

国家自然科学基金重点项目“矿山顶板灾害预警(51234005)”资助

矿山顶板灾害预警研究论文集

KUANGSHAN DINGBAN ZAIHAI YUJING YANJIU LUNWENJI

何富连 马念杰 张守宝 主编



冶金工业出版社

www.cnmp.com.cn

矿 山 顶 板 灾 害 预 警 研 究 论 文 集

何富连 马念杰 张守宝 主编

北 京
冶 金 工 业 出 版 社

2016

内 容 提 要

本书内容是受国家自然科学基金重点项目“矿山顶板灾害预警(编号51234005)”资助召开的矿山顶板灾害全国性学术会议的文集。论文集内容涉及以下五个方面:(1)矿山顶板灾害活动特征及其力学机制;(2)矿山顶板大面积破断失稳致灾机理及预警响应;(3)矿山顶板岩体局部破碎失稳的灾变与预警理论;(4)矿山顶板灾害风险程度分区量化评估;(5)矿山顶板灾害的预警系统。

本书可供煤矿开采及相关行业生产、科研、设计人员阅读,也可供高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

矿山顶板灾害预警研究论文集/何富连,马念杰,张守宝
主编. —北京:冶金工业出版社,2016.7

ISBN 978-7-5024-7302-0

I. ①矿… II. ①何… ②马… ③张… III. ①矿山—
顶板—灾害—预警系统—文集 IV. ①TD322-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016) 第 154674 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷39号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcbbs@cnmp.com.cn

责任编辑 杨秋奎 美术编辑 杨帆 版式设计 孙跃红

责任校对 石静 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7302-0

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2016年7月第1版,2016年7月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16;12印张;279千字;183页

45.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街46号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

煤炭开采在我国已有几千年的历史。目前我国仍然是世界上第一大产煤国和消费国。煤炭开采面临着五大灾害，其中顶板灾害连续多年位居矿山灾害发生数量和致死人数的首位。煤层赋存条件的复杂多变、顶板岩性和分层厚度不尽相同，因此顶板灾害发生的条件和位置也存在极大差异，研究矿山顶板灾害发生的环境特征、致灾机理、灾变条件、预警指标和预警系统等工作成为解决矿山顶板灾害的必经之路。

近年来，许多煤矿科技工作者致力于从事矿山顶板灾害的研究，从矿山顶板发生的机理、预警方法等方面开展了矿山顶板灾害程度、矿山矿压规律的监测与分析、矿山巷道围岩控制方法与策略以及矿山顶板灾害治理的研究。本次全国性学术会议的目的是通过会议搭建一个在矿山顶板灾害的研究结论分享与讨论的平台，会议的内容主要是偏向于矿山岩石与岩体力学、矿山压力与岩层控制、矿山采场与巷道围岩控制以及顶板灾害预警等方面的理论与实践。以期通过会议讨论活跃本专业领域内的学术交流，提高矿山顶板灾害研究的水平，为推动我国矿山顶板灾害研究贡献力量。

本次会议经过筛选和评审，共收录相关科技论文 34 篇，内容涉及矿山岩石力学、矿山顶板运移规律、顶板灾害发生机理、巷道围岩控制技术、矿山顶板灾害预警系统等方面，基本覆盖了矿山顶板灾害的各个方面的研究，反映了国内各个单位在矿山顶板灾害研究方向的新进展。

论文集的出版得到了国家自然科学基金重点项目“矿山顶板灾害预警（编号 51234005）”的资助。在会议组织过程中还受到中国矿业大学（北京）资源与安全工程学院院长王家臣教授等专家的亲切指导；会议组织秘书处张拥军、谢生荣、刘洪涛、赵志强等做了许多具体的工作，在此一并表示感谢。

编 者

2016 年 6 月

目 录

缝合线对石灰岩变形强度的影响	
..... 鲁建涛, 徐涛, 杨天鸿, 于庆磊, 周广磊, 陈崇枫	1
过断层掘进诱发煤岩破坏过程	7
..... 倪俊蓉, 韩正林, 谭志宏	
基于构造逐级控制理论的新立矿瓦斯赋存特征	12
..... 尚林伟, 温云兰, 孙辉, 何森	
浅埋煤层顶板切落压架的断裂力学分析	
..... 杨登峰, 陈忠辉, 张拥军, 席婧仪, 洪钦锋, 张闪闪	17
浅埋煤层开采顶板切落压架灾害的突变分析	
..... 杨登峰, 陈忠辉, 张拥军, 席婧仪, 洪钦锋, 张闪闪	23
基于断裂力学的特厚煤层综放开采顶板破断规律研究	
..... 杨登峰, 陈忠辉, 张拥军, 张凌凡, 柴茂, 李博	29
基于 Rayleigh-Ritz 法的房柱式采空区煤柱稳定性研究	35
..... 高峰, 卫文彬	
高瓦斯矿井综采面顶板“三带”分布数值模拟研究	40
..... 高升	
大跨度切眼复式锚索桁架支护技术研究	44
..... 董伟, 赵志志, 何维胜, 贾川	
色连一号矿综采首采面矿压显现规律研究	50
..... 王爱午, 王继树	
综放厚煤顶回采巷道围岩支护优化研究与应用	
..... 李秀华, 毛建新, 任启刚, 卞平均	57
特厚煤层临近采空区巷道围岩控制技术	63
..... 赵勇强	
王家岭矿综放大断面沿空掘巷煤柱合理宽度研究	68
..... 李安静	
厚硬直接顶沿空留巷关键块结构优化控制研究	73
..... 刘少沛	
大断面端头悬顶支护技术研究	79
..... 何富连, 许华威	
基于单片机的煤矿巷道支护体结构受力远程监测系统设计及研究	
..... 施伟, 李政, 肖鹏	84
回采巷道冒顶高度综合预测方法与工程应用	89
..... 贾后省, 连小勇	
基于 ANSYS 的玻璃钢锚杆偏心载荷分析	94
..... 江魏, 李英明	
近距离煤层开采“两带”发育高度研究	99
..... 许海涛, 康庆涛	
煤巷顶板锚固体稳定性智能识别及工程应用	103
..... 付孟雄, 张祥	
大倾角仰采煤壁片帮机理及防治技术	110
..... 李英明, 徐先胜	
松软煤岩体锚固孔孔底扩孔力学特征分析	115
..... 程利兴, 李国盛	

