

曾明圣,施式亮,鲁义,等. 基于免疫机理的瓦斯异常涌出预警[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2022, 37(3):14-19.
doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.03.003

ZENG M S, SHI S L, LU Y, et al. Study on Early Warning of Abnormal Gas Emission Based on the Immune Mechanism[J].
Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 37(3):14-19. doi:10.13582/j.cnki.
1672-9102.2022.03.003

基于免疫机理的瓦斯异常涌出预警

曾明圣¹,施式亮^{1,2*},鲁义¹,李贺¹,吴宽¹,凌紫城¹

(1.湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201;

2.湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室,湖南 湘潭 411201)

摘要:为了降低瓦斯异常涌出事故概率及危险程度,提出将生物免疫系统机理运用到瓦斯异常涌出预警系统.通过比较生物免疫系统和瓦斯异常涌出系统的相似性,提出基于免疫机理的预警系统包括监测监控系统、控制决策子系统、应急救援子系统和记忆库子系统.依据 Ag-Ab(抗原-抗体)模型建立起瓦斯异常涌出预警系统指标体系,并用层次分析法赋予相关权重.结果表明:瓦斯特性(Ag III)和安全管理(Ab I)对预警系统的影响较大,需要重点关注.通过 MATLAB 的 Mamdani 型模糊推理系统建立起预警模型,研究表明该模型能动态地进行预警,并根据预警级别进行响应,以提高响应速度从而降低涌出事故概率及危险性,为煤矿的瓦斯异常涌出预警提供参考和依据.

关键词:免疫机理;瓦斯;异常涌出;预警系统;模糊推理

中图分类号:X936 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2022)01-0014-06

Study on Early Warning of Abnormal Gas Emission Based on the Immune Mechanism

ZENG Mingsheng¹, SHI Shiliang^{1,2}, LU Yi¹, LI He¹, WU Kuan¹, LING Zicheng¹

(1. School of Resources & Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to reduce the probability and danger degree of abnormal gas emission, it is proposed to apply the mechanism of biological immune system to the early warning system of abnormal gas emission. By comparing the similarity between biological immune system and abnormal gas emission system, an early warning system based on immune mechanism is proposed, including monitoring and monitoring subsystem, control decision subsystem, emergency rescue subsystem, and memory subsystem. According to the Ag-Ab (antigen-antibody) model, the index system of gas abnormal out of the early warning system is established, and the relevant weight is given by the hierarchical analysis method. Results show that gas characteristics (Ag III) and safety management (Ab I) have a great impact on early warning systems and need to be focused on. An early warning model is established through MATLAB's Mamdani fuzzy inference system, and the research shows that the model can dynamically provide early warning and respond according to the early warning level, so as to improve the response speed and reduce the probability and danger of the outburst accident, which provides a certain reference

收稿日期:2020-07-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51974120; 51774135)

*通信作者, E-mail: hmustssl@ qq.com.

and basis for the early warning of gas emission from coal mines.

Keywords: immune mechanism; gas; abnormal emission; early warning system; fuzzy inference

煤炭井下开采环境复杂,同时煤矿开采深度及强度逐渐加大,瓦斯压力加大,地质条件复杂,导致近年来我国煤矿瓦斯事故层出不穷^[1].2013年—2017年间我国煤矿共发生死亡事故1 945起,死亡3 771人,其中瓦斯事故占据218起,死亡1 138人,分别占煤矿事故的11.2%和30.2%^[2].瓦斯浓度超限会引起瓦斯爆炸、瓦斯燃烧等灾害,特别是瓦斯异常涌出的突然性和压力能瞬间释放往往会造成群死群伤以及破坏井下设备.瓦斯事故是煤矿各类重特大事故中占比最大、死亡率最高、造成损失最严重的事故之一.因此,有必要对瓦斯异常涌出事故进行预警,以有效防治事故,减少伤亡损失.

