

# 基于事故树分析的煤矿潜在突水危险评价研究

王长申<sup>1, 2</sup>, 孙亚军<sup>1, 2</sup>, 杭 远<sup>1, 2</sup>

(1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221008; 2. 中国矿业大学 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:** 基于事故成因理论建立煤矿突水事故模型。煤矿突水事故危险源被分为突水水源、突水通道、突水诱因和应急失效 4 类; 建立煤矿突水事故树模型, 并提出基于事故树方法的煤矿突水危险性专项评价方法。以杨庄矿及其周边 6 个地方煤矿为例, 识别周边地方煤矿可能诱发杨庄矿发生地表洪水、太原组灰岩水等突水的 4 类突水事故危险源, 并以此建立杨庄矿突水事故树模型, 求最小割集评价最危险突水路径, 利用最小径集优化最有效防治措施。研究结果表明, 有 306 种可使杨庄煤矿发生煤矿突水的基本事件组合, 防止杨庄矿突水事故发生的途径是加强监管, 杜绝地方煤矿穿层、越界等违规操作。事故树方法可以完成复杂煤矿突水危险性专项安全评价。

**关键词:** 采矿工程; 矿井突水; 事故成因理论; 事故树分析; 最小割集; 危险性评价

**中图分类号:** TD 163

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2009)02 - 0298 - 08

## APPLICATION OF FAULT TREE ANALYSIS TO RISK ASSESSMENT OF POTENTIAL WATER-INRUSH HAZARDS IN COAL MINING

WANG Changshen<sup>1, 2</sup>, SUN Yajun<sup>1, 2</sup>, HANG Yuan<sup>1, 2</sup>

(1. *School of Resources and Earth Sciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China*; 2. *State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China*)

**Abstract:** Water-inrush is one of the most difficultly predicted and controlled mining accidents. On the basis of accident-causing theory, the conceptual model of mine water-inrush is developed; and the risk sources of mine water-inrush are classified into inrush water-sources, inrush passages, inrush-induced factors and salvage failure. Based on fault tree analysis, the fault tree model of mine water-inrush is constructed and the method to assess the risk of water-inrush is proposed. Taking Yangzhuang Mine, a key state-owned coal mine, for example, four types of risk sources of water-inrush from six southern-surrounding local mines are analyzed; and the water-inrush fault tree model of Yangzhuang Mine is constructed. The least cut-set to find out the most dangerous water-inrush paths is derived; and the least path-set to optimize the most effective water-inrush controlling way is presented. The result shows that there are 306 kinds of possible water-inrush cases for Yangzhuang Mine; and the most effective way for controlling water-inrush hazards is to strictly prohibit the local mines exceeding their permitted and authorized boundaries. It shows that the fault tree analysis can be effectively used in safety assessment of mine water-inrush accidents.

**Key words:** mining engineering; water-inrush hazards; accident causing theory; fault tree analysis; least cut-set; risk assessment

**收稿日期:** 2008 - 09 - 12; **修回日期:** 2008 - 12 - 10

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2007CB209400); 煤炭资源与环境科学技术创新引智基地资助项目(B07028), 江苏省博士后科研资助计划项目(0801029B)

**作者简介:** 王长申(1970 -), 男, 博士, 1994 年毕业于焦作矿业学院水文地质与工程地质专业, 主要从事矿井水文地质、环境科学等方面的研究工作。E-mail: cougar3wcs@163.com

## 1 引言

我国矿井多数都属于矿井水文地质条件复杂类型<sup>[1-2]</sup>。自 20 世纪 70 年代以来, 共有 250 多个矿井被淹, 1 700 多人死亡, 经济损失高达 350 多亿元人民币<sup>[3]</sup>。近几年, 随着越来越多的矿井进入深部开采阶段, 矿井水文地质条件更加复杂, 同时为了提高煤炭开采率、降低煤炭开采成本、减少水资源浪费, 煤矿突水事故又呈现频率上升、危害增大的趋势。据不完全统计, 自 2000 年以来的几年里共发生重特大突水事故 473 起, 死亡及失踪人数达到 2 635 人<sup>[3]</sup>。

“危险性评价”, 也称作“安全评价”, 是利用系统工程方法对拟建或已有工程、系统可能存在的危险性及其可能产生的后果进行综合评价和预测, 并提出相应安全对策措施, 以期达到工程和安全运行<sup>[4]</sup>。在 20 世纪 60 年代, 欧美等发达国家形成了以安全评价为目的、以系统工程为工具的安全系统工程理论; 其危险识别、风险评价与控制是安全系统工程的主要内容。20 世纪 80 年代初期, 安全系统工程方法首先引入我国机械、冶金、航天等部门<sup>[4-9]</sup>。其中, 较早地将更多安全系统工程方法介绍并应用于煤矿安全评价的是沈斐敏<sup>[5]</sup>。他系统介绍了事故树分析(fault tree analysis, FTA)、管理失误和风险树分析(MORT)、安全检查表(SCL)等评价方法及其在矿井火灾事故、瓦斯事故、冒顶事故、水灾事故及综合安全评价中的运用。2003 年, 我国颁布了《煤矿安全评价导则》<sup>[4]</sup>, 煤矿水害是煤矿安全评价中的一项重要内容。目前, 煤矿安全评价主要是通过矿井生产系统调查、专家打分/评分和安全检查表法等对矿井安全进行安全综合评价<sup>[4-7, 10]</sup>。