综采回撤通道支护技术研究	石建军, 刘加旺	122
综放工作面过陷落柱综合技术研究	师皓宇, 田多	126
深井软岩巷道锚网、U形钢与混凝土浇筑联合支护技术及应用	陈锋, 李英伟	131
煤层冲刷带开采工艺研究与实践	黄瑜, 王志刚, 王志坤	137
大断面切眼支护设计优化及效果分析	徐文斐	142
三软煤层沿空掘巷煤柱宽度的确定及支护设计	杨绿刚, 杨洪增	148
具有水平双向恒阻功能的新型锚索桁架研究	张洪旭	154
二次采动影响巷道的锚索桁架支护研究	王学海	159
端面顶板冒落高度影响因素的分析研究	王宇, 孙波, 解丰华, 朱孟楠	164
大断面煤巷采动影响变形与控制研究	杨长德, 李金波	168
近距离下层煤综采面顶板稳定性与加固技术	李政, 解广瑞, 孟祥超, 彭潇	173
近距离采空区下回采巷道位置研究	刘东升, 段继荣, 马强, 沙吾拉提·叶尔扎曼, 齐正	178

缝合线对石灰岩变形强度的影响

鲁建涛, 徐涛, 杨天鸿, 于庆磊, 周广磊, 陈崇枫

(东北大学岩石破裂与失稳研究中心, 辽宁沈阳 110819)

摘要: 缝合线是沉积岩中一种显著的粒间局部压溶形成的地质构造。本文获取了含复杂几何形态的缝合线石灰岩样品, 并获得 CAD 与离散元软件 (PFC^{2D}) 相互耦合的数字模型, 对石灰岩样品开展了一系列的单轴压缩试验, 通过离散元数值软件对不同倾角的数字模型模拟实验研究缝合线对石灰岩破坏过程中变形强度的影响以及岩样变形破裂过程中声发射的演变过程和裂纹贯通过程。实验结果和数值模拟结果一致。研究表明石灰岩中缝合线显著降低了石灰岩的强度; 水平缝合线石灰岩模型变形强度比其他角度模型高, 其破坏模式与完整模型的破坏模式相似; 倾斜近 60° 的缝合线石灰岩模型强度最低, 其破裂面沿缝合面滑动。

关键词: 缝合线; 声发射; 变形强度; 耦合

0 引言

缝合线是沉积岩中常见的一种由压溶作用形成的锯齿状裂缝构造。在沿裂缝破裂面上, 它呈现为参差不平凹凸起伏的面, 即缝合面; 从立体上看, 这些凹下或凸起的大小不等的柱体, 称为缝合柱^[1,2]。煤层开采造成的岩体失稳和工程破坏对工程安全至关重要。岩体中裂隙、节理、结构面等显著影响岩石的力学性能。缝合线作为石灰岩中一种特殊的地质构造, 其几何分布特征对石灰岩的力学性能具有显著的影响。为了保证地下工程安全生产及工程岩体的稳定, 研究缝合线对石灰岩变形强度的影响尤为重要。

压溶作用使缝合线具有复杂的多尺度粗糙度特征。多数学者采用分形理论来描述缝合线的复杂几何形态和定性的研究其粗糙度程度^[3~8], 近期研究表明缝合线具有不变的切割尺度^[9,10], 可预测成岩过程中的构造应力; 压溶作用造成缝合面含有

方解石、氧化铁、黏土等众多不溶物残渣^[11], 改变了岩石孔隙率, 对岩石的渗透性能和吸附作用有显著影响^[12,13], 众多研究表明, 缝合线对油气的生排运储有积极作用^[14~17]; 同时, 压溶过程物质溶解岩层下移, 可用来估测岩层收缩应变和位移量^[18]。目前针对缝合线对灰岩力学特性影响的研究工作开展较少。基于此, 本文基于室内物理实验结果, 通过 CAD 与 PFC 耦合数值模拟探究缝合线的几何分布特征对岩石变形强度影响及不同倾角情况下岩石强度各向异性现象。

1 数值模拟软件

1.1 离散元 PFC 基本原理

颗粒流 PFC^{2D} 软件属于不连续介质力学的一种方法^[19], 在 PFC 模型中, 颗粒被认为是刚性体, 颗粒间的接触方式和力学特征符合基本的牛顿运动定律。在计算模型中, 通过墙体单元施加速度边界条件, 模拟加载。加载模型如图 1 所示。PFC 在计

算中循环中交替运用牛顿第二定律与力-位移定律, 来获取系统的宏观力学响应。

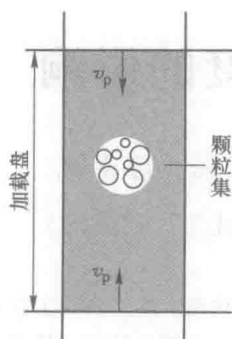


图1 颗粒流加载模型

1.2 CAD 与离散元 PFC 耦合

鉴于 PFC 不能直接建立复杂模型的缺点, 利用 CAD 构造复杂模型的优势, 将 PFC 与 CAD 耦合^[20], 将 PFC 建立的模型信息导入到 CAD 中, 利用 CAD 中的 polyline 多段线表示边界, 重新生成 PFC 命令流, 在 PFC 中识别不同分组材料, 赋值不同的细观属性, 区分原岩材料和缝合线材料。伺服控制使模型达到基本的应力平衡状态, 然后加载计算, 监测裂纹演变和声发射演变信息。CAD 与 PFC 耦合流程见图 2。

