

文章编号: 1001-1986(2010)06-0057-05

用事故树法确定煤矿防治水安全检查表

高 岳

(中国矿业大学资源与地球科学学院, 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: 为对煤矿防治水系统做出专项安全评价, 采用了事故树分析的方法。利用计算机编程分析可以得出煤矿突水事故树最小割集和基本事件的结构重要度。根据事故树基本事件及其结构重要度建立防治水系统专项安全评价指标体系与安全检查表。采用该方法实现了某煤矿六采区水体下开采的防治水专项安全评价。得出突水事故树的最小割集共 116 个以及基本事件的结构重要度。依此建立了六采区防治水系统专项评价指标体系与安全检查表。检查评价该矿安全等级为低度危险, 并提出整改意见。

关 键 词: 事故树分析; 安全评价指标体系; 安全检查表

中图分类号: TD745 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2010.06.012

Application of fault tree analysis to establish safety checklist for groundwater inrush in underground coalmines

GAO Yue

(School of Resources and Geosciences, State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: This paper presents the application of the fault tree analysis to assess the risk of groundwater inrush in coalmines. Computer programming was used to calculate the minimal cut set and structure importance. The results of computer programming for a coalmine illustrate that the number of minimal cut set is 116. And the structure importance of every basic event was also calculated. A safety assessment index system and a special safety checklist were established based on these results. The result of safety assessment is low risk. And amendments were proposed.

Key words: groundwater inrush; fault tree analysis; safety assessment index system; safety checklist

我国煤矿水文地质条件极为复杂, 无论是受水威胁的面积、类型, 还是水害威胁的严重程度, 都是世界罕见的。地表水、老空水、冲积层水、底板水等各种类型的水害样样俱全^[1-3]。全国煤矿水害发生次数和死亡人数, 仅次于瓦斯事故。因此, 预测预报、监测预警和煤矿安全评价对矿井水害防治极为重要^[4-5]。

2003 年《煤矿安全评价导则》颁布以后, 矿井安全综合评价在全国范围内展开^[6]。煤矿防治水系统安全评价方法以安全检查表和危险指数法为主。其中, 安全检查表法主要依据《煤矿安全规程》、《矿井水文地质规程》、《煤矿防治水工作条例》等规程与标准, 将地面防治水、井下防治水、井下探放水和排水的规范要求列成检查表格, 通过逐项检查、

专家打分评定矿井防治水系统的安全等级^[7-9]。2009 年 12 月 1 日起施行新颁布的《煤矿防治水规定》^[10], 因此, 煤矿安全检查表内容需要根据新的《煤矿防治水规定》进行修订。

根据曾康生的调查显示: 安全检查表中应用最多的是部颁的标准化检查表, 只有为数不多的矿井依据自身实际编制自己的安全检查表, 并且检查表的编制质量良莠不齐^[11]。标准化检查表实质上是对煤矿防治水技术与管理系统的的结果评价, 主要应用于评价煤矿是否具备安全生产所必需的生产条件, 并未对水灾事故产生进行预测^[12]。其存在的另一问题是专家凭主观认识来确定项目指标值, 表的评价结果含有相当高的经验成分。为克服以上不足, 本文采用事故树方法建立煤矿突水事故专项安全检查表。

收稿日期: 2010-03-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(40772192); 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金项目(SKLGDUEK0903)

作者简介: 高 岳(1986—), 男, 甘肃兰州人, 硕士研究生, 从事煤矿水文地质工程地质研究。

1 事故树分析概述

事故树分析(Fault Tree Analysis, FTA)是以一种不希望发生的事件为最后状态(顶上事件), 然后使用系统分析的方法寻找造成这一状态的一系列原因(基本事件), 将这些原因由上至下依照逻辑关系绘制成树状图。事故树可以对事故做定性分析也可以做定量分析。定量分析必须知道基本事件的概率, 但在实际中得到基本事件的概率非常困难, 所以煤矿事故树分析以定性分析为主。定性分析包括最小割集、最小径集、结构重要度 3 个方面^[6-8]。

