

文章编号: 1001-4888(2017)04-0559-09

极松软煤层工作面片帮力学机制分析与煤体加固实验研究^{*}

李家卓^{1,2}, 朱传奇², 刘万荣²

(1. 安徽理工大学, 深部煤矿采动响应与灾害防控安徽省重点实验室, 安徽淮南 232001;

2. 安徽理工大学, 能源与安全学院, 安徽淮南 232001)

摘要: 针对极松软煤层工作面煤壁片帮控制难题, 三维有限差分数值计算表明, 极松软煤层开挖后在煤壁底角产生剪应力集中, 破坏位置由此沿渐变剪应力带牵引至煤壁顶部, 产生卸载松弛浅层坍塌片帮。室内实验结果表明, 极松软煤天然含水率极低, 自身保水能力严重不足, 极易失水。含水率由 1.46% 提高到 3.39%, 应变增高 154.32%; 含水率 4.49%, 粘土含量 10.00%。与无粘土极松软煤相比, 抗压强度提高 55.02%, 应变提高 574.26%。含水率在 0~4.03% 内, 抗剪强度与含水率正相关; 含水率在 4.03%~12.70% 区间, 随着含水率的增高, 抗剪强度迅速降低。且黏聚力对水的敏感度远大于内摩擦角对含水率的敏感程度, 存在某一特定含水率, 此时抗剪强度最大。极松软煤层可采用施工扰动方法, 使煤层在工作面前方壳基支承压力作用下发生团化固结, 达到有效应力增加、孔隙比减小、抗剪强度提高的目的。

关键词: 极松软煤; 片帮机理; 煤体加固; 力学实验

中图分类号: TD323 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-16-285

0 引言

我国在今后相当长时间内, 仍将坚持以煤炭为主体、电力为中心的能源战略。淮南煤田煤炭资源量占华东地区的 50%, 储量十分丰富, 是典型的煤层群开采矿区。但随着煤矿开采规模的不断扩大, 煤矿开采难度逐渐增加, 进而产生一系列问题, 煤层群开采条件下的极松软煤体煤壁片帮是其中难题之一。如何安全高效开采这部分资源成了摆在面前的首要任务, 为解决这一问题, 首先必须清楚极松软煤层煤壁发生片帮的机理及相应的防治措施。

国内外许多专家和学者都对这一课题进行了长期研究。宁宇等^[1]结合作面三维数值模拟, 提出了煤壁为上端简支、下端固支的受力杆力学模型, 认为在支撑压力作用下, 煤壁发生挠曲变形, 煤壁上部 0.35 倍采高处首先发生断裂, 继而整个煤壁产生片帮。闫少宏、尹希文等^[2,3]认为煤壁片帮程度与采高正相关, 采高 4m 为煤壁发生拉伸破坏的分界点, 采用“压杆”理论, 认为中硬煤壁失稳点在采高的中上部, 提出了“滑落”式半煤壁片帮和采煤机扰动下的整煤壁片帮两种类型, 提出了增加支架工作阻力等技术措施。王家臣等^[4]认为加快推进速度是避免煤壁片帮的有效措施。方新秋等^[5]分析了煤壁片帮现状、原因, 提出煤壁片帮严重区域采用打木锚杆来控制煤壁稳定。于岩斌等^[6]对煤样在自然和饱水状态

^{*} 收稿日期: 2016-12-27; 修回日期: 2017-04-03

基金项目: 国家自然科学基金煤炭联合基金重点资助项目(U1361208); 安徽省自然科学基金资助项目(1408085MKL42); 安徽理工大学博士基金; 安徽理工大学青年教师科学研究基金重点项目(12859)

通讯作者: 李家卓(1986-), 男, 博士, 讲师, 主要从事矿山压力与岩层控制方面的教学和研究工作。Email: jiazhuo312@126.com

进行单轴和拉伸实验,认为饱水后煤样的抗压和抗拉强度不同程度降低,且饱水对抗拉强度的影响程度大于抗压强度。杨治国等^[7]为控制综放工作面三软不稳定煤层煤壁片帮,对工作面煤层进行了深孔注水加固,有效控制了片帮及冒顶。赵洪亮等^[8]对大倾角松软煤层综放面矿压规律进行了研究,认为工作面中、下部的片帮、冒顶现象加剧,提出通过加固煤壁、优化推进方式和提高推进速度等技术措施进行控制。张辉等^[9]对煤样在自然和饱水状态下进行巴西劈裂实验,分析饱水对煤样应力、强度及能量耗散程度的影响,饱水后煤样抗拉强度和峰值能率均有不同程度降低。多年来,工作面片帮机理研究主要集中在硬煤层,而对极松软煤层工作面稳定性与控制的研究较少,尤其对极松软煤层工作面注水加固的内在力学本质研究就更少,本文结合新庄孜煤矿煤质松软的地质条件,通过实验室试验、数值模拟的方法对极松软煤层工作面片帮机理进行系统分析,为有针对性地提出极松软煤层煤壁稳定性控制提供理论基础。