常用全检查表法的实质是依据《煤矿安全规程》、《矿井水文地质规程》等标准与规范法对矿井防治水技术与管理系统的质量进行评价, 目的是评价煤矿是否具备安全生产所必需的生产条件。我国还没有成熟的煤矿突水事故模型和有效评价复杂或特殊条件下的煤矿突水危险性的专项安全评价方法。

事故树分析(FTA)是 20 世纪 60 年代美国贝尔实验室的 T. J. Watson 等在图论基础上发展起来的逻辑

分析法<sup>[4-6]</sup>, 是一种从结果到原因描述事故的有向逻辑树图。其最大优点是可以分析事故深层原因, 也是我国普遍使用的安全评价方法<sup>[5, 6]</sup>。纪常伟等<sup>[11]</sup>基于事故树和神经网络建立航天器的智能诊断模型; 丁彩红等<sup>[12]</sup>利用事故树最小割集和基本事件的结构重要度排序进行航天器故障定位; 袁昌明<sup>[13]</sup>讨论了事故树中最小割集、最小径集的计算算法。

基于煤矿突水原理与事故致因理论建立突水事故模型, 本文提出基于事故树方法的煤矿突水事故树模型; 以杨庄矿及其 6 个周边地方煤矿为工程背景, 确定突水事故危险源, 基于事故树法评价了由于周边 6 个周边地方煤矿开采引起的杨庄矿潜在突水危险。

## 2 煤矿突水事故模型

依据煤矿突水原理和能量意外释放与人为失误理论, 煤矿突水事故的发生是由于不合理生产过程使地表或地下水系统能量向井巷工程的意外释放造成的。不合理采矿活动是能量意外释放的诱因, 不合理排水与安全救助措施加重了突水事故的灾害性, 煤矿突水事故概念模型如图 1 所示。

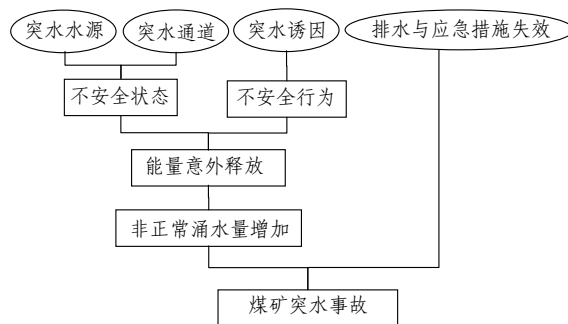


图 1 煤矿突水事故概念模型

Fig.1 Conceptual model of mine water-inrush

在图 1 中, 煤矿突水事故危险源可分为 4 类: 第一类是突水水源, 其能量以势能为主, 地下水、地表水或老窑水水位、水压、水量表明危险物能量大小。第二类是突水通道, 断层、陷落柱等天然突水通道及顶底板采动裂隙、人为钻孔等人为突水通道是能量释放途径; 二者构成矿井水能量意外释放的物质条件, 使矿井处于“不安全状态”。第三类突水诱因, 即生产过程中技术、管理和操作漏洞、

失误等“不安全行为”，它们是导致突水水源能量增高、天然突水通道活化、人为突水通道形成、非正常涌水量增加的人为“突水诱发因素”。第四类是排水与应急措施失效，它们将非正常涌水恶化成了造成生命和财产损失的突水事故。

煤矿突水类型多种多样<sup>[2]</sup>，上述 4 类危险源又包括若干直接或间接因素，矿井突水是煤矿安全事故中最难预测与防治、危害最大的事故。

### 3 煤矿突水事故树模型

#### 3.1 突水事故树模型

目前，在煤矿防治水领域，所能预测的主要是煤矿正常涌水量和最大涌水量<sup>[2]</sup>，而煤矿突水机制与预测技术仍不成熟。虽然煤矿突水是煤矿安全中的重要安全事故，但是煤矿安全评价主要是对煤矿安全系统的综合评价，也不能完成煤矿突水危险性的专项评价。

