

# 煤岩对压裂裂缝长期导流能力影响的实验研究

张士诚, 牟善波, 张劲, 王雷

中国石油大学石油工程教育部重点实验室, 北京, 102249

**内容摘要:**煤层中一般都伴有煤层气,通过压裂可以将煤层气释放出来,一方面能够获得清洁能源,另一方面可以提高煤田的安全开采。煤岩层自身特点决定了其在压裂中应用的实验评价方法及结论应具有特殊性,本文主要针对煤层气井的煤岩层压裂裂缝长期导流能力进行实验评价研究。实验表明,与砂岩地层不同,煤岩的硬度较小,压裂中支撑剂嵌入情况较严重;煤岩易破碎,碎屑颗粒充填到支撑剂中;同时支撑剂存在破碎及吸附伤害等,多种作用导致支撑裂缝的导流能力降低。实验中,以煤岩层闭合压力为一个重要的参数,实验对比分析了在不同闭合压力下,铺砂浓度、支撑剂粒径、支撑剂种类及组合的选择、支撑剂颗粒的破碎与嵌入、压裂液残渣等因素对煤岩层导流能力的影响。本文的实验结论为,嵌入对煤岩层支撑裂缝的导流能力伤害很大,加大铺砂浓度、采用低破碎率支撑剂、降低压裂液伤害能在一定程度上提高煤层裂缝的导流能力,但影响程度随闭合压力的增加而逐渐降低。本文所得出的结论对今后煤层气的开发及设计施工具有一定的指导意义。

**关键词:**煤岩;压裂;支撑剂;导流实验;导流能力

国外在煤储层煤层气勘探开发中取得了巨大的成功(Zuber, 1998),我国煤储层中煤层气资源十分丰富(叶建平等, 1998)。前期我国在山西沁水盆地开展了大量试气排采工作,取得了一些初步的认识(傅雪海等, 2003)。煤层气是一种非常规天然气,主要是以吸附状态存在于煤层内,也有少量以游离状态存在于孔隙与裂缝中(Smith et al., 1984)。在一些煤田,地层垂向剖面上存在着多个含煤层气系统,各系统之间极少发生动力学联系(秦勇等, 2008),通过压裂可以将煤层气有效释放,既能获得清洁资源,又能提高煤田的安全开采。煤储层与其盖层中天然裂隙优势发育方向基本上是正交的,顶板节理密闭性随主应力差的增大而增强,有可能对煤储层起到有效的封盖作用(秦勇等, 1999),有利于压裂施工。煤层气井一般较浅,因此压裂过程中对支撑剂的强度要求不高,所以煤层气井压裂通常选择石英砂作为支撑剂。目前主要使用粒径为20~40目(0.4~0.8 mm)和10~20目(0.8~1.2 mm)的石英砂。与常规砂岩地层相比,煤层的节理发育、天然裂缝较多、埋藏浅、硬度低、渗透率低、孔隙度小(琚宜文等, 2005),所以砂岩地层中裂缝导流能力的许多评价结

果不能应用到煤岩层压裂中,因此有必要对煤岩层裂缝导流能力进行实验评价。

## 1 短期导流能力的评价局限性

实验室评价支撑剂导流能力一般都采用短期评价的方法,短期导流能力并不能表明支撑剂在地下的真实导流能力,表示的应该为瞬时导流能力。

(1)API推荐短期导流能力评价方法(中国石油天然气总公司, 1997):API推荐的短期导流能力评价方法,也是我国石油天然气的行业标准(SY/T6302-1997),该标准推荐了实验方法和实验仪器。其目的是为了建立标准的步骤和条件,以便在实验室条件下对各种压裂用支撑材料进行短期导流能力的评价。

(2)短期导流能力评价方法的局限性:短期导流能力的评价方法可以为用户在实验室条件下对比不同支撑剂的性能,为选择支撑材料提供参考依据。但该方法并不能获得油气藏条件下的支撑裂缝的导流能力的绝对值,也不能为长期导流能力提供一个参考。保守地估计,长期导流能力将要比短期内、常温下的导流能力降低5~10倍。支撑剂短期导流能

注:本文为国家重点基础研究发展规划“973”项目“中国煤层气成藏机制及经济开采基础研究”(编号2002CB117009)和中国石油2006年风险基金(石油大学-02)资助成果。

