

# 极松软煤层抗剪强度的水敏性试验研究

周 鹏<sup>1,2</sup>, 张 博<sup>3</sup>

(1. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116;  
3. 晋城煤业集团长平煤业有限责任公司, 山西 晋城 048000)

**摘要:** 为分析极松软煤层注水防止片帮的效果, 研究了极松软煤层注水后抗剪强度的变化。基于非饱和土理论及直剪试验, 采用极松软煤体重塑煤样, 进行了一系列不同含水率及法向应力下不固结不排水直剪试验的研究, 提出了以含水率为中心, 以黏聚力和内摩擦角为主要指标的抗剪强度分析方法, 采用试验和理论方法综合分析研究了含水率对极松软煤的抗剪强度的影响。研究结果表明: 在低法向应力状态下, 试样剪应力易发生软化现象, 而在高法向应力状态下, 试样易发生硬化现象; 重塑煤样的黏聚力随含水率的增加先增大, 达到最适含水率后(约 17.64%), 黏聚力随含水率的增加反而减小; 含水率对重塑煤样的内摩擦角影响不明显, 证实松软煤层注水防止片帮的工程控制技术是有效的。

**关键词:** 极松软煤层; 煤层注水; 直剪试验; 水敏性; 片帮防治

中图分类号: TD313 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2017)05-0103-06

## Experimental study on water sensitivity of shear strength of extremely soft coal seam

Zhou Peng<sup>1,2</sup>, Zhang Bo<sup>3</sup>

(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, Xuzhou 221116, China; 3. Changping Coal Industry Co., Ltd., Jincheng Coal Group, Jincheng 048000, China)

**Abstract:** In order to analyze the effects of preventing rib spalling by using water injection in extremely soft coal seam, the change of shear strength after water injection was carried out on extremely soft coal seam. Based on the theory of unsaturated soil theory and the direct shear tests, by using extremely soft coal samples which had been re-modelled, a series of direct shear tests with non consolidation and non drainage were performed under the conditions of different moisture contents and different normal stresses. The analysis method of shear strength was proposed in this paper, and the moisture content was used as the key index, the cohesion and internal friction angle were selected as the main indexes. The influences of moisture content on extremely soft coal seam were studied comprehensively combined with tests and theoretical analysis. Results showed that in the condition of low normal stress, the shear strength of the sample tended to soften, and the sample was prone to hardening in high stress state. Besides, the cohesion increased with the increasing of the moisture content, after that when the moisture content of the sample exceeded the optimum moisture content (approximately 17.64%), the cohesion began to decline and the moisture content possesses little effect on the internal friction angle. It is proved that the engineering control technology of preventing rib spalling by using water injection in extremely soft coal seam is effective.

**Key words:** extremely soft coal seam; water injection in coal seam; direct shear test; water sensitivity; rib spalling prevention

## 0 引言

随我国煤炭工业的飞速发展, 在煤炭高产高效

的要求下, 放顶煤开采已取代传统的分层开采成为厚煤层开采的主要技术手段。但在松软厚煤层的放顶煤开采的工作面经常出现工作面片帮现象, 随着

收稿日期: 2016-12-12; 责任编辑: 曾康生 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2017.05.018

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA062101); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-10-0770); 国家自然科学基金资助项目(51074164)

作者简介: 周 鹏(1991—), 男, 江苏泰兴人, 硕士。Tel: 18652067801, E-mail: zhoupengcumt@126.com

引用格式: 周 鹏, 张 博. 极松软煤层抗剪强度的水敏性试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(5): 103-108.

Zhou Peng, Zhang Bo. Experimental study on water sensitivity of shear strength of extremely soft coal seam [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(5): 103-108.

