

文章编号: 1673-3363-(2012)05-0613-06

隔水层采动破坏裂隙的闭合机理研究及工程应用

徐智敏, 孙亚军, 董青红, 朱宗奎

(中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116)

摘要 煤层顶底板的采动裂隙是煤矿一系列灾害事故发生的根源, 对其发育及演化规律的研究对各类灾害事故的防治具有重要意义。论文借助现场超声波成像技术、室内岩石矿物成分分析以及岩石膨胀性实验等手段, 分析了影响煤层顶板采动裂隙闭合的相关因素, 揭示了顶板隔水层采动裂隙的闭合规律。结果表明: 顶板隔水层中的蒙脱石(包括伊/蒙混层)含量越高, 其膨胀程度越大; 隔水层距煤层顶板的距离越大, 膨胀程度亦越大; 在不发生顶板结构严重破坏的情况下, 当隔水层的体积膨胀率大于采动裂隙的发育率, 采动裂隙将实现有效闭合。最后, 通过在新安煤田水体下采煤岩体渗透性评价以及神东矿区水资源保护性开采中的工程应用, 对顶板采动裂隙的闭合机理进行了验证, 并取得了良好的应用效果。

关键词 顶板隔水层; 采动裂隙闭合; 水害防治; 水体下采煤; 保水采煤

中图分类号 TD 745

文献标识码 A

Closing Mechanism of Mining-Induced Fracture in Coal Mine Aquifuge and Its Application

XU Zhi-min, SUN Ya-jun, DONG Qing-hong, ZHU Zong-kui

(School of Resource and Geoscience, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract The mining-induced fractures in roof and floor are the origin of a series of mine disasters. Thus, the research on the development and evolution law of the fractures has great significance to the mine disaster prevention. To study the closing mechanism of mining-induced fractures in overburden aquifuge and the associated influencing factors, several research means, including the ultrasonic imaging technology, mineral composition measurement and expansibility experiment are introduced in this paper. The results show that the expansion rate of the overburden aquifuge shows direct proportion to the montmorillonite content (including mixed minerals of Illite and montmorillonite) and its distance to the coal seam roof. Meanwhile, when the overburden structure is not suffered a severe damage, if the expansion rate is greater than the development rate of fracture, the mining-induced fracture can be closed effectively. Finally, the research result has been successfully verified by the penetrability evaluation of coal mining under water body at Xin'an Coalfield and the water-preserved mining at Shendong Mining Area, and has achieved a good application effect in practice.

Key words overburden aquifuge; fracture closing mechanism; mine water inrush prevention; mining under water body; water-preserved mining

收稿日期: 2012-02-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2007CB209401); 江苏高校优势学科建设工程项目; 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2010QNB35)

作者简介: 徐智敏(1981-), 男, 四川省简阳市人, 讲师, 博士, 从事矿井水害防治、水体下采煤方面的研究。

E-mail: xuzhimin@cumt.edu.cn

Tel: 13775978891

我国煤矿群死群伤特重大事故主要由瓦斯和突水灾害造成,而采动裂隙则是这类灾害事故的根源。据统计,由于矿井水害事故造成的直接经济损失一直排在各类煤矿灾害事故之首,仅 2000 年来,全国就发生各类水害事故 500 余起,造成 2 800 多人丧生,直接经济损失更是高达数百亿元之多。

矿井突水事故防治的关键问题之一就是准确把握突水渗流通道,煤层采出后引起采场围岩变形破坏进而形成导水裂隙已得到了广泛的认识,国内外学者在这方面进行了大量的研究^[1-3],总结得出了导水裂隙发育高度计算的经验公式,提出了相应的防范技术措施等。同时,煤层采动后,采场围岩受到矿压以及自重力等的作用,不断破裂、垮落,形成导水裂隙,这种趋势伴随回采的进行不断向周围空间扩展并逐渐减缓^[4]。伴随着采动裂隙向周围空间扩展,裂隙波及到的水体或含水层渗流到导水通道,在此过程中,伴随着新裂隙的不断产生,原有采动裂隙又发生一系列的演化^[5-6],地下水流在裂隙的运移过程中势必引起周围岩体尤其是软弱岩的遇水膨胀,同时受到采动矿压等因素的影响,使得裂隙充填、堵塞,最终导致采动裂隙的闭合^[7]。采动裂隙形成后的这种随开采、应力、地下水侵蚀等条件的改变而再度闭合的机理对矿井防治水理论研究具有重要的意义,但是到目前为止,关于此类作用和机理的深入研究成果甚少。

