

doi: 10.3969/j.issn.1005-3026.2017.03.023

瓦斯爆炸事故风险耦合分析

张津嘉, 许开立, 王延瞳, 王 犇
(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 运用物理学、协同学、灾害学等学科相关概念,对瓦斯爆炸事故的风险耦合的定义及类型进行了界定;其次以复杂系统风险涌现为视角,构建了瓦斯爆炸事故风险耦合层次网络模型,并利用 N-K 模型分析了各风险因素之间的耦合关系.结果表明:瓦斯爆炸事故是微观风险因素间的非线性耦合导致宏观层级结构状态发生阶跃式突变的结果,该过程中风险因素耦合越多越易引发瓦斯爆炸事故;在控制风险耦合的过程中,客观因素造成的耦合风险比主观因素造成的耦合风险更难控制.

关 键 词: 瓦斯爆炸事故;风险因素;风险耦合;层次网络模型;N-K 模型

中图分类号: X 936 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2017)03-0414-05

Analysis of Risk Coupling of Gas Explosion Accidents

ZHANG Jin-jia, XU Kai-li, WANG Yan-tong, WANG Ben
(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: XU Kai-li, E-mail: kaili_xu@aliyun.com)

Abstract: The connotation and types of risk coupling of gas explosion accidents were defined on the physics, synergetics and catastrophology concepts. Moreover, hierarchical network model of risk coupling of gas explosion accidents was constructed from the perspective of risk emergence for a complex system. Then, coupled correlation of risk factors was analysed by using the N-K model. The result shows that gas explosion accidents are the consequence of stepping mutation from the nonlinear coupling between micro risk factors to macro hierarchical structural state, and the more the number of coupled risk factors is, the easier the gas explosion accidents are triggered. In the control process of risk coupling, risk coupling of objective factors is more difficultly controlled than that of the subjective factors.

Key words: gas explosion accidents; risk factors; risk coupling; hierarchical network model; N-K model

煤矿生产系统是一个具有动态性和模糊性的社会技术系统,其内部因素包括规章制度、安全管理、行为主体、技术设备和地质条件等,外部环境包括国家政策、法律法规、煤炭市场、煤炭相关产业等,其系统结构决定了煤矿瓦斯爆炸事故具有多因素耦合致因性特点.因此,煤矿瓦斯爆炸事故致因分析需要从复杂系统风险耦合的角度,分析风险因素之间的关联、路径及规律等问题,以便提高瓦斯爆炸事故风险预控水平.

近年来,对于风险耦合的研究主要集中在自然灾害、金融、航空等方面,例如:Kappes 等^[1]、Selva^[2]和 Marzocchi 等^[3]认为对于目标区域的灾害风险评估,应考虑多种灾害风险间耦合作用对风险评估结果的影响(如灾害的影响范围和等级),提出了多种灾害风险因素评价模型;Thierry 等^[4]利用火山喷发、不稳定斜坡和地震等致灾因子的强度和频率两个指标建立场景矩阵进行叠加,对喀麦隆山区域进行了多种灾害风险评估和风险维度区划;Jarrow 等^[5]和 Zhou^[6]从违约相关性或违约概率角度对多个公司间资产信用风险相关性进行了分析,并从理论和实证等方面验证了信用风险相关性的存在;Leveson 等^[7-8]从系统事

收稿日期: 2015-10-09
基金项目: 国家留学基金资助项目(201606080029); 辽宁省自然科学基金资助项目(2013020137).
作者简介: 张津嘉(1986-),男,河北青龙人,东北大学-昆士兰大学联合培养博士研究生;许开立(1965-),男,山东郓城人,东北大学教授,博士生导师.

故因素交互视角提出了系统理论事故模型,认为事故是复杂系统可变性和可交互的涌现行为;Shyur^[9]和刘堂卿等^[10]统计分析了航空事故,探讨了航空事故风险耦合内涵及规律,并构建了航空风险评估模型.目前,在煤矿瓦斯爆炸事故风险耦合方面研究鲜有涉足,对于瓦斯爆炸事故风险耦合分析仍处于起步阶段,基于此,作者拟在前人的研究基础上,将风险耦合的分析方法引入到瓦斯爆炸事故致因分析,利用复杂系统理论构建风险耦合层次网络分析定性模型,并运用N-K模型定量分析煤矿生产系统中各风险因素间强弱耦合关系.

