

文章编号: 1000-7598-(2008)10-2678-05

基于室内试验的条带煤柱稳定性研究

陈绍杰, 郭惟嘉, 杨永杰, 王亚博

(山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建教育部重点实验室, 青岛 266510)

摘 要: 对建新矿 13 煤进行了室内力学性质研究, 研究了煤岩的尺寸效应, 得到了建新矿 13 煤煤岩体单轴抗压强度为 6.928 MPa; 进行三轴压缩试验确定该层煤符合摩尔-库仑弹塑性力学模型。以试验研究结果为基础, 结合建新矿的实际情况, 在选定采出条带宽度 25 m 时, 应用 FLAC^{3D} 对条带开采进行煤柱应力和地表最大下沉分析, 并研究煤柱稳定性。结果表明选择 20 m 宽度的煤柱时, 可以保持煤柱稳定性。基于室内煤岩试验研究的结果, 采用数值模拟的方法, 通过多方案条带开采研究煤柱安全性, 在减小煤柱尺寸的同时, 确保煤柱安全稳定, 避免仅仅使用经验公式计算带来的盲目性。

关 键 词: 强度试验; 煤柱体强度; 数值模拟; 煤柱稳定性

中图分类号: TD 322^{+.4}

文献标识码: A

Research on stability of strip coal pillar based on laboratory test

CHEN Shao-jie, GUO Wei-jia, YANG Yong-jie, WANG Ya-bo

(Key Laboratory of Mine Disaster Prevention and Control, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China)

Abstract: Mechanical properties of Coal Seam No.13 in Jianxin Colliery are tested by using Rock Servo Mechanics Test System. The coal masses uniaxial compressive strength is tested to be 6.928 MPa through size effect study. And the coal is testified to accord with Mohr-Coulomb elastoplastic model by triaxial compression test. Based on the experimental study, the pillar stress and maximum subsidence are studied by using FLAC^{3D}; and the pillar security is analyzed after selecting the mining strip width of 25 m, then the stability of coal pillar is studied. The results indicate that the width of 20 m can maintain pillar stability. On the basis of coal test in laboratory with numerical simulation method, studying strip pillars' stability of different widths can insure its stability and safety while reducing the size of pillar, then avoiding blindness by using empirical formula merely.

Key words: strength test; pillar strength; numerical simulation; pillar stability

1 引 言

在煤矿条带开采中, 保留煤柱来支撑上覆岩层以起到控制地表沉降的作用。合理地进行条带煤柱设计, 确保煤柱的稳定性, 对于多回收煤炭资源、安全开采和保护地表形貌、形态至关重要^[1,2]。实践和理论表明, 煤柱体强度与煤岩试块的强度是进行条带开采煤柱设计时的基础和关键^[2-4]。

长期以来, 国内外做的煤岩实验多是非标准试件; 所有煤矿的煤柱强度计算公式都是根据实验室煤岩试块单轴实验、现场调查和现场观测得出的^[3]; 在设计煤柱尺度时, 都是采用经验公式和经验参数进行粗放设计和预计, 笼统地给出一个安全系数^[1,3],

导致煤柱设计不合理。本文利用先进的 MTS 岩石伺服试验机, 系统地进行煤岩室内实验, 进行理论分析, 获得各情况下强度参数间的关系, 综合考虑煤柱的尺寸效应、侧压效应和时间效应^[5], 利用数值模拟的方法进行条带煤柱稳定性分析可以使设计更加合理。这对矿区的可持续发展、更多更合理地回收煤炭资源、更加安全地进行开采具有重要意义。

2 煤岩室内力学试验研究

2.1 试验条件和试验内容

为研究煤岩的力学性质, 为条带煤柱安全性研究提供基础, 首先对建新煤矿 13 煤进行试验研究。现场取得大煤块后即封蜡, 以保证与现场相同的湿

收稿日期: 2006-10-09

基金项目: 山东省科技厅重大科技专项 (No.2006GG1108097-14)、矿山灾害预防控制教育部重点实验室开放基金 (No.MDPC0603, No.MDPC0607) 资助。