鉴于上述分析,本文借助现场超声波成像技术、室内岩石矿物成分分析以及岩石膨胀性试验等手段对煤层顶板隔水层采动裂隙的理化特征、演化、闭合规律等进行系统研究,重点探讨隔水层采动破坏裂隙的闭合机理及影响因素,评价顶板隔水层的再生结构系统。本研究将对水体下采煤岩体渗透性评价、西部干旱半干旱地区水资源保护性开采等具有一定的指导意义。

1 采动裂隙的形成机制

煤层开采是人类在复杂的地质空间进行的采矿工程活动。由于采动破坏了煤层与围岩的原始平衡关系,煤层上覆岩层特别是煤层顶板岩体,因自身成份与结构形态的不同而呈现出不同的运移状态,最终形成新的结构与构造形态,以使自身趋于稳定,形成新的平衡。在这一过程中,煤层上覆岩层(包括松散层)中的地下水,随着岩层原始形态的改变,随之产生新的运动趋向,可能沿新产生的采动裂隙透入井下采煤工作面。采煤工作面是否透

水及透水的程度取决于采动裂隙是否互相连通以及互相连通的裂隙是否波及到水体(含水层)。

工作面采动后,由于煤层采空区上覆岩层特别是煤层顶板岩层离层破断运移、在煤层采空区上部岩层中自下而上形成冒落(或垮落)带、裂隙带和弯曲下沉带,即“上三带”的宏观结构形态。冒落带与裂隙带为破坏影响带,由于该带形成的岩层离层空间及破断裂隙具有开放性,可导水,故称为导水裂隙带。

2 隔水层采动裂隙闭合机理

煤层采动后,采场围岩受到矿压以及自重等作用,不断破裂、垮落,形成导水裂隙,这种趋势伴随回采的进行不断向周围空间扩展并逐渐减缓。同时,当采动裂隙成为地下水运移的通道时,地下水流冲刷会使裂隙进一步发育,导水能力进一步增强;与水流致裂导致岩石扩容相反,水流在裂隙中运移的过程中,自身携带的微粒物质由于流速的减缓或通道的变窄逐渐堆积,并对导水通道进行充填;另外,如果遇到膨胀性(塑性)岩层,岩石颗粒便会遇水膨胀,并不断胶结充填裂隙,致使裂隙闭合。研究表明,岩石的膨胀性和矿物成分对裂隙闭合具有重要影响。许多黏性土和泥质岩中含有大量蒙脱石类矿物,当遇水后引起岩体的体积变化。黏粒及膨胀性黏土矿物含量越多,遇水后越容易膨胀、胶结,充填裂隙,产生明显的裂隙闭合作用^[8]。

综上所述,采动裂隙闭合机制包括以下 3 种作用:工作面后方压应力区的压实作用、渗流携带物质的充填作用以及采动裂隙范围内软弱岩矿物遇水后的膨胀作用。

结合采动裂隙闭合特征,即使采动形成的导水裂隙一定程度上波及到上覆含水层,当水流在裂隙的运移过程中造成塑性岩层的膨胀,其岩体颗粒胶结,充填裂隙使其闭合。因此可以假设,即便导水裂隙波及到上覆稳定的隔水层,在不发生岩层结构严重破断的情况下,不会形成较大的导水通道使得上覆水体溃入工作面。

3 采动裂隙闭合规律的试验研究

黏性土和泥质岩中含有大量的伊利石、蒙脱石类矿物颗粒,这些颗粒的遇水膨胀,将引起岩体体积发生变化^[9]。本文将重点通过对泥岩层的矿物成分、膨胀性以及裂隙发育等方面展开研究,分析采动裂隙范围内软弱岩矿物遇水后的膨胀作用。

