p 为瓦斯压力， MPa ； a 、 b 为吸附常数， m^3/t 、 MPa^{-1} ， E 为系数， $E=1/(0.010325\rho)$ ， $\text{m}^3/(\text{t} \cdot \text{MPa})$ ； ρ 为煤的视密度， t/m^3 ； n 为煤的孔隙率。

钻孔周围的瓦斯流动为径向非稳态流动，基于达西定律和质量守恒定律，得到钻孔径向瓦斯流动数学模型和边界条件，如式(2)所示。

$$\begin{cases} \frac{\partial(\frac{ab\sqrt{P}}{1+b\sqrt{P}} + En\sqrt{P})}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \frac{\partial P}{\partial r}) \\ t=0, \quad P=P_0 \\ r=r_1, \quad P=P_1 \\ r=\infty, \quad P=P_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, P 为瓦斯压力, MPa^2 , 即 $P=p^2$; λ 为煤层透气性系数, $\text{m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$; r_1 为钻孔半径, m ; p_1 为钻孔瓦斯抽采压力, MPa 。

钻孔表面瓦斯涌出速度 q , 即单位面积煤壁在单位时间所涌出的瓦斯在标准状况下的体积, m^3/d , 由式(3)计算:

$$q = \lambda \frac{\partial P}{\partial r} \Big|_{r=r_1} \quad (4)$$

引入以下无因次量, 将钻孔径向瓦斯流动数学模型无因次化:

$$N = \frac{En}{ab}, \quad \Theta = \frac{P}{P_0}, \quad Fo = \frac{\sqrt{P_0}\lambda}{\rho r_1^2 ab} t, \quad R = \frac{r}{r_1}, \quad B = b\sqrt{P_0} \quad (5)$$

式中, N 为无因次孔隙率, Θ 为无因次瓦斯压力, Fo 为无因次时间, R 为无因次半径, B 为无因次瓦斯吸附常数。

将式(4)中的无因次量代入式(2)得到无因次钻孔径向瓦斯流动方程, 及无因次边界条件。如式(5)所示。

$$\begin{cases} \frac{\partial(\frac{1}{\frac{1}{\sqrt{\Theta}} + B} + N\sqrt{\Theta})}{\partial Fo} = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} (R \frac{\partial \Theta}{\partial R}) \\ Fo=0, \quad \Theta_0=1 \\ R=1, \quad \Theta_1 = \frac{P_1}{P_0} \\ R=\infty, \quad \frac{\partial P}{\partial R} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

无因次瓦斯涌出量 Y 为:

$$Y = \frac{\partial \Theta}{\partial R} \Big|_{R=1} \quad (7)$$

6.4.2 基于有限差分法的无量纲模型求解

通过有限差分法求解上述无量纲模型, 得到无因次瓦斯涌出速度 Y 与傅里叶数 Fo 的关系曲线。物理模型为钻孔及其周围煤体, 对解算区域进行网格划分并将节点编号, 沿钻孔壁向煤体远处方向, 将煤体划分为 N 个区域, 并进行节点编号, 依次为 $0, 1, 2, \dots, N$; 以相邻节点的重点划分并得到任意一个节点 i 的控制体。节点间距和差分计算的时间间隔呈等比增加。

对 0 节点, 其无因次瓦斯压力与无因次钻孔瓦斯压力相同, 由边界条件可得:

$$\Theta_0^j = 1 \quad (8)$$

式中，下标表示节点，即 0 节点；上标 j 表示时间节点。

对于内部节点 1~N-1，有差分方程：

$$\begin{aligned} & \left[\frac{R_{i+1} + R_i}{R_{i+1} - R_i} \Delta F o_j + \frac{R_i + R_{i-1}}{R_i - R_{i-1}} \Delta F o_j + \right. \\ & \left. \left[\left(\frac{R_{i+1} + R_i}{2} \right)^2 - \left(\frac{R_i + R_{i-1}}{2} \right)^2 \right] \left[\frac{1}{\left(1 + B \sqrt{\frac{\Theta_i^j + \Theta_{i-1}^{j-1}}{2}} \right)^2 \sqrt{\frac{\Theta_i^j + \Theta_{i-1}^{j-1}}{2}}} + \frac{N}{\sqrt{\frac{\Theta_i^j + \Theta_{i-1}^{j-1}}{2}}} \right] \right] \Theta_i^j - \Delta F o_j \frac{R_i + R_{i-1}}{R_i - R_{i-1}} \Theta_{i-1}^j - \Delta F o_j \frac{R_{i+1} + R_i}{R_{i+1} - R_i} \Theta_{i+1}^j \\ & = - \left[\frac{R_{i+1} + R_i}{R_{i+1} - R_i} \Delta F o_j + \frac{R_i + R_{i-1}}{R_i - R_{i-1}} \Delta F o_j - \right. \\ & \left. \left[\left(\frac{R_{i+1} + R_i}{2} \right)^2 - \left(\frac{R_i + R_{i-1}}{2} \right)^2 \right] \left[\frac{1}{\left(1 + B \sqrt{\frac{\Theta_i^j + \Theta_{i-1}^{j-1}}{2}} \right)^2 \sqrt{\frac{\Theta_i^j + \Theta_{i-1}^{j-1}}{2}}} + \frac{N}{\sqrt{\frac{\Theta_i^j + \Theta_{i-1}^{j-1}}{2}}} \right] \right] \Theta_i^{j-1} - \Delta F o_j \frac{R_i + R_{i-1}}{R_i - R_{i-1}} \Theta_{i-1}^{j-1} + \Delta F o_j \frac{R_{i+1} + R_i}{R_{i+1} - R_i} \Theta_{i+1}^{j-1} \end{aligned} \quad (9)$$

(i = 1, 2, \dots, N-1 \quad j = 1, 2, \dots)

对 N 节点，认为其距离钻孔壁足够远，无因次压力与无因次煤层原始瓦斯压力相同，由边界条件可得：

$$\Theta_N^j = b^2 P_0 \quad (10)$$

由于朗格缪尔式模型是非线性方程组，因此每个时间步长需给节点的无因次压力平方 Θ_i^j 赋初值并进行迭代。本文设定的初值为前一时刻压力平方乘以一个略小于 1 的系数 **c**，使方程转化为近似线性方程。结合 0 节点和 n 节点方程，调用子程序求解方程组，得到 j 时刻节点压力平方的近似值 $\Theta_i^{j'}$ 。将所得近似值 $\Theta_i^{j'}$ 与 Θ_i^j 进行比较，如果两者相对误差大于设定的精度 **M**，则将 $\Theta_i^{j'}$ 作为新的初值，重新调用子程序求解，直至误差符合 **M**。输出压力值、瓦斯含量、钻孔瓦斯涌出量，进入下一个循环，直至完成设定的时间循环。程序流程图如图 1 所示。

