论矿山动力现象研究的哲学精神

代高飞,滕宏伟,尹光志
(重庆大学 资源与环境工程学院,重庆 400030)

摘要:自然辩证法的若干思想在科学研究中起着重要作用。正确地处理好科学研究中的一些哲学问题,用辨证的思想方法去解决科学难题,对科学研究大有裨益。作者在矿山动力现象的研究中巧妙地运用了辨证的思想,取得了很好的效果。

关键词:自然辩证法;科学研究;正反馈;自组织
中图分类号:B02 **文献标识码**:A **文章编号**:1008-5831(2006)01-0071-05

一、前言

矿井开采是一个复杂系统。随着时间推移,矿井将进入深部开采,矿山动力现象的灾害将日趋严重。采矿业发达国家如前苏联、美国、波兰、德国、法国和日本等国家相继成立了专门的矿山动力现象研究机构。我国从50年代初开始对这种特殊的矿井灾害进行研究,虽然对矿山动力现象有了一些认识和预报防治措施,但是,到目前为止,仍不能完全控制这种灾害,它已成为世界范围内采矿工程和岩石力学界必须面对的世纪难题。笔者对这种灾害发生的机理、预防、预报和防治进行了系统研究,取得了一些研究成果,研究过程中笔者感到以下几个哲学问题对认识和处理特殊矿山动力现象大有裨益。

二、正反馈和负反馈

自然辩证法认为负反馈是使系统保持向原有状态发展的动力,是使微小事件趋于消失的倾向,是使系统保持稳定的因素。负反馈的特性是防止小的不安定因素使系统解体。正反馈的作用与负反馈的作用表现出恰恰相反的效应,微小的事件会被放大和发展,而不是趋于消失。正反馈是推动系统偏离既有的稳定性。在经典的试件试验机模型中,即把一个岩石或煤试件放在试验机上进行压缩实验,正反馈就是应变软化的煤岩试件,负反馈就是弹性的试验机。煤岩试件在加载初期,表面变形场在各处是均匀的,具有对称性,即处于高度的无序状态。随着加载的增加,对称性逐渐被打破,出现变形局部化和有序的现象。此时有序现象的出现是不稳定的,局部化有跳跃现象。随着进一步加载,试件逐渐形成稳定的局部化带,达到新的完全的有序状态。如果煤岩试件是完全均质的材料,则变形局部化可以从试件表面的任何一处开始,实际局部化发生在何处,完全是偶然的,即变形局部化从试件表面的哪一处开始,充满了不确定性。但如果试件某处哪怕比其它地方材料的强度弱一点点,局部化就从这里开始了。变形局部化一旦形成,则这种偶然性就成为一种必然性。

矿井开采过程中,岩石受压发生破坏,在岩石峰值强度前,岩石承载能力随变形增加而增加,具有负反馈性质。在超过峰值强度后,岩石产生应变软化,承载能力随变形增加而降低,岩石变成具有正反馈性质。采矿活动形成的地下结构,其组成材料为煤和岩石,这些煤岩结构中一部分材料不可避免地要在超过峰值强度后的变形区工作,在应力超过强度极限后,这部分煤岩材料变成了应变软化材料,具有正反馈性质,而深部受采动影响较小的区域仍处于硬化或弹性阶段,具有负反馈性质,所以煤岩结构一般可分为正反馈区和负反馈区,深部区域是负反馈材料,靠近边界的区域是正反馈材料,而这两部分区域的大小是随着煤岩结构所受载荷大小或随着采掘进行而变化的。在井下煤岩变形系统中,扰动可以

