

矿山灾害系统的脆性关联分析^{*}

刘辉, 吴超

(中南大学资源与安全工程学院, 湖南长沙 410083)

摘要:应用脆性理论来研究矿山灾害系统。从人、机、环境及运作管理等子系统出发,以矿山灾害事故与各子系统的脆性联系为着眼点,建立了矿山事故脆性关联分析模型,并根据矿山生产的特点,提出了相应的脆性因子。最后以某矿为例,计算出矿山事故与各子系统间的脆性联系熵值,并就结果进行了分析。结果表明应用复杂系统脆性理论研究矿山灾害,找出影响矿山灾害的脆性因子对于预防事故的发生具有重要意义;同时,脆性波动熵变化范围表明运作管理对于控制事故的发生有更大的操作空间。

关键词:矿山灾害;脆性关联;分析模型;熵

中图分类号:TD7 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-811X(2008)04-0006-05

0 引言

矿山安全是采矿工业可持续发展的重要组成部分,已广泛引起各国政府的高度重视^[1]。由于矿山生产系统是一个由人、机、环境等子系统构成的空间极其复杂的灾害系统^[2],其事故的发生具有明显的不确定性和随机性,一旦一个关键组元的功能失效,就有可能导致整个井下生产系统的崩溃,从而造成事故的发生,甚至酿成重大灾难。目前我国矿山安全生产形势依然严峻,矿山灾害严重制约了我国矿山企业的发展,并成为其发展的“瓶颈”。因此,如何通过灾害事故及其致灾因子进行客观、有效的分析,找出导致灾害事故发生的脆性因子及其相互影响关系,从而控制事故乃至从根本上杜绝事故的发生成为安全科学迫切需要解决的重大课题。

近年来,一些学者运用脆性理论^[3-5]来研究复杂系统,并且成功地应用于传染病扩散^[3]、交通系统^[4]等的研究中。文献[3]根据脆性的定义以及脆性所具备的特性提出脆性熵和脆性联系熵函数等概念来研究复杂系统的特性及其与内外不确定因素之间的关系。文献[5]描述了煤矿系统内部的脆性过程。矿山灾害系统是一个典型的复杂系统,其井下开采的作业环境与条件完全具有复杂系统所具备的特点。

1 复杂系统脆性

1.1 脆性的本质

系统由于受到内、外干扰因素的作用而使得某一部分发生崩溃,从而使得其他部分受到直接或间接的影响,进而引发崩溃,这样会带来连锁的反应。文献[3]把系统的这种特性称之为脆性。

脆性是复杂系统的一个基本特性,始终伴随着复杂系统存在,并不会因为系统的进化或外界环境的变化而消失。对于一个开放的复杂巨系统,当它的一个子系统(不是孤子)遭受足够大的外力打击时,会使原来的有序状态破坏,进而形成一种新的无序状态,此时称该子系统崩溃。由于该子系统会与其他子系统交换物质和能量,因此它的崩溃会使其他与其交换物质和能量的子系统的有序状态遭到破坏,最后产生崩溃。随着崩溃子系统数量的增多,层次的扩大,最终将导致整个复杂系统崩溃^[3]。

1.2 脆性关联

根据集对分析理论^[6],在复杂系统的子系统之间或子系统的各个要素之间,按照其功能和状态受相关系统(要素)崩溃影响的程度,可将脆性关联关系分为同一、波动和对立3种^[3,6]。

集对分析是我国学者赵克勤提出的一种系统分析方法,其核心思想是将两个具有一定联系的

^{*} 收稿日期:2008-04-21

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划课题(2006BAK04B03)

作者简介:刘辉(1978-),男,江西高安人,博士研究生,主要研究方向为矿山安全.E-mail:liuhui2003@126.com

集合组成一个集对, 再在一定的环境条件下, 分析集对所具有的特性。目前, 集对分析法已经在科学研究、工程技术、哲学、社会科学、经济等领域得到了初步的应用, 并展现了广阔的发展前景。集对分析针对同异和反 3 种不同的集对特性, 建立其联系式为:

$$\mu = a + bi + cj, \quad (1)$$

式中: a 为同一性测度; b 为波动性测度; c 为对立性测度; i 、 j 分别为波动度、对立度系数, 且 $i \in [-1, 1]$, $j \in [-1, 0]$, 其取值可根据实际情况来定。

1.3 脆性联系熵

根据 Shannon 的信息熵理论, 将系统抽象为 n 个事件进行分析, 每个事件出现的概率分别为 p_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 时, 其选择结果的不确定程度, 可记为 $H(p_1, \dots, p_n)$

$$H(p_1, \dots, p_n) = -k \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i. \quad (2)$$