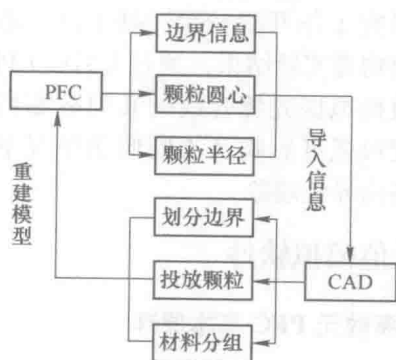


图2 PFC 与 CAD 耦合流程

2 数值模型

2.1 模型建立

室内物理实验样品采自法国南部地下

研究工作室 (ANDRA) 附近比尔煤矿地下 159m 的牛津段石灰岩, 分别从石灰岩中钻取不含缝合线的完整岩样及含不同倾斜角度 (0° , 63° 和 90°) 缝合线的岩样, 岩样直径 20mm, 高度为 40mm, 试验详细结果参见文献 [21]。采用 PFC^{2D} 程序计算, 建立模型尺寸与实验室样品尺寸一致, 模型尺寸为 20mm × 40mm, 默认设置颗粒厚度为一个单位长度, 经过伺服膨胀法共得到颗粒数目 2897 个, 模型细观参数见表 1。经过 CAD 处理后将颗粒重新导入到 PFC 中, 获得分组后的数值模拟模型见图 3。

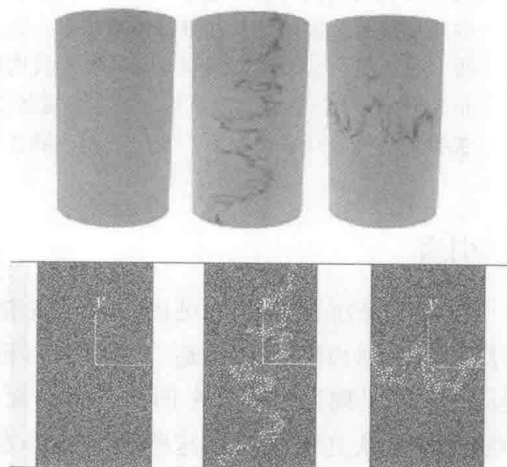


图3 实验样品和数值模拟模型

在标定细观参数时, 采用了一系列的单轴压缩试验, 最终标定参数见表 1。物理试验中岩石全应力应变曲线的初始弯曲阶段 (对应于初始裂纹闭合、压头与试样的接触调整等) 在数值模拟中还不能很好地展示 (图 4), 采用文献 [22] 初始段平移的方法来消除其影响。图 5 是完整岩石实验和数值模拟的应力应变曲线及声发射演变过程和破坏模式。分析结果可以得到岩石的单轴抗压强度是 46.95MPa, 弹性模量为 17.40GPa, 实验室中得到的单轴抗压强度是 45.31MPa, 弹性模量是 17.26GPa, 实验和数值模拟一致性较好。加载初期, 在

岩石内部出现声发射事件,表明岩石内部裂纹开始萌生,加载中期,岩石内部各处都有声发射事件出现,但能量较大的事件主要出现在内部,表明裂纹的发展主要在

岩石内部,最后岩石内部出现大量能级高的声发射事件,裂纹破坏并且贯通,直至整个岩石破坏。力链图和裂纹模式图也表明完整岩石以内部劈裂破坏为主。

表 1 颗粒和缝合线的细观材料参数

材 料	细 观 参 数	数 值
颗粒/Grain	颗粒半径比值 $R_{\max}/R_{\min}$	1.66
	颗粒密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	2660
	颗粒接触模量 E_c/GPa	12.0
	k_n/k_s	1.0
	颗粒摩擦系数	0.5
	法向接触强度均值(方差)/N	30e6 (15e6)
	切向接触强度均值(方差)/N	75e6 (20e6)
	平行黏结接触刚度/GPa	12.0
	颗粒最小半径	0.02
缝合线/Stylolite	刚度 k_n	9.6e9
	k_n/k_s	1.0
	颗粒摩擦系数	0.5
	法向接触强度/N	24e6
	切向接触强度/N	60e6

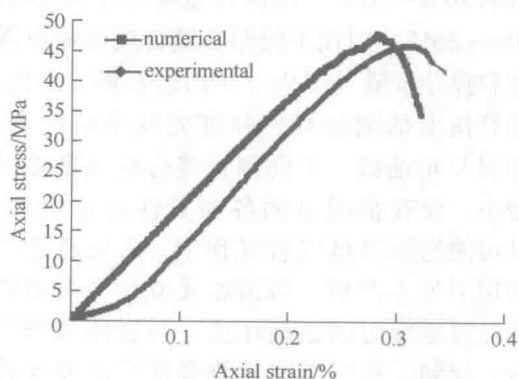


图 4 原始数据与测试数据的应力应变曲线

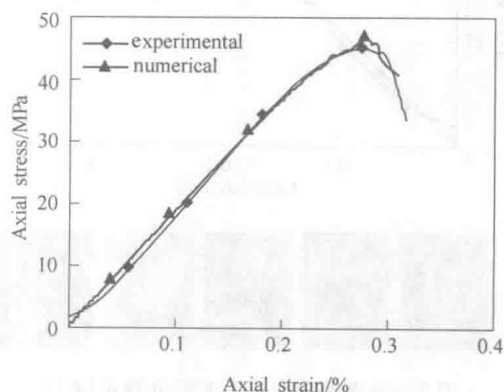
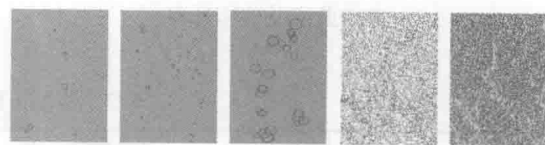