国内外关于瓦斯异常涌出预警的相关理论及模型研究较多,但仍为探索阶段,有待进一步的完善^[3].魏连江等^[4]从K线图角度对瓦斯异常模式进行研究,确立瓦斯异常K线诊断准则和程序;蔺亚兵^[5]提出用三维地震等方法对冲刷带煤层进行鉴定并做好预测,以预防该区域内瓦斯异常涌出;WANG Xiaolu^[6]提出一种基于方差比检验法确定采煤工作面瓦斯涌出量预报器最适宜输入因子的方法;Dan X^[7]基于灰色系统理论建立了回采工作面瓦斯涌出异常的灰色预警模型.但由于煤矿井下环境的复杂性,上述方法动态性和整体性较弱,而免疫机理由于动态性强、学习精度高等优点而广泛应用于各行业.目前利用免疫机理对瓦斯异常涌出进行预警尚处于空白阶段,其他行业也只是利用免疫机制从整体上构建一个事故管理或预防框架,且集中在化工领域^[8].笔者通过比较生物免疫和瓦斯异常涌出预警系统的相似性,研究基于免疫机理的瓦斯涌出预警系统,利用MATLAB模糊推理系统建立起初期预警模型,有助于瓦斯异常涌出的实时预警及应急处置管理,为煤矿瓦斯事故防治提供参考和依据.

1 生物免疫系统理论概述

免疫系统的主要功能是识别机体中的有害元素,并迅速做出反应,以消除有害因素^[9].生物免疫系统的免疫机理如图1所示,当机体正常运行时,免疫系统将通过“免疫稳定”清理机体各种损伤、衰老、病变的细胞,及时更新和优化机体内部免疫分子及细胞的数量,从而维持机体各项功能正常运行.当机体遭到抗原(Ag)入侵,免疫系统将根据抗原特性释放相应抗体(Ab)进行响应,机体产生免疫识别、免疫应答、免疫记忆等功能,以确保机体保持正常状态.

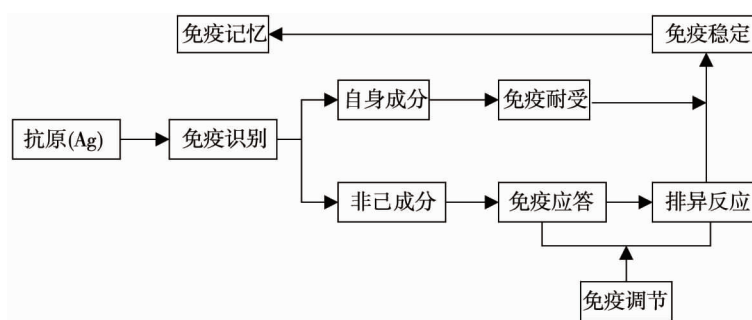


图1 免疫系统作用机制

通过对免疫系统的机理进行分析,可知免疫系统是一类高效处理复杂问题的非线性自适应网络,可通过免疫应答进行无导师自适应学习^[10].总体来说,免疫系统的分布性、适应性、多样性、耐受性、记忆性、学习反馈等特点,可用来建立人工免疫网络模型,为瓦斯异常涌出预警提供一种有效的方法^[11].

2 瓦斯异常涌出预警系统的免疫机理

2.1 瓦斯异常涌出预警系统与免疫系统的可行性分析

生物免疫系统基本功能是消灭各种试图或已经侵入机体的抗原,避免机体发生异常.与此相似,瓦斯异常涌出预警是指在瓦斯涌出前,根据各类隐患和前兆信息,分析事故发生的可能性、危险程度及趋势,并

按照一定准则,提前以声、光、颜色、文字等形式向相关部门和人员发出危险等级信号,以便及时防控,从而避免涌出事故的发生或减少事故损失的行为^[12].同生物免疫系统比较,瓦斯异常涌出预警系统与生物免疫系统具有较多相似性,如表1所示.

综上所述,瓦斯异常涌出预警系统与免疫系统存在诸多相似性,煤矿井下与瓦斯相关的参数和免疫系统一样处于一个动态变化的过程,将免疫机理引入到瓦斯异常涌出预警系统中是可行的.免疫系统的分布性、适应性、鲁棒性等原理可以提高预警系统的健壮性和容错性;自适应性原理可以使得预警系统在日常使用过程中不断改进,以适应采煤强度和深度持续加大而带来的问题.因此,基于免疫机理的瓦斯异常涌出预警系统可及时监控监测瓦斯各项参数,对瓦斯事故进行及时预警.

