

doi: 10.11799/ce201410045

大采高综放面支架—围岩系统失稳的模糊事故树法研究

何富连, 赵志志, 何尚森, 李通达, 殷帅峰
(中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083)

摘要: 基于同忻矿大采高综放面支架—围岩系统失稳机理, 探究影响综放面稳定性的因素, 建立了大采高综放面支架—围岩系统失稳事故树; 运用三角模糊函数和布尔代数法求出顶事件发生的模糊概率, 评价系统的安全性; 对基本事件的模糊重要度进行排序, 从而确定导致综放面支架—围岩系统失稳的主要因素。

关键词: 大采高综放面; 支架—围岩系统失稳; 事故树; 三角模糊数

中图分类号: TD323 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0959(2014)10-0158-04

Fuzzy Fault Tree Analysis on Instability of Bracket – Rock System in Fully Mechanized Caving Face with Large Cutting Height

HE Fu – lian, ZHAO Zhi – zhi, HE Shang – sen, LI Tong – da, YIN Shuai – feng

(School of Resources and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the instability mechanism of bracket – rock system in fully mechanized caving face with large cutting height in Tongxin coal mine, the influence factors was investigated for the stability of fully mechanized caving face, and the instability fault tree was established. The fuzzy probability of top event was calculated with triangular fuzzy function and Boolean algebra method, and the security of the system was evaluated. The importance degree of elementary event was ranked to ascertain the dominant factor for the instability of bracket – rock system in fully mechanized caving face with large cutting height.

Keywords: fully mechanized caving face; instability of bracket – rock system; fault tree; triangular fuzzy numbers

大采高综放开采由于煤层较厚、生产条件特殊, 相对于普通综放开采对支架等相关设备有了更高的要求, 设备的维护和管理难度加大, 故障率也较普通综放面设备要高; 加之操作不慎, 组织失误等人为因素, 使得工作面支护往往达不到理想效果甚至出现支护失效。另外, 由于采高和顶煤厚度大幅增加, 大采高综放面还存在覆岩运动规律不清, 力源不明^[1]等复杂地质问题, 致使支架—围岩系统失稳的几率进一步增大, 因此保证大采高综放面支架—围岩系统的安全稳定是煤矿实现高产高效的必要条件。

同忻矿 8105 综放工作面主采煤层为石炭系 3[#] ~ 5[#] 煤, 采用单一走向长壁后退式综合机械化放顶煤开采, 工作面

倾斜长 200m, 中部支架为 ZF15000/27.5/42 型支撑掩护式低位放顶煤支架, 采高为 3.9m, 放煤厚度 11.59m。在该工作面的开采过程中比较严重的片帮冒顶等异常矿压现象时有发生, 不仅如此, 在该煤层开采的过程中也曾发生严重的支架—围岩事故。如在 8107 综放工作面曾发生大范围的冒顶片帮和底鼓事故, 事故初期, 煤壁发生严重片帮, 片帮深度达 1.5 ~ 2.5m, 局部大于 3.0m; 后期, 顶板大范围冒漏, 大量矸石漏至工作面, 最大冒高达 17m 以上, 大量冒落煤岩体侵入到支架中, 导致工作面停产, 严重威胁井下人员的安全。

为了保障 8105 工作面的后续安全生产需要对支架—围

收稿日期: 2013-08-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51234005); 国家重点基础研究发展计划资助(2010CB226802); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2010YZ02)

作者简介: 何富连(1966-), 男, 浙江临海人, 教授, 博士生导师, 主要从事矿山压力与岩层控制方面研究, E-mail:1046171715@qq.com。

引用格式: 何富连, 赵志志, 何尚森, 等. 大采高综放面支架—围岩系统失稳的模糊事故树法研究 [J]. 煤炭工程, 2014, 46(10): 158-161.

岩系统进行深入研究。目前,大采高综放开采虽然在理论和实践都有一些进展,但是由于各个矿井的地质生产条件差异较大,支架—围岩系统稳定性的关键影响因素也有较大区别,并且现有研究也极少对支架—围岩这一复杂的矿山系统进行全面细致的分析,矿井安全事故的“蝴蝶效应”时有发生。因此,本文将模糊事故树法引入到大采高综放工作面支架—围岩系统稳定性的研究中。

