

文章编号:1673-9469(2008)02-0062-03

## 煤层隔水底板稳定性可靠度分析

杜文堂<sup>1</sup>, 杨会双<sup>2</sup>, 贾向新<sup>3</sup>

(1. 河北工程大学 资源学院, 河北 邯郸 056038; 2. 河北省地勘局第十一地质大队, 河北 邢台 054000; 3. 河北建设勘察研究院, 河北 石家庄 050031)

**摘要:**为了合理评价煤层隔水底板的稳定性, 使用了可靠性分析的“JC”法, 分析了水压力、隔水底板破坏深度和突水系数的不确定性, 建立了煤层隔水底板可靠度分析的极限状态方程, 并计算了与隔水底板稳定性有关的可靠度指标、失效概率和突水系数。依据现行《矿井水文地质规程》, 并参考其它事故的发生率, 提出煤层隔水底板的失效概率为  $1.5 \times 10^{-3} \sim 3.0 \times 10^{-3}$ 。

**关键词:** 隔水底板; 突水系数; 可靠度; 极限状态方程

**中图分类号:** P641.4

**文献标识码:** A

## Reliability analysis of the steadiness of impervious base

DU Wen-tang<sup>1</sup>, YANG Hui-shuang<sup>2</sup>, JIA Xiang-xin<sup>3</sup>

(1. College of Natural Resources, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;  
2. No. 11 Team, Hebei Geological Prospecting Bureau, Xingtai 054000, China; 3. Hebei Research Institute of Construction & Geotechnical Investigation, Shijiazhuang 050031, China)

**Abstract:** The “JC” method reliability is used to evaluate the steadiness of impervious base reasonably. Limit state equations for reliability of impervious base are given after analyzing randomness of hydraulic pressure, depth of destructive bed and coefficient of water inrush. This paper calculates reliability index, lose efficacy probability and coefficient of water inrush corresponding to the thickness of different impervious base. The lose efficacy probability of the impervious base ranges suitably in  $1.5 \times 10^{-3} \sim 3.0 \times 10^{-3}$  by contrast with other accidents .

**Key words:** impervious base; coefficient of water inrush; reliability; limit state equations

底板突水机理研究可以追溯到 20 世纪初, 1944 年, 匈牙利韦格·弗伦斯<sup>[1]</sup>第一次提出底板相对隔水层的概念, 建立了水压、隔水层厚度与底板突水的关系。50 年代后, 国外用现场和实验室相结合的方法研究了隔水层的作用, 1974 年, 匈牙利国家矿业技术鉴定委员会将相对隔水层厚度概念列入《矿业安全规程》<sup>[1]</sup>。我国在 60 年代提出突水系数的概念。70 年代后期修改了原有突水系数的概念。80 年代各具特色的理论应运而生, 最具代表性的有“三带”划分理论、原位张裂与零位破坏理论、板模型理论和关键层理论等<sup>[2]</sup>。近年来, GIS 与 ANN 耦合技术<sup>[3,4]</sup>及考虑不确定因素的可靠度方法<sup>[5,6]</sup>开始用于矿井突水评价。本文在前人研究的基础上, 应用可靠度理论对煤层隔水底板稳定性进行了评价,

并确定了合理的可靠性指标。

### 1 可靠度分析的“JC”法

“JC”法是“国际结构安全度联合委员会”推荐的一种可靠度计算方法, 因最初为 Rackwitz - Fiessler 提出, 亦称“R - F”法, 其基本原理如下:

确定随机性影响因素, 即“基本变量”, 记为  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ), 建立包括各有关基本变量在内的关系式

$$Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (1)$$

这一关系式称为极限状态方程, 其中  $z = g(\cdot)$  称为“功能函数”。

当功能函数与多个正态基本变量有关时, 式

(1)代表以基本变量  $x_i (i=1,2,\dots,n)$  为坐标的  $n$  维欧氏空间上的一个曲面。将功能函数在验算点  $P^*$  处按泰勒级数展开,并仅保留其一次项,推导可知<sup>[1]</sup>,可靠指标  $\beta$  是标准正态空间坐标系中原点到极限状态曲面的最短距离,可用以下方程组迭代求解,得到可靠指标  $\beta$  及验算点坐标值  $x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*$ 。

$$x_i^* = u_{x_i} - \delta_{x_i} \beta \alpha_i (i=1,2,3,\dots,n) \quad (2)$$

$$\alpha_i = \frac{\left. \frac{\partial g}{\partial x_i} \right|_P \cdot \delta_{x_i}}{\left[ \sum \left( \left. \frac{\partial g}{\partial x_i} \right|_P \cdot \delta_{x_i} \right)^2 \right]^{1/2}} (i=1,2,\dots,n) \quad (3)$$

$$Z = g(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) = 0 \quad (4)$$

式中  $\mu_{x_i}$ —变量  $x_i$  的均值;  $\delta_{x_i}$ —变量  $x_i$  的标准差。

当基本变量为非正态随机变量时,需进行当量正态化处理<sup>[1]</sup>,当有相关性的随机变量时,可首先采用正交变换,转换为相互独立的随机变量,然后再利用式(2)–(4)求解,求出  $\beta$  后,就可利用关系式  $P_f = \Phi(-\beta)$  求出相应的失效概率。

## 2 煤层隔水底板稳定可靠度分析

可靠度分析的基本思路是在定值法分析计算的基础上,选定某些参数为基本变量,并令按定值法计算得到的安全系数  $F=1$ ,则可得到相应各种分析方法的极限状态方程,然后利用“JC”法求解  $\beta_i$  和  $x_i^*$ 。

### 2.1 极限状态方程

煤层隔水底板以下具有一定承压水头的含水层,在开采其上覆煤层时常常会发生底板突水。引起底板突水的因素很多,但关键在于所承受的水压、煤层采动后的围岩压力、隔水层的厚度以及底板岩石的力学性质。

在煤层隔水底板稳定可靠度分析时,对对应定值法中不同的计算模型,将导出不同的极限状态方程,也将产生不同的计算结果。考虑可靠度理论的分析特点,采用《矿井水文地质规程》推荐的如下经验公式来建立极限状态方程。

$$T = \frac{P}{M - M_0} \quad (5)$$

式中  $M$ —底板隔水层实际厚度(m);  $P$ —底板承受的水压力值(MPa);  $T$ —临界突水系数(MPa/m);  $M_0$ —采矿影响底板隔水层的破坏深度(m)。

由于不同矿区底板隔水层的岩性不同,力学强度不一,阻(隔)水性亦有所差异,因此上述突水系数是一个不确定量。另外,水压力受各种补给和开采因素的影响经常发生变化。可见上述公式中的变量多为随机量,根据其变异性的选择水压力、底板隔水层破坏深度和突水系数为基本随机变量,根据式(5)建立如下极限状态方程

$$Z = g(T, M_0, P) = T(M - M_0) - P \quad (6)$$

把有关变量代入式(6)即可用“JC”法计算煤层隔水底板的可靠度。

### 2.2 可靠性指标的确定

利用可靠度理论进行煤层隔水底板稳定性评价需要确定合理的可靠性指标或失效概率。目前常用的方法为类比法和校准法。

类比法或协商给定法<sup>[7]</sup>是参照人们在日常活动中所经历的各种风险,确定一个为公众所能接受的失效概率即可靠性指标。文献[7]给出了一些事故所造成的年死亡率,这些数据可供隔水底板稳定可靠度分析和确定可靠指标时参考。

所谓校准法,就是通过对现行设计规范安全度的校核(反演计算),找出隐含于现有结构中相应的可靠指标值,经综合分析和调整,制定今后设计采用的目标可靠指标。这实质上是充分注意到工程建设长期积累的实践经验,继承现行设计规范规定的设计可靠度水准,认为它从总体上来讲是合理的可以接受的。在现阶段,从实用出发,这是一种比较切实可行的确定设计可靠指标的方法。