结合集对分析方法, 若一个子系统 X 在干扰下发生崩溃则另外一个子系统的 Y 状态向量中至少有一个 y_j ($1 < j < n$) 与子系统 X 发生脆性同一、脆性波动和脆性对立的概率分别是 $p_a(y_j/X)$ 、 $p_b(x_j/X)$ 、 $p_c(y_j/X)$, 则相应的脆性同一熵、波动熵、对立熵分别为^[3]

$$H_a = - \sum_{j=1}^k p_a(y_j/X) \ln p_a(y_j/X), \quad (3)$$

$$H_b = - \sum_{j=1}^h p_b(y_j/X) \ln p_b(y_j/X), \quad (4)$$

$$H_c = - \sum_{j=1}^{n-k-h} p_c(y_j/X) \ln p_c(y_j/X), \quad (5)$$

$$\text{且有 } p_a(y_j/X) + p_b(y_j/X) + p_c(y_j/X) = 1. \quad (6)$$

对于子系统 Y , 其受 X 的影响, 应该是脆性同一、脆性对立和脆性波动的综合。因此 X 崩溃发生时, 子系统 Y 也发生崩溃的脆性联系熵为

$$H_{XY} = w_a H_a + w_b H_b + w_c H_c, \quad (7)$$

式中: w_a 、 w_b 、 w_c 为脆性同一、脆性对立和脆性波动的权系数。当存在一定的概率分布的组合, 使 H_{XY} 达到最大的情况, 此时, 子系统 Y 受到 X 崩溃的影响最大。

2 矿山灾害系统脆性关联分析

矿山开采是一个综合性的技术行业, 涉及到地质、采矿、通风、运输、安全、机电和电气、

爆破、环境保护及企业管理等多方面的内容, 与其它行业相比, 采矿业劳动强度大, 作业条件差, 不安全因素多, 工作场所及工作本身都具有一定的危险性。井下生产工作空间狭窄, 井下有毒有害气体、煤尘、火灾、水灾、顶板事故、井下爆破、机电设备等都对矿山安全构成冲击, 威胁矿工的生命安全和健康。尽管事故发生的原因不尽相同, 事故种类各式各样, 灾后的损失也千差万别^[7], 但每一次灾难的发生无不关联着人的不安全行为、物的不安全状态以及生产运作管理等因素, 正是因为这些因素的不正常运作而导致矿山安全系统发生损害, 且当损害程度超过系统所能承受的程度时, 系统发生崩溃。从人、机、环境及运作管理角度建立矿山灾害系统与各事故的脆性关联, 则有:

$$S = (S_1, S_2, S_3, S_4)。$$

2.1 人子系统

人们开采矿山, 虽然在自然界不安全因素众多的环境里工作, 客观存在着瓦斯、水、火、顶板等危险源, 但开矿毕竟是人为活动。人在矿山生产系统中占有独特的地位, 既是生产的主体, 同时也是灾害事故发生的受害体, 其中作业人员的素质状况对安全系统状态起着重要的影响。可从生理、心理状态、技术素质和安全培训情况等方面提取脆性因子:

$$S_1 = (s_{101}, s_{102}, \dots, s_{112})。$$

其中, s_{101} = 身体健康状况, s_{102} = 疲劳程度, s_{103} = 情绪因素, s_{104} = 冒险心理, s_{105} = 麻痹心理, s_{106} = 其他心理, s_{107} = 文化水平, s_{108} = 上岗持证率, s_{109} = 业务熟练程度, s_{110} = 培训计划实施, s_{111} = 日常安全教育, s_{112} = 培训考核。

2.2 机子系统

在整个矿井生产系统中, 机械装备是内容最多、涵盖面最宽的因素, 每个因素均有可能由于其功能失效而导致系统的崩溃, 其脆性因子取为:

$$S_2 = (s_{201}, \dots, s_{216})。$$

其中, s_{201} = 支护设备完好率, s_{202} = 煤体注水覆盖率, s_{203} = 采后注浆覆盖率, s_{204} = 机械及其保护设备完好率, s_{205} = 采掘机械化水平, s_{206} = 瓦斯抽放设备完好率, s_{207} = 排水设备完好率, s_{208} = 运输机械化水平, s_{209} = 通讯设施完好率, s_{210} = 监测监控设备完好率, s_{211} = 通风设备完好率, s_{212} = 防尘设施完好率, s_{213} = 防尘设施利用率, s_{214} = 电器及保护设备完好率, s_{215} = 隔爆设施完好率, s_{216} =