片帮后端面距的增加,还易引发冒顶事故,给井下作业人员的安全带来威胁,制约生产效率的提高。对于极松软煤体而言,由于其自承能力差,采取物理化学方法改善煤体性质对煤壁片帮的预防尤为重要<sup>[1]</sup>。工程实践表明,合理注水可以提高煤体的黏聚力与抗剪强度,能有效地控制工作面片帮冒顶事故的发生<sup>[2]</sup>。

目前针对松软煤层片帮防治的研究,一方面集中在技术手段方面,如:王建君等<sup>[3]</sup>结合新集二矿煤层的赋存条件及顶板矿压规律,对片帮冒顶原因进行了分析,采取了聚氨酯煤壁加固技术,对于片帮防治起到了良好的效果。赵保太等<sup>[4]</sup>对新峰矿二<sub>1</sub>矿的“三软”煤层的注水降尘的实践过程进行了详细的描述。另外一方面,研究主要集中注水对于煤层应力分布的影响,比如:李见波等<sup>[5]</sup>对新兴矿煤层注水后的应力变化进行了数值模拟分析,推导了注水渗透半径及应力前移距离,并与实践情况进行了比较分析。郝洪海等<sup>[6]</sup>对米村矿松软煤层的浅孔注水技术进行了机理分析和支承应力分布实测。但目前的研究存在着对于极松软煤层自身物理性质和诱发片帮原因的研究不足,且主要集中在某个具体工程的问题,没有对极松软煤体工程物理性质及注水强化普遍规律进行研究。

因此,笔者通过对义络煤业有限公司的极松软的“类土质”的二<sub>1</sub>煤层的煤样,进行一系列的直剪试验,研究了水敏性对煤样的抗剪强度的影响,以证实注水防止煤壁片帮是有效的。

## 1 不同含水率条件下松软煤样的直剪试验

相关研究<sup>[1,7]</sup>表明,造成煤壁产生片帮的主要原因是:煤壁在自重和顶板压力的作用下,产生拉裂破坏与剪切破坏。对于软煤而言,在顶板压力及自身重力的影响下,煤壁内会产生横向的拉应力,但由于软煤层的横向及蠕动变形会释放或缓解由于压缩而产生的横向拉应力,最终因煤壁内的剪应力大于其抗剪强度而产生剪切滑动破坏。对于极松软煤层而言,煤壁的拉裂破坏和剪切破坏都与煤体的抗剪强度密切相关。抗剪强度是评价极松软煤体的力学性能最为重要的指标之一,也是工程中判断煤壁稳定性的重要指标。提高极松软煤体的抗剪强度可以降低煤壁片帮的发生。

工作面注水实践表明<sup>[8-10]</sup>,合理的煤层注水能

够增强煤壁的稳定,降低片帮次数及片帮面积。因此研究极松软煤体的水敏性显得非常重要。由于取样地点义络煤业有限公司二<sub>1</sub>煤层属于极松软煤体,因此难以取出完整煤块制样,故采用重塑极松软煤体进行相关试验。

### 1.1 试验材料特性

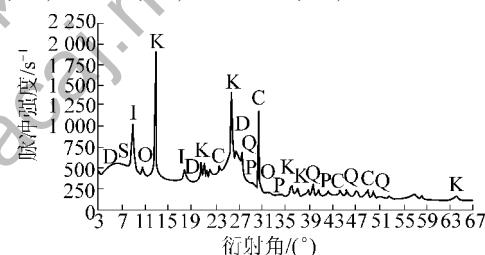
二<sub>1</sub>煤层煤质松散破碎,强度极低,破碎后呈颗粒和鳞片状,该煤样的基本物理性质见表1。

表1 煤的物理性质

Table 1 Physical properties of coal

干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	原始含水量/%	普氏系数	渗透参数/(10 <sup>-4</sup> cm·s <sup>-1</sup> )
1.25	4.03	0.733	1.32

煤样的矿物成分分析结果如图1所示。通过分析,煤样中矿物成分按照含量由高到低依次为:非晶物质(煤)、高岭石、方解石、蒙脱石、伊/蒙混层、绿泥石(少)、石英(少)、菱铁矿(少)、其他。



K—高岭石;D—方解石;I—伊利石;S—蒙脱石;I/S—伊/蒙混层;C—绿泥石;Q—石英;P—菱铁矿;O—其他

图1 煤样矿物成分X射线衍射结果

Fig. 1 X-ray diffraction pattern of mineral compositions of coal sample

在煤样含有的矿物成分中,遇水可发生反应的有高岭石、蒙脱石和伊/蒙混层。其中高岭石含量远高于蒙脱石和伊/蒙混层。由于高岭石吸水性强,遇水具有可塑性,产生一定强度,或可对煤层强度产生影响;而伊利石和蒙脱石遇水膨胀,结构发生改变,因此进行松软煤样的抗剪强度的水敏性分析的研究非常必要。

