

岩层明显运动时间效应分析

文志杰¹, 夏洪春^{1,2}, 董洪青³

1. 山东科技大学; 矿山灾害预防与控制重点实验室, 山东青岛 266510
2. 大连大学; 辽宁省复杂结构体系灾害预测与防治重点实验室, 辽宁大连 116622
3. 级索煤矿, 山东滕州 277518

摘要 基于应用“以岩层运动和支承压力分布”为核心的矿山压力控制理论, 建立了采场结构力学模型和留巷结构力学模型, 阐述了垮落带厚度确定方法, 推导了煤矸石压缩前后变形量求解公式, 分析了采空区煤矸石压缩和留设巷道围岩变形压缩作用力的来源; 利用自制的煤矸石压密试验设备和 MTS 815.03 电液伺服万能试验机对 3 种粒径等级 (10—20mm、20—30mm、30—60mm) 煤矸石的压缩特性进行了系统性研究, 得到了煤矸石在不同单轴压缩条件下的碎胀特性、碎胀系数与应力关系曲线, 以及压缩过程中的时间相关特性。研究结果表明, 采空区煤矸石压缩作用力主要来源于采场断裂拱内岩层重量; 煤矸石压缩至密实状态变形量大约为 $0.3m_z$; 煤矸石压缩曲线符合对数函数关系; 试验结果与现场数据基本吻合。

关键词 岩层; 运动; 煤矸石; 压缩; 时间效应

中图分类号 TD801

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.18.005

The Time Effect of Strata Obvious Movement

WEN Zhijie¹, XIA Hongchun^{1,2}, DONG Hongqing³

1. Key Laboratory of Mine Disaster Prevention and Control; Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, Shandong Province, China
2. Key Laboratory of Liaoning Province for Prediction and Control of Complicated Structure System; Dalian University, Dalian 116622, Liaoning Province, China
3. Jisuo Coalmine, Tengzhou 277518, Shandong Province, China

Abstract Based on the ground pressure and strata control theory with "the strata movement and abutment pressure" as the core, the stope structural mechanical model and the gob-side retaining entry mechanical model are built, the caving zone height is determined, the non-compressed and compressed gangue deformation calculation formula is obtained, the compression effect of coal gangue in the mined-out area is explained and the gob-side retaining entry surrounding deformation is analyzed. For the coal gangue with three kinds of size ranks (10—20mm, 20—30mm, 30—60mm), their compression characteristics are analyzed by MTS 815.03 electron hydraulic servo machine and home-made compression testing-equipment, and its compression-time characteristics are obtained. The results show that the strata weight of the fracture-arch in the stope is the main source of the compression effect of the coal gangue in the mined-out area. The coal gangue deformation is about from beginning to the dense condition; the coal gangue compression curve assumes a logarithmic relationship; the test results agree well with the field data.

Keywords strata; movement; coal gangue; compression; time effect

0 引言

地下岩体在开挖以前, 原岩应力处于平衡状态。开掘巷道或进行回采工作时, 破坏了原始的应力平衡状态, 引起岩

体内部的应力重新分布, 在煤层形成“内、外应力场”。“内应力场”范围内煤体遭到不同程度的破坏, 原始应力高峰向内转移, 巷道开掘和维护主要在“内应力场”中进行^[1]。

收稿日期: 2010-06-09; 修回日期: 2011-05-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50874021); 《科技导报》“博士生创新计划”项目 (kjdb200902-13); 山东科技大学研究生科技创新基金项目 (YCA100306)

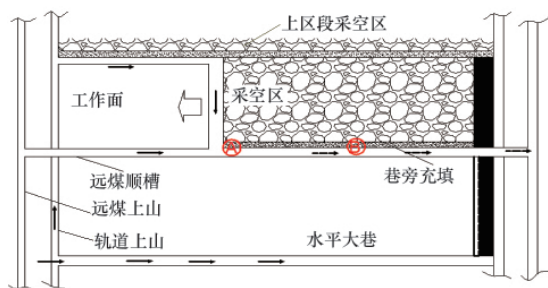
作者简介: 文志杰, 博士研究生, 研究方向为矿山压力与岩层控制, 电子信箱: sdst0532@gmail.com; 董洪青 (通信作者), 工程师, 研究方向为矿山压力与岩层控制, 电子信箱: wenbin1022@163.com

