

文章编号:1001-1986(2006)01-0041-05

# 煤层覆岩与地下水在采动损害中的互馈效应探讨

夏玉成,雷通文,白红梅

(西安科技大学地质与环境工程系,陕西 西安 710054)

**摘要:**地下水的存在可以改变岩体的力学性质及覆岩应力状态,从而加剧由地下采煤诱发的地表变形、塌陷、地裂缝及水资源流失等采动损害现象;在采动损害过程中产生的覆岩中隔水层破断,又反过来改变地下水系统,引起井下突水事故和地面环境恶化。两者相互影响、相互制约,形成有利于采动损害发生、发展的互馈效应。在研究采动损害时,地下水是一个不可忽略的重要因素。

**关键词:**煤矿区;地下水;采动损害;数值试验

**中图分类号:**TD163.1;P642.26 **文献标识码:**A

## Discussion of interaction between cover rocks and underground water in environmental hazards induced by coal mining

XIA Yu-cheng, LEI Tong-wen, BAI Hong-mei

(Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Underground water may change the mechanics qualities and stress state of the cover rocks on the coal-mined bed, aggravating environmental hazards induced by coal mining such as deformation, subsidence, crevasse of the ground and loss of water resource. During environmental hazards induced by coal mining result in the fracture of water-lock rock layers and the change of the motion system of underground water so that cause mine flood and deterioration of ground environment. Interaction of the both factors makes for happening and developing of environmental hazards induced by coal mining. Therefore, underground water is an important factor, which cannot be ignored in studying environmental hazards induced by coal mining.

**Key words:** coal mining area; underground water; environmental hazards induced by coal mining; digital test

## 1 引言

因为煤矿的井工开采,打破了煤矿区原有的应力平衡状态,使得上覆岩层只有通过发生移动变形才能达到新的平衡,从而在地表表现出各种环境损害现象甚至地质灾害,主要表现为地表变形、塌陷、地裂缝及水资源流失等。煤矿区采动损害的程度主要由构造介质、构造界面和构造应力等因素控制<sup>[1]</sup>。其中,构造介质,即开采煤层上覆岩土体(以下简称覆岩)是采动损害的重要控制因素之一。当覆岩中有地下水赋存时,岩体的力学性质及地应力状态与无水时有很大差异,这种差异对采动损害的发生、发展具有重要意义。另一方面,随着地下采空区扩大,在覆岩中形成的冒落带、裂隙带逐步上升,使原有的隔水层断裂,必将改变地下水原有的赋存条件或运动模式。本文分析了煤矿区井工开采对地下水资源

的影响和破坏机理,同时,应用数值模拟试验对比等方法,探讨了地下水对采动损害的控制作用。

## 2 煤矿区地下水系统的特点

a. 含煤岩系及其上覆岩层一般以沉积岩为主。由于在其形成过程中沉积环境的变迁,含煤岩系及其上覆岩层是由不同性质的岩层交替叠覆构成的系列,所以,不同性质的岩层表现出不同的水文地质特性。有的岩层具有较强的含水性能,如砾岩、砂岩、风化岩层等,属于含水层;有的岩层,如泥岩层等,则只能少量含水或不含水,从而成为地下水运移的屏障,属于覆岩中的隔水层。因此,从开采煤层上到地表,往往可以有多个含水层、隔水层交替出现。根据其赋存条件,地下水可分为浅层水和深层水两类<sup>[2]</sup>。

b. 浅层水又称潜水,主要赋存于第四系含水

收稿日期:2005-03-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40472104)

作者简介:夏玉成(1957-),男,甘肃武威人,西安科技大学教授,主要人事地质工程与环境保护研究。

层,包括山前、河谷、山间冲积含水层和黄土含水层等松散沉积物中,常以基岩为隔水底板。此类含水层较为疏松,含水类型主要为孔隙水。由于埋藏较浅,该类含水层易于得到大气降水和地表水的补给。潜水面的高低受补给水量多少及地表高程变化的控制。在水资源极为贫乏的西部旱塬、荒漠地区,例如陕西北部—内蒙古西部某矿区,潜水稀少,潜水面较低,地表沉陷对其影响不大;在水资源丰富的东部盆地、平原地区,例如山东兖州某矿区,潜水面往往位于地表附近,如果地表发生弯曲下沉,潜水面就可能高出地面,形成地表水域,引起生态环境改观。