收稿日期:2008-05-07;改回日期:2008-09-18;责任编辑:周健。

作者简介:张士诚,男,1963年生。中国石油大学(北京)教授,主要从事增产机理的教学与科研工作。Email:wzsc@cup.edu.cn。

力的局限性表现在以下几个方面:①实验闭合压力难于达到油藏条件下压力;②实验是在常温下进行的,不能代表油藏条件下的温度。该方面曾有学者研究过(McDaniel,1986),对于石英砂,在闭合压力 55 MPa 条件下,测试温度从 24℃ 到 135℃,导流能力下降至 0.07,可见温度对导流能力影响非常大;③实验没有考虑支撑剂嵌入,以及胶液泥饼,微粒运移,井下液体,时间等因素作用。

## 2 长期导流能力实验过程

长期导流能力实验过程参考 Cobb 等(1986)、McDaniel(1986)、Penny(1987)、Parker 等(1987)、中国石油天然气总公司(1997)、Phillip 等(2007)。

### 2.1 实验仪器及实验条件

本次煤层导流能力实验所使用的仪器及相关实验条件如表 1。

表 1 实验条件及仪器

Table 1 Experimental condition and apparatus

项目	内容
实验仪器	FCES-100 导流仪
实验温度	60℃
最大闭合压力	60MPa
支撑剂类型	石英砂(10~20、20~40 目) 陶粒砂(10~20、20~40 目)

### 2.2 岩样制备

为了真实的反映支撑剂在地下裂缝的实际情况,模拟温度取 60℃,选用长期导流能力测试,每个测试压力点都测量 15 h。我国煤层气井的井深多在 1400 m 内,闭合压力在 20 MPa 左右,闭合温度在 40℃ 左右,在模拟中选取的最大闭合压力为 60 MPa,高于实际的闭合压力值,最高实验温度 60℃,满足实验要求。支撑剂选用现在普遍采用的石英砂及陶粒,选择 20~40 目和 10~20 目两种进行实验。实验中的流体选择为 4%KCl 活性水,流体速度 2~5 mL/min。实验使用从中国某煤矿 200 m 地下所取岩芯,加工成岩片实验试件的尺寸为长 17.7 cm,宽 3.8 cm,厚 1~2 cm,端部成半圆形。其结果如图 1。

由于煤层的天然裂缝非常发育,获得完整无损的岩芯非常困难,对破坏不是非常严重的岩芯,使用化学胶将断裂裂缝粘结,磨平粘结处用于实验。

### 2.3 实验方法

利用 FCES-100 导流仪,在岩芯夹持器中夹持煤片模拟煤层裂缝,实验过程中将实验流体以稳定



图 1 煤岩裂缝导流实验的岩样照片

Fig. 1 Core samples of coal bed

的流速通过两片煤片之间的支撑剂夹层,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(Penny et al.,1991)。通过改变铺砂浓度、支撑剂粒径、支撑剂组合比例、压裂液浓度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。

## 3 实验结果分析

### 3.1 铺砂浓度对导流能力的影响

分别选取 5 kg/m<sup>2</sup> 和 10 kg/m<sup>2</sup> 两种铺砂浓度进行实验,支撑剂粒径 20~40 目石英砂,图 2 是煤层两种铺砂浓度在不同地层闭合压力下导流能力的对比图,如图所示铺砂浓度为 10 kg/m<sup>2</sup> 时的导流能力明显大于 5 kg/m<sup>2</sup> 时的导流能力,可见加大铺砂浓度能在很大程度上提高裂缝的导流能力。这与砂岩地层导流能力评价实验的结果是一致的。

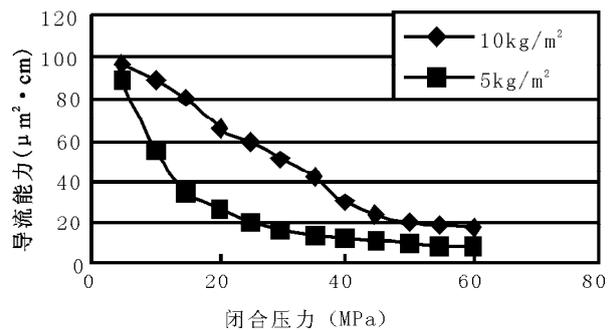


图 2 煤层不同铺砂浓度导流能力对比图

Fig. 2 Effects of sand concentration on the conductivity

### 3.2 支撑剂粒径变化对导流能力的影响

图 3 是 20~40 目和 10~20 目两种粒径石英砂加入 120 mL 胍胶浓度为 0.3% 的压裂液以后得到的导流能力对比图,支撑剂的铺砂浓度为 5 kg/m<sup>2</sup>,采用煤片夹持。从图中可以看出,当闭合压力小于 20 MPa 时,粒径为 10~20 目的石英砂的导流能力明显大于 20~40 目。闭合压力大于 20 MPa 以后,

