

# 隔水关键层水文地质概念模型的建立与分析

李春意, 崔希民, 袁德宝, 胡青峰

(中国矿业大学 资源与安全工程学院, 北京 100083)

**摘 要:**水资源保护性煤炭开采是煤矿绿色开采的重要内容之一,也是目前我国煤炭开采迫切需要的重大课题。在分析结构关键层内涵的基础上,提出了广义隔水关键层和保水开采的基本概念;依据地层的含、隔水结构,得出隔水层的 2 种最基本模式。基于水文地质学和地层结构理论,提出了 5 种隔水关键层水文地质概念模型;得出了影响煤层顶、底板隔水关键层破坏的主要因素。表明在生态环境脆弱的西部矿区以及我国东部的大水矿区,充分利用隔水关键层的良好隔水作用,能够实现保水开采。

**关键词:**隔水关键层;水文地质概念模型;绿色开采;保水开采

**中图分类号:** TD745

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1003 - 496X(2009)04 - 0011 - 05

## Establishment and analysis on hydrological geology conception models of water - resisting key - stratum

LI Chun - yi, CUI Xi - min, YUAN De - bao, HU Qing - feng

(Institute of Resources and Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Water - preserved mining is one of important contents of green - mining and also is an fundamental assignment to be solved in the course of mining. Based on analyzing the conception of structure key - stratum, the notion of generalized key - stratum and water - preserved mining was put forward. According to water - bearing and water - stop stratum structure, two basic water - stop stratum models were obtained. Based on hydrological geology and stratum structure theory, five hydrological geology conception models of water - stop stratum was presented and achieved main factors of influencing roof and floor water - stop key - stratum destroy. It has been demonstrated that sufficiently utilizing good action of water - stop key - stratum, water - preserved mining could be realized in western mining area with vulnerable ecological environment and eastern mining area with large full - water.

**Key words:** water - resisting key - stratum; hydrological geology conception models; green mining; water - preserved mining

## 0 引 言

近年来,我国已兴起了关于“资源与环境协调开采的绿色开采技术”的研究与开发工作,学术界已提出了关于煤炭资源绿色开采的概念与技术体系<sup>[1-3]</sup>。水资源保护性煤炭开采是绿色开采的核心内容之一,亦是当前我国煤炭开采迫切需要解决的重大课题。我国许多矿区,为防治煤矿水害投入大量的人、财、物,造成很大的经济和环境负担,而有些地区又存在天然缺水和人为造成的缺水问题。我国西部干旱半干旱地区,如晋陕蒙交界的神华矿区,如果不采取保水措施,会使宝贵的第四系萨拉乌苏组

含水层遭到破坏,使本来就脆弱的生态环境进一步恶化<sup>[4]</sup>。而隔水关键层的研究则恰恰是达到保水开采、实现矿区可持续发展和煤矿绿色开采的关键。从水文地质和矿山开采沉陷的角度来研究隔水关键层,能更好的解决保水采煤需要攻关的工程技术问题,为理论研究和工程实践奠定基础。

## 1 广义隔水关键层

### 1.1 广义隔水关键层与保水采煤的概念

文献[5]在岩层控制的关键层理论中提到的“关键层”是指在采场覆岩层中存在多个岩层时,对岩体活动全部或局部起控制作用的岩层称为关键层。进而把这一定义推广发展成保水开采隔水关键层<sup>[6]</sup>。事实上,广义的隔水关键层还包括,在煤矿开采过程中上覆或下伏岩层中能有效起到隔水作用的岩层、结构体或者人造隔水构筑物,这些都可以称

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助(2007CB209400);教育部新世纪优秀人才支持计划资助(NCET-07-0798);矿山空间信息技术国家测绘局重点实验室开放基金资助项目(KLM200816)