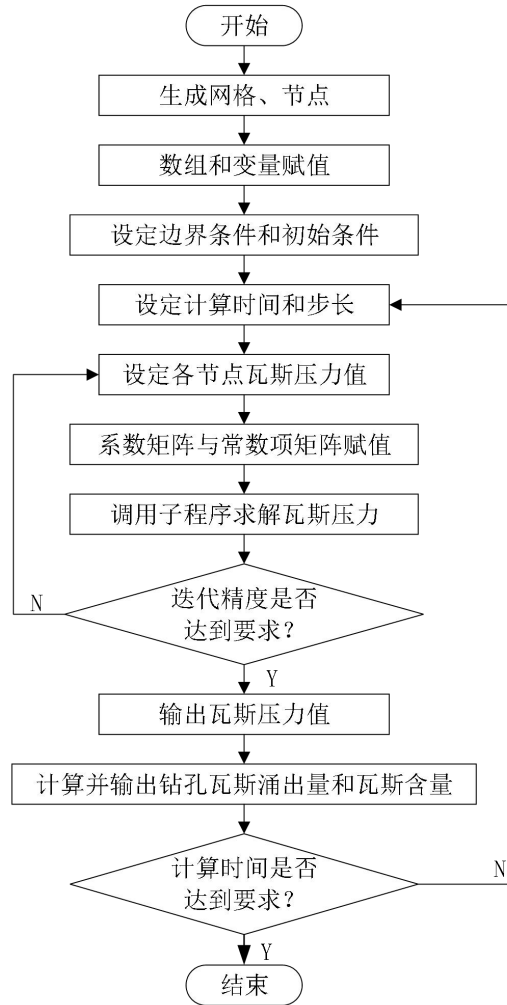


图 1 程序解算流程

根据程序解得的无因次压力, j 时刻的无因次瓦斯涌出速度可由式(10)计算:

$$Y = \frac{\partial \Theta}{\partial R} \Big|_{R=1} = \frac{qr_1}{\lambda P_0} \quad (11)$$

6.4.3 煤层透气性系数新算法

为建立煤层透气性系数计算公式, 基于无因次瓦斯涌出速度 Y 与无因次时间 F_0 之间的关系开展反演分析。求解上述模型可获得 Y 与 F_0 的关系曲线。由于不同煤层的原始瓦斯压力、吸附常数和孔隙率等参数存在差异, 因此在各参数的工程取值范围内设置参数组合以表征不同煤层条件, 进而得到普适性的计算公式。对不同参数组合的模型进行解算, 得到覆盖煤层参数取值范围的关系曲线族。通过移动变换使各曲线重合, 得到适用不同煤层参数的统一关系曲线。

为表征不同煤层参数对瓦斯涌出规律的影响, 将煤层参数归并为三个无因次变量, 分别为无因次吸附常数 B , 无因次孔隙率 N , 无因次煤层原始瓦斯压力 Θ_l , 如式(11)所示。

$$\begin{cases} N = \frac{n}{a\rho_m b p_0} \frac{T_0}{T} \\ B = bp \\ \Theta_1 = \frac{P_0}{P} \end{cases} \quad (12)$$

式中， $p_0=0.1$ MPa； $T_0=273.15$ K； ρ_m 为煤的密度，取 1.2 T/m³； $P_0=0.01$ MPa²； a 的取值范围 $15\sim 60$ m³/T； b 的取值范围 $0.25\sim 2$ MPa⁻¹； n 为孔隙率，取值范围为 $0.05\sim 0.2$ ； T 为煤层的温度，取 273.15 K。

根据上述取值范围计算三个无因次量的取值范围。对 N 来说，当 n 取最大， a 和 b 取最小值时， N 取最大值，为 0.44 ；当 n 取最小， a 和 b 取最大值时， N 取最小值，为 0.0034 ； N 的取值为 $0.003\sim 0.4$ ，中位数 0.035 。对参数 B ，当 b 和 p 均取最小值时， B 取最小值，为 0.0625 ，当 b 和 p 均取最大值时， B 取最大值，为 16 ；因此 B 的取值范围为 $0.0625\sim 16$ ，中位数 1 。对参数 Θ_1 ，当 p 取最小值时， Θ_1 取得最大值 0.16 ，当 p 取最大值时， Θ_1 取得最小值 0.00015625 ；因此 Θ_1 的取值范围为 $0.00015625\sim 0.16$ 。

以 $B=1$ ， $N=0.035$ ， $\Theta_1=0.01$ 为标准情况，改变单一变量，得到三个参数分别变化时的曲线。各变量按照等比的规律取值，取值如表 1 所示。

表 1 三个无因次量的取值

无因次量	取值								
N	0.003	0.006	0.012	0.035	0.07	0.14	0.28	0.4	
B	0.0625	0.125	0.25	0.5	1	2	4	8	16
Θ_1	0.00015625	0.000625	0.0025	0.01	0.04	0.16			

当 $N=0.035$ ， $\Theta_1=0.01$ ， B 取不同值时模拟结果如图 2(a)所示。研究发现，当水平移动各条曲线，即将横坐标替换为 $\lg Fo + f_1(B)$ 时，可以使所有的曲线重合，如图 2(b)所示。其中：