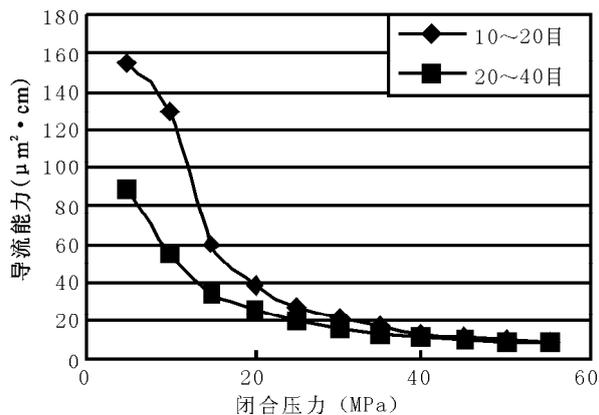


图3 煤层中不同粒径石英砂导流能力对比图

Fig. 3 Effect of sand sizes on the conductivity

两者导流能力相差不大。因此,在闭合压力小于20 MPa的时候选用较大粒径的石英砂作支撑剂可以得到较大的导流能力。这与砂岩地层导流能力评价实验的结果相差较大。

### 3.3 支撑剂类型对导流能力的影响

(1)支撑剂浓度与破碎率的关系:图4是根据API标准进行支撑剂导流能力评价实验测得的20~40目石英砂破碎率。从图中可以看出,当闭合压力小于45 MPa时,铺砂浓度为10 kg/m<sup>2</sup>与5 kg/m<sup>2</sup>时的破碎率相差不大,前者比后者略小,当闭合压力大于45 MPa时,铺砂浓度为5 kg/m<sup>2</sup>的破碎率明显增大。对比图2中闭合压力超过45 MPa时的导流能力变化可以看出,5 kg/m<sup>2</sup>时导流能力为10 μm<sup>2</sup>·cm左右,已经很低且趋于平稳。10 kg/m<sup>2</sup>时接近20 μm<sup>2</sup>·cm,当煤层闭合压力大于45 MPa时,石英砂的铺砂浓度大于5 kg/m<sup>2</sup>有利于提高煤层中支撑剂的导流能力。

(2)支撑剂类型与导流能力的关系:图5是在煤

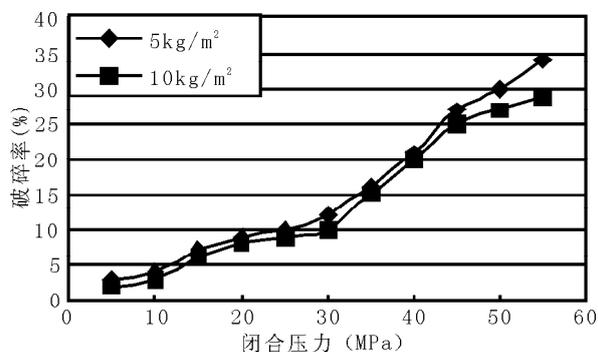


图4 不同铺砂浓度下破碎率对比图(20~40目)

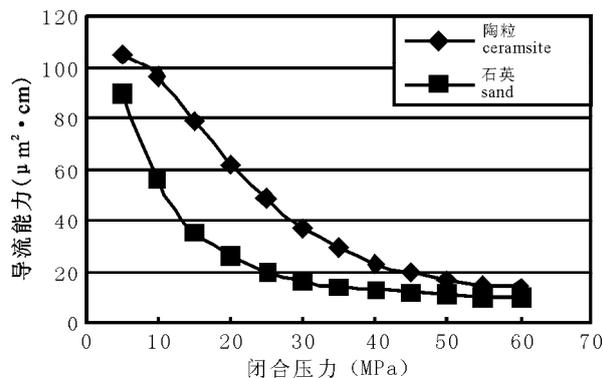
Fig. 4 Effect of sand concentration on the crush ratio  
(0.4~0.8 mm)