表1 生物免疫系统与瓦斯涌出预警系统的相似性

免疫系统	瓦斯异常涌出预警系统	相似点
免疫系统是由免疫细胞、分子、组织、器官等构成的复杂系统	瓦斯异常涌出预警系统是由人、机、环、管等构成的复杂系统	组织构成类似:都是复杂系统
免疫系统作用对象为试图侵入机体或已存在机体内部的抗原	瓦斯异常涌出预警系统体系的作用对象为与灾害相关的各类信息(外部及内部)	作用对象类似:都是危险有害因素
免疫系统的功能是释放抗体以求消灭有害抗原,维护机体正常状态	预警系统功能是根据瓦斯相关参数变化及时发布预警并响应以避免事故发生	系统功能类似:都是保障系统正常运行
免疫系统会随着外(内)部环境进行调整,机体不断适应免疫系统	预警系统随着采煤过程的各种变化而调整和改善,促进煤矿其他系统良好运转	运行机制类似:都是自适应不断变化系统

2.2 瓦斯异常涌出预警系统的免疫机制研究

借鉴生物免疫系统作用机制,结合瓦斯异常涌出实际情况,可建立起如图2所示的基于免疫机理的瓦斯异常涌出预警系统.该机制所构成的子系统应包括:监测监控子系统、控制决策子系统、应急救援子系统和记忆库子系统.

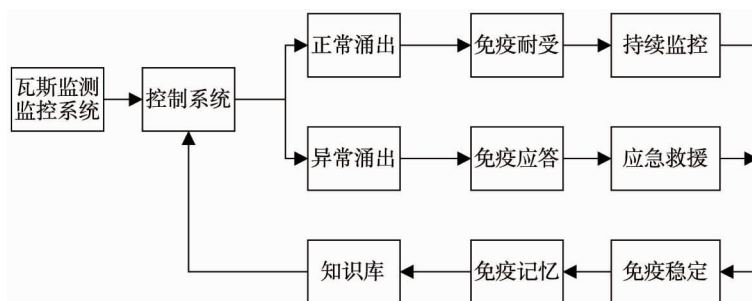


图2 基于免疫机理的瓦斯异常涌出预警系统

监测监控子系统主要是对与瓦斯灾害相关的信息及数据进行监测监控,该系统一般由传感器、井下分站、信息传输系统和地面中心站等部分组成.根据瓦斯异常涌出机理,借鉴国内外研究人员的研究结论,可利用瓦斯含量(压力)信息、矿压、声发射、微震、电磁辐射等指标进行涌出预警^[3].监测监控子系统得到的数据经过处理后,可为管理层决策、探测和预报灾害事故、应急救援等提供动态信息.

控制决策子系统是对监测监控的子系统获得的数据、相关标准规定以及矿山以往瓦斯异常涌出实例等构成的数据库进行深度挖掘和分析,得到矿井瓦斯涌出的变化规律,利用这些指标实时进行瓦斯涌出危险性预警,同时判断涌出方式与危险性程度发展趋势,从而做出免疫耐受或免疫应答,为决策提供技术支持.

应急救援子系统包括应急决策指挥和应急救援启动.当预警系统做出免疫应答程序后,矿级领导作为指挥者,应根据监测监控系统、控制子系统实时反馈的信息以及现场状况对灾情发展做出预判,以做出决策指导应急救援^[13].由于瓦斯异常涌出时矿井系统的复杂性、危险性,应急救援过程中,应遵循救援原则,以防灾害的扩大化.

记忆库子系统是在预警系统的运行过程中,不断补充与灾害相关的信息,对同质性造成瓦斯异常涌出

的诱因进行预测或识别并迅速做出免疫应答^[14].记忆库子系统将相关事故案例指标传递到控制子系统,当遇到类似情况时,控制子系统能迅速准确地做出响应,以便及时预警煤矿开采过程中参数动态变化引起的灾害,保证系统处于动态安全的状态.