事故树分析法作为一种全面有效的系统安全评价方法,其描述事故的因果关系具有直观明了、思路清晰、逻辑性强等优点,不仅能分析出事故的直接原因,而且能深入地揭示出导致事故的潜在原因,传统的事故树分析要求基本事件有精确的概率,但在煤矿系统中,存在很多不确定因素,这些不确定性的因素对系统基本事件的发生行为有影响,基本事件的精确概率并不是一成不变的;另外有些基本事件也没有精确的统计概率,为了尽可能准确描述事故发生的可能性引入三角模糊数表征基本事件发生的概率。

1 三角模糊数

R 上的一个模糊集 A 称为三角模糊数,若它满足^[2]:

- 1) 存在 R 上的 3 个点 l, m, u , 且 $l < m < u$;
- 2) 隶属函数具有如下形式:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & x \in (-\infty, l) \\ \frac{x-l}{m-l} & x \in [l, m] \\ \frac{u-x}{u-m} & x \in [m, u] \\ 0 & x \in (u, +\infty) \end{cases}$$

如图 1 所示为两个三角模糊数;三角模糊数的相关计算原则可参考文献 [2], 不再赘述。

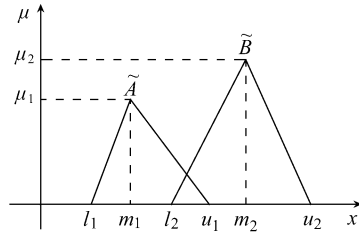


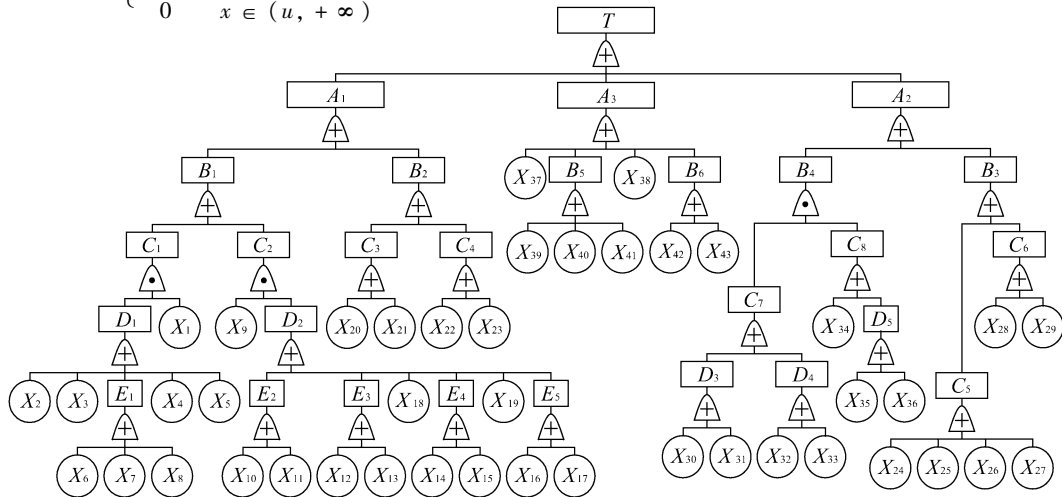
图 1 两个三角模糊数

2 支架—围岩事故树的建立及分析

2.1 支架—围岩系统失稳事故树建立

基于大采高综放面支架—围岩系统失稳机理结合 8105 综放工作面地质生产条件以及矿井工作面以往事故统计,主要从支架和围岩的两方面探讨导致事故发生的原因,统计分析基本事件建立大采高综放工作面支架—围岩失稳事故树,如图 2 所示。其中基本事件共 43 个用 $X_1, X_2 \dots X_{43}$ 表示,基本事件的类型见表 1。

在以往统计资料的基础上计算得出部分基本事件的概率并以实测统计为依据确定波动范围;对于缺少资料难以统计的基本事件通过 3σ 表征法^[3] 确定其模糊概率数,见表 1。其中无精确统计概率的基本事件有: $X_{24}, X_{25}, X_{26}, X_{27}, X_{28}, X_{29}, X_{32}, X_{33}, X_{35}, X_{36}, X_{42}, X_{43}$ 。



T —支架—围岩失稳; A_1 —支架失稳; A_2 —围岩失稳; A_3 —劳动作业管理不善; B_1 —支架故障; B_2 —支护质量差; B_3 —围岩开裂软弱; B_4 —异常矿压显现; B_5 —移护不规范; B_6 —割煤质量差; C_1 —机械故障; C_2 —泄漏故障; C_3 —支护质量差; C_4 —支架稳定性差; C_5 —煤岩体松软破碎; C_6 —构造发育; C_7 —围岩异常破碎; C_8 —预测防护不力; D_1 —支架构件损坏; D_2 —液压系统泄漏; D_3 —端面围岩事故; D_4 —顶板异常来压; D_5 —围岩裂动机理不明; E_1 —管路故障; E_2 —立柱泄漏; E_3 —千斤顶泄漏; E_4 —操纵阀泄漏; E_5 —单向阀泄漏