## 3 实例及成果分析<sup>[8]</sup>

某矿位于河北省中部,主要开采5#煤层,该煤层距下部灰岩含水层55m。现开采深度已达280m,试评价开采过程中5#煤层隔水底板的稳定性,并确定该矿最大的合理开采深度。

### 3.1 煤层隔水底板稳定可靠度分析

利用多年的观测和试验资料,在假设各变量服从正态分布的前提下,煤层隔水底板承受的水压力值、突水系数值和采矿影响底板破坏深度值的统计特征值为

$u_p = 2.31 \text{ MPa}$ ,  $\delta_p = 0.06 \text{ MPa}$ ;  $u_T = 0.076 \text{ MPa/m}$ ,  $\delta_T = 0.0056 \text{ MPa/m}$ ;  $u_{m_0} = 10 \text{ m}$ ,  $\delta_{m_0} = 1.22 \text{ m}$   
其中  $u_p$ —水压力均值;  $\delta_p$ —水压力标准差;  $u_T$ —

突水系数均值;  $\delta_r$ —突水系数标准差;  $u_{mo}$ —底板破坏深度均值;  $\delta_{mo}$ —底板破坏深度标准差。

把上述参数代入(2) - (4)式,即可计算出开采深度 280m(即隔水底板厚度 55m)时煤层隔水底板的可靠度指标、失效概率。为便于对比分析,计算了不同隔水底板厚度所对应的可靠度指标、失效概率和突水系数值。计算结果见表 1。

计算结果表明:随着底板隔水层厚度的减少,可靠指标减小,失效概率和突水系数增大。可见,随着煤层开采深度的增加,底板突水的可能性越来越大,矿井防治水工作将更加艰巨。

表 1 煤层隔水底板厚度与可靠度关系

Tab. 1 The relationship between reliability and thickness of impervious base

| 底板厚度<br>(m) | 可靠指标<br>( $\beta$ ) | 失效概率<br>( $P_f$ )     | 突水系数<br>(MPa/m) |
|-------------|---------------------|-----------------------|-----------------|
| 57          | 4.67                | $2.44 \times 10^{-7}$ | 0.049           |
| 56          | 4.48                | $3.73 \times 10^{-6}$ | 0.050           |
| 55          | 4.28                | $9.35 \times 10^{-6}$ | 0.051           |
| 54          | 4.08                | $2.25 \times 10^{-5}$ | 0.053           |
| 53          | 3.86                | $5.67 \times 10^{-5}$ | 0.054           |
| 52          | 3.63                | $1.42 \times 10^{-4}$ | 0.055           |
| 51          | 3.40                | $3.37 \times 10^{-4}$ | 0.056           |
| 50          | 3.15                | $8.16 \times 10^{-4}$ | 0.058           |
| 49          | 2.89                | $1.93 \times 10^{-3}$ | 0.059           |
| 48.5        | 2.75                | $2.98 \times 10^{-3}$ | 0.060           |
| 48          | 2.61                | $4.53 \times 10^{-3}$ | 0.061           |
| 47          | 2.33                | $9.90 \times 10^{-2}$ | 0.062           |
| 46          | 2.03                | $2.12 \times 10^{-2}$ | 0.064           |
| 45          | 1.71                | $4.36 \times 10^{-2}$ | 0.066           |

### 3.2 可靠性指标的确定

图 1 为隔水底板失效概率与突水系数关系图。从图中可以看出随着突水系数的增加,失效概率呈逐渐增大趋势。大致可分为三个阶段:第一阶段失效概率缓慢增加阶段,该阶段失效概率从  $2.44 \times 10^{-7}$  增大到  $1.93 \times 10^{-3}$ ,对应的突水系数从 0.049 MPa/m 增加到 0.059 MPa/m,平均增长率为  $0.19(\text{MPa/m})^{-1}$ ;第二阶段失效概率明显增加阶段,其失效概率从  $1.93 \times 10^{-3}$  增大到  $4.53 \times 10^{-3}$ ,对应的突水系数从 0.059 MPa/m 增加到 0.061 MPa/m,平均增长率为  $1.30(\text{MPa/m})^{-1}$ ;第三阶段失效概率突然增加阶段,该阶段失效概率从  $4.53 \times 10^{-3}$  增大到  $4.36 \times 10^{-2}$ ,对应的突水系数从 0.061 MPa/m 增加到 0.066 MPa/m,平均增长率为  $7.814(\text{MPa/m})^{-1}$ 。按最优化理论,取拐点处