c. 深层水主要赋存于基岩含水层,含水类型主要为裂隙水和岩溶水。深层水空间分布不均一,动态变化较复杂,一般与大气降水关系不密切。由于构造变形的影响,被封闭在上、下两个隔水层之间的地下水具有水头压力,成为承压水。煤层可能位于承压水之上,也可能位于承压水之下,一旦隔水层遭到破坏,就有可能造成井下开采煤层的顶板或底板突水事故。

d. 一个地区含水层、隔水层的组合形式和赋存状态决定了该地区地下水的补给区、径流区、排泄区的分布及地下水的运动规律,形成与所在区域地层、构造条件相适应的比较稳定的地下水系统。当构造条件发生改变时,地下水系统将产生相应的变化,以达到新的平衡状态。其中,对地下水系统影响最大的是断层。

e. 断层对地下水系统的影响程度由断层的性质、规模、形成的时代、两盘伴生裂隙的发育程度、两盘岩层的对接组合状况、所切割地层的岩性和富水性等因素综合确定。断层对地下水的控制表现在以下几个方面:a. 切割岩层,破坏岩层的完整性,在隔水层中形成破碎带,成为新的含水空间;b. 张性断层本身在天然状态下即是导水通道,特别是那些断层带较宽或产生的裂隙带较宽时,其导水的可能性更大;c. 使断层两侧的含、隔水层产生新的组合,改变煤层的直接充水含水层的补给条件;d. 断层可能使煤层与含水层对接或接近,增大含水层向矿坑充水的可能性;e. 因为在勘探过程中无法查清小断层的分布及其充水状况,开采过程中难以及时回避或提前采取防范措施,煤矿区突水一般发生在小断层附近。

### 3 煤炭井工开采对地下水系统的影响

煤炭资源开采对地下水的影响可分为两个阶段:在开采之前,为保证安全采矿,需要预先排水,对

威胁矿井安全生产的地下水进行人工疏干;在开采过程中,采动引起的裂隙在覆岩中形成新的导水通道,或破坏隔水层的隔水性能,使地下水向矿井中渗流。下面重点分析在煤矿开采过程中,人为地质作用引起的地下水渗流机理及其对地表生态环境产生的恶化效应。

#### 3.1 地下水向煤矿采空区渗流的机理

煤层开采导致上覆岩层产生移动变形和断裂破坏,在采空区顶板以上出现冒落带、导水裂隙带和弯曲下沉带,俗称“三带”。“三带”发展高度与采厚、顶板管理方式等采矿因素及覆岩力学性质、构造界面(节理、断层)的发育程度、构造应力等地质因素密切相关。由于覆岩变形形成的导水裂隙带具有较强的导水性能,当其发展到与含水层贯通时,含水层中的地下水就会沿裂隙发生渗流。但渗流程度的强弱受裂隙形成机制的控制,因而,表现出明显的分区性。

根据材料力学理论,可以把单一岩层看作具有一定厚度和强度、并承受其上部岩层自重应力的“板”,二维上看作“梁”。当其下部失去支撑时,形成“简支梁”结构。在工作面推进距离很小时,所受应力在该岩层强度可承受的范围内,仅发生小量弯曲变形;随着工作面的推进,支点跨度增大,所受应力也将增加;当其所受应力超过岩层强度极限时,便发生破裂甚至断裂破坏。在采空区两端,失去支撑的顶板与煤壁顶板之间产生强烈的剪切应力,易形成张性裂隙;在采空区上方的顶板表面,则由于岩层下弯而受挤压应力作用,可使早先形成的张性裂隙闭合。覆岩为多岩层组合结构,其应力—应变分布形式如图 1 所示。可以看出,在采空区两端形成的张性裂隙,为地下水渗流提供了通道。

运用东北大学岩石破裂与失稳研究中心开发的 RFPA 软件进行数值模拟试验(参数见表 1),得到如图 2 所示的渗流图。从图 2 可以看出,地下水的渗流集中在采空区的两端,渗透系数最大可达  $6\text{m/d}$ ;而在采空区中部,渗透系数很小或几乎不发生渗透现象。数值试验结果与上述理论分析的结论和生