图 2 大采高综放工作面支架—围岩系统失稳事故树

2.2 事故树的分析

2.2.1 定量分析

1) 利用布尔代数法,计算出顶上事件 T 的发生概率为 0.31 ~ 0.52, 表明 8105 综放工作面支架—围岩系统稳定性

较差,系统的潜在危险性较大,应提高警惕并采取相应措施确保工作面支架—围岩系统的安全。

2) 三个A级事件的概率降序为支架失稳(0.22~0.25)、劳动作业管理不善(0.12~0.22)、围岩失稳(0.06~0.11),表明支架失稳是支架—围岩系统失稳的主因,要使系统的整体稳定性得到较大提高应着眼于如何保持支架的稳定性。

表1 大采高综放工作面支架—围岩系统失稳事故树基本事件的三角模糊概率数

符号	基本事件	三角模糊概率数	符号	基本事件	三角模糊概率数
X_1	破损结构件检修不力	(0.014, 0.054, 0.016)	X_{23}	顶梁俯仰异常	(0.0019, 0.039, 0.0012)
X_2	立柱损坏	(0.00002, 0.0001, 0.00005)	X_{24}	顶煤破碎	(0.00097, 0.003, 0.00097)
X_3	千斤顶弯曲脱落	(0.00002, 0.0002, 0.00001)	X_{25}	底板松软	(0.00255, 0.00917, 0.00255)
X_4	操纵阀手把顿挫失灵	(0.001, 0.006, 0.002)	X_{26}	裂隙发育	(0.00073, 0.005, 0.00073)
X_5	底座主筋断裂	(0.00003, 0.0001, 0.00002)	X_{27}	夹层繁多	(0.00615, 0.01233, 0.00615)
X_6	液压软管破损	(0.001, 0.005, 0.003)	X_{28}	断层	(0.00134, 0.0015, 0.00134)
X_7	管路堵塞	(0.006, 0.02, 0.008)	X_{29}	煌斑岩入侵	(0.01224, 0.023, 0.01224)
X_8	管路接头损坏	(0.005, 0.015, 0.005)	X_{30}	严重片帮	(0.005, 0.043, 0.003)
X_9	乳化液泄漏发现不及时	(0.05, 0.65, 0.05)	X_{31}	冒顶	(0.002, 0.009, 0.004)
X_{10}	立柱泄漏	(0.0004, 0.003, 0.0007)	X_{32}	周期来压过大	(0.00883, 0.022, 0.00883)
X_{11}	立柱活腔串液	(0.0006, 0.005, 0.0009)	X_{33}	顶板大面积来压	(0.00075, 0.00157, 0.00075)
X_{12}	千斤顶漏液	(0.007, 0.01, 0.003)	X_{34}	防护措施不及时	(0.0015, 0.005, 0.0024)
X_{13}	千斤顶活腔串液	(0.003, 0.03, 0.005)	X_{35}	冒落片帮机理不明	(0.12246, 0.25, 0.12246)
X_{14}	操纵阀漏泄	(0.004, 0.01, 0.003)	X_{36}	覆岩破断运动机理不明	(0.07071, 0.36667, 0.07071)
X_{15}	操纵阀串液	(0.01, 0.05, 0.02)	X_{37}	推进速度过慢	(0.003, 0.015, 0.001)
X_{16}	单向阀漏液	(0.003, 0.008, 0.002)	X_{38}	采高超限	(0.016, 0.044, 0.006)
X_{17}	单向阀高低串液	(0.007, 0.013, 0.009)	X_{39}	支护不及时	(0.0005, 0.003, 0.0003)
X_{18}	安全阀漏液	(0.004, 0.055, 0.005)	X_{40}	梁端距过大	(0.003, 0.032, 0.007)
X_{19}	液压管漏液	(0.002, 0.005, 0.001)	X_{41}	接顶距过大	(0.007, 0.035, 0.013)
X_{20}	初撑力不足	(0.005, 0.02, 0.007)	X_{42}	底板未割平	(0.0122, 0.025, 0.0122)
X_{21}	支架前梁不接顶	(0.006, 0.04, 0.004)	X_{43}	煤壁未采直	(0.0245, 0.014, 0.0245)
X_{22}	支架倾倒歪斜	(0.0021, 0.015, 0.0038)	—	—	—

