

文章编号:0253-9993(2009)06-0756-05

煤岩与顶底板岩石力学性质及对煤储层压裂的影响

朱宝存, 唐书恒, 张佳赞

(中国地质大学(北京)海相储层演化与油气富集机理教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 基于不同地区煤岩及顶、底板岩石样品的力学性质数据, 总结了主要岩石类型的力学性质特征, 重点对两者力学性质的差异进行了对比研究, 分析了决定岩石力学性质的主要控制因素, 如岩性、孔隙特征和含水率. 以此为基础讨论了两者的力学性质差异对煤储层水力压裂的影响. 研究表明, 岩石的强度随孔隙度的增大而减小; 岩石的软化性取决于岩石的矿物组成与孔隙性, 水分对不同岩性岩石强度的影响方式和影响程度存在差异. 力学性质的差异, 影响了煤层中地应力场的分布, 使得煤层气井水力压裂表现出与常规储层水力压裂不同的特点.

关键词: 煤岩; 顶、底板岩石; 力学性质; 水力压裂

中图分类号: TD313 文献标识码: A

Mechanics characteristics of coal and its roof and floor rock and the effects of hydraulic fracturing on coal reservoir

ZHU Bao-cun, TANG Shu-heng, ZHANG Jia-zan

(The Key Laboratory of Marine Reservoir Evolution and Hydrocarbon Accumulation Mechanism, Ministry of Education, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the mechanical properties of coal and its roof and floor rock from different area, the mechanics characteristics of main rock types were summarized, and the difference of rock mechanics properties among them was discussed. The lithologic features, pore characteristics, water content and other main controlling factors of rock mechanics properties were analyzed. The effect of mechanical difference on hydraulic fracturing was studied systematically. The results show that rock strength decreases with the increase of porosity, and there are differences in influence mode and degree of water content on rock strength of different lithologic rock. The rock softening is mainly determined by its mineral composition and porosity. Due to the difference of rock mechanics properties between coal and its roof and floor rocks, stress field distribution in coal seam is affected, and hydraulic fracture in coalbed methane well shows different characteristics compared with conventional reservoir fracturing.

Key words: coal; roof and floor rock; mechanics properties; hydraulic fracturing

水力压裂裂缝的产生、传播、扩展、保持或重新张开所需的流体压力, 与岩石中客观存在的地应力场及岩石本身的力学物理性质密切相关. 关于地应力场对压裂的控制作用, 目前研究的比较深入; 但关于岩石力学性质对压裂的影响有待进一步研究. 煤层及顶、底板的力学性质是影响储层改造效果的重要因素,

收稿日期: 2008-07-11 责任编辑: 王婉洁

基金项目: 国家高科技发展计划(863)基金资助项目(2006AA06Z235); 国家自然科学基金资助项目(40772096); 国家重点基础研究发展计划(973)基金资助项目(2006CB202202); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0211)

作者简介: 朱宝存(1974—), 男, 河北滦县人, 博士研究生. Tel: 010-82320601, E-mail: zbc0225@yahoo.com.cn

两者力学性质的差异，对煤层中地应力场的分布产生了重要影响，从而影响煤储层压裂，使其表现出与常规油气储层压裂不同的特点^[1]。

1 岩石力学性质特征

有关岩石力学特性的研究，早已受到国内外学者的重视，取得了许多研究成果^[2-13]。含煤岩系中，煤岩及其顶、底板的生成和赋存环境与其他岩石相比有其特殊性，使其岩石力学性质也表现出特殊性^[2]。

为研究煤岩及其顶、底板岩石力学性质特征，分析了晋城、鹤岗、淮南、淮北、新疆地区26个煤岩样品和299个顶、底板样品的岩石力学数据(表1)。数据表明，同一类岩石的力学性质变化范围很大，说明除岩性外，沉积岩的成分、结构、胶结物成分，胶结类型等因素对岩石的力学性质都有影响。岩类相同，抗压强度不同；强度相同，岩类不同的主要原因是由岩石结构的差异引起的^[3]。尽管岩石力学性质数据的变化范围较大，影响因素较多，但其平均值还是可以清楚地反映出岩性差异对岩石力学性质的影响，并且不同岩类力学性质的差异非常明显。

表1 煤岩及顶、底板岩石力学性质测试结果
Table 1 Experimental results of rock mechanics properties of coal and its roof and floor rock

