

关键层理论在保水开采中的应用

莘海德¹, 孔海陵², 王路珍^{2,3}

- (1. 中国矿业大学 力建学院, 江苏 徐州 221008;
2. 盐城工学院 基础教学部, 江苏 盐城 224051;
3. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221008)

摘要:在绿色开采思想的指导下,对关键层理论在保水开采中的应用进行了分析。通过算例讨论了三者的关系并分析了岩层变形-渗流耦合系统的复杂性特征,提出应用复杂系统动力学理论解释突水机制的初步设想。研究表明,在承载关键层破断前,承载关键层同时也是保水关键层;在承载关键层破断后,不再具有隔水作用,而保水关键层此时由渗流关键层充当;如果承载关键层破断,并且渗流关键层不存在,则会发生突水现象。岩层变形-渗流耦合动力学系统是具有时变边界、非线性、非均匀性和非连续性等特征的复杂系统。将复杂系统动力学引入突水防治理论研究,可以从本质上描述突水的过程。

关键词:承载关键层;保水关键层;渗流关键层

中图分类号:TD313 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5322(2012)04-0063-04

矿产资源开采的同时也造成了对环境的破坏,基于对绿色 GDP (Gross Domestic Product 国民生产总值)的考虑,必须正视资源环境成本,钱鸣高、缪协兴等提出了绿色开采^[1-4]的概念,其中就包括对于矿区水资源的保护和利用。

关键层理论^[5]自提出以来,在采矿的各个领域都得到了广泛的应用^[6-12]。在研究煤矿保水开采时,分别从围岩的承载能力、隔水能力和渗流稳定性的视角认识和解释突水过程,先后提出关键层(又称结构关键层或承载关键层)、隔水关键层(保水关键层)和渗流关键层^[13]的概念。

假设煤层上部含水层在承载关键层的上方,或煤层下部含水层在承载关键层的下方,如果承载关键层采动后不破断,则承载关键层起到隔水作用,将含水层保护起来,也就是保水关键层。当然,如果承载关键层采动后会发生破断,但是破断裂隙被软岩层充填,不能形成渗流突水通道,则承载关键层和软岩层组合形成复合型保水关键层。

如果某一岩层的渗透率比起其他岩层底2个

以上量级,同时厚度与其他岩层在同一量级,则该层的渗透性对渗流的稳定性起到关键作用,该层被称为渗流关键层。显然,岩层的渗透特性是随着岩层位移的变化而变化的,因此承载关键层是否破坏对各岩层的渗透特性具有显著的影响。在没有与水源贯通的裂隙(包括断层和其他弱面)的情形下,如果承载关键层不破坏,则各岩层的渗透率都很低,渗流很难失稳。如果承载关键层破坏,则各岩层的渗透率大多发生显著变化,只有少数岩层渗透特性变化不大。在这少数几层岩石中,某一岩层的渗透率远远低于其他岩层,这就是渗流关键层。也就是说,虽然承载关键层与渗流关键层不是同一岩层,但是只有在承载关键层被破坏的前提下渗流关键层才有意义。

本文针对西部缺水矿区的保水开采进行研究:承载关键层破坏将影响其本身及其他岩层的保水性能和渗透性,保水关键层关乎矿区地下水资源的分布,而渗流关键层则与地下水资源是全部流失还是保存密切相关。文章通过一个算例来

收稿日期:2012-09-20

基金项目:盐城工学院应用基础研究项目(XKR2010010);江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXZZ12_0924)

作者简介:莘海德(1986-),男,河北张家口人,硕士研究生,主要研究方向为岩体破坏及渗流突水。

说明关键层在绿色(保水)开采方面的作用。

1 算例

A 矿煤₄ 底板岩层,地质资料,从含水岩层到开采煤层(煤₄)共 6 层,厚度 30.42 m,由上向下分别有:砂岩 2.5 m、粉砂岩 2.05 m、砂岩 12.6 m、泥岩 2.5 m、煤 9.98 m、砂岩 0.79 m。通过合并相邻岩性相同或相近的岩层,利用 RFPA^{2D} 建立了一个 196×500 的模型(见图 1)。对煤₄ 进行开挖 200 m,每次推进 10 m,共分 20 步完成。为减小边界效应,在模型两端各留 150 m 的煤柱。开采煤层厚 1.57 m,在此煤层向下截取 41.5 m(到含水的砂岩层),向上截取 153 m,在煤层水平方向截取 500 m。模型左、右两侧为水平方向位移约束;采场下部受 3 MPa 的水压,且为铅垂方向位移约束;上表面边界受向下的均布载荷作用,分布集度 $q=5$ MPa。岩层之间均设定了弱层。软件