图 5 完整岩石模拟的破坏过程

水平缝合线的破坏模式与完整岩石破坏模式相似(图6),加载初期,声发射主要集中在缝合线区域或者靠近缝合线的区域,表明缝合线区域最先出现裂纹萌生,从最后的破裂模式看出,裂纹从缝合线区域萌生,逐渐向上下发展,直至失稳破坏,岩石底部声发射事件多且能级较高,声发



射图与裂纹图相对应,底部出现较多的劈裂裂纹,这是整个样品破坏的主要原因。

垂直缝合线的破坏模式以剪切破坏为主(图7),声发射图表明裂纹初始萌生主要集中在缝合线区域或者靠近缝合线的区域,在加载过程中,声发射也主要集中在缝合线区域,裂纹进一步发展贯通直至剪切破坏,裂纹图和力链图与声发射图对应效果很好,揭示了破裂的过程。倾斜缝合线的破坏模式是沿缝合线滑动剪切破坏(图8),纵观整个声发射演变过程,裂纹萌生、发展、贯通都集中在缝合线区域,对比裂纹图和力链图,表明缝合线弱面存在是导致岩石整体破裂失稳的主要原因。

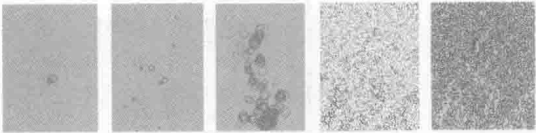


图6 水平缝合线岩石实验的破坏过程

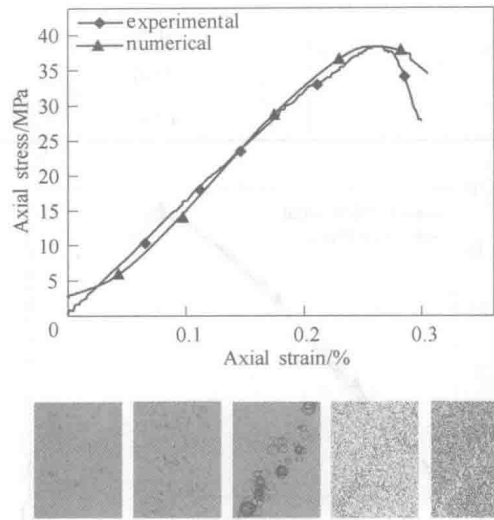


图7 垂直缝合线岩石实验和模拟应力应变曲线及破坏过程

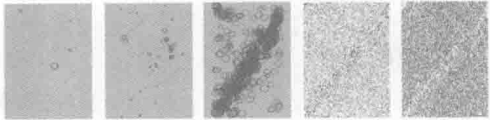
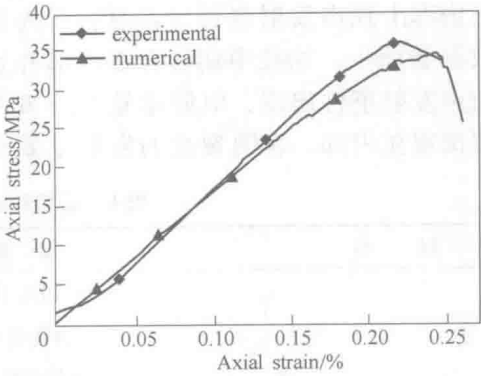


图8 倾斜缝合线岩石实验和模拟应力应变曲线及破坏过程

2.2 实验与数值模拟对比分析

通过对完整岩石和0°、63°、90°岩石在单轴压缩下峰值强度和弹性模量的实验数据和数值模拟数据对比(表2),发现缝合线降低了岩石强度,大约降低了完整岩石的10%~20%,弹性模量降低了原岩的10%~30%。对比不同倾角缝合线的峰值强度和弹性模量(图9),0°时岩石强度最高,随着角度的增加峰值强度先减小后增大,呈倒U形曲线,不同倾角缝合线强度差异较小,没有很明显的各向异性现象出现,其可能的原因是成岩过程中,岩层在水的作用下发生溶解,可溶物质减少,难溶物质经过地应力的逐渐压实,与岩体紧密结合,起到了黏结作用导致强度变化差异较小。弹性模量的变化近似呈线性变化,在15GPa上下浮动。

表2 实验与数值模拟对比结果

角度/(°)	弹性模量/GPa		强度/MPa	
	实验	数值模拟	实验	数值模拟
无缝合线	17.26	17.40	45.31	17.26
0	15.07	15.25	0	15.07
63	16.10	14.70	63	16.10
90	15.70	15.00	90	15.70

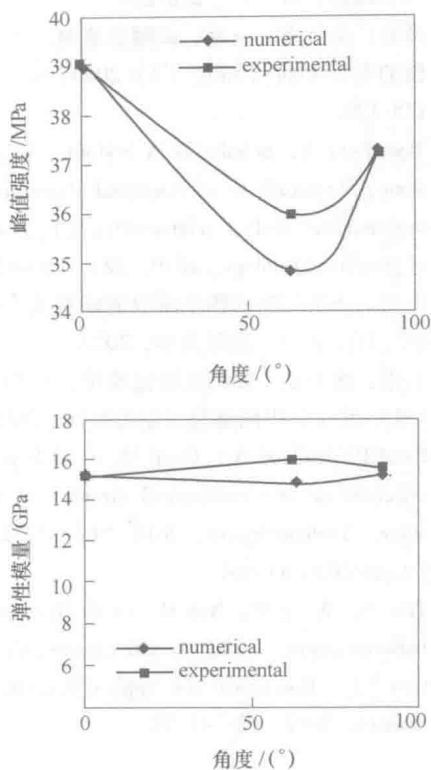


图9 实验与数值峰值强度和弹模对比

3 结论

通过数值模拟同室内物理实验结果的对比分析,研究了缝合线对灰岩变形强度特性的影响。数值模拟结果同实验结果一致性很好。数值模拟较好地记录了岩石损伤破裂过程中声发射演化特征及力链图演化特征,声发射图解释了裂纹萌生发展和贯通破坏的全过程,裂纹图和力链图揭示了岩石破坏的模式。完整岩石和水平缝合线破坏模式相似,以劈裂破坏为主,垂直缝合线和倾斜缝合线破坏模式相似,都是剪切破坏,倾斜缝合线的剪切面沿着缝合线走向。本文研究表明:

(1) 缝合线会降低岩石强度,大约降低了完整岩石强度的10%~20%,弹性模量降低了10%~30%。

(2) 加载过程中,岩石内部裂纹初始

萌生主要集中在缝合线区域或者靠近缝合线的区域,以此为基础裂纹向四周发展,最终裂纹贯通岩石失稳破坏。

(3) 通过研究不同倾角缝合线岩石变形强度,0°时峰值强度最高,63°时峰值强度最低,各倾角下峰值强度差异较小,没有出现明显的各向异性。

参考文献

- [1] 蔡杰兴. 缝合线特征及成因机理 [J]. 岩石学报, 1990, 2: 51-61.
- [2] 谭钦银, 王瑞华, 等. 缝合线成因新认识 [J]. 地质前缘, 2011, 18 (3): 241-248.
- [3] Brouste A, Renard F, Gratier J P, et al. Variety of stylolites' morphologies and statistical characterization of the amount of heterogeneities in the rock [J]. Journal of Structural Geology, 2007, 29: 422-434.
- [4] Drummond C N, Sexton D N. Fractal structure of stylolites [J]. Journal of Sedimentary Research, 1998, 68: 8-10.
- [5] Renard F. Three-dimensional roughness of stylolites in limestones [J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109.
- [6] Schmittbuhl J, Renard F, Gratier J P, et al. The roughness of stylolites: Implications of 3D high resolution topography measurements [J]. Physical Review Letters, 2005, 93.
- [7] Gratier J P, Muquet L, Hassani R, et al. Experimental microstylolites in quartz and modeled application to natural stylolitic structures. Journal of Structural Geology, 2005, 27: 89-100.
- [8] Karcz Z, Scholz C H. The fractal geometry of some stylolites from the Calcare Massiccio Formation, Italy [J]. Journal of Structural Geology, 2003, 25: 1301-1316.
- [9] Ebner M, Koehn D, Toussaint R, et al. The influence of rock heterogeneity on the scaling properties of simulated and natural stylolites [J]. Journal of Structural Geology, 2009, 31: 72-82.
- [10] Ebner M, Koehn D, Toussaint R, et al. Stress

- sensitivity of stylolite morphology. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 277: 394-398.
- [11] Stockdale P B. The Stratigraphic Significance of Solution in Rocks [J]. *Journal of Geology*, 1926, 34: 399-414.
- [12] Olierook H K H, Timms N E, Hamilton P J. Mechanisms for permeability modification in the damage zone of a normal fault, northern Perth Basin, Western Australia [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 50: 130-147.
- [13] Heap M J, Baud P, Reuschle T, et al. Stylolites in limestones: Barriers to fluid flow? [J]. *Geology*, 2013, 42: 51-54.
- [14] 高岗. 缝合线对碳酸盐岩油气生排运聚的作用 [J]. *西安石油学院学报*, 2000, 15 (4): 32-35.
- [15] 黄传卿, 张金功, 张建坤. 缝合线构造与油气地质意义 [J]. *地下水*, 2014, 36 (2): 171-173.
- [16] 高岗. 碳酸盐岩缝合线研究及油气地质意义 [J]. 2013, 24 (2): 218-224.
- [17] 高岗, 郝石生, 王晖. 碳酸盐岩基质与缝合线的生烃和排烃特征 [J]. 2000, 30 (2): 175-179.
- [18] Benedicto A, Schultz R A. Stylolites in limestone: Magnitude of contractional strain accommodated and scaling relationships [J]. *Journal of Structural Geology*, 2010, 32: 1250-1256.
- [19] 罗勇. 土工问题的颗粒流数值模拟及应用研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [20] 石崇, 徐卫亚. 颗粒流数值模拟技巧与实践 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [21] Baud P, Rolland A, Heap M, et al. Impact of stylolites on the mechanical strength of limestone. *Tectonophysics*, 2016. doi: 10.1016/j.tecto.2016.03.004
- [22] Hao S, Wang H, Xia M, et al. Relationship between strain localization and catastrophic rupture [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2007, 48: 41-49.

过断层掘进诱发煤岩破坏过程

倪俊蓉¹, 韩正林², 谭志宏¹

(1. 河南理工大学安全科学与工程学院, 河南焦作 454003;

2. 淮南矿业集团谢桥煤矿, 安徽淮南 232000)

摘 要: 运用 RFPA 软件进行计算分析 (模型为 $30\text{m} \times 30\text{m}$, 单元划分为 300×300), 对上盘过断层掘进和下盘过断层掘进煤岩破坏进行研究。分析了掘进过程中煤岩应力场演化, 将掘进诱发煤岩破坏分为四个阶段: 应力集中阶段、应力诱发断层破裂阶段、煤岩破裂阶段和煤与瓦斯突出阶段。分析了掘进过程煤岩体的破坏损伤演化, 下盘掘进时, 瓦斯压力可能使上盘破碎的煤块沿断层破裂面压入掘进巷道诱发煤与瓦斯突出; 上盘掘进时, 随着巷道掘进, 上部煤层受力增大, 易诱发上盘煤层破坏, 导致破坏更严重。分析了掘进过程瓦斯场的演化, 认为掘进诱发的煤岩破坏对过断层后的煤层瓦斯有明显的卸压效果, 但是上盘掘进时, 由于断层周围煤岩体的破坏, 因此对上盘煤层瓦斯也有明显卸压效果。