作者简介: 陈绍杰, 男, 1978 年生, 讲师, 博士研究生, 主要从事矿山压力与岩层控制、矿山岩石力学、开采沉陷与环境保护方面的教学与研究工作。E-mail: csjwyb@163.com

度和含水率，运抵实验室后加工成标准岩石试件。根据具体试验需要，加工后的标准煤岩试样有圆柱体和立方体两种，其平整度、垂直度均达到岩石试验规范标准^[6]。已有研究表明，同一地质条件下试件的声波速度相近时，试件的单轴抗压强度相差不大^[7]，故采用声波速度相近的试件在 MTS815 岩石伺服系统上进行试验。

试验包括煤岩的单轴压缩试验和常规三轴压缩试验，以研究尺寸与侧向压力对煤岩强度的影响。

2.2 试验结果和分析

(1) 单轴压缩试验

首先对圆柱体标准试件进行单轴压缩试验，测得建新矿 13 煤试块的单轴抗压强度为 7.96 MPa，弹性模量为 1 545.91 MPa，泊松比为 0.281 45。

为分析煤柱体强度和煤岩试块之间的关系，要进行煤岩尺寸效应研究。为此加工了不同尺寸的立方体试件共计 23 块进行单轴压缩试验，试验结果如表 1 所示。根据刘宝琛等归纳多种岩性试验提出的尺寸效应指数经验公式^[8]，可以得到建新矿 13 煤的尺寸效应：

$$\sigma_c = \gamma_c + \alpha_c \exp(-\beta_c D) = 6.928 + 130.269 8 \exp(-0.105 95 D) \quad (1)$$

式中： σ_c 为受力断面边长或直径为 D 的试件的单轴抗压强度； γ_c 为该种岩体的单轴抗压强度； α_c 为原岩强度与岩体强度差； β_c 为岩样强度衰减系数； D 为试件受力断面边长或直径。

建新矿 13 煤边长为 50 mm 的长方体试件单轴压缩强度 σ_c 为 7.579 9 MPa，原岩单轴抗压强度为

137.198 MPa，岩体强度 γ_c 为 6.928 MPa。拟合公式与实测数据的相关系数为 0.883 1，说明公式拟合效果较好。

(2) 常规三轴压缩试验

为研究围压对煤岩强度的影响，在围压 0.2~12 MPa 共 9 个围压下对建新矿 13 煤进行了常规压缩试验。

库仑准则是线性准则，当 σ_3 较小时更为适用，采用较低围压下 (0~1.2 MPa) 的试验结果回归得到建新矿 13 煤的库仑准则主应力关系式为

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 9.710 05 + 12.471 6 \sigma_3 \quad (\rho = 0.998 86) \quad (2)$$

式中： ρ 为拟合公式与实测数据的相关系数。

围压-最大主应力差试验结果与回归曲线如图 1 所示，求得建新矿 13 煤的黏聚力 $c = 1.323$ MPa，内摩擦角 $\varphi = 59.516^\circ$ 。

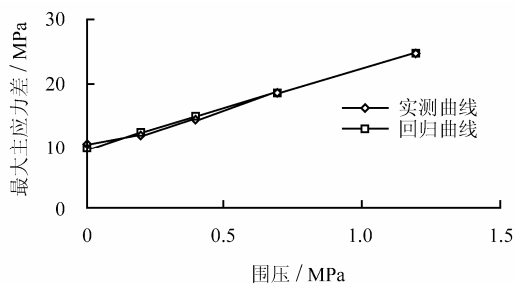


图 1 建新矿 13 煤最大主应力差-围压曲线

Fig.1 Curve of Maximum principal stress difference and confining pressure

根据摩尔准则，把本次试验的全部结果参与回归得出抛物线型摩尔包络线的曲线方程：

$$\tau^2 = 10.547(\sigma + 0.261 3) \quad (3)$$

如图 2 所示，以此求得建新矿 13 煤的单轴抗拉强度 $\sigma_t = 0.261 3$ MPa、黏聚力 $c = 1.66$ MPa，稍大于根据库仑准则求得的值；在单轴压缩破坏点处抛物线的外切线与 σ 夹角为煤岩的原始内摩擦角 $\varphi = 51.055^\circ$ ，小于按库仑准则求得的值。