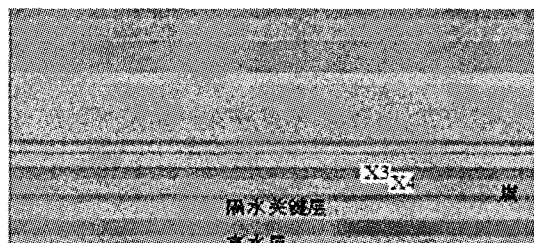


图 1 A 矿 RFPA^{2D} 矿压模型

Fig. 1 A model of rock pressure of Coal Mine A simulated by RFPA^{2D}

用基元弹性模量、单轴抗压强度等按 Weibull 分布赋值。

根据底板各岩层性质,可以发现岩层 X3 是作为承载关键层而存在的。当工作面推进到 150 m 时,如图 2 所示,工作面下方岩层未被破坏,没有能够形成突水通道,岩层 X3 起到了阻水作用,即岩层 X3 既为承载关键层也同时作为保水关键层。

当工作面推进到 200 m 时,如图 3 所示,工作面下方承载关键层岩层 X3 被破坏,形成突水通道。可以计算出此时底板各岩层的渗透特性,如表 1 所示。从表 1 可以看出,岩层 X4 即泥岩的渗透率比其他各个岩层都低至少两个数量级,因此可以认为该岩层为渗流系统的关键层,也就是渗流关键层,其渗透特性对系统的稳定性起支配作用。在这种情况下承载关键层破断,不能充当保水功能,则保水关键层由泥岩层即渗流关键层充当。



图 2 开挖 150 m 时的变形图

Fig. 2 The Graph of Deformation when the Workface is Pushed on to 150 m

表 1 工作面推进到 200 m 时的底板各岩层的渗透特性

Table 1 Seepage Parameters in Strata under Mined Coal Seam When Workface are Pushed on to 200 m

岩层代号	岩层名称	厚度 /m	推进到 150 m 时的渗透特性			备注
			k/m^2	β/m^{-1}	备注	
X1	砂岩	2.50	1.77×10^{-21}	1.52×10^{24}		
X2	粉砂岩	2.05	4.78×10^{-20}	1.18×10^{23}		
X3	砂岩	12.6	3.15×10^{-21}	2.90×10^{23}	承载关键层(破坏)	
X4	泥岩	2.50	7.81×10^{-23}	1.89×10^{26}		渗流关键层
X5	煤	9.98	1.19×10^{-16}	5.38×10^{18}		
X6	砂岩	0.79	2.87×10^{-21}	2.28×10^{24}		富水层

如果工作面继续向前,承载关键层将破断更加严重,甚至会影响到岩层 X4。这种情况下,岩层 X4 将破坏,渗透率增大,逐渐形成渗流突水通道,丧失作为渗流关键层的能力,同样也就失去了保水功能,则将会发生突水现象。

