DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2018.03.007
引用格式:陈同刚,汪启年,朱将波,等. 煤层及其顶、底板岩石力学性质对水力压裂裂缝延伸的控制[J]. 华东地质,2018,39(3):212-217.

煤层及其顶、底板岩石力学性质对水力压裂裂缝延伸的控制

陈同刚[1],汪启年[1],朱将波[1],汤达祯[2],许 浩[2]

(1. 安徽省勘查技术院,合肥 230031; 2. 中国地质大学(北京) 能源分院,北京 100083)

摘要: 为了揭示煤层及其顶、底板岩石力学性质对水力压裂裂缝延伸的影响,应用岩石三轴伺服机测试陕西韩城地区煤层及顶、底板岩石力学性质,总结不同类型岩石力学性质特征和差异;剖析孔隙率和含水率与岩石力学性质之间的关系,探讨岩石力学性质差异对煤层水力压裂的影响。研究表明:岩石强度随孔隙度增大而降低;岩石矿物成分及其胶结程度与孔隙度决定岩石的软化程度,水分对不同类型岩石强度的影响方式和程度差异较大;当煤层埋藏较浅,煤层与顶、底板岩石的弹性模量存在较大差异时,水力压裂裂缝更易控制在煤层中,且延伸更长更远。

关键词: 煤层;煤层顶、底板;岩石力学性质;裂缝

中图分类号:TE37;TD313 **文献标识码**:A **文章编号**:2096-1871(2018)03-212-06

煤层水压致裂裂缝的生成、延伸与煤层地应力场、煤层力学性质相关,一些学者对地应力场压裂控制作用进行了研究。程远方等[1]系统分析了施工工艺,如排量、压裂液黏度、压裂液滤失量等因素与裂缝形态的关系,认为排量、黏度与裂缝高度呈正相关;滤失量与裂缝几何形态参数呈负相关。基于弹性、岩石力学分析,李春等[2]认为裂缝交角是控制裂缝延伸模式的主要参数,煤岩非均质性、裂缝系统分布和力学性质将不同程度影响煤层水压致裂裂缝的延伸。梁万库[3]根据岩石力学性质和现场裂缝形态,认为水平主应力是控制火山岩水力裂缝延伸的关键因素之一。

以上研究提出了水力裂缝的产生、形态和影响因素,但一些问题尚值得商榷,比如,获取理想裂缝形态时,假设了压裂液的不可压缩,在裂缝立体空间沿缝长方向呈一维流向;再如,裂缝在竖直切面内符合平面应变状态,裂缝在井筒四周呈轴对称排列等。这些问题表明煤岩力学性质是控制裂缝延伸的关键因素之一,但对煤层力学性质,特别是煤层顶、底板岩石力学性质对水力压裂的控制分析较少,而煤层及顶、底板岩石的力学性质差异是控制煤层水力压裂、改造煤层孔裂隙的重要因素,三者力学性质的差异将影响煤层中地应力场的分布,直接决定煤层气压裂效果。本文以陕西韩城矿区为例,分析该区煤层及其顶、底板岩石力学性质对水力压裂裂缝延伸的控制作用,以期为该区煤层水力压裂研究提供参考。

1 地质背景

韩城矿区位于陕西渭北石炭纪—二叠纪煤田东部边缘,地跨韩城、黄龙和宜川 3 个县市,地理坐标为 35°21′～35°51′ N, 110°10′～110°36′ E。受区域构造控制,地层走向总体为 NE 向,呈东南翘起的单斜[4],受后期伸展断裂切割的影响,其轴部及东南翼下降归并于汾渭地堑中,西北翼局部残存,形成现今的单斜[5]。该区构造活动的总体特征是南强北

* **收稿日期**:2017-09-13 **修订日期**:2017-12-01 **责任编辑**:谭桂丽

基金项目:国家科技重大专项“煤层气藏储渗空间特征与渗流机理研究(编号:2011ZX05038-001)”和国家自然科学基金(编号:41272175)项目联合资助。