岩石类型	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
泥岩	11.7 ~ 149.1 45.1	0.4 ~ 4.5 1.6	2.30 ~ 72.00 21.32	0.02 ~ 0.43 0.24
砂岩	29.1 ~ 164.9 87.6	1.1 ~ 5.0 3.4	11.00 ~ 97.00 33.73	0.10 ~ 0.39 0.22
灰岩	53.9 ~ 142.1 120.6	3.4 ~ 5.0 4.3	27.00 ~ 89.00 51.05	0.10 ~ 0.34 0.20
煤	2.4 ~ 20.3 10.0	0.4	0.50 ~ 20.00 5.08	0.14 ~ 0.47 0.28

煤岩力学性质的特殊性通过与其顶、底板力学性质的对比表现出来。煤岩的抗压强度与顶、底板的相比明显偏低；弹性模量与顶、底板的差别更为明显和灰岩相比可差一个数量级；泊松比明显高于顶、底板的。据文献[4-5]，一般岩石的抗拉强度为抗压强度的3%~30%。而煤岩顶、底板抗拉强度与抗压强度比值为3%~6%，与一般岩石相比要小的多。因此，与顶、底板相比，煤岩的力学性质总体表现为低强度、低弹性模量、高泊松比的特性。

2 孔隙度对岩石力学性质的影响

岩石材料是似连续又非完全连续，似破断又非完全破断的介质^[6]。徐林生等^[3](1996)研究了煤层顶板砂岩分维与其力学性质的相关关系，认为岩石结构的分形维数与其抗压强度之间有着很好的相关性。岩石的粒度分形维数和孔隙分形维数可定量表达岩石的抗压强度。岩石内部孔隙的存在影响岩石组间的接触，因而影响联结力，从而影响岩石的强度。一般说来，孔隙度愈大，岩块的强度愈低，塑性变形和渗透性愈大，反之亦然。图1(c)中，煤岩的抗压强度、弹性模量与孔隙度之间关系不甚明显。而在图1(a)，(b)中顶、底板的抗压强度和弹性模量均随孔隙度的增大而减小，但由于岩性复杂，孔隙分形特

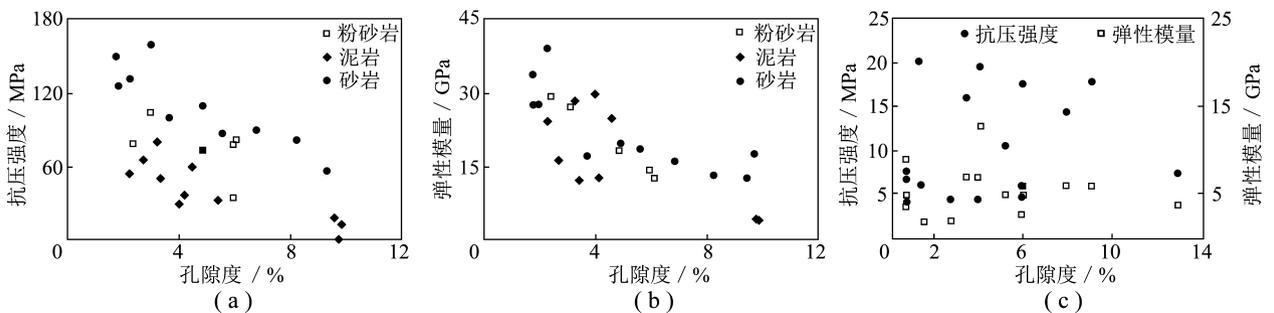


图1 岩石力学性质与孔隙度之间的关系

Fig. 1 Relationship between rock mechanics properties and porosity

征、矿物成分、胶结状况等因素的影响,数据非常离散,只表现出一种总体上的变化趋势.若按岩性分类讨论,泥岩、粉砂岩、砂岩的抗压强度、弹性模量随孔隙度的增加明显降低.

地层中的岩石常具有各种明显的缺陷,即使是同一岩块加工的岩样,由于缺陷的位置、大小不同,岩样达到屈服的应力存在明显差异,屈服之后的变形特性也完全不同^[7].尤明庆^[8](2003)基于实验数据,认为在不同的试验围压下,弹性模量与强度成线性关系,这一关系在统计意义上具有一致性.但是具有局部缺陷的岩样,在缺陷达到承载能力开始屈服之前,岩样的变形不受影响,缺陷只影响峰值强度和峰值附近的屈服过程.因此,图1中顶、底板的抗压强度和弹性模量随孔隙度的变化规律并不完全一致.

