文章编号: 1672 - 9315(2008)02 - 0305 - 05

矿井密闭填充材料力学性能分析与稳定性预测

罗振敏[1,2],葛岭梅[1,2],邓 军[1,2],张嫱妮[1,2],杨永斌[1,2]

(1. 西安科技大学 能源学院,陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 教育部西部矿井开采及灾害防治重点实验室,陕西 西安 710054)

摘 要: 采用水凝胶密闭填充材料建造密闭墙是防止煤层自燃、有害气体扩散或者瓦斯爆炸的方法之一。通过一系列单向压缩试验,分析了吸水性单体、交联剂、促凝剂的含量等对水凝胶内填充材料力学性能的影响。并利用灰色 GM(1,1)预测模型对水凝胶密闭填充材料进行了持久稳定性分析。实验发现,随着单体与交联剂添加量的增加,水凝胶材料的弹性模量增大,强度提高,弹性减弱;而促凝剂含量的影响正好与之相反。同时水凝胶材料的应力 - 应变曲线出现了阶段性变化,且分界点的位置由材料本身的形变所决定,一般出现在纵向形变为 50%处;模型精度较好,亲水性单体浓度增大,水凝胶材料的持久稳定性也较好。

关键词: 密闭墙; 水凝胶; 力学性能; 稳定性

中图分类号: $712^{+}.54$ **文献标识码**: A

0 前 言

我国煤矿井下生产条件复杂,地质条件多变,在目前的 2.6万多处煤矿中,有 60% ~70%是在极复杂的构造条件下进行开采。随着开采深度的加大,经常受到水、火、瓦斯、煤尘、冒顶等灾害的威胁,安全形势非常严峻。

为了防止煤层自燃、有害气体扩散或者瓦斯爆炸而影响安全生产,常常建立密闭墙将易自燃区、有害气体源或瓦斯聚集区进行隔离。其中粉煤灰加高水凝胶充填材料密闭、聚氨酯泡沫塑料喷涂层密闭、泡沫树脂用作临时密闭、罗克休泡沫墙密闭、气囊式快速密闭、撑伞式密闭等几种密闭形式[1~6]属于轻质密闭。除此之外还有几种传统的密闭方式,如砖石密闭墙、沙石混凝土密闭墙、沙袋密闭墙等。上述密闭形式经现场应用取得了一定效果,但都有着自身的局限性。轻质密闭墙虽然能够迅速简便地隔绝危险区域,起到很好的密闭作用,但对于瓦斯爆炸产生的几千帕、甚至是几兆帕的冲击波作用基本无法抵抗。砖石或沙石混凝土密闭墙的厚度虽然达到一定值时可以抵抗爆炸冲击波的作用,但由于重量和数量都很大,运输困难,需要耗费大量的人力,且施工时间长。另外,砖石和沙石混凝土属于刚性材料,当顶板发生运动时,刚性墙体没有缓冲的能力,很容易造成密闭墙体的破坏。沙袋密闭墙具有一定的柔性,不会由于顶板的运动而破坏,能够较好地抵抗爆炸冲击波,但同样具有材料用量大,施工时间长等缺点。

由于目前采用的矿井密闭墙存在自身局限性,课题组正在研发一种新型矿用快速防爆密闭墙,它由防爆外袋和水凝胶内填充材料组成。采用防爆袋作为内填充水凝胶材料的成型设施,可根据巷道制成不同形状和型号。当井下出现火灾或瓦斯爆炸危险时,在需要密闭的地方快速放置防爆袋,随后操作人员在远距离向袋内充填水凝胶材料,当溶液进入袋内后,会在很短的时间内凝结成具有较好弹性和强度的固溶体,水凝胶材料和防爆袋作为一个整体,形成防爆密闭墙,用来封闭火区、抵抗爆炸冲击波的作用。

收稿日期: 2008 - 04 - 10

基金项目:陕西省科技攻关项目 (2007K08 - 05);新世纪人才支持计划 (NECT050874)

作者简介:罗振敏 (1976 -),女,陕西榆林人,在职博士,讲师,主要从事矿井瓦斯爆炸控制技术方面的研究工作.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 水凝胶密闭填充材料