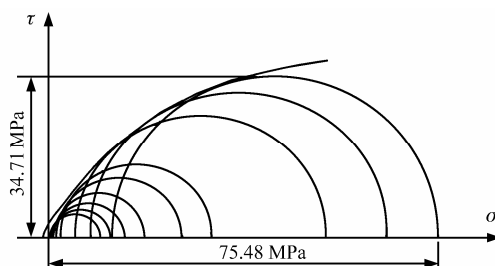


图 2 建新矿 13 煤摩尔圆摩尔包络线

Fig.2 Mohr circle & Mohr enveloping line

表 1 建新矿 13 煤立方体试件单轴压缩试验结果

Table 1 Uniaxial compressive test results of cube samples

试件 编号	高度 / mm	边长 / mm	单轴压缩 强度 / MPa	试件 编号	高度 / mm	边长 / mm	单轴压缩 强度 / MPa
1	31.55	15.308 3	36.948 7	13	73.36	35.803 0	11.173 1
2	34.06	16.404 6	31.512 9	14	75.15	36.678 9	10.543 3
3	37.27	17.239 6	29.096 2	15	83.52	40.793 8	9.2631 2
4	43.44	18.009 8	24.520 9	16	85.94	42.789 3	14.758 0
5	41.4	18.439 0	23.925 0	17	88.64	44.332 9	11.230 8
6	42.29	19.240 8	16.823 9	18	103.63	51.163 6	6.879 1
7	43.28	20.317 1	21.317 1	19	122.26	59.400 7	6.215 7
8	48.26	23.343 1	12.272 8	20	132.52	63.971 8	5.706 3
9	52.19	25.377 5	17.864 7	21	132.49	65.233 7	5.023 5
10	59.6	26.010 0	20.372 4	22	144.42	76.524 8	3.941 4
11	74.38	30.331 5	13.144 9	23	159.61	78.872 3	4.784 3
12	69.91	30.366 7	11.221 5				

整体来说,建新矿 13 煤较好地符合库伦-摩尔模型。

3 煤柱体强度

实验室内采用的是尺寸很小的岩块,煤柱则是采矿工程实际中的岩体。煤柱体强度是指每单位煤柱面积上能承受的最大载荷,它是保证煤柱稳定安全的基础。煤岩的力学性能具有尺度效应,故实验室测试的煤样强度和其力学参数不能直接用作现场煤岩的整体强度,必须把室内试验结果做适当的参数转换。根据对建新矿 13 煤 23 块煤样单轴压缩强度的尺寸效应试验研究,由式(1)得出建新矿 13 煤的煤柱体强度 σ_m 为 6.928 MPa。

煤柱包括塑性破坏区和核区,塑性破坏区已经破坏,失去了承载能力;核区受力还没有达到其承载极限,对支持上覆岩层起主要作用。在我国条带开采保留的煤柱一般不进行支护,煤柱边缘的塑性破坏区处于自然状态,对煤柱的核区能够起到一定的约束作用而使煤柱的核区处于三向受力状态。三轴试验研究表明,建新矿 13 煤在围压下较好地符合摩尔-库伦准则,故条带煤柱稳定性研究数值模拟中采用摩尔-库伦模型。

4 建新煤矿条带开采煤柱稳定性

4.1 建新煤矿条带开采条件

建新煤矿中部采区地表对应村庄等建、构筑物,为控制地表下沉,保护地表建、构筑物,建新矿决定对中部采区 13 煤采用条带开采法。该煤层赋存稳定,煤厚 1.6~1.8 m,平均 1.7 m;煤层井下标高 -180~-205 m,地面标高 +160 m,平均采深 352.5 m,煤层顶底板综合柱状图如图 3 所示。根据已采相邻矿井观测资料,工作面直接顶初次垮落步距 8.3 m,老顶初次来压步距 27.3 m,周期来压步距 12 m。由于充填采空区成本太高,这里采用全陷法管理顶板。

根据 13 煤的埋深、厚度、顶板覆岩性质、顶板来压情况等确定采出条带宽度 b 为 25 m。条带开采的煤炭采出率 ρ 应在 40%~70%之间,因此留设煤柱宽度应该在 37.5~10.7 m 之间,