1 瓦斯爆炸事故风险耦合定义及类型

1.1 瓦斯爆炸事故风险因素

煤矿生产系统是一个复杂的动态社会技术系统,涉及到人、机、环、管4大子系统,在生产的过程中存在着许多瓦斯爆炸风险因素.根据安全系统工程理论,按瓦斯爆炸事故风险起源分类,则可分为人为因素风险、设备因素风险、环境因素风险、管理因素风险.

人为因素风险主要包括员工的文化素质风险、专业技能风险、生理因素风险以及心理因素风险等方面,这些风险因素往往造成员工思想上失衡、行为上违章、管理上缺陷,如:带电作业、违章爆破、瓦斯漏检等.

设备因素风险主要包括机器设备的安全状况、设备的自动化水平、安全防护装置等,这些设备故障或损坏可能直接产生电火花或间接地造

成瓦斯积聚,如:局部通风机故障造成瓦斯积聚、煤电钻失爆产生电火花等.

环境因素风险主要包括员工的作业环境和自然环境两部分.作业环境包括照明、粉尘、湿度、温度等,这些作业条件间接影响员工的安全行为或设备的安全状态;自然环境包括煤层瓦斯含量、顶板稳定程度、平均断层落差等,这些地质条件易引起瓦斯突出或瓦斯异常涌出.

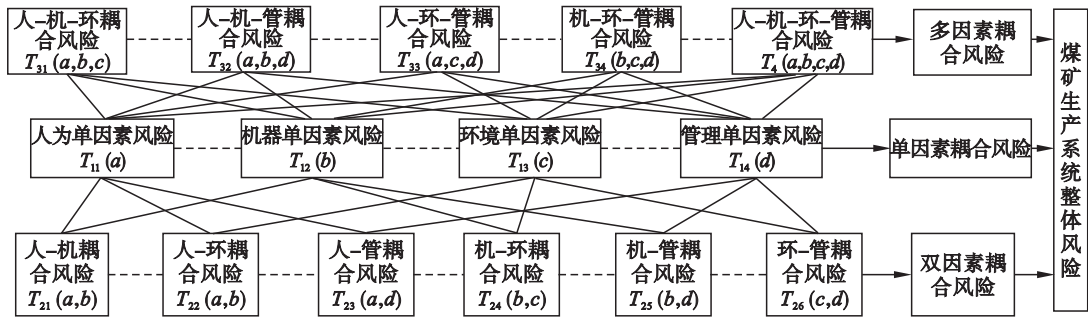
管理因素风险主要包括规章制度、组织结构、安全管理、教育培训、安全文化等方面,这些因素的缺陷会造成规章制度不健全、安全监管不严、教育培训不充分、管理决策和方式失误等,如无证上岗、违章指挥等.

1.2 瓦斯爆炸事故风险耦合定义

耦合在物理学、协同学、灾害学等^[11]学科中定义各不相同,作者归纳分析认为耦合内涵是系统各因素间相互作用模式改变了系统局部或整体的层次结构和功能属性.基于此,瓦斯爆炸事故风险耦合是指煤矿生产系统的外部环境和内部系统中潜在的风险依附于某些载体在风险网络上蔓延,当遇到其他风险因素时,通过相互作用改变风险强度或引发风险事件,甚至演化为瓦斯爆炸事故的过程.

1.3 瓦斯爆炸事故风险耦合类型

煤矿生产系统是由“采、掘、机、运、通、排”等复杂关联的若干子系统组成,其系统结构决定了煤矿生产系统不仅有人、机、环、管单个风险,还有风险间的耦合风险.因此,将煤矿生产系统中人、机、环、管不同情况下的耦合风险分为单因素耦合风险、双因素耦合风险、多因素耦合风险,如图1所示.



2 瓦斯爆炸事故风险耦合模型

2.1 瓦斯爆炸事故风险耦合层次网络模型

事故致因模型是科技水平的发展产物,针对

简单的人机系统已日趋完善,但现代系统中物质、能量、信息交互模式及各元素间层次结构都更加复杂,事故类型也从传统的部件物理失效事故转变为复杂性的交互社会技术系统事故.传统的事

局限性,例如:事故频发模型是从某一角度分析事故发生的规律,割裂了事物之间的联系性;事故链模型过于绝对和简单的主观认为事故过程为线性的链式结构,忽略了事故灾变过程的非线性和随机性;病理学模型和瑞士奶酪模型等虽从系统角度描述事故演变的过程,但缺乏考虑系统层级结构的立体致因网络. 复杂系统理论认为复杂系统是一个具有涌现属性和非线性特征的层次结构组织,从广义上讲,可将煤矿生产系统视为一个以社会因素、人为因素、设备因素、环境因素和管理因素为基础层级的社会技术系统. 瓦斯爆炸事故是事故因素处于不同层级表现出不同的风险状态,同一层级瓦斯爆炸风险因素间因各种复杂的耦合关系会导致相互作用,当瓦斯爆炸根源事件导致事故因素风险状态被触发时,风险因素会以“源→链→网→层”的路径传递引起上层事故因素发生结构状态的演化或跃迁,若社会技术系统层级结构状态阈值被突破时,将酿成瓦斯爆炸事故,如图 2 所示.