收稿日期:2005-09-23
作者简介:代高飞(1974-),男,重庆人,重庆大学资源与环境工程学院博士后,主要从事岩土资源研究。

是洞室的开挖、工作面的推进、开采、顶板岩层微裂纹的突然断裂、地震和放炮等,这些扰动因素在实际工程中是不可避免的。但是在通常的情况下,这些扰动在煤岩变形系统的线弹性负反馈自稳机制的调节下——一般不至于影响系统的总体稳定性。随着开采范围扩大,煤岩体进入峰值强度后变形的区域加大,正反馈程度的加深,煤岩结构由稳定的平衡向非稳定平衡过渡。当成为非稳定平衡时,这些扰动可以通过系统中的应变软化正反馈机制得以积累和放大,以致于影响系统原有的总体稳定性,使系统失稳破坏。所以负反馈特性是煤岩体稳定的必要条件,而正反馈特性是煤岩体失稳破坏的充分条件。对于矿井开采系统,正反馈和负反馈是两个问题的两个方面。

三、进化与退化

进化与退化往往相互交替、相互转化。非平衡组织理论在这方面提供了典型的事例。在对“混沌”现象的研究中,非平衡开放系统不仅可以从有序演化到无序,而且还能在一定的外部控制参量条件下经过突变从有序经过一定的道路进入“混沌”状态。文献[2]假设在初始状态下,岩石内部有 n_i 条裂纹,且在加载过程中,微裂纹形成时释放出的能量促使新的微裂纹产生,因而可采用触发—生长—触发的链式生长模型来描述微裂纹的演化过程,也就是说,可以假设微裂纹的产生正比于微裂纹密度和广义驱动力。从而推导出微裂纹总数 n_{i+1} 可由(1)式计算:

$$n_{i+1} = F_1(\sigma)\cdot n_i + F_2(\sigma)\cdot(N_o - n_i)\cdot X_i \quad (1)$$

式中,N_o 为有效生长区内可能产生的微裂纹总数;$X_i = \frac{n_i}{N_o}$ 为微裂纹密度(无量纲);$F_1(\sigma)$ 为微裂纹存活比,它是反映微裂纹闭合效应的一个特征量,且为无量纲标量;$F_2(\sigma)$ 为依赖于应力水平 σ 的驱动力,且为无量纲标量。

根据(1)式,可得:

$$X_{i+1} = F_1(\sigma)\cdot X_i + F_2(\sigma)\cdot X_i\cdot(1 - X_i) = F_2(\sigma)\cdot X_i\cdot\left[\frac{F_1(\sigma) + F_2(\sigma)}{F_2(\sigma)} - X_i\right] \quad (2)$$

令 $X_i = \frac{F_2(\sigma)}{F_1(\sigma) + F_2(\sigma)}\cdot X_i$,

$$F_2(\sigma) = \frac{[F_1(\sigma) + F_2(\sigma)]^2}{F_2(\sigma)} \quad (3)$$

式中,$F_2(\sigma)$ 是 $F_1(\sigma)$ 和 $F_2(\sigma)$ 的单值函数;$X_i(\sigma)$ 是 X_i、$F_1(\sigma)$ 和 $F_2(\sigma)$ 的单值函数。

根据(3)式,(1)式和(2)式可表示为:

$$X_{i+1} = f[F_2(\sigma), X_i] = F_2(\sigma)\cdot X_i\cdot(1 - X_i) \quad (4)$$

而标准 Logistic方程为:

$$x_{n+1} = f(x_n, \mu) = \mu x_n(1 - x_n) \quad (5)$$

因此,对于(4)式,设 $F_2(\sigma)\in[0, 4]$; $L\in[0, 1]$;当 $X\in L$, $X_{i+1}\in L$ 时,式(4)为一种非线性映射,即为 Logistic方程。当 $F_2(\sigma)(1 - X_i) > 0$ 时,广义驱动力 $F_2(\sigma)(1 - X_i)$ 是微裂纹发展、演化的推动力,它表示为正反馈作用。广义驱动力的大小是微裂纹发展、演化快慢的度量。广义驱动力不应是个常数,而是 X_i 的非线性函数。对于式(4)有:

$$X_{i+1} = F_2(\sigma)\cdot X_i - F_2(\sigma)\cdot X_i^2 \quad (6)$$

式(6)中的高次限制项 $(-F_2(\sigma)\cdot X_i^2)$ 可称为负反馈项,它表示单轴加载系统中微裂纹的湮灭,表示 $F_2(\sigma)\cdot X_i$ 湮灭率。在式(7)中,若 $1 < F_2(\sigma) < 2$,则迭代过程将使 X_{i+1} 逼近 $x_a = 1 - \frac{1}{F_2(\sigma)}$;对于描述岩石微裂纹数目的方程(4),从数学上讲,存在这样一种状态,当广义驱动力水平很低时 $(0 < F_2(\sigma) < 1)$,随着加载过程的进行,由于能量耗散和裂纹闭合效应的存在,有效生长区中的微裂纹数目逐渐减少直至完全消失,其稳定状态为相空间收缩后形成的不动点 $X_i^0 = 0.0$。$x_a < 0$,这只是理论值,实际上微裂纹的群体是正系统。微裂纹的湮灭只能接近零,不可能为负。若 $F_2(\sigma) > 2$,随着 $F_2(\sigma)$ 的增大,可能出现不同周期的周期性振荡或非周期性振荡(混沌)。方程(6)的解 X 与 $F_2(\sigma)$ 的依赖关系大致可分为倍周期区和混沌区。当 $3.0000 < F_2(\sigma) < 3.5699$ 时,系统处于倍周期分叉区。当 $3.5699 < F_2(\sigma) < 4.0000$ 时,系统处于混沌区。混沌区中也有不少周期窗口。例如周期 $P = 3, 5, 6\cdots$ 的窗口,这些周期 P 也不断倍分叉。对于式(5)所描述的非线性函数 $f(F_2(\sigma), X_i)$,不能单值地定义逆映射 $f^{-1}(F_2(\sigma), X_i)$。不可逆性在一定意义上

相当于存在能量耗散。因此,式 (4) 描述了耗散系统对于离散时间的不可逆演化过程,同时描述了系统通过倍期分岔,便会逐渐丧失周期行为而进入混沌状态。混沌状态是一种微观上有序有律的状态,它和平衡状态下的无序是不同的,从宏观角度看,它的有序程度明显降低了。在这里,有序和无序是真正的两极相通,随着外界控制参量的变化,可以循环经过无序 →有序 →混沌的历程。进化与退化的辩证统一表明,物质系统不可能单调地走向复杂化, 也不可能单调地走向简单化 ,物质系统的演化是一个曲折的过程 ,追求直线性的演化途径原则上是不会成功的 ,整个自然界在进化与退化的循环往复和矛盾斗争中构成丰富多彩的演化过程。

四、突变和渐变

顾名思义 ,剧烈的、迅速的变化就是突变 ,即突变等于快速变化 ,而把速度缓慢的变化称之为渐变 ,即渐变等于缓慢变化。对于突变的不连续的自然现象 ,法国著名数学家 R. Thom 在关于奇点理论研究基础上 ,于 60 年代提出了用突变理论来进行描述。这一理论特别适合于自然界中作用力或动力的渐变导致状态突然变化的场合 ,其中突变理论在地质现象的不连续性和地质事件的突然性中的应用是一个很重要的方面。在地学中 ,突变现象十分普遍 ,最典型的莫过于地震了 ,在矿井系统中 ,小型的地震即矿震也是一类特殊的突变现象。在一般情况下 ,矿震启动后都会产生煤岩的雪崩式突然破坏 ,是一个突变过程。矿震给研究煤岩的破坏过程带来了极大的困难 ,瞬间的雪崩式破坏掩盖了煤岩体在矿震启动后变形破坏的过程和规律 ,使人们只能片面看到最后破坏的情况。实际上 ,矿震这种突变和渐变之间是有一定规律可循的。突变理论的实质就是揭示事物的质变方式是如何依据条件变化的。最常用的尖点突变模型的势能函数的标准形式为:

$$V(x) = x^4 + \mu x^2 + vx \qquad (7)$$

式中, x为状态变量, μ、v为控制变量。文献 [3] 考虑顶板岩体、煤层和底板岩体组成的有可能发生矿震的系统,将该系统简化为一简支平直梁,推导出顶底板和煤层系统的势函数可近似表达式为:

$$V = \frac{EI\pi^6}{16L^5}u^4 + \frac{\pi^2}{4L}\left(\frac{EI\pi^2}{L^2} - N\right)u^2 + pu \qquad (8)$$

