

全煤巷支护全过程损伤机理数值模拟研究

付永刚^{1,2}, 孟 达³, 季文博¹

(1. 中国矿业大学(北京), 北京 100083; 2. 河北冀中能源金牛股份有限公司, 河北 邢台 054000;

3. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要: 文章通过对全煤巷被动—主动支护机理的损伤分析, 得到岩锚柱单元对裂隙岩体刚度矩阵的“贡献”, 确定全煤巷支护复合岩体的损伤本构关系; 采用有限元软件进行数值计算, 建立损伤模型, 对全煤巷支护之前和支护之后的应力、应变及损伤演化进行分析, 得到锚固定量参数, 为此类巷道的支护提供有效的方法和可靠的依据。

关键词: 锚固损伤模型; 数值模拟; 损伤值; 损伤演化; 锚固参数

中图分类号: TD350.1 **文献标识码:** B **文章编号:** 1671 - 0959(2008)12-0064-03

损伤力学在采煤工艺中的应用是最近十年才兴起的。特别是特厚煤层综放开采在工作面的推进过程中, 顶煤、顶板等围岩在压力的作用下其内部裂纹不断产生、扩展、汇合, 直至整体破坏、垮落, 也就是说, 顶板的运移、垮落过程也是其在压力作用下的损伤过程。从宏观来讲, 煤体是强度较低的一种岩体, 具有岩体的宏观表象和微观特征, 用损伤力学理论来分析顶煤顶板的运移和垮落过程, 分析巷道开挖、破坏到维护、稳定的过程是可行的。这方面的研究也取得了许多成果。

1 损伤原理

损伤的宏观力学效果表现为损伤体的柔度发生变化, 以下的内容都是在选择上述第二类损伤定义的框架下, 从固体力学中的自洽理论、应变能等效原理出发推导多重裂纹体的等效弹性—损伤柔度张量, 用以定义裂隙岩体的损伤张量。如图 1 所示, 节理裂纹扩展会引起岩体产生不可逆损伤变形。在载荷完全卸除后, 岩体中的残余变形除塑性变形外, 还包括损伤和断裂引起的不可逆变形, 并且在变形过程中岩体的弹性性质产生了“劣化”($E < E_0$), 这就是岩体的弹塑性损伤变形。

节理煤岩体弹塑性损伤变形与有效应力示意图见图 1。

2 无支护开挖模拟

2.1 开挖过程模拟

巷道的开挖过程可作如下模拟: 先就开挖前的煤体单独加重力, 计算其初始应力, 在洞室形成之后, 在洞室周边的有限单元结点上逐步施加相反的荷载, 以计算开挖对煤体的影响。当考虑煤岩材料的非线性时, 这种方法就有它的局限性, 由于煤岩拉、压性质不一致及煤岩材料的非

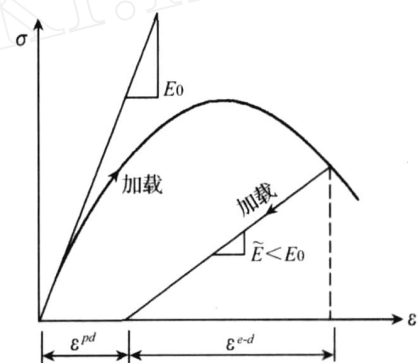


图 1 裂隙岩体弹塑性损伤变形

线性特性, 因而不能采用这种叠加的方法。对此, 本文用如下方法处理: 利用洞室形成之后的单元网格划分, 首先施加土体自重及与自重应力对应的洞室周边分布力进行计算, 得到洞室开挖前的初始应力, 然后再利用单元生死技术, 生成衬砌单元, 再逐步把上述的洞室周边分布力释放至零。

计算模型中的煤岩力学参数见表 1。

2.2 模拟结果分析

1) 应力场特征。从开挖不支护情况下巷道模拟图(图 2、图 3)来看, 第一主应力中最大拉应力为 0.25MPa, 最大压应力为 -4.7MPa, 最大拉应力主要存在于巷道底部中央及拱顶上部, 最大压应力主要存在于两边墙中部及底角处; 最大压应力为 -4.4MPa, 最大压应力主要存在于两边墙中部及底角处, 拉应力主要集中在巷道底部和拱顶上部; 最大拉应力主要存在于巷道底部中央及拱顶, 其值为 0.6MPa, 最大压应力主要存在于两边墙中部及底角处其值为 -4.3MPa, 最大拉应力主要集中在巷道底部和巷道顶部

收稿日期: 2008 - 08 - 08

基金项目介: 国家自然科学基金项目(10672167)