图5 不同类型支撑剂导流能力对比(20~40目)

Fig. 5 Effect of proppant type on the conductivity

层片中,分别选取20~40目的石英砂和陶粒砂进行导流实验,实验中加入胍胶浓度为0.3%的压裂液120 mL以后得到的导流能力对比图,支撑剂的铺砂浓度为5 kg/m<sup>2</sup>。从图中可以看出,在相同的闭合压力下,石英砂的导流能力明显小于陶粒砂的导流能力。

### 3.4 支撑剂嵌入对导流能力的影响

与砂岩地层相比,煤层的弹性模量较小,泊松比较大,硬度较小,所以支撑剂颗粒在煤层的嵌入情况比在砂岩中严重。

(1)陶粒砂嵌入影响:如图6所示,铺砂浓度为5 kg/m<sup>2</sup>,分别用钢板、砂岩、煤岩芯作为甲板进行实验,支撑剂采用20~40目陶粒砂。在疏松的煤层中,由于支撑剂硬度大于煤层的硬度,因此会发生支撑剂颗粒在煤层嵌入较严重现象,降低了裂缝导流能力,相同压力条件下嵌入砂岩对导流能力影响较小。而在闭合压力大于37 MPa条件下,对于砂岩,嵌入影响逐渐增大,而煤层的嵌入影响自始至终都很大。从图6中可以看出,在闭合压力小于30 MPa

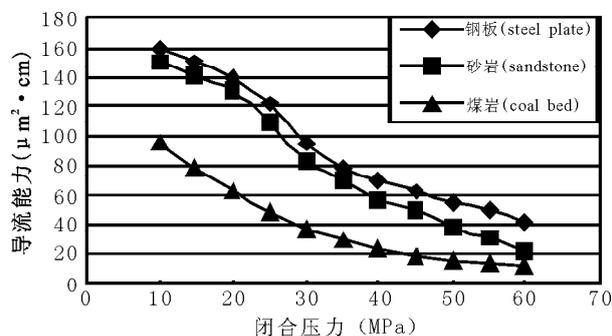


图6 钢板、砂岩、煤岩芯为甲板时陶粒砂嵌入对导流能力影响示意图

Fig. 6 The impact of embedding on flow conductivity with ceramsite

条件下,煤层的导流能力的降幅很大,在闭合压力大于 30 MPa 条件下,随着闭合压力增加,导流能力降幅相对变缓,实验证明,由于闭合压力的增大而产生的支撑剂嵌入对导流能力的影响较大,在进行煤层气井压裂设计时应十分注意嵌入对导流能力的影响,地层压力大于 40 MPa 时,应该增大支撑剂的铺砂浓度,有利于提高煤岩层压裂裂缝的导流能力。

(2)石英砂嵌入影响:图 7 为在同样的条件下,支撑剂采用 20~40 目石英砂所做的嵌入实验,基本规律类似,随着闭合压力超过 50 MPa,3 种工况下的导流能力越来越接近。图 8 是在实验结束后 30 min 观察的支撑剂颗粒嵌入后的显微照片(闭合压力为 30 MPa),图 9 是在实验结束 3 h 后观察的支撑剂颗粒嵌入后的显微照片(闭合压力为 30 MPa),对比这两张图可以明显看到支撑剂颗粒发生嵌入后留下的痕迹。对比图 8 与图 9,随着时间的增加,实验中煤片的嵌入情况更加严重,可见嵌入对煤层裂缝导流能力的影响不容忽视。