2.2.2 定性分析

1) 事故树的最小割集。采用布尔代数法求系统的最小割集,应用到支架—围岩事故树,其表达式如下:

$$\begin{aligned}
 T &= A_1 + A_2 + A_3 \\
 &= X_1 [X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + (X_6 + X_7 + X_8)] + X_9 \\
 &\quad [(X_{10} + X_{11}) + (X_{12} + X_{13}) + (X_{14} + X_{15}) + \\
 &\quad (X_{16} + X_{17}) + X_{18} + X_{19}] + [(X_{20} + X_{21}) + \\
 &\quad (X_{22} + X_{23})] + (X_{24} + X_{25} + X_{26} + X_{27}) + \\
 &\quad (X_{28} + X_{29}) + [X_{30} + X_{31} + X_{32} + X_{33}] \\
 &\quad [X_{34} + (X_{35} + X_{36})] + [X_{37} + X_{38} + (X_{39} + \\
 &\quad X_{40} + X_{41}) + (X_{42} + X_{43})]
 \end{aligned}$$

由上式可知,该故障树最小割集数46,任意一个最小割集的发生都能影响支架—围岩系统的稳定性。

从8105综放工作面支架—围岩系统失稳事故树的逻辑门构成分析,逻辑门共28个,其中逻辑“或”门25个,占89.3%;而“与”门3个,仅占10.7%。“或”门较多表明大部分单个事件都有输出,即每一个单个事件的发生

3) 支架泄漏故障概率为0.136~0.141,在支架整体故障中所占的比例达到60.9%,表明支架的泄漏故障是造成支架性能欠佳的主因,另外支架的液压阀泄漏故障即操纵阀、安全阀、单向阀三者泄漏故障之和占支架泄漏故障的96.4%,因此加强液压阀的检修是保证支架液压系统良好工作的重中之重。

都会引起相应的故障或事故,支架—围岩系统的稳定性较差。

2) 基本事件的模糊重要度分析。基本事件的模糊重要度 S_i 反映了对顶上事件的影响程度,基本事件的模糊重要度越大,表明其对系统的影响越大。本文采用模糊重要度中值法^[4,5],求出基本事件的模糊重要度,并对其排序,令 S_i 为基本事件 X_i 的模糊重要度,则基本事件的模糊重要度排序:

$$\begin{aligned}
 S_9 < S_{36} < S_{35} < S_{15} < S_{18} < S_1 < S_{41} < S_{30} < S_{23} < S_{40} < S_{21} < \\
 S_{13} < S_{38} < S_{42} < S_7 < S_{20} < S_{29} < S_{32} < S_{22} < S_{17} < S_8 < S_{43} < S_{37} < \\
 S_{27} < S_{31} < S_{25} < S_{14} < S_6 < S_4 < S_{34} < S_{16} < S_{11} < S_{26} < S_{12} < S_{19} < \\
 S_{10} < S_{24} < S_{39} < S_{33} < S_{28} < S_3 < S_2 < S_5
 \end{aligned}$$

3 大采高支架—围岩事故树的结果分析

对模糊重要度排序靠前的基本事件进行分析总结表明:

1) 基本事件“乳化液泄漏发现不及时”排序第一,表明其对支架—围岩系统稳定性影响最大,而在支架的泄漏

故障中液压系统的乳化液串液等“内泄”故障由于缺乏有效的检测方法和仪器往往难以直观察觉,因此寻找合理支架泄漏检测方案是亟待解决的问题。

2)“综放面冒落片帮机理不明以及覆岩破断运动机理不明”的重要度分居二三位,表明大采高综放面的围岩的失稳规律尚不完全明确,综放端面煤岩体控制缺乏较为可靠的理论指导,应加强端面煤岩体破断运动以及工作面矿压显现规律的研究。

3)“支架前梁不接顶、顶梁俯仰异常、端面距过大”三个基本事件的重要度均排序靠前,可见支架几何姿态对支架—围岩系统稳定性的影响较大,加强支架操作管理,有效控制支架几何位态也是保障8105综放工作面支架—围岩系统稳定性的关键。

