

中、高煤阶煤岩压裂裂缝导流能力实验研究

邹雨时, 马新仿, 王 雷, 林 鑫

(中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室, 北京 102249)

摘 要: 运用 FCES-100 长期裂缝导流仪, 测试了中、高煤阶煤岩水力裂缝的长期导流能力, 并考虑了煤粉对导流能力的伤害, 提出了简易测试煤层复杂裂缝导流能力的方法。通过室内实验测试分析认为, 不同煤阶煤岩由于力学性质等的不同, 在相同条件下其导流能力有明显的差异, 煤层水力压裂施工设计中应考虑煤阶对裂缝导流能力的影响; 支撑剂嵌入对煤岩裂缝导流能力伤害严重, 适当增加铺砂浓度、加大支撑剂粒径、压裂液中加入分散剂可以降低支撑剂嵌入和煤粉的伤害; 裂缝形态对煤岩的导流能力也存在影响, 多条裂缝与单一裂缝的导流能力不同。

关键词: 煤阶; 煤粉; 裂缝形态; 导流能力; 压裂

中图分类号: P618.11

文献标志码: A

Experimental evaluation of conductivity of fracturing in medium and high-rank coal beds

ZOU Yu-shi, MA Xin-fang, WANG Lei, LIN Xin

(State Key Laboratory of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China)

Abstract: The long-term conductivity of hydraulic fractures in medium-rank and high-rank coal bed was tested by using of FCES-100 fracture long-term flow conductometer, considering the damage of coal powder on fracture conductivity, and put forward a simple method for testing complex fracture conductivity in coal beds. According to the analysis on laboratory experiment, for different ranks of coal beds, conductivity at the same conditions varies sharply due to the differences of mechanical properties. Therefore, the influence of coal ranks on fracture conductivity shall be taken into consideration in coal bed hydraulic fracturing design. Proppant embedment can pose a great damage on fracture conductivity of coal bed. However, increasing the sand concentration, enlarging the proppant diameter and adding dispersant into the fracturing fluid appropriately can decrease the embedment of proppant and lower the damage of coal powder. Fracture morphology also plays an important role on the conductivity of fractures and conductivity of multiple fractures is different from that of single fracture.

Key words: coal rank; coal powder; fracture morphology; conductivity; fracturing

煤阶是煤变质程度的重要指标。不同煤阶煤岩的结构和力学性质有一定的差异。中阶煤和高阶煤相比, 具有强度低、脆度大、裂隙发育、更易破碎等特点^[1]。岩石杨氏模量影响着支撑剂的嵌入程度, 随着岩石杨氏模量的增加, 支撑剂的嵌入深度越来越小^[2]。煤粉产生也与煤岩性质密切相关, 软煤层更易产出煤粉^[3]。煤粉在支撑剂填充裂缝孔隙中运

移, 当遇到喉道时, 便开始堆积、堵塞, 使裂缝导流能力大幅度下降, 这对于煤层气开采是非常不利的。由于煤岩自身特点, 形成的水力裂缝形态复杂, 如“T”型缝、“多条垂直裂缝”、“爪”型缝、复杂裂缝“网络”等^[4-6], 其评价方法也应有特殊性。一般对煤储层水力裂缝导流能力的研究只是针对单一裂缝, 没有考虑裂缝形态的影响, 也没有考虑煤阶、煤粉伤害的影

响^[7-9]。因此,本文主要针对上述存在的问题进行了重点研究。

1 实验仪器及实验条件

实验仪器: FCES-100 导流仪; 实验流体: 2% 的 KCl 溶液, 流体流量 2~5 mL/min; 实验温度: 40 ℃; 实验压力: 10、15、20、25、30 MPa, 共 5 个测试压力点; 实验时间: 单点 50 h; 支撑剂类型: 石英砂(10~20、20~40 目)。

