

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2017.04.19

九里山煤矿垂直井起裂压力对煤层气产能的影响

王志荣¹, 郭志伟¹, 徐培远^{2,3}, 陈玲霞¹

(1. 郑州大学水利与环境学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南省煤田地质局, 河南 郑州 450053;
3. 河南省能源钻进工程技术研究中心, 河南 郑州 450053)

摘要: 为了总结豫北焦作矿区九里山煤矿煤层气井压裂抽采试验的成功经验与失败教训, 基于弹性平面应变理论和数值模拟方法, 讨论了煤岩体压裂缝的形成与发展机理, 并推导了“三软”煤层压裂抽采井在不同地质条件下的起裂压力计算公式。通过对比计算结果与实际抽放试验资料, 认识到在张性断裂构造发育的大水矿区, 过大的压裂措施使煤层气井筒附近煤储层隔水底板受到较为严重的损伤, 压裂缝转向底板太原组 L_{7-8} 岩溶含水层, 导致大量地下水涌入地面采井。从产能效果看, 强烈的地下水径流作用, 使原先游离于储层空隙中的煤层气逸散殆尽, 孔隙水压也使得大量吸附于裂隙中的煤层气难以解析, 因而无法形成长期稳定的单井规模产量。

关键词: 九里山煤矿; “三软”煤层; 煤层气垂直井; 起裂压力

中图分类号: TD845

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2017)04-0124-05

Influence of fracturing pressure of vertical well to CBM capacity in Jiulishan coal mine

WANG Zhirong¹, GUO Zhiwei¹, XU Peiyuan^{2,3}, CHEN Lingxia¹

(1. College of Environmental and Hydraulic Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China;
2. Henan Coalfield Geology Bureau, Zhengzhou, Henan 450053, China; 3. Research Centre
of Gas Well Engineering of Henan, Zhengzhou, Henan 450053, China)

Abstract: Based on the elastic plane strain theory, this article deduces the crack pressure calculation formula of fracturing extraction wells under different geological constructions in order to summarize the successes and the failures of the fracturing extraction experiment in the Jiulishan coal mine of the Jiaozuo coal field. By comparing the computation results with the actual drainage test data, it is found that in the tensile fracture development areas, the overlarge fracture measures will do great harm to the impermeable bases of coal reservoirs near the coal bed gas wells, and the fracturing fractures spread to the L_{7-8} karst aquifer of the Taiyuan Group, resulting in a large number of underground water into the surface wells. The fierce river course of groundwater makes almost all the coal bed gas escape from the interspaces of the reservoir stratum where it stays. Additional water pressure makes it difficult for much coal bed gas absorbed in fissures to escape, so it cannot form a long-term stable single well scale output.

Keywords: Jiulishan coal mine; “three soft” coal seam; CBM vertical well; fracturing pressure

我国是世界上少数几个煤与瓦斯突出极其严重的国家, 特别是河南省“三软”大水矿区, 晚石炭与中奥陶统岩溶水发育且各层水力联系较为复杂^[1], 主采二₁煤层变形

强烈、渗透率极低, 瓦斯与突水事故频发^[2-3]。随着“能源安全”与“环境保护”上升到国家战略层面, 复杂地质条件下煤层气的开采技术研究已经迫在眉睫^[4]。

收稿日期: 2016-09-19; 修订日期: 2016-11-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272339)