4.2 煤柱宽度 a 的数值模拟研究

采用 FLAC^{3D} 软件进行数值模拟计算,针对研究目标建立不同形状的网络模型,网格单元隶属于不同的材料特性,在载荷作用或边界约束下,每个单元依据被赋予的线性或非线性应力(应变)规律而变化。在大变形模式下材料会屈服或产生塑性变

形,具有该材料特性的模型网格便会变形和移动,可以模拟工程岩体的弹塑性应变软化非线性大变形特征,能够比较真实地揭示地下煤层开采后各覆层的应力状态和变形特征。

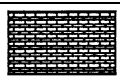
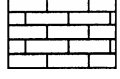
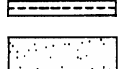
煤岩名称	柱状	平均厚度 / m	主要特征
砂质岩		16	灰黑色,性脆致密,含植物化石。
四灰		7.0	深灰色裂隙发育,性脆坚硬。
13 煤		1.7	黑色光亮、含镜煤。
黏土页岩		0.8	黑色易风化。
中粒砂岩		2.4	灰色黏土胶结致密坚硬裂隙发育。
页岩		2.6	深灰色。

图 3 煤层顶底板综合柱状图
Fig.3 Integrated columnar section

根据工程实际情况,建立开采宽度 25 m,留设煤柱宽度分别为 35 m, 30 m, 25 m, 20 m, 15 m 5 种数值模型。因为需要根据煤柱的稳定性和地表下沉来选定留宽,建立了同样条件下的大小两类模型如图 4 和图 5 所示。每类模型包括 5 个模型分别模拟 5 种不同宽度煤柱情况。

煤层的力学参数是根据本次试验研究得出的相应岩体参数,其他各岩层的力学参数参考相邻矿井情况确定。各岩层力学参数如表 2 所示。根据室内试验研究,建新煤矿 13 煤的强度较好地符合摩尔-库伦准则,因此采用 FLAC 中自带的摩尔-库伦弹塑性材料模型进行数值模拟。

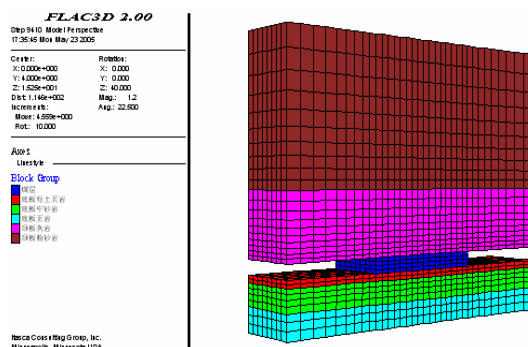


图 4 煤柱稳定性数值模型
Fig.4 Numerical model of pillar stability

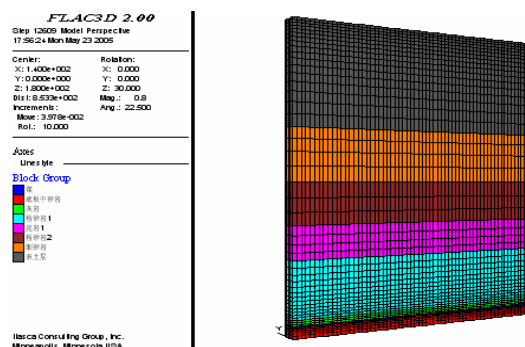


图 5 覆岩沉陷数值模型

Fig.5 Numerical model of overburden subsidence

表 2 模型各岩层参数

Table 2 Parameters of each stratum in model

岩性	容重 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	单轴抗压强度 / MPa	泊松比	弹模 / MPa	抗拉强度 / MPa	黏聚力 / MPa	内摩擦角 / (°)	剪切强度 / MPa
表土层	1.03	1.2	0.36	800	0.03	0.317	43	0.12
细砂岩	2.66	19	0.18	7 300	0.37	2.265	46	1.9
粉砂岩	2.64	17	0.16	5 600	0.35	2.194	37	1.7
泥岩	2.63	6	0.19	2 400	0.08	0.381	49	0.6
灰岩	2.76	36	0.21	13 500	1.22	6.073	41	3.6
煤	1.31	6.928	0.281 5	1 545.9	0.07	0.446	51.06	0.27
中砂岩	2.59	21	0.20	8 600	0.61	4.079	39	2.1
黏土页岩	2.64	15	0.24	3 300	0.43	3.924	46	1.5
页岩	2.61	13	0.24	3 100	0.37	3.862	42	1.3