关键词: 过断层; 掘进; 煤与瓦斯突出; 煤岩破坏

0 引言

在煤矿巷道掘进过程中, 经常会遇到一些断层方面的构造。如何安全顺利通过断层, 对实现安全生产意义重大^[1,2]。及时总结影响瓦斯赋存规律的各种地质因素, 对有效防治煤与瓦斯突出具有重要的意义^[3~6]。但在矿山安全评价方面, 也经常忽视断层特别是逆断层对采动煤岩层的危害性和影响作用^[7]。

进入 21 世纪以来, 随着开采深度的不断加深、开采规模的扩大和新技术的应用, 地质条件日趋复杂, 数值模拟技术的引入对于分析复杂条件下的破坏过程具有较好的效果^[8~10]。目前断层带附近应力变化情况不明

确, 研究采掘过程中断层带附近应力变化, 对煤矿在采掘过程中的安全生产有现实意义。

1 计算模型情况

主要研究逆断层条件下的掘进, 分上盘掘进和下盘掘进两种情况, 如图 1 所示。

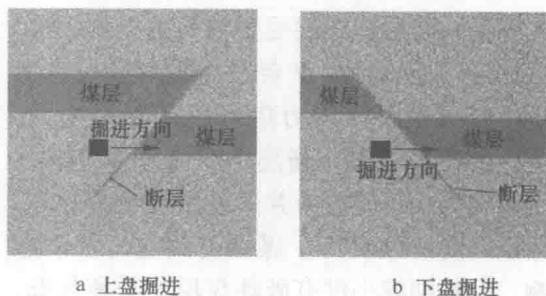


图 1 计算模型

收稿日期: 2016.4.25。

基金项目: 中国博士后基金资助项目 (2012M511577), 国家自然科学基金资助项目 (51004044)。

作者简介: 倪俊蓉 (1978—), 女, 辽宁海城人, 在读硕士。E-mail: 51647130@qq.com。

通讯作者: 谭志宏 (1979—), 男, 湖南洪江人, 副教授。电话: 0391-3986283, E-mail: tanzhihong@hpu.edu.cn。

逆断层落差为 10m, 断层上下盘煤厚为 5m, 断层面倾角为 45° 。煤层顶、底板为强度较大, 变形较小的岩层, 岩层封闭条件较好。在煤层同一水平开挖, 沿平巷向前掘进, 掘进巷道高度 2m。

采用 RFPA 软件进行数值建模和计算分析。模型尺寸为 $30\text{m} \times 30\text{m}$, 划分为 300×300 共 90000 个计算单元。模型的加载方式为载荷加载, 水平压力为 5MPa, 垂直压力为 12MPa。岩层和煤层参数见表 1。

表 1 煤岩物理力学参数取值

	顶底板	煤
均值度	3	2
弹性模量/MPa	50000	15000
抗压强度/MPa	30	8
泊松比	0.25	0.31
自重/ $\text{N} \cdot \text{mm}^{-3}$	2.2×10^{-5}	1.7×10^{-5}

2 煤岩破坏结果及分析

2.1 破坏过程应力迁移

研究发现过断层掘进过程中, 如果满足煤岩破坏的条件, 整个破坏过程可以分为 4 个阶段。

(1) 应力集中阶段。沿着煤层同一水平开挖, 断层和煤层受到的初始损伤较小。在掘进过程中, 掘进巷道周围发生应力集中, 断层周围的应力集中程度不断增大, 在掘进巷道前方与断层之间的岩体形成一个高应力区, 但应力并未使断层发生破坏, 断层的封闭性良好。煤层受到应力扰动影响, 但扰动较小没有破坏煤层的平衡状态, 煤层未发生破坏。这个阶段沿断层上下盘掘进的过程相差不大, 但下盘掘进应力集中程度较上盘掘进大 (图 2)。

(2) 应力诱发断层破裂阶段。巷道向前掘进过程中, 随着距离断层面更近, 断层受到的切向应力不断增大, 沿断层上盘

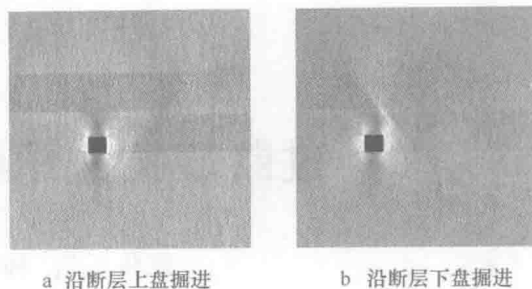


图 2 第一阶段剪应力分布图

掘进时, 断层破坏比较慢, 巷道开挖至断层附近, 断层受到的应力集中, 达到足以使断层发生破坏, 这时断层下端部出现微小破裂, 裂纹随着应力的增大而逐渐增多, 并且是沿着断面向上扩展; 破裂增多使得断层封闭性变差, 不能很好地封闭煤层; 煤层局部开始受到应力扰动的影响, 但扰动还不足以使煤层发生破坏。而沿着断层下盘掘进时, 断层受到的应力扰动更大, 断层正对开挖巷道底部开始出现有一些微小的裂纹。巷道向前掘进过程中, 应力不断增大, 断层产生更多更大的破裂, 破裂大多发生在正对煤层的断层部位, 破裂降低了断层的封闭性, 煤层受到应力的影响, 但应力还未使煤层发生破坏 (图 3)。

