

文章编号: 1001-1986(2010)02-0014-04

# 煤层应力敏感性及其对压裂液滤失的影响

冯利娟<sup>1</sup>, 郭大立<sup>2</sup>, 曾晓慧<sup>3</sup>, 朱卫平<sup>1</sup>, 刘川庆<sup>1</sup>

(1. 西南石油大学研究生院, 四川 成都 610500; 2. 西南石油大学理学院, 四川 成都 610500;

3. 西南石油大学石油工程学院, 四川 成都 610500)

**摘要:** 压裂液滤失系数是压裂设计中非常重要的参数。由于煤层中的渗透率、孔隙度等物性对应力极为敏感, 在对煤层进行压裂设计时, 若直接用试井和测井测得的渗透率和孔隙度值代入滤失系数的计算公式, 算出的结果可能与实际情况严重不符。通过实验室内不断改变围压的方式来模拟煤储层上覆压力的变化情况, 建立了某盆地煤层应力与渗透率之间的关系, 并在考虑煤层物性应力敏感性的情况下, 探讨了煤层压裂液综合滤失系数的计算方法。结果发现, 压裂液综合滤失系数及岩心渗透率与净围压的关系均符合指数递减规律。另外, 通过对动态渗透率的拟合, 使得到的综合滤失系数远远大于未考虑应力情况下的综合滤失系数, 这样能更准确地反映实际情况。

**关键词:** 煤层; 压裂液; 滤失系数; 应力敏感性

**中图分类号:** P618.11 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2010.02.004

## Experimental study on the stress sensitivity of coal and its impact on the filtration of the fracturing fluid

FENG Lijuan<sup>1</sup>, GUO Dali<sup>2</sup>, ZENG Xiaohui<sup>3</sup>, ZHU Weiping<sup>1</sup>, LIU Chuanqing<sup>1</sup>

(1. Graduate School, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. School of Sciences, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

3. College of Petroleum Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

**Abstract:** The filtration coefficient of fracturing fluid is an important parameter in fracturing design. If the permeability and porosity values obtained from well testing and logging are directly substituted into the equation of calculating filtration coefficient, the results calculated may be entirely different from the practical case, because the petrophysical parameters such as permeability and porosity, etc. are very sensitive to the stress in coal bed. Coal bed reservoir, fractured reservoir and tight sand reservoir are typical sensitive reservoirs. So it is necessary to study the stress sensitivity in coal bed. In the article the relationship between the stress and permeability in the coal reservoir was set up by simulating the coal reservoir pressure suffered by the overlying formation. And the method of calculating overall filtration coefficient during fracturing in coal bed is also generally discussed. The results show that both the overall filtration coefficient and permeability accord with the exponential decline law. Besides, on the basis of fitting of the dynamic permeability, the overall filtration coefficient under the consideration of stress sensitivity is higher than that which doesn't consider the stress sensitivity, which is more practical and can describe the actual situation.

**Key words:** coal bed; fracturing fluid; overall filtration coefficient; stress sensitivity

储层物性应力敏感伤害是指储层随着孔隙流体的产出, 孔隙压力随之降低, 储层所受的上覆岩层压力保持不变, 促使储层内外压差增大, 储层岩石发生弹塑性变形, 渗透率、孔隙度等物性参数也将随之降低的现象。

应力敏感对于煤层气藏、裂缝性油气藏、致密砂岩油气藏具有普遍性。大量现场实践和室内实验已经表明, 煤层气藏、裂缝性油气藏和致密砂岩油

气藏等为典型的应力敏感油气藏, 即随着开采的进行, 储层孔隙压力降低, 地层有效应力增加, 致使储层渗透率大幅度降低。因此, 对煤层应力敏感性的研究, 显得非常必要。

### 1 煤层应力敏感性实验

对于煤层气藏, 随着开采的进行, 储层孔隙压力降低, 储层渗透率大幅度降低, 而孔隙度变化很

收稿日期: 2009-05-18

作者简介: 冯利娟(1985—), 女, 江苏宿迁人, 硕士研究生, 从事水力压裂及最优化方向研究。

小。这种变化规律可近似地处理为: 忽略孔隙度的变化, 储层渗透率与地层净应力的关系呈指数递减规律, 即:

$$K = K_0 e^{-\gamma(P-P_0)}$$

式中  $K$  为动态渗透率, 即压力  $P$  下的渗透率,  $\mu\text{m}^2$ ;  $K_0$  为压力  $P_0$  下的渗透率,  $\mu\text{m}^2$ ;  $\gamma$  为渗透率指数递减系数,  $1/\text{MPa}$ 。