作隔水关键层。

保水开采的内涵是,通过相关水资源保护性煤炭开采理论和技术基础研究,实行保水开采、煤水共采,以及通过对矿井水进行处理复用,实现矿井水和矿区废水的资源化,达到矿井水的零排放;再结合区域性水资源联合调度,实现“三水”统一管理,从而最大限度地利用现有水资源。在保护和利用水资源的前提下,实现煤炭资源的高效合理开采。保水采煤的核心问题之一是,采动产生的导水裂缝带不会与底板或顶板含水层沟通。

### 1.2 隔水关键层的基本隔水模式

从水文地质学的角度,依据地层含、隔水结构,隔水层基本模式可以总结以下 2 种。

(1)含水 - 隔水。地下水的活动,受地质构造和隔水层的控制,当岩石空隙在空间的组合为该结构时,含水层为散体结构或块状结构,含水空隙均匀,大面积出露,以垂向补给为主,具有统一的自由地下水面。构成这种含水结构的有风化岩体、大面积裸露的巨厚灰岩及松散堆积物。如图 1(a)。

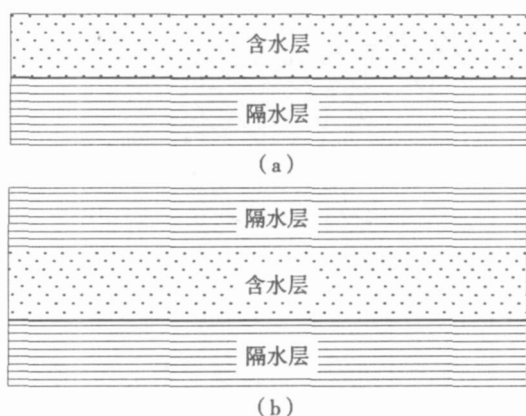


图 1 隔水关键层的基本隔水模式

(2)隔水 - 含水 - 隔水。此种隔水模式通常具有承压性,含水层为层状碎裂结构、层状散体结构和管状结构,含水层顶底板有隔水层控制,以侧向补给为主。如图 1(b)。

### 1.3 隔水关键层与保水采煤的关系

煤系地层赋存于不同的水文地质环境中,有的煤层覆岩或底板不存在含水层或含有少量孔隙水、裂隙水,则谈不上研究隔水关键层,不需要保水采煤。因此,除了存在含水层,煤系地层中赋存隔水层是实现保水开采的必要条件,保水开采为成功实现含水层再造开辟了新途径<sup>[7]</sup>。煤层顶底板结构在采动条件下使原有的应力发生变化,导致顶、底板的损伤,结果是岩体的裂隙性发生改变,有的岩体被错

断,使本已张开的裂隙和相连通的裂隙变得闭合或互不连通,原来闭合的裂隙变得张开或变长以至相互连通,从而引起固有含水层结构特性的变化。如果采取一定的措施使导水裂隙带范围控制在一定的限度内,便可增大储水空间,使水位降低,减少对煤层开采的水压威胁,若条件允许或采取一定措施保护隔水关键层不被破坏,或暂时破坏但随着裂隙的压密隔水层恢复其隔水性,可以使更多的地下水资源储存其中而不被破坏,从而实现保水开采。

根据我国部分煤矿水体下采煤经验,对于松散层来说,凡粘土含量  $< 10\%$ ,单位涌水量  $> 0.1 \text{ L/s} \cdot \text{m}$ ,渗透系数  $K_{\text{渗}} > 5 \text{ m/d}$  的含水砂层、砂砾石层或砂卵石层,均可作为中等和强富水松散层,不能作为隔水关键层的组成部分;凡粘土含量为  $11\% \sim 30\%$ ,单位涌水量  $< 0.1 \text{ L/s} \cdot \text{m}$ ,渗透系数  $K_{\text{渗}} = 1 \sim 5 \text{ m/d}$  的含水砂层、砂质粘土层,均可作为弱富水松散层或相对隔水层,可以作为隔水关键层的组成部分;凡粘土含量  $> 30\%$ ,  $< 1 \text{ m/d}$  的粘土、粘土夹砾石、钙质粘土等,均可作为良好的隔水层。