针对煤矿水灾事故, 冯治斌^[13]较早应用事故树分析矿井突水事故并通过查阅矿井水灾资料提出了 13 个突水事故基本事件; 陈文学等^[14]通过计算机编程, 开发了事故树分析系统, 对老空区积水透水事故进行事故树分析, 并根据分析结果, 提出了该类透水事故的预防方案; 王长申等^[12]基于事故成因理论建立煤矿突水事故模型, 并提出基于事故树方法的煤矿突水危险性专项评价方法。诸多学者研究表明, 事故树分析法可用于指导煤矿突水事故预防, 但缺乏对煤矿防治水系统的专项安全评价研究。

2 用事故树法确定煤矿防治水评价指标体系和专项检查表

本文应用王长申等的研究成果, 以煤矿突水为顶上事件(T), 基于事故成因理论建立煤矿突水事故模型^[12], 见图 1。根据该煤矿突水事故树模型, 结合各矿实际情况可以建立不同生产条件、不同矿井水害类型的突水事故树。

经计算机编程计算可得事故树最小割集和基本事件的结构重要度(计算机编程从略)。从最小割集中选择易于做出判断的基本事件, 同时去掉重复的基本事件, 再结合传统的安全检查表防治水部分的内容, 则可以得出相应安全评价指标体系。

为克服传统安全检查表专家打分将不同事件同等对待的缺点, 选用基本事件的结构重要度为基本数据, 对每一评价指标体系内的基本事件的结构重要度加和, 结果可以作为该安全评价指标的权重值。依此构建含有权重值的专项检查表。

针对不同矿区实际情况构建不同的事故树, 则权重计算结果与专项检查表内容也不同。因此, 该方法可对不同矿区不同水害类型的防治水系统做专项检查评价。

3 工程实例

3.1 某煤矿六采区地质水文条件概述

某煤矿位于山东省济宁市辖区, 六采区位于井

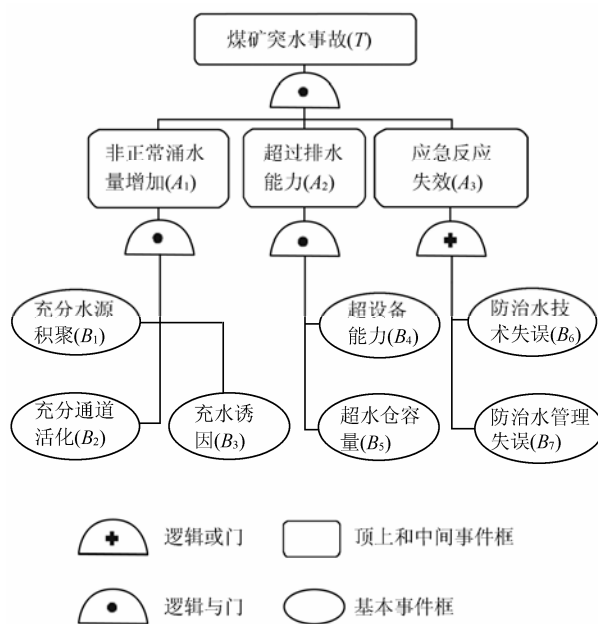


图 1 煤矿突水事故树模型^[12]

Fig. 1 Fault tree model for in groundwter intrush coalmine

田的西南部。本区地层由老到新有: 奥陶系(O)、石炭系(C)、二叠系(P)、侏罗系(J)、第四系(Q)。采区内地质构造以褶曲为主, 断层较发育。岩溶陷落柱等不发育。

六采区开采对象为煤田浅部的二叠系山西组的 3 煤, 开采方法为综采, 放顶煤时, 煤层上覆含水层成为安全开采的主要威胁。根据矿井勘查报告、矿井水文地质资料认为该采区开采 3 煤时, 主要充水含水层为第四系下组砂层、侏罗系上统砂岩(以下简称红层)、3 煤顶板(部)砂岩。其中第四系不整合于侏罗系上统和二叠系之上, 厚度在 110~227 m, 平均 170 m。按岩性、颜色、含水性划分为上、中、下 3 组。上、下组为含水层组, 中组为隔水层组。中组平均厚度为 58.14 m, 区内普遍发育, 隔水性能良好。下组平均厚度 52 m, 岩性主要为中砂、砂砾层, 中间夹有薄层粘土层。第四系下组又进一步分为上、下 2 段, 下段简称为底含。底含单位涌水量 0.52~1.143 L/(s·m), 渗透系数 3.89~7.10 m/d, 为孔隙承压水, 富水性中等。采区内 3 煤顶板至第四系底界距离 80~171.19 m, 平均 136.16 m。红层厚 0~84.01 m, 平均厚 51.68 m。单位涌水量为 0.001 93 L/(s·m), 渗透系数 0.037 m/d。从抽水资料看, 含水较弱, 补排条件不良。但采动作用下, 易迅速产生竖向的采动裂隙, 岩层的导水性明显增强, 局部富水区往往造成回采工作面来水突然, 水势猛、峰值大、危害严重的后果。3 煤顶板(部)砂岩厚度平均为 12 m, 以中细砂岩为主, 富水性中等, 是 3 煤开采的直接充水含水层。六采区开采 3 煤时也受到周围一个地方