$$f_1(B) = \frac{B}{1.621 + 0.62B} - 0.4462 \quad (13)$$

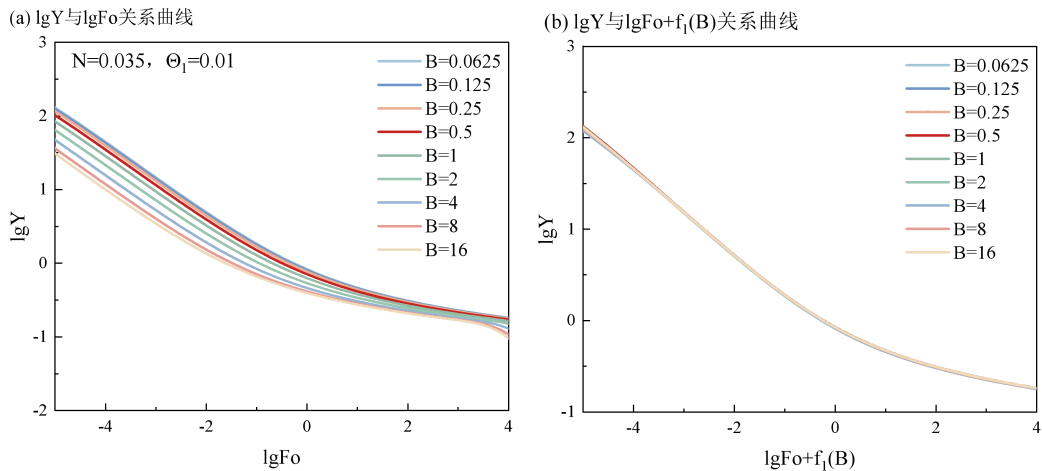


图 2 (a)当 $N=0.035$ ， $\Theta_1=0.01$ ， B 取不同值时的 $\lg Y$ 与 $\lg Fo$ 关系曲线

(b) B 取不同值时的 $\lg Y$ 与 $\lg Fo + f_1(B)$ 关系曲线

当 $B=1$ ， $\Theta_1=0.01$ ， N 取不同值时的模拟结果如图 3(a)所示。当水平移动各

条曲线，即将横坐标替换为 $\lg Fo + f_2(N)$ 时，可以使所有的曲线重合，如图 3(b) 所示。其中：

$$f_2(N) = \exp[-1.965(N - 0.035)] \quad (14)$$

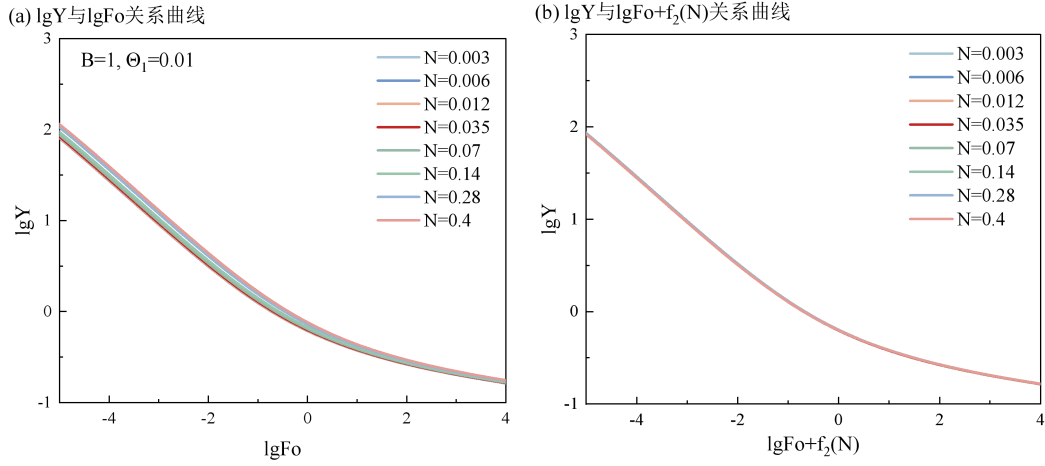


图 3(a) 当 $B=1$, $\Theta_I=0.01$, N 取不同值时的 Y 与 Fo 关系曲线

(b) N 取不同值时的 Y 与 $Fo + f_2(N)$ 关系曲线

当 $B=1$, $N=0.035$, Θ_I 取不同值时的模拟结果如图 4(a) 所示。当图中各条曲线同时做垂直和水平移动时，即将横坐标替换为 $\lg Fo + f_3(N)$ ，同时将纵坐标替换为 $\lg Y + f_4(N)$ 时，可以使所有的曲线重合，如图 4(b) 所示。其中：

$$\begin{cases} f_3(\Theta_I) = 0.62(\Theta_I - 0.01) \\ f_4(\Theta_I) = 0.42(\Theta_I - 0.01) \end{cases} \quad (15)$$

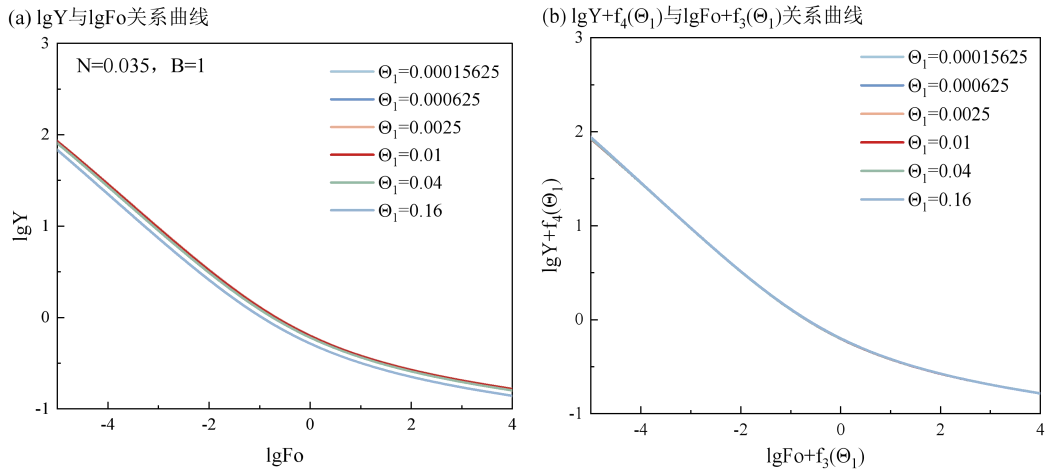


图 4(a) 当 $B=1$, $N=0.035$, Θ_I 取不同值时的 Y 与 Fo 关系曲线

(b) $\lg Y + f_4(\Theta_I)$ 与 $\lg Fo + f_3(\Theta_I)$ 关系曲线

综上所述，令：

$$\begin{cases} Z = Y \cdot \exp[0.9671(\Theta_I - 0.01)] \\ T = Fo \cdot \exp\left(\frac{3.714B}{2.614 + B} - 1.028 + 1.428(\Theta_I - 0.01) - 1.965(N - 0.035)\right) \end{cases} \quad (16)$$

即，

$$\begin{cases} Z = Y \cdot \exp[0.9671(\Theta_1 - 0.01)] \\ T = Fo \cdot \exp\left(\frac{3.714B}{2.614 + B} + 1.428\Theta_1 - 1.965N - 0.973\right) \end{cases} \quad (17)$$

则在 B 、 N 、 Θ_1 上述各种变化条件下, Z 和 T 都有相同的曲线, 如图 5 所示。

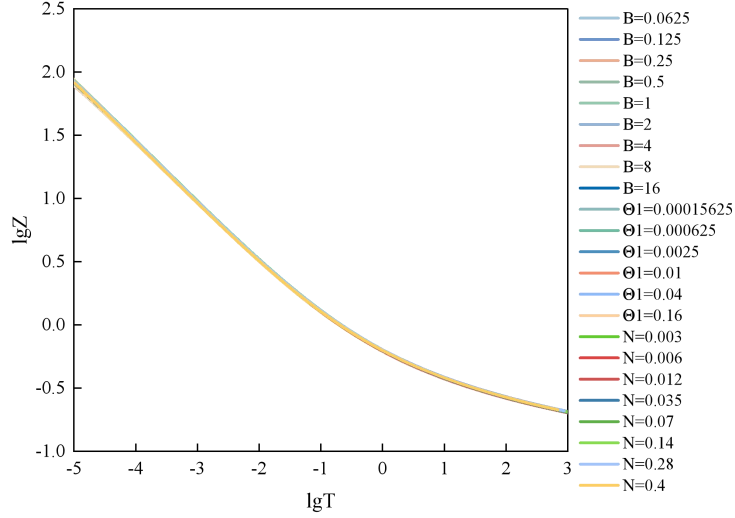


图 5 Z 和 T 关系曲线重合

由式:

$$\begin{cases} Y = \frac{qr_1}{\lambda P_0} \\ Fo = \frac{\sqrt{P_0}\lambda}{\rho r_1^2 ab} t \end{cases} \quad (18)$$

得:

$$\begin{cases} Z = \frac{qr_1}{\lambda P_0} \cdot \exp[0.9671(\Theta_1 - 0.01)] = \frac{U}{\lambda} \\ T = \frac{\sqrt{P_0}t\lambda}{\rho r_1^2 ab} \cdot \exp\left(\frac{3.714B}{2.614 + B} + 1.428\Theta_1 - 1.965N - 0.973\right) = V\lambda \end{cases} \quad (19)$$

式中,

$$\begin{cases} U = \frac{qr_1}{P_0} \cdot \exp[0.9671(\Theta_1 - 0.01)] \\ V = \frac{\sqrt{P_0}t}{\rho ab r_1^2} \cdot \exp\left(\frac{3.714B}{2.614 + B} + 1.428\Theta_1 - 1.965N - 0.973\right) \end{cases} \quad (20)$$