掌握“内应力场”所涉及的运动岩层范围及其运动发展情况,正确的选择巷道开掘和维护的时间,是该范围巷道矿山压力和顶板控制的关键^[2]。

实际应用过程中,主要是根据统计经验,即在推进距离达到两倍工作面宽度之后进行留巷,没有进行理论分析,因此容易造成工作面接续紧张。本研究以岩层运动和支承压力分布规律研究为基础,进而对采场上覆岩层裂断运动规律和采空区矸石压实特性进行研究,为合理确定正确的无煤柱开采时空关系提供了一种新思路和方法。

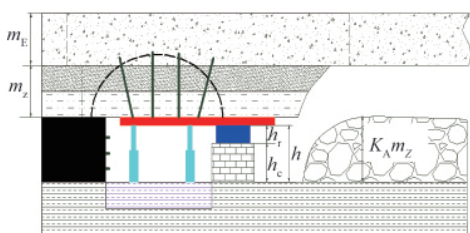
1 采场上覆岩层赋存形态分析

无煤柱开采模式包括“沿空留巷”和“沿空掘巷”两种方案,为维护巷道围岩稳定性,应确定合理的巷道开掘时空关系:开掘位置应布置在内应力场,开掘时间应在内应力场形成之后,即采场上覆岩层明显运动稳定之后,为此,需要准确建立采场结构力学模型,以分析岩层运动状态。留巷结构力学模型如图1所示,图1(b)、图1(c)所示位置分别位于图1(a)中的A、B位置处。其中, m_z 为直接顶厚度; m_E 为老顶厚度; K_A 为冒落矸石初始松散系数; K_{min} 为矸石压实后松散系数。



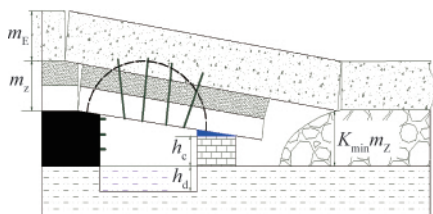
(a) 留巷系统布置

(a) Gob-side retaining entry system layout



(b) 压缩前

(b) Non-compressed state



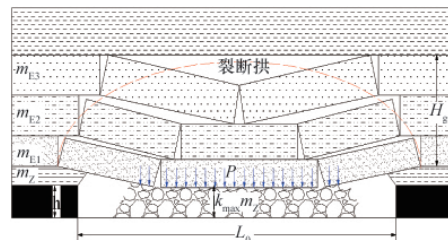
(c) 压缩后

(c) Compressed state

图1 留巷结构力学模型

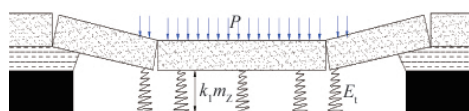
Fig. 1 Structural mechanism model for roadway retaining

在“内应力场”中开掘和维护的巷道围岩应力主要来源于受采场采动影响明显运动的上覆岩层运动的作用力。随采场推进进入明显运动的岩层,包括垮落的直接顶厚度(m_z)和运动中保持传递力联系的老顶(m_{E1} 、 m_{E2} 、 m_{E3} ...)。运动实现的基本结构状态和结构参数如图2所示,图中 L_0 为工作面宽度, H_g 为开挖后上覆岩层形成的拱结构高度, E_i 为矸石压缩刚度, P 为矸石承载, h 为煤层开采高度。