由 (8)式可以知道,顶底板岩体和煤层系统的总势能 V可看成以顶板的中点位移 u为状态变量,水平

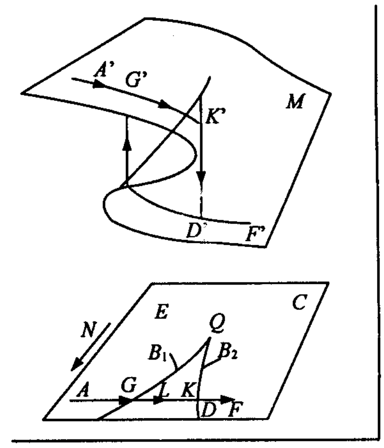

图 1　点 (N, P) 在 $N > N_0$ 且保持常数和垂直力 P增大时的运动

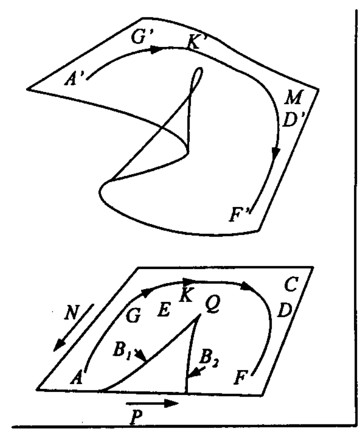

图 2　点 (N, P) 保持在区域 E中的运动

力 N和垂直力 P为控制变量的尖点突变模型:

$$V = V_{(a,b)}(x) = \frac{1}{4}x^4 + \frac{1}{2}ax^2 + bx \qquad (9)$$

其中:
$$x = \frac{\pi}{L}\left(\frac{4L}{EI\pi^2}\right)^{-\frac{1}{4}}u$$
$$a = \frac{L}{\pi}\left(\frac{L}{EI}\right)^{-\frac{1}{2}}\left(\frac{EI\pi^2}{L^2} - N\right)$$
$$b = \frac{L}{\pi}\left(\frac{4L}{EI\pi^2}\right)^{-\frac{1}{4}}p \qquad (10)$$

根据所建立的突变模型,在水平力 N和垂直力 P确定的控制平面中的运动途径对顶底板和煤层矿震系统的突变和渐变特性有明显的影响:

(1) 设点 (N, P) 在控制空间 C中的运动途径为 $A \to G \to K \to D \to F$点,相应于在平衡曲面 M中的运动途径为 $A' \to G' \to K' \to D' \to F'$,如图 1。当点 (N, P) 右移到 K点,系统的状态和势能都发生突变。这时垂直力是由负经过零逐渐增大的,说明在 Q点附近

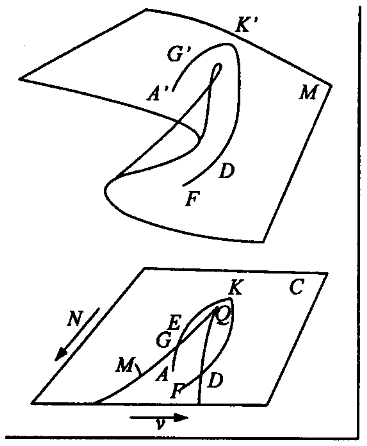

图 3 点 (N, P) 在尖角区 J内的运动

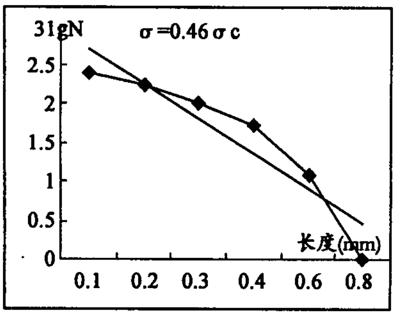

图 4 砂岩微裂隙长度与频率的关系曲线

一个局部范围内;系统受到的垂直力的性质发生了突变 (方向改变),并且它的出现和渐变可能导致状态突变。如果点 (N, P) 沿相反途径运动 (图 1中的 $F \to D \to K \to G \to A$),那么突变不是在原来的 K(或 D)点,而是在原来不发生突变的 G点。