由此可见, T 和 Z 分别与透气性系数 λ 成反比和成正比。为了求 λ , 还需要知道 Z 和 T 之间的规律, 需要将 Z 表示为 T 的幂函数, 即:

$$Z = \beta T^{-\alpha} \quad (21)$$

带入公式(18), 得到:

$$\frac{U}{\lambda} = \beta(V\lambda)^{-\alpha} \quad (22)$$

整理得到：

$$U \cdot V^\alpha = \beta \lambda^{1-\alpha} \quad (23)$$

即：

$$\lambda = \left(\frac{1}{\beta} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} U \times (UV)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} \quad (24)$$

记 $W=UV$ ，得：

$$\lambda = \left(\frac{1}{\beta} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} U \cdot W^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} \quad (25)$$

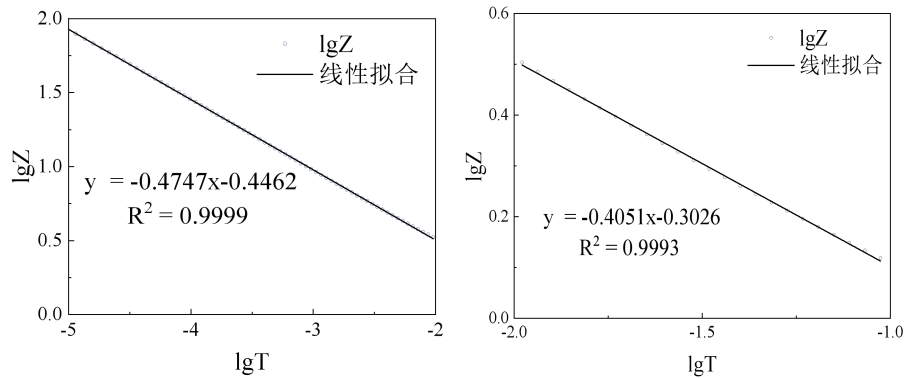
式中，

$$W = UV = \frac{qt}{\rho a b r_1 \sqrt{P_0}} \cdot \exp \left(\frac{3.714B}{2.614+B} + 2.395\Theta_1 - 1.967N - 0.9827 \right) \quad (26)$$

综合以上分析， U 、 W 可由式(26)计算。

$$\begin{cases} Fo = \frac{\sqrt{P_0} \lambda t}{\rho r_1^2 a b} \cdot \exp \left(\frac{3.714b\sqrt{P_0}}{2.614+b\sqrt{P_0}} + 1.428 \frac{P_1}{P_0} - \frac{1.965nT_0}{a\rho_m b p_0 T_s} - 0.973 \right) \\ U = \frac{q r_1}{P_0} \cdot \exp \left[0.9671 \left(\frac{P_1}{P_0} - 0.01 \right) \right] \\ W = \frac{0.3743qt}{\rho a b r_1 \sqrt{P_0}} \cdot \exp \left(\frac{3.714b\sqrt{P_0}}{2.614+b\sqrt{P_0}} + 2.395 \frac{P_1}{P_0} - \frac{1.965T_0 n}{a\rho_m b T p_0} \right) \end{cases} \quad (27)$$

因此，需要将图 5 中的曲线分段拟合为线性函数。对图 7 中曲线进行分段线性回归，计算过程如图 6 所示。



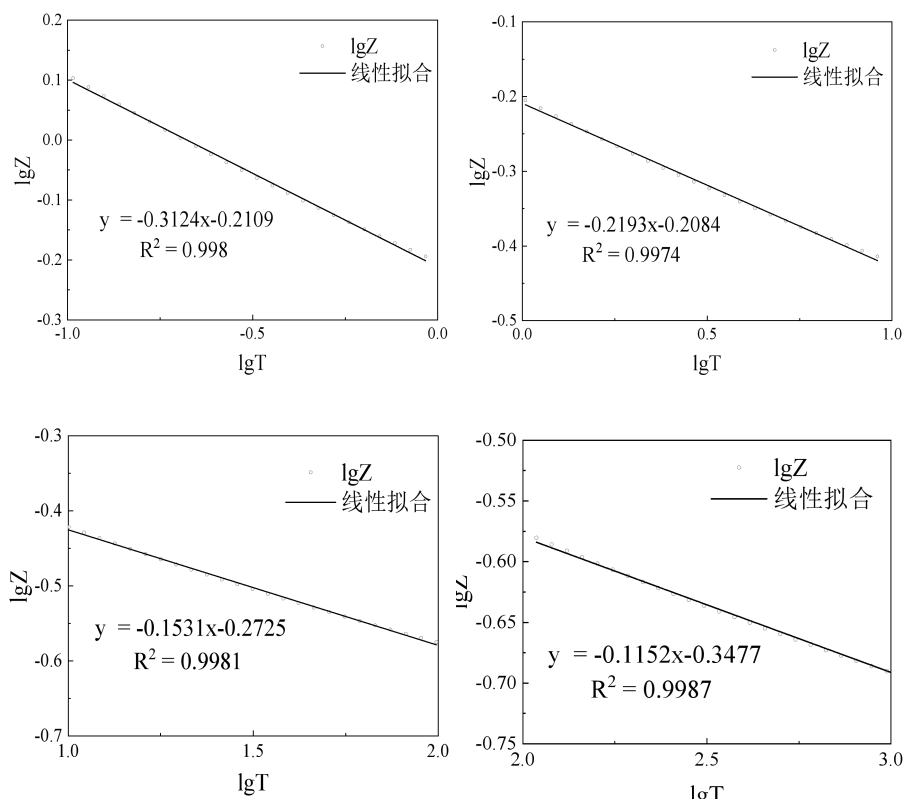


图 7 分段线性回归图

由图 7 中所示的回归公式，可计算相关参数，如表 2 所示。

表 2 回归参数计算表

$\lg T$		$-\alpha$	$\lg \beta$	$\alpha/(1-\alpha)$	$(1/\beta)^{(1/(1-\alpha))}$
$(-5, -2)$	$\lg Z = -0.4747 \lg T - 0.4462$	-0.4747	-0.4462	0.9037	7.070
$(-2, -1)$	$\lg Z = -0.4051 \lg T - 0.3026$	-0.4051	-0.3026	0.6810	3.226
$(-1, 0)$	$\lg Z = -0.3124 \lg T - 0.2109$	-0.3124	-0.2109	0.4543	2.027
$(0, 1)$	$\lg Z = -0.2193 \lg T - 0.2084$	-0.2193	-0.2084	0.2809	1.850
$(1, 2)$	$\lg Z = -0.1531 \lg T - 0.2725$	-0.1531	-0.2725	0.1808	2.098
$(2, 3)$	$\lg Z = -0.1152 \lg T - 0.3477$	-0.1152	-0.3477	0.1302	2.4716