在前面煤矿突水事故模型和突水危险源分类基础上，以煤矿突水为顶上事件( $T$ )，建立了两级煤矿突水事故树基本模型，如图 2 所示。

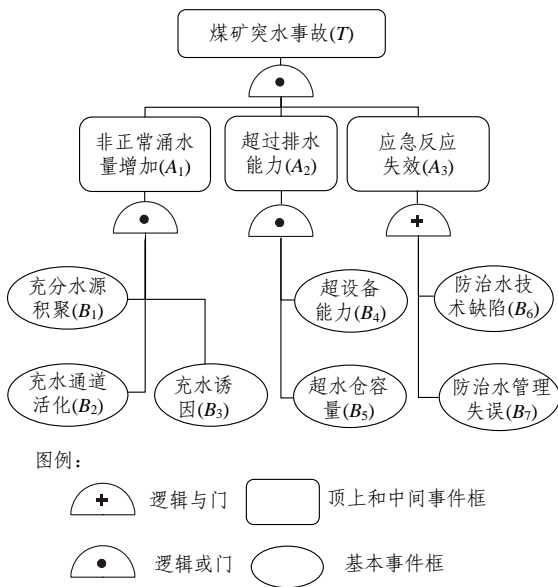


图 2 煤矿突水事故树模型

Fig.2 Fault tree model of water inrush for coal mining

在图 2 中，煤矿突水(顶上事件  $T$ )是由于非正常涌水量增加( $A_1$ )、超过排水能力( $A_2$ )以及应急失效( $A_3$ )造成的，三者是造成煤矿突水事故的必要条件，与顶上事件( $T$ )为逻辑与门关系，构成煤矿突水

事故树的第一层次。

在煤矿突水事故树的第二层次中，矿井充水水源积聚( $B_1$ )、充水通道活化( $B_2$ )和充水诱因( $B_3$ )是矿井非正常涌水量增加( $A_1$ )的必要条件，它们与  $A_1$  为逻辑与门关系；非正常涌水超过煤矿防治水系统排水能力( $B_4$ )和水仓能力( $B_5$ )是造成矿井排水能力不足( $A_2$ )的必要条件，与  $A_2$  为逻辑与门关系；防治水技术( $B_6$ )和管理( $B_7$ )缺陷与失误是造成煤矿突水事故应急失效( $A_3$ )的充分条件，其与  $A_3$  为逻辑或门关系。

该基本模型是单成因(类型)的煤矿突水事故树模型，根据突水水源的不同，可分析地表水充水、孔隙水充水、裂隙水充水、老窑水充水和岩溶水充水引起的煤矿突水事故；根据突水通道不同，可分析断层突水、陷落柱突水等煤矿突水事故。同时，可通过对事故树中各中间和基本事件的进一步分解实现复杂矿井、复杂成因的煤矿突水事故评价。

#### 3.2 突水事故树模型定性分析方法

煤矿突水事故树直观、清晰地反映了突水事故发生的因果关系，定性分析包括最小割集、最小径集和结构重要度分析。

最小割集是导致顶上事件发生的最起码/基本事件组合，是系统发生故障的充要条件<sup>[4~6]</sup>。最常用的求最小割集方法是布尔代数化简法和行列式法。分析煤矿突水事故树最小割集的目的：(1) 最小割集数量越多，煤矿突水可能性越大，系统越危险；(2) 最小割集是煤矿发生突水的基本事件组合，通过分析最小割集分析，评价煤矿突水途径；(3) 通过分析最危险突水途径提出预防措施。

最小径集是使事故不发生的最低限度的基本事件的集合<sup>[4~6]</sup>。求最小径集的方法是首先将事故树中每一个基本事件变成它们的“对偶事件”，将“与门”变为“或门”，“或门”变为“与门”，则事故树变成了“成功树”，然后求“成功树”的最小割集，即为事故树的最小径集。分析突水事故树最小径集的目的：(1) 通过最小径集数量评价系统的安全性；(2) 通过最小径集中基本事件的数量评价突水防治难易程度；(3) 评价基本事件对突水事故的重要程度。

结构重要度是在不考虑基本事件发生概率或假定各基本事件的发生概率相等的情况下，基本事件发生对顶上事件所产生的影响程度<sup>[4~6]</sup>。分析方法

是利用最小割集和最小径集比较基本事件结构重要系数大小。依据基本事件的结构重要度系数, 找出煤柱防治水系统中的最薄弱环节, 确定煤矿突水防治措施的优先顺序和提出突水防治优选方案。

## 4 工程实例

### 4.1 杨庄矿及周边地方煤矿工程背景

杨庄矿主要可采煤层为下石盒子组 5 煤以及山西组 6 煤, 一水平(-180 m)已经报废, 二水平(-330 m)生产基本结束, 三水平(-500 m)为主要开采水平; 矿井属于“岩溶充水矿床底板进水为主的极复杂水文地质类型”, 主要受地表水与松散层孔隙水、5 煤顶板火成岩凝结水、6 煤底板及太原组灰岩水等威胁。