### 1.2 试验方法及步骤

试验所采用的仪器为ZJ型电动四联等应变直接剪切仪,刚环系数为2.47 Pa/cm。由于松软煤样性质介于黏土和砂之间,且更接近于砂,故本试验剪切速率采用2.4 mm/min。进行煤样的原始水分测定试验后,将松软煤样晾晒、风干后进行筛分,在剪切过程中,颗粒的粒径对剪切面的相互错动有很大影响,导致测得的剪应力产生较大的不确定性,影响

试验的可重复性,因此本试验所采用试样粒径均在1mm以下,且保证颗粒大小较为均匀。依据GB/T50123—1999《土工试验方法标准》和设计试验方案配置不同含水率的5组试样。

采用干密度控制法制备极松软煤的重塑试样,确定试样干密度为1.25 g/cm<sup>3</sup>,环刀状试样的直径为61.8 mm,高20 mm。在装样过程中为避免人为指定剪切面的情况发生,将每个试样均匀分为3份,分层击实,各层保证高度相等,在消除结构面影响的同时,保证同一含水率的试样剪切面附近的压实度一致。按设计含水率4%、8%、16%、24%、32%(测得实际含水率:6.55%、12.34%、17.64%、19.59%、20.68%)制备了5组试样,每组4个样。可推测该煤层的饱和含水率接近21%左右。

试样制备完毕后,置于密闭干燥容器中进行保存。按照表2的具体试验方案进行试样在不同法向压力下的不固结不排水的快速直接剪切试验。

表2 不同含水率条件下松软煤样的剪切特性试验设计

Table 2 Design of direct shear experiment of soft coal sample with different water content

试验编号	法向应力/MPa	含水率/%
1	0.1、0.2、0.3、0.4	6.55
2	0.1、0.2、0.3、0.4	12.34
3	0.1、0.2、0.3、0.4	17.64
4	0.1、0.2、0.3、0.4	19.59
5	0.1、0.2、0.3、0.4	20.68