3 瓦斯异常涌出预警系统模型

3.1 预警指标体系构建

安全生产预警的内容包括预警需求分析、预警监测监控指标确定和预警系统设计^[15].借鉴生物免疫机理,以抗原(Ag)和抗体(Ab)建立起瓦斯预警异常涌出指标体系,为控制系统提供相关决策.预警指标体系分为目标层、准则层、要素层和指标层4层,如表2所示.

表2 基于Ag-Ab模型的瓦斯异常涌出预警指标体系

目标层	准则层	要素层	权重	指标层	权重
瓦斯 异常 涌出预警	Ag 因素	自然因素(Ag I)	0.136 8	地质构造(Ag1)	0.039 7
				围岩状况(Ag2)	0.039 7
				地面大气压变化(Ag3)	0.011 7
				孔隙及裂隙发育(Ag4)	0.045 6
		开采因素(Ag II)	0.341 4	开采规模(Ag5)	0.046 5
				开采方法(Ag6)	0.058 3
				通风方法(Ag7)	0.122 9
				生产工序(Ag8)	0.021 5
				风量变化(Ag9)	0.092 1
		瓦斯特性(Ag III)	0.443 9	瓦斯含量(Ag10)	0.190 3
				钻屑量(Ag11)	0.063 4
				瓦斯压力(Ag12)	0.190 3
		总体规划(Ag IV)	0.077 9	规划不合理程度(Ag13)	0.020 1
				采空区管理(Ag14)	0.049 6
				交通状况(Ag15)	0.008 2
Ab 因素	安全管理(Ab I)	0.484 0	瓦斯监测系统运行状况(Ab1)	0.130 2	
			安全监督机构机制及人员配置(Ab2)	0.063 5	
			设备日常管理与维修(Ab3)	0.091 3	
			安全检查人员素质及检查效果(Ab4)	0.058 5	
			安全生产责任制(Ab5)	0.058 6	
			作业危险过程改进(Ab6)	0.033 2	
			安全文化(Ab7)	0.048 7	
	安全培训教育(Ab II)	0.271 3	日常安全教育(Ab8)	0.061 2	
			负责人及安全管理人员教育(Ab9)	0.029 6	
			教育培训计划及实施(Ab10)	0.043 0	
			特种作业人员安全培训(Ab11)	0.036 9	
			作业人员安全意识(Ab12)	0.075 4	
			法律法规、条例规范的教育(Ab13)	0.025 1	
	应急救援能力(Ab III)	0.130 7	应急资源(Ab14)	0.055 5	
			应急救援计划(Ab15)	0.035 3	
应急救援体制建设(Ab16)			0.021 1		
应急演练(Ab17)			0.018 8		
事故预防投入(Ab IV)	0.114 0	安全投资(Ab18)	0.072 6		
		环保投资(Ab19)	0.011 9		
		公共服务设施投资(Ab20)	0.029 4		

通过参考相关文献、咨询专家与现场工作人员,利用层次分析法(AHP)的评估模型^[16]和相关研究成果,对瓦斯异常涌出预警的各类指标进行权重比较,从而得到Ag和Ab的权重,见表2.结果表明:Ag要素

层中,影响较大的指标为瓦斯特性(Ag III),Ag 指标层中,影响较大的为瓦斯含量(Ag10)和瓦斯压力(Ag12);Ab 要素层中,影响较大的指标为安全管理(Ab I),Ab 指标层中,影响较大的为瓦斯监测系统运行状况(Ab 1).

3.2 瓦斯异常涌出预警系统模型建立

模糊推理的本质是将给定的输入空间通过模糊逻辑的方法进行计算,从而将结果映射到特定的输出空间,其原理如图 3 所示^[17].根据 Mamdani 型的模糊推理系统设计一个基于 Ag-Ab 模型的瓦斯异常涌出预警系统模型,建立起的系统如图 4 所示.