采用双溶液混合法配置的水凝胶密闭填充材料,用作凝胶的原料无毒无害,主要是由吸水性单体、交联剂、促凝剂、引发剂等组成。其中吸水性单体为丙烯酰胺。将吸水性单体、交联剂、促凝剂配制成溶液A;而将引发剂配制成溶液B。之后2种溶液混合形成凝胶。

水凝胶密闭填充材料是一种弹性凝胶,呈半固体状,无流动性,具有三维网状结构。水凝胶材料90%以上都是水,并以结合水、束缚水、自由水3种形式存在。其中结合水与聚合物有着强烈的相互作用;束缚水与聚合物有微弱的相互作用;另外就是自由水。水凝胶的吸水作用主要是通过三维网络结构吸收大量的自由水储存在聚合物内而完成的。形成水凝胶的单体在结构上是轻度交联的空间网络结构,它是由化学交联和树脂分子链间的相互缠绕物理交联而构成的。胶凝之前,高分子长链相互缠绕在一起,彼此交联成网络结构,从而达到整体上的紧固程度。在受到外界力作用时,能够通过变形来吸收外部能量,同时又能保持本身结构的稳定性,能够起到吸收爆炸冲击波的能量,以缓冲、抵抗外力破坏的作用。

2 力学性能分析

制备的水凝胶密闭填充材料是一种弹性凝胶,呈半固体状,无流动性,具有三维网状结构,有一定的几何外形,并具有一定的强度、弹性和屈服值。凝胶网络的网链(交联结点间的大分子链)在外力作用下通过单键的内旋发生构象改变,沿作用力方向伸展,凝胶发生变形。这时网链构象熵减少,内能升高,产生了弹性能(内力);在外力解除后,网链借助这种弹性力回复原构象,凝胶变形消失[7]。水凝胶密闭填充材料通过形变来吸收爆炸冲击波能量,同时又能保持本身结构的稳定性,达到抵抗瓦斯爆炸的目的。

选用弹性比功 $W_e=\frac{\sigma_e^2}{2E}$,衡量材料对瓦斯爆炸冲击波的缓冲作用。对于矿井用防爆密闭墙,要增大材料的弹性比功,增强防爆密闭墙对瓦斯爆炸冲击波的缓冲作用,要从增大材料的应变率入手,即提高 σ_e,或降低 E。

水凝胶材料在受到外载作用而不发生破坏之前,产生的是弹性形变,所以弹性模量 $E=\frac{\sigma}{\varepsilon}$.

水凝胶材料在井下受到的主要是爆炸冲击波单向压缩的作用,实验主要采取单向压缩的形式。试样为高5 cm,直径5 cm的圆柱体。从吸水性单体、促凝剂和交联剂的含量3个方面,分析研究水凝胶密闭填充材料力学性能的变化规律(图1)。