注:剪切速率为2.4 mm/min。

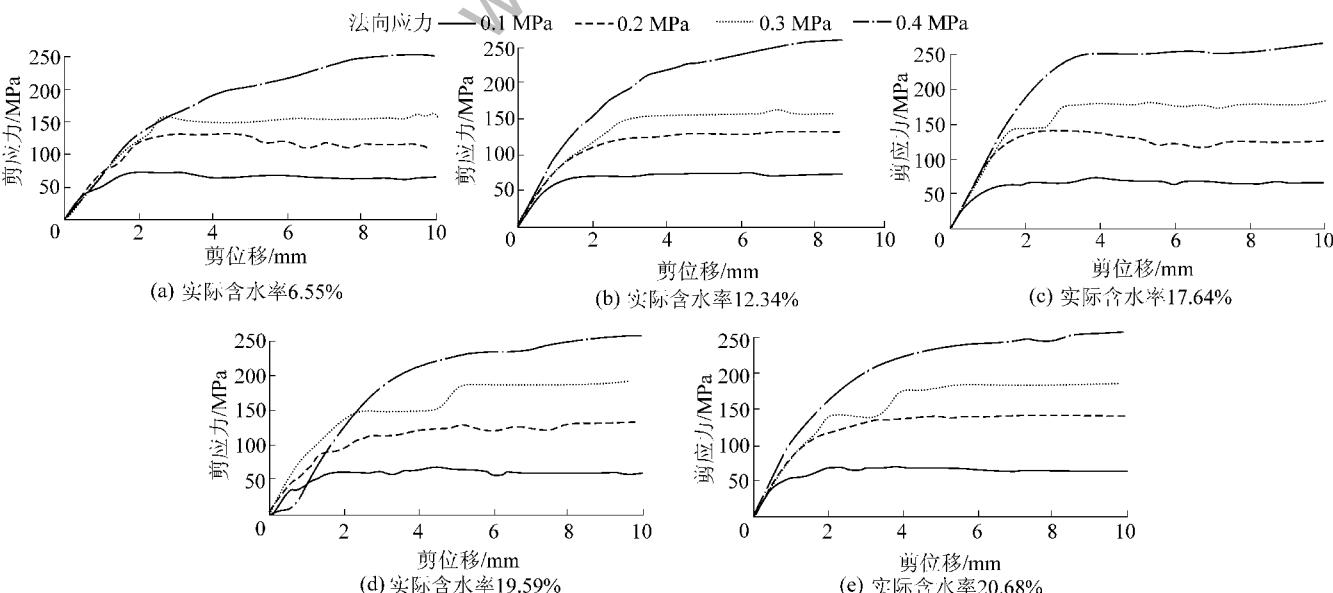


图2 不同含水率条件下的煤样的剪应力-应变曲线

Fig. 2 Shear strength-strain curves of remodeled coal with different moisture content

## 2 试验结果及作用机理分析

### 2.1 直剪试验结果

制样过程中发现:当重塑软煤试样含水率接近原始含水率时,软煤试样煤体颗粒的黏结较差,试样结构性较差,松软易破碎;当实际含水率为6.55%~19.59%时,煤体颗粒之间的黏结状况改善,可以形成较大的团状块粒,压制的试样成型较好;当实际含水率超过19.59%,压制试样时开始出现明显的水分挤出,推测试样已经达到饱和含水率。

实际含水率6.55%、12.34%、17.64%、19.59%、20.68%的5组试样的剪应力-剪位移曲线如图2所示,试验所得抗剪强度指标见表3。

### 2.2 抗剪强度的水敏性分析

对比5组试样的应力位移曲线可以发现:在较低的法向应力作用下(0.1、0.2 MPa),剪应力达到峰值后易发生软化现象;在较高法向应力作用下(0.3、0.4 MPa),剪应力软化现象不明显,且表现出一定的硬化现象,随着剪应变的增加,剪应力继续有所增加,最终达到一个较稳定的值,该值为残余强度。由此可知,注水后的煤体在高法向应力情况下,煤体塑性降低,延性增加,抵抗变形破坏的能力有所增大。分析认为在高法向应力的作用下,重塑试样在达到剪切峰值后,剪切面也会随着剪切产生变化,形成新的剪切面,较高的应力造成重塑软煤试样颗粒进一步压实,使得粉土颗粒间的摩擦力和咬合力增加,提高了试样的残余剪切强度。

由试验结果可知,在相同含水率条件下,随着作用在试样上的法向压力的增加,试样的抗剪强度随着增加,最大法向应力(0.4 MPa)下的抗剪强度是最小法向应力(0.1 MPa)作用下的3~4倍。

主要作用机理分析为:在高法向应力的作用下,上下压力盒的剪切面的重塑煤体颗粒进一步压实,煤体颗粒之间的有效摩擦应力增加,使得抗剪强度增加;同时,在重力、较高的法向应力和剪应力的作用下会造成剪切面附近的孔隙水的重新分布,剪切面附近的孔隙水压力减小,从而导致基质吸力的增加。在以上2方面因素的共同作用下,抗剪强度会增加。

表3 不同含水率时松软重塑煤样的抗剪强度指标

Table 3 Shear strength of soft coal samples with different moisture content

实际含水率/%	法向应力/kPa	剪应力/kPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
6.55	0.1	66.7	9.10	29.76
	0.2	135.7		
	0.3	155.1		
	0.4	250.9		
12.34	0.1	74.8	12.95	30.04
	0.2	132.7		
	0.3	161.1		
	0.4	258.2		
17.64	0.1	76.4	15.23	31.34
	0.2	142.2		
	0.3	186.7		
	0.4	264.6		
19.59	0.1	69.0	9.53	31.19
	0.2	135.0		
	0.3	185.6		
	0.4	254.0		
20.68	0.1	67.3	8.50	31.63
	0.2	141.5		
	0.3	184.2		
	0.4	258.7		

