

文章编号:1671-6833(2009)02-0133-04

瓦斯爆炸演变过程的混沌特征分析

何利文¹, 施式亮^{1,2}, 宋 译², 刘业科¹

(1. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 湖南科技大学 能源与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘 要: 瓦斯爆炸事故作为矿井灾害系统中一个重要的子系统,其演变过程中的一些特征表明,它与混沌现象有着密切的关系,因此在对矿井工作面瓦斯涌出时间序列观测数据分析的基础上,应用混沌理论中的自相关函数、相空间重构、Poincare 截面和返回映象等对该工作面瓦斯涌出进行了混沌特性研究和判别,初步证明了该工作面瓦斯涌出具有混沌特性,同时,对瓦斯爆炸演变系统进行综合分析发现,瓦斯爆炸的演变过程存在明显的蝴蝶效应。

关键词: 瓦斯爆炸;演变;混沌;瓦斯涌出;时间序列;蝴蝶效应

中图分类号: TD 712.5 **文献标识码:** A

0 引言

我国有 95% 以上的煤矿开采有瓦斯赋存的煤层,其中 46% 的煤矿属高瓦斯矿井,由于煤层赋存条件差,地质构造复杂,随着开采程度的日益加深,煤矿井下生产系统日趋复杂,瓦斯涌出、积聚并引发瓦斯爆炸事故的危险性也日益增大。在重特大事故中,我国瓦斯爆炸事故已占到煤矿事故的 80% 以上,造成的伤亡占到特大事故伤亡人数的九成^[1],因此,运用新的理论研究瓦斯爆炸事故的演变规律特征对矿井的安全管理具有现实的迫切性。

瓦斯爆炸演变过程内部之间相互关系非常复杂,构成该系统各要素及其环境之间的非线性相互作用与混沌现象有着密切关系,如煤岩体受力破坏、应力、应变过程的不可逆性;煤岩体内孔隙、裂隙结构所具有的分形几何特征;瓦斯涌出的非周期性等。因此对于瓦斯爆炸来说,系统的结构、系统的作用原理、各系统因素之间关系往往是很不明确和很不清楚的,这样就不利于人们对其分析和进行正确有效的决策,寻求并建立科学、合理的瓦斯灾害控制理论,并与实际生产相结合,使矿井的技术和管理部门有针对性地采取措施,而瓦斯爆炸演变过程中的混沌现象,决定了运用混沌

理论对瓦斯爆炸演变特征进行研究的可行性。

1 瓦斯爆炸演变过程中混沌特征分析的原理与方法

混沌序列可以看作是考察混沌系统所得到的—组随时间变化的观察量值^[2]。考察混沌的方法通常有以下几种^[3-4]:①考察自相关函数;②考察 Poincare 截面;③考察返回映象。

1.1 自相关函数

一般自相关函数 $C(\tau)$:

$$C(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau)dt \quad (1)$$

式中: τ 是时间的移动值。

若用 $C(\tau)$ 量度相隔时间 τ 的信号之间的关联,对于混沌运动 $C(\tau)$ 将随 τ 迅速衰减,常常带有一个指数尾巴。

1.2 Poincare 截面法

设—维时间序列为: $x(t_0), x(t_1), \dots, x(t_i), \dots, x(t_n)$, 将此时间序列延拓成 m 维相空间的一个相型分布:

$$\begin{array}{ccccccc} x(t_0) & x(t_1) & \dots & x(t_j) & \dots & x(t_n - (m-1)\tau) \\ x(t_0 + \tau) & x(t_1 + \tau) & \dots & x(t_j + \tau) & \dots & x(t_n - (m-2)\tau) \\ x(t_0 + 2\tau) & x(t_1 + 2\tau) & \dots & x(t_j + 2\tau) & \dots & x(t_n - (m-3)\tau) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x(t_0 + (m-1)\tau) & x(t_1 + (m-1)\tau) & \dots & x(t_j + (m-1)\tau) & \dots & x(t_n) \end{array} \quad (2)$$

收稿日期:2008-09-11;修订日期:2008-12-27

基金项目:国家自然科学基金资助(50774033);教育部科学技术研究重点项目资助(206100);湖南省自然科学基金资助项目(06JJ2069);国家安全生产监督管理局科研计划项目(06-394)

作者简介:何利文(1978-),男,湖南宁乡人,中南大学博士研究生,主要从事矿山安全技术研究。

式中的每一列构成 m 维相空间中的一个相点,每个相点表示了该系统在某个瞬时的状态。于是,在 m 维相空间中得到了一个相型,从原则上讲,便有了足够的信息把体系的动态展现在多维相空间上来考察。