新安煤矿位于小浪底水库淹没区，库盆底部与主采煤层之间有 90m 以上的隔水层，其岩性多以泥岩、砂质泥岩、砂岩为主。本研究以该矿 11201 工作面覆岩结构中的特定岩样为研究对象，进行岩样成分分析和膨胀性测试，该工作面覆岩结构地层柱状如图 1 所示。



图 1 11201 工作面结构示意图

Fig.1 Overburden rock structure of 11201 working face

本次试验利用在该工作面布置的 3 个试验钻孔采取了 6 组岩样，利用 X 射线衍射仪、WZ-2 型膨胀仪等设备，对泥岩遇水的崩解软化机理进行测试和分析，样本见表 1。

表 1 该矿泥岩膨胀性试验样品清单
Table1 Expansibility test sample list of mudstone

编号	取样孔	岩性	取样深度/m	距煤层距离/m
1		泥岩	25	228
2	K3	泥岩	57	196
3		泥岩	140	113
4	Y1	砂质泥岩	217	37
5		泥岩	203	51
6	Y2	泥岩	209	45

其中，地面钻孔 K3 标高+267 m，孔深 240 m，为超声波测试孔，Y1，Y2 为井下仰孔。

3.1 矿物成分分析

塑性岩层中蒙脱石类、高岭石、伊利石等矿物有很强的亲水性，当其含水性变化时将发生显著的体积变化。通过 X 射线衍射图谱分析，组成泥岩的

物质成分以黏土矿物为主(含 84%~92%)，其余为石英、钾长石等。其中，5 号样品的分析图谱如图 2。

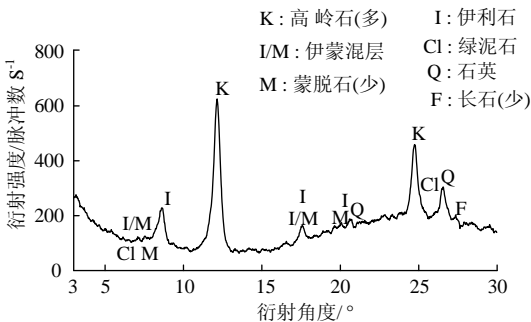


图 2 5 号样品的 X-射线衍射分析图谱

Fig.2 X-Ray diffraction analysis of NO.5 sample

对上述岩石样本进行黏土定性与相对定量测试分析，以确定岩样中各种矿物的成分及含量，从而为分析岩样的膨胀机理及对裂隙闭合的影响提供重要的依据。采用 D/Max-3B X-射线衍射仪对以上样品的分析结果如表 2。

表 2 黏土相对定量分析结果
Table 2 Contra-quantative analysis of clay

编号	I	I/M	M	Ch	K	备 注
1	6	28	4	3	59	I: 伊利石 (KAl ₂ (OH) ₂ (AlSi ₃) ₄ O ₁₀);
2	3	26	3	3	65	I/M: 伊利石/蒙脱石 (KAl ₂ (OH) ₂ (AlSi ₃) ₄ O ₁₀ /(Na,Ca) _{0.7} (Al,Mg) ₄ (OH) ₄ (SiAl) ₈ O ₂₀ nH ₂ O);
3	6	19	3	4	68	M: 蒙脱石 ((Na,Ca) _{0.7} (Al,Mg) ₄ (OH) ₄ (SiAl) ₈ O ₂₀ nH ₂ O);
4	16	5	2	2	75	Ch: 绿泥石 ((Mg,Fe,Al) ₆ (OH) ₈ (Si,Al) ₄ O ₁₀);
5	21	6	3	2	68	
6	20	6	5	2	67	K: 高岭石 (Al ₄ (OH) ₈ Si ₄ O ₁₀)

结合现场钻孔取样的岩样观察及描述，在相同条件下，蒙脱石(包括伊/蒙混层)含量越高，岩样表现为相对越破碎，力学性质越差。

3.2 膨胀性试验研究

塑性岩层的膨胀性指标是评价采动裂隙闭合趋势的重要依据之一。在裂隙张开后，隙壁泥岩处于卸荷状态，因此可采用钻孔取样切割后，在实验室通过无侧限膨胀浸泡试验来模拟自然条件下岩层遇水膨胀的变形过程。