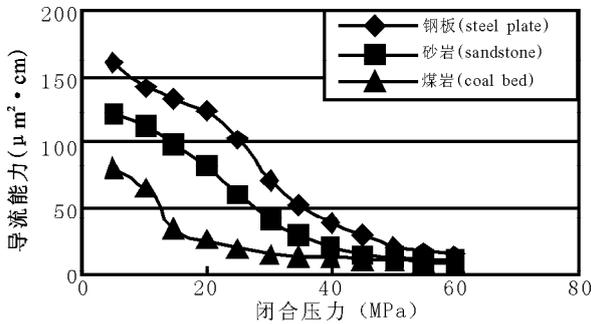


图 7 钢板、砂岩、煤岩芯为甲板时石英砂嵌入对导流能力影响示意图

Fig.7 The impact of embedment on flow conductivity with silica sand



8 实验结束后 30 min 支撑剂压入的实验结果

.8 The result of proppant impaction after 30 min

### 3.5 不同类型组合支撑剂导流能力实验研究

图 10 是两种不同目数支撑剂不同比例的导流能力变化图,两种支撑剂的目数是 20~40 目,铺砂



图 9 实验结束后 3 h 支撑剂压入的实验结果

g.9 The result of proppant impaction after 3 h

浓度为 5 kg/m<sup>2</sup>,陶粒砂与石英砂体积比例分别是 1:4、1:5、1:6。其中陶粒尾追在缝口的位置,该处裂缝闭合后承受压力大,陶粒强度相对较高,较好的起支撑缝口作用。3 种组合当中,在闭合压力较低时,3 条曲线差别较小,当闭合压力增大以后,其差距逐渐增大,其原因就是支撑剂被压碎以后,其孔隙通道被残渣堵塞,粒径类型含量不同所造成的影响变大,导致导流能力差别变大。从结果中我们可以得出陶粒含量越高,组合支撑剂的导流能力最大。

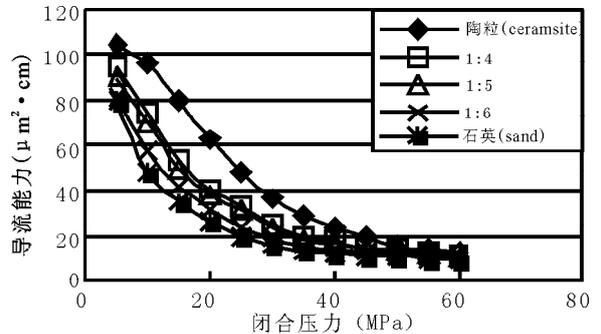


图 10 不同粒径支撑剂组合导流能力随闭合压力变化图

Fig.10 The change diagram on flow conductivity of different size composite proppant with closure pressure changing

### 3.6 压裂液残渣对导流能力的影响

选用胍胶浓度为 0.3% 的压裂液以及 4% KCl 活性水作为驱替流体进行实验,支撑剂采用 20~40 目的石英砂,支撑剂的铺砂浓度为 5 kg/m<sup>2</sup>。图 11 是这两种情况下导流能力的对比图。如图所示随着压力增加,填充层的导流能力明显降低,但是当闭合压力大于 30 MPa 后,两者导流能力相差不大,由此可以推断压裂液残渣伤害对填充层的导流能力有一定的影响,但是这种影响随着闭合压力的增大变得越来越小,在较大的闭合压力下(大于 30 MPa),压裂液的残

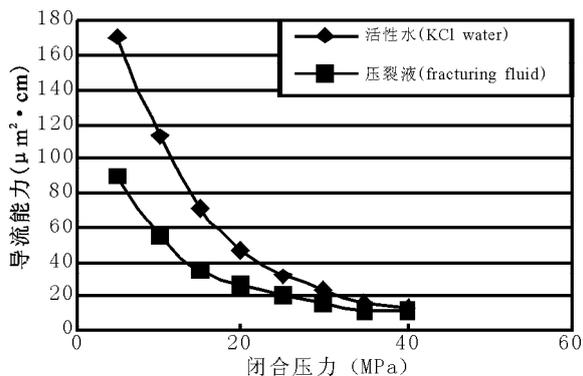


图 11 压裂液和活性水测量煤层裂缝导流能力图

Fig. 11 The flow conductivity of coal bed fracture using fracturing fluid and KCl water

渣伤害对煤层裂缝导流能力的降低不起主导作用。这与砂岩地层导流能力评价实验的结果是一致的。

## 4 结论

(1) 加大铺砂浓度能较好提高煤层裂缝导流能力,地层闭合压力增大应相应加大铺砂浓度。

(2) 当煤层闭合压力小于 20 MPa 时,选用较大粒径的石英砂支撑剂可以获得较大的导流能力,闭合压力大于 20 MPa 时,粒径的变化对导流能力的影响不大。

(3) 相同的条件下,煤层裂缝中陶粒砂支撑裂缝导流能力大于石英砂支撑裂缝导流能力。

(4) 煤层的硬度较小,支撑剂的嵌入情况较严重,随着闭合压力的增加,由于嵌入而导致的导流能力降低比压裂液残渣伤害影响要大。

(5) 煤层压裂过程中,组合陶粒能较好提高裂缝的导流能力,根据性价比比较,采用陶粒与石英为 1:5 的比例效果较好。

## 参 考 文 献

- 傅雪海,秦勇,姜波,等. 2003. 山西沁水盆地中、南部煤储层渗透率物理模拟与数值模拟. 地质科学, 38(2): 221~229.
- 据宜文,姜波,侯泉林,王桂梁,方爱民. 2005. 华北南部构造煤纳米级孔隙结构演化特征及作用机理. 地质学报, 79(2): 269~285.