3 含水率对岩石力学性质的影响

3.1 含水率与饱和抗压强度的关系

岩体是两相介质,即由矿物-岩石固相物质和含于孔隙和裂隙内水的液相物质组成^[9].煤岩及顶、底板岩石都或多或少含有水分或溶液.室内一般通过测定饱水条件下的抗压强度反映水分含量对抗压强度的影响.由图2(a)可以看出,随含水率增加,顶、底板岩石的饱和抗压强度急剧降低;但不同岩性岩石饱和抗压强度降低的速率并不完全一致,数据的离散程度也存在差异.煤岩饱和抗压强度数据较少,未分析其与含水率的关系.但值得注意的是,随着含水率的增加,煤岩的抗压强度变小的趋势非常明显(图2(b)).

岩石的抗压强度会随孔隙分形维数的增大而减小^[3].煤岩具有不同成因、不同级次孔径的孔隙,不同孔径的孔隙对煤岩的力学性质的影响程度存在差异.煤岩复杂的孔隙系统决定了煤岩的抗压强度与孔隙度的关系不甚明显(图1(c)).一般认为,地层条件下煤岩处于饱水状态,大于一定孔径的连通孔隙可以完全被水饱和,在这个意义上说含水率可以代表煤岩中可以被水饱和的孔隙占总孔隙的比例,一定程度上代表了煤岩孔隙的分形特征.因此,图2(b)中煤岩抗压强度与含水率之间表现出较好的相关性.

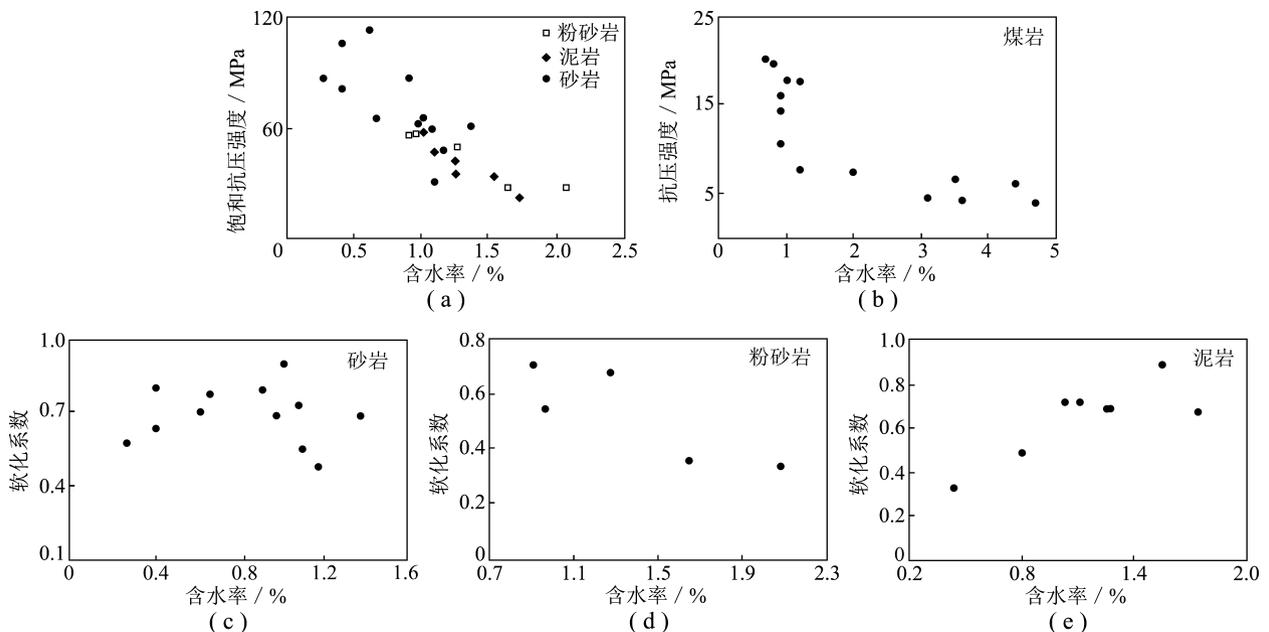


图2 岩石力学性质与含水率的关系

Fig. 2 Relationship between rock mechanics properties and water content

3.2 含水率与软化系数的关系

岩石的软化性取决于岩石的矿物组成与孔隙性^[10].当矿物组分相对简单时,由于水的加入使分子活动能力加强,在岩石孔隙、裂隙中的液体或气体会产生孔隙压力,抵消一部分作用在岩石内部任意截面的