对于岩层来说,凡泥岩、页岩、砂质页岩、泥质胶结的砂岩、粉砂岩、泥质灰岩等松软柔韧性岩层,都是良好的隔水层或相对隔水层;凡薄层砂岩、砾岩砂砾岩、具有岩溶的可溶性岩层以及坚硬脆性结构面多的岩层,不能作为隔水关键词。因此,在强富水的东部矿区或生态环境较为脆弱的西部矿区,煤矿开采过程中,充分利用上覆或下伏的隔水关键层,通过采取一定的开采措施,控制隔水关键层的破坏程度和范围,能够实现保水开采。

### 1.4 利用隔水关键层进行保水开采的基础理论

对于顶板保水而言,主要是通过采取特定的回采工艺和岩层控制措施,如限厚开采、条带开采、充填开采、覆岩离层注浆等,来控制导水裂隙带的发育高度,保护隔水关键层,实现保水开采。目前主要根据不同条件下冒落带、裂隙带的发育规律,在生产实践中采用实测的经验公式<sup>[8]</sup>。

对底板保水开采的理论的研究主要集中在对底板岩层突水的预测上,预测模型主要有,关键层理论、突水系数理论和“下三带”理论<sup>[5,9-10]</sup>。

(1)关键层理论。将底板采动破坏带以下及含水层以上承载能力最大的一层岩层称为地底板关键层,而在底板隔水层中起关键控制作用的关键层,称为底板隔水关键层。对采场底板突水机理的研究简化为底板关键层破断条件及破断后各岩块平衡关系的研究,采用“砌体梁”结构的滑落失稳与回转失稳

分析方法对底板关键层破断块体的稳定性做出分析,从而对底板突水危险性做出评价。

(2)突水系数法。突水系数法首先于 20 世纪 60 ~ 70 年代,由我国煤炭科学总院西安勘探分院的科技工作者在借鉴保护层理论和相对隔水层厚度的概念后提出,定义突水系数的概念为单位厚度隔水层所能承受的极限水压值。但这一理论模型仅仅考虑了隔水层的厚度,而反映隔水层强度不等、抗水性能各异的岩层复合特征,在公式中并没有反映出来。后经各国科技工作者的共同努力,把突水系数公式中底板隔水层厚度等效于按照各岩层厚度在下伏岩层中所占的比例进行加权平均。即:

$$T = p / M_c \quad M_c = M \sum_{i=1}^n M_i$$

式中,  $T$  为突水系数,  $\text{MPa/m}$ ;  $p$  为隔水层底板承受的水压;  $M_c$  为底板隔水层的等效厚度;  $M$  为底板隔水层的实际测量厚度,  $\text{m}$ ;  $M_i$  为底板隔水层的强度比值系数;  $M_i$  为底板隔水层中第  $i$  层厚度的百分比;  $M_i$  为底板隔水层中第  $i$  层岩石的强度比值系数。

事实上,煤层底板突水机理很复杂,影响因素也较多,上述公式仅考虑底板隔水层厚度、强度和水压,而没有考虑矿山压力对底板隔水层的破坏和影响。

(3)“下三带”理论。“下三带”指在矿压和水压共同作用下,底板隔水层发生变形和破坏形成的“三带”,分别为矿压破坏带、有效隔水层和承压水导水带。综合考虑各种因素,底板隔水层突水系数按下式计算:

$$T = p_c / (M \sum_{i=1}^n M_i - M_1 - M)$$

式中,  $p_c$  为导升水的残余水压;  $M_1$ 、 $M$  分别为矿压破坏带高度和原始导高带厚度,  $\text{m}$ 。

突水系数的临界值  $T_{\text{临}}$  对于预报底板突水危险性具有决定作用。由于不同矿区水文地质条件、底板岩石性质和组合以及采矿影响差异较大,并且这些因素随时间、空间也在发生变化,故  $T_{\text{临}}$  具有显著的区域性、时效性。通常根据不同矿区的实测资料统计确定突水系数临界值,并不断地统计计算和修改。