在多维相空间中适当选取一截面,通常称为 Poincare 截面。观察运动轨迹与此截面的截点称为 Poincare 点,设它们依次为 $P_0, P_1, \dots, P_n, \dots$ 。这样,原来相空间的连续轨迹在 Poincare 截面上便表现为这些离散点之间的映象:

$$P_{n+1} = TP_n \quad (3)$$

式中: T 称为 Poincare 映象。

对于混沌,因其既具有确定性又具有随机性,其奇怪吸引子在 Poincare 截面上将形成有一定形状的线、带或其他图案;

1.3 返回映象

对于用连续流的微分方程(组)表征的系统或测量得到的时间序列,可以很简单地仿照一维离散映象方式得到其二维平面上的相图。这就是把得到的时间序列数据 $x(t)$ [对于微分方程,就是求解时得到的 $x(t)$] 做横坐标, $x(t+\tau)$ 做纵坐标(或简单地取 $\tau=1$),然后作图,在二维平面上得到一定规则的图形。这样的离散映象称为返回映象。对于周期运动,这样的映象的结果也是有限个点: nP 周期运动有 n 个极大值,因此映象是 n 个点。对于完全随机的运动,映象是一些杂乱无章的密集点。对于混沌运动,则将是有形状图案。

另外,混沌理论作为现代非线性理论的一个重要组成部分,对于自然界和社会现象的认识有着不同于传统科学的思想,除了能够解释与说明传统科学理论所能解释与说明的现象与问题之外,还能够解释与说明传统科学理论所不能解释与说明的许多复杂现象或问题^[5-7]。混沌理论中“蝴蝶效应”指明了系统对初始条件敏感性的一种依赖现象,即输入端微小的差别会被迅速地放大到输出端的一切的差别^[8]。

2 实例瓦斯爆炸演变过程中混沌现象分析

对淮北矿务局某矿 7128 轨道巷掘进工作面相对瓦斯涌出量及绝对瓦斯涌出量的时序数据进行分析,如图 1 所示,反应了该矿 7128 轨道巷掘进工作面九个月间瓦斯涌出变化情况和地质构造情况,该工作面瓦斯涌出最高峰出现在 7 月底与 8 月初,最低点在 5 月中旬,而且随着巷道掘进,

相对瓦斯涌出和绝对瓦斯涌出量均表现出较明显的不稳定性,其变化曲线起伏较大且不重复原来的“轨迹”,表现为复杂的结构,反应了系统演变的不规则性。

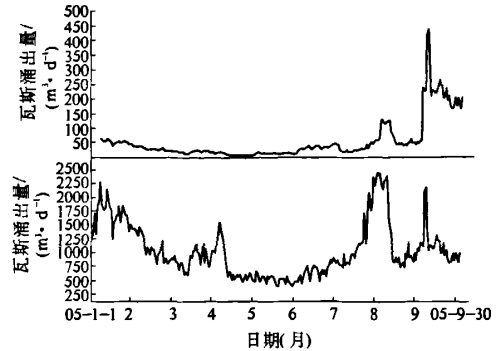


图 1 某矿 7128 轨道巷掘进工作面相对瓦斯涌出量及绝对瓦斯涌出量分析图

Fig. 1 The analyzing graph of the comparative and absolute quantity of the gas gush of the excavation working face of the No. 7128 roadway in a coal mine

对该工作面的瓦斯涌出时序数据进行自相关函数分析,如图 2 所示所示自相关函数 $C(I)$ 随延迟坐标 I 迅速衰减,并带有一个指数的尾巴,因此可以初步判明该工作面瓦斯涌出具有类似混沌的特征。

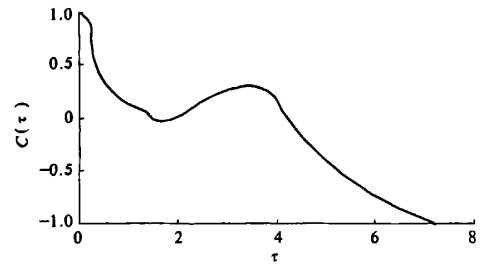


图 2 自相关函数图

Fig. 2 The Picture of the autocorrelation function

对该工作面的瓦斯涌出时序数据,计算了不同时间延迟坐标所构成的相空间之间的相关性,结果见表 1。从表 1 可得到,当 $\tau=5$ 时,其相关系数最小,为 0.115 5。