作者简介: 付永刚(1972 -), 男, 黑龙江阿城人, 博士, 高级工程师, 主要从事采矿工程、煤炭安全等专业工作。

中央向上延伸；从应力来看，巷道周围应力比较大，发生应力集中。

2) 损伤特征。洞室开挖过程中，洞室周边浅部围岩中出现了厚度不等的损伤破坏区（图 4），比较而言，以拱顶部位和底板和墙角处损伤破坏较为严重，损伤因子最大达

到 0.86。这些部位常常也是最大、最小主应力集中区。从拉损伤图中可以看出，只有底板发生比较大的损伤，但从压损伤看，巷道周围已经发生比较大的损伤。主要因为在拱顶和底板都是以张拉性破坏为主，而在两边中部和两边墙角都以剪切性破坏为主。

表 1 计算模型中的煤岩力学参数表

内容名称	煤岩名称	容重 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	体积模量 /MPa	剪切模量 /MPa	泊松比	抗拉强度 /MPa	抗压强度 /MPa	内摩擦角 / $(^\circ)$	粘结力 /MPa
老底岩	粗砂岩	2600	9260	4900	0.295	4	40	45	
直接底	粉砂岩	2000	3500	1170	0.35	1	10	33	0.4
煤层	煤	1400	1444	482	0.4	0.5	5	29	0.2
直接顶	细砂岩	2100	3500	1170	0.35	1	10	31	0.4
老顶	中粗砂岩	2400	4133	1923	0.3	6	60	39	0.6

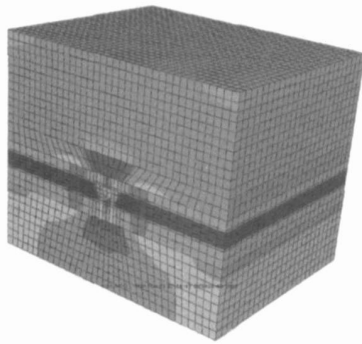


图 2 无支护巷道最大主应力云图

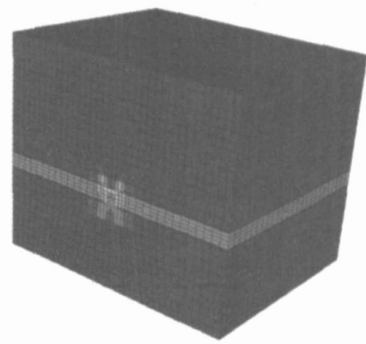


图 4 无支护巷道压损伤云图

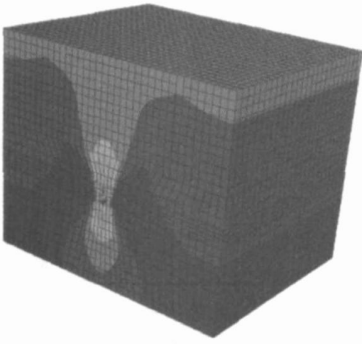


图 3 无支护巷道最小主应力云图

从这几张损伤趋势表来看，巷道越往外损伤越小，其中拱顶处的损伤最大，不过随着距离的增大，下降的也比较快，在距离拱顶 10m 左右，损伤已经非常小了，从横向损伤趋势看，损伤在边墙最大达到 0.69，在距离巷道 4m 内，呈现明显下降的趋势，到了 4m 后，损伤逐渐稳定在 0.2 左右，与没有开挖时煤岩损伤值相同，在横向上，4m 外不受开挖影响。

3 锚固结构数值模拟

模型力学参数选择：因为锚杆主要是受压构件，所以

采用梁单元，锚索主要受拉，采用桁架单元，材料采用钢材，锚索、锚杆单元用“植入”的方式嵌入在基岩中，与基岩形成空间损伤岩锚柱单元模型。支护形式模拟见图 5。

1) 应力场特征。巷道开挖实施锚网索耦合支护后巷道应力分布如图 6、7 所示，应力集中产生在巷道顶板中间靠左两侧部位，此处即为锚索耦合支护的关键部位。从采掘支护情况下巷道模拟图来看，第一主应力中最大拉应力为 0.2MPa，最大压应力为 -4.5MPa，最大拉应力主要存在于巷道底部中央及拱顶上部，最大压应力主要存在于两边墙中部及底角处；最大拉应力主要集中在巷道底部和巷道顶部中央向上延伸；最小压应力在巷道周围，最大的是向外延伸的部分。

2) 损伤特征。从图 8 损伤云图可知，巷道越往外损伤越小，其中拱顶处的损伤最大，不过随着距离的增大，下降的也比较快，在距离拱顶 10m 左右，损伤已经非常小了，从横向损伤趋势看，损伤在边墙最大达到 0.42，在距离巷道 4m 内，呈现明显下降的趋势，到了 4m 后，损伤逐渐稳定在 0.2 左右，与没有开挖时煤岩损伤值相同，说明在横向上，4m 外基本不受开挖影响。总体来说支护的损伤比无支护情况下的损伤区域要大大减小，损伤程度也减小比较大。