第一作者: 王志荣(1963-), 男, 教授, 博士, 主要从事岩土工程与地质灾害防治研究。E-mail: wangzhirong513@sina.com

水力压裂增透技术作为煤层气抽采的主要方法之一,能有效地增加煤层透气性,提高煤层气抽采率,从而彻底解决矿井瓦斯地质灾害问题。水力压裂增产作业于1947年在美国首次进行,由于增产效果十分显著^[5],在我国低渗透煤层气气田的开发过程中得到了不断改进和迅速发展^[6-7]。我国从1970年开始在阳泉、抚顺、焦作等煤矿开展了地面和井下钻孔煤层水力压裂抽放瓦斯试验,并取得很好的产能提高效果。然而,在河南省焦作大水矿区,抽采试验虽然取得了不少成功经验,也揭示出一些严重的地下水害问题,如许多地面井压裂后触及含水层而诱发涌水现象^[8-9]。近年来,压裂作用对地下水循环以及地面井产能的影响一直是复杂大水矿区非常规天然气开发的热点问题^[10-11],本文通过总结若干试验井抽采的经验教训,推导了复杂地质条件下地面井起裂压力的计算公式,并分析了焦作试验区钻井涌水与产能二者相互关系,为大水矿区高效利用煤层气资源起到一定示范作用。

1 地质背景

九里山煤矿位于焦作煤田中部核心区段,单斜构造,产状平缓,倾向南东 150° 左右,倾角 $10^{\circ} \sim 16^{\circ}$ 。区内发育两组断裂构造,一组为NEE向,主要有马坊泉断层;另一组为NW向倾向断层,主要有方庄断层和魏南断层。上述两组断层均属张扭性高角度正断层,构成矿区充水边界(图1)。



图1 焦作九里山矿区水文地质略图

Fig. 1 Hydrogeological map of the Jiulishan mining area

1—井田边界;2—断层上下盘;3—第四系孔;4— L_8 孔;5— L_2 孔;
6— O_2 孔;7—推测断层;8—铁路

气源岩二₁煤层厚度集中在3.00~7.00 m,含气性极好,达 $10 \sim 38 \text{ m}^3/\text{t}$,埋深一般250~750 m,为煤层气开采的较佳深度。矿区水文地质条件复杂,底板突水风险较大。直接充水含水层 L_8 灰岩平均厚8.44

m,上距二₁煤层20~25 m。1982年以来矿井共突水24次,最大突水强度为 $3226 \text{ m}^3/\text{h}$,其中底板石炭系 L_8 灰岩突水达19次,占总数的80%。

2 “三软”煤层起裂压力

2.1 煤层变形特征

在我国采矿界,使用“三软”煤层这一术语虽然由来已久,但至今尚无公认的确切定义。通常认为,“三软”煤层指一定开采技术条件下由软煤、软顶和软底构成的特殊地质体。

“三软”煤层的核心内容是软煤。软煤的通俗含义即受构造作用改造,强度低、变形大且易破碎的煤体。也就是说,软煤即地质意义中的构造煤,是在一期或多期构造应力作用下,在一定的工程环境中,煤体的原生结构、构造遭到不同程度的破坏,同时引起物理力学性能极大变化的一类煤。从瓦斯地质学角度,构造煤尚包括瓦斯含量、瓦斯压力及瓦斯渗透性能等物性内容,因而是煤层气开发领域的一个综合性范畴。

试验区二₁煤层呈复杂结构,是我国典型的“三软”煤层。据毗邻恩村井田CQ₆参数井揭露,上部5.40 m为块状煤,节理发育,坚固系数 f 为0.2~0.5;下部2.15 m为粉状煤,坚固系数 $f < 0.12$ 。粉状煤体质松性脆,揉搓现象严重,碎裂后断面光滑,伴生有大量摩擦镜面、擦痕及擦槽。根据曹代勇等^[12]提出的构造煤变形序列划分方案,块状煤裂隙发育,应属I-II类构造软煤,即碎裂-碎斑煤;而粉状煤极其破碎,则属典型的IV类碎粒煤。

2.2 模型推导

注水压裂技术就是借鉴地面油气井压裂工艺,一般在地面布置压裂孔,沿一定方向进行水力压裂,然后进行抽采的一种油气井增产、注水井增注的重要技术措施。该技术依靠水力能量憋压,将地层压开一条或多条水平或垂直裂缝,然后用支撑剂(砾石)支撑裂缝,形成高导流能力通道,从而达到增产增注目的。然而,九里山煤矿水文地质条件复杂,如果地面起裂压力过大,压裂缝穿过底板隔水层,则会触及 L_8 岩溶含水层甚至边界充水断层,从而引发地下水涌出、煤层气渗漏、地面沉降以及矿区诱发地震等地质灾害(图2)。