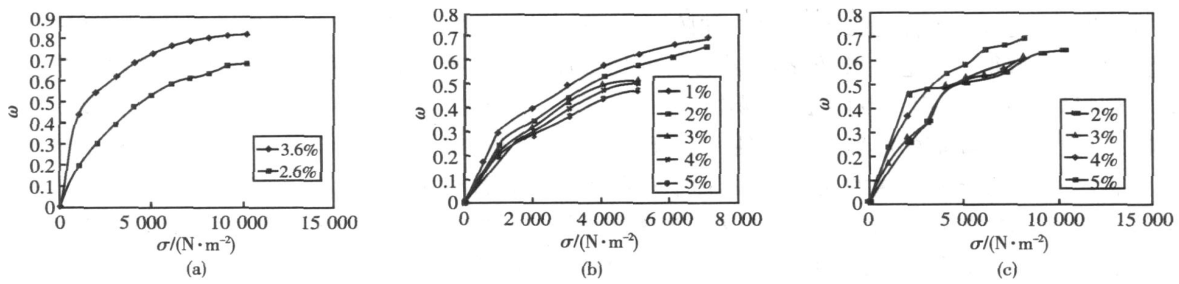


图1 水凝胶密闭填充材料 σ - ε变化规律曲线

Fig 1 Curve of σ - ε of seal-filling hydrogel material

(a) 不同单体浓度 (b) 不同交联剂浓度 (c) 不同促凝剂浓度

实验发现,随着施加荷载加大,试样形变量增大。随着丙烯酰胺单体添加量的增大,水凝胶材料的变形减小,强度增大。这主要是由于荷载量增大到一定值时,水凝胶的三维网络结构发生了显著变化,造成了材料力学性质的变化,从而使弹性模量发生了改变。在荷载的作用下,材料结构更加致密,材料内部产生的内能相应增大,出现了弹性模量增大,即强度增大,弹性减弱的现象。另外,单体浓度增加,材料三维网络结构中有效交联点的数目也增加,使结构更加致密,增大了水凝胶材料的拉伸难度,变形率下降。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

交联剂浓度加大,材料的刚性增大,弹性减弱;水凝胶材料的刚性率与交联密度成正比,$G = RT\frac{V}{V_0}$(式中 G为刚性率,$\frac{V_e}{V_0}$为交联密度)。随着交联剂浓度增大,交联点增多,交联密度增大,刚性率也增大,相应材料的弹性下降,促使了材料的刚性增大。

促凝剂含量增加,水凝胶材料的变形率加大,强度减小,弹性增加。这是由于促凝剂在材料胶凝过程中能使具有网络结构的大分子碳链更快地伸展开,从而使碳链上的吸水性官能团充分吸收水分;促凝剂含量增大,减少了水凝胶内部分子链的缠绕卷曲现象,从而使得空间位阻降低,施加荷载引起的水凝胶材料的内能减小,形变率增大。

另外,从图 1可以看出,水凝胶密闭填充材料的应力 - 应变曲线出现两段斜率不同的直线段,也就是说材料的弹性模量出现阶段性的变化,不是一个定值,且分界点的位置由材料本身的形变所决定,一般出现在纵向形变为 50%的点处,分界点所对应的水凝胶材料的变形率基本相等。

3　持久稳定性预测

采用灰色 GM(1, 1)模型对水凝胶密闭填充材料进行持久稳定性的灰色预测。

水凝胶(试样 1, 2)高度随时间的减小值见表 1。

表 1　水凝胶高度随时间的减小值

Tab. 1　The decreases of hydrogel in height with time (sample 1, 2)　　cm

时间/d	1	3	5	7	9
试样 1高度	7. 65	7. 55	7. 40	7. 32	7. 25
高度减少量 ΔH_1		0. 10	0. 25	0. 33	0. 40
试样 2高度	7. 50	7. 50	7. 35	7. 33	7. 30
高度减少量 ΔH_2		0. 00	0. 15	0. 17	0. 20

设试样 1的一系列减小值为原始数据 $x^0(k) = \{0.1,\ 0.25,\ 0.33,\ 0.4\}$,对实验得到的原始脱水率数据进行 1 - AGO处理,得到生成数据 $x^1(k) = \{0, 1,\ 0.35,\ 0.58,\ 1.08\}$.构建向量 X和矩阵 B

$$X = \{0.25,\ 0.33\ \ 0.4\}^{\mathrm{T}},$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(x^1(1) + x^1(2)) & 1 \\ -\frac{1}{2}(x^1(2) + x^1(3)) & 1 \\ -\frac{1}{2}(x^1(3) + x^1(4)) & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.225 & 1 \\ -0.525 & 1 \\ -0.880 & 1 \end{bmatrix}.$$

表 2　生成数据及其预测值

Tab. 2　The final date and its prediction number

k	0	1	2	3
$x^{(1)}(k+1)$	0. 10	0. 35	0. 68	1. 08
$\hat{x}^{(1)}(k+1)$	0. 10	0. 35	0. 67	1. 07

得 GM(1, 1)的灰色参数 $a = -0.228,\ b = 0.202\ 8$.建立灰色预测模型 $\hat{x}^{(1)}(k+1) = 0.989\ 474\exp(0.228k) - 0.889\ 474$.由此得出生成数据的预测值(表 2)。