2 煤样制备

实验选用中煤阶和高煤阶煤岩。将天然煤岩加工成岩板实验试件, 尺寸为长 17.7 cm、宽 3.8 cm、厚 1~2 cm, 端部成半圆形, 如图 1 所示。

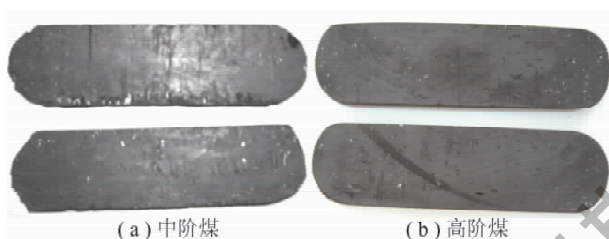


图 1 不同煤阶煤岩板照片

Fig. 1 Plot of different rank coal

3 实验方法及方案

实验利用 FCES-100 导流仪, 在导流室中夹持煤片模拟煤层裂缝, 将实验流体以稳定的流速通过两片煤板之间的支撑剂填充层, 逐渐增大闭合压力得到裂缝导流能力随闭合压力变化的曲线^[10-12]。通过改变煤岩类型、煤粉浓度、铺砂浓度、支撑剂粒径及组合、裂缝形态等实验条件得出不同情况下闭合压力与导流能力关系的曲线, 然后将不同的曲线进行比较得出相应的实验结论。

4 实验结果与分析

4.1 支撑剂嵌入对导流能力的影响

实验选用 20~40 目石英砂, 采用 10 kg/m² 铺砂浓度, 用钢板和煤岩(高煤阶和中煤阶) 分别进行实验, 实验结果如图 2 所示。

由图 2 可以看出, 使用钢板(无嵌入)测得的导流能力明显大于使用煤岩测得的导流能力, 说明支撑剂在煤岩中的嵌入伤害程度很大。研究资料表明: 当闭合压力达到一定值时, 嵌入伤害才表现出来^[13], 砂岩当闭合压力大于 25 MPa 时, 嵌入伤害才比较明显^[8], 而煤岩在较低的闭合压力(低于 15 MPa) 下嵌入伤害就表现的十分明显。

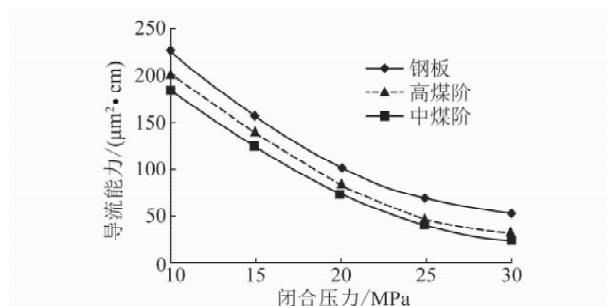


图 2 钢板、煤岩对导流能力的影响

Fig. 2 Effect of steel and coal on conductivity

由于两种煤阶煤岩的强度不同, 导流能力表现出了一定的差异。中阶煤比高阶煤嵌入更严重, 同一闭合压力下, 中阶煤的导流能力更小, 下降幅度越大。嵌入伤害越严重, 裂缝壁面嵌入部分产生的煤粉碎屑越多, 对支撑裂缝内的流体流动阻碍更大, 使得导流能力进一步下降。