(a) 采场结构模型

(a) Stope structure mechanics model



(b) 煤矸石受力简图

(b) Force diagram of gangue

图2 煤矸石结构力学模型简图

Fig. 2 Structural mechanics model of coal gangne

采空区煤矸石力源(P)主要来源于裂断拱内岩层重量,工作面宽度一定时,工作面开采形成的裂断拱范围即确定,矸石上作用力确定。

1.1 垮落带厚度确定

假设煤层开采厚度 h ,矸石碎胀系数 K_A ,基本顶视为刚性结构。

理论确定直接顶厚度的方法是根据采场上覆岩层钻孔柱状图,按各岩层冒落条件判断的“钻孔柱状推断法”。

按直接顶各岩层厚度小于其下部允许运动的自由空间高度的原理,由下而上逐层判断,即

$$M_z = \sum_{i=1}^n M_i \quad (1)$$

式中, M_i 为第 i 层老顶厚度,其余变量含义同上。

其中,第 n 层老顶厚度 $M_n \leq h - \sum_{i=1}^{n-1} M_i (K_A - 1)$,则岩层塌

落;第 $n+1$ 层老顶厚度 $M_{n+1} > h - \sum_{i=1}^n M_i (K_A - 1)$,则岩层进入老顶范围。

1.2 力学结构分析

假设工作面宽度为 L_0 ,则开挖后上覆岩层形成的拱结构高度 $H_g = \alpha \cdot L_0$,其中 $\alpha \in [0.5, 0.7]$ 。

采空区煤矸石上承受的作用力即为拱结构的重量,单位面积作用力

$$P = \gamma \cdot H_g \quad (2)$$

根据统计,煤矸石初期碎胀系数 $K_{A\max} \in [1.35, 1.45]$,随着上覆岩层作用力持续加压,煤矸石逐渐被压实,从实用出发,此时碎胀系数 $K_{A\min} \in [1.05, 1.15]$ 。

为分析简便,分别取 $K_{A\max}=1.4, K_{A\min}=1.1$ 。已知煤矸石堆积厚度 $h_0=K_A \cdot m_Z$,则压实前后,煤矸石变形量 $\Delta h=(K_{A\max}-K_{A\min}) \cdot m_Z=0.3m_Z$ 。

2 煤矸石压缩特性研究

煤矸石作为工程充填材料的利用,压密程度是一项重要控制指标,受其粒度构成和岩性的影响,煤矸石的压密特性表现出比较复杂的特点。

实验室矸石粒径等级分为3组,即10—20mm、20—30mm和30—60mm。将每组配好的矸石放入模具内,矸石高度约为400mm。试验采用特制容器(图3)在压力机上进行分级加压。压密过程中,测度每级压力下矸石样相应的压缩变形,换算出应力与应变的关系。

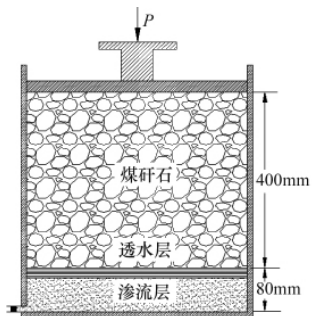


图3 压密试验设备结构简图

Fig. 3 Compression test equipment structure

2.1 煤矸石碎胀特性

选取在单轴压缩试验中不同轴压下破断的试样(这里选取30—60mm粒径试样)进行试验^[9]。根据其破断前尺寸计算试样实体体积后,再进行一次性击碎,并用量筒测量其破断后的体积。4块同一粒径级配(30、40、50、60mm粒径按照1:1:1:1级配密度进行配比)试样在压实断裂时,破碎散体粒度不同,造成破碎体的空隙度有差异,因而破碎散体体积有所差异,试验结果见表1。

由表1可知,矸石的平均碎胀系数 $K_A=1.79$,且单轴抗压强度大的矸石试样,其碎胀系数大于单轴抗压强度小的试样。

表1 碎胀系数测试结果

Table 1 Testing results for swelling factors

试样序号	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]
破断压力 σ/MPa	116	88	94	75
碎胀系数	1.92	1.82	1.81	1.63
平均碎胀系数	1.79			

2.2 矸石的碎胀系数与应力关系曲线

试验得出矸石的碎胀系数与应力关系如图4所示。由图4可以得出:(1) 矸石的碎胀系数随轴压增加而减少,两者近

似于对数关系;(2) 在初始加载阶段,矸石的碎胀系数减幅较大,随着轴向应力的增加,矸石碎胀系数减小的速率趋缓,并逐渐趋向于稳定。

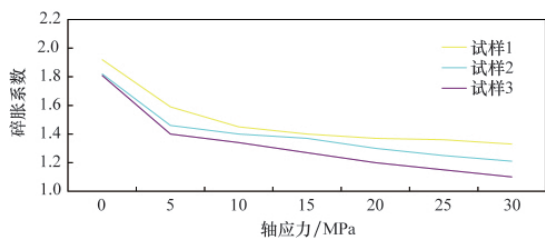


图4 煤矸石碎胀系数与应力关系曲线

Fig. 4 Relationship between stress and hulking coefficient

2.3 矸石压实过程的时间相关特性

为全面了解矸石压缩时间特性,笔者在实验室利用MTS 815.03型电液伺服机对兴隆庄矿岩石试样进行了压缩试验(粒径范围是20—80mm,20—40mm粒径比例占40%),总结出时间相关性规律。