1 工程背景

淮南煤田B组煤在长期的特定地质作用下煤层富存不稳定,煤体极其松软呈粉末状,煤体裂隙充分发育,强度低,其硬度系数小于0.1,煤壁处煤体手抓即碎。新庄孜煤矿是淮南矿业集团老矿区之一,66207工作面回采时相邻水平距离30m的66107工作面、距煤层顶板22m的66208工作面已回采结束(图1),66207工作面煤层平均厚度3.0m,煤层倾角平均28°,随着66207工作面的推进,本煤层和66208工作面产生的复杂应力场和位移场相互叠加,在高采动应力作用下,浅部松软煤层由于煤壁内的剪应力大于其抗剪强度而发生剪切滑动,产生大面积片帮,片帮类型如图2所示。煤层注水是防止松软煤体煤壁片帮的有效措施,但煤层注水作用机理及注水量的定量有待进一步揭示。

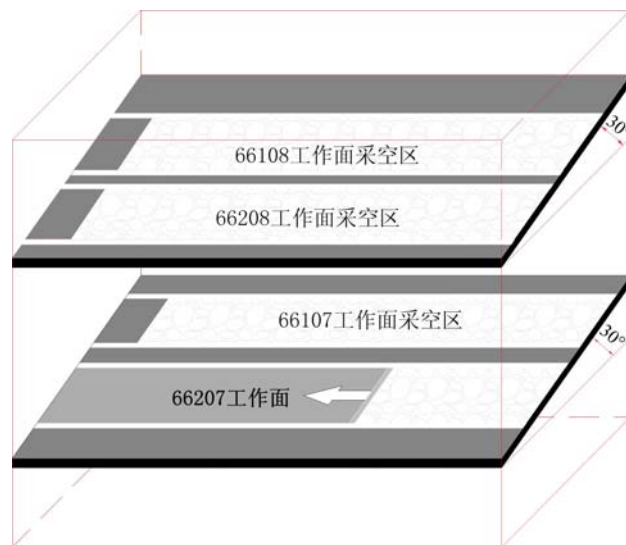


图1 66207工作面空间位置

Fig. 1 Spatial position of 66207 working face

2 极松软煤层片帮机理

2.1 极松软煤体颗粒间错动细观机理

极松软煤体强度主要由基质吸力、凝聚力和煤颗粒间的摩擦阻力构成,饱和极松软煤体由煤颗粒骨架和围绕在其周围的水构成,非饱和煤体由空隙气、孔隙水和煤颗粒组成,作用在煤体上的超前支撑压力由粒间应力和孔隙水压力或空隙气压力共同承担,而孔隙水压力在各个方向上大小相等,不会引起煤颗粒的移动变形,有效应力使得相邻煤体颗粒错动,这是煤壁失稳的力源,极松软煤体组成如图3、图4所示,有效应力计算公式如下^[10]:

$$\sigma = \frac{\sum P_{sv}}{A} + \frac{A_w}{A} u = \sigma' + u \quad (1)$$

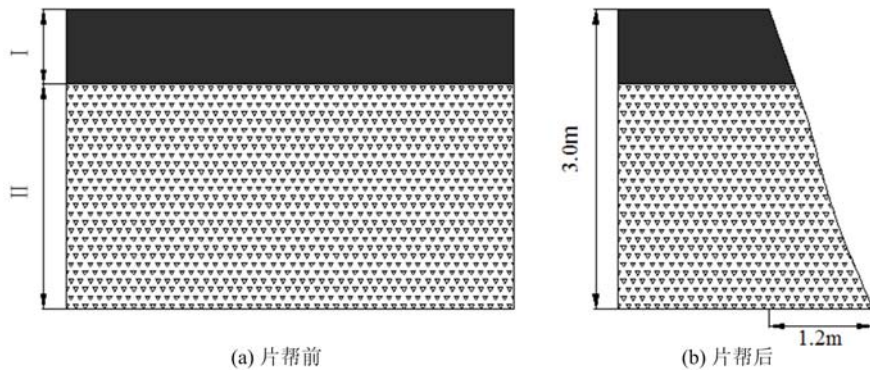


图 2 极松软煤层工作面煤壁片帮类型

Fig. 2 Type of similar soil coal rib spalling

式中, A 为土单元的断面积; A_s 为颗粒接触点的面积; A_w 为孔隙水的断面积; σ 为有效应力; σ' 为单位粒间力的竖向分力; μ 为单位空隙水压力; 图 3 中的 P_s 为粒间力; P_{sv} 为粒间力的竖向分力。