为表征上述注水作用机理,可结合国内研究文献[11~15]和国外研究文献[16~17],其提出的双变量非饱和土抗剪强度理论进行解释,即

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi_b \quad (1)$$

式中: $c'$ 和 $\varphi'$ 分别为饱和土的黏聚力、内摩擦角; $u_a$ 为孔隙气压; $u_w$ 为孔隙水压; $\sigma - u_a$ 为净法向应力; $\varphi_b$ 为抗剪强度随吸力增加的速率。

干密度一定的试样,在同一含水率条件下,在相

同的吸力环境下,法向应力 $\sigma$ 成倍增加会直接引起 $\tau_f$ 的增加;同时,在高法向应力的作用下,剪切面附近的煤体颗粒会进一步压实,导致孔隙水的重新分布,孔隙水压 $u_w$ 减小,孔隙气压 $u_a$ 增加,使得基质吸力有所增加,综合导致了松软煤样的抗剪强度的增加。

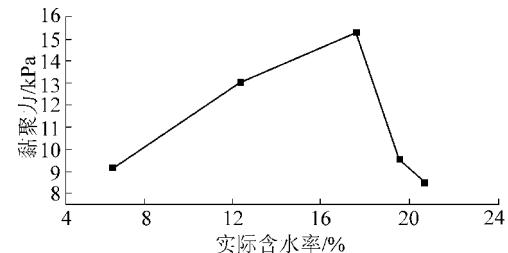


图3 含水率与黏聚力关系曲线

Fig. 3 Relation curves of moisture content and cohesion

### 2.3 抗剪强度指标( $c, \varphi$ )的水敏性分析

根据抗剪强度-垂直应力关系,代入库伦公式,可以得出本次试验的5组黏聚力及内摩擦角数值。

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (2)$$

式中: $\tau$ 为粉土试样抗剪强度,Pa; $c$ 为黏聚力,Pa; $\sigma$ 为法向应力,Pa; $\varphi$ 为内摩擦角,(°)。

由图4可知软煤试样的抗剪强度包线基本符合库伦摩尔强度准则。

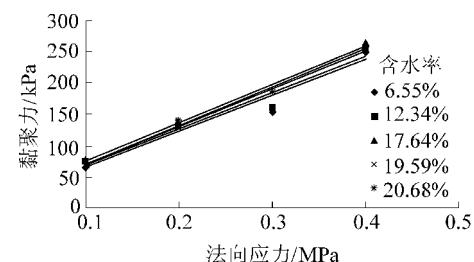


图4 不同含水率下软煤试样的抗剪强度拟合

Fig. 4 Shear strength fitting curve of soft coal with different moisture content

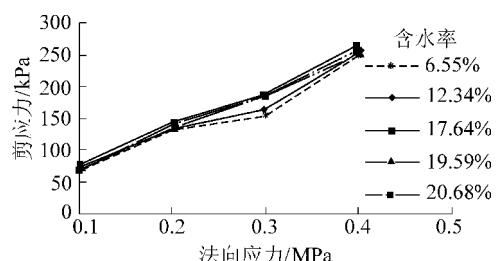


图5 不同含水率的试样剪切强度曲线

Fig. 5 Shear strength curve with different moisture content

含水率与抗剪应力关系如图5所示,由图5及表3可以看出:本次重塑松软煤样的直剪试验结果与前人<sup>[18]</sup>针对重塑土的试验研究结果有类似的规

律:通过控制干密度,添加水量来实现不同含水率的直剪试验存在1个临界含水率,即在含水率较低时,随着含水率的增加,煤样的抗剪强度也增加;当含水率达到临界含水率后,随着含水率的进一步增加,煤样的抗剪强度会有所降低。在此过程的水作用机理分析如下:

重塑松软煤样在含水率较低时(6.55%~17.65%),试样为控制干密度相同的重塑煤样,煤体颗粒间的黏结性很小,水对煤体颗粒间的润滑作用不明显。随着含水率的增加,水对煤体颗粒内部矿物成分产生作用,随着水分侵入矿物晶层,改变了晶体的晶层结构,使晶体遇水膨胀,在达到饱和之前,水分越多反应的范围越广,总的膨胀量越大,导致粒间孔隙及缝隙逐渐被填充撑开,颗粒间的公共水膜增厚,其产生的湿吸力增强,同时毛细管应力作用产生的吸力也增强,在宏观上表现为试样的黏聚力增强。当含水率进一步增加时(大于17.65%),煤体中的矿物成分已经反应充分,部分矿物晶体溶于水,胶结作用减弱,煤体颗粒间的结合水膜厚度进一步增大后,湿吸力降低,毛细管作用也减弱,宏观表现为松软煤样的黏聚力的降低。

