

文章编号: 0253-9993(2013)07-1185-06

煤层脉动水力压裂中脉动参量作用特性的实验研究

李全贵 林柏泉 翟 成 倪冠华 李贤忠 孙 臣

(中国矿业大学 安全工程学院 江苏 徐州 221116)

摘 要: 为了研究脉动参量对脉动水力压裂致裂效果的影响,制作了力学特征接近真实煤体的型煤试样,利用脉动水力压裂实验系统分别从不同压裂方式、不同脉动频率和不同参量组合 3 个方面进行了实验,实验结果表明:对于相似型煤试样,脉动压裂在较小压力下使试样破坏,其原因在于使试样产生疲劳破坏;脉动压裂时试样内部变化可分成脉动水充满原始裂隙、裂隙发育和扩展、裂隙贯通 3 个时期;相同压力下,脉动频率越低裂隙发育越充分,脉动频率选择 24 Hz 时煤层增透效果和脉动压裂效率均能得到保证;实施脉动水力压裂时应适当控制脉动压力,为脉动水在煤体内部的反复作用提供时间保证。结合脉动参量组合特点,提出了“双频-双压”压裂工艺。

关键词: 脉动水力压裂;脉动频率;脉动压力;参量组合;疲劳破坏;增透

中图分类号: TD712 **文献标志码:** A

Experimental study on action characteristic of pulsating parameters in coal seam pulse hydraulic fracturing

LI Quan-gui, LIN Bai-quan, ZHAI Cheng, NI Guan-hua, LI Xian-zhong, SUN Chen

(Faculty of Safety Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to study the influence of pulsating parameters to fracturing effect by pulse hydraulic fracturing, coal briquette samples that the mechanical characteristics closed to the real were done, and experiments were taken in three aspects included different fracturing mode and pulsating frequency and parameters' combinations by pulse hydraulic fracturing system. The results show that to the similar briquettes sample pulse fracturing can make the sample destructed under low pressure, for which can make sample fatigue damage. The process of sample internal changes can be divided into three periods which calls pulsating water is full of original fissures, fissures propagation and extension, and fissures connectivity. Under the same pressure, the lower pulse frequency is, the more fissures are, and 24 Hz is selected as the pulsating frequency that meets the need of coal antireflection but also the fracturing efficiency can be guaranteed. The pulsating pressure should be controlled properly so that it can provide sufficient time for the pulsating water at the coal inside repeated when pulse hydraulic fracturing is implemented. Based on the characteristics of pulse parameters combination, "dual frequency-dual pressure" fracturing technology is proposed.

Key words: pulse hydraulic fracturing; pulsating frequency; pulsating pressure; parameters' combination; fatigue damage; antireflection

随着高瓦斯低透气性煤层卸压增透技术研究和防突技术研究的深入开展,许多水力化措施得到应用,其特点都是用水力作为煤体卸压增透的介质,使煤层产生并发育裂隙,提高瓦斯抽采效果^[1-6]。煤矿

井下脉动水力压裂增透技术在国内一些矿井进行了工业性试验应用,初步显示出具有增大煤层透气性、降低地应力及卸压范围大的特点,为低透气性、无保护层开采的突出煤层瓦斯治理提供了一条新的途

收稿日期:2012-11-21 责任编辑:许书阁

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2011CB201205);国家自然科学基金面上资助项目(51274195);江苏省自然科学基金面上资助项目(BK2012571)

作者简介:李全贵(1986—),男,河南民权人,博士研究生。E-mail: guiquanli414@163.com

径^[7-8]。

脉动水力压裂是在普通水力压裂技术的基础上提出的一种新的煤层卸压增透技术,是将具有一定频率的脉动水持续注入钻孔中,由峰值压力与谷底压力构成周期性的脉动波,对煤体裂隙产生交变或重复荷载,逐渐使煤体出现疲劳破坏,促使煤层中的微小裂隙形成和逐渐张开,宏观裂隙扩展联通,最终形成新的裂隙网。文献[9]对高压脉动水对煤体作用进行了理论分析,并利用现场工业性试验得出了脉动压力在 24 MPa、脉动频率在 20 Hz 时,卸压增透效果最好。