试验试样取自采空区垮落矸石,确定试验基本参数见表2。

表2 试验基本参数

Table 2 Basic parameters of testing

项目	试样序号	
	1	2
轴向应力/MPa	1.0	5.0
加载速率/($\text{kN} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.2	1.0
持续时间/min	700	700

根据表2确定的试验基本参数,对现场充填矸石进行了时间相关性试验。时间相关性特性曲线如图5所示。

图5(a)、5(b)曲线拟合函数分别见式(3)、式(4)。

$$y=330\ln(x)+13.001 \quad (3)$$

$$y=338\ln(x)+30.036 \quad (4)$$

3 采场覆岩运动稳定时间特性

采场推进,形成上覆岩层垮落空间,岩层不断失稳,断裂或弯曲,形成裂断拱结构^[4-6]。

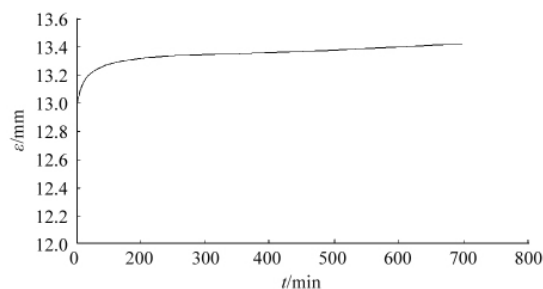
煤矸石垮落后充填采空区,经拱内岩层压实,可成一稳定状态,研究从开始压缩到稳定这个时间特性,是研究覆岩稳定时间特性的关键^[7-8]。

由式(2)可知,煤矸石单位面积压缩作用力 $P=\gamma \cdot H_g$ 。

兖州矿务局兴隆庄矿4318工作面宽度为 $L_0=180\text{m}$,则开挖后上覆岩层形成的拱结构高度 $H_g=\alpha \cdot L_0=90\text{—}126\text{m}$ 。

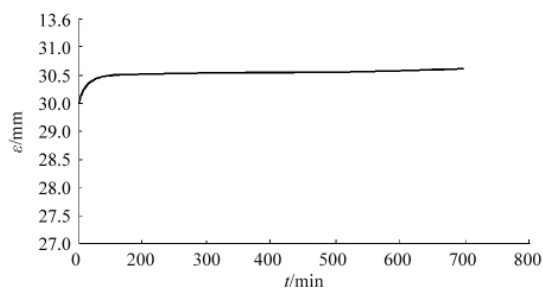
采空区煤矸石上前期承受的作用力即为拱结构的重量,单位面积作用力 $P=\gamma \cdot H_g=2.25\text{—}3.15\text{MPa}$

后期裂断拱上方支托层发生弯曲,载荷作用到裂断拱裂断岩层上,根据工作面柱状图看出随支托层同时运动的岩层高度为60m的泥岩和泥质页岩,因此后期煤矸石单位面积作用力 $P=\gamma \cdot H_g=3.75\text{—}4.65\text{MPa}$,直接顶厚度 $m_Z=13\text{m}$ 。



(a) 轴向应力 1.0MPa

(a) 1.0MPa axial stress



(b) 轴向应力 5.0MPa

(b) 5.0MPa axial stress

图 5 充填矸石时间相关性特性曲线

Fig. 5 Time relation curve of filling waste

压实前后, 煤矸石变形量 $\Delta h = (K_{\text{Amx}} - K_{\text{Amin}}) \cdot m_z = 0.3m_z = 3.9\text{m}$ 。