因此,为了确保大水矿区的地下水环境,以及压裂改造作用后的煤层气产能,必须正确采用地面起裂压力这一关键施工参数。设地面井射孔内施加注水压力 P ,由于煤体的抗拉强度远小于抗剪强度与抗压强度,所以往往最先在 θ 等于 90° 方向,及垂直方向发生拉张破坏。在实际压裂过程中,随着内水压力逐渐增加,

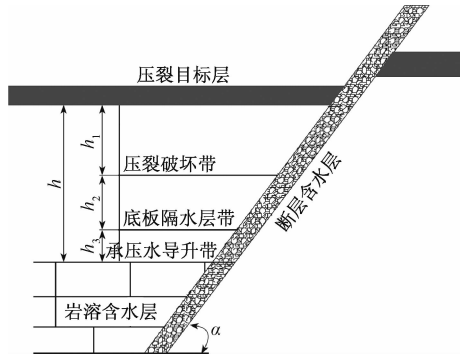


图2 大水矿区压裂抽采地质环境示意图

Fig.2 Sketch map of the geological environment of hydraulic fracturing in the large water mining area

利用应力叠加原理求解,可根据最大拉伸破坏强度准则,得出层状体系如下起裂条件^[13]:

若 $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ 或 $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$, 则有:

$$P_{wf} = \frac{3\sigma_h - \sigma_H - 2P_r + [\sigma_t^h]}{2 - \beta \frac{1-2\nu}{1-\nu}} + P_r \quad (1)$$

式中: P_{wf} ——起裂压力/MPa;

σ_v ——垂直应力/MPa;

σ_h, σ_H ——最小、大水平主应力/MPa;

P_r ——地层压力/MPa;

$[\sigma_t^h]$ ——煤体水平抗拉强度/MPa;

ν ——煤层泊松比;

β ——Biot 系数。

若 $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$, 则有:

$$P_{wf} = \frac{\sigma_v - P_r + [\sigma_t^z]}{1.94 - \beta \frac{1-2\nu}{1-\nu}} + P_r \quad (2)$$

式中: $[\sigma_t^z]$ ——煤体垂直抗拉强度/MPa;

设构造稳定条件下,地下半空间无限体完全侧限,地层无任何缩短与伸长,则有

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \mu \left(\frac{\sigma_z}{E} + \frac{\sigma_y}{E} \right) = 0 \quad (3)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} - \mu \left(\frac{\sigma_z}{E} + \frac{\sigma_x}{E} \right) = 0 \quad (4)$$

式中: $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ —— x, y 方向的应变;

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ —— x, y, z 方向的水平主应力/MPa;

E ——弹性模量/MPa。

联立式(3)与式(4)得:

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_z \quad (5)$$

$$\lambda = \frac{\sigma_x}{\sigma_z} = \frac{\sigma_y}{\sigma_z} = \frac{\mu}{1-\mu} \quad (6)$$

式中: λ ——构造单元体的侧压力系数;

μ ——构造单元体的泊松比。

将式(6)代入式(1)、(2)分别得:

$$P_{wf} = \frac{2\lambda\sigma_{cz} - 2P_r + [\sigma_t^h]}{2 - \beta(1-\lambda)} + P_r \quad (7)$$

$$P_{wf} = \frac{\sigma_{cz} - P_r + [\sigma_t^z]}{1.94 - \beta(1-\lambda)} + P_r \quad (8)$$

由文[17]同理推得,设 σ_p 为裂缝起裂时的脉动注水强度,则动力条件下水平裂缝的形成条件:

$$\sigma_p = \frac{\sigma_z + [\sigma_t^z] - P_r\beta(1-\lambda)}{1 + m - \beta(1-\lambda)} \quad (9)$$