上述计算动态渗透率的经验公式由 McKee 提出, 同样适用于压裂过程及压后生产过程中动态渗透率与净围压(有效应力)的关系。

为定量研究某盆地煤层应力敏感性, 笔者进行了应力敏感性实验。该实验是将岩样在常温常压下测定渗透率后, 再加以设定的压力, 测定加压后岩样渗透率的变化以及压力撤销或减小后岩样的渗透率变化情况。

实验按围压分别为 1 MPa、3 MPa、6 MPa、9 MPa、12 MPa、9 MPa、6 MPa、3 MPa、1 MPa 的变化进行, 测定在给定压力下的渗透率情况。采用天然煤样, 钻取天然煤心 10 块。表 1 是进行煤样的应力敏感性实验用的岩样基本数据; 图 1 是岩心渗透率随有效覆压变化的关系曲线; 表 2 是不同覆压下渗透率变化规律。从实验结果可以看出, 岩心渗透率普遍较低, 为 1~10 mD, 渗透率随有效覆压的变化较大。当有效覆压增加到 12 MPa 时, 其渗透率均已降到初始值的 10% 以下。同时, 实验结果表明, 当有效压力由小增大时, 储层渗透率由大到小变化, 其下降幅度由大到小; 当有效压力由大往回变小时, 储层渗透率由小到大变化, 即向原始值的方向恢复, 但无法恢复到原来的数值水平。这主要是岩石变形中包含有部分塑性变形的缘故, 使得储层岩石留下了部分永久变形。部分实验结果见图 2(编号为 E 的实验结果)。

表 3 是 6 块岩心渗透率随有效覆压的变化情况。可以看出, 当覆压增至 12 MPa 时, 岩心剩余渗透率为 1.78%~5.14%, 均在 10% 以下。当覆压回复至 1 MPa 时, 岩心渗透率损失为 55.12%~78.48%。

进一步对实验结果进行数据处理。利用线性回归方法, 对 6 块岩心的渗透率与有效覆压的变化关系进行了数据处理。本文仅取一例即 E 号岩心的升压过程测得的数据见表 4。

应用线性回归的拟合情况见图 3, 即动态渗透率与净围压的关系为:

$$K = 9.0516 e^{-0.272P}$$

取压力  $P_0$  为一个标准大气压, 从而动态渗透率与净围压的关系式为:

$$K = 8.8087 e^{-0.272(P-P_0)}$$

表 1 实验岩样基本数据

Table 1 Basic data about the experimental rock samples

岩心编号	长度/cm	直径/cm	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$
B	4.558	2.538	9.625 1
C	4.818	2.536	1.131 8
E	2.753	2.531	7.193 4
F	4.618	2.538	1.178 6
G	2.462	2.539	4.687 7
H	4.533	2.536	1.100 6