$y = 338 \ln(x) + 30.036 = 3900$, 解得 $x = 91622 \text{min} \approx 63\text{d}$ 。

即采空区煤矸石压缩至密实, 即上覆岩层运动基本稳定所需时间大约为 63d, 所得结论基本与现场相符。

4 结论

本文利用三维伺服实验机对煤矸石进行了压缩试验, 得出如下结论。

(1) 建立采场结构力学模型及相关的结构力学参数, 得出采空区煤矸石作用力主要来源于裂隙拱内覆岩重量。

(2) 利用自制的特制容器对煤矸石进行分级加压, 对碎胀系数和碎胀系数与应力关系, 以及其时间相关特性进行了分析讨论, 得出随着轴向应力增加, 碎胀系数变化速率逐渐平缓, 对煤矸石时间特性曲线建立了方程。

(3) 将拟合曲线方程与采场覆岩压缩煤矸石变形量结合起来, 得出的稳定时间与现场数据基本吻合。

参考文献 (References)

- [1] 宋振骐. 实用矿山压力与控制 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1988: 10-15.
Song Zhenqi. Practical mine ground pressure and control [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1988: 10-55.
- [2] 宋振骐, 蒋宇静, 杨增夫. 煤矿重大事故预测和控制的动力信息基础的研究 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2003: 13-14.

- Song Zhenqi, Jiang Yujing, Yang Zengfu. Study on the basic information of stratum movement and mechanics on predicting and controlling heavy accidents in coal mine [M]. Beijing: Coal Industry Press, 2003: 13-14.
- [3] 张吉雄. 矸石直接充填综采岩层移动控制及其应用研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学(徐州), 2008: 53-60.
Zhang Jixiong. Study on strata movement controlling by raw waste backfilling with fully-mechanized coal minning technology and its engineering applications [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology(Xuzhou), 2008: 53-60.
- [4] 张东升, 缪协兴. 综放沿空留巷充填体稳定性控制 [J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(3): 232-235.
Zhang Dongsheng, Miao Xiexing. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2003, 32(3): 232-235.
- [5] Litwiniszyn J. Model for the initiation of coal-gas outbursts [J]. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 1985, 22(1): 39-46.
- [6] Krajcinovic D. Continuum damage mechanics, theory and applications [M]. New York: Springer-Verlag, 1987: 67-69.
- [7] Li Y S. Time-dependent test on intact rock in uniaxial compression [J]. *Int J Rock Mech Mine Sci*, 2000, 37(3): 467-475.
- [8] 钱鸣高, 缪协兴, 何富连. 采场“砌体梁”结构的关键块分析 [J]. 煤炭学报, 1994, 19(6): 557-563.
Qian Minggao, Miao Xiexing, He Fulian. *Journal of China Coal Society*, 1994, 19(6): 557-563.
- [9] 史红, 姜福兴. 采场上覆岩层结构理论及其新进展 [J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2005, 24(1): 21-25.
Shi Hong, Jiang Fuxing. *Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science*, 2005, 24(1): 21-25.
- [10] 宋振骐, 崔增娣. 无煤柱矸石充填绿色安全高效开采模式及其工程理论基础研究 [J]. 煤炭学报, 2010, 35(5): 705-708.
Song Zhenqi, Cui Zengdi. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(5): 705-708.
- [11] 张文江. 煤矿采场结构力学模型及其应用研究 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2008.
Zhang Wenjiang. Study on the application of coal mine stope structure mechanical model [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2008.
- [12] 姜福兴. 采场覆岩空间结构观点及应用研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(1): 30-33.
Jiang Fuxing. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2006, 23(1): 30-33.
- [13] Hanson D R, Vandergrift T L, DeMarco M J, et al. Advanced techniques in site characterization and mining hazard detection for the underground coal industry [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2002, 50(1-4): 275-301.
- [14] Beck D A, Brady B H G. Evaluation and application of controlling parameters for seismic events in hard-rock mines [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, 39(5): 633-642.
- [15] Altounyan P E R, Bigby D N, Hurt K G, et al. Instrumentation and procedures for routine monitoring of reinforced mine roadways to prevent falls of ground [C]. 27th International Conference of Safety in Mines Research Institute, New Delhi, India, Feb 20-22, 1997.

(责任编辑 岳臣)