自 20 世纪 90 年代末, 杨庄矿一水平报废后, 一水平 3, 4, 5, 6 煤层的部分残余煤炭划归地方煤矿开采, 在杨庄矿南部浅部煤层露头处, 自东向西分别建有生产能力 6~12 t 的周 A~F 煤矿 6 个周围地方煤矿, 杨庄与 6 个地方煤矿位置关系见图 3。由于: (1) 随着近十几年采空区范围进一步扩大, 地方煤矿所处的浅部露头塌陷区东、西塌陷坑和乾隆湖积水量达  $2.180 \times 10^7 \text{ m}^3$  以上。(2) 个别地方煤矿, 如 2006 年的周 C 与 D 矿、2008 年的周 F 矿, 发生超层、越界等违规开采事件, 极可能破坏第四系底部稳定隔水层、揭露 6 煤底板太原组灰岩水承压含水层, 使地方煤矿面临地表水溃入和底板太原组灰岩水突水的危险。(3) 杨庄矿各水平连续开采, 开采水平之间相互连通, 而使原本已经属于极复杂水文地质条件类型的杨庄矿陷入一种更复杂的特殊水害威胁之中, 即来自多个地方小煤矿的重大突水威胁。

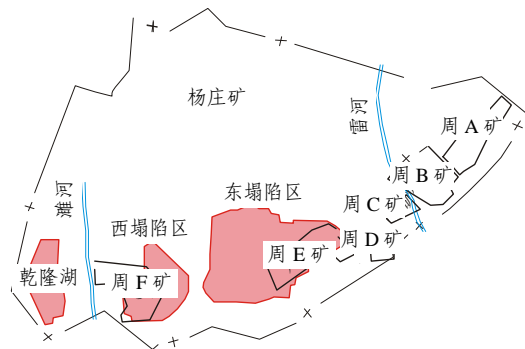


图 3 杨庄矿与 6 个地方煤矿位置关系图

Fig.3 Locations of Yangzhuang Mine and 6 local mines

同时, 由于杨庄矿与各地方煤矿及各地方煤矿之间空间关系和水文地质条件极其复杂, 各地方煤矿实际开采资料不详, 且各地方煤矿超层越界方位、区域、时间难以确定, 安全检查表法难以完成由地方煤矿引起杨庄矿突水路径、危害程度与防治措施评价, 因此本文选择事故树法完成该突水危险评价。

解决问题的方法是: 分析地方煤矿周围杨庄矿的残余煤炭资源, 预测地方煤矿可能的超层越界区域, 识别地方煤矿突水危险源, 利用煤矿突水事故树模型评价假设地方煤矿超层越界条件下杨庄矿的突水途径与突水危险程度, 并提出了最有效的防治方案。

### 4.2 杨庄矿突水危险源识别

在分析地方煤矿周围杨庄矿残余煤炭资源和地方煤矿可能超层越界区域基础上, 识别杨庄矿及周边地方煤矿突水水源、突水通道和突水诱因, 周边地方煤矿诱发杨庄矿非正常涌水量增加的原因有洪水溃入( $B_1$ )、地表水及第四系松散层孔隙水溃入( $B_2$ )、6 煤底板及太原组岩溶水突水( $B_3$ )、5 煤顶板火成岩水和老塘水突水( $B_4$ )等。不同突水类型突水水源、突水通道与诱发因素较多, 见表 1。

表 1 地方煤矿引起杨庄矿潜在突水类型及危险源

Table 1 Risk sources of water inrush caused by local mines

突水类型	突水危险源
洪水溃入( $B_1$ )	周 A 矿旧风井高程(+31.4 m)与周 F 矿旧风井高程(+32.1 m)低于当地历史最高洪水位(+32.7 m), 为基本事件 $x_1$ 与 $x_2$
地表水和松散层孔隙水溃入( $B_2$ )	(1) 各地方煤矿擅自突破各自开采上限提高煤炭开采率, 为基本事件 $x_3 \sim x_8$ ; (2) 周 B, C 和 D 矿采动或破坏雷河保护煤柱, 周 F 矿采动或破坏濠河保护煤柱提高煤炭开采率, 为基本事件 $x_9 \sim x_{12}$
6 煤底板及太原组灰岩水突水( $B_3$ )	(1) 构造导水, 包括周 A 煤矿内的 1 号陷落柱以及落差大于 10 m 的断层, 主要包括周 B 矿内 AF1 断层、周 C 矿内 AF2 及太原组断层及周 F 矿内 DF4 断层, 为基本事件 $x_{13} \sim x_{16}$ ; (2) 井田内封闭不良钻孔导水, 主要包括周 B 矿的 B14、周 C 矿的 A74、周 E 矿的日伪 4 和 A34、周 F 矿的日伪 13, 为基本事件 $x_{17} \sim x_{20}$ ; (3) 杨庄矿残余资源分析发现, 地方煤矿都具备超层、越界采杨庄矿 6 煤资源的条件, 为基本事件 $x_{21} \sim x_{26}$
5 煤顶板火成岩水和老塘水突水( $B_4$ )	5 煤顶板火成岩凝结水局部聚积, 表现出老塘水突水特征, 主要危险源有: (1) 杨庄矿残余资源分析发现, 除周 A 矿外, 其他地方煤矿都具备超层或越界采杨庄 5 煤条件, 为基本事件 $x_{27} \sim x_{31}$ ; (2) 周 A, E 和 F 矿主要开采杨庄矿报废采区的 5 煤遗留煤柱, 属老区复采, 探放水不利时构成突水危险, 为基本事件 $x_{32} \sim x_{34}$