煤矿老空水的威胁。

3.2 六采区突水事故树分析

应用煤矿突水事故树基本模型(图 1),再综合该矿采矿、地质、水文等实际情况。建立该矿六采区突水事故树,见图 2。在图 2 中,以该矿六采区突水为顶上事件(T)。突水事故是由非正常涌水量($M1$),超过排水能力($M2$),预防及应急反应失效($M3$)同时发生的结果,属于逻辑“与门”的关系,此作为事故树的第一层。在第二层中,非正常涌水量($M1$)是由松散层突水($M4$)、红层突水($M5$)、3 煤顶板砂岩突水($M6$)、老空水突水($M7$)、地表水或洪水溃入($M8$)引起的,为逻辑“或门”关系;超过排水能力($M2$)是由于突水量同时超过该煤矿的设备排水能力($M9$)与水仓能力($M10$)的结果,为逻辑“与门”关系;预防与应急失效($M3$)包括技术问题($M11$)与管理不善

($M12$),为逻辑“或门”关系;在第三层,松散层富水($X1$)和防水煤柱问题($M13$)是引起松散层水突水的原因,为“与门”。防水煤柱问题包括留设不合理($X2$)和采动破坏($X3$),两者是“或门”关系。红层突水($M5$)是红层富水($X4$)与裂隙导水($M14$)共同作用的结果,两者为“与门”关系。裂隙导水($M14$)包括采动破坏($X3$)裂隙和断裂导水($X5$),两者为“或门”关系。3 煤顶板砂岩含水层富水($X6$)和裂隙导水($M15$)是引起 3 煤顶板砂岩含水层突水的原因,为“与门”。裂隙导水包括采动破坏($X3$)裂隙和背斜向斜轴部裂隙富水导水($X7$),两者是“或门”关系。老空区富水($X8$)和井巷打通水体($M16$)是引起老空突水的原因,为“与门”。井巷打通水体($M16$)包括探放水失误($X9$)和违章施工($X10$),两者是“或门”关系。事故树其余分析依此类推。

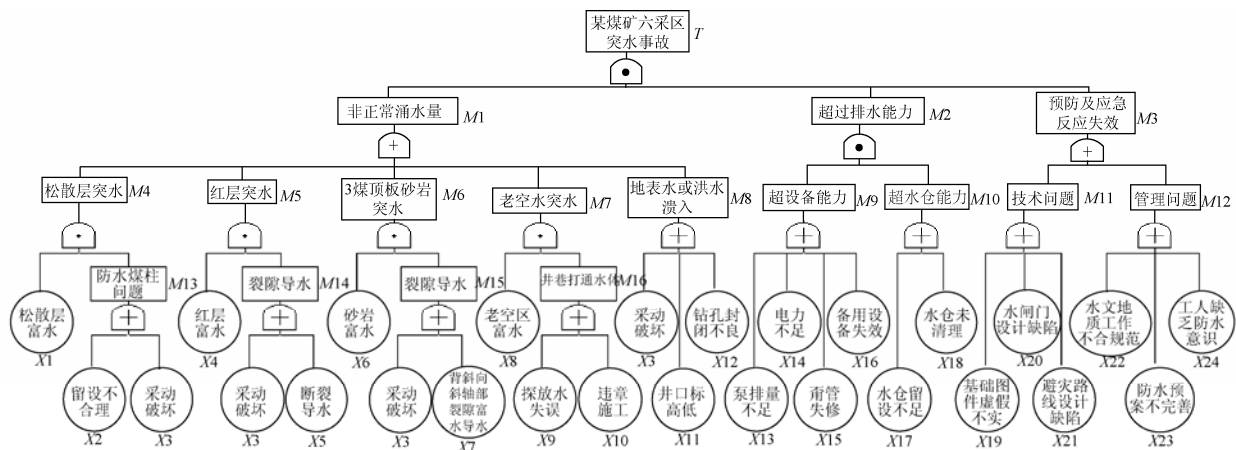


图2 某煤矿六采区突水事故树

Fig. 2 Fault tree analysis of groundwater inrush in district 6 of a coalmine

利用布尔代数的方法求解六采区突水事故树模型的最小割集,方程为:

$$T = M1M2M3 = [M4 + M5 + M6 + M7 + M8][M9M10][M11 + M12] \quad (1)$$

式中 T , M 分别为顶上事件和中间事件。

式(1)经过化简计算得到结果如下: $\{X5 X16 X21 X4 X17\}$; $\{X7 X16 X21 X6 X17\}$; $\{X10 X16 X21 X8 X17\}$... $\{X3 X15 X21 X18\}$; $\{X3 X16 X21 X18\}$; $\{X3 X13 X21 X18\}$ 总共 116 个最小割集。每个最小割集代表煤矿的一种突水模式或基本事件组合。

编程计算各基本事件的结构重要度如下:

$$\begin{aligned} I(1) &= 0.0045; I(2) = 0.0136; I(3) = 0.0875; \\ I(4) &= 0.0182; I(5) = 0.0136; I(6) = 0.0182; \\ I(7) &= 0.0136; I(8) = 0.0591; I(9) = 0.0591; \\ I(10) &= 0.0136; I(11) = 0.0170; I(12) = 0.0170; \\ I(13) &= 0.0795; I(14) = 0.0205; I(15) = 0.0205; \\ I(16) &= 0.1011; I(17) = 0.0409; I(18) = 0.1807; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I(19) &= 0.0102; I(20) = 0.0182; I(21) = 0.0966; \\ I(22) &= 0.0205; I(23) = 0.0102; I(24) = 0.0659. \end{aligned}$$

基本事件的结构重要度大小顺序为: $I(18) > I(16) > I(21) > I(3) > I(13) > I(24) > I(8) > I(9) > I(17) > I(22) = I(14) = I(15) > I(4) = I(6) = I(20) > I(11) = I(12) > I(7) = I(5) = I(10) = I(2) > I(19) = I(23) > I(1)$

由以上基本事件结构重要度可知:在非正常涌水量($M1$)中,事件松散层突水($M4$)是六采区主要面临的问题。防水煤柱的留设问题是主要的诱发因素。在超过排水能力($M2$)中,设备能力、水仓能力是主要问题。预防和应急反应失效方面($M3$)中,避灾路线设计缺陷($X21$)、水文地质工作不合规程($X22$)、工人缺乏防水意识($X24$)结构重要度大。

4 专项安全评价指标体系与安全检查表

4.1 安全评价指标体系的确定

在上述 116 个最小割集中,选择易于做出判断的基本事件,同时去掉重复的基本事件,再结合传

统安全检查表中防治水部分的内容。则可以得出该矿区以下安全评价指标体系：水仓水泵完好率；管路电路完好率；水害隐患源探明程度；安全技术设计合理性；采动破坏和构造导水；安全管理状况。

根据检查，本工程实例的事故致因全部包含在上述安全评价指标体系中。见表 1。

4.2 建立专项安全检查表

为克服传统安全检查表中专家打分将不同事件同等对待的缺点，选用基本事件的结构重要度为基本数据，对每一评价指标体系内的基本事件的结构重要度加和，结果作为该安全评价指标的权重值。

如水泵水仓完好率的权重值为：水仓留设不足，水仓未清理，泵排量不足，备用设备失效这 4 个基本事件的结构重要度之和，即 $I_{17}+I_{18}+I_{13}+I_{16}=0.402$ 。同理得到其他指标的权重值，管路电路完好率权重值为 0.041；水害隐患源探明程度权重值为 0.159；安全技术设计合理性权重值为 0.128；采动破坏和构造导水等权重值为 0.149；安全管理状况权重值为 0.121。（小数点后保留 3 位数字）