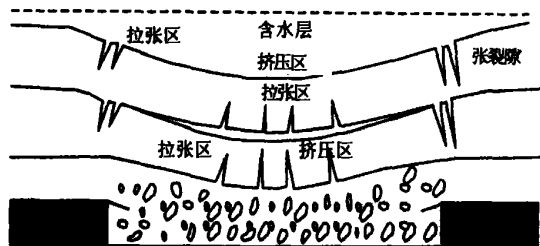


图 1 覆岩应力—应变分区示意图

Fig. 1 Sketch map of stress-strain subareas in cover

表 1 两种模型公用的力学参数及有水模型的水文参数

岩层名称	厚度/m	弹模/MPa	抗压强度/MPa	泊松比	重力密度/ 10 <sup>-5</sup> N·mm <sup>-3</sup>	内摩擦角(°)	渗透系数/m·d <sup>-1</sup>		孔隙率/%	水头/m
							水平	垂直		
松散层	11	50	0.5	0.4	2.02	40	10	15	2	11
粉砂岩	2	3 600	21.4	0.26	2.43	34	6	9	1	13
中粒砂岩	6	4 050	37.5	0.25	2.40	32	0.5	0.8	0.5	19
砂质泥岩	3	4 150	38.5	0.23	2.44	30	0.05	0.1	0.3	22
粉砂岩	4	5 100	48.3	0.21	2.51	34	0.08	0.5	0.3	26
泥岩	4	4 100	38.3	0.24	2.42	32	0.05	0.1	0.3	30
煤层	4	2 230	14.8	0.28	1.33	33	0.06	0.3	0.5	34
粉、细砂岩	4	4 050	37.5	0.23	2.41	38	0.05	0.4	0.5	38

生产实际中观测得到的现象是一致的。

3.2 开采沉陷对地下水系统的改造效应

a. 在地下水比较丰富的地区,如果在采动覆岩中能形成弯曲下沉带,潜水下的隔水层未遭到破坏,则一般不会造成浅层水资源流失,但往往会引起生态环境的改变。在潜水位很高时,采煤沉陷引起地面高程相对下降,导致潜水位高于地表或接近地表,地下水变为地表水,使原来的耕地变为水域、沼泽或盐渍地,农民失去土地,或使农作物减产。例如,山东兖州矿区某矿 3 号煤开采后,地表沉陷量一般为 6~8 m,而该地区的地表潜水位一般为 3~5 m,所以开采后地表沉陷积水,造成农田绝产。每开采 1 万 t 煤,损失农田约 1.1 ha,全矿区每年产煤 2 000 万 t,则每年损失农田约 200 ha。截止目前已使其所在镇本来就十分珍贵的良田有一半以上变成了深达 10 m 左右的水域,既无法耕种,也无法利用。在干旱或季节干旱地区,当地下水位上升到离地表 1 m 左右时,土壤毛细管作用就可将地下水提升到地面。上升的地下水将土壤里的钙、钠、镁等盐类带到地表,待水分蒸发后,这些盐类就在地表聚集,造成土地盐渍化。

b. 如果潜水下的隔水层遭到破坏,导水裂隙带与上覆含水层沟通时,含水层中的水沿采动裂隙流向采空区,不仅会导致水资源流失,而且易引发井下水害。例如,神府矿区最大的井工矿井——大柳塔煤矿地表变形严重,地裂缝十分发育,最宽达 2 m 多,深 10 m 多,最大塌陷深度 6.5 m。而窟野河两岸大小煤矿连片开发,造成窟野河支流母河沟、王渠、三不拉沟等较大沟流从 1997 年以来陆续干枯断流,致使黄河的一级支流——窟野河在 2000 年断流 75 d,在 2001 年断流 106 d。鄂尔多斯高原最大的内陆湖、水域面积达 56 km<sup>2</sup> 的红碱淖,5 a 来水位下降 2 m 多 湖区周围 50 km 范围内地下水位下降 1.81 m。同时,“涌水溃沙”成为困扰陕北煤田开发的主要井下灾害。对于干旱地区来说,本来水资源就