4.2 煤粉对导流能力的影响

实验选用 20~40 目石英砂, 采用 10 kg/m² 铺砂浓度, 混入 2% 的煤粉(≤20~40 目), 对高阶煤进行实验, 实验结果如图 3 所示。

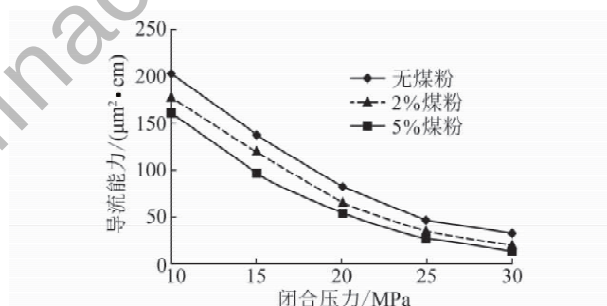


图 3 不同煤粉浓度对导流能力的影响

Fig. 3 Effect of coal powder concentration on conductivity

由图 3 可以看出, 煤粉对裂缝导流能力伤害很大, 随着闭合压力的增大, 煤粉浓度的增高, 导流能力迅速下降。闭合压力 10~30 MPa, 2% 煤粉可以使导流能力下降 13.1%~34.9%, 5% 煤粉下降 19.7%~53.2%。煤粉具有疏水性, 不易分散于水或水基压裂液, 从而极易聚集起来阻塞裂缝孔隙喉道, 随着时间的延长, 煤粉微粒不断运移, 可以使得堵塞更为严重。如在压裂液中加入润湿剂和分散剂则能使煤粉由疏水性转为亲水性, 有助于分散与悬浮煤粉于压裂液中, 阻止煤粉的聚集, 有利于煤粉的返排。

综合上述两因素可知, 煤阶对导流能力的影响主要体现在嵌入程度和煤粉产出量的不同。煤阶还影响了煤中天然裂隙(割理)密度的高低, 同一应力场中, 中变质煤天然裂隙密度高于高变质煤^[14], 这也直接影响了支撑裂缝的导流能力。

4.3 铺砂浓度对导流能力的影响

实验选用20~40目石英砂,分别选取 5 kg/m^2 和 10 kg/m^2 两种铺砂浓度,实验结果如图4所示。

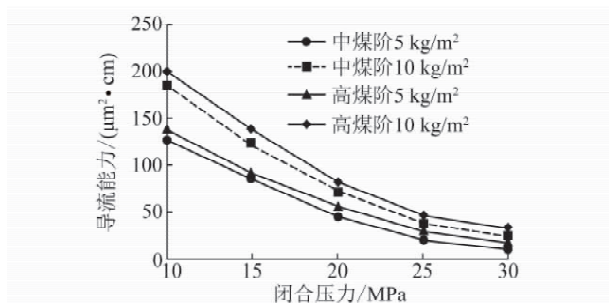


图4 中高煤阶煤岩、不同铺砂浓度对导流能力的影响

Fig. 4 Effects of sand concentration on the conductivity of medium and high-rank coal

由图4可知,无论何种煤阶煤岩,提高支撑剂的铺砂浓度导流能力都有明显的提高,铺砂浓度从 5 kg/m^2 提高到 10 kg/m^2 ,支撑剂的导流能力可以提高50%~100%。而低铺砂浓度下一旦发生嵌入现象,其影响要比高铺砂浓度大。闭合压力越大,铺砂浓度越低,地层岩石越软,嵌入越严重^[9]。因此,较软的中阶煤层中为了降低嵌入和煤粉对导流能力的伤害,施工过程中应该增大铺砂比,提高填充裂缝的铺砂浓度显得更为必要。

4.4 支撑剂粒径、组合对导流能力影响

实验应用高阶煤岩,选择10~20目和20~40目两种粒径的石英砂支撑剂按照不同比例混合时测试其导流能力^[15],铺砂浓度为 10 kg/m^2 ,实验结果如图5所示。

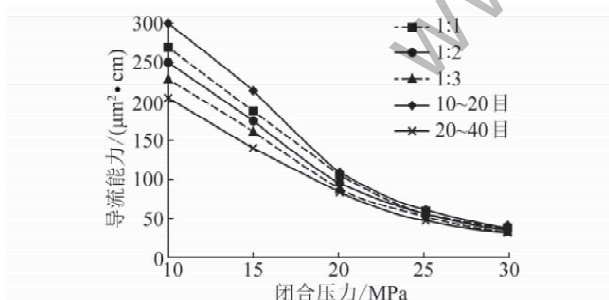


图5 不同粒径支撑剂组合对导流能力的影响

Fig. 5 Effect of different size composite proppant on conductivity

由图5可以看出,当闭合压力低于20 MPa时,单一粒径10~20目的石英砂的导流能力比20~40目的大30%~50%,且大粒径支撑剂所占比例越大,其导流能力也越大。而当闭合压力高于20 MPa时,各比例组合导流能力相差不大。因此,压裂施工过程中,考虑造缝和携砂效果,前期应用较小粒径支撑剂(20~40目),低排量施工,可较好支撑多裂缝的支缝系统,使裂缝延伸更长;后期尾追较大粒径支撑剂

