

气液二相流体裂缝渗流规律的模拟实验研究*

赵阳升 胡耀青 杨 栋 郑少河

(太原理工大学采矿工艺研究所 太原 030024)

1 引言

气液二相流体的渗流问题是石油、天然气开采、地热开发、煤层气开采、煤炭地下气化和环境工程等极其广泛的工程领域普遍存在的问题。气液二相流体的渗流是典型的不溶混流体渗流问题。同时,由于气体为可压缩流体,在渗流过程中,随着渗透压力的变化,其气体表现了剧烈的体积变化,因而也表现了二相流体剧烈的体积变化及其相对饱和度的变化,在孔隙与裂缝中,气液二种不溶混流体表现出相互阻碍制约的复杂渗流形态,可以说是一类极其复杂的渗流问题。

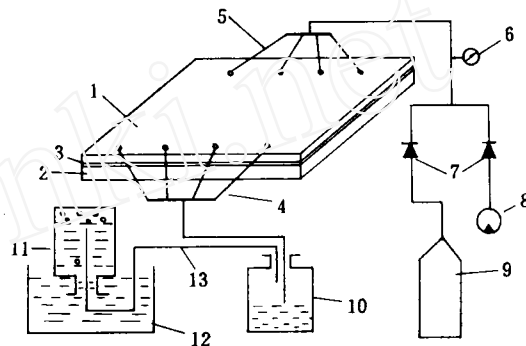
由于问题本身的复杂性,致使这一问题在国内国外均研究很少,关于二相流体渗流问题的研究,主要集中在不同粘度的液体方面^[1,2],而关于气液组成的二相流体则研究很少。从1997年开始,开展了该方面的实验研究,其目的是通过实验揭示气液二相流体沿岩石裂缝的渗流物性规律。但在实际岩石裂缝实验中,发现水或气体的相对饱和度对渗流有较大影响,为此进行了本模拟实验,目的是直观地揭示这一复杂现象。

2 二相渗流模拟实验方法

2.1 实验装置

为直观地观察、研究、揭示气液二相流体在裂缝中的复杂渗流现象及其规律,研制了裂缝渗流模拟实验装置,其结构原理如图1所示。二相流体裂缝渗流模拟实验装置主要由3大部分组成:(1)模拟裂缝装置,主要由上下有机玻璃板、裂缝宽度调节密封条、上下板夹紧装置和注、排流体接口所组成。(2)复合流体注入系统,主要由压力表、单向阀、水泵和

高压气瓶及其管路组成。(3)复合流体收集与分离系统,主要由集水瓶、集气瓶、水槽和管路组成。



1. 有机玻璃上压板 2. 有机玻璃下压板 3. 裂缝宽度调节密封带
4. 复合流体排放管 5. 复合流体注入管 6. 压力表 7. 单向阀
8. 水泵 9. 气瓶 10. 集水瓶 11. 集气瓶 12. 水槽 13. 集气管

图1 二相流体裂缝渗流模拟实验装置示意图

Fig. 1 Diagram of simulation testing equipment of seepage with two-phase fluid in fissure

2.2 实验方法

实验用流体选用空气和水。将水和空气分别同时经过两个单向阀注入模拟裂缝,其相对饱和度可以通过水泵和气瓶开关调节,复合流体压力由压力表读取,气水二相流体通过裂缝渗流,进入流体收集与分离系统,分别收集空气和水。记录确定时间段内的气体和水的排量,则可以获得气液二相流体在裂缝中的渗流规律。气液二相流体在裂缝中的渗流现象,尤其是气体与水为不溶混渗流,气体体积随渗流过程膨胀,及其气水相互制约,障碍渗流通道等特殊现象,可以清楚地从有机玻璃板观察和拍照,若水中加入红色示踪剂,则更易观察。

实验中模拟裂缝宽度选择为0.1 mm, 0.08 mm, 0.05 mm三种,流体压力在各个方案中选择1, 1.5,

1998年4月3日收到初稿,1998年10月21日收到修改稿。

* 国家杰出青年科学基金资助项目(59625409)。

作者 赵阳升 简介:男,43岁,1992年于同济大学地下工程结构工程专业获博士学位,现任教授、博士生导师、研究所副所长,主要从事岩石力学与采矿工程方面的研究工作。