第一作者简介:陈同刚,1988 年生,男,工程师,主要从事地质调查及物探找矿工作。

弱，东强西弱，边浅部比中深部复杂，南北分区明显[6]（图 1）。

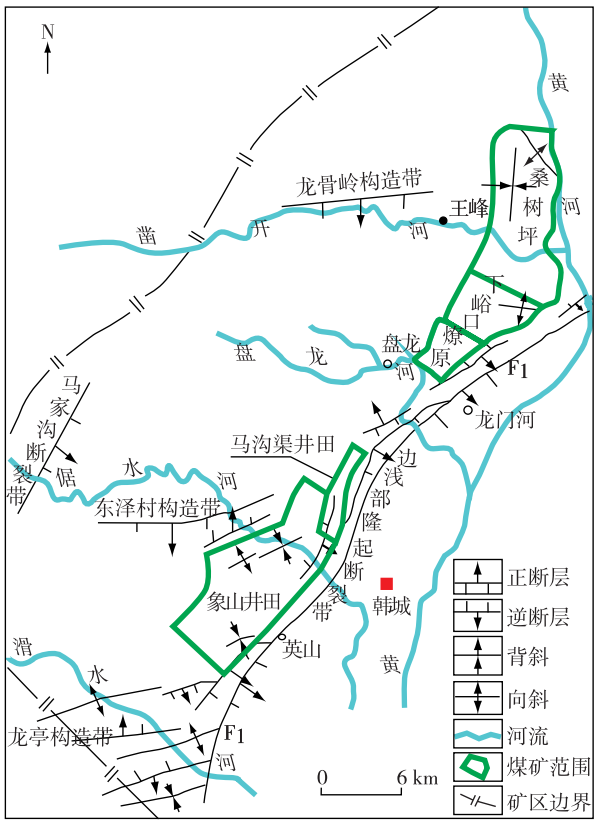


图 1　韩城矿区构造纲要图[6]

Fig. 1　Sketch map showing the structure of the Hancheng mining area

研究区地层有太古宇，早古生代寒武系、奥陶系，晚古生代石炭系、二叠系，新生代古近系、新近系和第四系。晚石炭世山西组和早二叠世太原组构成含煤岩系[7]。3 号煤层顶板主要是湖泊相、河床相泥质岩和粉砂岩，以泥质岩为主，次为细粒砂岩及粉砂岩。5 号、11 号煤层顶板主要是石灰岩、泥灰岩、泥岩和砂质泥岩，局部见粉砂岩、石英砂岩，底板以泥岩为主。

石炭系泥质岩含高岭石黏土岩、水云母黏土岩；砂岩以石英为主，含较多长石和泥质岩屑，层面可见白云母，填隙物以黏土杂基为主，偶见钙质胶结物，胶结类型为基底式和孔隙式。二叠系泥质岩以伊利石黏土岩为主；砂岩颗粒主要为石英，长石和岩屑极少，胶结物以硅质为主，次为钙质，胶结类型是孔隙式。灰岩主要产于太原组，多为含生物碎屑的泥晶灰岩[8]。

2　岩石力学性质

含煤岩系中煤及其顶、底板岩层的生成、赋存环境有其特性，导致其岩石力学性质各不相同[9]。为了解韩城矿区煤层及其顶、底板岩石力学性质，测试了该区煤层及其顶、底板岩石的力学性质参数（表 1）。相同类型岩石的力学性质在一定范围内发生变化，表明除了岩性外，岩石组分、结构、胶结物类型及含量等也影响岩石力学性质。岩石类型不同，抗压强度不同，主要由岩石结构差异引起[10]。由表 1 可知，这种差异十分明显。虽然岩石力学性质参数在一定范围内变化，但其力学性质参数的平均值仍能较好地体现不同类型岩性的岩石力学性质。

煤岩力学性质的独特性通过其与顶、底板岩石力学性质的差异获得。煤层抗压强度明显低于其顶、底板岩石；煤层弹性模量与其顶、底板岩石差异明显，煤的弹性模量仅为顶、底板的 20%。其他几类岩石抗拉强度最高为抗压强度的 1/3[11]，而煤的抗拉强度仅是抗压强度的 5%～10%，比其他岩石远小的多。与顶、底板对比可知，煤的力学性质为低强度、低弹性模量和高泊松比。

表 1　韩城矿区岩石力学性质参数

Table 1　Mechanical property parameters of the rocks in the Hancheng mining area

岩石类型	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
泥岩	15.1～117.5 36.3	0.7～2.1 1.4	6.9～29.7 13.7	0.16～0.23 0.20
砂岩	37.5～59.1 47.8	1.6～2.5 2.1	14.9～21.1 19.0	0.15～0.18 0.17
煤	8.9～12.3 10.6	0.2～0.4 0.3	4.2～5.8 4.9	0.22～0.24 0.23
灰岩	42.0	1.8	16.9	0.16