根据表 2 中的数据，得到透气性系数的计算公式如下：

$$\begin{cases}
 T = (10^{-5}, 10^{-2}) \text{ 时, } \lambda = 7.070U \cdot W^{0.9037} \\
 T = (10^{-2}, 10^{-1}) \text{ 时, } \lambda = 3.226U \cdot W^{0.6810} \\
 T = (10^{-1}, 1) \text{ 时, } \lambda = 2.027U \cdot W^{0.4543} \\
 T = (1, 10) \text{ 时, } \lambda = 1.850U \cdot W^{0.2809} \\
 T = (10, 10^2) \text{ 时, } \lambda = 2.098U \cdot W^{0.1808} \\
 T = (10^2, 10^3) \text{ 时, } \lambda = 2.4716U \cdot W^{0.1302}
 \end{cases} \quad (27)$$

6.5 煤层及钻孔基本情况

煤层透气性系数的径向流量法规定，应采用穿层钻孔进行测定。径向流量法及本文提出的新计算方法均假设穿层钻孔可等效为无限大平壁中的圆孔，并基于达西定律建立瓦斯流量随时间的变化与透气性系数之间的定量关系，从而

反演煤层透气性系数的计算公式。随着钻孔影响范围的不断扩大，在不同时间尺度内均可获得相对稳定的透气性系数值。在排放初期，钻孔影响范围较小，此阶段钻孔附近的瓦斯流动特征与顺层瓦斯抽采钻孔相似，为进一步发展顺层钻孔透气性系数测定方法提供了理论基础。

为检验新方法的可靠性并论证顺层钻孔测定煤层透气性系数的可行性，在官地煤矿、万峰煤矿和玉溪煤矿开展了煤层透气性系数现场测试。在上述煤层分别取样进行基础参数测试。使用 WY-98A 全自动瓦斯吸附常数测定仪对煤样的朗格缪尔吸附常数进行测定，使用 QGFC-9000 全自动工业分析仪开展煤样工业分析。依据 GB/T217—2008《煤的真相对密度测定方法》、GB/T6949—2010《煤的视相对密度测定方法》和 GB/T23561.4—2009《煤和岩石物理力学性质测定方法第 4 部分：煤和岩石孔隙率计算方法》对煤样的真相对密度和视相对密度进行测试，并计算孔隙率。各煤层瓦斯参数及工业分析结果见表 3。

表 3 各煤矿的基本参数

参数	单位	官地煤矿			万峰煤矿			玉溪煤矿
		3#	6#	7#	1#上	1#	2#	3#
吸附常数 a	m ³ /t	31.73	38.20	36.65	21.74	26.19	22.04	42.97
吸附常数 b	MPa ⁻¹	0.48	0.63	0.52	0.48	0.54	0.56	1.21
原始瓦斯压力	MPa	0.33	0.48	0.41	0.65	0.62	0.2	1.6
煤层厚度	m	2.26	2.31	0.75	0.60	1.50	1.50	6.20
水分 M _{ad}	%	1.32	2.1	6.76	0.83	1.08	0.71	1.66
灰分 A _d	%	17.07	12.22	18.46	35.2	27.26	17.28	9.06
挥发分 V _{ad} f	%	16.52	12.12	16.97	27.14	26.60	29.33	7.17
真密度	t/m ³	1.49	1.43	1.56	1.58	1.40	1.58	1.57
视密度	t/m ³	1.44	1.39	1.49	1.51	1.45	1.66	1.46
孔隙率	%	3.36	2.8	4.49	4.43	3.45	4.82	6.925

在官地煤矿的 3#、6#和 7#煤层分别施工 1 个顺层钻孔；在万峰煤矿 1#上煤层施工 2 个顺层钻孔，在 1#煤层和 2#煤层分别施工 2 个和 1 个穿层钻孔；在玉溪煤矿 3#煤层施工 6 个顺层钻孔。各钻孔的具体参数见表 4。

表 4 钻孔参数

参数	钻孔编号	钻孔直径	钻孔长度	煤孔长度	布置方式
		mm	m	m	
官地煤矿	GD-3#煤层	113	38	26.5	顺层钻孔
	GD-6#煤层	113	32	24	顺层钻孔
	GD-7#煤层	65	16	7	顺层钻孔
万峰煤矿	WF1-1#穿层钻孔	94	80	2	穿层钻孔
	WF1-2#穿层钻孔	94	80	4	穿层钻孔
	WF1 上-1#钻孔	94	65	2	顺层钻孔
	WF1 上-2#钻孔	94	35	3	顺层钻孔
	WF2-2#穿层钻孔	94	55	1.5	穿层钻孔
玉溪煤矿	YX-49#钻孔	94	118	103	顺层钻孔
	YX-50#钻孔	94	118	103	顺层钻孔
	YX-53#钻孔	94	118	103	顺层钻孔
	YX-54#钻孔	94	118	103	顺层钻孔
	YX-55#钻孔	94	118	103	顺层钻孔
	YX-56#钻孔	94	118	103	顺层钻孔

三个矿井现场钻孔瓦斯流量监测结果如图 8 所示。官地煤矿和万峰煤矿的钻孔进行了煤层瓦斯压力测定，待钻孔内瓦斯压力稳定后开启钻孔，监测瓦斯流量。因此，官地煤矿和万峰煤矿钻孔排放时间自钻孔开启时计算。玉溪煤矿