2 动力学分析

由于岩层的渗透性越差其隔水性能越强,因此,渗流关键层与保水关键层大多情形下是一致的。两者之间的主要差别在于文字表述上,保水

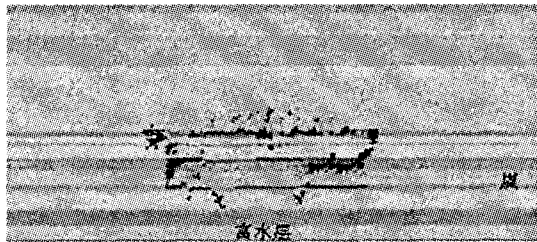


图3 开挖200 m时的变形图

Fig. 3 The Graph of Deformation when the Workface is Pushed on to 200 m

关键层采用定性的描述,而渗流关键层则采用定量的描述。两者之间的另一差别在于,保水关键层基于纯力学概念描述,而渗流关键层则基于动力系统理论的描述。

底板或顶板突水实际上是岩层变形运动与水流动(渗流)之间耦合作用的结果,即岩层的变形引起岩体的孔隙和裂隙结构的变化,并使岩层的渗透特性发生变化,从而引起渗流状态的变化;而水压的变化又引起岩层变形状态和孔、裂隙结构的变化。突水过程实际上是岩层变形与水渗流耦合作用发展到一定阶段的结果,即当岩层内出现一条由若干条裂隙组成的流水通道,并且渗流的参量(渗透率、非 Darcy 流 β 因子,加速度系数,水的动力粘度和质量密度等)满足一定的条件,渗流发生 Lyapunov 意义下的失稳,便引发突水。因此,突水是一种复杂动力学现象。评价承载关键层、保水关键层和渗流关键层之间关系,必须从复杂性着手。

岩层变形与水渗流耦合产生的复杂性主要表现在:岩层中部分材料的垮落引起的边界变化和弹性区、塑性区、裂隙区和破碎区之间界面的变化;由于边界时变,岩层变形-水渗流耦合动力系统的控制参量(包括孔隙度、渗透率、非 Darcy 流 β 因子、加速度系数等)也随时间变化,而且这种变化不是给定的时间函数;由于岩层的塑性区内应力-应变关系是非线性的,同时渗流动量守恒方程(Forchheimer 方程)的非线性,岩层变形-水渗流系统是非线性;由于岩层控制方程中各岩层参数并不一致,因此岩层各层参数也是非均匀的;岩层在运动过程中出现裂隙,由于裂隙不是完全随机分布的,具有一定的方向性,故岩层呈现出各向异性;岩体还存在非连续性。

目前,有关承载关键层、保水关键层和渗流关

键层的论著,基本上未涉及到如上复杂性。承载关键层和保水关键层理论基础是梁和板的弹性理论。渗流关键层的概念虽然是在运动稳定性和结构稳定性(分岔)理论指导下提出的,但是文献[14]建立的力学模型过分简单,即没有考虑边界的时变,也没有考虑流-固耦合作用,更没有考虑岩体的非连续性、非均匀性。因此,将复杂性科学的思想和理论应用于上述3种关键层模型的研究是今后煤矿灾害防治技术领域的一项重要任务。下面通过图4给出的简单模型给出用复杂系统动力学理论解释底板突水机制的简单设想。

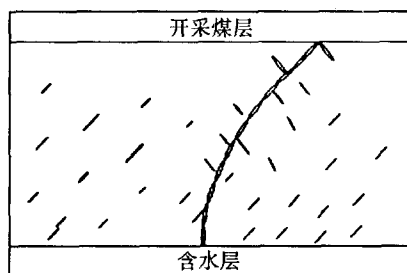


图4 裂隙相互贯通形成导水通道

Fig. 4 A Passage of Water Conducting Through a Chain of Fractures Which Connect One After Another

煤层在开采过程中,由于煤的采出,底板上端面处应力释放以及水压的作用使得底板弯曲并在局部区域产生裂隙(次生裂隙)。裂隙的出现降低了底板的承载能力,造成裂隙的发展和裂隙区域的扩大;而裂隙的发展和裂隙区域的扩大又进一步降低了底板的承载能力。这样过程循环往复,使得底板大范围出现裂隙,并形成一条由若干条裂隙组成的流水通道。如果沿此通道渗流的参量(渗透率、非 Darcy 流 β 因子,加速度系数,水的动力粘度和质量密度等)满足一定的条件,渗流发生 Lyapunov 意义下的失稳,便引发突水。

3 结论

本文在绿色开采思想的指导下,对关键层理论在保水开采中的应用进行了分析,并提出应用复杂系统动力学理论解释突水机制的初步设想。通过以上讨论,得出以下结论。

(1)在承载关键层破断前,承载关键层同时也是保水关键层;在承载关键层破断后,承载关键层不再具有保水作用,由渗流关键层充当保水关键层,而且保水关键层和渗流关键层往往为同一