3　孔隙度与岩石力学性质

砂岩、泥岩及煤层是非均质性有差异的多孔介质，岩石中孔隙多少和类型影响岩石组分间的接触方式和联结力，因而不同类型岩石的强度不同。岩石孔隙度越大，内部结构越松散，岩石强度越低，受

力越易变形，但煤的抗压强度、弹性模量与孔隙度无明显的相关性。韩城矿区试验结果表明，煤层顶、底板的抗压强度和弹性模量随孔隙度的增大而减小，即泥岩和砂岩的抗压强度、弹性模量随孔隙度的增加而降低(图 2)。

试验中部分煤顶、底板抗压强度和弹性模量与孔隙度的数据较分散，这是因为不同顶、底板岩石样品接近临界变形压力开始屈服之前，变形不受制约，且峰值强度和峰值附近的屈服过程存在差异，但数据分析统计仍然可用[12]。

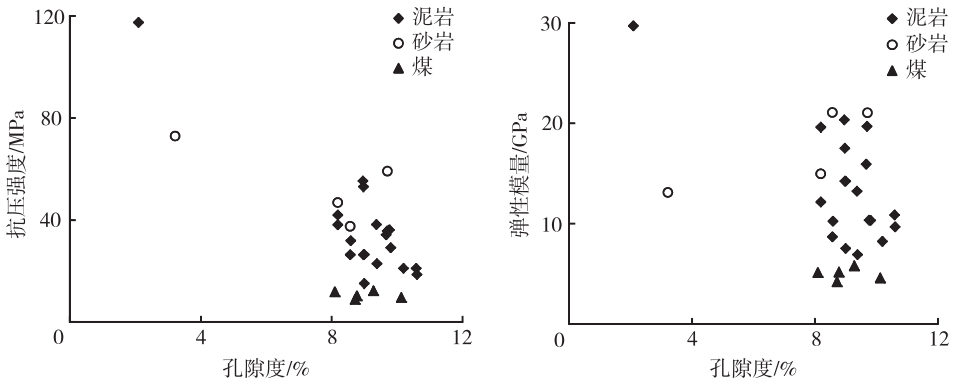


图 2 岩石力学性质与孔隙度的相关图

Fig. 2 Correlation diagrams between mechanical property and porosity of rocks

4 含水率与岩石力学性质

4.1 含水率与饱和抗压强度的关系

岩石由矿物固相物质和孔隙、裂隙内的流体构成，煤是由煤基质、孔裂隙和孔表面的吸附态气体组成。韩城矿区煤层及其顶、底板岩石含水量不同，实验表明，岩石经水饱和后，含水率增大，顶、底板泥岩、砂岩的抗压能力迅速降低，但下降速率不同(图 3)。

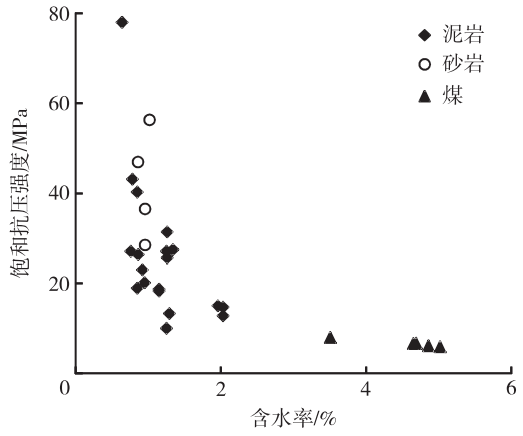


图 3 岩石饱和抗压强度与含水率的关系

Fig. 3 Correlation diagram between saturated compressive strength and water content of rocks

煤的孔隙结构由不同成因、不同孔径的孔隙组成，不同孔隙对煤力学性质影响不同。突破临界喉道压力时，煤中连通孔隙可以完全被水进入，含水率是煤被饱和的孔隙占总孔隙的比例。含水率增加，煤饱和抗压强度减小。