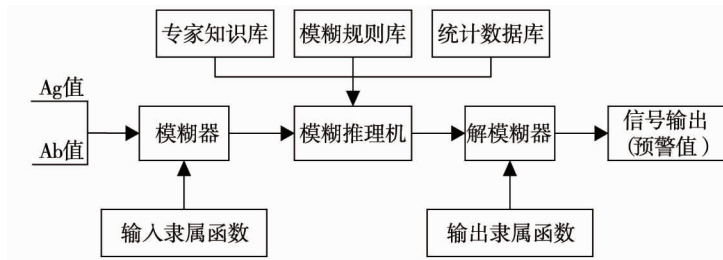


图 3 模糊逻辑系统运行流程

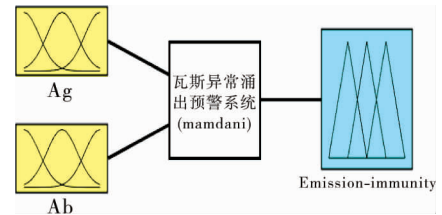


图 4 瓦斯异常涌出预警系统

规定输入指标 Ag 与 Ab 的模糊语言值为很低(VL)、低(L)、中(M)、高(H)、很高(VH)5 个模糊子集,模糊论域均为(0,1).对于隶属函数的选择,由于三角形隶属函数结构及运算简单,能达到预警的效果,并且该函数是分段线性的,故本系统均采用三角形隶属函数.输出指标涌出免疫力值(Emission immunity)的模糊语言值由非常差(VP)、差(P)、中等(M)、好(G)、非常好(E)表示,模糊论域为(0,1).由推理系统建立起 25 条“if ...and ... then ...”规则的模糊推理规则库.瓦斯异常涌出预警系统中的预警等级根据 Emission immunity 值分为 5 级,数值越高预警级别越低,数值由高到低依次为无警(I 级)、轻警(II 级)、中警(III 级)、重警(IV 级)和巨警(V 级).预警系统对应输出曲面图如图 5 所示,x 方向为 Ag 值,y 方向为 Ab 值,z 方向为 Emission immunity 值.当 Ag 值越低而 Ab 值越高时,Emission immunity 值越大(接近 1),此时瓦斯异常涌出危险性极低,无预警;当 Ag 值越高而 Ab 值越低时,Emission immunity 值越小(接近 0),此时瓦斯异常涌出危险性极高,预警级别最高.在矿山实践中,系统自动输入表 2 的 Ab 和 Ag 值,经过模糊推理算法可以得到 Emission immunity 值,从而根据预警区间进行相应的预警,并及时做出相应响应措施.瓦斯异常涌出推理系统结果图如图 6 所示,如输入 Ag=0.653 3, Ab=0.244 5 时,Emission immunity 输出值为 0.3,预警等级为重警.

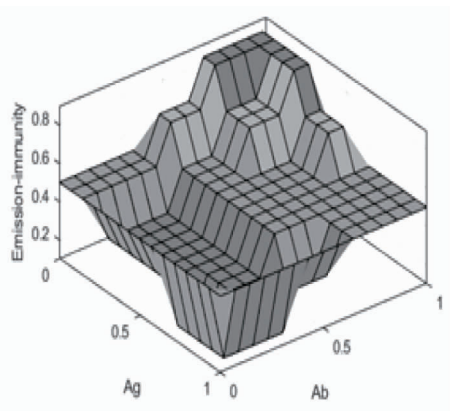


图 5 预警系统输出曲面

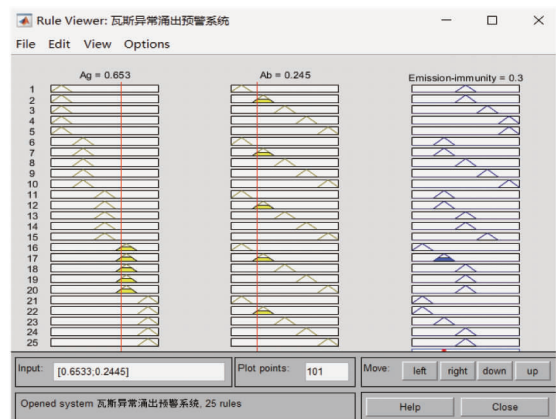


图 6 推理系统结果

4 结论

1) 通过比较,生物免疫系统与瓦斯异常涌出预警系统在组织结构、作用对象、基本功能、作用机制等方面具有相似性,将免疫机理引入瓦斯异常涌出预警系统具有可行性.借鉴生物免疫系统机理,提出基于