排水与应急失效主要包括: 超过地方煤矿与杨庄矿排水能力( $A_2$ )与应急反应失效( $A_3$ ), 危险源包括非正常涌水超过地方与杨庄矿设备与水仓能力(为

基本事件 $x_{35} \sim x_{38}$ )以及基础资料不详、没有应急预案、避灾路线不合理、水闸门设计缺陷、排水设备不能使用、隐瞒突水事故、盲目指挥、防治水措施未落实、杨庄矿避灾路线被破坏等(为基本事件 $x_{39} \sim x_{47}$ )。

### 4.3 杨庄矿突水事故树建模

为了能够清晰分析各类突水危险源(4 类 47 种)与突水类型(5 类)的关系,根据煤矿突水事故模型和突水危险源分析,建立杨庄矿突水事故树模型,如图 4 所示。

在图 4 中,突水事故树的顶层以杨庄矿突水事故( $T$ )作为顶上事件;突水事故是矿井非正常涌水量增加( $A_1$ )、超过排水能力( $A_2$ )和应急失效( $A_3$ )同时发生的结果,属于逻辑“与门”关系,此为第一层;在第二层,矿井非正常涌水量增加是由于洪水溃入( $B_1$ )、地表积水及松散层孔隙水突水( $B_2$ )、6 煤底板及太原组灰岩水突水( $B_3$ )或 5 煤顶板火成岩凝结水及老空水突水( $B_4$ )引起的,为逻辑“或门”关系;排水能力不足是由于突水量同时超过杨庄与地方煤矿的设备排水能力( $B_5$ )与水仓容积( $B_6$ )的结果,为逻辑“与门”关系;应急失效包括技术问题( $B_7$ )与管理不善( $B_8$ ),为逻辑“或门”关系;在第三层,破坏顶板防水煤柱( $C_1$ )或雷河与濉河煤柱( $C_2$ )是引起地表水和松散层水突水的原因,为“或门”;构造导水( $C_3$ )、钻孔导水( $C_4$ )或穿层越界( $C_5$ )是引起 6 煤底板及太原组灰岩水的主要原因,为“或门”关系;越界开采( $C_6$ )或探放不利( $C_7$ )是引起 5 煤顶板凝结水及老窑水突水的原因,为“或门”关系;第四层为引起突水的基本事件,记为  $x_i$ ,共 47 种(见表 1);其中,使非正常涌水量增加 34 种 $\{x_1, x_2, \dots, x_{34}\}$ ,排水能力不足的 4 种 $\{x_{35}, x_{36}, x_{37}, x_{38}\}$ ,应急失效 9 种 $\{x_{39}, x_{40}, \dots, x_{47}\}$ ,见图 4。

### 4.4 最小割集计算与突水路径分析

利用行列式法求解杨庄矿突水事故树的最小割集:

$$T = A_1 A_2 A_3 = (B_1 + B_2 + B_3 + B_4)(B_5 B_6)(B_7 + B_8) = \sum_{i=1}^{34} x_i x_{35} x_{36} x_{37} x_{38} \sum_{j=39}^{47} x_j \quad (1)$$

式中:  $x_i (i = 1, 2, \dots, 34)$ 为使非正常涌水量增加的 34 种基本事件,  $x_j (j = 39, 40, \dots, 47)$ 为应急失效的 9 种基本事件。

杨庄矿发生突水事故的最小割集为

$$\phi = \{ \{x_1 x_{35} x_{36} x_{37} x_{38} x_{39}\}, \{x_1 x_{35} x_{36} x_{37} x_{38} x_{40}\}, \dots, \{x_1 x_{35} x_{36} x_{37} x_{38} x_{47}\}, \dots, \{x_{34} x_{35} x_{36} x_{37} x_{38} x_{47}\} \} \quad (2)$$

式(2)共 306 个最小割集,每个最小割集代表杨庄矿突水的一种基本事件组合,即杨庄在 6 个地方煤矿影响下存在 306 种突水路径或突水模式,防治难度非常大。每个路径包括一个使非正常涌水量增加的基本事件、4 个使排水能力不足的基本事件和一个应急反应失效的基本事件组成。从最小割集计算可以得出:

(1) 使非正常涌水量增加的 34 个基本事件(原因)是造成各种杨庄矿突水灾害发生的最重要原因。在这 34 个基本事件(原因)中,构造事件(原因)4 种,钻孔事件(原因)4 种,探放水事件(原因)3 种,井口高程事件(原因)2 种,河流等防(隔)水(砂)煤岩柱事件(原因)4 种、各种超层、越界事件(原因)17 种;其中,各类违法开引发的突水模式占 189 种;杜绝违规操作可以极大降低突水防治难度。

(2) 首先从突水危害程度来看,后果最严重的基本事件是地方煤矿突破开采上限、井口高程低于历史最高洪水位和破坏河流防隔水煤岩柱问题,根据我国类似突水案例分析,可直接造成杨庄矿二、三或四水平甚至整个矿井被淹;其次是地方煤矿超层越界开采 6 煤、破坏陷落柱与断层防隔水煤岩柱或钻孔导水,根据杨庄矿以往太原组灰岩突水案例,也可以引发开采水平被淹;第三是超层越界开采 5 煤或探放不利引起的 5 煤顶板火成岩凝结水或老塘水突水,可使工作面甚至水平被淹;第四是技术与管理方面的应急失效问题,后果是引发或加重事故的灾害性。

(3) 从基本事件的发生频率上,井口高程问题引发突水事故受多年降水周期规律影响,而目前各类已经发现或未被发现的违规开采时有发生,引发突水概率最大。

### 4.5 最小径集计算与防治措施分析

将杨庄矿突水事故树变成了“成功树”,求解成功树的最小割集,得事故树最小径集为

$$T' = A'_1 + A'_2 + A'_3 = (B'_1 B'_2 B'_3 B'_4) + (B'_7 B'_8) + (B'_5 + B'_6) = x'_1 x'_2 \dots x'_{34} + x'_{39} x'_{40} \dots x'_{47} + x'_{35} + x'_{36} + x'_{37} + x'_{38} \quad (3)$$