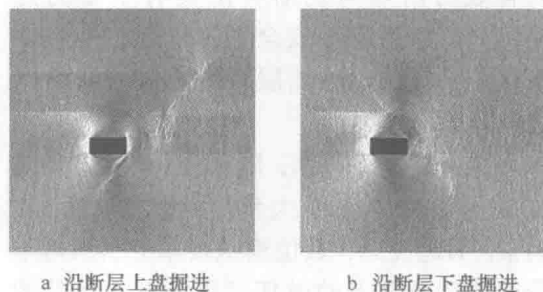


图 3 第二阶段剪应力分布图

(3) 瓦斯、应力促使煤层破坏阶段。沿断层下盘向前掘进, 断层受到的应力增大, 产生更严重的破裂, 但断层发生的破裂使断层的封闭性效果变差; 煤层受到的

应力扰动变大,这时主要受拉应力的影响而发生轻微的破坏,产生部分裂隙,这时发生的都是零星破坏,裂隙的产生导致煤层中瓦斯开始解析。瓦斯解析产生瓦斯压力,这时断层主要受到煤层中的瓦斯压力作用,同时还受到切向应力作用而产生更大的破坏,随着瓦斯的大量解析,瓦斯压力对煤体做更多的功,煤层与断层面之间形成了破裂面,断层封闭性变差,透气性增大,形成的破裂面为煤层中瓦斯的运移提供了通道。由于掘进巷道与煤层之间还有一段安全距离,瓦斯压力不足以使煤体发生突出。沿断层上盘掘进,断层和煤层受到的破坏大,煤层产生很多裂隙。而沿断层上盘掘进过程中,煤层受到的应力也随着增大,拉应力增大而使煤层的破坏增多,产生更多裂隙,瓦斯大量运移。当巷道开挖过断层时,巷道上部煤层受到破坏(图4)。

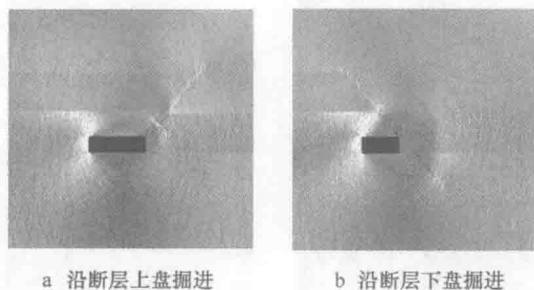


图4 第三阶段剪应力分布图

(4) 突出发生阶段。沿断层上盘掘进过程中,过断层后,巷道上方煤层发生破坏,瓦斯大量解析,断层主要受到瓦斯压力作用,靠近上盘煤层的断层发生较大破坏,从而引起上盘煤层受到应力的影响,而产生破坏,随着巷道在煤层的掘进,上部煤层受力增大,有可能发生更大的突出危险性。

而沿着断层下盘开挖,随着平巷往前掘进,断层受到的剪应力增大并发生更严

重的破坏,裂隙更大,断层对煤层的阻隔作用减小。煤层受到的拉应力随着裂隙的增大而逐渐减小,瓦斯压力对煤体做更多的功,压应力增大使煤体产生更严重的破坏,并产生很多煤体碎块。当巷道掘进至断层附近时,瓦斯压力使破碎的煤块沿着断层破裂面压入掘进巷道进而发生煤与瓦斯突出(图5)。

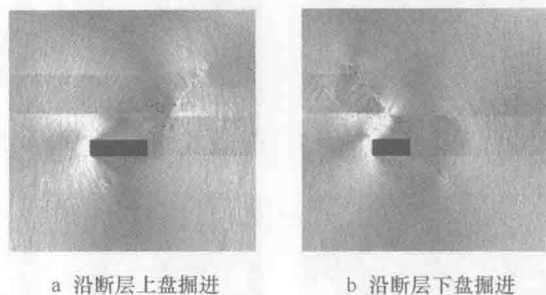


图5 第四阶段剪应力分布图

2.2 破坏损伤分析

过断层掘进过程中煤岩体的破坏损伤演化如图6所示。

在巷道刚开挖时,断层附近没有明显的破坏与损伤。沿着断层上盘掘进过程中,断层附近的应力不断增加,产生压破坏。随着巷道向前掘进,断层产生更多的压剪破裂,这时煤层受到应力影响,主要表现为拉破坏,造成瓦斯运移,使煤层主要受到压应力作用产生压剪破裂,同时拉应力继续对煤层作用产生拉伸破裂,随着压应力增大,拉应力减小,煤层产生更多压破坏。过断层后,断层上部煤层受到拉破坏作用。随着应力增大,拉伸破坏更加严重,有可能引发断层上盘发生突出(图6a)。

而沿着断层下盘掘进时,断层和煤层主要受到压应力作用而产生压破坏。随着应力的增加,煤层受到拉应力作用而产生拉破坏(图6b)。

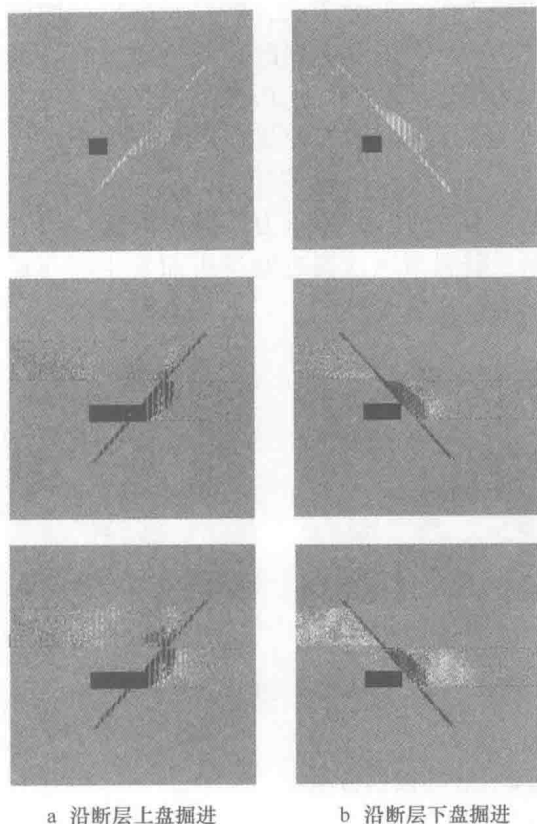


图6 过断层掘进过程中煤岩破坏与损伤演化

压力作用下,大量微裂纹连接贯通,煤层中形成有规律的裂隙通道,瓦斯压力充满整个裂隙空间。由于破裂面处的压力为零,当煤体中瓦斯压力足够大,就将煤体压入掘进巷道而发生突出(图7b)。