使用关联度方法对所建模型进行检验。即原始数据列为 $x_0^0(1), x_0^0(2), \cdots, x_0^0(n)$,第 i个模型标出的模型指数列为 $\hat{x}_i^0(1), \hat{x}_i^0(2), \cdots, \hat{x}_i^0(n),\ i = 1, 2, \cdots, m$[8]。关联系数计算式为[9]

$$\xi(k) = \frac{\min\limits_i \min\limits_k |x_0^0(k) - \hat{x}_i^0(k)| + 0.5 \max\limits_i \max\limits_k |x_0^0(k) - \hat{x}_i^0(k)|}{|x_0^0(k) - \hat{x}_i^0(k)| + 0.5 \max\limits_i \max\limits_k |x_0^0(k) - \hat{x}_i^0(k)|},$$

关联度

$$r = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} \xi_i(k).$$

对于试样 1,选用一次模型,即 $i = 1$时的模型,也就是根据灰色预测模型得到的结果,经过计算 $r_i \approx 1$, 证明模型精度较好。

同样的做法,可以得到试样 2的预测模型,并对 1, 2试样 1个月的高度减小值进行了预测,结果见表 3。

表 3　试样 1, 2高度减小值的预测结果

Tab. 3　Prediction result of the decrease in height of sample 1and 2　　cm

时间/d	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29
ΔH_1	0. 25	0. 32	0. 40	0. 50	0. 63	0. 79	1. 00	1. 25	1. 57	1. 97	2. 48	3. 11	3. 91	4. 91	6. 17
ΔH_2	0. 15	0. 17	0. 20	0. 23	0. 27	0. 31	0. 36	0. 41	0. 48	0. 55	0. 64	0. 74	0. 85	0. 98	1. 14

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

试样 2在一个月的时间内高度减少了 1. 14 cm,持久稳定性好于试样 1。这是由于亲水性单体的浓度增大,合成的高聚物的数量也相应增加,交联后形成的三维网络结构更加紧凑,同时亲水性官能团由于亲水性单体的增加而增多,使得吸收的水更加牢靠地存在于结构当中,保水性能改善。

4 结 论

1) 目前矿井普遍采用的密闭墙存在自身局限性。轻质密闭基本无法抵抗瓦斯爆炸冲击波的作用,传统密闭需要耗费大量的人力、物力,且施工时间太长。文中提出了一种新型矿用快速胶体防爆密闭墙,它由防爆外袋和水凝胶内填充材料组成。

2) 水凝胶密闭填充材料的变形率与单体添加量、交联剂浓度、促凝剂含量有关。随着单体与交联剂添加量增大,水凝胶内填充材料的弹性模量增大,强度增大,弹性减弱;而促凝剂含量的影响正好与之相反。另外,水凝胶材料的应力 - 应变曲线出现了阶段性变化,且分界点的位置由材料本身的形变所决定,一般出现在纵向形变为 50%的点处。

3) 通过灰色预测方法建立的水凝胶密闭填充材料持久稳定性的预测模型经过关联度的检验和实验发现,较为准确,能够较好地预测材料的持久稳定性。

参考文献 References

[1] 朱晓明. 晋城矿区井下综合利用粉煤灰的研究与探索[J]. 粉煤灰, 2003, (1): 28 - 30.
ZHU Xiao-ming. Study and discuss on fly ash comprehensive utilization in Jincheng mine[J]. Fly Ash, 2003, (1): 28 - 30.

[2] 陈文彬,邱 雁. 快速密闭在防止漏风恢复生产中的应用[J]. 煤矿安全, 1996, (4): 22 - 23.
CHEN Wen-bin, QIU Yan. Application of rapid sealing in avoiding wind leakage to resume produce[J]. Mine Safety, 1996, (4): 22 - 23.

[3] 金龙哲,靳瑞英,蒋仲安. 矿井安全作业采用的填充密闭材料 ——泡沫树脂及其应用技术[J]. 中国安全科学学报, 1998, 8(5): 32 - 36.
JIN Long-zhe, JIN Rui-ying, JIANG Zhong-an. Application of seal-filling material in mine safety foaming resin and its application technology[J]. Journal of China Safety Science, 1998, 8(5): 32 - 36.