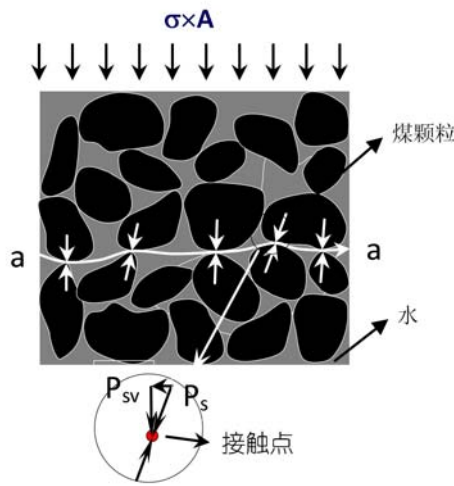


图 3 饱和煤体受力

Fig. 3 Stress state of saturated coal

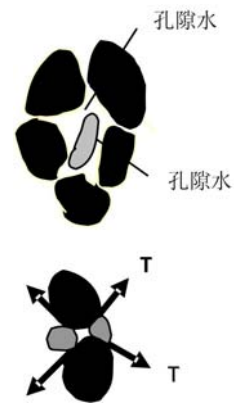


图 4 非饱和煤体

Fig. 4 Stress state of unsaturated coal

2.2 极松软煤体工作面煤壁片帮宏观机理

煤壁的稳定性不仅与煤体内基质吸力、凝聚力和煤颗粒间的摩擦阻力等内在物理力学性质有关,也与外在采动应力有关。图 5 为采用非线性三维数值计算软件 FLAC3D 计算得到的 66207 工作面煤壁处剪应力分布特征,煤岩体物理力学参数、边界条件见文献[11]。从图 5 煤壁处不同开挖步数的剪应力分布云图可以看出,在煤壁底角出现剪应力集中显现,形成剪切带,在此高应力作用下,底角必然首先进入屈服状态,并沿剪切带向上牵引发育至煤壁顶部,最终贯通煤壁,发生卸荷松弛浅表层坍塌片帮。

3 防片帮力学实验方法的比较及选择

66207 工作面属于极松软煤层,煤的坚固性系数和强度都很低,对采掘整体煤块进行取芯制作试件是很困难的,故无法对实验煤层的煤体采用取芯制作试件的方式进行力学性质测定实验。针对这种特殊情况,本实验结合现场特点,破碎煤体采用点荷载法测其抗压强度,极松软煤体进行压缩成型,进而结合现场素描图分别加权平均计算出原煤体的抗压强度、煤层注浆(浆)后强度,得到不同含水率条件下相对力学变化规律;抗剪强度是极松软煤壁稳定性的重要参数,其指标包括内聚力和内摩擦角。因极松软煤层力学环境各异,无法找到精确的公式计算本文的极松软煤体强度,鉴于煤层取样质量较高,可选取

原状态煤样进行室内剪切实验,以期测得不同含水率和不同黄土配比条件下的抗剪强度、内摩擦角,从而找到含水量、含水率、抗剪强度和内摩擦角间的规律,为66207工作面煤壁片帮施工扰动提供理论基础。