## 2 隔水层关键层水文地质概念模型

基于水文地质学和保水采煤理论,隔水关键层的水文地质模型可以概括为以下几种:

(1)粘土层、砂质页岩或泥岩及其互层。表征岩土体透水性的重要指标是渗透系数  $K$ ,其主要取

决于岩石的粒度、成分、颗粒排列、充填状况、裂隙性质及其发育程度。粘土层、砂质页岩或泥岩的特点是空隙小而密,连通性差,透水性小,渗透系数为  $K = 0.001 \sim 1 \text{ m/d}$ ,且在后期的构造运动或受采动影响不易产生破裂。若其覆盖煤系地层之上,在一定的采动程度下,能有效地限制导水裂缝带的发育高度,使空隙潜水含水层不受破坏,达到保水开采的目的。其水文地质概念模型如图 2(a)。

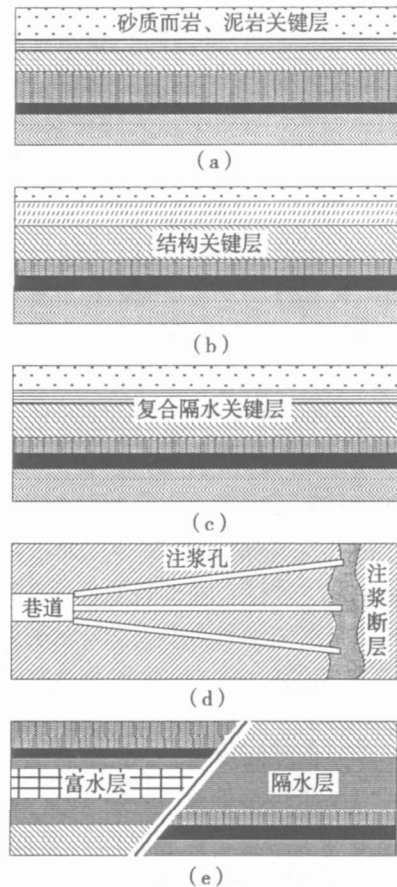


图 2 隔水关键层水文地质要领模型

(2)结构关键层作为隔水关键层。即文献 [6] 所提到的隔水关键层,假设煤层上部含水层在结构关键层的上方,或煤层下部含水层在结构关键层的下方,如果结构关键层采动后不破断,则结构关键层可起到隔水作用,同时就是隔水关键层;如果结构关键层采动后会发生破断,但破断裂隙被软弱岩层所充填,不形成渗流突水通道则结构关键层与软弱岩层组合形成复合隔水关键层。在煤层开采过程中,应充分利用该类型隔水层,能在保水方面起到事半功倍之效,大大节约人力、财力和物理。其水文地质模型图如 2(b)。

(3)复合隔水关键层,即由 (1)和 (2)两种模式

复合而成。具有此种地层结构的岩层,水资源保护则非常有效。事实上,即使在煤矿开采过程中,由于矿山压力的作用使结构关键层失稳破断,导水裂隙带继续向上发育,当发展到第四系粘土层或砂质页岩时,由于其岩性较软、柔韧性较强,能有效地阻止导水裂隙带继续向上发育,保护其上的含水层。其水文地质模型如图 2(c)。

(4)人造隔水关键层。帷幕注浆截是人造隔水关键层的典型,实质是在含水层段中尽量垂直地下水流动方向注浆建造地下“帷幕”,拦截强地下水流入矿区或采掘区外,减少含水层段的侧向补给水量,使矿区或采掘区的动态涌水量大幅度减少,进而易于疏干,防治矿井水害的发生<sup>[9]</sup>。在应用上具有一定的前提条件,其一是矿井主要充水含水层的动态补给水量大且稳定,采用疏水技术难以疏干或经济上不合理。其二是矿井导水通道位置明确且相对集中。水文地质模型如图 2(d)。