4.2 含水率与软化系数的关系

岩石矿物组成和孔隙特征决定了其软化性质[13]，矿物成分相对简单，岩石孔隙中的流体能增强固体颗粒活性，流体形成的孔隙压力可部分抵消作用在岩石某一作用面上的总应力，因而岩石的弹性屈服极限和抗剪强度降低。当煤中含有大量亲水性的高岭石、黏土矿物时，饱和水的煤层、孔隙外表面及内胶结物被软化溶解，导致岩石颗粒崩裂解体和体积膨胀，引起岩石抗压强度降低。韩城矿区砂岩矿物成分相对简单，软化性主要由孔隙和分形特征决定，但随含水率的改变，砂岩的软化系数变化不明显(图 4)。孟召平等[14]认为随 SiO_2 含量增加，淮南矿区新集井田煤系泥岩的单轴抗压强度和弹性模量变大；闫立宏等[15]认为泥岩含较多的亲水性矿物，水的浸湿降低了煤的强度，加大了煤的变形量。理论上，随含水率的增加，软化系数减小。但本次实验发现，韩城矿区泥岩和煤随含水率的增加，软化系数并未减小，这是因为泥岩矿物组分复杂，煤的

矿物成分简单，含量较少，其软化性还受亲水组分及含量控制。

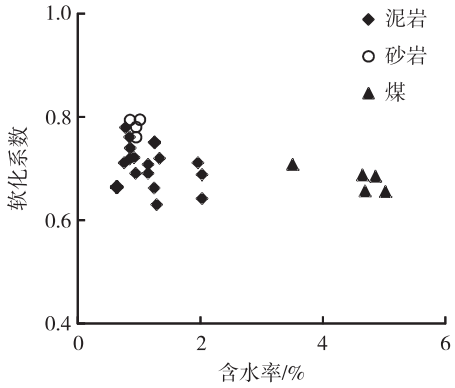


图 4　岩石软化系数与含水率的关系

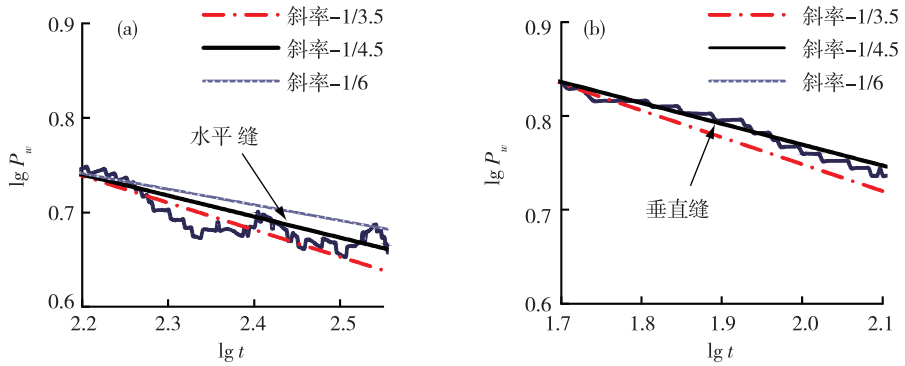
Fig. 4　Correlation diagram between softening coefficient and water content of the rocks

5　岩石力学性质对水力压裂裂缝延伸的控制

砂岩储层与上部、下部非渗透致密岩层的岩石力学性质差异较小，最小水平主应力差是决定裂缝高度的主要因素。煤层不同于常规储层，具有相对低强度、低弹性模量、高泊松比等特点。兰姆方程理论认为，水力裂缝的宽度与弹性模量呈反比[16]，弹性模量越小，水压裂缝宽度越大，煤层越易形成较宽的水力裂缝。然而，相同的施工工艺，裂缝宽度增加制约了裂缝长度的延伸，因此，煤层水力压裂裂缝普遍短而宽。

煤层与其顶、底板力学性质的差异，决定了层间最小水平主应力差，且弹性模量差值越大，最小水平主应力差越大，煤层水力压裂裂缝越易在煤层中延伸；煤层与顶、底板间存在 1 个力学弱面，如果弱面上、下力学性质差异较大，在弱面周围形成低应力区。水力压裂过程中，裂缝垂向延伸至弱面时，受上、下相对高应力煤层顶、底板的阻挡，裂缝沿弱面低应力区的垂直延伸改变为水平延伸，煤层被改造为水平裂缝与垂直裂缝构成的“T”形水力裂缝。