当前对于脉动水力压裂时煤体卸压增透机理较少。除了借鉴常规水力压裂的破煤岩机理的研究,脉动水力压裂的研究还需要考虑脉动参量的作用特性。脉动压裂参量包括初始加载压力、脉动压力上升速率、脉动压力峰值、脉动压力持续时间、脉动频率、脉动频率转换等。因此,笔者认为可以从研究以上脉动参量入手,探索不同脉动参量及参量优化组合对煤体致裂效果的影响程度,进而找出脉动水力压裂破煤岩机理。本文重点研究脉动压力和脉动频率两个脉动参量的作用特性,考察脉动不同脉动参量及其组合的不同作用效果,对实施煤层脉动水力压裂技术进行指导。

1 实验方案

1.1 实验设计

脉动水力压裂是在常规水力压裂的基础上提出的新压裂方式,二者不同之处在于,常规水力压裂多采用高压、大流量的乳化液泵将水注入目标煤体^[10],具有流速稳定、起压快等特点,其水流可视为静压压裂,而脉动水力压裂则采用脉动注水泵作为水动力源,将具有一定频率的水注入煤体中。鉴于此,本文实验主要考察不同压裂方式(静压压裂、脉动压裂)及不同脉动参量下脉动压裂的作用效果,分析脉动频率和脉动压力对煤岩致裂的影响程度,对比分析不同脉动压裂参量的作用效果,利用研究成果对脉动水力压裂技术工艺进行优化。开展以下工作:①设计制作型煤试样,使其接近真实煤体的力学特征;②实验 1 考察不同压裂方式(静压压裂、脉动压裂)的试样致裂效果;③实验 2 考察相同压力下不同脉动频率的脉动压裂效果;④实验 3 考察不同脉动压裂参量组合的作用效果。

1.2 实验系统

脉动水力压裂实验系统(图 1)包含注水系统、控制系统、监测系统和效果分析 4 个部分。

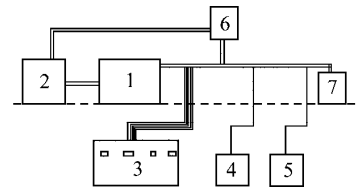


图 1 脉动水力压裂实验系统设备连接

Fig. 1 Equipments connection diagram of pulse hydraulic fracturing test system

1—注水泵;2—自动控制水箱;3—控制台;4—高压流量计;5—压力采集系统;6—溢流阀;7—试样

注水系统由 2 种不同注水形式的泵体组成。脉动压裂选用脉动注水泵。静压压裂选用乳化液泵。2 种注水泵的技术参数见表 1。

表 1 注水泵主要参数信息

Table 1 The main parameters information of water injection pump

注水泵	注水压 力/MPa	输出流量/ (L·min ⁻¹)	输出频 率/Hz	调速 方式	特点
脉动注水泵	0~25	40	0~48	可控硅调速	频率可调
乳化液泵	0~31.5	200			压力稳定

控制系统主要包括溢流阀、压频控制台等。监测系统 and 效果分析主要利用脉动压力测试系统实验过程中记录分析脉动压力和注水时间等参数。压力采集采用高精度数字压力传感器,采集系统采用高速远程数据采集系统,该采集系统集信号调理、传感器供电、数据采集、数据存储为一体,配上不同的传感器,可满足机械振动、机构响应、脉动等较低频率的速度、位移、压力等连续实时监测。两种压裂方式均使用溢流阀进行压力控制。

文献[11]采用煤粉、水泥和石膏粉配制了型煤,实验了 7 种配合比,经实验得到配合比煤粉:水泥:石膏:水=0.5:1:1:0.8,接近真实煤体力学特征。根据煤层赋存状况、水力压裂的影响范围等,确定 1:30 作为相似比^[12]。因此,假定单个压裂孔影响半径为 9 m,钻孔长度为 90 m,钻孔直径为 120 mm,则实际模型半径应 ≥ 30 cm,注水管深度应 ≥ 30 cm,注水管直径应约为 8 mm。

2 实验过程

定义 10 Hz 为低频压裂,24 Hz 为中频压裂,48 Hz 为高频压裂,定义 2 MPa 为低压压裂,4 MPa 以上为高压压裂。3 个实验中的试样分别标记为 A 组、B 组、C 组,每组包括 4 个试样。根据实验设计思路,按照以下步骤进行实验:

(1) 实验 1 考察不同压裂方式(表 2)。分别使用乳化液泵和脉动注水泵进行静压压裂和不同频率的脉动压裂,开泵前保持溢流阀全部打开,启动泵,水流稳定后开始调节溢流阀。均匀关闭溢流阀至 75%。

表 2 不同压裂方式记录参数

Table 2 Recording parameters of different fracturing modes

试样	压裂方式	最大注水压力/MPa	注水时间/s	结束状态	溢流阀状态(开口)
A ₁	静压压裂	5.0	95	开裂	25%
A ₂	高频压裂(48 Hz)	3.2	108	开裂	25%
A ₃	中频压裂(24 Hz)	2.0	120	开裂	25%
A ₄	低频压裂(10 Hz)	1.6	140	开裂	25%

(2) 实验 2 考察相同压力下不同脉动频率的脉动压裂。对于 A 组型煤试样,使用不同频率,其起裂压力变化范围为 1.6~3.2 MPa。本实验所采用 B 组型煤试样,选定 1.6 MPa 作为最高注水压力。首先保持溢流阀开口 50%,逐渐关闭溢流阀,使压力升至 1.6 MPa 后,适当打开溢流阀,使压力保持在 1.6 MPa。注水时间依据型煤试样变化而定,出现开裂或出水停止,最大时间为 95 s。脉动压裂同时,同样使用静压压裂,以作对比。实验结果见表 3。

表 3 不同频率下脉动压裂记录参数

Table 3 Pulse fracturing recording parameters of different frequencies

试样	注水频率/Hz	最大注水压力/MPa	注水时间/s	结束状态	溢流阀状态(开口)
B ₁	48	1.6	50	开裂	50%~30%
B ₂	24	1.6	75	渗水	30%~20%
B ₃	10	1.6	80	渗水	30%~20%
B ₄	静压压裂	1.6	95	完整	50%~30%

(3) 实验 3 考察脉动压力和脉动频率两个脉动参量的组合效果。脉动压力和脉动频率之间可以组成以下组合“高压-低频”、“高压-高频”、“低压-低频”、“低压-高频”。

对于 C₁, C₂ 型煤试样,分别采用“高压-低频”和“高压-高频”两种组合,其方法为,调节好频率后,迅速关闭溢流阀至 10%,至型煤试样开裂。对 C₃, C₄ 型煤试样,分别采用“低压-低频”和“低压-高频”两种组合,其方法为,两个型煤试样分别对应高频和低频,选定 2 MPa 为注水压力,通过调节溢流阀,保持注水压力在 2 MPa 以内,至型煤试样渗水或开裂。4 个型煤试样压裂实验过程参数见表 4。

表 4 不同组合下脉动压裂参数

Table 4 Pulse fracturing recording parameters of different combinations

试样	注水频率/Hz	最大注水压力/MPa	组合形式	注水时间/s	结束状态
C ₁	10	5	高压-低频	15	开裂
C ₂	48	7	高压-高频	10	开裂
C ₃	10	2	低压-低频	300	渗水
C ₄	48	2	低压-高频	240	渗水

3 实验结果及分析

3.1 脉动压裂与静压压裂作用效果的对比分析

表 2 中记录了不同压裂方式的注水时间及最大注水压力,4 种条件下试样均被破裂。为使型煤试样开裂,使用脉动压裂方式时最大注水时间为 140 s,整个过程中出现的最大压力为 3.2 MPa;使用静压压裂方式时注水时间为 95 s,整个过程中出现的最大压力为 5 MPa。单独对比最大压力,静压压裂所需的注水压力大于脉动压裂。而从注水时间上看,静压压裂的时间最短。因此,从直观上看,脉动压裂能够在较小的注水压力下破坏型煤试样。