内摩擦角与含水率变化关系如图6所示,内摩擦角的变化范围随含水率的变化规律不明显,内摩擦角为29°~32°时,没有明显的线性关系。含水率的变化对内摩擦角的影响不明显。对此,认为由于试验采用的是重塑软煤试样,所使用的干燥软煤的颗粒粒径均在1 mm以下,因此推测,含水率的变化不会引起软煤试样颗粒的结构、大小及密实度的显著变化,因此含水率对软煤试样在直剪试验过程中的内摩擦角影响较小。

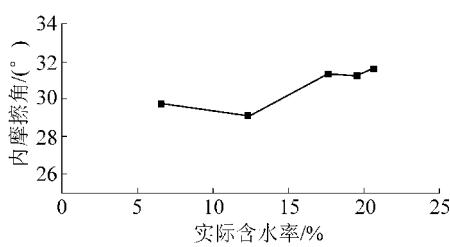


图6 含水率与内摩擦角的关系

Fig. 6 Relation curves of moisture content and internal frictional angle

### 3 结论

以属于豫西“三软”煤层的义络煤业集团有限公司二<sub>1</sub>煤层为研究对象,对其煤样的抗剪强度的水

敏性进行了试验研究。试验采用了重塑试样进行一系列不固结不排水的直剪试验,得出3条结论。

1)重塑试样的剪应力-位移曲线表明:在同一含水率条件下,重塑软煤试样的抗剪强度随法向应力的增大而提高。相同含水率条件下,试样在低法向应力下(0.1、0.2 MPa),试样存在软化现象;在高法向应力状态下(0.3、0.4 MPa),试样达到峰值后,有一定的硬化现象,表明注水后重塑煤样在高法向应力状态下塑性减弱,延性增强,煤体抵抗高应力状态下的变形能力增强。

2)分析了不同含水率条件下,重塑煤样的黏聚力的变化情况:重塑试样的含水率较低时(6.55%~17.64%),试样的黏聚力随着含水率的增加而增大,当含水率达到最适含水率(约17.64%)后,试样的黏聚力随着含水率的增加而减小,且黏聚力下降速率较快。同时测得本试验的试样饱和含水率约为20.68%。

3)分析了不同含水率条件下,重塑煤样的内摩擦角的变化情况:由于试验采用颗粒粒径均在1 mm以下的软煤试样进行重塑试样,含水率的变化不会引起软煤试样颗粒的结构、大小及密实度的显著变化,含水率对试样的黏聚力变化影响较小,重塑煤样的内摩擦角在29°~32°波动变化,故无明显线性关系。

### 参考文献(References):

- 王家臣.极软厚煤层煤壁片帮与防治机理[J].煤炭学报,2007,32(8):785~788.
- Wang Jiachen. Mechanism of the rib spalling and the controlling in the very soft coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(8):785~788.
- 程才.松软煤体煤壁注水增稳机理及工艺参数研究[D].徐州:中国矿业大学,2014.
- 王建君,袁振江,张五兵.“三软”综采面片帮及冒顶的防治[J].煤炭科学技术,2003,31(5):22~24.
- Wang Jianjun, Yuan Zhenjiang, Zhang Wubing. Prevention of spalling off and roof collapse in fully mechanized mining face with ‘three soft’[J]. Coal Science and Technology, 2003, 31(5):22~24.
- 赵保太,申建慧,赵义华,等.三软煤层高压注水降尘防片冒顶的有效途径[J].中州煤炭,2003(1):25~26.
- Zhao Baotai, Shen Jianhui, Zhao Yihua, et al. The efficient way to prevent the roof dust high pressure water injection “three soft” coal seam[J]. Zhongzhou Coal, 2003(1):25~26.
- 李见波,陈学习,王新梅.煤层注水致工作面前方集中应力前移的机理分析[J].煤炭科学技术,2012,40(4):56~59.