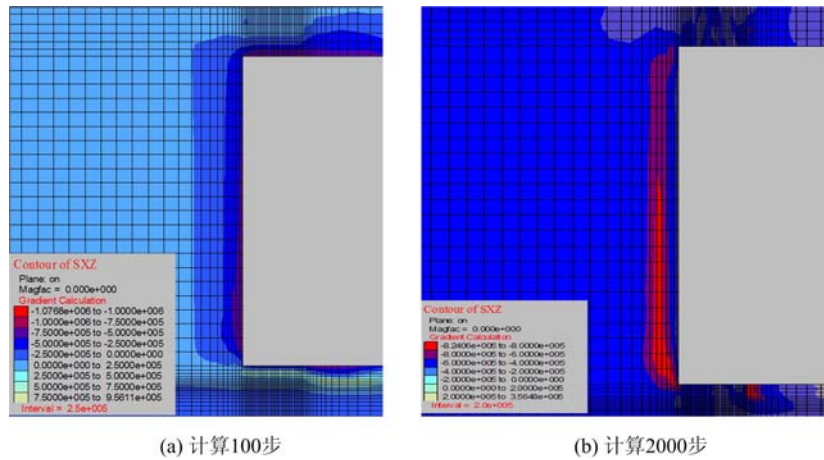


图5 煤壁处剪应力云图

Fig. 5 Cloud maps of shear stress of coal wall

4 实验结果分析

4.1 含水率与点荷载强度实验

实验所用煤样为66107工作面扰动样,按照《煤与岩石物理力学性质测定方法》^[12]中含水率实验要求,取煤层I部分5组,其自然状态质量为116.60g、65.46g、133.74g、172.00g、142.44g,在105℃烘箱内烘干至衡量分别为115.71g、65.00g、132.72g、170.78g、141.32g、197.13g,含水率分别为0.76%、0.70%、0.76%、0.71%、0.78%、0.71%,平均含水率为0.74%。煤层II部分为极松软煤体,自然状态质量为61.51g、71.16g、83.96g、102.41g、121.28g,在105℃烘箱内烘干至衡量分别为59.89g、69.32g、81.93g、100.07g、118.55g,含水率分别为2.64%、2.59%、2.42%、2.29%、2.25%,平均含水率为2.44%。

煤层I部分采用数显岩石点荷载试验仪进行点荷载强度实验,本次实验共选出15块煤样,实验方法按照1985年国际岩石力学学会(ISRM)公布的《测定点荷载强度的建议方法》^[12],实验结果如表1所示。

点荷载强度指数介于0.06~0.32MPa,依据国际岩石力学实验方法委员会测定点荷载强度的建议方法(1985年修订),单轴抗压强度最大值为6.40MPa,最小值为1.12MPa,平均值为3.82MPa,变异系数为0.48。

点荷载强度指数最大值0.32MPa、单轴抗压强度最大值6.40MPa,点荷载强度指数最小值0.06MPa、单轴抗压强度最小值1.12MPa,点荷载强度指数平均值0.19MPa,单轴抗压强度平均值3.82MPa,变异系数0.48。

4.2 型煤单轴抗压实验

根据《煤与岩石物理力学性质测定方法》^[12]的要求进行现场煤样的采取,并严格密封后带回实验室。煤样取自新庄孜煤矿66107工作面,并将其用烘干箱于105~110℃下烘干3.0h,去除水分后将煤样继续破碎、碾磨,筛选出粒径大小为40~60目的煤粉颗粒,然后将264g煤粉与27g纯净水混合均匀后置于成型模具中,最后在2000kN刚性试验机上以100MPa的压力压制成 $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的标准煤样,端面不平行度不超过0.05mm。型煤的制作过程使其离散性很小,从而保证实验的重复性很好。

采用RMT-150B型岩石力学测试系统,对新庄孜煤矿66107工作面采回的松散煤体进行不同含水率条件下的压缩实验,通过实验结果分析该煤体在不同含水率条件下力学性质的变化规律。

表1 I部分点荷载强度
Tab.1 Point load strength of Section I

试块 编号	实验点间距 (mm)	破坏荷载 (kN)	等效直径 (mm)	点荷载强度 (MPa)	尺寸效应 修正系数	点荷载 强度指数 $I_{d(50)}$ (MPa)	换算成单轴 抗压强度 (MPa)
1	41.90	1.20	69.50	0.25	1.16	0.29	5.75
2	37.40	0.61	50.60	0.24	1.01	0.24	4.81
3	41.70	0.65	77.00	0.11	1.21	0.13	2.67
4	31.80	0.16	52.00	0.06	1.02	0.06	1.23
5	38.00	0.33	63.80	0.08	1.11	0.09	1.79
6	31.90	0.53	47.90	0.23	0.98	0.23	4.53
7	35.70	0.94	56.90	0.29	1.06	0.31	6.14
8	33.90	0.82	50.70	0.32	1.01	0.32	6.40
9	45.10	0.49	60.10	0.14	1.09	0.15	2.94
10	50.30	0.74	84.70	0.10	1.26	0.13	2.59
11	46.50	0.31	83.10	0.04	1.25	0.06	1.12
12	55.70	0.49	69.00	0.10	1.15	0.12	2.37
13	47.50	1.27	74.60	0.23	1.19	0.27	5.43
14	40.30	0.63	59.20	0.18	1.08	0.20	3.90
15	51.30	1.16	68.60	0.25	1.15	0.28	5.68