防火及消防设施完好率。

2.3 环境子系统

事故的统计分析表明,恶劣的现场作业环境因素也是导致灾难频发的一个重要原因。本文就矿山作业人员的工作环境及地质环境两方面的特点提取脆性因子:

$$S_3 = (s_{301}, s_{302}, \cdots, s_{313})。$$

其中, s_{301} = 地质构造, s_{302} = 煤层赋存条件, s_{303} = 顶底板稳定性, s_{304} = 瓦斯地质条件, s_{305} = 水文地质条件, s_{306} = 煤层自燃倾向性, s_{307} = 煤层爆炸性, s_{308} = 温度, s_{309} = 湿度, s_{310} = 空气流速, s_{311} = 照明, s_{312} = 噪声, s_{313} = 粉尘与煤尘浓度。

2.4 运作管理子系统

确保矿山安全生产,离不开各部门功能的正常运作及其对系统的协调管理。从管理因素、运作协调性与应急响应等方面取脆性因子:

$$S_4 = (s_{401}, s_{402}, \cdots, s_{409})。$$

其中, s_{401} = 安全管理, s_{402} = 质量管理, s_{403} = 文明生产, s_{404} = 人气协调指数, s_{405} = 经气协调指数, s_{406} = 风气协调指数, s_{407} = 应急计划, s_{408} = 应急处理, s_{409} = 事故管理。

2.5 脆性关联分析模型

依据人、机、环境及运作管理等子系统的脆性因子与各种灾害事故可能存在的脆性同一性、脆性波动性和脆性对立性等关系建立矿山灾害系统的脆性关联分析模型,如图1所示。

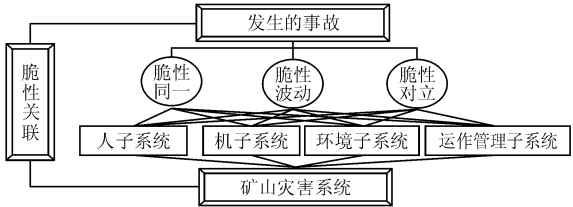


图1 脆性关联分析模型

3 实例分析

以Z煤矿为例进行分析。该矿采用立、斜井混合集中大巷,采区石门的开拓方式,通风方式为中央边界抽出式,现有3个采区,4个工作面生产。瓦斯与煤尘爆炸、水、火、冒顶以及机电事故等是该矿存在的主要灾害形式。

3.1 数据处理

采集Z矿的现场数据并就具体生产情况进行分析,以5维向量表示各脆性因子的安全状态。如:(1, 0, 0, 0, 0)、(0, 1, 0, 0, 0)、(0, 0, 1, 0, 0)、(0, 0, 0, 1, 0)、(0, 0, 0, 0, 1)分别表示各脆性因子为优、良、中、差、劣等状态,取“优”状态为各因素与事故发生具有脆性对立性,良、中为脆性波动性,差、劣为脆性同一性。具体结果如表1所示。为更好的阐述这一方法及方便计算,取该矿灾害事故与人、机、环境、运作管理等子系统相关因素发生脆性同一、脆性波动及脆性对立的概率为相应的脆性测度,计算结果见表2。

表1 现场调查结果及各因子脆性关联性

子系统	脆性因子	调查结果	脆性关联性	子系统	脆性因子	调查结果	脆性关联性
人	s_{101}	(1, 0, 0, 0, 0)	对立性	机	s_{201}	(0.2, 0.8, 0, 0, 0)	波动性
	s_{102}	(0, 0, 1, 0, 0)	波动性		s_{202}	(0.6, 0.4, 0, 0, 0)	对立性
	s_{103}	(0, 0, 1, 0, 0)	波动性		s_{203}	(0, 0.8, 0.2, 0, 0)	波动性
	s_{104}	(0, 0, 1, 0, 0)	波动性		s_{204}	(0, 1, 0, 0, 0)	波动性
	s_{105}	(0, 0, 1, 0, 0)	波动性		s_{205}	(0, 0.25, 0.75, 0, 0)	同一性
	s_{106}	(0, 0, 1, 0, 0)	波动性		s_{206}	(0.8, 0.2, 0, 0, 0)	对立性
	s_{107}	(0, 0, 0, 1, 0)	同一性		s_{207}	(0, 1, 0, 0, 0)	波动性
	s_{108}	(0, 1, 0, 0, 0)	对立性		s_{208}	(0.8, 0.2, 0, 0, 0)	对立性
	s_{109}	(0, 0, 1, 0, 0)	波动性		s_{209}	(0.2, 0.8, 0, 0, 0)	波动性
	s_{110}	(0, 0, 0, 1, 0)	同一性		s_{210}	(0, 1, 0, 0, 0)	波动性
	s_{111}	(0, 0, 1, 0, 0)	波动性		s_{211}	(0, 1, 0, 0, 0)	波动性
	s_{112}	(0, 0, 0, 1, 0)	同一性		s_{212}	(0, 0.25, 0.75, 0, 0)	同一性
					s_{213}	(0, 0, 0, 1, 0)	同一性
					s_{214}	(0, 0.25, 0.75, 0, 0)	同一性
					s_{215}	(0, 1, 0, 0, 0)	波动性
					s_{216}	(0, 0.25, 0.75, 0, 0)	波动性