因此,突水事故树存在 6 个最小径集,分别为

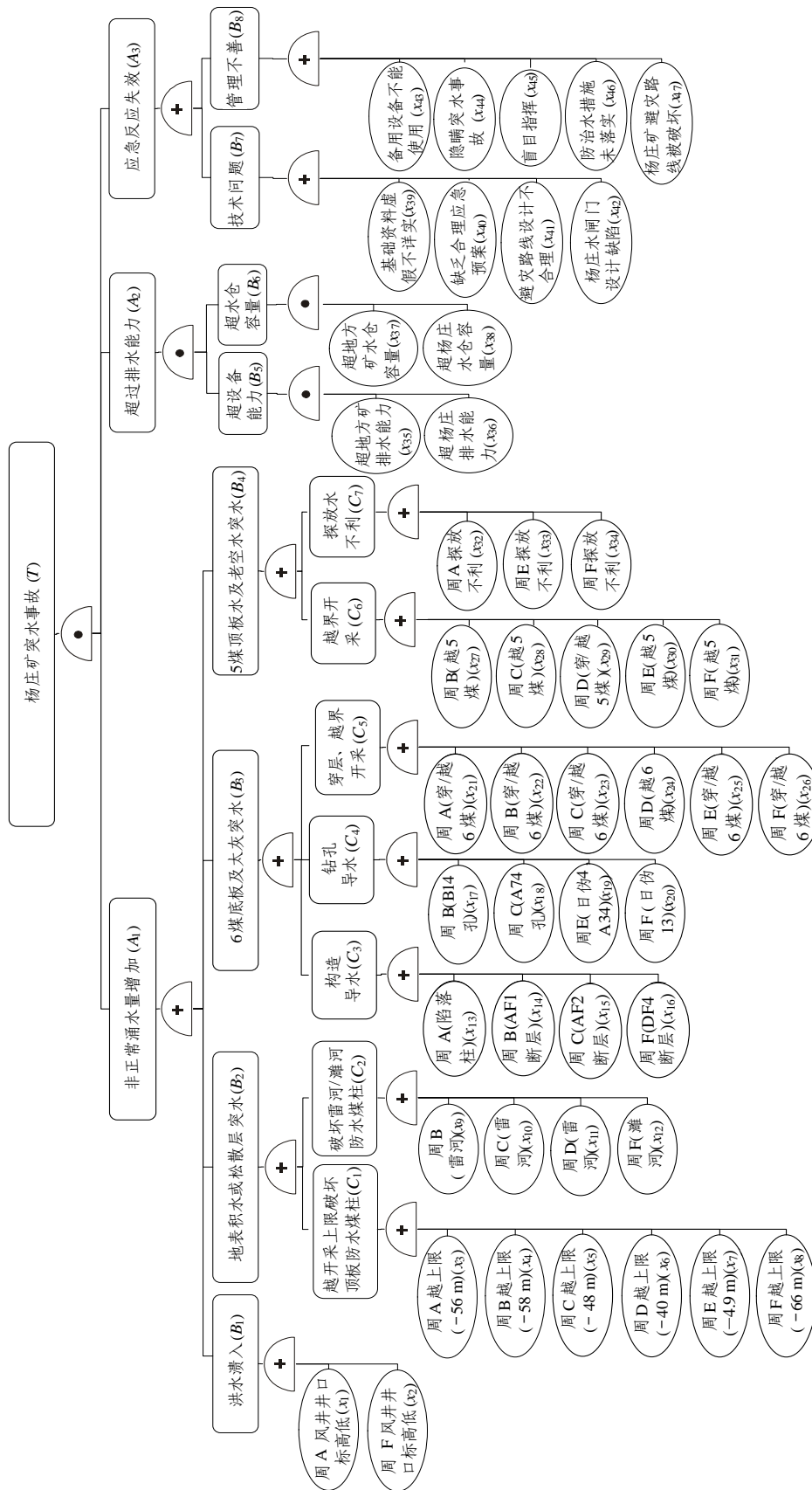


图 4 杨庄矿突水事故树模型

Fig.4 Model of fault tree of water inrush for Yangzhuang Mine

$$\left. \begin{aligned}
 P_1 &= \{x'_1, x'_2, \dots, x_{34}\} \\
 P_2 &= \{x'_{39}, x'_{40}, \dots, x'_{47}\} \\
 P_3 &= \{x'_{35}\} \\
 P_4 &= \{x'_{36}\} \\
 P_5 &= \{x'_{37}\} \\
 P_6 &= \{x'_{38}\}
 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式(4)的结果表明:

(1)  $P_3, P_4, P_5$  与  $P_6$  代表了防治突水的最短路径, 措施是使杨庄和地方煤矿的排水设备能力或水仓容积能够承受这种突水事故压力; 显然, 杨庄矿和地方煤矿显然没有办法、也没有理由扩大排水能力去承担非法开采可能引发的突水压力。

(2)  $P_2$  由 9 个基本事件组成, 措施是同时避免应急预案中的技术与管理失误; 但是应急预案与设计 and 投产时预计矿井正常水量、最大涌水量及突水特点相匹配, 应急预案措施足以保证最大限度的减小在正常开采条件下突水事故损失, 却不足以挽救非法开采招致的“严重”灾难。

(3)  $P_1$  由 34 个基本事件组成, 措施是同时避免使非正常涌水量增加的 34 个基本事件发生, 难度很大; 但是在 34 个基本事件当中, 擅自提高开采上限、5 煤与 6 煤超层越界开采、破坏河流与断层隔水煤柱等 21 个基本事件都属于法律、法规严格禁止的违法开采行为; 如果能够杜绝这些现象,  $P_2$  中基本事件仅有 13 个, 防治难度降低, 各地方煤矿也不会再对杨庄矿构成如此严重、复杂突水威胁。

#### 4.6 结构重要度比较与防治方案优化

根据最小径集计算突水事故树中基本事件的结构重要度。在最小径集  $P_1$  中, 假定各基本事件的发生概率相等, 则  $P_1 = \{x_1, x_2, \dots, x_{34}\}$  中基本事件  $x_1, x_2, \dots, x_{34}$  对杨庄矿突水事故的结构重要程度相同, 即

$$I_{\phi(1)} = I_{\phi(2)} = \dots = I_{\phi(34)} \quad (5)$$

同理, 有

$$\left. \begin{aligned}
 I_{\phi(39)} &= I_{\phi(40)} = \dots = I_{\phi(47)} \\
 I_{\phi(35)} &= I_{\phi(36)} = I_{\phi(37)} = I_{\phi(38)}
 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

又由于最小径集中  $P_3 \sim P_6$  的基本事件数量最小, 其基本事件的结构重要度最大,  $P_2$  中基本事件

结构重要度次之,  $P_1$  中基本事件结构度最小, 即

$$I_{\phi(1)} < I_{\phi(39)} < I_{\phi(35)} \quad (7)$$

比较结果说明, 杨庄矿与地方煤矿排水能力的基本事件结构重要度最大。在正常开采条件下, 杨庄与地方煤的排水系统是矿防治水系统的最重要环节; 但是, 在地方煤矿可能违法开采的条件下, 突水危害远远超过它们的排水能力和应急反应能力, 最优的突水防治措施是通过监管、教育、法律等手段杜绝违规开采。

## 5 结 论

(1) 基于煤矿突水原理和事故致因理论建立煤矿突水事故概念模型: 突水水源与通道使工作面处于“不安全状态”, 突水诱因等“不安全行为”诱发非正常涌水量增加, 排水与应急措施失效最终酿成突水事故。