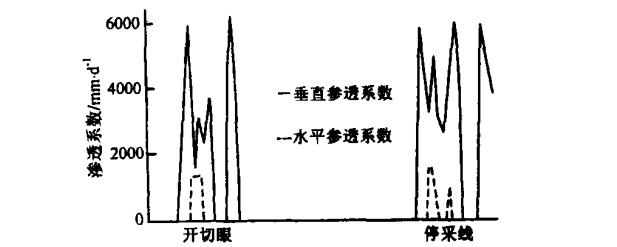


图 2 顶板渗透系数的变化

Fig.2 Change of seepage coefficient in top rock  
极为缺乏,地下水流失对人类生产、生活及环境更是“雪上加霜”。由于地表及地下水向深部渗漏,导致土壤湿度减小,沙化现象日益严重。

c. 煤炭开采导致地下水系统的水-岩相互作用以及所处化学环境发生改变,造成矿区水资源的污染。开采形成的导水裂隙使地下水向采空区汇集,原有的地下水环境化学平衡遭到破坏,氧化作用和生物化学作用加剧,岩石淋蚀作用加强,致使地下水化学成分发生变化。矿坑水中含有煤屑、岩屑、油污等有机和无机悬浮物质,矿化度提高,有毒有害组分浓度增大。未经处理的矿坑水向地表排放,既浪费水资源,又污染矿区地下水和地表水,导致供水系统水质恶化。

4 地下水对矿区采动损害的控制作用

岩体裂隙与孔隙中的地下水活动是影响绝大多数岩体工程稳定性的主要因素。据统计,90%的岩体工程失事都与地下水的活动有关,因此,研究岩体中的地下水活动及影响规律,已成为岩土工程界普遍关注的课题。同样,地下水也是影响煤矿区采动损害的重要因素之一。

4.1 地下水对煤矿区采动损害的控制机理

4.1.1 地下水对覆岩具有软化效应

开采煤层的上覆岩系是采动损害形成与发展的介质,采动损害的强弱在很大程度上取决于覆岩的力学性能。但水的加入会使岩石中分子活动能力加

强,在岩石孔隙、裂隙中的液体或气体产生孔隙压力,抵消一部分作用在岩石内部任意截面的总应力,使岩石的弹性屈服极限降低,易于塑性变形,同时还会降低岩石的抗剪强度,使岩石剪切破坏。实验证明,随着含水量增加,岩石的单轴抗压强度和弹性模量均急剧降低。例如,细粒石英砂岩在无水时的单轴抗压强度和弹性模量分别是 142.5 MPa 和 73.33 GPa,而在含水量为 0.35% 时,单轴抗压强度和弹性模量分别降到 44.56 MPa 和 23.28 GPa<sup>[3]</sup>,岩石强度降低约三分之一。通常,岩石中亲水矿物质量分数越多,其力学性质越不稳定。对于含亲水矿物的岩石,当含水量低时,岩石强度较高,压缩性小,呈脆性破坏,具有弹性介质的特征;而含水量高时,则岩石强度降低,表现为塑性介质破坏特征。此外,地下水在岩石中渗流的过程中,可将岩石中的可溶物质溶解带走,甚至将岩石中的小颗粒冲走,从而使岩石强度大为降低。赋存在岩石孔隙、微裂隙中的水,在冻融时产生的胀缩作用也会使岩体的连续性遭到破坏,从而降低其力学强度。

#### 4.1.2 地下水对覆岩具有增重效应

地下水充满岩体的孔隙,自然会加大岩体的自重,这就相当于增加了采空区顶板和覆岩中关键层所承受的垂向应力。显然,在这种情况下,地下开采更容易引起上覆岩层的移动变形以及地面沉陷。要保持覆岩的稳定状态,必须减小工作面的临界长度。

#### 4.1.3 地下水对覆岩具有应力效应

赋存于岩体中的地下水,对岩体将产生一定的应力效应。在重力作用下产生静水压力;承压水具有巨大的水头压力;在渗流过程中,对通道壁产生动水压力。由于岩体中地下水的浮托力作用和孔隙水压力的存在,将使得岩体中结构体之间的有效接触压力减小,使岩体抗剪强度降低。