- Li Jianbo, Chen Xuexi, Wang Xinmei. Mechanism analysis on concentrated stress in front of mining face moving forward occurred by water injection in seam [J]. Coal Science and Technology, 2012, 40 (4): 56-59.
- [6] 郝洪海,于明献,姚治彬,等.煤壁浅孔注水控制“三软”煤层煤壁片帮[J].矿山压力与顶板管理,2003,20(3):34-35.
- Hao Honghai, Yu Mingxian, Yao Zhibin, et al. Control of “Three Soft” coal seam wall with water injection in coal wall [J]. Ground Pressure and Strata Control, 2003, 20 (3):34-35.
- [7] 李钊,金兆涛,聂利亚,等.极软煤层大采高综采化学注浆控制片帮冒顶技术[J].煤矿开采,2010,15(6):57-60.
- Li Zhao, Jin Zhaotao, Nie Liya, et al. Technology of roof falling and coal sliding prevention of large-mining-height fully-mechanized mining face in extremely soft coal seam [J]. Coal Mining Technology, 2010, 15(6):57-60.
- [8] 王怀珍.煤层静压注水技术在三软煤层掘进巷道防止片帮、冒顶的研究与应用[J].焦作工学院学报:自然科学版,2004,23 (4):261-263.
- Wang Huaizhen. Research and application of whisht press affusion technology for preventing coal wall collapse in picking laneway [J]. Journal of Jiaozuo Institute of Technology: Natural Science, 2004, 23 (4):261-263.
- [9] 蒋元男.长平矿大采高综采工作面片帮防治技术研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2012.
- [10] 桑培森.注水强化松软煤壁稳定性的规律及工艺参数研究[D].焦作:河南理工大学,2010.
- [11] 张海明,姚爱军,王兆辉,等.非饱和粉土力学特性的大型直剪试验[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2014,33 (10):1352-1356.
- Zhang Haiming, Yao Aijun, Wang Zhaohui, et al. Mechanical properties of unsaturated silt with large scale shear test [J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2014, 33 (10):1352-1356.
- [12] 边加敏,王保田.含水率对非饱和土抗剪强度参数的影响研究[J].地下空间与工程学报,2011,7(1):17-21.
- Bian Jiamin, Wang Baotian. Research on influence of water contents on the shear strength behavior of unsaturated soils [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7 (1):17-21.
- [13] 卢肇钧.非饱和土抗剪强度的探索研究[J].中国铁道科学,1999,20(5):10-16.
- Lu Zhaojun. Explorations on the sectional shear strength of unsaturated soils [J]. China Railway Science, 1999, 20(5):10-16.
- [14] 罗小龙.含水率对黏性土体力学强度的影响[J].岩土工程界,2002,5(7):52-53.
- Luo Xiaolong. Influence of water content on shear strength of soils [J]. Geotechnical Engineering Field, 2002, 5(7):52-53.
- [15] 申春妮,方祥位,王和文,等.吸力、含水率和干密度对重塑非饱和土抗剪强度影响研究[J].岩土力学,2009,30(5):1347-1351.
- Shen Chunni, Fang Xiangwei, Wang Hewen, et al. Research on effects of suction, water content and dry density on shear strength of remolded unsaturated soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5):1347-1351.
- [16] Fujii Yoshiaki, Ishijima Yoji, Ichihara Yoshihisa, et al. Mechanical properties of abandoned and closed roadways in the Kushiro Coal Mine, Japan [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(4):585-596.
- [17] Chen T C, Yeung M R, Mori N. Effect of water saturation on deterioration of welded tuff due to freeze-thaw action [J]. Cold Regions Science and Technology, 2004, 38(2/3):127-136.
- [18] 黄琨,万军伟,陈刚,等.非饱和土的抗剪强度与含水率关系的试验研究[J].岩土力学,2012,33(9):2600-2604.
- Huang Kun, Wan Junwei, Chen Gang, et al. Testing study of relationship between water content and shear strength of unsaturated soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9):2600-2604.