(10~20目)提高近井地带的导流能力。

4.5 复杂裂缝导流能力测试

实验选用20~40目石英砂,采用 10 kg/m^2 的铺砂浓度。描述煤层水力压裂中形成的“T”型、“I”型、多分支等复杂裂缝如图6(b)所示。将10 kg的石英砂分成5 kg两份,分别充填于相邻裂缝内,从而测试其导流能力,并与单一支撑裂缝的导流能力进行对比。

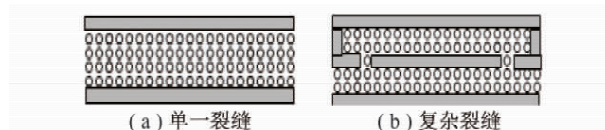


图6 裂缝形态

Fig. 6 The morphology of fracture

由图7可以看出,等量的支撑剂,多条裂缝的导流能力小于单一裂缝的导流能力,平均可以降低14.6%,其值并不是单纯的两条低铺砂浓度(5 kg/m^2)的裂缝导流能力的累加。一方面是由于裂缝条数的增多,造成支撑剂较为分散,铺砂浓度降低,增加支撑剂嵌入和煤粉堵塞;另一方面,缝间流体流动发生转向,产生附加渗流阻力,压裂后的煤岩裂缝形态和表面极其不规则,这种渗流阻力会更大,致使导流能力进一步降低。由于煤岩强度差异,裂缝形态对中阶煤岩的导流能力影响程度更大,闭合压力为20 MPa时,中煤阶煤岩导流能力降低17.6%,高煤阶煤岩降低12.8%。

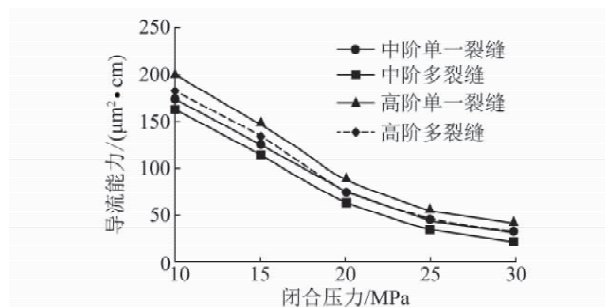


图7 不同裂缝形态对导流能力的影响

Fig. 7 Effect of fracture morphology on conductivity

5 结 论

(1) 煤岩的嵌入比砂岩严重,在较低闭合压力(低于15 MPa)下就表现明显的嵌入,而砂岩闭合压力大于25 MPa时才表现出一定程度的嵌入。

(2) 不同煤阶煤岩支撑剂嵌入程度不同,较软的中阶煤岩嵌入更为严重,煤粉产出更多,对导流能力伤害更大,压裂施工过程中应考虑煤阶对裂缝导流能力的影响。

(3) 闭合压力 10 ~ 30 MPa, 2% 煤粉可以使导流能力下降 13.1% ~ 34.9%, 5% 煤粉下降 19.7% ~ 53.2%, 在压裂液中加入分散剂可以使煤粉不易聚集, 有利于返排, 降低伤害。

(4) 增加铺砂浓度可以很大程度地提高导流能力, 地层闭合压力增大应相应增加铺砂浓度, 在软煤层中显得更为必要。

(5) 压裂施工过程中, 考虑造缝和携砂效果, 前期应用较小粒径支撑剂 (20 ~ 40 目), 低排量施工, 可较好支撑多裂缝的支缝系统, 使裂缝延伸更长; 后期尾追较大粒径支撑剂 (10 ~ 20 目) 提高近井地带的导流能力。

(6) 等量支撑剂, 多条裂缝的导流能力小于单一裂缝的导流能力, 平均可以降低 14.6%; 裂缝形态对中阶煤岩的导流能力影响程度更大, 闭合压力为 20 MPa 时, 中阶煤导流能力降低 17.6%, 高阶煤降低 12.8%。