总应力(包括围压和构造运动所产生的应力),使岩石的弹性屈服极限降低,易于塑性变形,同时还会降低岩石的抗剪强度,使岩石剪切破坏^[2];当矿物组分相对复杂,含有较多的亲水性和可溶性矿物时,主要是由于高岭石、伊/蒙混层等黏土矿物颗粒小、亲水性强,当水贯入泥岩的孔隙、裂隙中时,细小岩粒的吸附水膜便会增厚,部分胶结物会被软化或溶解,从而引起岩石颗粒的崩裂解体和体积膨胀,使岩石的抗压强度降低^[11]。

由于砂岩的矿物成分相对简单,其软化性主要取决于岩石的孔隙性和孔隙分形特征,因此砂岩的软化系数随含水率的变化趋势并不明显(图2(c)).粉砂岩的矿物成分相对砂岩要复杂一些,其软化性不仅受岩石孔隙性的影响,而且含水率对软化系数的影响程度增强;表现为随含水率的增大,软化系数变小的趋势增强(图2(d)).泥岩含有较多的亲水性矿物,理论上来说,随着含水率的增加,软化系数应变小,但图2(e)中却表现出相反的趋势.这是由于泥岩矿物组分复杂,其软化性主要取决于组分特征,而不是水分含量.孟召平等^[12](2004)研究了淮南新集井田煤系泥岩的矿物组成和化学成分特征,认为泥岩的力学性质与化学成分密切相关,随着SiO₂含量的增大,泥岩的单轴抗压强度和弹性模量总体呈增大趋势.

关于煤岩含水率对岩石软化性的影响,闫立宏等^[13](2002)通过试验研究与分析,认为水对煤的力学性质的影响是十分显著的;由于水的浸入,煤的强度降低,变形量增大.

4 岩石力学性质对煤储层压裂的影响

与常规储层相比,煤储层力学性质表现出低强度、低弹性模量、高泊松比的特性.根据兰姆方程理论^[14],在岩石中形成水力裂缝的宽度与其弹性模量成反比.弹性模量越小,压开的裂缝宽度越大,这是煤层压裂裂缝较宽的主要原因.由于宽度的增加,在相同的施工规模条件下,裂缝长度增加将受到限制.因此,同常规砂岩压裂结果相比煤岩更易形成短宽裂缝.

一般认为,储集层岩石力学性质对于裂缝延伸影响较小,而遮挡层与产层的最小水平主应力差是影响裂缝高度最显著的因素.对于常规砂岩储层,其与上下岩层间的岩石力学性质的差异较小,最小水平主应力差是影响裂缝高度的主要因素.但煤岩与其顶、底板岩石力学性质存在明显差异,若仅考虑层间最小水平主应力差,计算结果与实际会有较大的出入.层间的岩石力学性质的差异影响到层间最小水平主应力差的大小,且弹性模量差值越大,层间最小水平主应力差越大,压裂缝就更容易被控制在煤层中^[1].另一方面,煤层与顶、底板间存在一个弱面,弱面对压裂的影响通过煤层与顶、底板之间岩石力学性质的差异体现出来.若弱面上下岩层的力学性质存在明显的差异,则在层间形成明显的应力差,且在弱面附近造成一个明显的低应力区.压裂裂缝垂向延伸至弱面时受应力阻挡,导致裂缝沿弱面处的低应力区水平延伸,形成水平裂缝与垂直裂缝构成的组合裂缝,即“T”形缝或“工”字形缝.

煤岩与顶、底板力学性质的差异,使得煤层中更容易产生以垂向应力为主的地应力场,煤岩与顶、底板岩石弹性模量差异越大,这种趋势越明显^[1].当煤层埋藏较浅时,只要煤层与顶、底板的弹性模量相差较大,也会使垂向主应力大于最大水平主应力,产生垂直缝,煤储层水力压裂实践也证明了这一点.

5 结 论

(1) 与顶、底板岩石相比,煤岩具有低强度、低弹性模量、高泊松比的力学性质特征.