[4] 邱春亮,张雪涛. 罗克休泡沫产品在济宁二号煤矿中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2003, 31(6): 59 - 60.
QIU Chun-liang, ZHANG Xue-tao. Technology of Lukexin foam product applied in Jining No. 2 mine[J]. Coal Science and Technology, 2003, 31(6): 59 - 60.

[5] 郭福君,冯述虎. 气囊式快速密闭[J]. 煤矿安全, 1998, (3): 45 - 47.
GUO Fu-jun, FENG Shu-hu. Bag-type rapid sealing[J]. Mine Safety, 1998, (3): 45 - 47.

[6] 王国超,戴小平,邓国红,等. 降落伞充气式耐高温快速密闭的研究[J]. 矿业安全与环保, 2000, 27(6): 5 - 6.
WANG Guo-chao, DAI Xiao-ping, DENG Guo-hong, et al. Research on high temperature resistance and rapid sealing of inflation-parachute[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2000, 27(6): 5 - 6.

[7] 刘双成. 堵水调剖类水基凝胶力学性能研究[J]. 油田化学, 1995, 12(4): 332 - 333.
LIU Shuang-cheng. Mechanical properties of polymer hydrogels for water plugging and profile modification[J]. Oilfield Chemistry, 1995, 12(4): 332 - 333.

[8] 徐志胜. 火灾后钢筋混凝土损伤程度的灰关联分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2003, 23(3): 37 - 40.
XU Zhi-sheng. Analysis for damage degree of reinforced concrete after firing based on grey degree of incidence[J]. Journal of Seismology, 2003, 23(3): 37 - 40.

[9] 韩 生. 灰色模型的优化方法及其在水文预报中的应用[J]. 长春地质学院学报, 1994, 24(4): 429 - 434.
HAN Sheng. The optimization method grey model and its application in groundwater prediction[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 1994, 24(4): 429 - 434.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Mechanical analysis and stability prediction of seal-filling hydrogel material for hermetic wall in coalmine

LUO Zhen-min[1,2], GE Ling-mei[1,2], DENG Jun[1,2], ZHANG Yan-ni[1,2], YANG Yong-bin[1,2]

(1. School of Energy, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Western Mine Exploitation and Hazard Prevention of the Ministry of Education, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Hydrogel material to build hermetic wall is one of seal-filling forms. Effects of monomer, crosslinker, and accelerator content on mechanical of seal-filling hydrogel were analyzed by the series of single-direction compression experiments. And grey predication by GM(1, 1) model is used to analyze the stability property of hydrogel material. The results show that the bigger elastic modulus and strength of seal-filling hydrogele is, the smaller elastic is, and the higher the monomer and crosslinker content is. In comparison with them, the effect of the accelerator content is diametrically opposed. At the same time staggered change of elastic modulus was come forth, its demarcation points generally appeared at the value of 50% of vertical deformation. The accuracy of the grey prediction model can be proved. And the concentration of the absorbing-water monomer of hydrogel material increases.

Key words: hermetic wall; hydrogels; mechanical property; stability

* **Biography:** LUO Zhen-min, Lecturer, Xi'an 710054, P. R. China, Tel: 0086 - 29 - 85583143, E-mail: luozm9903@163.com

(上接第 304页)

Forecasting of gas emissions based on MGM(1, N) model

XIAO Peng[1,2], LI Shu-gang[1,2], ZHANG Jin[1,2]

(1. School of Energy, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Western Mine Exploitation and Hazard Prevention of the Ministry of Education, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Forecasting the gas emissions is most important part for the ventilation planning and safety management of newly-built coal mine or expanded coal mine and for drafting reasonable gas counter-measures. Increasing research on forecast method of gas emissions, and precisely predicting gas emissions are of great importance for improving the situation of safety and production of coalmine in China. The gas emissions are affected by other factors that influence each other when forecast it. A new forecast method MGM(1, N) is put forward model. The parameters of the forecast model reflect the variable and influence each other. MGM(1, N) can consider synthetically each effect factor and show the exactitude and efficiency of the method through setting up the multivariate forecast model.

Key words: MGM(1, N) model; gas emissions; forecast method

*Biography: XIAO Peng, Assistant Engineer, Xi'an 710054, P. R. China, Tel: 0086 - 13002960395, E-mail: xiaopeng@xust.edu.cn

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net