按照设定水分配比,使用自制的煤样加工实验装置共计加工11组煤样,煤样含水率分别介于1.33%~5.22%,粘土含量分别为0%、5%、10%、15%、20%,不同配比试块21块,分别进行单轴抗压实验。型煤试件实物如图6所示,煤样破坏形态如图7所示。



图6 型煤试件实物图

Fig.6 Entity of manufacture sample



图7 型煤破坏形态

Fig.7 Failure mode of manufacture sample

在含水率为4.49%,黄土占煤粉百分含量为0和10.21%时,其轴向变形、加载时间、横向变形、抗压强度关系如图8~图10所示。煤粉在不同含水率情况下的抗压强度如图11~图13所示。

含水率对煤体最大应变影响程度优于抗压强度,含水率由1.46%提高到3.39%,最大应变增量增高154.32%。在含水率相近的条件下,粘土含量10%比无粘土煤样抗压强度提高55%,应变提高574.26%,相同含水率情况下随土含量的进一步增加,抗压强度和应变都迅速下降,表明10%粘土能到达与煤粉的最佳匹配。

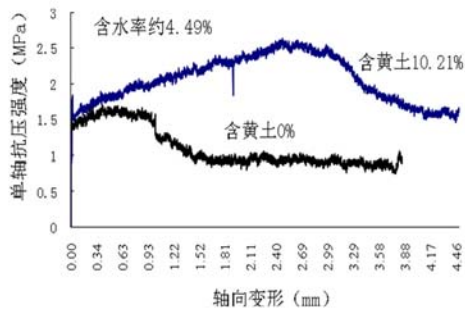


图8 轴向变形—单轴抗压强度曲线

Fig. 8 Axial deformation-uniaxial compression strength curve

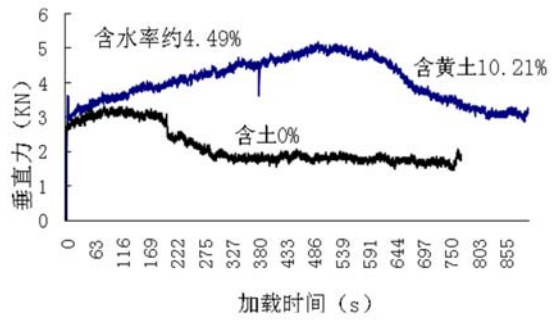


图9 加载时间—单轴抗压强度曲线

Fig. 9 Axial deformation-load time curve

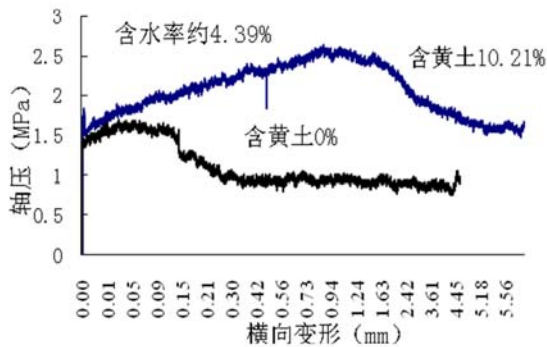


图10 横向变形—单轴抗压强度曲线

Fig. 10 Lateral deformation-uniaxial strength curve

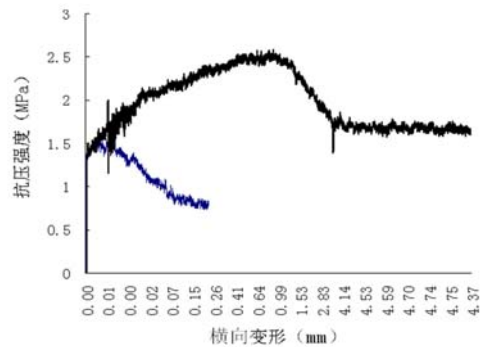


图11 横向变形—单轴抗压强度曲线

Fig. 11 Lateral deformation-uniaxial strength curve

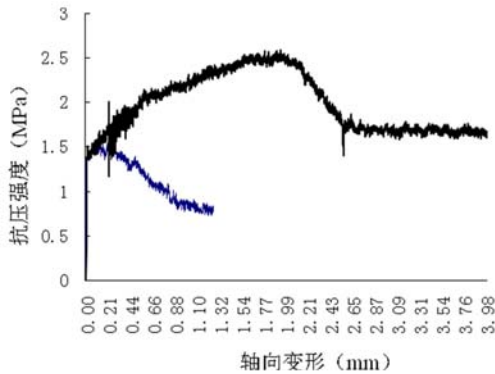


图12 轴向变形—单轴抗压强度曲线

Fig. 12 Axial deformation-uniaxial strength curve