(2) 煤岩顶、底板的抗压强度和弹性模量均随孔隙度的增大而减小,而煤岩的力学性质与孔隙度间的关系不甚明显.

(3) 岩石的软化性取决于岩石的矿物组成与孔隙性,水分对不同岩性岩石抗压强度的影响方式和影响程度存在差异.

(4) 煤岩与顶、底板岩石间力学性质差异显著,使得煤层气井水力压裂诱发的裂缝表现出与常规水力裂缝不同的特点.水力压裂时煤层中更容易产生垂直缝,且水力裂缝更容易被控制在煤层中.

参考文献:

- [1] 朱宝存. 煤层气井水力压裂力学机制数值模拟研究 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2008: 57 - 62.
Zhu Baocun. Numerical modeling of mechanical mechanism of hydraulic fracture in coalbed methane well [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2008: 57 - 62.
- [2] 孟召平, 彭苏萍, 傅继彤. 含煤岩系岩石力学性质控制因素探讨 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21 (1): 102 - 106.
Meng Zhaoping, Peng Suping, Fu Jitong. Study on control factors of rock mechanics properties of coal-bearing formation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21 (1): 102 - 106.
- [3] 徐林生, 张占海. 顶板砂岩分维与其力学性质的相关性研究 [J]. 煤炭学报, 1996, 21 (3): 245 - 249.
Xu Linsheng, Zhang Zhanhai. Fractal dimension of roof rock structure and its correlation with mechanical properties [J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21 (3): 245 - 249.
- [4] 乌效鸣. 煤层气井水力压裂计算原理及应用 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997: 30 - 31.
Wu Xiaoming. Calculation and application of hydraulic fracturing of coal bed gas well [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1997: 30 - 31.
- [5] 傅雪海, 秦勇, 韦重韬. 煤层气地质学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007: 143 - 144.
Fu Xuehai, Qin Yong, Wei Chongtao. Coalbed methane geology [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2007: 143 - 144.
- [6] 谢和平. 孔隙与破断岩体的宏细观力学研究 [J]. 岩土工程学报, 1998, 20 (4): 113 - 114.
Xie Heping. Investigation on macro and meso mechanism of porous and fractured rock mass [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20 (4): 113 - 114.
- [7] 尤明庆, 华安增, 李玉寿. 缺陷岩样的强度和变形特性的研究 [J]. 岩土工程学报, 1998, 20 (2): 98 - 102.
You Mingqing, Hua Anzeng, Li Yushou. A study of triaxial strength and deformation of flawed specimen [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20 (2): 98 - 102.
- [8] 尤明庆. 岩石试样的杨氏模量与围压的关系 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (1): 53 - 60.
You Mingqing. Effect of confining pressure on the Young's modulus of rock specimen [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (1): 53 - 60.
- [9] 米勒 L. 岩石力学 [M]. 李世平, 冯震海, 译. 北京: 煤炭工业出版社, 1981: 1 - 8.
Müller L. Rock mechanics [M]. Li Shiping, Feng Zhenhai, trans. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1981: 1 - 8.
- [10] 楼一珊. 岩石力学与石油工程 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2006: 19 - 22.
Lou Yishan. Rock mechanics and petroleum engineering [M]. Beijing: Publishing House of Oil Industry, 2006: 19 - 22.
- [11] 刘长武, 陆士良. 泥岩遇水崩解软化机理的研究 [J]. 岩土力学, 2000, 21 (1): 28 - 31.
Liu Changwu, Lu Shiliang. Research on mechanism of mudstone degradation and softening in water [J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21 (1): 28 - 31.
- [12] 孟召平, 彭苏萍. 煤系泥岩组分特征及其对岩石力学性质的影响 [J]. 煤田地质与勘探, 2004, 32 (2): 14 - 16.
Meng Zhaoping, Peng Suping. Mudstone composition of coal measures and its influence on the mechanical properties [J]. Coal Geology & Exploration, 2004, 32 (2): 14 - 16.
- [13] 闫立宏, 吴基文, 刘小红. 水对煤的力学性质影响试验研究 [J]. 建井技术, 2002, 23 (3): 30 - 32.
Yan Lihong, Wu Jiwen, Liu Xiaohong. Test and research on water affected to coal mechanism [J]. Mine Construction Technology, 2002, 23 (3): 30 - 32.
- [14] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
Cai Meifeng, He Manchao, Liu Dongyan. Rock mechanics and engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002.