图 2 表明,相似型煤试样下,不同的压裂方式,其作用过程也不尽相同。根据压力随时间的变化,将压裂过程人为分成 3 个阶段:压力上升期、压力反复期和压力下降期。在压力上升期内,孔及孔周围内迅速充满水,水以渗流形式进入试样原始裂隙中,4 种状态下压力均呈直线上升,由于流量和注水频率的不同,时间上也不同。随着压力上升到第 1 个峰值,出现压力的回落,进入压力反复期。这一时期,原始裂隙被水充满,随着持续注水,原始裂隙的扩展、次生裂隙的产生以及裂隙之间的贯通引起了注水压力的反复。在压力反复期后期,持续上升的压力等于或者超过了试样的最大破裂压力,导致试样开裂,压力开始逐渐下降。对比脉动压裂和静压压裂,二者最大的不同在于压力反复期,图 2(a)~(c) 显示,压力出现多次反复,变化幅度较小,次数较多,而图 2(d) 显示,静压压裂仅出现了一次压力反复。因此,脉动压裂时试样内部裂隙发生扩展、发育及贯通的几率和次数较多。结合文献[13-14]对煤岩体“门槛值”和疲劳损伤的定义,可以认为:

(1) 静压压裂和脉动压裂对型煤试样的破坏是两种不同的破坏方式。脉动压裂使试样开裂的原因在于使试样产生疲劳破坏。文献[15]利用实验得出“循环荷载作用下煤样疲劳破坏“门槛值”不超过单

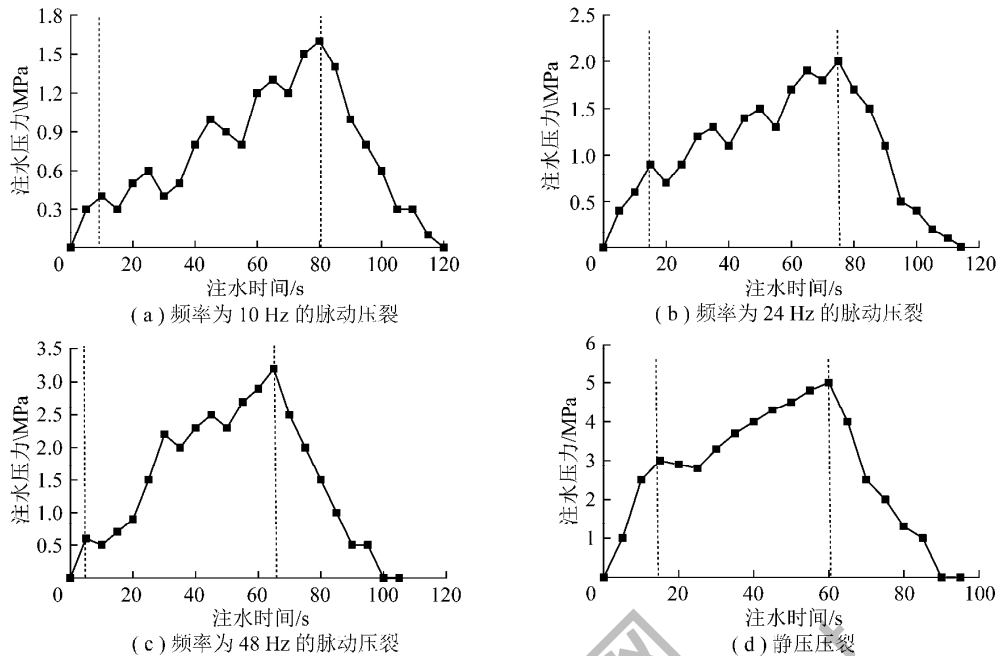


图2 不同压裂方式注水压力随时间的变化

Fig. 2 Changes of fracturing pressure with the time in different fracturing modes

轴抗压强度的81%,且在疲劳破坏“门槛值”以下进行循环加载、卸载时,也会产生一定程度的疲劳损伤”型煤试样的破坏存在“门槛值”,脉动压裂时虽然压力很低,但在足够的脉动荷载下,型煤试样仍然出现损伤。

(2) 对比分析脉动压裂和静压压裂的压裂过程,压力反复期的长短对于裂隙的发育至关重要。对应于压裂过程中各个压力期的变化,可以将脉动压裂时试样内部变化分为脉动水充满原始裂隙、裂隙发育和扩展、裂隙贯通3个时期。

另外,不同频率下脉动压裂的压力与时间也有明显区别。频率为10 Hz的低频压裂最大压力为1.6 MPa,频率为24 Hz的中频压裂最大压力为2 MPa,频率为48 Hz的高频压裂最大压力为3.2 MPa,且所需时间分别为140,120,108 s。在高频压裂状态时,注水压力和注水时间接近于静压压裂,频率降低时,注水时间和注水压力也随着变化。因此,对于脉动压裂,频率不同时其作用效果也不同。