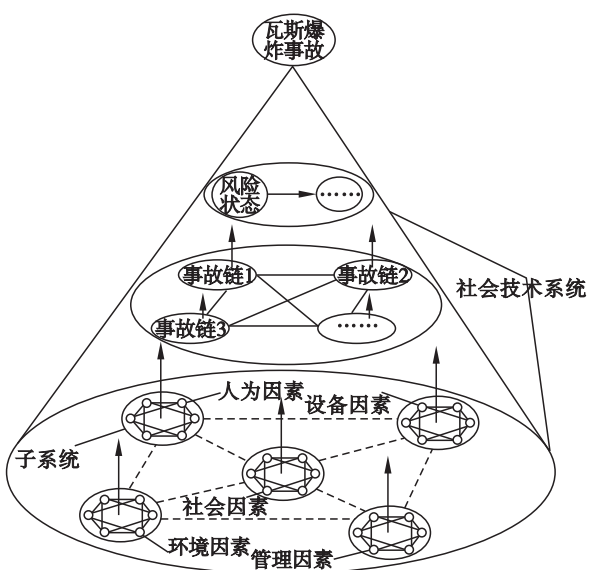


图 2 瓦斯爆炸事故风险耦合层次网络模型

Fig. 2 Risk coupling hierarchy network model of gas explosion accidents

2.2 瓦斯爆炸事故风险耦合 N - K 网络量化模型

从复杂系统理论角度来讲,瓦斯爆炸事故的灾变过程是典型的复杂系统风险耦合演化的过程,而 N - K 模型^[12-13]是解决复杂动态系统的通用模型,与瓦斯爆炸事故风险耦合演化的契合度较高,它包括两个参数:N 是组成系统中元素的个数,K 是系统网络中相互耦合关系的个数. 如果系统中有 N 个元素,其中每个元素又有 n 种不同的

情况,则 n^N 个状态就是所有可能耦合的方式. 当系统元素按一定耦合关系组合起来,就形成了网络. K 最小为 0,最大为 $N - 1$ ^[14].

煤矿生产系统中风险因素之间的交互信息,可以用来评价它们相互作用之后形成耦合风险的态势,笔者仅对煤矿生产系统内部因素风险耦合进行量化研究. 瓦斯爆炸事故风险耦合计算公式如下:

$$T(a,b,c,d) = \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K p_{h,i,j,k} \times \text{lb}\left(\frac{p_{h,i,j,k}}{(p_{h...} \cdot p_{i...} \cdot p_{j...} \cdot p_{k...})}\right). \tag{1}$$

式中: $p_{h,i,j,k}$ 代表人在第 h 种状态、机器在第 i 种状态、环境在第 j 种状态、管理在第 k 种状态下耦合发生的概率; T 为对煤矿生产系统风险耦合的量化评估, T 值越高,说明瓦斯爆炸事故发生风险的可能性越大.

瓦斯爆炸事故三因素耦合风险,可以通过三者之间的信息交互来评估瓦斯爆炸事故风险因素耦合的情况,其计算公式如下:

$$T_{31}(a,b,c) = \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J p_{hij} \text{lb}\left(\frac{p_{hij}}{(p_{h...} \cdot p_{i...} \cdot p_{j...})}\right); \tag{2}$$

$$T_{32}(a,b,d) = \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K p_{hik} \text{lb}\left(\frac{p_{hik}}{(p_{h...} \cdot p_{i...} \cdot p_{k...})}\right); \tag{3}$$

$$T_{33}(a,c,d) = \sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K p_{hjk} \text{lb}\left(\frac{p_{hjk}}{(p_{h...} \cdot p_{j...} \cdot p_{k...})}\right); \tag{4}$$

$$T_{34}(b,c,d) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K p_{ijk} \text{lb}\left(\frac{p_{ijk}}{(p_{i...} \cdot p_{j...} \cdot p_{k...})}\right). \tag{5}$$