图 3 为各岩样在遇水浸泡 5 min 后开始出现不同程度的体积膨胀曲线，结合表 1，岩样膨胀的总体趋势为随着其距煤层顶板的距离增大而加大。这对采动导水裂隙带末梢的脉状裂隙的闭合具有重要意义。试验结果表明：在一定含水量条件下，泥岩的膨胀程度与蒙脱石(包括伊/蒙混层)含量成正比关系，蒙脱石含量越多，泥岩的膨胀量越大。

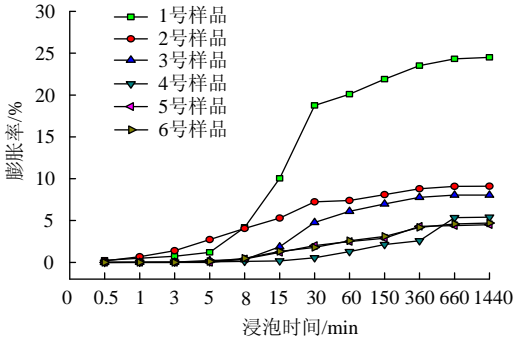


图 3 样品膨胀率与时间关系

Fig.3 Relationship between expansivity and time

可见，在不发生覆岩结构严重损坏的情况下，如果泥岩遇水后膨胀率超过实际裂隙张开度，结合

工作面后方压应力区的压实作用，则完全具有采后自动闭合的能力。

3.3 现场超声成像测试

超声成像技术测井是采用工作频率 1 MHz，直径 20 mm 的圆片压电陶瓷换能器向井壁发射超声波脉冲，然后测量回波幅度和传播时间。经计算机处理后，可直接观察出孔壁岩性、裂隙、层理、洞穴及钻孔几何形状的变化、深度及方位^[10-11]。观测孔布置于工作面推进前方，首先观测采动影响之前的原岩裂隙，然后在工作面推过后 1.5~3 个月内观测采动裂隙，通过前后 2 次观测结果比较判断采动裂隙发育范围，探测结果如图 4 所示。

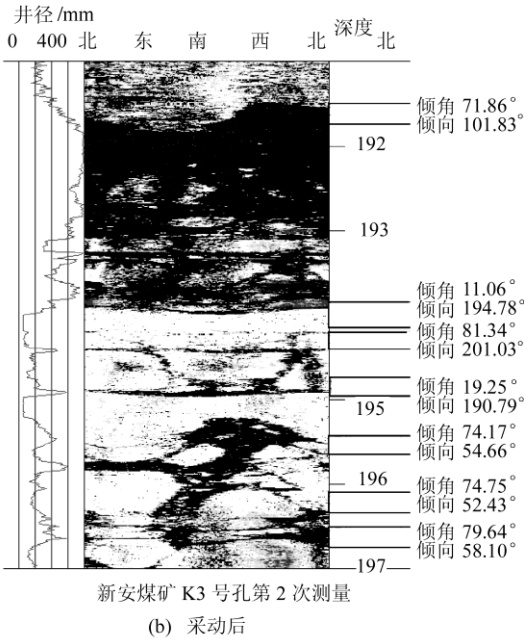
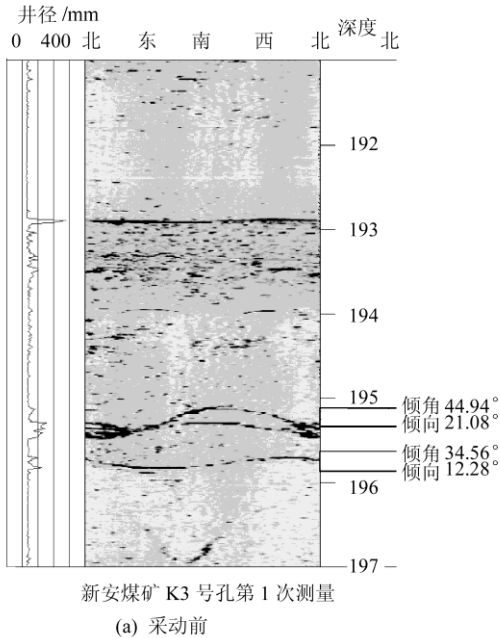