(即第二阶段)的失效概率  $1.93 \times 10^{-3} \sim 4.53 \times 10^{-3}$  为优化设计参考值。

综合上述分析,依据《矿井水文地质规程》并结合多年的采矿和防治水工作经验(矿井底板临界突水系数一般取 0.06 ~ 0.066),建议失效概率取  $1.5 \times 10^{-3} \sim 3.0 \times 10^{-3}$ 。

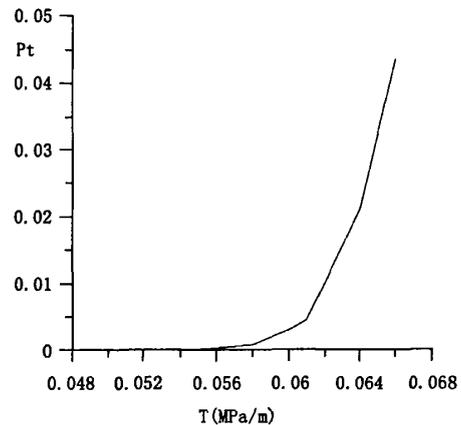


图 1 失效概率与突水系数关系图

Fig. 1 The relationship between disabled probability and coefficient of water inrush

### 3.3 隔水底板稳定性评价及最大开采深度预测

目前,被评价矿井主要开采 5# 煤层,该煤层距下部灰岩含水层 55m。由表 1 计算的结果可知,其失效概率为  $9.35 \times 10^{-6}$ ,小于允许的失效概率值  $1.5 \times 10^{-3} \sim 3.0 \times 10^{-3}$ 。因此,现阶段开采条件下煤层隔水底板是稳定的。

表 2 开采深度与可靠度关系

Tab. 1 The relationship between reliability and depth of exploitation

| 开采深度<br>(m) | 可靠指标<br>( $\beta$ ) | 失效概率<br>( $P_f$ )     |
|-------------|---------------------|-----------------------|
| 280         | 3.89                | $5.01 \times 10^{-5}$ |
| 290         | 3.51                | $2.24 \times 10^{-4}$ |
| 300         | 3.13                | $8.74 \times 10^{-4}$ |
| 310         | 2.74                | $2.90 \times 10^{-3}$ |
| 320         | 2.35                | $9.39 \times 10^{-3}$ |
| 330         | 1.96                | $2.5 \times 10^{-2}$  |
| 340         | 1.58                | $5.7 \times 10^{-2}$  |

表 2 计算了煤层不同开采深度所对应的可靠性指标和失效概率值,结果表明:(下转第 75 页)

### 3 结语

本文主要介绍了GPS用于滑坡外观变形监测的方法,并通过三峡库区卡子湾滑坡体实例介绍了整个监测过程。其中,需要特别注意的问题有:

1)在对GPS监测网点进行观测时,最好采取强制对中措施,以保证对中精度在1mm内;为保证高程方向的监测精度,应采用固定天线高的方法消除天线高的丈量误差。

2)对于GPS监测网,外业观测质量合格只能说明GPS网中没有出现错误和大的粗差,网中是否含有小的粗差和异常值,还需要通过网平差后的质量评价来确定。一个GPS网,只有通过了这两个方面的检核,才能认为是合格的。