修正后为:

$$\sigma_p = \frac{\sigma_z + [\sigma_t^z] - P_r\beta(1-\lambda)}{1.5 + m - \beta(1-\lambda)} \quad (10)$$

2.3 模型分析

由储层起裂压力计算公式(7)、(8)可知,岩体破裂的起始压力不仅取决于最大主应力,还与最小主应力有关,即取决于二者的组合形式。鉴于复杂结构煤层形成于一定的构造环境,不同构造单元中煤体结构明显不同,因而侧压力系数的取值应考虑矿区构造特征。挤压区煤层在水平方向呈缩短效应,一般形成糜棱煤, λ 值最大取 0.8 ~ 1.2; 稳定区地层处自然侧限状态,被近似认为水平方向无任何变形,一般形成简单结构煤,根据煤体泊松比试验值,换算得 λ 为 0.3 ~ 0.5; 伸展区即正断层发育区,地层在水平方向有伸长空间,故 λ 值最小,取 0.2 ~ 0.3,一般赋存碎裂煤。由起裂压力计算模型式(7) ~ (10),计算时储层压力梯度取 5 kPa/m,地层储层压力取 4.14 MPa,地应力梯度取 2.45 MPa/100 m,煤体抗张强度取 0.8 MPa,取 0.31, Biot 系数取 1^[9]。从而得到不同构造单元、不同类型软煤的垂直井起裂压力值随埋深的关系(图3)。

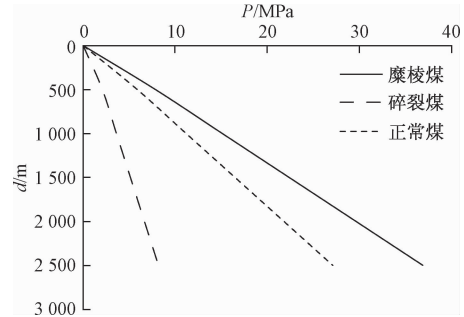


图3 射眼垂直井的煤体起裂压力值与埋深关系
Fig.3 Crack pressure value of the coal body in the vertical well

“三软”煤层的起裂压力除了与埋深有关外,还与本身的力学性能及煤体结构有关。可以说,煤体结构在复杂矿区有着极其重要的研究意义,构造煤尤其是糜棱煤是一种具有丰富地质信息的天然

气载体,对各种力学环境具有独特的力学响应。位于同一深度的煤层,结构致密的糜棱煤更容易塑造水平裂缝,且起裂压力要大于正常煤,更大于碎裂煤(表1)。

表1 垂直井的煤体起裂压力值

Table 1 Crack pressure value of the coal body in the vertical well

软煤结构 λ 埋深/m	糜棱煤 λ=0.8~1.2(水平缝)		碎裂煤 λ=0.2~0.3(垂直缝)				正常煤 λ=0.3~0.5(垂直缝)	
	静压破坏/MPa		脉动水压/MPa		脉动水压/MPa		脉动水压/MPa	
	0.8	0.8	0.2	0.3	0.2	0.3	0.5	0.5
500	7.83	5.73	2.08	3.34	1.47	2.35	5.86	4.13
1000	15.08	10.68	3.60	6.12	2.54	4.31	11.16	7.86
1500	22.33	15.64	5.12	8.90	4.01	6.27	16.46	11.59
2000	29.58	20.59	6.64	11.68	4.68	8.26	21.76	15.32
2500	36.83	25.54	8.16	14.46	5.74	10.18	27.06	19.06