而沿上盘掘进时,开挖至断层附近,断层产生的破坏少,煤层并未发生突出,当巷道开挖过断层以后,巷道上部煤层瓦斯大量解析,上盘煤层容易发生倾出;瓦斯压力梯度大,并引起断层上盘煤层的破坏,容易引起上盘煤层发生突出(图7a)。

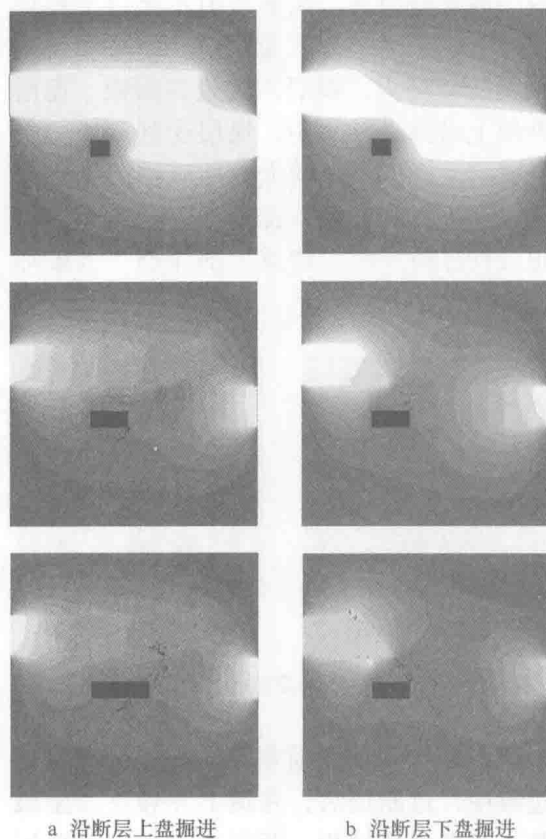


图7 过断层掘进过程中瓦斯流场演化

3 破坏过程瓦斯场分析

巷道开挖初始阶段,断层未受到破坏,较好地封闭了煤层中的瓦斯,煤层中瓦斯没有发生解析,较好地赋存在煤层中。随着巷道的开挖,煤层受到应力扰动,只有部分瓦斯开始解析,并使煤层发生较小破坏而产生微小裂隙。

沿断层下盘掘进时,伴随着巷道开挖而应力不断增加,煤层受到的扰动增大使瓦斯运移增多,煤层在瓦斯压力作用下产生更多裂隙,并且瓦斯大量解析,瓦斯压力不断增大,并形成一定的瓦斯压力梯度,由于掘进巷道距离煤层有足够的安全距离,瓦斯压力不足以破坏岩体而发生突出。随着巷道向前开挖,断层受到应力增大而透气性增大,煤层中瓦斯大量解析,在瓦斯

4 结论

(1) 无论是上盘掘进还是下盘掘进,如果条件满足,过断层掘进过程煤岩破坏均可分为四个阶段:应力集中阶段,应力诱发断层破裂阶段,瓦斯、应力促使煤层

破裂阶段以及煤与瓦斯突出阶段。

(2) 沿上盘掘进, 过断层后, 煤层发生破坏, 靠近上盘煤层的断层发生较大破坏, 从而引起上盘煤层受到应力的影响, 而诱发破坏, 随着巷道在煤层的掘进, 上部煤层受力增大, 有可能发生更大的突出危险性。

(3) 沿下盘掘进, 当巷道掘进至断层附近时, 瓦斯压力使破碎的煤块沿着断层破裂面压入掘进巷道进而发生煤与瓦斯突出。

(4) 无论上盘掘进还是下盘掘进, 煤岩的破坏对过断层后的煤层瓦斯有明显的卸压效果, 但是上盘掘进过程, 由于断层周围煤岩体的破坏, 对上盘煤层瓦斯也有明显卸压效果。

参 考 文 献

- [1] 刘栋. 煤矿掘进迎头过断层技术探讨 [J]. 科技资讯, 2010 (8): 53.
- [2] 刘明举, 孟磊, 魏建平. 近年煤与瓦斯突出的统计特性及其防范措施 [J]. 煤矿安全, 2009 (7): 73-76.
- [3] 张英, 丁永杰, 刘成军. 鹤壁六矿煤与瓦斯突出特点及其控制因素分析 [J]. 煤炭工程, 2008 (4): 67-69.
- [4] 晁建伟, 余同勇, 韦四江. 回采巷道过断层顶板破坏特征研究 [J]. 矿业安全与环保, 2009, 36 (2): 13-15.
- [5] 李普, 张子敏, 崔洪庆. 李子垭北井煤与瓦斯突出特征及主控因素分析 [J]. 煤矿安全, 2009 (7): 69-72.
- [6] 刘咸卫, 曹运兴, 等. 正断层两盘的瓦斯突出分布特征及其地质成因浅析 [J]. 煤炭学报, 2000, 25 (6): 571-575.
- [7] Hakan Stille, Arild Palmstrom. Ground behaviour and rock mass composition in underground excavations [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008 (23): 46-64.
- [8] 刘伟韬, 姬保静, 何寿迎. 断层破碎带变形破坏失稳过程模拟 [J]. 煤田地质与勘探, 2009, 37 (3): 33-37.
- [9] 石必明, 刘泽功. 保护层开采上覆煤层变形特性数值模拟 [J]. 煤炭学报, 2008, 1 (33): 17-22.
- [10] 刘晓宇, 程五一, 王广宇. 保有限元数值模拟在巷道掘进中的应用研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2009, 5 (3): 158-163.