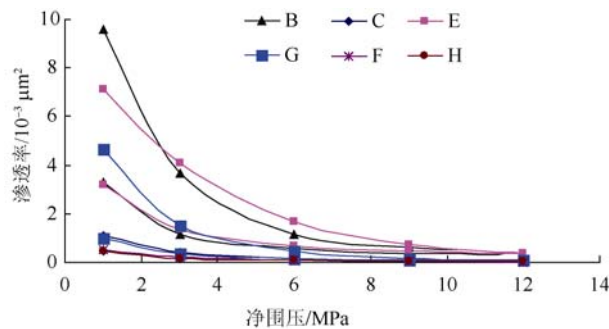


图 1 岩心渗透率与有效覆压关系曲线

Fig. 1 Relationship between core permeability and effective overburden pressure

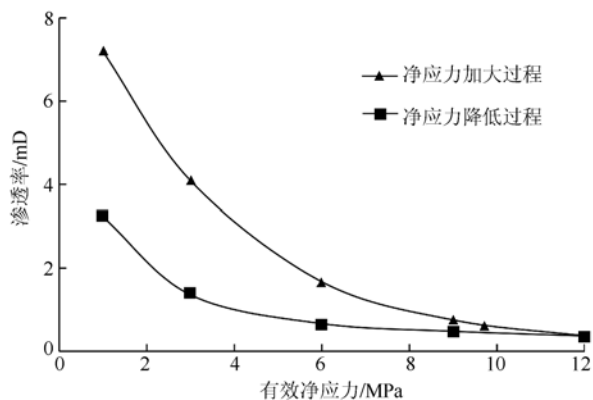


图 2 E 号岩心应力敏感曲线

Fig. 2 Stress sensitivity curve of the core E

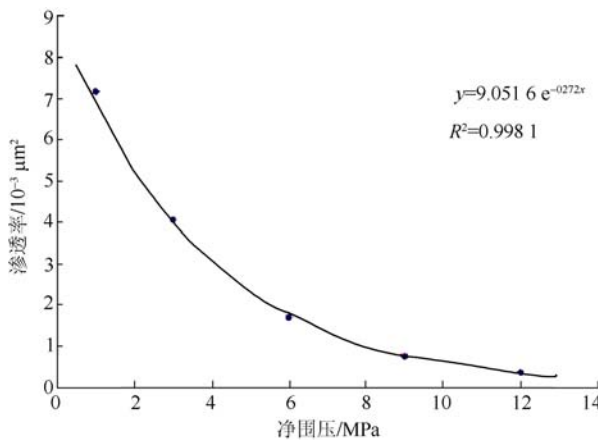


图 3 E 号岩心应力敏感实验数据的拟合

Fig. 3 Fitting of experimental data about stress sensitivity curve of core E

表 2 不同覆压下渗透率变化规律  
Table 2 Change of permeability under different overburden pressure

岩心 编号	有效围压 1 MPa	有效围压 6 MPa		有效围压 12 MPa		有效围压 1 MPa	
	渗透率 / $10^{-3} \mu\text{m}^2$	渗透率 / $10^{-3} \mu\text{m}^2$	百分数 /%	渗透率 / $10^{-3} \mu\text{m}^2$	百分数 /%	渗透率恢复 / $10^{-3} \mu\text{m}^2$	百分数 /%
B	9.625 1	1.171 4	12.17	0.350 4	3.64	3.305 1	34.34
C	1.131 8	0.162 6	14.37	0.037 0	3.27	0.480 0	42.41
E	7.193 4	1.671 9	23.24	0.369 8	5.14	3.228 2	44.88
F	1.178 6	0.225 2	19.10	0.052 6	4.46	0.377 2	32.00
G	4.687 7	0.463 3	9.88	0.083 4	1.78	1.008 8	21.52
H	1.100 6	0.209 0	18.99	0.053 7	4.88	0.455 3	41.37

表 3 岩心渗透率随有效覆压的变化情况  
Table 3 Core permeability change with effective overburden pressure

岩心 编号	初始渗透率 / $10^{-3} \mu\text{m}^2$	增压至 12 MPa			减压至 1 MPa		
		渗透率 / $10^{-3} \mu\text{m}^2$	剩余 /%	损失 /%	渗透率 / $10^{-3} \mu\text{m}^2$	剩余 /%	损失 /%
B	9.625 1	0.350 4	3.64	96.36	3.305 1	34.34	65.66
C	1.131 8	0.037 0	3.27	96.73	0.480 0	42.41	57.59
E	7.193 4	0.369 8	5.14	94.86	3.228 2	44.88	55.12
F	1.178 6	0.052 6	4.46	95.54	0.377 2	32.00	68.00
G	4.687 7	0.083 4	1.78	98.22	1.008 8	21.52	78.48
H	1.100 6	0.053 7	4.88	95.12	0.455 3	41.37	58.63

表 4 E 号岩心应力敏感实验数据  
Table 4 Experimental data about stress -sensitive core E

序号	净围压/MPa	上流压力/MPa	流量/ $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$	校正流量/ $\text{mL} \cdot \text{s}^{-1}$	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$
1	1	0.5	560.2	9.490 1	7.144 5
2	3	0.5	318.4	5.393 9	4.060 7
3	6	0.5	130.2	2.205 7	1.660 5
4	9	0.5	58.6	0.992 7	0.747 4
5	12	0.5	28.8	0.487 9	0.367 3