环境	s_{301}	(0, 0, 0.4, 0.6, 0)	同一性	运作管理	s_{401}	(0, 1, 0, 0, 0)	波动性
	s_{302}	(0, 0.29, 0.69, 0.02, 0)	波动性		s_{402}	(0, 0, 0, 1, 0)	同一性
	s_{303}	(0, 0, 0.6, 0.4, 0)	波动性		s_{403}	(0, 1, 0, 0, 0)	波动性
	s_{304}	(0, 0.17, 0.81, 0.02, 0)	波动性		s_{404}	(0, 0, 0, 1, 0)	同一性
	s_{305}	(0, 0.5, 0.5, 0, 0)	波动性		s_{405}	(0, 1, 0, 0, 0)	波动性
	s_{306}	(0, 0.01, 0.81, 0.18, 0)	波动性		s_{406}	(0, 0, 0, 1, 0)	同一性
	s_{307}	(0, 0, 0, 1, 0)	同一性		s_{407}	(1, 0, 0, 0, 0)	对立性
	s_{308}	(0, 0, 0, 1, 0)	同一性		s_{408}	(0, 1, 0, 0, 0)	波动性
	s_{309}	(0, 0.01, 0.76, 0.23, 0)	波动性		s_{409}	(0, 1, 0, 0, 0)	波动性
	s_{310}	(0, 0.09, 0.87, 0.04, 0)	波动性				
	s_{311}	(0.85, 0.02, 0.13, 0, 0)	对立性				
	s_{312}	(0, 0, 0, 0, 1)	同一性				
	s_{313}	(0, 0, 0, 0, 1)	同一性				

表 2 各子系统脆性关联度

脆性测度	人	机	环境	运作管理
同一度	3/12	4/16	5/13	3/9
波动度	7/12	9/16	7/13	5/9
对立度	2/12	3/16	1/13	1/9

3.2 权系数确定

矿山灾害事故的发生往往具有突发性, 式(7)脆性联系熵中的权系数, 可以根据其同一熵、波动熵和对立熵对矿山安全生产发生变化所起的作用来确定。参照文献[3], 论文采用突变级数法确定各个权系数^[8]。托姆提出一系列数学模型, 用以解释自然界和社会现象中所发生的不连续的变化过程, 描述各种现象为何从形态的一种形式突然地飞跃到根本不同的另一种形式, 并已证明,

当控制变量不大于 4 个时, 最多有 7 种突变模型^[9]。其中燕尾突变的势函数为

$$V(x) = \frac{1}{5}x^5 + \frac{1}{3}ax^3 + \frac{1}{2}bx^2 + cx, \quad (8)$$

式中: a, b, c 为控制变量; x 为状态变量。其分解形式的分歧集方程为:

$$a = -6x^2, b = -8x^3, c = -3x^4, \quad (9)$$

导出归一公式为:

$$x_a = a^{1/2}, x_b = b^{1/3}, x_c = c^{1/4}, \quad (10)$$

式中: x, a, b, c 的取值范围在 0, 1 之间; w_a, w_b, w_c 分别取 x_a, x_b, x_c 。

结合式(1)、式(3)、式(4)及式(5), 分别求得各子系统脆性熵值如表 3 所示, 其中取 $j = -1, i \in [0, 1]$ 。

表 3 各子系统脆性熵值及权系数

熵值	人		机		环境		运作管理	
	脆性熵	权系数	脆性熵	权系数	脆性熵	权系数	脆性熵	权系数
同一熵	0.150 5	0.150 5 ^{1/2}	0.150 5	0.150 5 ^{1/2}	0.159 6	0.159 6 ^{1/2}	0.159 0	0.159 0 ^{1/2}
波动熵	0.136 5	0.136 5 ^{1/3}	0.140 6	0.140 6 ^{1/3}	0.144 8	0.144 8 ^{1/3}	0.141 8	0.141 8 ^{1/3}
对立熵	0.129 7	0.129 7 ^{1/4}	0.136 3	0.136 3 ^{1/4}	0.085 7	0.085 7 ^{1/4}	0.106 0	0.106 0 ^{1/4}
联系熵	-0.019 4 ± 0.070 3 <i>i</i>		-0.014 4 ± 0.073 1 <i>i</i>		0.017 4 ± 0.071 6 <i>i</i>		0.002 9 ± 0.073 9 <i>i</i>	