按延迟坐标 $\tau=5$ 进行漂移,分别组成 $m=2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12$ 维空间,根据式(2)进行延拓,并分析它们的相型。然后选用某一截面,并作 Poincare 截面和返回映象图如图 3 和图 4 所示。图 3 所示吸引子在 Poincare 截面形成一定形状的线,并且从图 4 也可以看出,返回映象形成了近似环形的图样,均表现出混沌运动特征。

表 1 重构坐标系各个分量之间的关系
Tab. 1 The relationship between each weight of the reconstruction coordinate

延迟坐标 τ	1	2	3	4	5	6	7
平均相关系数	0.710 7	0.580 9	0.409 5	0.214 3	0.115 5	0.372 6	0.207 2

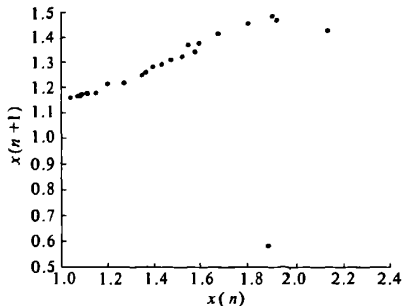


图 3 Poincaré 截面图
Fig. 3 The picture of the poincare section

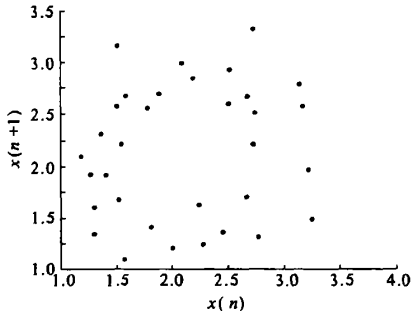


图 4 返回映象图
Fig. 4 The picture of the return map

3 瓦斯爆炸演变过程中混沌现象综合分析

在瓦斯爆炸事故中,存在着风险传导并引起突发的机制.实验表明,瓦斯爆炸的条件必须具备三要素,即瓦斯浓度(达到临界浓度)、引火源(延时)和氧气浓度(足够),三者缺一不可,这是引发瓦斯爆炸事故的宏观条件.但是,上述的每一个条件,都是井下人一机一环境复杂系统中各因子相互作用的结果,其混沌现象具体表现在:

(1)造成煤矿井下瓦斯积聚的条件和因素众多且相互交错.相对其他产业的生产过程,煤矿生产系统结构独特:一是地下作业是其最显著特点,各种地下工程构成立体且不“透明”的网络化结构;二是煤矿主要生产系统的回采和掘进工作面是动态推进的.在工作面推进过程中,由于推进方向的煤岩层结构和赋存条件的不可知性和不可预测性,作业人员所承担的责任风险与开采技术条件不承担事故风险的不对称性在这里得到高度的

体现.一旦初始条件形成后(比如来自煤层或岩层的瓦斯涌出量的增大),如果矿井通风系统(包括采掘工作面的局部通风系统)没有作出符合实际的动态调节来稀释涌出的瓦斯,就会形成瓦斯积聚状态,构成瓦斯爆炸事故的第一条件.当另外两个条件具备的时候,将无法控制的灾难突发性地降临,从而形成最具显著特点的从原始条件演变到不可预测后果的事故明显具有风险的传导特征以及事故发生的突发性特征.

(2)煤矿井下瓦斯爆炸事故的形成具有明显的“蝴蝶效应”,如图 5 所示.由于井下通风系统是由复杂的串并联网络组成,某一支的风量变化(比如风门的开关,或者调节风窗的失效),不一定在该分支巷道中出现瓦斯浓度的变化,可能会引起临近或相距较远的分支巷道内风量的波动,一旦风量减少,就可能引起巷道内瓦斯浓度的增加,当浓度增加到爆炸浓度的范围内,爆炸事故的第一条件形成,事故的发生概率急剧增大,“蝴蝶效应”在这里得到了充分体现.