正是因为地下水具有上述效应,所以,当覆岩中有地下水存在时,必将显著地降低煤矿区地质环境的承载能力<sup>[4]</sup>,使采动损害更容易发生。

### 4.2 地下水与采动损害关系的数值试验

为了进一步验证地下水对采动损害的控制作用,分别建立有水模型( $W_1$ )和无水模型( $W_0$ ),运用 RFPA 软件进行数值模拟试验。有水模型( $W_1$ )所采用的覆岩结构及力学、水文参数见表 1。为了保证试验结果的可对比性,无水模型的覆岩结构、力学参数及其他各种条件与有水模型完全一致,均以每步 3 m 的开采速度模拟地下开挖,区别仅在于假设没有地下水存在。

对无水模型进行模拟开挖试验,当开挖到第 8

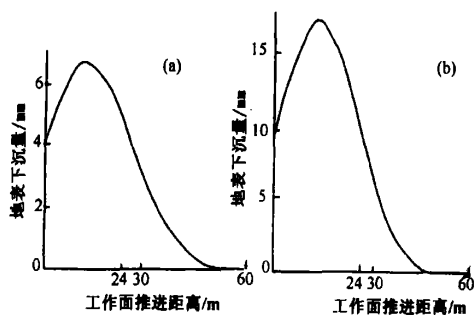


图 3 工作面推进 24 m 时的地表下沉曲线

Fig.3 Curve of surface subsidence while workface advancing 24 m

a——无水模型;b——有水模型

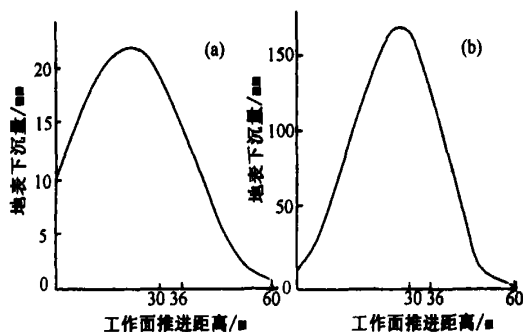


图 4 工作面推进 36 m 时的地表下沉曲线

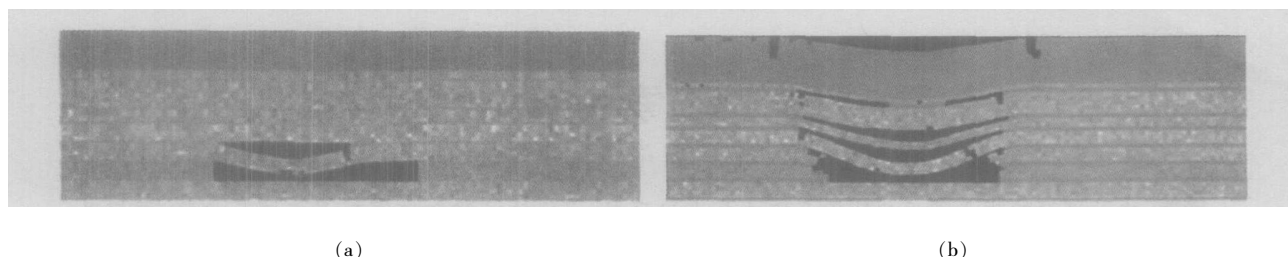
Fig.4 Curve of surface subsidence while workface advancing 36 m

a——无水模型;b——有水模型

步(相当于工作面从开切眼向前推进 24 m)时,采空区上覆岩层发生轻微的移动变形,地表最大下沉量仅有约 7 mm,地表下沉曲线如图 3a 所示。因为此时地表垂向位移量小于 10 mm,可认为地表地质环境尚未受到采动损害。对具有同样地质、开采条件的有水模型进行模拟开挖试验,当工作面从开切眼向前推进到 24 m 时,由于有地下水作用,地表最大下沉量达到了 17 mm,地表下沉曲线如图 3b 所示。显然此时地表地质环境已经遭到了采动损害。

当开挖到第 12 步(相当于工作面从开切眼向前推进 36 m)时,无水模型采空区上覆岩层移动量增加,地表最大下沉量大于 12 mm(图 4a)。但在同样的地质、开采条件下,有水模型采空区上覆岩层的移动变形要剧烈得多,地表最大下沉量超过了 170 mm(图 4b)。