局部的耦合也可以是同种属性因素内部因子间的耦合,笔者拟将单因素风险耦合视为两因素风险耦合特例. 瓦斯爆炸事故两因素风险耦合计算公式如下:

$$T_{21}(a,b) = \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I p_{hi.} \text{lb}\left(\frac{p_{hi.}}{(p_{h...} \cdot p_{i...})}\right); \tag{6}$$

$$T_{22}(a,c) = \sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^J p_{hj.} \text{lb}\left(\frac{p_{hj.}}{(p_{h...} \cdot p_{j...})}\right); \tag{7}$$

$$T_{23}(a,d) = \sum_{h=1}^H \sum_{k=1}^K p_{h.k} \text{lb}\left(\frac{p_{h.k}}{(p_{h...} \cdot p_{k...})}\right); \tag{8}$$

$$T_{24}(b,c) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J p_{ij.} \text{lb}\left(\frac{p_{ij.}}{(p_{i...} \cdot p_{j...})}\right); \tag{9}$$

$$T_{25}(b,d) = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K p_{i.k} \text{lb}\left(\frac{p_{i.k}}{(p_{i...} \cdot p_{k...})}\right); \tag{10}$$

$$T_{26}(c,d) = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K p_{.jk} \text{lb}\left(\frac{p_{.jk}}{(p_{j...} \cdot p_{k...})}\right). \tag{11}$$

3 实例应用

在对 1950 ~ 2014 年期间发生的 437 起^[15-16]

(非完全统计)较大以上瓦斯爆炸事故案例调查报告
中事故原因分析的基础上,得到瓦斯爆炸事故多
因素风险耦合的次数及频率,见表 1. 其中用 0 表示
风险因素未发生耦合,1 表示风险因素发生耦合.

表 1 风险耦合次数及频率
Table 1 Risk coupling times and frequency

单因素耦合	耦合次数	0000 = 0	1000 = 12	0100 = 17	0010 = 15	0001 = 8	
	耦合频率	$p_{0000} = 0$	$p_{1000} = 0.027\ 5$	$p_{0100} = 0.038\ 9$	$p_{0010} = 0.034\ 3$	$p_{0001} = 0.018\ 3$	
双因素耦合	耦合次数	1100 = 26	1010 = 23	1001 = 14	0110 = 32	0101 = 21	0011 = 19
	耦合频率	$p_{1100} = 0.059\ 5$	$p_{1010} = 0.052\ 6$	$p_{1001} = 0.032$	$p_{0110} = 0.073\ 2$	$p_{0101} = 0.048$	$p_{0011} = 0.043\ 5$
多因素耦合	耦合次数	1110 = 52	1101 = 47	1011 = 28	0111 = 36	1111 = 87	
	耦合频率	$p_{1110} = 0.119$	$p_{1101} = 0.107\ 6$	$p_{1011} = 0.064\ 1$	$p_{0111} = 0.082\ 4$	$p_{1111} = 0.199\ 1$	

为了计算瓦斯爆炸事故风险耦合的 T 值,先
计算以下各项的值.

1) 单因素风险耦合引发瓦斯爆炸事故的概率:

$p_{0...} = p_{0000} + p_{0001} + p_{0010} + p_{0011} + p_{0100} + p_{0101} +$
 $p_{0110} + p_{0111} = 0.338\ 6$; 同理可得: $p_{...0} = 0.272\ 3$,
 $p_{...1} = 0.331\ 8$, $p_{...0} = 0.405$, $p_{...1} = 0.661\ 4$,
 $p_{...1} = 0.727\ 7$, $p_{...1} = 0.668\ 2$, $p_{...1} = 0.595$.

2) 双因素风险耦合引发瓦斯爆炸事故的概率:

$p_{00..} = p_{0000} + p_{0001} + p_{0010} + p_{0011} = 0.096\ 1$; 同
理可得: $p_{01..} = 0.242\ 5$, $p_{10..} = 0.176\ 2$, $p_{11..} =$
 $0.485\ 2$, $p_{0..0} = 0.105\ 2$, $p_{0..1} = 0.233\ 4$, $p_{1..0} =$
 $0.226\ 6$, $p_{1..1} = 0.434\ 8$, $p_{0..0} = 0.146\ 4$, $p_{0..1} = 0.192\ 2$,
 $p_{1..0} = 0.258\ 6$, $p_{1..1} = 0.402\ 8$, $p_{..00} = 0.078\ 8$, $p_{..01} =$
 $0.194\ 5$, $p_{..10} = 0.254$, $p_{..11} = 0.473\ 7$, $p_{..00} =$
 0.114 , $p_{..01} = 0.157\ 9$, $p_{..10} = 0.290\ 6$, $p_{..11} =$
 $0.437\ 1$, $p_{..00} = 0.125\ 9$, $p_{..01} = 0.205\ 9$, $p_{..10} =$
 $0.279\ 1$, $p_{..11} = 0.389\ 1$.