4)“煌斑岩入侵”的重要度在所有地质构造影响因素中居首位,表明其与系统失稳关系密切,受其影响煤层结构和煤质变得复杂,且侵入无明显规律可循,对矿井巷道布置、工作面回采及顶板维护等均有一定影响,应着力加强对煌斑岩及相关地质构造的探测及预防。

4 现场应用

根据事故树的分析结果对重要度排序靠前的事件进行提升和改进。

采用液压泄漏故障检测仪^[6]对8105综放工作面118架综放支架进行了系统的检测,结果表明:28架液压支架存在泄漏故障,占支架总数的24%;故障支架共有59处液压元件发生泄漏,其中不易发现的“内泄”故障24处,占故障液压元件的41%;操纵阀故障共24处,主要是内部内泄故障;管路及连接件泄漏故障14处,全部是外泄故障。造成8105工作面支架液压系统泄漏故障的原因,小部分是泵、管路等液压系统的故障及支柱、千斤顶的机械故障,绝大部分则是由于液压阀故障导致的。液压阀的故障主要原因是阀组件疲劳变形、磨损以及密封件密封不严造成密封圈和阀的闭锁件失效泄漏。根据液压泄漏检测结果对故障支架进行维修,维修后支架—围岩系统的稳定性得到了较大提高。

另外,根据其他模糊重要度靠前的基本事件结合现场

(上接第157页)

高,工作效果良好,可为今后开展采动覆岩稳定性分析和变形预测等相关研究提供一种新的方法。

参考文献:

- [1] 刘金龙, 栾茂田, 王吉利. 测斜仪测量路基水平位移过程中的局限性分析[J]. 长江科学院院报, 2007, 24(5): 56-59.
- [2] 王继华, 彭振斌, 杜长学, 等. 浅析测斜仪监测原理和应用[J]. 勘察科学技术, 2005(2): 55-58.
- [3] 李国维, 胡龙生, 王润等. 滑动式测斜仪测试与误差处理方

地质以及生产情况得到综放液压支架故障诊断及顶板煤岩体控制的关键指标:冒高小于0.30m,支架故障率小于8%,支架初撑力大于12778kN(31.40MPa),工作阻力不小于15000kN,端面距不大于0.5m,顶梁俯仰角绝对值不大于5°,顶梁台阶不大于0.13m。此外,支架操作时应快速、及时带压移架,使支架保持接顶良好并避免出现顶梁台阶过大的情况。

5 结论

1)基于三角模糊函数的事故树分析法应用于大采高综放面支架—围岩系统,将煤矿复杂的系统精确化;三角模糊数在事故树中的应用弥补了传统事故树分析法的缺陷,对全国煤矿系统的分析有重要借鉴意义。

2)通过对同忻矿大采高综放面的事故分析,建立了大采高综放面支架—围岩系统失稳事故树,通过分析表明同忻矿目前的支架—围岩系统稳定性较差并且找出了大采高综放面失稳的主要诱因。

3)提出保持同忻矿支架—围岩系统稳定性的措施即:对支架故障尤其是液压系统的泄漏故障要及时检修;保持支架的合理位态;加强端面煤岩体的理论研究,及相关地质构造的探测和预防。

参考文献:

- [1] 孔令海, 姜福兴, 王存文. 特厚煤层综放采场支架合理工作阻力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(11): 2312-2318.
- [2] 李青, 陆廷金, 李宇萍, 等. 三角模糊数的模糊故障树分析及其应用[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(1): 56-59.
- [3] 贾智伟, 景国勋, 张强, 等. 基于三角模糊数的矿井火灾事故树分析[J]. 安全与环境学报, 2004, 4(6): 62-65.
- [4] 李青, 陆廷金. 模糊重要度分析方法的研究[J]. 模糊系统与数学, 2000, 14(1): 89-93.
- [5] YAMASHIRO M. The median for a L-R fuzzy number[J]. Microelectronics Reliability, 1995, 35(2): 269-271.
- [6] 张守宝, 谢生荣, 何富连. 液压支架泄漏检测方法的分析与实践[J]. 煤炭学报, 2010, 35(1): 145-148.

(责任编辑 郭继圣)

法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013, 41(6): 512-516.

- [4] 刘金龙, 栾茂田, 王吉利. 测斜仪测量路基水平位移过程中的局限性分析[J]. 长江科学院院报, 2007, 24(5): 56-59.
- [5] 张光春, 宿莉. 假设检验问题分析[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2005(4): 215-217.
- [6] 盛聚, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.

(责任编辑 郭继圣)