与此同时,无水模型中的煤层顶板泥岩发生冒落,并与其上面的粉砂岩层之间出现离层,再往上,覆岩未遭到明显破坏(图 5a);而在有地下水存在的情况下,顶板冒落范围更大,上覆岩层中形成大量的垂直裂隙和离层裂隙,松散层及地表出现较大幅度的弯曲下沉,并在采煤沉陷盆地边缘附近产生拉张裂缝(图 5b)。



(a) (b)

图 5 工作面推进 36 m 时的覆岩弹性模量图

Fig. 5 Elastic modulus of the strata while workface advancing 36 m

a——无水模型; b——有水模型

对比以上两个模型 采动损害数值试验结果还可发现:**a.** 如果主采煤层覆岩中没有地下水, 采动损害起动距(地表下沉量大于 10 mm 时工作面从开切眼向前推进的距离)大约为 30 m; 而在富含地下水的情况下, 采动损害起动距不到 20 m。**b.** 在不含地下水的模型中, 随着采空区的不断扩大, 地表下沉量比较缓慢地增加; 而当有地下水存在时, 随着采空区扩大, 地表下沉量增加很快。**c.** 在达到充分采动(本试验中, 工作面从开切眼向前推进 36 m)时, 如果主采煤层覆岩中富含地下水, 则地下开采对地表生态环境造成的破坏程度远比没有地下水时强烈。

## 5 结论

**a.** 煤炭井工开采引起开采煤层上覆岩系的移动变形, 并导致地表下沉、开裂、塌陷等采动损害现象, 必将在一定程度上改变煤矿区的水环境和地下水系统。采动损害可以使富水区的地下潜水变成地表水体, 也可以使干旱区的地表水通过裂缝渗入地下。当导水裂隙将覆岩中的隔水层破坏时, 采空区上覆含水层中的地下水沿着裂隙加速向采空区或深部岩体渗漏, 使水位降低, 甚至导致地下水疏干, 井泉干涸, 严重影响井下安全生产, 导致煤矿区生态环境恶化。

**b.** 地下水向采空区的渗流存在分区性。在采空区两端, 剪应力集中, 煤层覆岩中容易产生张性

裂隙; 在采空区中部的覆岩, 受挤压应力作用, 裂隙发育较少, 甚至可使先成裂隙闭合。因此, 在采空区两端更容易出现地下水的渗流现象或渗流强度较大。

**c.** 地下水对开采煤层的上覆岩系有软化、增重和应力效应, 因而能降低岩石的力学强度, 改变覆岩中的应力分布状态, 对采动损害起到明显的加快和加剧作用。

**d.** 地下水与开采煤层上覆岩系在采动损害中存在密切的互馈关系。实际上, 在煤矿区普遍存在地下水, 只是丰富程度不同而已。因此, 在研究采动损害时, 应将地下水作为一个不容忽视的重要因素, 以便更有效地预测和控制采动损害的发生, 更好地推进“绿色矿区”建设。

承蒙东北大学岩石破裂与失稳研究中心的软件支持, 谨致谢忱。

## 参考文献

- [1] 夏玉成. 构造环境对煤矿区地表环境灾害的控制作用[J]. 煤田地质与勘探. 2005, 33(2): 18—20.
- [2] 韩奉平. 试论北方煤矿区地下水源地评价[J]. 陕西煤炭. 2003, (3): 19—20.
- [3] 彭苏萍, 孟召平. 煤井工程地质理论与实践[M]. 北京: 地质出版社. 2002.
- [4] 夏玉成. 构造应力对煤矿区采动损害的影响探讨[J]. 西安科技学院学报. 2004, 24(1): 72—74.

## 《渭河盆地地热资源赋存与开发》出版

陕西省煤田地质局 186 队总工程师王兴编著的此书, 30 万字, 2005 年 10 月由陕西科学技术出版社出版, 是渭河盆地一部系统论述地热资源地质特征与开发利用的学术论著。全书共 11 章, 包括绪言、地热储层条件、地热构造条件、地温场特征及地热系统、热储层水文地质特征、地热地球物理特征、地热

地球化学特征、热储模型、地热资源评价、地热资源开发及环境影响评价、地热资源综合利用、结束语。本书内容丰富, 资料翔实, 是渭河地区地热开发利用的重要参考书。

(陕西省煤田地质局 范立民)