3.2 相同压力下脉动频率对压裂效果的影响分析

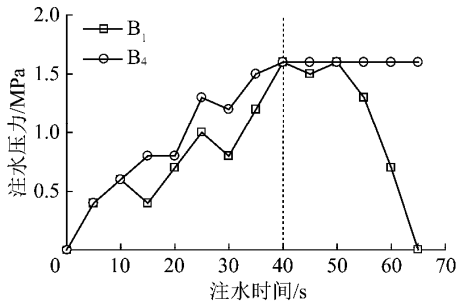
表3显示,对于相似型煤试样,在相同压力下,脉动频率不同时,试样的破坏过程及程度也不同。图3中描述了各种方式压裂过程中注水压力的变化。图3(a)中,频率为48 Hz的脉动压裂过程经历了压力上升期、压力反复期和压力下降期3个阶段,10~50 s共出现4个峰值,而在40和50 s处达到了设定的1.6 MPa,在50 s时试样开裂,而静压压裂仅出现了1

次峰值,在38 s时达到1.6 MPa,后随着时间的延续,试样没有出现破裂。图3(b)中,频率为24 Hz的中频压裂在55 s时达到1.6 MPa,在经历了多次压力反复后,65 s时试样出现渗水,频率为10 Hz的低频压裂在60 s时达到1.6 MPa,同样经过压力反复期后,70 s试样出现渗水,两者在反复次数上略有不同,低频时压力反复较多。

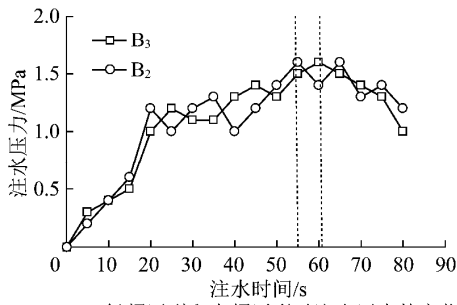
对比4种不同压裂方式的结果可知:脉动压裂使试样开裂或者渗水的原因在于使试样出现疲劳破坏,而在压力不够大(1.6 MPa)时静压压裂难以破坏试样,这一点和实验1的结论吻合;脉动频率不同时,脉动压裂的效果也不同,结合实验1中裂隙发育和扩展与压力反复期的对应关系可知,低频压裂更加利于裂隙的扩展和发育。脉动频率对于压裂效果影响的基本规律在于脉动频率越低裂隙发育越充分,但试样得到破坏所需的时间也越长。因此,综合考虑现场实施效率和增透效果的需要,在现有技术条件下,脉动频率选择24 Hz时既能满足增透的需要,也能使脉动水力压裂效率得到保证。

3.3 脉动参量组合的特点分析及“双频-双压”压裂工艺的提出

实验1和实验2主要讨论了两种压裂方式的特点和脉动压裂时脉动频率的选择。在现场进行脉动水力压裂实施时,可以通过不同的脉动压力和脉动频率控制压裂过程。实验3尝试对不同的脉动压力和脉动频率进行组合,探索不同脉动参量组合的作用效



(a) 高频压裂和静压压裂时注水压力的变化



(b) 低频压裂和中频压裂时注水压力的变化

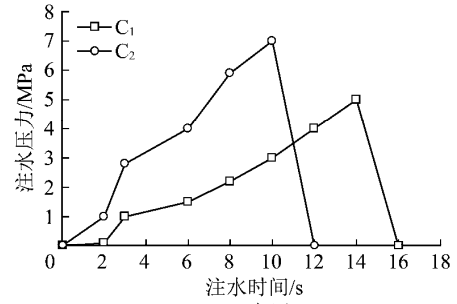
图 3 相同压力下不同注水频率下注水压力变化

Fig. 3 Changes of fracturing pressure with same pressure and different fracturing frequencies