依据以上分析，建立煤矿六采区突水事故专项安全检查表(表 2)。邀请该矿防治水专家为该专项表打分。

表1 安全评价指标体系表

Table 1 Safety assessment index system

水仓水泵完好率	管路电路完好率	水害隐患源探明程度	安全技术设计合理性	采动破坏和构造导水等	安全管理状况
水仓留设不足(X17)	电力不足(X14)	松散层富水(X1)	煤柱留设不合理(X2)	采动破坏(X3)	工人防水知识不足(X24)
水仓未清理(X18)	泵管失修(X15)	红层富水(X4)	水闸门设计缺陷(X20)	断层导水(X5)	水文地质工作不合规范(X22)
泵排量不足(X13)		3 煤顶板砂岩富水(X6)	避灾路线设计缺陷	背斜向斜轴部裂隙	违章施工(X10)
备用设备失效(X16)		老空区富水(X8)	(X21)	富水导水(X7)	基础图件虚假不实(X19)
		探放水失误(X9)		井口标高低(X11)	防水预案不完善(X23)
				钻孔封闭不良(X12)	

表2 某煤矿六采区突水事故专项安全检查表

Table 2 Special safety checklist for water inrush in district 6 of a coalmine

安全评价指标体系	权重	评价标准(每一指标体系分值为 100 分，其中的单项评价有一项为“否”，则扣 20 分)	检查记录	得分
1 水仓水泵完好率	0.402	1 水仓容量是否符合规定、水仓是否及时清理；2 水泵排水能力是否足够、是否检修水泵；3 水泵房是否规范；4 主排水泵是否经省级部门检测合格。	4 未达标	80
2 管路电路完好率	0.041	1 是否有工作和备用水管；2 是否有相应的配电设备和备用设备；3 管径是否配套；4 排水管是否使用钢管；	1 未达标	80
3 水害隐患源探明程度	0.159	1 矿井是否开展水患调查；2 是否有探放水计划措施；3 探放水设备数量是否充足；4 是否查明地表积水和洪水可能汇聚地区。	3 未达标	80
4 安全技术设计合理性	0.128	1 是否按规程设计煤柱；2 是否按规定设置防水闸门；3 采空区是否按规定设置防水密闭；4 避灾路线设计保护是否合理。	4 未达标	80
5 采动破坏和构造导水等	0.149	1 地质构造是否查清；2 井口标高是否低于洪水位标高，而未采取安全措施；3 是否存在封闭不良钻孔；4 是否查明地方煤矿超层、越界等违规生产；5 是否观测记录“三带”高度。	3、4 未达标	60
6 安全管理状况	0.121	1 是否设置水害防治机构；2 是否有防水预案；3 工人是否经过防水培训；4 是否存在违章施工；5 水文地质工作是否符合规范	1 未达标	80

表中每项得分均为百分制。在专项检查中可根据表中的评价标准对其打分，将得分与权重相乘，然后逐项相加，可以得到总分。根据总分评价煤矿整体防治水安全等级。见表 3。

如该煤矿总得分为 $80 \times 0.402 + 80 \times 0.041 + 80 \times 0.159 + 80 \times 0.128 + 60 \times 0.149 + 80 \times 0.121 = 77$ ，安全等级为低度危险，需对专项安全检查表中未达标项目进行整改。

以上评价指标的权值，是该矿六采区的突水事故树分析得出的基本事件的结构重要度之和，克服了传统安全检查表将不同因素同等对待等缺点，同时有利于明确防治水系统的安全责任。依照该方法可以对矿井突水事故进行检查评价，节约大量时间，

表 3 安全等级

Table 3 Grades of security

得分	< 20	20~39	40~59	60~79	> 80
安全等级	极度危险	高度危险	中度危险	低度危险	相对安全

有效指导防治水方案制定, 确保安全生产。

5 结 论

a. 建立了煤矿突水事故树, 根据事故树基本事件及其结构重要度建立了防治水系统专项评价指标体系与专项安全检查表。

b. 以某煤矿工程实际为例, 建立了该煤矿六采区的突水事故树。经编程计算得到六采区突水事故树共 116 个最小割集与基本事件的结构重要度。根据事故树分析, 建立了专项安全评价指标体系。体系共包括水仓水泵完好率、管路电路完好率、水害隐患源探明程度、安全技术设计合理性、采动破坏和构造导水等及安全管理状况 6 项安全评价指标。

c. 根据安全评价指标体系和基本事件的结构重要度建立了相应的煤矿突水专项安全检查表。该表有别于传统安全检查表, 对煤矿防治水系统做出了专项检查。可以在其他矿区试行推广。

参考文献

- [1] 隋旺华, 孙亚军. 矿井水害防治关键技术及防治水专业人才培养方案探讨[J]. 中国地质教育, 2009(1): 26-29.
- [2] 中国煤炭工业劳动保护科学技术学会. 矿井水害防治技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2007: 90-93.