图 4 采动前后采裂隙发育对比图像

Fig.4 Comparison of overburden rock failure

结合上述超声波成像测试结果，将采动裂隙发育后一维裂隙张开度百分比率沿深度进行分段统计，11201 工作面在 K3 孔控制范围内导水裂隙带发育高度 59 m（孔深 194 m 以下）。同时，煤层采动后，采动裂隙发育沿深度加大有明显增强的趋势，如图 5 所示。

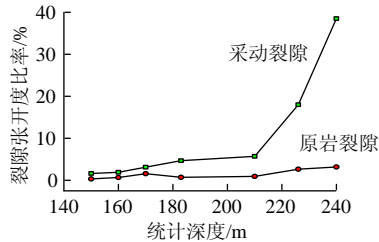


图 5 采动裂隙统计曲线

Fig.5 Fracture statistic curve of mining-induced fracture

根据膨胀性试验结果，煤层覆岩结构中塑性岩（位于工作面上方 44.5 m 处的泥岩段，孔深 202.1~209.5 m）遇水浸泡数小时后膨胀率平均在 4.95%，而统计图 5 中该段采动裂隙发育一维裂隙张开度平均为 3.72%。因此，在不发生覆岩结构严重损坏的情况下，即在采动裂隙带发育顶部，塑性岩体的体积膨胀可使得该层段以上位置形成的采动裂隙的有效闭合，从而增加实际隔水层的厚度。

4 工程应用

4.1 水体下采煤岩体渗透性评价中的应用

小浪底是我国特大型水利枢纽，2000 年水库蓄水后，水位达+275 m，使得新安井田 40%的面积处

于水库淹没区水体之下,水下压煤达 $8.0 \times 10^7 \text{ t}$ 。在新安矿水库下安全开采决策中,覆岩采动裂隙的形成及水体下采煤岩体渗透性评价是制订矿井水害防治决策的重要理论基础。根据中国矿业大学小浪底水库下采煤课题组研究成果^[3,8,12-13],采动形成的导水裂隙绝大多数都影响到了该区上覆稳定隔水层。

为了研究采动裂隙的演化规律,在11201工作面的回采过程中,对涌水量进行了实时观测,观测结果如图6所示。在最大采动裂隙形成之前,该工作面涌水量一直稳定在 $25 \text{ m}^3/\text{h}$ 左右,当采动裂隙范围发育到最大后,涌水量急剧上升,达到 $98 \text{ m}^3/\text{h}$ 。此后,随着工作面的不断推进,矿井涌水量逐渐减小,并稳定在 $30 \text{ m}^3/\text{h}$ 左右,在经过该工作面有效隔水层低值区时也没有再次出现涌水量增大的迹象。

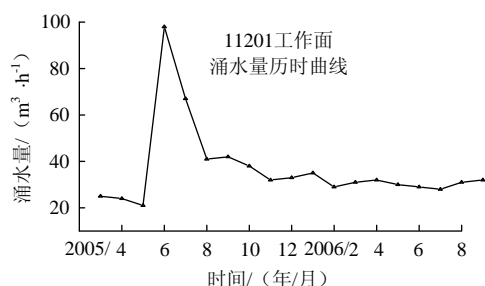


图6 11201工作面涌水量观测曲线

Fig.6 Curve of the 4mine water at 11201 working face

结合采动裂隙闭合机理分析认为,当采动裂隙扩散波及到上覆水体时,遇到具有膨胀性的岩体,并使其遇水膨胀充填裂隙通道造成裂隙闭合,从而使得裂隙形成的导水通道的过水能力降低,有效的阻止了上覆水体溃入工作面。