三轴应力理论分析可知，煤层三向应力的相对大小决定了水力裂缝延伸的形态。如果垂向应力小于水平最小应力，水力裂缝形成水平缝；垂向应力大于水平最小应力，裂缝沿垂直方向延伸。因此，韩城矿区 3 号煤层（图 5(a)）以及 5 号煤层（图 5(b)）气井水力裂缝理均为水平缝（表 2）。



(a) 3号煤层　　(b) 5号煤层

图 5　基于数值模拟的韩城矿区煤层水力压裂裂缝形态

Fig. 5　Hydraulic fracturing morphology of coal seams in the Hancheng mining area using numerical simulation

表 2　韩城矿区某井煤层及顶、底板的岩石力学性质

Table 2　Rock mechanical properties of the CBM well in the Hancheng mining area

煤层	埋深/m	弹性模量/Gpa			垂向应力/MPa			水平最小应力/Mpa			水平最大应力/Mpa		
		顶板	煤层	底板	顶板	煤层	底板	顶板	煤层	底板	顶板	煤层	底板
3 号	575	14.2	4.4	16.5	13.4	13.5	13.5	16.9	15.6	17.3	23.1	22.8	23.5
5 号	654	19.7	3.1	22.3	14.8	14.9	15.0	18.4	12.0	18.9	25.0	19.5	25.6

裂缝形态由多种因素综合决定，从压裂改造时压降曲线上可获取裂缝闭合压力 P_w，联立物质平衡方程、裂缝可塑性方程和流体渗流方程[17]，利用水力压裂施工压力分析中井底净压力与裂缝形态的关系式，进而判断水力裂缝的类型。不同类型的水力裂缝判断公式为

$$P_w(t)=\begin{cases}\alpha^{\frac{1}{2n+2}}\left[\frac{\pi}{2}\right]^{-\frac{2n+1}{2n+2}}(KE'^{2n+1}q^n)^{\frac{1}{2n+2}}\left[\frac{L(t)}{H_f^{3n+1}}\right]^{\frac{1}{2n+2}} & \text{水平缝}\\ \alpha^{\frac{1}{2n+2}}\left[\frac{\pi}{2}\right]^{-\frac{2n+1}{2n+2}}\left[KE'^{2n+1}\frac{q^n}{H_f^nL^{2n}(t)}\right]^{\frac{1}{2n+2}} & \text{垂直缝，}\\ \alpha^{\frac{1}{2n+2}}\left[\frac{\pi}{2}\right]^{-\frac{2n+1}{2n+2}}\left[KE'^{2n+1}\frac{q^n}{H_f^nL^{2n}(t)}\right]^{\frac{1}{2n+2}} & \text{均可能}\end{cases}$$

式中 $\alpha=2\left[\frac{2(2n+1)}{n}\right]^n$，$p_w$ 为井底净压力，p_f 为裂缝内净压力，MPa；n 为流变指数，无因次；q 为缝长任意点的流量，m^3/s；K 为稠度指数，$MPa\cdot s^n$；E' 为平面应变弹性模量，MPa；H_f 为裂缝高度，m；$L(t)$ 为 t 时刻裂缝长度，m；α 为沿裂缝长度幂律系数的指数变量。

韩城矿区 5 号煤层是垂直缝，根据该煤层与顶、底板力学性质差异，数据模拟表明：煤层更易形成以垂向应力为主的地应力场，且煤层埋藏较浅，煤层与顶、底板岩石弹性模量差别越大，这种趋势变化越明显，垂向主应力大于最大水平主应力，煤层产生垂直缝（图 5(b)）。

以上分析表明，岩石的孔隙率、孔隙结构、矿物成分及其胶结程度，决定了应力、水分的作用方式和程度，进而影响岩石强度、软化特性等力学性质。此外，利用煤层气测井资料，也可以获取煤层及顶、底板的岩性、孔隙度等力学性质参数，结合施工中压裂和水力裂缝参数，总结煤层压裂裂缝形态的不同特征和规律，及时调整地面水力压裂压力、排量和砂比等参数，可更好地改造煤层裂缝。根据韩城地区水力压裂经验，煤层埋藏较浅，3 号和 5 号煤层压裂的裂缝形态均应为水平缝。裂缝形态的数值模拟也表明，3 号裂缝形态几乎均为水平缝。挑选试验的 5 号煤层及顶、底板岩石力学性质差异明显的煤层气井，在及时调整采用相对更低的前置液百分数和砂比后，5 号煤层压裂的裂缝形态以垂直缝为主，从而相对提高了排采阶段煤层气的产气量。