3.3 结果分析

从表 3 可以看出, 当 i 取 1 时, 事故的发生与各子系统间脆性联系熵的最大值分别为 $\max(S_1) = 0.050 9$; $\max(S_2) = 0.058 8$; $\max(S_3) = 0.089$; $\max(S_4) = 0.076 8$; 数据显示环境子系统与事故的脆性关联最大。这从本质上反映了矿山的开采是一个复杂的生产过程, 它不仅作业环节多, 而且作业场所处在经常不断的变化中, 特别是生产工作面的布置要受到矿床的赋存条件、地质构造、顶底板特性以及水文地质情况等开采条件的制约。

由脆性熵理论可知, 事故的脆性熵值反映了矿山生产系统发生事故的不确定性程度, 熵值越大, 灾害事故发生的风险就越大, 因此, 避免矿山生产系统脆性的根本方法在于从外界引入负熵来抑制系统内部的熵增。从各子系统的波动熵值情况来看, $\Delta(B_4) > \Delta(B_2) > \Delta(B_3) > \Delta(B_1)$, 可见运作管理子系统对应的脆性波动熵最大, 其对于系统发生熵变的影响也就最大。所以, 矿山生产系统的良好运作及有效管理是控制矿山灾害事故发生的關鍵。

4 结论

矿山生产系统是一个极其复杂的灾害系统。本文从人、机、环境、运作管理等子系统出发,以矿山灾害事故与各子系统的脆性联系为着眼点,建立了矿山事故脆性关联分析模型,并根据矿山生产的特点,提出了相应的脆性因子。结果分析表明,矿山作业环境及地质条件是构成矿山灾害系统脆性的本质原因;同时,对比各子系统的波动熵值发现,运作管理对矿山安全生产的影响最大,良好运作及有效管理是控制矿山灾害事故发生的关键。

当然,复杂系统脆性理论应用于矿山灾害系统尚处在研究阶段,虽然能够找到与事故关联最大的脆性原因,但对于导致事故发生的脆性机理还不够明确。随着该理论的完善及其与矿山事故的有效耦合,必将在矿山灾害的研究中有着广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] 郭进平, 吴伶, 顾清华, 等. 矿山事故时序分形特征研究[J]. 金属矿山, 2007, (12): 111-114.
- [2] 施式亮, 王海桥. 矿井安全非线性动力学评价[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001.
- [3] 荣盘祥, 金鸿章, 韦琦, 等. 基于脆性联系熵的复杂系统特性的研究[J]. 电机与控制学报, 2005, 9(2): 111-115.
- [4] 韦琦, 金鸿章, 姚绪梁, 等. 基于脆性的复杂系统崩溃的初探[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2003, 24(2): 161-165.
- [5] 金鸿章, 吴红梅, 林德明, 等. 煤矿事故系统内部的脆性过程[J]. 系统工程学报, 2007, 22(5): 449-454.
- [6] 赵克勤. 集对分析与熵的研究[J]. 浙江大学学报, 1992, 6(2): 69-73.
- [7] 关贤军, 徐波, 尤建新. 城市灾害风险的基本构成要素[J]. 灾害学, 2008, 23(1): 128-131.
- [8] 朱顺泉. 基于突变级数法的上市公司绩效综合评价研究[J]. 系统工程理论与实践, 2002, 22(2): 90-94.
- [9] 凌复华. 突变理论及其应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1987.

Analysis on Brittle Relationship of Mine Disaster System

Liu Hui and Wu Chao

(School of Resources & Safety Engineering, National Research Center of Science and Technology
for Metal Mines, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The theory of brittleness is applied to analyze brittle relation between accident and mining production system, and the brittle relationship analysis model is constructed from four aspects of human, machine, environment and operation management. According to the characteristics of mining production, the corresponding brittleness factors are given. Finally, taking a coalmine as an example, brittle link entropy of mine accident and sub-systems are calculated and the results are analyzed. The results show that using brittleness theory of complex system to study coalmine disasters and find out brittleness factors which affect coalmine disasters is important to coalmine disaster prevention. The range of brittle fluctuation entropy shows that the operation management can provide more room for controlling the occurrences of mine accidents.

Key words: mine disaster; brittle relationship; analysis model; entropy