(2) 点 (N, P) 保持在区域中运动,如图 2,这时水平力和垂直力的变化,使系统从一个稳定平衡状态变到另一个稳定平衡状态,这时系统状态的改变是一个渐变的过程。

(3) 点 (N, P) 的运动的起、终点都在尖角区 J内,如图 3。此时系统的状态和势能可能发生很大变化,但不以突变的方式发生。例如开始在 A,经过 G、K、D最后达到 F, 这也是一个渐变的过程。

五、自组织特征

自然辩证法认为自组织指一个系统的要素按彼此的相干性、协同性或某种默契形成特定结构与功能的过程,它是根据事物变化的规律和特定条件完成的。自组织概念有重要的理论和现实意义。它可能是解释复杂性问题的有效工具和手段。自组织理论认为,开放系统在远离平衡的非线性区,可通过引进负熵和正反馈循环,经过涨落或起伏,从无序状态产生有序结构。自组织理论作为科学发展中的最新思想和方法,在认识论上给予人们许多重要的启示意义。20世纪 60～70年代,普利高津和哈肯分别创立的耗散结构和协同学,对系统的自组织现象和过程做出了深刻的研究和阐述。物质世界中任何开放系统都处于一定的自组织演化过程中。1987年, *Bak Wiesenfeld*和 *Chao Tang*提出了自组织的临界状态的概念,这一理论认为:许多复合系统自然地朝着一种临界状态进化,在这种状态下,小事件引起的连锁反应能对系统中任何数目的组元产生影响。他们的研究结果表明具有自组织临界特性的系统,在临界状态其规模与其分布函数满足如下幂律关系:

$$D(V) = KV^{-a} \tag{11}$$

其中: $D(V)$ 为某事件的分布函数; V为该事件的规模。

对于工程地质体的演化过程而言,就是组成工程地质体的各个子系统之间通过不断的竞争和协同,最后在一定的外界条件和系统内部非线性机制的作用下,从无序到有序,从低级到高级的自组织演化过程。虽然复合系统发生的小事件比大灾难多,但遍及所有规模的连锁反应是动态特性的一个必不可少的部分,因而小事件和大灾难的发生都起因于同一种机制,并且,复合系统永远不会达到平衡态,而是从一个亚稳态向下一个亚稳态进化。自然界中的许多复合系统都有自己的自组织临界状态,已有许多模型显示了自组织的临界状态,其中地震模型也许是最成功的。1956年,地质学家 *Beno Gutenberg* 和 *Charles F. Richter*发现,地震震级大于 m 的地震数目 N满足如下关系式:

$$\lg N = a - bm \tag{12}$$

上述关系式不仅适应于区域地震活动,对全球范围的地震活动都适用,这说明地震震级 m 与其相应的发生频率之间存在着某种普适性,这种普适性就是幂律关系。幂律关系广泛存在于自然界的各种现象中,如岩体累进性破坏和矿井动力现象的发生都满足幂律规律。

根据文献 [4],对超过某一长度 (规模) L的微裂纹数目 (频率) N 进行了研究,其结果如图 4所示 (限于篇幅,本文只给出一种应力状态下的关系曲线)。图 4表明,在无标度区域内,岩石微裂纹生长和演化过程中微裂纹产生频率的对数与微裂纹长度呈很好的线性关系,在不同的应力阶段,它们之间满

足的线性关系式如表 1所示,从相关系数可以看出它们具有较好的相关性。表中各式表明,各个应力阶段岩石在单向应力作用下微裂纹的长度与频率之间的确遵守幂律规则。根据表 1中各个应力阶段微裂纹分布的幂律规则,可以定性地预测岩石不同应力阶段某种长度微裂纹的数目,由此可见,岩石在单向应力状态下微裂纹产生的规模和频率符合幂律规则,具有自组织特征。