注：岩心长度 2.753 cm；岩心直径 2.531 cm；实验温度 22.0℃；实验大气压 97.42 kPa；氮气粘度 0.017 217 5 mPa·s。

## 2 煤层应力敏感性对压裂液滤失的影响

在压裂过程中，由于缝内外存在压力差，导致压裂液由壁面向地层滤失。压裂液滤失是正常的，但滤失过多会产生诸多不利影响。对于煤层气藏，由于其应力敏感性，渗透率的变化必然影响压裂液滤失系数，进而影响到压裂设计和模拟的正确性和合理性，因此必须从应力敏感的角度计算出动态渗透率，从而计算出压裂液综合滤失系数。

受压裂液粘度控制、对地层渗透率敏感的滤失系数  $C_1$  为：

$$C_1 = 0.171 \left( \frac{K \Delta P \phi}{\mu_a} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

式中  $C_1$  为受压裂液粘度控制、对地层渗透率敏感的滤失系数， $\text{m}/\text{min}^{0.5}$ ； $K$  为动态渗透率， $\mu\text{m}^2$ ； $\Delta P$  为缝内外压差，MPa； $\phi$  为地层孔隙度，无因次； $\mu_a$  为压裂液粘度， $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

受地层流体压缩性控制、对地层渗透率敏感的

滤失系数  $C_2$  为：

$$C_2 = 0.138 \Delta P \left( \frac{K C_f \phi}{\mu} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

式中  $C_2$  为受地层流体压缩性控制、对地层渗透率敏感的滤失系数， $\text{m}/\text{min}^{0.5}$ ； $C_f$  为地层流体压缩系数， $1/\text{MPa}$ ； $\mu$  为地层流体粘度， $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

煤层压裂一般采用活性水或清洁压裂液，均不会在裂缝壁面形成滤饼。因此计算压裂液综合滤失系数时，一般不考虑压裂液造壁性。此时，压裂液综合滤失系数  $C$  为：

$$C = \frac{2C_1 C_2}{C_1 + \sqrt{C_1^2 + 4C_2^2}}. \quad (3)$$

若用式(1)、式(2)和式(3)，直接采用实测的煤层渗透率、综合压缩系数和孔隙度数据，计算出来的滤失系数结果比现场得到的结果小几倍。这正是煤层物性应力敏感性造成的。在进行压裂施工时，随着压裂液的注入，地层孔隙压力增大，原始天然裂

缝重新开启，导致渗透率、孔隙度、裂缝系统孔隙体积压缩系数发生改变。考虑到在进行压裂施工时，压裂液的注入增大了地层孔隙压力，引起地层有效应力的改变。因此，有必要考虑并对比煤层应力敏感性对压裂液综合滤失系数的影响。

为此，选取典型数据如下：地层压力为 5.72 MPa，井底破裂压力为 26.8 MPa，即缝内外压差为 21.08 MPa；压裂液为活性水，粘度为 1 mPa·s；

地层孔隙度为 0.01，地层流体粘度为 1 mPa·s，地层流体压缩系数为 0.1(1/MPa)。对于不同的净围压，根据动态渗透率与净围压的关系式可计算出不同的动态渗透率，再根据这些动态渗透率，分别计算出压裂液综合滤失系数  $C$  等参数，计算结果见表 5，拟合曲线见图 4。从图 4 可以看出，压裂液综合滤失系数与净围压的关系也符合指数递减规律，即满足：

$$C = 0.0049e^{-0.136P}$$

表 5 煤层应力敏感性对压裂液综合滤失系数的影响  
Table 5 Stress sensitivity of coal and its impact on the overall filtration coefficient of the fracturing fluid