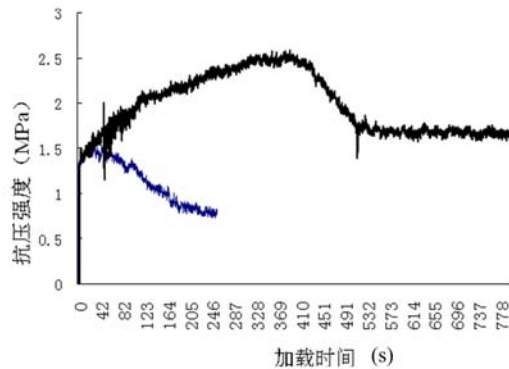


图13 加载时间—单轴抗压强度曲线

Fig. 13 Load time-uniaxial strength curve

4.3 极松软煤体直剪实验

本次实验进行 17×4 共计 68 次,实验仪器采用应变控制式智能电动四联直剪仪,剪切速度为 0.1mm/min,实验过程如图 14 所示。

煤粉和水在不同配比、不同轴压条件下的抗剪强度和轴压实验结果如图 15、图 16 所示。

由实验结果知,煤粉天然含水率极低,自身保水能力严重不足,极易失水。含水率在 0~4.03% 区间,抗剪强度随含水率的增高而增高;4.03%~12.7% 区间,随着含水率的增高,抗剪强度迅速降低。1.07%~17.07% 范围内,黏聚力对水的敏感度远大于内摩擦角对含水率的敏感程度。

粘土含量为 3%,在含水率为 2.44%、4.10%、6.14%、9.79%、5.11%、20.26% 和 24.51% 条件



图 14 应变控制式智能电动四联直剪仪

Fig. 14 Large direct shear apparatus

下分别做直剪实验,实验结果见图 17(a)。粘土含量为 8%,在含水率为 2.53%、4.04%、5.93%、10.07%、15.04%、19.86%和 24.95%条件下分别做直剪实验,实验结果见图 17(b)。粘土含量为 11%,在含水率为 2.11%、4.78%、7.86%、10.49%、15.47%、20.82%和 24.69%条件下分别做直剪实验,实验结果见图 17(c)。粘土含量为 20%,在含水率为 2.03%、3.74%、6.05%、10%、14.93%、19.78%、20.26%条件下分别做直剪实验,实验结果如图 17(d)所示。

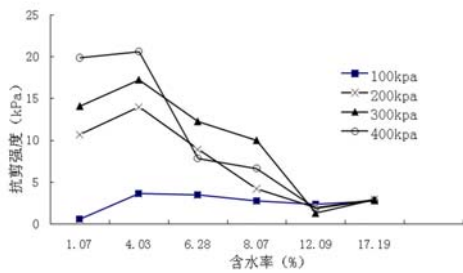


图 15 含水率—抗剪强度曲线

Fig. 15 Shear strength-moisture content curve

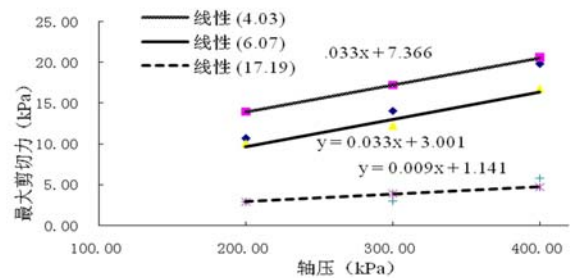
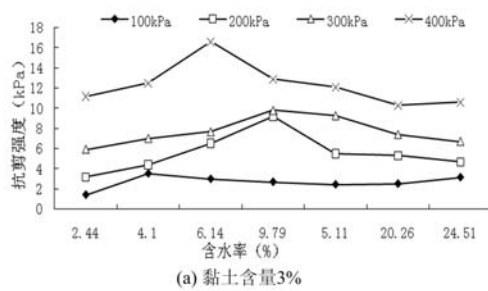
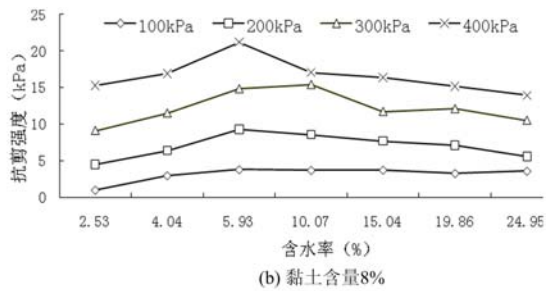