3 应用实例

2009年1—5月,焦作矿区九里山煤矿在试验井田范围内共布置8个地面压裂试验钻孔,分别为JLS试-002、JLS-试006、JLS-试007、JLS-试008、JLS-试010、JLS-试011、JLS-试014与JLS-试016,均采用相同的地面垂直井射眼压裂抽采工艺。以JLS试-002为例(表2~3),该井煤层埋深403.02~408.64m,厚5.62m,无夹矸不取心;测井资料得知固定碳含量为68.36%,灰分为15.37%,煤质较好;施工压力为7.2~11.8MPa,破裂压力为11.8MPa,停泵压力为6.4MPa,测压降60min后压力为5.2MPa。

根据垂直井起裂压力计算公式和矿区构造特征,求得九里山井田各试验井的 P_{wf} 值大致在4.21~

9.96MPa。由于JLS试-002地面井起裂压力的理论值与实际值比较接近,故压裂效果较为理想,施工三个月后累计产水量只有295.73m³,累计产气量相应达92405.81m³(表4)。但其余试验井实际破裂压力都远远大于相应的理论预测值,一般都在2~3倍,这在大水矿区是比较冒险的。试验井产能结果充分印证了这一点,由于初始破裂压力过大,压裂缝贯通含水层导致抽采井出水量很大,但实际煤层气的产能几乎都接近零(表4)。

表2 JLS试-002井射孔布置

Table 2 JLS No. 2 Test well's perforation layout

号	射孔井段/m	厚度/m	射孔枪型	孔密/(孔·m ⁻¹)	孔数/孔
二 ₁	403~407	4	102枪弹	16	64

表3 JLS试-002井压裂液使用情况

Table 3 JLS No. 2 Test well's fracturing fluid service condition

	施工排量/ (m ³ ·min ⁻¹)	压裂液/m ³				石英砂/m ³			平均 砂比/%	加砂率 /%
		前置液	携砂液	替置液	总量	中砂	粗砂	总量		
设计	7.0 ~ 8.0	180	209	4.9	393.9	20	20	40	18.0	100
施工	7.6 ~ 7.8	180	196	5.2	381.9	20	20	40	17.8	100

表4 焦作九里山矿区压裂值与煤层气产能关系

Table 4 Relationship between gas production and pressure value in the Jiulishan coal mining in Jiaozuo

井号 (JLS试)	起裂压力/MPa		日均产 水量/m ³	日均产 气量/m ³	累计产 水量/m ³	累计产 气量/m ³
	计算值	实测值				
002	9.96	11.8	0.73	296.45	295.73	92405.81
006	4.21	10.3	12.58	0	4352.41	0
007	4.71	11.5	10.73	0	5953.70	2.86
008	6.39	13.5	1.85	0	1029.57	30.90
010	6.82	16.3	42.82	0	9775.96	6.00
011	6.46	15.8	1.31	0	552.01	1850.14
014	6.57	13.1	46.04	0	10867.17	0
016	4.08	12.9	43.93	1.66	11595.03	149.27

九里山井田试验井的单井产能如此悬殊,究其原因就是因为矿井复杂的水文地质条件。压裂层下伏L₈灰岩含水极不均匀,正常情况下水量有限,一般为10~30m³/h,但有其它强含水层补给时,则可发生大流量涌水事故。井田绝大部分试验井的后期排采产水量印证了该推测,如JLS试-014与JLS试-016三个月累计抽水量都在万方以上(表4)。强烈的地下水径流作用,使原先游离于储层空隙中的煤层气逸散殆尽,孔隙水压也使得大量吸附于裂隙中的煤层气难以解析,因而无法形成长期稳定的单井规模产量,这应该是九里山井田首次压裂试验绝大部分抽采井产能效果不佳的主要原因。

此外,九里山井田断裂构造发育,方向性明显。若煤层与富水性或透气性较好的太原组、奥陶系或者上覆二叠系砂岩段对接,则煤层气容易逸散。压裂液触及充水断层后地面井仍然会出现涌水以及煤层气产能低值现象^[14]。