参考文献:

- [1] 申卫兵, 张保平. 不同煤阶煤岩力学参数测试 [J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(S1): 860 - 862.
Shen Weibing, Zhang Baoping. Testing study on mechanical parameters of coal [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(S1): 860 - 862.
- [2] 郭建春, 卢 聪, 赵金洲, 等. 支撑剂嵌入程度的实验研究 [J]. 煤炭学报, 2008, 33(6): 661 - 664.
Guo Jianchun, Lu Cong, Zhao Jinzhou, et al. Experimental research on proppant embedment [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(6): 661 - 664.
- [3] 陈振宏, 王一兵, 孙 平. 煤粉产出对高煤阶煤层气井产能的影响及其控制 [J]. 煤炭学报, 2009, 34(2): 229 - 232.
Chen Zhenhong, Wang Yibing, Sun Ping. Destructive influences and effectively treatments of coal powder to high rank coalbed methane production [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(2): 229 - 232.
- [4] 王杏尊, 刘文旗, 孙延罡, 等. 煤层气井压裂技术的现场应用 [J]. 石油钻采工, 2001, 23(2): 58 - 61.
Wang Xingzun, Liu Wenqi, Sun Yangang, et al. Field testing of fracturing technology in coal formed gas well [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2001, 23(2): 58 - 61.
- [5] Abass H H. Experimental observations of hydraulic fracture propagation through coal blocks [J]. SPE 21289, 1990: 239 - 252.
- [6] Olsen T N. Improvement processes for coalbed natural gas completion and stimulation [A]. Annual Technical Conference and Exhibition [C]. SPE 84122, 2003.
- [7] 王春鹏, 张士诚, 王 雷, 等. 煤层气井水力压裂裂缝导流能力实验评价 [J]. 中国煤层气, 2006, 3(1): 17 - 20.
Wang Chunpeng, Zhang Shicheng, Wang Lei, et al. Experimental evaluation on conductivity of hydraulic fracturing in CBM wells [J]. China Coalbed Methane, 2006, 3(1): 17 - 20.
- [8] 张士诚, 牟善波, 张 劲, 等. 煤岩对压裂裂缝长期导流能力影响的实验研究 [J]. 地质学报, 2008, 82(10): 1 444 - 1 449.
Zhang Shicheng, Mou Shanbo, Zhang Jin, et al. Experimental evaluation of long-term conductivity of fracturing in coal bed [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(10): 1 444 - 1 449.
- [9] Penny G S, Conway M W, McBane R. Coordinated laboratory studies in support of hydraulic fracturing of coalbed methane [J]. SPE 22911, 1991: 231 - 246.
- [10] Penny G S. An evaluation of the effects of environmental conditions and fracturing fluids upon long term conductivity of proppants [J]. SPE 16900, 1987: 220 - 236.
- [11] Penny G S, Conway M W. Laboratory tests to determine parameters for hydraulic fracturing [J]. SPE 21812, 1991: 89 - 108.
- [12] Phillip B Kaufman, Robert W, Mark Ziegler, et al. Introducing new API/ISO procedures for proppant testing [A]. Annual Technical Conference and Exhibition [C]. SPE 110697, 2007.
- [13] 温庆志, 张士诚, 王 雷, 等. 支撑剂嵌入对裂缝长期导流能力的影响研究 [J]. 天然气工业, 2005, 25(5): 65 - 68.
Wen Qingzhi, Zhang Shicheng, Wang Lei, et al. Influence of proppant embedment on fracture long-term flow conductivity [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(5): 65 - 68.
- [14] 张新民, 庄 军, 张遂安. 中国煤层气地质与资源评价 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [15] 王 雷, 张士诚, 张文宗, 等. 复合压裂不同粒径支撑剂组合长期导流能力实验研究 [J]. 天然气工业, 2005, 25(9): 64 - 66.
Wang Lei, Zhang Shicheng, Zhang Wenzong, et al. Conductivity of the proppant combination with different grain sizes in complex fracturing [J]. Nature Gas Industry, 2005, 25(9): 64 - 66.