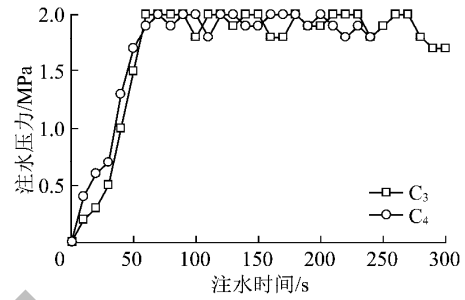
果。

表 4 显示, 高压状态下, C_1 和 C_2 试样均开裂。低频压裂 15 s 时达到最大压力 5 MPa, 高频压裂 10 s 时达到最大压力 7 MPa, 低频时所用压力较小。图 4(a) 显示, 二者压力均呈直线上升, 与实验 1 2 中的压力-时间相比, 压力反复期不明显。因此, 单纯使用较高的脉动压力不利于脉动压裂发挥其作用。表 4 显示, 低压状态下, 足够长的时间内(分别为 300, 240 s), 高频和低频压裂使 C_3, C_4 试样产生渗水破坏。图 4(b) 中, 二者压力变化轨迹基本相同。在低压状态下, 脉动压裂有足够时间使具有一定频率的水在试样内部作用, 形成较长时间的压力反复期, 造成试样的疲劳破坏, 最终渗水。因此, 综合 C_1, C_2, C_3, C_4 四个实验, 实施脉动水力压裂时, 应适当控制脉动压力, 为脉动水在煤体内部的反复作用提供时间。

进一步分析脉动参量组合的特点, 可以看出: “高压-高频”和“高压-低频”具有压力上升快、裂隙起裂快但压力反复期不明显的特点; “低压-高频”和“低压-低频”具有裂隙起裂慢但裂隙发育充分的特点。实验 2 得出了脉动频率为 24 Hz 时, 脉动水力压裂的效果和效率均能得到保证, 为了进一步提高脉动水力压裂的增透效果, 结合各参量组合的特点, 现场实施脉动水力压裂时, 可以尝试“双频-双压”压裂工艺, 即压裂前期钻孔及其周围存在孔隙及大量原始裂隙, 采用“高压-高频”迅速充满钻孔及原生裂隙, 形



(a) 高压



(b) 低压

图 4 不同脉动参量组合脉动压裂压力的变化

Fig. 4 Changes of pulse fracturing pressure of different parameters' combination

成钻孔主要裂隙。待压力上升明显时, 切换“高压-高频”至“低压-低频”, 延长压力反复期, 促进钻孔周围裂隙的扩展和发育。整个过程中, 可多次切换频率, 达到“高压-高频”注水、“低压-低频”起裂的效果, 最终形成裂隙网。

4 结 论

(1) 对于相似的型煤试样, 静压压裂使试样开裂的最大压力为 5 MPa, 脉动压裂分别以 3.2, 2.0, 1.6 MPa 使试样开裂。静压压裂和脉动压裂对型煤试样的破坏是两种不同的破坏方式, 脉动压裂能够在较小的注水压力下破坏型煤试样。

(2) 脉动压裂使试样开裂的原因在于使试样产生疲劳破坏。型煤试样的破坏存在“门槛值”, 脉动压裂时虽然压力很低, 但在足够的脉动荷载下, 型煤试样仍然出现损伤。压力过程中压力反复期决定了裂隙发育程度。根据脉动压力的变化特点, 压裂过程人为分成 3 个阶段: 压力上升期、压力反复期和压力下降期。对应于各个时期压力的变化, 可以将脉动压裂时试样内部变化分为脉动水充满原始裂隙、原始裂隙扩展及次生裂隙发育、裂隙贯通 3 个时期。

(3) 相同压力下, 脉动频率不同时, 脉动压裂的效果也不同, 其基本规律是脉动频率越低裂隙发育越充分, 但试样得到破坏所需的时间也越长。在现场实施脉动水力压裂时, 在现有技术条件下, 脉动频率选择 24 Hz 时既能满足煤层增透的需要, 也能使脉

动水力压裂效率得到保证。

(4) 对脉动压力和脉动频率两个脉动参量进行了设计“高压-低频”、“高压-高频”、“低压-低频”、“低压-高频”4种组合,并尝试对4种组合的作用效果进行了分析。结果认为,单纯使用较高的脉动压力不利于脉动压裂发挥其作用,实施脉动水力压裂时,应适当控制脉动压力,为脉动水在煤体内部的反复作用提供时间。结合脉动参量组合的特点,提出了“双频-双压”的脉动压裂工艺。

参考文献:

- [1] 富 向. 井下点式水力压裂增透技术研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(8): 1317-1321.
Fu Xiang. Study of underground point hydraulic fracturing increased permeability technology [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(8): 1317-1321.
- [2] 孟筠青. 煤层高压脉动注水防治煤与瓦斯突出理论与技术研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2011.
Meng Junqing. Study on the theory and technology of coal seam high pressure pulsion water infusion preventing coal and gas outburst [D]. Beijing: China University of Mining and Technology(Beijing), 2011.
- [3] 王兆丰. 我国煤矿瓦斯抽放存在的问题及对策探讨[J]. 焦作工学院学报(自然科学版) 2003, 22(4): 241-246.
Wang Zhaofeng. Probe into the problems of methane drainage in China's coal mines and its countermeasures [J]. Journal of Jiaozuo Institute of Technology(Natural Science) 2003, 22(4): 241-246.
- [4] 宋维源, 李大广, 章梦涛. 煤层注水的水气驱替理论研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(2): 147-150.
Song Weiyuan, Li Daguang, Zhang Mengtao. The Study on the theory of water and gas replacing during water injection into coal seams [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2006, 17(2): 147-150.
- [5] 李全贵, 翟 成, 林柏泉, 等. 低透气性煤层水力压裂增透技术应用[J]. 煤炭工程, 2012(1): 31-36.
Li Quanguai, Zhai Cheng, Lin Baiquan, et al. Application of hydraulic fracturing and permeability improvement technology to low permeability seam [J]. Coal Engineering, 2012(1): 31-36.
- [6] 马中飞, 俞启香. 水力卸压防止承压散体煤和瓦斯突出机理[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(1): 103-106.
Ma Zhongfei, Yu Qixiang. Mechanism of preventing coal and gas compression disseminated values outburst with stress pre-released hydraulically [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2007, 36(1): 103-106.
- [7] 翟 成, 李贤忠, 李全贵. 煤层脉动水力压裂卸压增透技术研究与应用[J]. 煤炭学报, 2011, 36(12): 1996-2001.
Zhai Cheng, Li Xianzhong, Li Quanguai. Research and application of coal seam pulse hydraulic fracturing technology [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(12): 1996-2001.
- [8] 倪冠华, 林柏泉, 翟 成, 等. 脉动水力压裂的电磁辐射机理及其应用[J]. 煤矿安全, 2011, 42(11): 1-4.
Ni Guanhua, Lin Baiquan, Zhai Cheng, et al. Electromagnetic radiation mechanism of pulse hydraulic fracturing and its application in mine [J]. Safety in Coal Mines, 2011, 42(11): 1-4.
- [9] 林柏泉, 李子文, 翟 成, 等. 高压脉动水力压裂卸压增透技术及应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(3): 452-455.
Lin Baiquan, Li Ziwen, Zhai Cheng, et al. Pressure relief and permeability-increasing technology based in high pressure pulsating hydraulic fracturing and its application [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2011, 28(3): 452-455.
- [10] 张国华. 本煤层水力压裂致裂机理及裂隙发展过程研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2003.
Zhang Guohua. The study of induce-crack mechanicals and cranny's development process about hydraulic fracture in mining-coal bed [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2003.
- [11] 黄炳香. 煤岩体水力致裂弱化的理论与应用研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(10): 1765-1766.
Huang Bingxiang. Research on theory and application of hydraulic fracture weakening for coal-rock mass [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(10): 1765-1766.
- [12] 顾大钊. 相似材料和相似模型[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1995.
- [13] 葛修润. 周期荷载作用下岩石大型三轴试验的变形和强度特性研究[J]. 岩土力学, 1987, 8(2): 12-15.
Ge Xiurun. Study on deformation and strength behavior of large-sized triaxial rock samples under cyclic loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 1987, 8(2): 12-15.
- [14] 葛修润, 卢应发. 循环荷载作用下岩石疲劳破坏和不可逆变形问题的探讨[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(3): 56-60.
Ge Xiurun, Lu Yingfa. Discussion of rock fatigue failure and non-reversible deformation under cyclic loading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(3): 56-60.
- [15] 杨永杰, 宋 扬, 楚 俊. 循环荷载作用下煤岩强度及变形特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 202-205.
Yang Yongjie, Song Yang, Chu Jun. Experiment study on characteristics of strength and deformation of coal under cyclic loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 202-205.