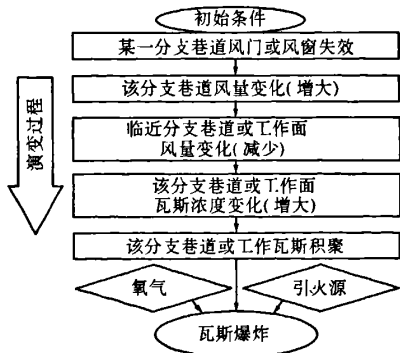


图 5 瓦斯爆炸演变过程
Fig. 5 Evolutionment process of gas explosion

(3)在井下实际生产条件下,氧气浓度低于 12% 的工作区域存在的可能性很小,主要问题自然集中在引火源的存在且足够点燃瓦斯引发爆炸.在煤矿机械化和电气化程度日益提高的今天,衍生了各种类型的引燃瓦斯并导致爆炸事故的引火源,在生产企业充分发挥机械化电气化带来的高效益的同时,引发瓦斯爆炸事故的引火源在时空上累积速度更快,隐蔽性更强,一旦某个薄弱的

技术或者管理链环中断时,微小的原始条件就会演变成不可控制的瓦斯爆炸事故。

(4)在一定条件下,由于瓦斯爆炸事故隐患被隐蔽而导致爆炸风险的累积,从而造成爆炸事故的发生。在当今煤矿生产系统中,由于现代化电子通讯手段在安全管理和监测中的广泛应用,对于现代技术的过分信任会导致不正确的信息以及作业和管理人员判断的失误在反复传递过程中瓦斯爆炸的风险指数被迅速且成几何级数放大,导致井下瓦斯爆炸事故的发生;2003年5月淮北某矿发生的特大瓦斯爆炸事故就是典型示例。在该事故发生前,地面中央监测与控制中心对爆炸区域的各项监测数据均属于正常范围,但是,就是在电子信息系统报告各项数据属于正常的情况下,造成86人死亡的瓦斯爆炸事故发生了,微小的初始条件在特定的条件下被无限放大,最终形成了无法控制的灾难性后果。

4 结论

(1)对煤矿工作面的瓦斯涌出时序数据,计算了不同时间延迟坐标所构成的相空间之间的相关性,当 $\tau=5$ 时,其相关系数最小,在此条件下,通过自相关函数、Poincare截面和返回映像等混沌特征分析方法,并根据各分析图形特征,仍可明显判定煤矿工作面瓦斯涌出具有混沌特性,同时也证明了对瓦斯爆炸的演变特征及其规律作混沌理论研究的合理性和可行性。

(2)对瓦斯爆炸演变的综合分析发现,造成煤矿井下瓦斯积聚的条件和因素众多且相互交错,而且瓦斯爆炸的演变具有明显的风险传导特征、事故发生的突发性特征以及“蝴蝶效应”,这些都为瓦斯事故预防与控制的非线性科学理论和应用研究奠定了良好的基础。

参考文献:

- [1] 李毅中. 安全生产现状、发展趋势和对策措施[R]. 北京:国家安全生产监督管理总局,2007.
- [2] PACKARD N H. Geometry from a time series [J]. Phys Rev Lett,1980,45:712-725.
- [3] 鄂加强,梅 焱,刘春洋,等. 炼铜转炉粗铜成分时间序列的混沌分形[J]. 中南大学学报:自然科学版,2005,36(2):238-242.
- [4] IZMAILOV I V, POIZNER B N, SHERGIN D A. Spatial deterministic chaos in optical systems and methods of its modeling [J]. Russian Physics Journal, 2004, 47(12):1289-1296.
- [5] LORENZ E N. The essence of chaos[M]. Washington: The University of Washington Press, 1993.
- [6] JACKSON E A. Perspectives of nonlinear dynamics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
- [7] BAKER G, GOLLUB J P. Chaotic dynamics - an introduction [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- [8] 黄润生. 混沌及其应用[M]. 武汉:武汉大学出版社,2000.

Chaos Characteristic Analysis of the Process of Gas Explosion Evolvement

HE Li-wen¹, SHI Shi-liang^{1,2}, SONG Yi², LIU Ye-ke¹

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central Southern University, Changsha 410083, China; 2. School of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Gas explosion accident is an important subsystem in the mine disaster system, and some characteristics is showed that it concerns chaos phenomena very nearly in its evolvement process. Therefore, after analyzing the coupling characteristics of the gas gush system of the excavation working faces and the chaotic theory, the chaotic characteristics of the gas gush in the working faces were determined by applying the autocorrelation function, the phase reconstruction, the Poincare section and the power spectrum of the chaotic theory. The research results proved preliminarily the gas gush in the working faces had chaotic characteristics, and at the same time, it was discovered that the evolvement process of gas explosion occurred obvious butterfly effect after comprehensive analysis about the gas explosion system was carried out.

Key words: gas explosion; evolvement; chaos; gas emission; time series; butterfly effect