在成孔后直接开展瓦斯流量监测，其排放时间自钻孔施工完成开始计算。由于不同矿井测试流程存在差异，在后续计算和结果分析中分别按照上述时间起点确定各钻孔排放时间。

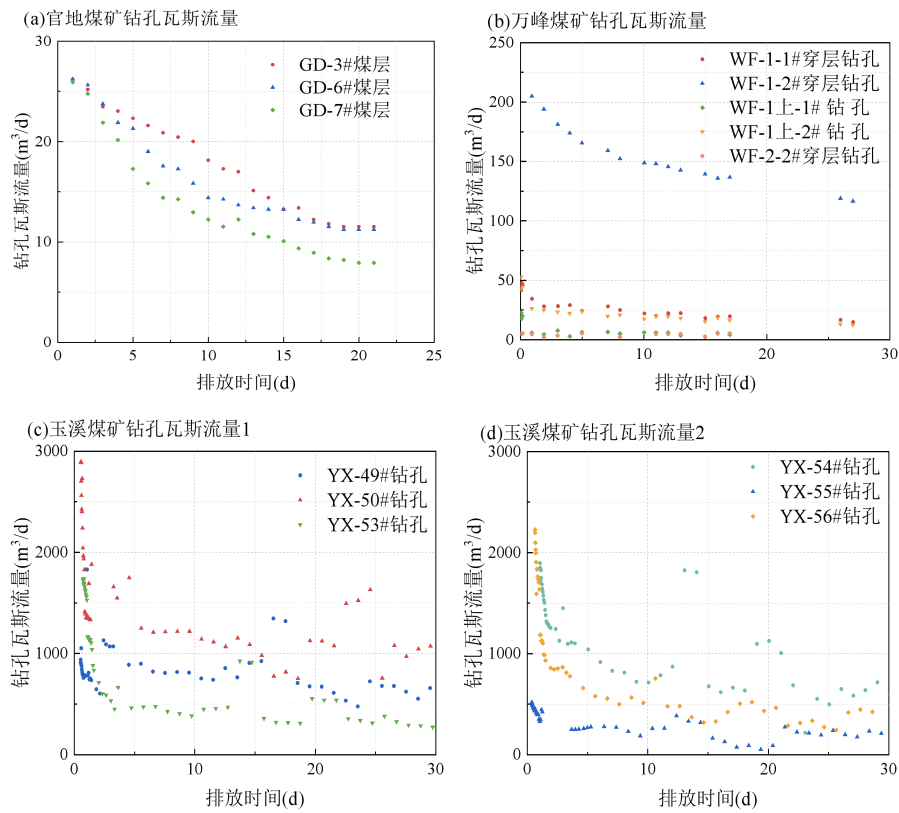


图 8 三个煤矿的钻孔瓦斯流量

6.6 煤层透气性系数计算

6.6.1 官地煤矿煤层透气性系数

官地煤矿三个煤层的煤层透气性系数如图 9 所示。3#煤层的煤层透气性系数在 4-10 天内保持稳定，6#煤层的煤层透气性系数在 2-8 天内保持稳定值，随后开始下降。由于 3#煤层与 6#煤层的煤层厚度接近，因此两个煤层的煤层透气性系数稳定时间也较为接近。而 7#煤层平均厚度仅有 0.75m，在较短时间内，钻孔瓦斯流量就会受到煤层厚度影响，进而导致煤层透气性系数不稳定。

比较两种计算方法的结果，虽然变化趋势解决，但是可以看出新方法的透气性系数稳定时间更长。尤其是在测定初期，透气性系数快速达到稳定值。

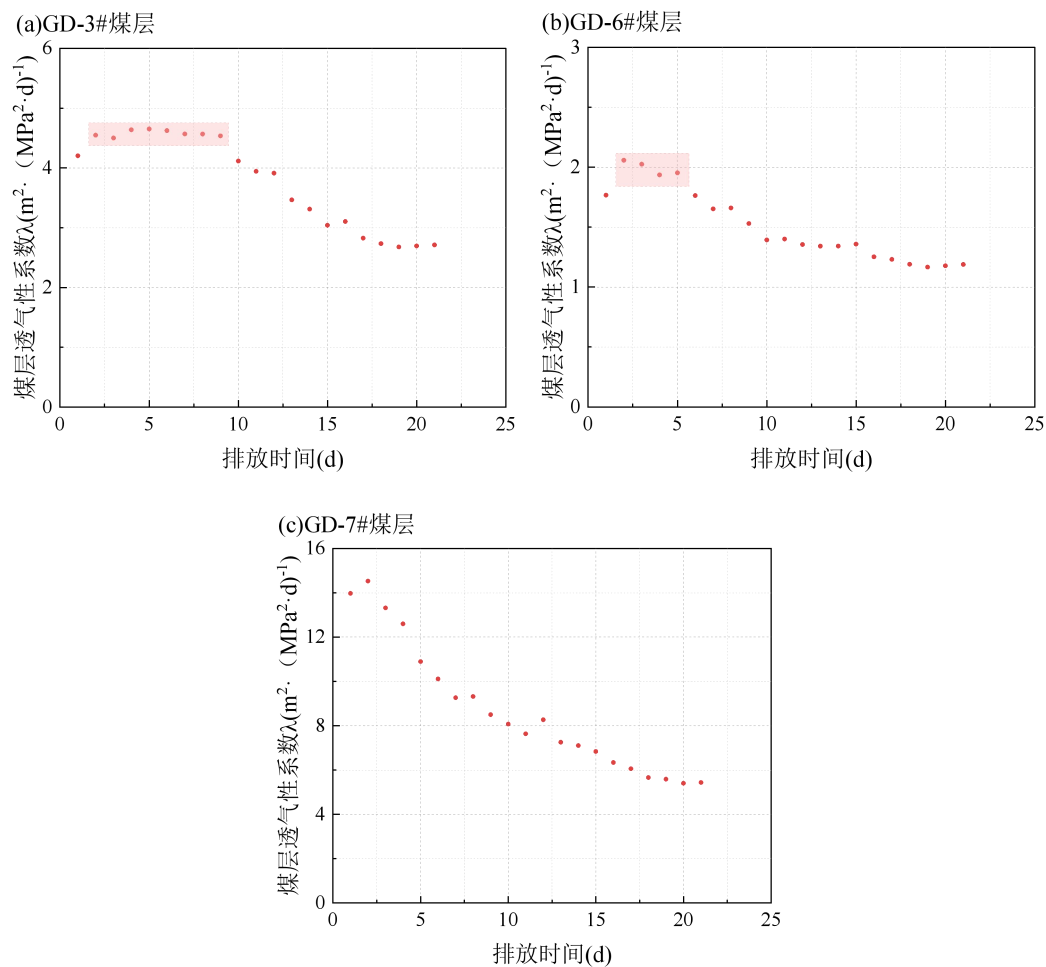


图 9 官地煤矿煤层透气性系数

6.6.2 万峰煤矿煤层透气性系数

万峰煤矿的顺层钻孔的煤层透气性系数如图 10 所示，穿层钻孔的透气性系数如图 11 所示。根据两个顺层钻孔的流量数据计算出的煤层透气性系数在 5-12 天内保持稳定。WF-1 上-1#钻孔的煤层透气性系数在 5-12 天内保持稳定，WF-1 上-2#钻孔的煤层透气性系数在 2-13 天内保持稳定。两个钻在第 9 天的煤层透气性系数均偏小，这是由于当次的流量数据明显偏小。同一煤层的两个钻孔，计算出的透气性系数虽然比较接近，但是有一定的不同，这是由于煤层的裂隙发育不均匀，进而导致透气性系数分布不均匀。