免疫机理的瓦斯异常涌出预警系统机制,系统应包括监测监控子系统、控制决策子系统、应急救援子系统和记忆库子系统。

2) 基于免疫机理建立瓦斯异常涌出预警指标体系,包括 15 个 Ag 指标, 20 个 Ab 指标,并由层次分析法给出相应指标的权重。结果表明:Ag 要素层中,影响较大的指标为瓦斯特性(Ag III),Ag 指标层中,为瓦斯含量(Ag10)和瓦斯压力(Ag12);Ab 要素层中,影响较大的指标为安全管理(Ab I),Ab 指标层中,较大的为瓦斯监测系统运行状况(Ab 1)。因此,应加强瓦斯含量与瓦斯压力的动态检测,保持监测系统的正常运行。

3) 通过 MATLAB 的 Mamdani 型模糊推理系统建立起瓦斯异常涌出预警系统,输入 Ab,Ag 值进行模糊推理输出涌出免疫力值,以做出相应级别的预警和防控措施,后续可将防控措施加入预警系统中,为煤矿的瓦斯异常涌出防治提供参考和依据。

参考文献:

- [1] Wang K, Jiang S, Ma X, et al. Abnormal gas emission in coal mines and a method for its dilution using ventilator control[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016,33: 355-366.
- [2] 蒋星星,李春香.2013—2017 年全国煤矿事故统计分析及其对策[J].*煤炭工程*,2019,51(1):101-105.
- [3] 宁小亮.煤与瓦斯涌出预警技术研究现状及发展趋势[J].*工矿自动化*,2019,45(8):25-31.
- [4] 魏连江,胡青伟,梁伟,等.基于 K 线图理论的瓦斯异常模式诊断研究[J].*煤矿安全*,2019,50(6):24-27.
- [5] 蔺亚兵,刘军,赵雪娇,等.煤层冲刷带对瓦斯赋存影响效应及其涌出控制机理[J].*煤炭科学技术*,2019,47(7):59-64.
- [6] Wang X L, Jian L, Lu J J. Coal working face gas emission prediction based on optimization input factors and RVM[C]// 2015 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC). IEEE, 2015.
- [7] Dan X, Gang L I. Establishment of Gray Early Warning Model for Gas Abnormal Emission at Extracting Coal Face and Its Application[J]. *Safety in Coal Mines*, 2015.
- [8] 陈清光,陈国华,段伟利,等.基于免疫机理的化工园区安全生产预警预测模型研究[J].*高校化学工程学报*,2014,28(3):626-633.
- [9] Fabio A G, Dipankar D. A Study of Artificial Immune Systems Applied to Anomaly Detection[D]. Memphis: University of Memphis, 2003.
- [10] 陈清光,段伟利,陈国华.基于免疫机理的化工园区安全生产预警机制设计[J].*中国安全科学学报*,2011,21(9):159-165.
- [11] 赵林度,杨世才.城市重大危险源免疫机制研究[J].*中国安全科学学报*,2007,17(9):146-152.
- [12] 赵旭生,宁小亮,张庆华,等.煤与瓦斯涌出预警方法探讨[J].*工矿自动化*,2018,44(1):6-10.
- [13] 关维娟,汤其建,张国枢,等.煤与瓦斯突出预警管理与应急响应[J].*煤矿安全*,2014,45(10):225-228.
- [14] 杨玉中,吴立云,何俊,等.煤矿瓦斯重大灾害预警理论及应用[M].北京:北京师范大学出版社,2010:197-215.
- [15] 张兴凯.安全生产危机预警初探[J].*中国安全生产科学技术*,2005(1):36-40.
- [16] Liu J, Yang B, Yuan S, et al. A fuzzy analytic hierarchy process model to assess the risk of disaster reduction due to grouting in coal mining[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13(5): 227.
- [17] 刘恒.模糊推理的 Mamdani 算法及其 Matlab 实现[J].*科教文汇(下旬刊)*,2008(10):269.