(5)隔水断层形成隔水关键层。断层对水文地质条件的控制作用,有不利的一面,也有有利的一面。不利的是它本身的含水性及导水性以及形成了岩系力学强度的薄弱环节。这里指的主要是断层能形成隔水边界。天然条件下,断层的形成要经过破裂与错动 2 个力学过程。隔水断层多是在挤压力作用下沿着剪裂面发生错动而形成的,它起阻隔地下水运动的作用。断层一般通过 2 种形式形成隔水关键层。一是断盘阻水。由于断层而使岩层错动,含水层与隔水层直接接触,阻隔了含水层的水力联系,形成采煤的天然地下挡水墙。在此情况下,断层一盘富水,一盘阻水,若断层破碎带密合良好,则起到良好的隔水作用;另一种就是断层带作为隔水关键层,它能把统一型水体分割成彼此独立的分散型水体。在含煤地层中,一些压性、压扭性断层,开启程度小,岩石强烈挤压形成糜棱岩、断层泥,或是张性断层被后期不透水的物质所充填,也能起到较好的隔水作用。水文地质模型如图 2(e)。断层的导水性和隔水性取决于断层及其所切割岩层的力学性质。张性、剪性、张剪性断层的导水性好,而压性、压剪性断层导水性差。而影响断层隔水性的最重要的因素是断层所切割的岩层的岩性。当岩性软弱时,即使是张性、剪性、张剪性断层,也可能具有较好的隔水性<sup>[11]</sup>。

### 3 影响隔水关键层隔水性的因素

影响煤层覆岩隔水层破坏的因素主要有以下几

个方面:

(1)开采厚度和采煤方法。一般导水裂隙带的发育高度随采厚的增加而增大,随分层开采数目的增加而减小。顶板管理的垮落法对覆岩破坏最为严重,充填法次之,条带法介于二者之间。

(2)覆岩岩性。岩性是评价隔水层和隔水层组的最重要依据,影响岩层或土层隔水性能的因素主要有组成岩石和土层的颗粒大小及级配、胶结物性质和胶结形式等<sup>[10]</sup>。对于岩层来说,凡泥岩、页岩、砂质页岩等松散柔韧性岩层,都是良好的隔水层或相对隔水层。

(3)岩层结构。一般而言,煤层直接顶至老顶全由多层结构的坚硬岩层组成时,一旦被破坏,导水裂隙带发展的相对较大;若为多层结构软弱岩层组成时,则导水裂隙带不发育或发育高度较低。研究表明,上覆围岩结构有隔水层时,特别是煤层直接顶有 50 m 以上的砂页岩层,岩层完整,隔水性和力学性质良好,则导水裂隙带不发育。

影响煤层底板隔水层破坏的因素主要取决于工作面的矿压作用,其影响因素有开采深度、煤层倾角、煤层开采厚度、工作面长度、开采方法和顶板管理方法;其次是底板岩层的抗破坏能力,包括岩石强度、岩层组合及原始裂隙发育状况等;最后是承压水压力的作用。

## 4 结 论

(1)提出了广义隔水关键层的概念,即在煤矿开采过程中,上覆或下伏岩层中能有效地起到隔水作用的岩层、结构体或者人造隔水构筑物,这些都可以称作隔水关键层。

(2)得出了隔水关键层与保水采煤的关系,煤系地层中赋存隔水层是实现保水开采的必要条件,保水开采为成功实现含水层再造开辟了新途径。在强富水的东部矿区或生态环境较为脆弱的西部矿区,充分利用煤层上覆或下伏的隔水关键层,运用隔水关键层隔水的基本理论,能够实现保水开采。