4.2 水资源保护性开采中的应用

我国西部地区煤炭储量丰富,据统计,仅2007年陕西、山西和内蒙的煤炭产量已达 $15 \times 10^8 \text{ t}$,占全国煤炭总产量的65%。位于3省交界的神东矿区煤层埋藏浅,主要含水层位于主采煤层之上,如不加以控制,大规模的煤炭开采活动有可能导致含水层破坏,造成潜水位下降、土壤沙化、水土流失等一系列问题。中国矿业大学保水采煤技术研究课题组近年来展开了系统研究,提出了适用于我国西部干旱半干旱地区不同水文地质结构条件的多种保水开采关键技术,形成了完整的水资源保护性开采理论与技术体系^[14]。

根据本课题的研究成果,当煤层顶板稳定隔水

层距离煤层较近,采动裂隙将成为主要的导水通道导通浅部含水层,进而造成神东矿区有限地下水资源的流失。根据本文的研究成果,要实现该区采动裂隙的有效闭合,实现水资源的保护性开采,即要确保顶板结构不发生严重破坏,通过控制煤层采厚的方式确保顶板冒落带控制在煤层顶板稳定隔水层之下。即使导水裂隙在采后的一段时间内将对隔水层造成影响,但是,当工作面推过一段时间后,随着隔水层中导水裂隙的逐渐闭合,将使得隔水层逐渐恢复隔水能力,从而实现地下水资源的保护。图7为课题组成员在补连塔矿31401工作面推进中S17观测孔的水位变化实测曲线图^[14]。

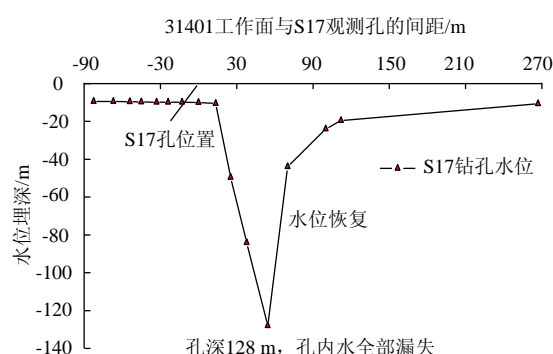


图7 采动裂隙闭合及水位恢复实测曲线图

Fig.7 Measured curve of the mining-induced fracture closing and water-level recovery

分析认为,煤层采动使得31401工作面覆岩中形成导水裂隙,并波及含水层,地下水位下降。由于隔水层具有塑性膨胀并实现采动裂隙闭合的性能,使得发育其中的导水裂隙随工作面推进而逐步闭合,恢复了隔水层的隔水能力,从而实现含水层水位恢复和水资源保护。

5 结 论

1) 研究了采动裂隙闭合机制的主要作用,包括工作面后方压应力区的压实作用、渗流携带物质的充填作用以及采动裂隙范围内软弱岩矿物遇水后的膨胀作用;

2) 通过采用超声波成像技术、室内矿物成分分析以及膨胀性试验等手段,研究了采动岩体裂隙闭合趋势与岩石的矿物成分、埋深以及膨胀率等因素的相关关系;

3) 结果表明:顶板隔水层中的蒙脱石(包括伊/蒙混层)含量越高,其膨胀程度越大;距煤层顶板的距离越大,膨胀程度亦越大;在不发生顶板隔水层结构严重破坏的情况下,当塑性岩体的体积膨胀率

大于裂隙率, 采动裂隙将实现有效闭合;

4) 通过在新安矿水体下采煤岩体渗透性评价以及神东矿区利用顶板隔水层的塑性膨胀实现干旱半干旱地区水资源保护性开采的工程应用, 对顶板采动裂隙的闭合机理进行了验证, 取得了良好的应用效果;

5) 本文关于采动裂隙影响范围内的塑性隔水层具有较好的自我保护、修复机理的研究对采动岩体再生结构系统的评价具有重要的研究价值, 特别是对水体下采煤岩体渗透性评价、西部干旱半干旱地区水资源保护性开采等具有重要的实践意义。

参考文献:

- [1] 刘天泉. 矿山岩体采动影响与控制工程学及其应用[J]. 煤炭学报, 1995, 20(1): 1-5.
LIU Tian-quan. Influence of mining activities on mine rockmass and control engineering[J]. Journal of China Coal Society, 1995, 20(1): 1-5.
- [2] PENG Su-ping, ZHANG Jin-cai. Engineering geology for underground rocks[M]. Heidelberg: Springer Press, 2007.
- [3] 孙亚军, 徐智敏, 董青红. 小浪底水库下采煤导水裂隙发育监测与模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 238-245.
SUN Ya-jun, XU Zhi-min, DONG Qing-hong. Monitoring and simulation research on development of water flowing fracture for coal mining under the Xiaolangdi reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 238-245.
- [4] 康建荣, 王金庄. 采动覆岩力学模型及断裂破坏条件分析[J]. 煤炭学报, 2002, 27(1): 16-20.
KANG Jian-rong, WANG Jin-zhuang. The mechanical model of the overburden rock under mining and the broken condition analysis[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(1): 16-20.
- [5] 谢和平, 于广明, 杨伦, 等. 采动岩体分形裂隙网络研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 147-151.
XIE He-ping, YU Guang-ming, YANG Lun, et al. Research on the fractal effects of crack network in overburden rock stratum[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(2): 147-151.
- [6] 涂敏, 刘泽功. 煤体采动顶板裂隙发育研究与应用[J]. 煤炭科学技术, 2002, 30(7): 54-56.
TU Min, LIU Ze-gong. Research and application of crack development in mining seam roof[J]. Coal Science and Technology, 2002, 30(7): 54-56.
- [7] 张文泉, 肖洪天, 张红日, 等. 临界距离老空水下薄煤层联合开采安全性分析[J]. 中国安全科学学报, 2000, 10(5): 54-59.
ZHANG Wen-quan, XIAO Hong-tian, ZHANG Hong-ri, et al. Analysis of the Safety of the Combined Mining of Thin Seams Under the Close Gob Water[J]. China Safety Science Journal, 2000, 10(5): 54-59.
- [8] 徐智敏. 小浪底水库下采煤导水裂隙带发育规律及预测研究[D]. 徐州: 中国矿业大学资源与地球科学学院, 2007.
- [9] 邵梧敏, 谭罗荣, 张梅英, 等. 膨胀土的矿物组成与膨胀特性关系的试验研究[J]. 岩土力学, 1994, 15(1): 11-19.
SHAO Wu-min, TAN Luo-rong, ZHANG Mei-ying, et al. The relation between mineral composition and swelling character of swelling soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 1994, 15(1): 11-19.
- [10] 韩绪山, 张景考, 刘振祥, 等. 裂隙离层及冒落带的声波成像识别方法[J]. 中国煤田地质, 2001, 13(3): 65-66.
HAN Xu-shan, ZHANG Jing-kao, LIU Zhen-xiang, et al. The identifying method on sound wave imaging of crack, abscission layer and caving zones[J]. Coal Geology of China, 2001, 13(3): 65-66.
- [11] 朱国维, 王怀秀. 利用超声成像技术辅助判定覆岩破坏钻孔得导水裂隙带高度[J]. 淮南工业学院学报, 1999, 19(3): 5-10.
ZHU Guo-wei, WANG Huai-xiu. The height of leaking crevice belt in wrecked-rock over coal seam determined supplementally by the technique of ultrasonic imagery in borehole[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology, 1999, 19(3): 5-10.
- [12] SUN Ya-jun, XU Zhi-min, DONG Qing-hong. Forecasting water disaster for a coal mine under the Xiaolangdi reservoir[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 18(4): 516-520.
- [13] XU Zhi-min, SUN Ya-jun, DONG Qing-hong. Predicting the height of water-flow fractured zone during coal mining under the Xiaolangdi reservoir[J]. Mining Science and Technology, 2010, 20(3): 434-443.
- [14] 缪协兴, 王安, 孙亚军, 等. 干旱半干旱矿区水资源保护性采煤基础与应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 217-227.
MIAO Xie-xing, WANG An, SUN Ya-jun, et al. Research on the basic theory of mining with water resources protection and application to arid and semi-arid mining areas[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 217-227.