表 1 各级应力状态下砂岩微裂隙长度与频率的关系

σ/MPa	无标度区内的线性关系	相关系数
0	LgN = - 0.3099L + 2.4437	0.9593
$0.46\sigma_c$	LgN = - 0.2188L + 2.6301	0.9757
$0.63\sigma_c$	LgN = - 0.1634L + 2.6222	0.9161
$0.86\sigma_c$	LgN = - 0.1391L + 2.6689	0.9263
σ_c	LgN = - 0.1296L + 2.7871	0.9607

南桐矿务局砚石台煤矿由于地质构造极为复杂,赋存条件极差,矿山动力现象频繁发生。该矿自1979年 8月 22日首次发生动力现象以来,到 1997年共发生了 193次煤与瓦斯突出,突出煤量达7177.91吨,且最大突出强度为 484吨/次,平均突出强度为 37.19吨/次。通过对该矿矿山动力现象资料的综合研究,发现煤岩的突出强度 Q 与突出频率 N 很好地满足幂律规则,回归方程为:

$$lgQ = -0.8585\,lgN + 2.9084 \quad r = 0.9646$$

同时瓦斯的突出强度 Y 与突出频率 N 也很好地满足于幂律规则,其回归方程为:

$$lgY = -0.7942\,lgN + 0.7934 \quad r = 0.9552$$

且煤岩的突出距离 D 与突出频率 N 也很好地满足幂律规则,其回归方程为:

$$lgD = -0.6529\,lgN + 1.7501 \quad r = 0.9340$$

煤岩的突出强度 Q、瓦斯的突出强度 Y、煤岩的突出距离 D 与突出频率 N 均符合幂律规则,充分说明矿山动力现象是地层系统中煤岩体物理力学性质、应力高度集中、应力重新分布等各要素按彼此的相干性、协同性或某种默契形成特定结构与功能的过程,它是根据地层系统自身运动变化规律和特定条件完成的。

六、结语

矿山动力现象是一个极其复杂的力学现象,笔者在认识和研究这一现象时,正确处理好了正反馈和负反馈、进化和退化、突变和渐变、自组织等关系,对于深刻地理解矿山动力现象发生和破坏过程的本质具有很好的作用,同时是从新的角度和方向,采用新的方法来对矿山动力现象发生和破坏过程进行深入研究,取得了一些创造性的成果,解释了传统理论所解释不了的一些矿山动力现象。因而,笔者认为,掌握辩证法对科学研究极为有用。

参考文献:

[1] 于学馥. 实现突破口的首要问题是思维方式的变革[J]. 岩石力学与工程学报, 1994, 13(1): 1 - 3.

[2] 赵修渝. 自然辩证法概论[M]. 重庆:重庆大学出版社, 2001.

[3] 尹光志,代高飞. 岩石裂纹演化的分岔混沌和自组织特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 635 - 639.

[4] 代高飞. 煤岩非线性动力学特征及冲击地压的研究[D]. 重庆:重庆大学, 2002.

[5] CHEN Y B, YAO X X, XIE H X. The Study of Fracture of Gabbro[J]. Int J. RockMech Min. Sci & Geomech, 1978, (15): 99 - 112.

[6] Y ZHAO, J HUANG, R WANG. Technical Note Real-time SEM Observation of the micro-fracturing Process in Rock During a Compression Tests[J]. Int J. Rock Min. Sci & Geomech, 1993, 30(6): 64 - 652.

[7] G 尼科利斯,等. 非平衡系统的自组织[M]. 北京:科学出版社, 1986.

A Philosophic Research on Dynamics Phenomena in Mine

DAI Gao-fei, TENG Hong-wei, YIN Guang-zhi

(College of Resource and Environmental Sciences, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The viewpoints of philosophy and methods of dialectics of nature play an important role in science researches. It is important to process issues in philosophy and settle difficult problems by methods of dialectics in science researches. Good effects were obtained in this paper through the viewpoints of philosophy in the study of dynamics phenomena in mine.

Key words: dialectics of nature; science research; positive feedback; self-organization