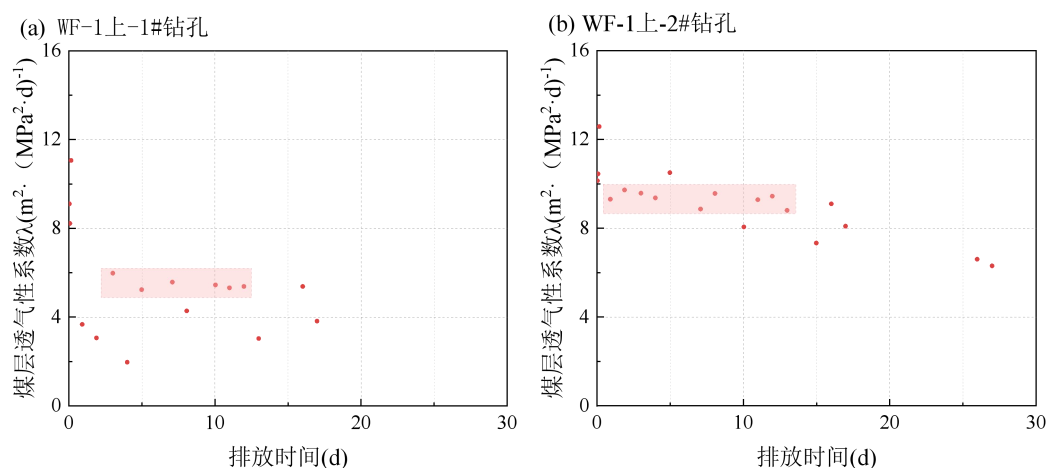


图 10 万峰煤矿顺层钻孔煤层透气性系数

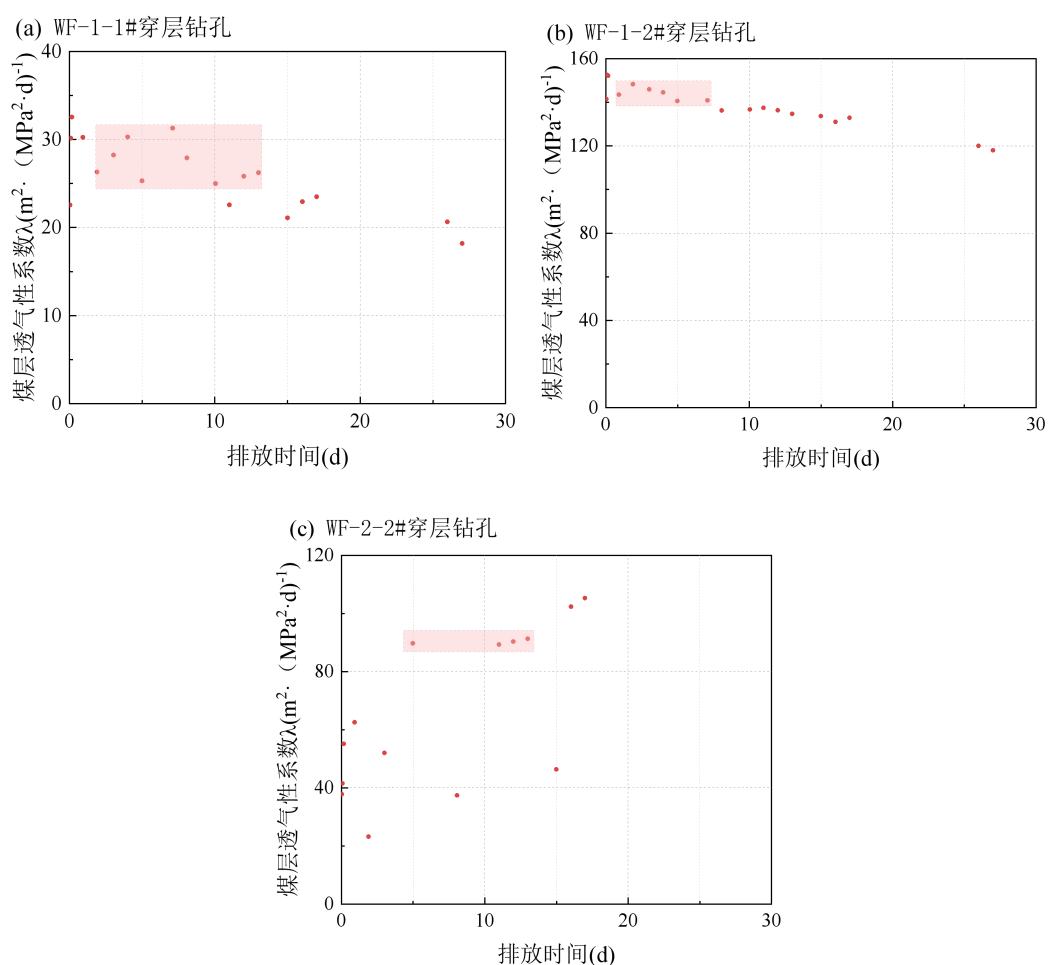


图 11 万峰煤矿穿层钻孔煤层透气性系数

6.6.3 玉溪煤矿煤层透气性系数

玉溪煤矿 3#煤层的煤层透气性系数如图 12 所示。大部分钻孔计算出的煤层透气性系数在 4-11 天内保持稳定，随后呈现逐渐降低的趋势。在第 13-15 天，由于钻孔瓦斯流量异常增大，各钻孔的煤层透气性系数也出现异常的较大值。

在排放期间，煤层透气性系数逐渐增大，随后稳定一段时间后开始下降。这也说明了，在排放初期，随着钻孔影响范围的扩大，顺层钻孔周围煤体的瓦

斯流动情况接近穿层钻孔的情况，这段时间内，可以使用煤层透气性系数的新计算方法或者径向流量法，计算出稳定的煤层透气性系数。当钻孔的影响范围逐渐扩大，顶底板岩石开始影响煤层瓦斯流动时，煤层透气性系数的计算结果变得不稳定。