(3)基于水文地质学和地层结构理论,提出了五种隔水关键层水文地质概念模型,粘土层、砂质页岩或泥岩及其互层;结构关键层作为隔水关键层;复合隔水关键层;人造隔水关键层;隔水断层形成隔水关键层。在实践中利用天然隔水层,可以实现开发煤炭资源和保护宝贵的地下水资源二者的有机统一。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 许家林, 钱鸣高. 绿色开采的理念与技术框架 [J] 科技导报, 2007, 25(7): 61 - 65.
- [3] 屠世浩,陈宜先. 探讨绿色开采技术 保护矿区生态环境 [J] 能源环境保护, 2003, 17(4): 10 - 13.
- [4] 余学义,黄森林. 浅埋煤层覆岩切落裂缝破坏及控制方法分析 [J] 煤田地质与勘探, 2006, 34(2): 18 - 21.
- [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] 缪协兴, 陈荣华, 白海波. 保水开采隔水关键层的基本概念及力学分析 [J] 煤炭学报, 2007, 32(6): 18 - 21.
- [7] 张发旺,周骏业,申保宏. 干旱地区采煤条件下煤层顶

板含水层再造与地下水资源保护 [M] 北京:地质出版社, 2006.

- [8] 国家煤炭工业局. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程 [M] 北京:煤炭工业出版社, 2000.
- [9] 庞渭舟,刘维周. 煤矿水文地质学 [M] 北京:煤炭工业出版社, 1985.
- [10] 卫修君,邓寅生,郑继东,等. 煤矿水的灾害防治与资源化 [M] 北京:煤炭工业出版社, 2008.
- [11] 煤炭科学研究院北京开采研究所. 煤矿地表移动与覆岩破坏规律及其应用 [M] 北京:煤炭工业出版社, 1981.

作者简介:李春意(1979 - ),男,河南周口人,博士研究生,主要从事开采沉陷与保水开采方面的研究。

(收稿日期:2008 - 10 - 09;责任编辑:郭瑞年)

(上接第 10 页)

析,放顶煤开采厚煤层比薄煤层更具有突出危险性。

## 6 结 论

探索了采高 2.5 m 采放比 1:3 时,原始煤体瓦斯压力 2 MPa 条件下,顶煤初次垮落过程煤体瓦斯渗流演化和内能变化,经过数值计算及理论分析,得出如下结论:

(1)顶煤初次垮落后产生了自由面,第二次垮落从放煤口到煤体深部 4 m 范围,瓦斯压力数值较低。

(2)工作面前方卸压区瓦斯压力变化梯度大,在应力集中区瓦斯压力较高,但是压力变化梯度小;初放期在工作面前方附近首轮循环放顶煤形成的瓦斯压力梯度比第二轮循环形成的瓦斯压力梯度大。

(3)在顶煤放落之前,应加强工作面前方煤体瓦斯抽排工作,使应力集中区往煤体深部运移,防止近工作面区域煤体产生较大瓦斯压力梯度,有利于工作面安全回采放顶。

(4)顶煤初次放落时厚煤层具有更高的瓦斯膨胀能,厚煤层比薄煤层更具有突出危险性。

## 参考文献:

- [1] 胡千庭. 煤与瓦斯突出的力学作用机理及应用研究 [D] 徐州:中国矿业大学, 2007: 83 - 85.
- [2] 李树刚. 综放开采围岩活动及瓦斯运移 [M] 徐州:中国矿业大学出版社, 2000 5: 189 - 192.
- [3] 周世宁,林柏泉. 煤层瓦斯赋存及流动规律 [M] 北京:煤炭工业出版社, 1998.
- [4] 朱连山. 关于煤层中的瓦斯膨胀能 [C] //煤炭科学研究总院重庆分院论文选集. 北京:煤炭工业出版社, 1990: 128 - 131.

作者简介:夏永军(1976 - ),男,汉族,重庆万州人,硕士,工程师,2001年毕业于辽宁工程技术大学,现在煤炭科学研究总院重庆研究院从事煤矿瓦斯动力灾害防治方向的研究工作,发表论文 5 篇。

(收稿日期:2008 - 10 - 11;责任编辑:郭瑞年)