4 结论

(1)在不同的构造单元与不同的水文地质单元,应采用正确的压裂施工工艺,选择正确的起裂压力参数,这是保证地面抽采井产能的唯一有效途径。

(2)在构造简单块段,大水矿区的地面井仍能保持很好的压裂抽采效果。在 10 MPa 左右压力作用下,九里山井田 JLS 试-002 试验井压裂后三个月内,日均产水量为 0.726 m³,累计产水量为 295.73 m³;日均产气量为 296.45 m³,累计产气量为 92 405.81 m³,注水压裂的增产效果十分明显。

(3)复杂水文地质条件下,在构造复杂块段特别是底板断层发育地带,若不采取相应措施,则难以保持良好的压裂抽采效果。试验结果表明,起裂压力如果过大,则压裂缝贯通底板含水层,地面抽采井虽然出水量很大,如 JLS 试-016 试验井后期排水量达 11 595.03 m³,但煤层气的产能几乎为零。

参考文献:

- [1] 高柏,王广才,周来逊,等. 华北型煤田岩溶水文地球化学研究进展[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(3): 59-63. [GAO B, WANG G C, ZHOU L X, et al. Advances in the study of hydrogeochemistry of karstic groundwater in coal mines in North China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(3): 56-63. (in Chinese)]
- [2] Wang Z R, Chen L X, Cheng C R, et al. Forecast of gas geological hazards for "Three-Soft" coal seams in Gliding Structural Area [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2007, 17(4): 484-488.
- [3] 林柏泉. 矿井瓦斯防治理论与技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010. [LIN B Q. Theory & technology of mine gas control [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2010. (in Chinese)]
- [4] 胡向志,王志荣,张振伦. 煤层气开发与“三软”矿区瓦斯抽采[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2011. [HU X Z, WANG Z R, ZHANG Z L. Development of CBM & gas drainage in "Three Soft" mining area [M]. Zhengzhou: The Yellow River Water

Conservancy Press, 2011. (in Chinese)]

- [5] Locker D, Byerlee J D. Hydrofracture in weber sandstone at high confining pressure and differential stress[J]. Journal of Geophysical Research, 1977, 82(14): 2018-2026.
- [6] 黄炳香,程庆迎,刘长友,等. 煤岩体水力致裂理论及其工艺技术框架[J]. 采矿工程与安全科学学报, 2011, 28(2): 167-173. [HUANG B X, CHENG Q Y, LIU C Y, et al. Hydraulic fracturing theory of coal-rock mass and its technical framework [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(2): 167-173. (in Chinese)]
- [7] 林柏泉,孟杰,宁俊,等. 含瓦斯煤体水力压裂动态变化特征研究[J]. 采矿工程与安全科学学报, 2012, 29(1): 106-110. [LIN B Q, MENG J, NING J, et al. Research on dynamic characteristics of hydraulic fracturing in coal body containing gas [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(1): 106-110. (in Chinese)]
- [8] 孙越英,卢耀东,王佩钰,等. 焦作煤田煤层气资源特征及开发利用研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2007, 26(1): 46-50. [SUN Y Y, LU Y D, WANG P Y, et al. Study on the charactersitics and exploitation of coalbed methane in Jiaozuo [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2007, 26(1): 46-50. (in Chinese)]
- [9] 王志荣,韩中阳,李树凯,等. “三软”煤层注水压裂增透机理及瓦斯抽采施工参数确定[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(5): 739-746. [WANG Z R, HAN Z Y, LI S K, et al. Mechanism of water-fracturing-induced permeability increment of "Three Soft" coal seam and construction parameters determination [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(5): 739-746. (in Chinese)]
- [10] 李宏欣. 焦作九里山井田煤层气赋存特征分析[J]. 中州煤炭, 2012(9): 4-7. [LI H X. Analysis on CBM Occurrence characteristics of Jiulishan coalfield in Jiaozuo [J]. Zhong Zhou Coal, 2012(9): 4-7. (in Chinese)]
- [11] 王志荣,胡向志,陈玲霞. 构造类比法在“三软”矿区煤层气井产能数值模拟中的应用[J]. 中国煤炭地质, 2014, 26(8): 45-49. [WANG Z R, HU X Z, CHEN L X. Application of structural analog method in CBM well capacity numerical simulation in "Three Soft" mine areas [J]. Coal Geology of China, 2014, 26(8): 45-49. (in Chinese)]