秦勇,张德民,傅雪海,林大洋,叶建平. 1999. 山西沁水盆地中、南部现代构造应力场与煤储层物性关系之探讨. 地质论评, 45(6): 576~583.

秦勇,熊孟辉,易同生,杨兆彪,吴财芳. 2008. 论多层叠置独立含煤层气系统. 地质论评, 54(1): 65~69.

叶建平,秦勇,林大杨. 1998. 中国煤层气资源. 徐州: 中国矿业大学出版社, 36~41.

中国石油天然气总公司. 1997. 压裂支撑剂充填层短期导流能力评价推荐方法. SY/T6302-1997. 中华人民共和国石油天然气行业标准.

Cobb S L, Farrell J J. 1986. Evaluation of longterm proppant stability. SPE 14133. The Society of Petroleum Engineers International Meeting on Petroleum Engineers, Beijing, China, March 17~20, Society of Petroleum Engineers, Richardson, TX.

McDaniel B W. 1986. Conductivity testing of proppants at high temperature and stress. SPE 15067. The 56th Califorma Regional Meeting of the Society of Petroleum Engineers, Oakland, CA.

Parker M A, McDaniel B W. 1987. Fracturing treatment design improved by conductivity measurements under in situ conditions. SPE 169001. The Society of Petroleum Engineers Annual Technical Conference. Dallas, TX. September 27~30, Society of Petroleum Engineers, Richardson, TX.

Penny G S. 1987. An evaluation of the effects of environmental conditions and fractureing fluids upon long term conductivity of proppants. SPE 16900. The Society of Petroleum Engineers Annual Technical Conference. Dallas, TX. September 27~30, Society of Petroleum Engineers, Richardson, TX.

Penny G S, Conway M W. 1991. Laboratory tests to determine parameters for hydraulic fracturing. SPE 21812. Low Permeability Reservoirs Symposium, 15~17 April, Denver, Colorado.

Phillip B. Kaufman, Robert W, Mark Ziegler, Aidner R, Neves, Sintex Minerals, Mark A Parker, Kathy Abney, Gabriel Warwick Kerr de Paiva Cortes, et al. 2007. Introducing new API/ISO procedures for proppant testing. SPE 110697. Annual Technical Conference and Exhibition, 11~14 November, Anaheim, California.

Smith D M, Williams F L. 1984. Diffusional effects in the recovery of methane from coal beds. SPE, 529~535.

Zuber M D. 1998. Production characteristics and reservoir analysis of coalbed methane reservoirs. International Journal of Coal Geology, 38(1~2): 27~45.

# Experimental Evaluation of Long-term Conductivity of Fracturing in Coal Beds

ZHANG Shicheng, MOU Shanbo, ZHANG Jin, WANG Lei

*MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Beijing, 102249*

## Abstract

Coalbed methane (CBM) occurring in almost all coal beds can be released through fracturing, which will not only provide a clean energy resources but enhance production safety in coal mining. The features of CBM determine adoption of experiment method and the particularity of final conclusion. This paper focuses on experimental evaluation of long-term conductivity of fracturing in coal beds. The results show that different from sandstone strata, coal beds are of low hardness and easily broken, and embedment of various fragments in fractures is very common. Fragmentation and adsorption of proppant in coal beds, along with other factors, result in decrease of conductivity of fractures. Because closure pressure of coal beds is an important parameter, the experiment contrastively analyzed the factors such as sand concentration, type, diameter and combination of proppant, fragmentation and embedment of proppant particles, and residue, and their effects on conductivity of fracturing under the condition of various closure pressures. It is concluded in this study that embedment does great harm to conductivity of fractures. Although increase of sand concentration and adoption of lowering proppant and closure pressure will to some extent improve conductivity of fractures in coal beds, their effects decrease with increasing of closure pressures. Therefore, this study is of some practical significance in gas exploitation and engineering design and construction.

**Key words:** coal bed; fracturing; proppant; experiment; conductivity