煤层性质（内因，如力学性质、孔裂隙系统等）和压裂工艺（外因，如压裂液配比，注入压力等）等是影响裂缝延伸的重要因素。受本次研究样品数量所限，从内因探索裂缝延伸机理，从外因控制裂缝三维形态特征，客观表征储层压力致缝并增能增产的研究程度还不够，这是今后的研究方向。

6 结 论

（1）韩城地区煤层与其顶、底板岩石的抗压强度和弹性模量差别明显。顶、底板岩石的抗压强度和弹性模量随孔隙度的增大而减小，煤层的力学性质与孔隙度之间的关系不明显；矿物组成、孔隙率和水分对不同岩性岩石抗压强度的影响方式和程度具有差异。

（2）由于煤层与顶、底板岩石间力学性质差异显著，由煤层气井水力压裂诱发的裂缝与一般的水力裂缝具有不同的特点；当煤层埋藏较浅，煤层与顶、底板岩石的弹性模量相差较大时，水力压裂煤层更易产生垂直裂缝，更易被控制在煤层中。

参考文献

[1] 程远方，吴百烈，李娜，等. 煤层压裂裂缝延伸及影响因素分析[J].特种油气藏，2013，20(2)：126-129.

[2] 李春，陈星，田跃儒. 煤岩储层中水力裂缝延伸扩展规律研究[J].中国高新技术企业，2016，36(10)：148-150.

[3] 梁万库. 水力压裂裂缝识别及评价方法研究[D].大庆：大庆石油学院，2009：41-42.

[4] 陈振宏，王勃，宋岩，等.韩城地区煤层气成藏条件评价[J].天然气地球科学，2006，17(6)：868-870.

[5] 陈同刚. 韩城地区煤储层精细描述及物性主控因素研究[D].北京：中国地质大学（北京），2013：8-9.

[6] 张金亮，张金功，洪峰，等. 鄂尔多斯盆地下二叠统深盆气藏形成的地质条件[J].天然气地球科学，2005，16(4)：526-534.

[7] 崔辽辽. 韩城矿区含煤地层特征及煤层对比方法[J].陕西煤炭，2014，33(5)：26-51.

[8] 端木合顺. 煤层围岩岩石学研究在煤层气评价中的作用——以韩城矿区为例[J].西北地质，1997(4)：90-93.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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，2007：43-144.
[12] 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.
[13] 楼一珊，金业权. 岩石力学与石油工程[M].北京：石油工业出版社，2006：19-22.
[14] 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.
[15] 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.
[16] 蔡美峰，何满潮，刘东燕.岩石力学与工程[M].北京：科学出版社，2002：460-461.
[17] 王正茂，李治平，雷婉，等.水力裂缝模型的自动识别及动态监测技术[J].天然气工业，2004，24(6)：83-85.

Control of mechanical properties of coal seam and its roof and floor rocks over the crack extension during hydraulic fracturing

CHEN Tong-gang[1], WANG Qi-nian[1], ZHU Jiang-bo[1], TANG Da-zhen[2], XU Hao[2]
(1. *Institute of Exploration Technology of Anhui Province, Hefei* 230031, *China*;
2. *School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In order to reveal the influence of mechanical properties of coal seam and its roof and floor rocks on crack extension during hydraulic fracturing, rock three-axis stress was used to test rock mechanical properties of various coal seams and their roof, floor rocks in the Hancheng area, Shaanxi Province. Characteristics and differences of mechanical properties of various rocks are summarized in this study. Through analyzing the relationships between porosity and water content, we explored influences of the differences of mechanical properties on fracture extension. The testing results show that rock strength decreases with increasing porosity, rock softening property depends on mineral compositions and rock porosity, and water contents greatly affect the strength of various rocks in different ways. For a shallowly-buried coal seam, roof and floor rocks of which have significant differences in elastic modulus, hydraulic cracking can be easily restricted within coal seam but extends much further.

Key words: coal seam; roof and floor; rock mechanical property; fracture