(下转第 159 页)

- parameters of shear strength of the Jigongshan slopea [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43 (3): 153 – 158. (in Chinese)]
- [9] Akcay O. Landslide fissure inference assessment by ANFIS and logistic regression using UAS-based photogrammetry [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2015, 4(4): 2131 – 2158.
- [10] 许领,戴福初,邝国麟,等. 黑方台黄土滑坡类型与发育规律[J]. *山地学报*, 2008, 26(3): 364 – 371. [XU L, DAI F L, KUANG G L, *et al.* Types and characteristics of loess landslides at Heifangtai loess plateau, China [J]. *Journal of mountain science*, 2008, 26(3): 364 – 371. (in Chinese)]
- [11] 胡炜,张茂省,朱立峰,等. 黑方台灌溉渗透型黄土滑坡的运动学模拟研究[J]. *工程地质学报*, 2012, 20(2): 183 – 188. [HU W, ZHANG M S, ZHU L F, *et al.* Kinematic simulation of irrigation-induced loess landslide in Heifangtai [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2012, 20(2): 183 – 188. (in Chinese)]
- [12] 李骅锦,许强,何雨森,等. 甘肃黑方台滑坡滑距参数的BP神经网络模型[J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(4): 141 – 148. [LI H J, XU Q, HE Y S, *et al.* BP neural network model for analyzing the impact factors of the travel distance of the Heifangtai landslide in Gansu. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43 (4): 141 – 148 (in Chinese)]
- [13] 董英,孙萍萍,张茂省,等. 诱发滑坡的地下水流系统响应历史与趋势——以甘肃黑方台灌区为例[J]. *地质通报*, 2013, 32(6): 868 – 874. [DONG Y, SUN P P, ZHANG M S, *et al.* The response of regional groundwater system to irrigation at Heifangtai terrace, Gansu Province [J]. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(6): 868 – 874 (in Chinese)]
- [14] Nam S, Gutierrez M, Diplas P, *et al.* Comparison of testing techniques and models for establishing the SWCC of riverbank soils [J]. *Engineering Geology*, 2010, 110(Sup 1/2): 1 – 10.
- [15] Qian Z, Rahardjo H. Quantification of uncertainties in soil-water characteristic curve associated with fitting parameters [J]. *Engineering Geology*, 2013, 163 (12): 144 – 152.
- [16] Lu N, Wayllace A, Oh S. Infiltration-induced seasonally reactivated instability of a highway embankment near the Eisenhower Tunnel, Colorado, USA [J]. *Engineering Geology*, 2013, 162(14): 22 – 32.

责任编辑:汪美华

(上接第128页)

- [12] 曹代勇,张守仁,任德贻. 构造变形对煤化进程的影响——以大别造山带北麓地区石炭纪含煤岩系为例[J]. *地质论评*, 2002, 48(3): 313 – 317. [CAO D Y, ZHANG S R, REN D Y. The influence of structural deformation on coalification: a case study of carboniferous coal measures in the northern foothills of the Dabie orogenic belt [J]. *Geological Review*, 2002, 48(3): 313 – 317. (in Chinese)]
- [13] 张琪. 采油工程原理与设计[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2006: 241 – 243. [ZHANG Q. Principle & design of oil production engineering [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2006: 241 – 243. (in Chinese)]
- [14] 魏亚强,董艳辉,李国敏. 断层对压裂液运移影响的数值模拟研究[J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(1): 117 – 123. [WEI Y Q, DONG Y H, LI G M. Numerical simulation of the fault impact on fracturing fluid migration [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(1): 117 – 123. (in Chinese)]

责任编辑:汪美华