$P$ /MPa	$K$ / $10^{-3} \mu\text{m}^2$	$C_1$ /m·min $^{-0.5}$	$C_2$ /m·min $^{-0.5}$	$C$ /m·min $^{-0.5}$
1	7.144 5	0.006 636 17	0.007 775 63	0.004 383 284
2	5.253 7	0.005 690 68	0.006 667 80	0.003 758 775
3	4.060 7	0.005 003 02	0.005 862 06	0.003 304 564
4	3.049 4	0.004 335 49	0.005 079 92	0.002 863 656
5	2.323 2	0.003 784 21	0.004 433 97	0.002 499 522
6	1.660 5	0.003 199 27	0.003 748 60	0.002 113 164
7	1.348 4	0.002 882 97	0.003 378 00	0.001 904 246
8	1.027 3	0.002 516 40	0.002 948 48	0.001 662 12
9	0.747 4	0.002 146 39	0.002 514 93	0.001 417 719
10	0.596 3	0.001 917 18	0.002 246 37	0.001 266 328
11	0.454 3	0.001 673 41	0.001 960 74	0.001 105 312
12	0.367 3	0.001 504 67	0.001 763 03	0.000 993 858

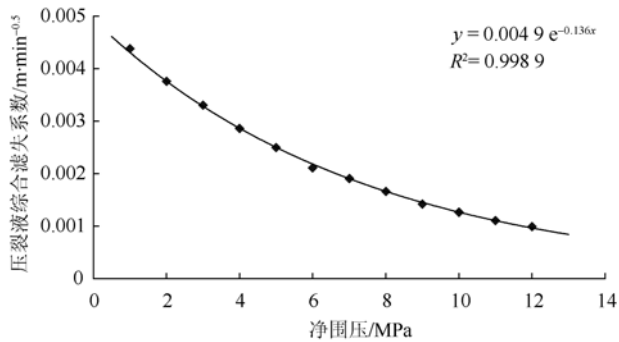


图 4 压裂液综合滤失系数与净围压的关系  
Fig. 4 Relation between the overall filtration coefficient of the fracturing fluid and net confining pressure

3 结 论

- a. 由于应力场和渗流场发生耦合作用的机制十分复杂，通过实验建立了不同的岩心渗透率与有效应力的函数关系，从而计算出煤层的综合滤失系数，为开发煤层气藏提供了一些理论基础。
- b. 由实验结果看出，当有效压力由小增大时，储层渗透率由大到小变化，其下降幅度由大到小；当有效压力由大往回变小时，储层渗透率由小到大变化，即向原始值的方向恢复，但无法恢复到原来的数值水平。这主要是岩石变形中包含有部分塑性变形的缘故，使得储层岩石留下了部分永久性变形。因

此对于煤层气藏，压敏伤害是永久而不可逆的。

c. 本文模型充分利用了实验数据，考虑了影响滤失的几个实验参数，例如时间、流量等。通过煤层物性的应力敏感性试验，对动态渗透率进行模拟，所得综合滤失系数远远大于未考虑应力情况下的综合滤失系数，这样能更准确地反映实际情况。

参考文献

[1] 曾晓慧，郭大立，王祖文，等．压裂液综合滤失系数的计算方法研究[J]．西南石油学院学报，2005，27(5)：53–56.

[2] 席先武，郑丽梅．煤层压裂液滤失系数计算方法探讨[J]．钻井工程，2001，21(3)：45–46.

[3] 黄远智，王恩志．低渗透岩石渗透率对有效应力敏感系数的试验研究[J]．岩石力学与工程学报，2007，26(2)：410–413.

[4] 才博，王欣，蒋廷学，等．利用不同技术方法进行压裂滤失系数分析[J]．中国西部油气地质，2007，3(1)：116–118.

[5] 埃克诺米德斯 J，诺尔特 G．油藏增产措施[M]．张宝平，蒋阡，刘立云，等，译．北京：石油工业出版社，2002.

[6] 古发刚，任书泉．多种因素下的滤失速度计算模型[J]．西南石油学院学报．1991，13(2)：65–71.

[7] 梁兵，郭建春．一种多参数的压裂液滤失模型[J]．天然气勘探与开发，2007，30(4)：52–55.

[8] 吴凡，孙黎娟，何江．孔隙度、渗透率与净覆压的规律研究和应用[J]．西南石油学院学报，1999，21(4)：23–25.

[9] ECONOMIDES M J，NOLTE K G．油藏增产技术(第三版)[M]．张保平译．北京：石油工业出版社，2002.