2.0, 3.0 个大气压, 气体相对饱和度在 0~100% 之间变化, 间隔测试十余个点。

3 实验结果

大量裂缝渗流研究证明^[1~5], 其渗流物性规律仍然服从 Darcy 定律, 为此本文按照 Darcy 定律, 分别整理水和气体的测试数据。气体裂缝渗透系数计算公式为

$$K_{fg} = \frac{QL}{A(P_1 - P_2)} \quad (1)$$

式中: Q 为气压等于 $(P_1 - P_2)/2$ 时的气体流量。设 Q_0 为 P_0 等于 1 个大气压时的气体排量, 则

$$Q = 2P_0Q_0/(P_1 + P_2) \quad (2)$$

将式(2)代入式(1), 则有

$$K_{fg} = \frac{2P_0Q_0L}{A(P_1^2 - P_2^2)} \quad (3)$$

水的裂缝渗透系数计算公式为

$$K_{fw} = \frac{QL}{A(P_1 - P_2)} \quad (4)$$

式中: L 为模拟裂缝渗流长度, A 为裂缝渗流面积, P_1 和 P_2 分别为进出口流体压力, K_{fg} 与 K_{fw} 分别为裂缝气、水渗透系数。

由于二相流体渗流中, 气体与液体相对排量或相对饱和度不同, 它们对渗流规律的影响也不相同, 本研究提出了按流体在确定压力下的体积计算其相对饱和度的计算公式为

水相对饱和度: $S_w = \text{单位时间内水的排量} / (\text{单位时间内水排量} + \text{单位时间内气体排量})$

气体相对饱和度: $S_g = 1 - S_w$

按照以上公式整理实验数据, 结果见表 1。

4 结果分析

经过详细的实验数据分析, 可知气液二相流体在光滑裂缝中的渗流有如下规律:

(1) 在气液二相流体沿裂缝渗流中, 水的相对渗透系数随水相对饱和度 S_w ($S_g = 1 - S_w$) 呈线性规律增加, 如图 2 所示, 其拟合公式为

$$K_{fw} = aS_w + b$$

不同模拟裂缝的拟合公式如表 2 所示。

(2) 在气液二相流体沿裂缝渗流中, 气体相对渗透系数随水相对饱和度 S_w ($S_g = 1 - S_w$) 呈负指数规律衰减, 如图 3 所示, 其拟合公式为

$$K_{fg} = ae^{(-\eta S_w)}$$

式中: η 为与流体性质有关的气体饱和度影响系数, 不同模拟裂缝的拟合公式如表 3 所示。

表 1 气-水二相流体裂缝渗流实验结果

Table 1 Seepage test results in fissure with two phase fluid of gas and water

压力/MPa	K_{fw} /cm·s ⁻¹	K_{fg} /cm·s ⁻¹	S_w /%	缝宽 /mm
0.150	0.000 00	337.301 00	0.000	0.05
0.150	0.050 60	177.510 00	1.120	
0.150	0.316 34	31.126 80	11.792	
0.150	0.379 13	29.397 60	19.645	
0.150	0.409 65	17.442 20	25.889	
0.150	0.478 44	11.937 30	33.379	
0.150	0.505 37	11.517 60	37.908	
0.150	0.597 00	8.867 20	47.322	
0.150	0.539 42	3.402 20	61.309	
0.150	0.595 81	3.479 80	63.116	
0.150	0.722 96	1.744 50	70.787	
0.200	0.256 85	77.729 64	8.869	0.05
0.200	0.592 39	49.033 27	20.660	
0.200	0.685 04	42.523 61	23.137	
0.200	0.788 88	26.415 12	33.632	
0.200	0.908 32	21.431 20	41.772	
0.200	1.461 60	5.162 13	71.001	
0.150	0.124 06	216.482 50	4.933	0.08
0.150	0.187 58	108.897 40	14.766	
0.150	0.214 10	81.427 07	15.672	
0.150	0.272 20	43.957 80	16.400	
0.150	0.384 23	23.106 27	33.550	
0.150	0.446 17	19.176 41	40.687	
0.150	0.480 21	12.492 84	44.383	
0.150	0.592 99	10.814 58	47.854	
0.150	0.695 54	6.815 16	53.846	
0.150	0.704 95	1.374 08	59.851	
0.150	1.236 00	0.121 11	99.101	
0.200	0.052 47	266.884 90	2.528	0.08
0.200	0.100 40	226.925 00	7.539	
0.200	0.122 82	121.993 90	14.815	
0.200	0.355 80	77.956 17	23.197	
0.200	0.811 16	38.088 37	32.215	
0.200	0.837 55	21.649 65	45.991	
0.200	0.861 50	19.233 02	51.720	
0.200	0.964 52	17.723 98	57.143	
0.200	1.027 10	6.972 66	59.550	
0.200	1.452 84	4.989 90	74.435	
0.200	2.143 20	2.544 96	89.380	
0.200	2.572 22	0.000 00	100.000	

表 2 水相对渗透系数拟合公式表

Table 2 Fitting formulat of relative permeability of water

缝宽 /mm	裂缝二相流 体压力/MPa	拟合公式	相关系数
0.05	0.15	$K_{fw} = 0.0057 S_w + 0.2692$	0.8855
0.05	0.20	$K_{fw} = 0.0183 S_w + 0.1757$	0.9796
0.08	0.15	$K_{fw} = 0.0118 S_w + 0.0246$	0.9821
0.08	0.20	$K_{fw} = 0.0244 S_w - 0.2692$	0.9402