图 16 轴压—抗剪强度曲线

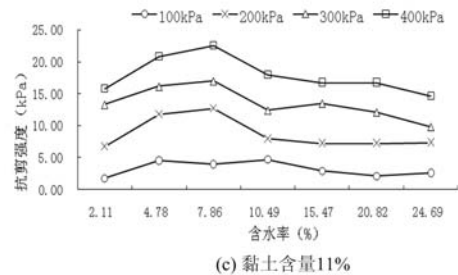
Fig. 16 Axial force-shear strength curve



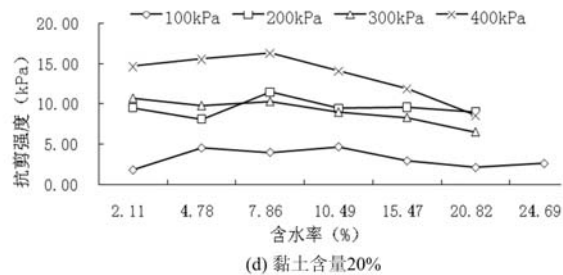
(a) 黏土含量3%



(b) 黏土含量8%



(c) 黏土含量11%



(d) 黏土含量20%

图 17 含水率—抗剪强度曲线

Fig. 17 Shear strength-moisture content curve

抗剪强度与含水率回归曲线可表示为：

$$\tau = a\psi^2 + b\psi + c \quad (2)$$

式中, τ 为抗剪强度; ϕ 为含水率; a 、 b 、 c 为试样关联系数。

粘性黄土颗粒微小,总的比表面积远大于极松软煤体颗粒,添加粘土后总结构粒间分子吸引力显著增强。粘土颗粒之间通过静电吸引易形成公共水化膜,使得粘土颗粒之间、粘土极松软煤粉颗粒之间通过公共水化膜连接在一起,这进一步增加了结构的粘结能力。煤粉和粘土遇水后,存在某一特定含水率,此时公共水化膜粘结能力最大,凝聚力亦越强,抗剪强度越大。此结构的内摩擦角最显著因素为颗粒的大小和密实程度,其次为含水率大小。

基于极松软煤层煤体含水率与抗剪强度关系,在66207工作面实施了深浅孔联合注水加固煤体技术。超前煤壁100m,在上下平巷对煤体进行长孔静压预注水,注水孔间距4~5m,孔深8m,注水压力1.0MPa。同时,在煤壁处使用煤电钻短时注水,注水压力为3.0~6.0MPa,注水时间约10min。极松软煤层注黄泥浆后,在固定支承压力作用下,发生团化固结,有效应力增加,孔隙比减小,抗剪强度提高。

5 结论

(1) 提出66207工作面煤体属于极松软煤体,工作面开挖后在煤壁底角产生剪应力集中,破坏位置由此沿渐变剪应力带牵引至煤壁顶部,产生卸荷松弛浅层坍塌片帮。

(2) 极松软煤天然含水率极低,自身保水能力严重不足,极易失水,黏聚力对水的敏感度远大于内摩擦角对含水率的敏感程度。

(3) 极松软煤体添加粘土后抗变形能力、抗压强度、抗剪强度显著提高,两者质量比一定时,存在某一特定含水率,此时公共水化膜粘结能力最大,凝聚力亦最强,抗剪强度最大;

(4) 实验工作面可采用注黄泥浆施工扰动方法,使煤层在壳基超前支承压力作用下发生团化固结,达到有效应力增加、孔隙比减小、抗剪强度提高的目的。

参考文献:

- [1] 宁宇. 大采高综采煤壁片帮冒顶机理与控制技术[J]. 煤炭学报, 2009, 34(1):50-52 (NING Yu. Mechanism and control technique of the rib spalling in fully mechanized mining face with great mining height[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(1):50-52 (in Chinese))
- [2] 闫少宏, 尹希文. 大采高综放开采几个理论问题的研究[J]. 煤炭学报, 2008, 33(5):481-484 (YAN Shaohong, YIN Xiwen. Discussing about the main theoretical problems of long Wall with top coal caving[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(5):481-484 (in Chinese))
- [3] 尹希文, 闫少宏, 安宇. 大采高综采面煤壁片帮特征分析与应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(2):222-225 (YIN Xiwen, YAN Shaohong, AN Yu. Characters of the rib spalling in fully mechanized caving face with great mining height[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(2):222-225 (in Chinese))
- [4] 王家臣, 陈贵. 极软煤层轻放开采工作面矿山压力显现规律分析[J]. 中国矿业, 2005, 14(12):56-59 (WANG Jiachen, CHEN Gui. A study on the mine pressure law on the dead soft blast layer working face [J]. China Mining Magazine, 2005, 14(12):56-59 (in Chinese))
- [5] 方新秋, 何杰, 李海潮. 软煤综放面煤壁片帮机理及防治研究[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(5):640-644 (FANG Xinqiu, HE Jie, LI Haichao. A study of the rib fall mechanism in soft coal and its control at a fully-mechanized top-coal caving face[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(5):640-644 (in Chinese))
- [6] 于岩斌, 周刚, 陈连军, 等. 饱水煤岩基本力学性能的试验研究[J]. 矿业安全与环保, 2014, 41(1):4-7 (YU Yanbin, ZHOU Gang, CHEN Jianjun, et al. Experimental study on basic mechanical properties of water-saturated coal[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2014, 41(1):4-7 (in Chinese))
- [7] 杨治国, 田建辉, 张力友, 等. 三软不稳定煤层深孔注水防尘与注浆防片帮技术[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(9):60-63 (YANG Zhiguo, TIAN Jianhui, ZHANG Liyou, et al. Dust prevention with deep borehole water injection and spalling prevention with grouting in unstable seam with soft roof, coal and floor[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(9):60-63 (in Chinese))
- [8] 赵洪亮, 袁永, 张琳. 大倾角松软煤层综放面矿压规律及控制研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(3):345-

- 348 (ZHAO Hongliang, YUAN Yong, ZHANG Lin. Strata behavior in fully mechanized top coal caving face of steep soft coal seams and its control[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(3):345-348 (in Chinese))
- [9] 张辉,程利兴,李国盛.基于巴西劈裂法的饱水煤样能量耗散特征研究[J].实验力学,2016,31(4):534-542 (ZHANG Hui, CHENG Lixing, LI Guosheng. Study of energy dissipation characteristic of saturated coal sample based on Brazil splitting method[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2016, 31(4):534-542 (in Chinese))
- [10] 姚仰平.土力学[M].北京:高等教育出版社,2011 (YANG Yangping. Soil mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2011 (in Chinese))
- [11] 李家卓.采场底板围岩应力壳力学特征研究[D].淮南:安徽理工大学,2015 (LI Jia-zhuo. Study on mechanical characteristics on surrounding rock of stope floor stress shell[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2015 (in Chinese))
- [12] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T 23561.5-2009 煤与岩石物理力学性质测定方法[S].北京:中国标准出版社,2009 (The National Standard Compilation Groups of People's Republic of China. GB/T 23561.5-2009 methods for determining the physical and mechanical properties of coal and rock[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009 (in Chinese))

Experimental Study of Coal Seam Reinforcement and Mechanism Analysis of Working Surface Rib Spalling for Very Soft Coal Seam

LI Jia-zhuo^{1,2}, ZHU Chuan-qi², LIU Wan-rong²

(1. Anhui Province Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mine, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China; 2. School of Mining and Safety Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: Aiming at the control problem of working surface coal wall spalling in extremely soft coal seam, three-dimensional finite difference numerical calculation indicates that after excavation of extremely soft coal seam, shear stress concentration occurs at coal wall bottom, then the damage position is drawn to the top of coal wall along the belt of gradual shear stress, thus unloading and relaxation of shallow spalling is generated. Indoor experimental results show that the natural moisture content of very soft coal seam is extremely low, its water holding capacity is seriously insufficient, easy to water loss. Water content increases from 1.46% to 3.39%, the strain value increases by 154.32%; when water content is 4.49%, the clay content is 10.00%. Comparing with very soft coal seam without clay, the compression strength increases by 55.02%, strain increases 574.26%. When the moisture content is within 0~4.03%, the shear strength is positively related to water content. When moisture contents are between 4.03%~12.70%, the shear strength decreases rapidly with the increase of water content. Moreover, the sensitivity of cohesive force to water content is much larger than that of internal friction angle. There is specific moisture content, when the shear strength is the largest. Using construction disturbance method, the very soft coal seam can be consolidated through the effect in front of coal bed shell base pressure support, the effective stress increases, pore ratio decreases, shear strength is improved.

Keywords: very soft coal seam; mechanism of rib spalling; coal seam reinforcement; mechanical experiments