岩层;如渗流关键层破坏,则发生突水现象。

(2) 岩层变形 - 渗流耦合动力学系统是具有非连续性、非均匀性、非线性、控制参量时变和边界时变等特征的复杂系统。将复杂系统动力学引入突水防治理论研究,可以从本质上描述突水过程。

(3) 突水过程实际上是岩层变形与水渗流耦合作用发展到一定阶段的结果,即当岩层内出现一条由若干条裂隙组成的流水通道,并且渗流的参量(渗透率、非 Darcy 流 β 因子,加速度系数,水的动力粘度和质量密度等)满足一定的条件,渗流发生 Lyapunov 意义下的失稳,便引发突水。

参考文献:

- [1] 钱鸣高. 绿色开采的概念与技术体系[J]. 煤炭科技, 2003(4): 1 - 3.
- [2] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 资源与环境协调(绿色)开采及其技术体系[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(1): 1 - 5.
- [3] 钱鸣高, 许家林, 缪协兴. 煤矿绿色开采技术[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(4): 343 - 348.
- [4] 缪协兴, 钱鸣高. 中国煤炭资源绿色开采研究现状与展望[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(1): 1 - 14.
- [5] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林, 等. 岩层控制的关键层理论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
- [6] 钱鸣高, 石平五. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
- [7] 钱鸣高, 张顶立, 黎良杰, 等. 梁的“S-R”稳定及其应用[J]. 矿山压力与顶板管理, 1994, 11(3): 6 - 10.
- [8] 钱鸣高, 刘双跃. 两柱支掩式支架的工作状态及其对直接顶稳定性的影响[J]. 煤炭学报, 1985, 10(4): 1 - 11.
- [9] 缪协兴, 茅献彪, 钱鸣高. 采场覆岩中关键层的复合效应分析[J]. 矿山压力与顶板管理, 1999, 16(Z1): 19 - 21, 25.
- [10] 许家林, 钱鸣高. 关键层运动对覆岩及地表移动影响的研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25(2): 122 - 126.
- [11] 许家林, 钱鸣高. 地面钻井抽放上覆远距离卸压煤层气试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(1): 78 - 81.
- [12] 黎良杰. 采场底板突水机理的研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 1995.
- [13] 孔海陵, 陈占清, 卜万奎, 等. 承载关键层、隔水关键层和渗流关键层关系初探[J]. 煤炭学报, 2008, 33(5): 485 - 488.
- [14] 孙明贵, 李天珍, 黄先伍, 等. 基于层状岩体渗流失稳条件的煤矿突水机理[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(3): 284 - 288, 293.

Study and Application of Key - stratum - theory in Water - preserved Mining

SHEN Hai-de¹, KONG Hai-ling², WANG Lu-zhen^{2,3}

1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221008, China;
2. Department of Fundamental Sciences Teaching, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu 224051, China;
3. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou Jiangsu 2210083, China

Abstract: Application of key - stratum - theory in water - preserved mining is analyzed under the guidance of green mining. Concepts of bearing - key - stratum, water - preserved - key - stratum and seepage - key - stratum are illustrated. The relationships among the three kinds of key - stratum are discussed with examples. Based on analyzing the dynamic systems of coupling between the deformation of the strata and the seepage in the strata, a primary thinking to explain the water - inrush mechanism by the complicacies science is presented. The research shows that, before the breaking of bearing - key - stratum, it is also water - preserved - key - stratum; after the breaking, the bearing - key - stratum can not preserve water any more, and the seepage - key - stratum then serves as the water - preserved - key - stratum; when bearing - key - stratum and seepage - key - stratum were broken, water inrush occurred. The dynamic system, in which the deformation of strata and the seepage in strata interact, is a system that posses complicacies such as variable boundaries non - linearity, heterogeneity, and non - continuity. If put dynamics of complex systems into the study and application of water - inrush control research, the process of water - inrush can be described.

Keywords: bearing - key - stratum; water - preserved - key - stratum; seepage - key - stratum

(责任编辑:沈建新)