3)对于GPS监测网,要根据监测区域中是否存在稳定的基准点而选用固定基准、秩亏基准和拟稳基准,对于选定的基准点,必要时还必须进行

基准点的稳定性分析,只有通过检验,才能用于下一步的变形分析。

#### 参考文献:

- [1] 王爱华,周园,殷百寿. 基于GIS的滑坡单因子分析研究[J]. 河北工程大学学报,2007,24(2):91-93.
- [2] 刘基余,李征航,王跃虎,等. 全球定位系统原理及应用[M]. 北京:测绘出版社,1999.
- [3] 徐绍铨,李征航,柳太康,等. 隔河岩大坝外观变形GPS自动化监测系统的建立[J]. 武汉测绘科技大学学报,1998,23(增刊):1-4.
- [4] 薛志宏,卫建东,金新平. GPS在雅砻江卡拉电站滑坡监测中的应用[J]. 测绘工程,2007,(2):65-68.
- [5] 国家质量技术监督局. 全球定位系统(GPS)测量规范[M]. 北京:中国标准出版社,2002.
- [6] 中华人民共和国建设部. 工程测量规范[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [7] 中华人民共和国建设部. 建筑变形测量规范[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007.

(责任编辑 刘存英)

(上接第64页)随着矿井开采深度的增大,可靠性指标逐渐减小,失效概率逐渐增大。以煤层隔水底板失效概率 $1.5 \times 10^{-3} \sim 3.0 \times 10^{-3}$ 作为判别标准,该矿井最大合理开采深度约为310m。

### 4 结论

1)可靠度分析方法用于煤层隔水底板稳定性评价,同时考虑了水压、煤层隔水底板力学强度和采矿破坏深度的不确定性,避免了定值法预测结果的绝对化。计算结果表明,可靠度方法应用于煤层隔水底板稳定性评价是可行的。

2)分析了矿井底板突水系数与失效概率的关系,以矿井规程规定的临界突水系数为基础,并参考其它事故的发生率,确定了合理的可靠指标,建议煤层隔水底板失效概率值为 $1.5 \times 10^{-3} \sim 3.0 \times 10^{-3}$ 。

3)由于矿区地质、水文地质条件的复杂性,可靠度方法用于煤层隔水底板稳定性评价,尚需进一步接受实践的检验。特别需要通过大量资料的积累,建立隔水底板岩石强度、水压和采矿破坏深

度等不确定因素合理的分布模型,使评价结果更为可靠。

#### 参考文献:

- [1] 房佩贤,卫中鼎,廖资生. 专门水文地质学[M]. 北京:地质出版社,2005.
- [2] 施龙青,韩进. 开采煤层底板“四带”划分理论与实践[J]. 中国矿业学报,2005,34(1):16-23.
- [3] 武强,庞伟,戴迎春,等. 煤层底板突水脆弱性评价的GIS与ANN耦合技术[J]. 煤炭学报,2006,31(3):314-319.
- [4] 李丽,程久龙. 基于信息融合技术的矿井底板突水预测[J]. 煤炭学报,2006,31(5):623-626.
- [5] 韩宇平,许拯民. 区域水资源短缺风险调控研究[J]. 河北工程大学学报,2007,24(4):81-84.
- [6] 杜文堂. 断层防水煤柱可靠度分析[J]. 煤田地质与勘探,2001,29(1):34-36.
- [7] 黄兴棣. 工程结构可靠性设计[M]. 北京:人民交通出版社,1989.
- [8] 刘正林. 井径煤田底板突水强度和突水频率趋势预测研究[J]. 中国矿业大学学报,1993,22(2):93-99.