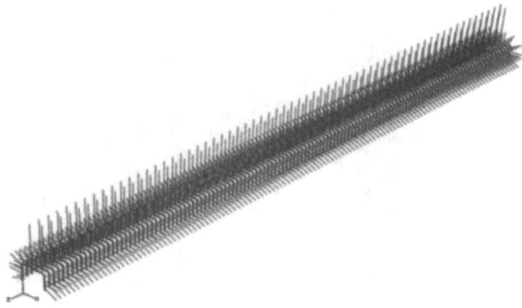


图5 支护模拟示意图

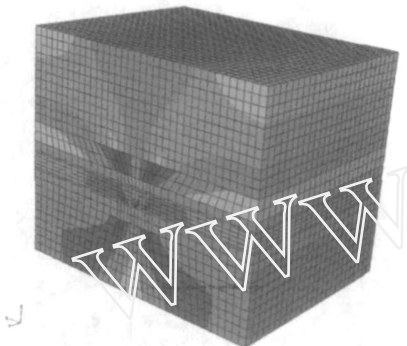


图6 锚固巷道第一主应力云图

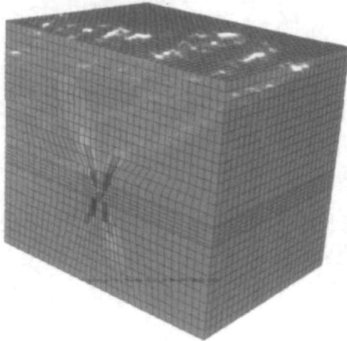


图7 锚固巷道XZ向剪应力云图

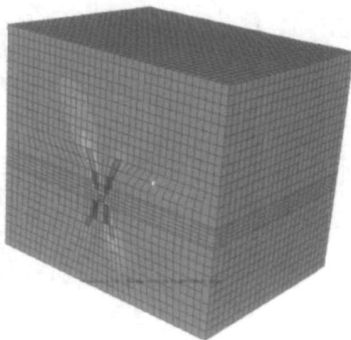


图8 锚固巷道压损伤云图

4 结论

1) 从应力图(图6、图7)可以看出,当煤岩层开挖加锚喷网支护后,应力集中区域为巷道两帮和拱顶处,在距离巷道3倍跨宽外岩层体内应力并无显著变化。此时锚杆的支护能力已得到充分发挥。

2) 用有限元较好地模拟了煤巷支护在工作状态下,整体结构体系的连续损伤应力、应变变化和演化规律,验证了解析解的准确性。

3) 对于符合锚固体系简化得到的强度、刚度和稳定性问题,还应该采用相似模拟或数值模拟进行验证,不能只用一种计算做出定论,因为岩体、煤体地质情况非常复杂,而且目前的勘探手段和技术有限,不能完全得到准确的岩体节理、断层、褶皱等构造运动所产生的中小构造,同时也要结合现场地质、物探的原位测试资料和原有的各种支护设计参数。

参考文献:

- [1] 康红普. 高强度锚杆支护技术的发展与应用 [J]. 煤炭科学技术, 2000, 28(2): 1~4.
- [2] 康红普. 煤巷锚杆支护动态信息设计法及其应用 [J]. 煤矿开采, 2002, (1): 5~8.
- [3] 康红普. 回采巷道锚杆支护影响因素的 FLAC 分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 534~537.
- [4] 何满潮, 孙晓明. 国煤矿软岩巷道工程支护设计与施工指南 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [5] 何满潮, 高尔新. 软岩巷道耦合支护力学原理及其应用 [J]. 水文地质与工程地质, 1998, 2(2): 1~4.
- [6] 张农, 高明仕. 煤巷高强预应力锚杆支护技术与应用 [J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(5): 524~527.
- [7] Greb S. F., Cobb J. C. Geologic classification and modeling of potential roof control problems in underground coal mines [A]. In: Proceedings of Multinational Conference on Mine Planning and Design, 1989: 27~32.
- [8] Hoek, E, et al Rock slopes in civil and mining engineering [C]. An International Conference on Geotechnical & Geological Engineering, Australia, 2000, 11.
- [9] Cai & Hudson et al, Computerization of rock engineering system using neural networks with an expert system [J]. Rock Mech. & Rock Eng. 1998, 31(3): 135~152.
- [10] 高杰, 刘玉元, 张京泉. 高强锚杆在深部煤矿巷道支护中的应用 [J]. 探矿工程, 2006, (1): 55~58.
- [11] 陈忠辉, 林忠明, 谢和平, 王红卫. 三维应力状态下岩石损伤破坏的围压效应 [J]. 煤炭学报, 2004, 29(1): 31~35.
- [12] 杨振茂, 马念杰, 孔恒等. 以地应力为基础的锚杆支护设计方法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 203~206.

(责任编辑 潘启新)