3) 多因素风险耦合引发瓦斯爆炸事故的概率:

$p_{000.} = p_{0000} + p_{0001} = 0.018\ 3$; 同理可得:
 $p_{001.} = 0.078\ 8$, $p_{010.} = 0.086\ 9$, $p_{011.} = 0.155\ 6$,
 $p_{100.} = 0.059\ 5$, $p_{101.} = 0.116\ 7$, $p_{110.} = 0.167\ 1$,
 $p_{111.} = 0.318\ 1$, $p_{..000} = 0.027\ 5$, $p_{..001} = 0.050\ 3$,
 $p_{..010} = 0.086\ 9$, $p_{..011} = 0.106\ 7$, $p_{..100} = 0.098\ 4$,
 $p_{..101} = 0.155\ 6$, $p_{..110} = 0.192\ 2$, $p_{..111} = 0.281\ 5$,
 $p_{0..00} = 0.038\ 9$, $p_{0..01} = 0.066\ 3$, $p_{0..10} = 0.107\ 5$,
 $p_{0..11} = 0.125\ 9$, $p_{1..00} = 0.087$, $p_{1..01} = 0.139\ 6$,
 $p_{1..10} = 0.171\ 6$, $p_{1..11} = 0.263\ 2$, $p_{00..0} = 0.034\ 3$,
 $p_{00..1} = 0.061\ 8$, $p_{01..0} = 0.112\ 1$, $p_{01..1} = 0.130\ 4$,
 $p_{10..0} = 0.080\ 1$, $p_{10..1} = 0.096\ 1$, $p_{11..0} = 0.178\ 5$,
 $p_{11..1} = 0.306\ 7$.

利用式(1) ~ 式(11), 可计算不同风险耦合
引起瓦斯爆炸事故的风险流值 T :

$T_4 = 0.027\ 8$, $T_{31} = 0.007\ 9$, $T_{32} = 0.006\ 6$,
 $T_{33} = 0.003\ 7$, $T_{34} = 0.007\ 2$, $T_{21} = 0.000\ 2$, $T_{22} =$

$0.000\ 7$, $T_{23} = 0.001\ 1$, $T_{24} = 0.002\ 6$, $T_{25} =$
 $0.000\ 3$, $T_{26} = 0.000\ 8$.

$T_4 > T_{31} > T_{34} > T_{32} > T_{33} > T_{24} > T_{23} > T_{26} > T_{22} >$
 $T_{25} > T_{21}$.

分析与讨论: 1) 从计算结果可知, 四因素全
面耦合风险值最大, 三因素局部耦合风险值次之,
两因素耦合风险值最小, 表明随着煤矿生产系统
风险耦合因素的增加, 导致发生瓦斯爆炸事故的
风险也随之增大.

2) 瓦斯爆炸事故三因素耦合风险中, $T_{31} >$
 $T_{34} > T_{32} > T_{33}$, 表明以人、管因素为主观因素的非
全面耦合比全面耦合风险要大, 以机、环因素为客
观因素的非全面耦合比全面耦合风险要小.

3) 瓦斯爆炸事故两因素耦合风险中, $T_{24} >$
 $T_{23} > T_{26} > T_{22} > T_{25} > T_{21}$, 表明以机、环因素为客
观因素耦合风险大于以人、管因素为主观因素耦
合风险, 说明在特定的条件下以机、环因素为客观
因素时更容易发生耦合.

4 结 论

1) 瓦斯爆炸事故致因分析应从风险动态耦
合角度考虑, 将事故视为一个风险因素动态耦合
的过程. 算例应用表明, 瓦斯爆炸事故风险系统成
因不但相互影响, 而且有不同的强弱耦合作用.

2) 瓦斯爆炸事故灾变过程是风险因素多层
次、多维度耦合的过程, 其实质是煤矿生产系统底
层风险因素的耦合作用导致上层事故层级发生结
构状态演化或跃迁的涌现规律.

3) $T_4 > T_{31} > T_{34} > T_{32} > T_{33} > T_{24} > T_{23} > T_{26} >$
 $T_{22} > T_{25} > T_{21}$, 表明耦合系统下一级子系统越多,
耦合度越大, 风险波动性越大, 客观因素造成的耦
合风险比主观因素造成的耦合风险更难控制.

(下转第 447 页)