(责任编辑 闫纯有)

# 煤层隔水底板稳定性可靠度分析

作者: [杜文堂](#), [杨会双](#), [贾向新](#), [DU Wen-tang](#), [YANG Hui-shuang](#), [JIA Xiang-xin](#)  
作者单位: [杜文堂, DU Wen-tang\(河北工程大学, 资源学院, 河北, 邯郸, 056038\)](#), [杨会双, YANG Hui-shuang\(河北省地勘局第十一地质大队\)](#), [贾向新, JIA Xiang-xin\(河北建设勘察研究院, 河北, 石家庄, 050031\)](#)  
刊名: [河北工程大学学报\(自然科学版\)](#)   
英文刊名: [JOURNAL OF HEBEI UNIVERSITY OF ENGINEERING \(NATURAL SCIENCE EDITION\)](#)  
年, 卷(期): 2008, 25 (2)  
被引用次数: 3次

## 参考文献(8条)

1. 房佩贤;卫中鼎;廖资生 专门水文地质学 2005
2. 施龙青;韩进 开采煤层底板“四带”划分理论与实践[期刊论文]-[中国矿业大学学报](#) 2005 (01)
3. 武强;庞炜;戴迎春 煤层底板突水脆弱性评价的GIS与ANN耦合技术[期刊论文]-[煤炭学报](#) 2006 (03)
4. 李丽;程久龙 基于信息融合技术的矿井底板突水预测[期刊论文]-[煤炭学报](#) 2006 (05)
5. 韩宇平;许拯民 区域水资源短缺风险调控研究[期刊论文]-[河北工程大学学报\(自然科学版\)](#) 2007 (04)
6. 杜文堂 断层防水煤柱可靠度分析[期刊论文]-[煤田地质与勘探](#) 2001 (01)
7. 黄兴棣 工程结构可靠性设计 1989
8. 刘正林 井径煤田底板突水强度和突水频率趋势预测研究 1993 (02)

## 本文读者也读过(10条)

1. [李珠明](#) 综合防治水患确保矿井安全[期刊论文]-[山东煤炭科技](#)2010 (6)
2. [孙莹洁](#), [田蒲源](#), [计炜](#), [SUN Ying-jie](#), [TIAN Pu-yuan](#), [JI Wei](#) 基于MapObjects的矿井水文地质信息系统设计与实现[期刊论文]-[桂林理工大学学报](#)2011, 31 (1)
3. [程金宏](#), [Cheng Jinhong](#) 矿井水文地质的空间分析及预测系统[期刊论文]-[山东煤炭科技](#)2010 (2)
4. [付小林](#), [李国良](#), [杨赉](#), [Fu Xiaolin](#), [Li Guoliang](#), [Yang Yun](#) 物探技术在煤矿浅部采空区探测中的应用[期刊论文]-[江西煤炭科技](#)2009 (1)
5. [欧钦](#), [陈绍林](#) 四川省煤矿防治水技术探讨[会议论文]-2009
6. [王立平](#), [WANG Li-ping](#) 煤层底板突水机理及评价[期刊论文]-[河南理工大学学报\(自然科学版\)](#)2008, 27 (5)
7. [俞解星](#) 煤矿矿井水患的初步评价与治理[期刊论文]-[城市建设](#)2009 (35)
8. [刘伟韬](#), [张文泉](#), [李庆忠](#) 水文地质信息可视化管理系统的开发及其在矿井水灾防治中的应用[期刊论文]-[中国地质灾害与防治学报](#)2000, 11 (2)
9. [尹尚先](#), [YIN Shang-xian](#) 煤层底板突水模式及机理研究[期刊论文]-[西安科技大学学报](#)2009, 29 (6)
10. [王春帅](#), [邵忠瑞](#) 关于崔庙煤矿矿井水文地质条件的分析[期刊论文]-[地下水](#)2010, 32 (6)

## 引证文献(3条)

1. [鲁海峰](#), [袁宝远](#), [姚多喜](#) 带压开采煤层底板突水安全可靠度分析[期刊论文]-[水文地质工程地质](#) 2010 (6)
2. [褚彦德](#) 宁东鸳鸯湖矿区红柳煤矿顶板砂岩突水机理分析[期刊论文]-[中国煤炭地质](#) 2013 (4)
3. [马彩霞](#), [赵存良](#), [刘世明](#) 鄂尔多斯盆地奥陶系沉积特征[期刊论文]-[煤炭技术](#) 2010 (5)