表 3 气体相对渗透系数拟合公式表

Table 3 Fitting formulat of relative permeability of gas

缝宽 /mm	裂缝二相流 体压力/MPa	拟合公式	相关系数
0.05	0.15	$K_{fg} = 89.908e^{(-0.0525S_w)}$	0.9312
0.05	0.20	$K_{fg} = 118.7e^{(-0.0436S_w)}$	0.9962
0.08	0.15	$K_{fg} = 300.99e^{(-0.0775S_w)}$	0.9647
0.08	0.20	$K_{fg} = 286.31e^{(-0.0545S_w)}$	0.9794

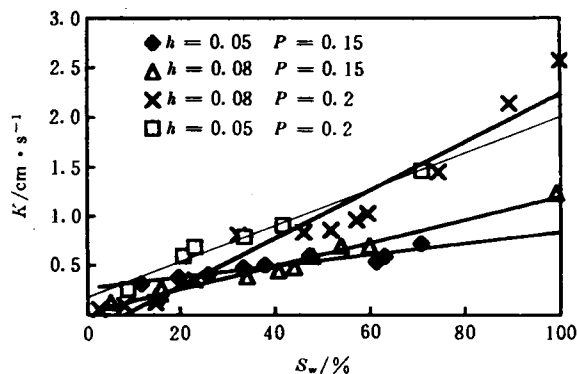


图 2 水相对渗透系数随水相对饱和度的变化曲线
Fig. 2 Variation of relative permeability of water with relative saturation of water

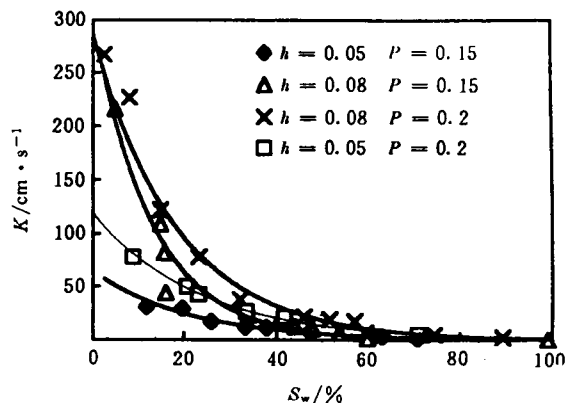


图 3 气体相对渗透系数随水相对饱和度的变化曲线
Fig. 3 Variation of relative permeability of gas with relative saturation of water

通过本模拟实验，揭示了二相流体在沿裂缝的渗流中，水相对饱和度(同样气体相对饱和度)对水(或气体)相对渗透系数影响的规律，对于深入研究二相流体沿裂缝的渗流规律具有较大的参考价值。当然这仅仅是初步研究，对于如此复杂的气液二相流体渗流问题，还需要进行大量扎实的实验研究，才能真正地给出实用的规律。

参 考 文 献

- 1 Helba A. A. Percolation theory of two phase relative permeability. SPE Reservoir Engineering, 1992, (2): 123~132
- 2 周维垣. 高等岩石力学. 北京: 水利电力出版社, 1990, 272~273
- 3 陶振宇. 关于岩石水力模型. 力学进展, 1994, (3): 409~417
- 4 赵阳升. 矿山岩石流体力学. 北京: 煤炭工业出版社, 1994
- 5 Dvan T, Golf-Racht. 裂缝油藏工程基础. 陈钟祥, 金玲年, 秦同洛译. 北京: 石油工业出版社, 1989, 97~162

A SIMULATION TESTING STUDY ON SEEPAGE LAW OF GAS-LIQUID TWO-PHASE FLUID IN FISSURE

Zhao Yangsheng Hu Yaoqing Yang Dong Zheng Shaohe

(Mining Technology Institute, Taiyuan University of Technology and Science, Taiyuan 030024)

国际岩土工程与地质工程会议(GeoEng 2000)
2000 年将在墨尔本召开

由国际工程地质学会、国际土力学与岩土工程学会及国际岩石力学学会联合发起，将于 2000 年 11 月 19~24 日在澳大利亚墨尔本召开国际岩土工程与地质工程会议(GeoEng 2000)。有关这次会议的详细信息请通过如下地址获取：

Max Ervin

ICMS Pty Ltd.

84 Queensbridge St.

Southbank, 3006 Victoria

Australia

电 话: (+61-3)9682 0244, 传真: (+61-3)9682 0288, 电子邮件: geoeng2000@icms.com.au

网 址: http://civil-www.eng.monash.edu.au/discipln/mgg/geo2000.htm