- [3] 范维唐, 卢鉴章, 申宝宏. 煤矿灾害防治的技术与对策[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007: 1-2.
- [4] 隋旺华, 董青红. 近松散层开采孔隙水压力变化及其对水砂突涌的前兆意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1908-1916.
- [5] 赵铁锤. 坚持“十六字”原则落实“五项”措施努力构建煤矿水害防治长效机制[J]. 当代矿工, 2006(7): 6-8.
- [6] 国家安全生产管理监督总局. 安全评价[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004.
- [7] 林伯泉, 周延, 刘贞堂. 安全系统工程[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2005: 15-18.
- [8] 沈斐敏. 安全系统工程理论与应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001: 22-25.
- [9] 凌标灿. 煤矿水灾安全评价内容探讨[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(7): 64-66.
- [10] 国家安全生产监管总局, 国家煤矿安全监察局. 煤矿防治水规定[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2009.
- [11] 曾康生. 我国煤矿安全评价方法的应用现状及其改进[J]. 中国煤炭, 2008, 34(11): 94-96.
- [12] 王长申, 孙亚军, 杭远. 安全检查表法评价中小煤矿潜在突水危险性[J]. 采矿与安全工程学报, 2009(9): 298-305.
- [13] 冯治斌. 基于事故树分析法的矿井水灾安全评价[J]. 中州煤炭, 2003(4): 43-44.
- [14] 陈文学, 曹庆贵, 单国文. 事故树分析系统设计与老空区透水分析[J]. 工业安全与环保, 2004, 30(11): 33-35.

(上接第 56 页)

对地表构筑物、建筑物的影响甚微, 能有效防止地表的沉降变形。

b. 由于地表村庄的影响, 部分观测点未能建立在理想的位置, 但该观测站用于多个相邻工作面综合开采的地表沉降观测, 效果良好。

c. 由于观测数据有限, 且未能在充填开采之前建立观测站, 不能得出高水材料充填技术下单个工作面的下沉规律。

d. 有望结合工作面上方综合地质情况, 进行沉降规律的进一步研究。

参考文献

- [1] 周邦全. 煤矿安全监测监控系统的发展历程和趋势[J]. 矿业安全与环保, 2007, 34(6): 76-77.
- [2] 贾静丽, 陈娟浓, 郭君, 等. 充填体中矿柱留设对地表沉降的影响[J]. 金属矿山, 2009(6): 32-34.
- [3] 耿建平. 高水材料巷旁充填沿空留巷技术探讨[J]. 山西建筑, 2003, 29(8): 67-68.

- [4] 毕国旗. 高水材料充填留巷技术中的关键问题[J]. 矿山压力与顶板管理, 2002(3): 6-7.
- [5] 马建强, 孙新荣, 陈长臻. 高水速凝固化充填在“三下”开采中应用的探讨[J]. 煤矿现代化, 2001(4): 27-28.
- [6] 周明凯, 张文生, 李北星. 高水速凝凝结材料性能和硬化机理研究[J]. 武汉工业大学学报, 1998, 20(4): 18-21.
- [7] 张农, 李伟. 高水材料注浆加固技术在煤巷支护中的应用[J]. 岩土力学, 1997, 36(8): 257-261.
- [8] 潘海良, 卢志敏. 高水材料巷旁充填沿空留巷技术研究与应用[J]. 中国煤炭, 2009, 35(8): 48-50.
- [9] 冯文辰, 柯冬, 梁霄, 等. 一种新的布设沉降观测点的方法[J]. 北京测绘, 2009(3): 69-71.
- [10] 黄声享. 变形监测数据处理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
- [11] 刘辉, 何春桂, 张安兵, 等. GPS 技术在三峡库区滑坡监测中的应用[J]. 长江科学院院报, 2008, 25(4): 33-35.
- [12] 余学祥, 秦永洋, 孙兴平, 等. 相邻工作面综合地表移动观测站的设计与连接测量[J]. 大连大学学报, 2008, 29(6): 74-79.
- [13] 中国标准出版社. GB12898—91 国家三、四等水准测量规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 1992.