(2) 基于煤矿突水事故模型建立煤矿突水事故树模型, 可以直观、清晰分析复杂煤矿突水事故的直接、深层原因, 通过最小径集、最小割集等计算评价煤矿突水路径、突水部位、危害程度、防治关键, 完成煤矿突水危险性专项评价。

(3) 6 个地方煤矿引起杨庄矿突水的危险源有 47 种, 与违法开采相关的 21 种; 突水路径 306 种, 穿层、越界等违法开采引发的潜在突水 189 种; 最危险的突水模式是由矿井口高程问题和擅自提高开采上限引发的地表积水溃入, 能够造成生产水平甚至整个杨庄矿井被淹, 有 72 种可能。

(4) 目前最紧迫的防治措施是处理井口高程低于历史最高洪水水位问题, 严禁提高开采上限, 杜绝穿层、越界开采, 降低杨庄矿和地方煤矿的防治水难度, 恢复到正常涌水的防治水平。

**致谢** 由衷感谢提供资料的杨庄矿及有关部门, 诚挚感谢煤矿防治水专家张希久、韩东亚、段中稳、胡永达以及张浩海的技术支持与帮助!

#### 参考文献(References):

[1] 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.(FAN Weitang, LU Jianzhang, SHEN Baohong. Technology and measures of mine hazards control[M].

- Xuzhou: China University Mining and Technology Press, 2007.(in Chinese))
- [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.(Society for Institute of Labor Protection and Technology of China Coal Industry. Technology of mining water hazards control[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2007.(in Chinese))
- [3] 缪协兴, 浦海, 白海波. 隔水关键层原理及其在保水采煤中的应用研究[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(1): 1 - 4.(MIAO Xiexing, PU Hai, BAI Haibo. Principle of water-resisting key strata and its application to water-preserved mining[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2008, 37(1): 1 - 4.(in Chinese))
- [4] 国家安全生产监督管理总局. 安全评价[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004.(State Administration of Work Safety, People's Republic of China. Safety assessment[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2004.(in Chinese))
- [5] 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.(SHEN Feimin. Theory and application of safety engineering[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2001.(in Chinese))
- [6] 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.(LIN Boquan, ZHOU Yan, LIU Zhentang. Safety system engineering[M]. Xuzhou: China University Mining and Technology Press, 2005.(in Chinese))
- [7] 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.(LING Biaocan. Discussion on content of safety assessment for colliery flood[J]. China Safety Science Journal, 2004, 14(7): 64 - 66.(in Chinese))
- [8] 钱新明, 陈宝智. 事故致因的突变模型[J]. 中国安全科学学报, 1995, 5(2): 1 - 4.(QIAN Xinming, CHEN Baozhi. Catastrophe model for accident cause[J]. China Safety Science Journal, 1995, 5(2): 1 - 4.(in Chinese))
- [9] 罗春红, 谢贤平. 事故致因理论比较分析[J]. 中国安全生产科学学报, 2007, 3(5): 111 - 115.(LUO Chunhong, XIE Xianping. Comparison study of accident-causing theories[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2007, 3(5): 111 - 115.(in Chinese))
- [10] 曹树刚, 张立强, 刘延保, 等. 小煤矿事故致因模型及预防保障体系分析[J]. 煤炭学报, 2008, 33(6): 629 - 634.(CAO Shugang, ZHANG Liqiang, LIU Yanbao, et al. Causing model of accidents and preventing system of small mines[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(6): 629 - 634.(in Chinese))
- [11] 纪常伟, 荣吉利, 黄文虎. 基于故障树和神经网络模型的航天器智能诊断研究[J]. 空间科学学报, 1999, 19(2): 160 - 166.(JI Changwei, RONG Jili, HUANG Wenhui. Research on intelligent diagnosis for spacecraft based on fault tree and neural network[J]. Chinese Journal of Space Science, 1999, 19(2): 160 - 166.(in Chinese))
- [12] 丁彩红, 黄文虎, 姜兴渭. 基于最小割集排序的航天器故障定位方法[J]. 空间科学学报, 2000, 20(1): 89 - 94.(DING Caihong, HUANG Wenhui, JIANG Xingwei. A method of fault isolation for spacecraft based on minimum cut sets' rank[J]. Chinese Journal of Space Science, 2000, 20(1): 89 - 94.(in Chinese))
- [13] 袁昌明. 事故树分析中最小割集、最小径集的计算求解[J]. 中国计量学院学报, 2002, 13(4): 308 - 310.(YUAN Changming. On funding versatile solution of the least cut set and least path set in fault tree analysis by computer[J]. Journal of China Institute of Metrology, 2002, 13(4): 308 - 310.(in Chinese))