根据采矿工程实际情况，模型的下边界采用固定约束，上边界为自由边界，其它 4 个面为滑动约束，允许在竖直方向移动。

从煤柱稳定性模型的煤柱竖直应力等值线图可以看出（图 6 为 20 m 煤柱稳定性模型），处于屈服区的煤柱最边缘处应力最小，接近于 0，这与已有的研究成果相符。当所留煤柱宽度为 20 m 时，如图 6，在煤柱两端边缘内侧各形成了应力集中区，这是采空区上覆岩层的重量集中的结果；煤柱中央的应力相对较小，整个煤柱应力分布呈“马鞍形”，说明煤柱中央受力没有达到峰值，煤柱能够承载采场上覆岩层而不会整体破坏。此外，从模型的变形场和煤柱的塑性区看，20 m 煤柱也不会整体破坏。综合分析，20 m 的煤柱处于稳定状态。当煤柱宽度缩小时，煤柱下方的应力分布呈中间上凸形，煤柱不能支撑采场的上覆岩层，随着煤柱边缘塑性破坏区的增大，煤柱中央受力也将增大，煤柱的塑性破坏区将会连通而导致煤柱整体破坏，煤柱处于不稳定状态。

由覆岩沉陷模型开采后的竖直位移云图（图 7

为 20 m 煤柱覆岩沉陷模型）可以看出：保留 15 m 煤柱时，采出条带上方覆岩的变形很快就相互影响，在顶板变形变化较大处就已经出现了各条带开采的叠加作用；当保留的煤柱大于 20 m 时，采出条带顶板处基本为本条带开采产生的位移，只有在距离顶板较远的覆岩处各采出条带产生的变形才耦合在一起，在保留煤柱大于 20 m 时，采区上方地表的变形下沉将远小于 15 m 煤柱的情况；在保留的煤柱大于 20 m 时，随着保留煤柱的增大，采出条带上方覆岩变形的耦合处相差不大，均是在位移很小处才耦合在一起，从而在保留煤柱大于 20 m 时各情况地表下沉相差不大。

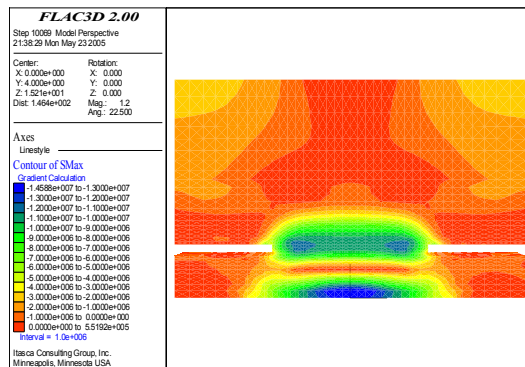


图 6 20 m 煤柱最大主应力云图

Fig.6 Nephogram of Maximum principal stresses of 20 m pillar

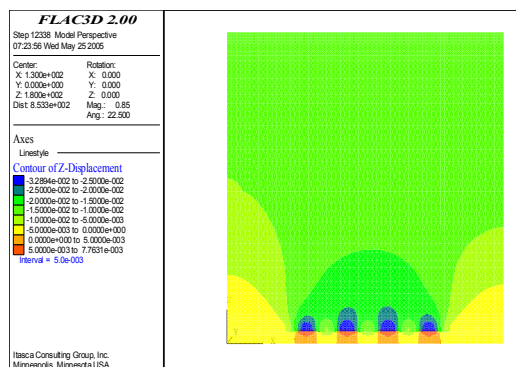


图 7 20 m 煤柱模型竖直位移云图

Fig.7 Nephogram of vertical displacements of 20 m pillar model

可见，当采出宽度为 25 m，留设 15 m 煤柱时是不稳定的、地表下沉量大，当煤柱宽度大于 20 m 时，煤柱稳定，地表下沉量较小。综合分析，根据建新矿实际情况和数值模拟结果，可以确定保留 20 m 的宽度可以保证煤柱的稳定和安全。