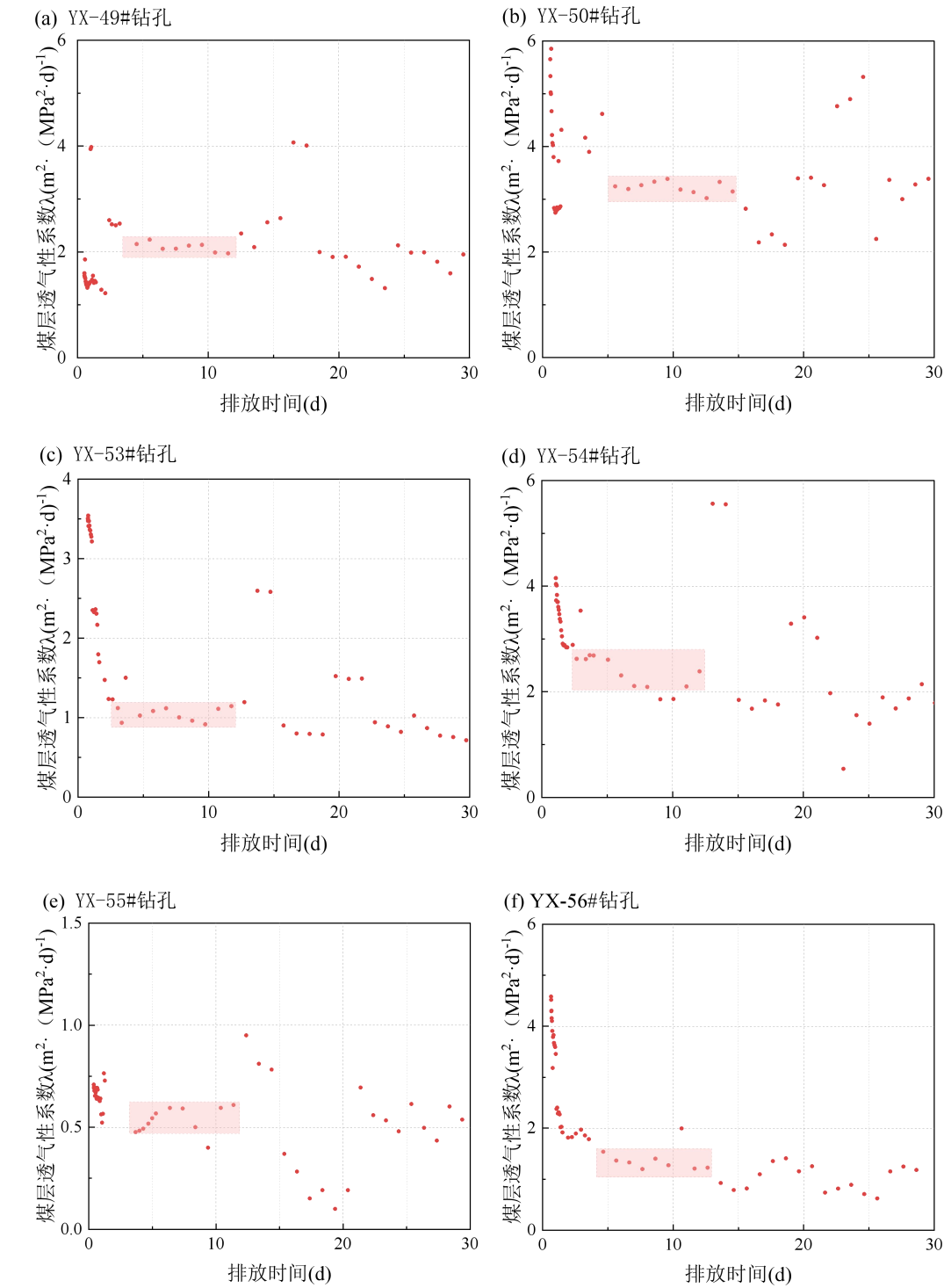


图 12 玉溪煤矿煤层透气性系数

6.7 计算结果分析

6.7.1 顺层钻孔瓦斯流动模型与透气性系数稳定期

在钻孔钻进的过程中，瓦斯涌出自钻孔暴露时开始发生。随着钻孔深度增加，新的钻孔壁不断暴露，不同深度钻孔段的暴露时间存在差异，暴露的时间差由打钻施工速度决定。测定到的单位面积钻孔壁的瓦斯涌出量，是暴露时间不同的各段钻孔的瓦斯涌出量的均值。理论模型默认整个钻孔壁从同一初始时刻开始排放，而实际钻孔不同深度段的排放时间不同。取均值的方法与理论计算结果不一致，因此排放初期的瓦斯涌出速度不能代表钻孔的瓦斯涌出速度，计算出的透气性系数没有代表性。所以初期的流量数据不可用。

随着排放时间的增长，各段钻孔的单位面积钻孔壁的瓦斯涌出速度趋于一致，钻孔的抽采状态进入稳定期。在钻孔的影响范围达到煤层的上下边界之前，钻孔周围的瓦斯流动与钻孔瓦斯径向流动模型相同，计算结果能够稳定反映煤层透气性系数。从官地煤矿的透气性系数随时间的变化也可以看出这一规律。

随着排放时间进一步增长，钻孔的影响范围到达上下边界，并且进一步沿着煤层水平方向扩展，钻孔的抽采状态进入偏离期。这段时间内，钻孔周围的瓦斯流动与理论模型不同。理论计算是将煤体范围视为无限大，钻孔的影响范围呈圆形向外扩散。钻孔周围瓦斯压力等值线为同心圆。而对于顺层钻孔，有限的煤层厚度导致钻孔周围的瓦斯压力等值线无法形成同心圆。进而造成顺层钻孔周围径向瓦斯压力梯度在不同方向上存在差异。钻孔瓦斯流量低于径向流动模型的理论计算值，这导致煤层透气性系数的计算值偏小。实测流量与理论流量之间的差异随着时间增长逐渐增大，计算得到的透气性系数则随之下降。

6.7.2 煤层厚度对煤层透气性系数稳定期的影响

根据三个煤矿钻孔的监测结果可以看出，各煤层透气性系数在一定时间范围内能够保持相对稳定，因此利用顺层瓦斯抽采钻孔计算煤层透气性系数具有可行性。煤层厚度对透气性系数稳定期具有明显影响，不同煤层厚度条件下透气性系数稳定期的开始时间和持续时间存在一定差异。各钻孔煤层厚度与透气性系数稳定期对应关系如表 5 所示。

表 5 煤层厚度与透气性系数稳定期

钻孔	煤层厚度(m)	稳定期开始(d)	稳定期结束(d)	稳定期时长(d)
GD-3	2.26	2	9	7
GD-6	2.31	2	5	4
GD-7	0.75	-	-	-
WF-1 上-1	0.60	3	12	9
WF-1 上-2	0.60	1	13	12
WF-1-1	1.50	2	13	11
WF-1-2	1.50	1	7	6
WF-2-2	1.50	5	13	9
YX-49	6.20	5	12	8
YX-50	6.20	5	15	11
YX-53	6.20	3	12	10
YX-54	6.20	3	12	10
YX-55	6.20	4	12	9
YX-56	6.20	5	12	8

由于顺层钻孔的煤层透气性系数稳定期受煤层厚度影响，对于煤层厚度小

于 1.3m 的薄煤层，稳定期的开始时间在 1d 左右，部分钻孔没有出现稳定期，这是由于煤层较薄。对于煤层厚度在 1.3-3.2m 之间的中厚煤层，稳定期的开始时间在 1-3d，并且持续到 5-9d 左右。对于厚度大于 3.2m 的厚煤层，稳定期的开始时间在 3-5d，持续到 12d 左右。

由表 5 可以看出，在不同矿区的钻孔监测结果中，煤层厚度与透气性系数稳定期之间呈现出较为明显的规律。对于煤层厚度小于 1.3m 的薄煤层，如 WF-1 上-1 (0.60m)、WF-1 上-2 (0.60m) 以及 GD-7 (0.75m) 等钻孔，透气性系数稳定期出现较早，一般在 1d 左右开始，其中部分钻孔未出现明显稳定期。这主要是由于薄煤层中的钻孔难以形成稳定的径向流动，在较短时间内会受到顶底板的影响，难以形成较长时间的稳定流动阶段。对于煤层厚度在 1.3-3.2m 的中厚煤层，如 GD-3 (2.26m)、GD-6 (2.31m)、WF-1-1 (1.50m)、WF-1-2 (1.50m) 及 WF-2-2 (1.50m) 等钻孔，其透气性系数稳定期开始时间一般在 1-3d，并可持续至 5-13d 左右。说明中厚煤层在钻孔施工后能够形成相对稳定的瓦斯流动状态，并保持一定时间的稳定阶段。对于煤层厚度大于 3.2m 的厚煤层，如 YX-49、YX-50、YX-53、YX-54、YX-55 及 YX-56 等钻孔，其煤层厚度均为 6.20m，透气性系数稳定期的开始时间为 1-3d，并可持续至 12-15d 左右。这表明厚煤层中的钻孔能够更晚受到顶底板的影响，稳定阶段的持续时间相对较长。

综上所述，煤层厚度对顺层钻孔透气性系数稳定期具有明显影响。随着煤层厚度的增加，稳定期结束时间总体呈延后趋势，而稳定期持续时间也相对延长。因此，在利用顺层钻孔数据计算煤层透气性系数时，应充分考虑煤层厚度对稳定期的影响，以合理确定数据选取范围，从稳定期内选取透气性系数计算结果，提高计算结果的可靠性。

6.8 煤层瓦斯抽放评估

根据各煤矿的钻孔瓦斯流量和煤层透气性系数，按照透气性系数将煤层瓦斯抽放的难易程度划分为三类，分别为容易抽放、可以抽放和难以抽放，如表 6 所示。

表 6 煤层瓦斯抽放难易程度划分

类别	煤层透气性系数($\text{m}^2/\text{MPa}^2 \cdot \text{d}$)
容易抽放	>10
可以抽放	$10\sim0.1$
难以抽放	<0.1