4.3 煤柱安全性验证

根据生产实际经验,留设的煤柱获得安全和稳定的支撑上覆岩层的作用时, a 值应满足下列各式:

$$\frac{a}{m} \geq 5 \quad (4)$$

$$a \geq 0.01mH + 8.4 \quad (5)$$

$$q = a/(a+b) \times \% \leq 70 \% \quad (6)$$

式中: H 为采深; m 为采厚; q 为工作面回采率。

经过验证, 20 m 的条带煤柱满足上面检验公式。

在进行条带开采时, 为了保证煤柱有足够的强度, 其安全系数 K 必须大于 1, 在煤柱三向受力状态下一般取 $K = 1.6 \sim 2.0$, 可保证煤柱有长期的支撑稳定性。煤柱承压安全系数为煤柱能承受的极限荷载与煤柱实际承受的荷载之比, 根据上述煤柱稳定性分析, 有

$$K = \frac{4\gamma H(a - 4.92mH \times 10^{-3})}{\gamma(Ha + 0.5b(2H - b/0.6))} = 1.84 \quad (7)$$

满足条带开采法的煤柱稳定性要求。

5 结 语

本文根据煤岩室内试验结果, 研究了煤岩的尺寸效应, 得到了建新矿 13 煤煤岩体的强度为 6.928 MPa; 进行三轴压缩试验确定该煤岩符合摩尔-库仑弹塑性力学模型。以试验研究结果为基础, 结合建新矿的实际情况, 在选定条带采出宽度 25 m 时, 应用 FLAC^{3D} 软件对建新矿 13 煤条带开采煤柱应力和地表最大下沉进行了数值模拟分析, 并进一步研究了煤柱稳定性。结果表明: 选择 20 m 宽度的煤柱时, 可以保持煤柱的稳定性。

参 考 文 献

- [1] 谢和平, 段法兵, 周宏伟, 等. 条带煤柱稳定性理论与分析方法研究进展[J]. 中国矿业, 1998, 7(5): 37—41.
XIE He-ping, DUAN Fa-bing, ZHOU Hong-wei, et al. Recent developments of theory and analysis methods of strip pillar stability[J]. China Mining Magazine, 1998, 7(5): 37—41.

- [2] 王金庄, 邢安仕, 吴立新. 矿山开采沉陷及其损害防治[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1995.
- [3] 王旭春, 黄福昌, 赵华兴. A. H. 威尔逊煤柱设计公式探讨与改进[J]. 煤炭学报, 2002, 27(6): 604—608.
WANG Xu-chun, HUANG Fu-chang, ZHANG Hua-xing. Discussion and improvement for A. H. Wilson's coal pillar design[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(6): 604—608.
- [4] 吴立新, 王金庄. 煤柱宽度的计算公式及其影响因素分析[J]. 矿山测量, 1997, (1): 12—48.
WU Li-xin, WANG Jin-zhuang. Pillar width calculation formula and analysis of influential factors[J]. Mine Survey, 1997, (1): 12—48.
- [5] PENG S S. Strength of laboratory-sized coal specimens vs. underground coal pillars[J]. Mining Engineering, 1993, 45(2): 157—158.
- [6] 国际岩石力学学会实验室和现场试验标准化委员会. 岩石力学试验建议方法[M]. 郑雨天, 傅冰骏, 卢世宗, 等译. 北京: 煤炭工业出版社, 1982.
- [7] 杨永杰, 陈绍杰. 同种岩石强度离散性的实验技术研究[J]. 实验技术与管理, 2005, (1): 34—37.
YANG Yong-jie, CHEN Shao-jie. Experimental technique study of discreteness of the same kind of rock[J]. Experimental Technique and Management, 2005, 22(1): 34—37.
- [8] 刘宝琛, 张家生, 杜奇中, 等. 岩石抗压强度的尺寸效应[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 611—614.
LIU Bao-chen, ZHANG Jia-sheng, DU Qi-zhong, et al. A study of size effect for compression strength of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(6): 611—614.