自组织临界性及其在斜坡重力作用灾害研究中的应用*

姚令侃①** 黄 渊② 陆 阳①

(①西南交通大学土木工程学院, 成都 610031; ②核工业西南物理研究院等离子体诊断研究室, 成都 610041)

摘要 首先介绍了 3 种在自组织作用下的反映斜坡物质能量耗散普适性过程的沙堆模型实验, 以及托卡马克等离子体试验. 实验表明, 当沙堆由非均匀颗粒组成时呈现 SOC 现象; 托卡马克等离子体当约束条件减弱时具有 SOC 的一些特性. 然后通过沙石材料土工性质的测试和堆积结构模拟分析, 得出SOC主要由系统的组构特征确定的结论. 最后在 SOC 的概念框架下讨论了斜坡重力作用灾害的机理研究、预测预报以及防治工程设计等问题.

关键词 自组织临界性 托卡马克等离子体试验 斜坡重力作用灾害

作为控制大量广延耗散动力系统(Spatially extended dynamical systems)的普遍组织原则, Bak等人[1]提出了自组织临界性(Self-organized criticality, 简称SOC)的概念: 耗散动力学系统的大量组元之间存在着强烈的相互作用, 使系统自然地朝着临界状态进化. 在临界状态下, 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, 甚至能导致大灾难, 遍及所有规模的连锁反应是其动态特性的本质. 宏观表现上, 小事件的发生比大事件多, 但是大小事件都起源于同一机制. 沙堆是SOC的一个典型范例, Held[2]用一套精密的装置进行了沙堆实验, 选用粒径 1 ~ 1.25 mm的沙粒, 采用在圆盘上逐粒加沙的方式构造沙堆. 当沙堆的倾角在临界角附近时, 加入的沙粒数量与落在边缘之外的数量总体上达到平衡, 沙堆停止增长. 此时对新添加沙粒(可视为一种干扰)的响应是无法预测的, 沙粒可能固定在沙堆上、也可能引起小范围沙粒的滑动、还可能导致更大规模的“雪

2003-12-04 收稿, 2003-12-31 收修改稿

* 国家自然科学基金项目(批准号: 50278080, 10375020)、国家自然科学基金西部重大研究计划项目(批准号: 90202007)和高等学校博士点专项科研基金项目(200061307)资助

** E-mail: yaolk@swjtu.edu.cn

崩”(avalanche), 但崩塌规模与发生频率的关系与幂律相符.

SOC 已经用于解释地震、森林火灾、恐龙灭绝等灾难性事件, 本文主要就SOC 的所谓尺度效应, 以及该理论在斜坡重力作用灾害应用方面的问题进行探讨.

1 斜坡物质自组织临界性研究

沙堆模型反映了一种在自组织作用下的斜坡物质能量耗散普适性过程. 这里所说的斜坡重力作用灾害指斜坡物质主要在重力作用下失稳的诸多自然现象, 尤其是指山体崩塌、自然或人工开挖的边坡失稳、坡面泥石流、大型弃渣堆、岩堆、溜砂坡、雪崩等系统的组元都具有散粒体性质的灾害类型. 它们的共同特征是能量的耗散是以斜坡物质失稳下滑实现的, 我们希望在 SOC 的概念框架下利用沙堆模型从整体理论上解释这些灾害的普适性动力学特征, 但首先面临的是SOC 系统的所谓尺度效应问题.

在各国开展的沙堆实验和计算机模拟的工作中, SOC现象的出现有尺度因素的影响, 如Held[2]进行的均匀颗粒的沙堆实验, 在圆盘直径为 2 cm时, 呈现自组织临界性; 而用直径 8 cm的圆盘时发现沙堆不呈现SOC, 他们尚不知道为何只有小沙堆才自然地朝着临界状态进化[2,3]. 因此人们认为SOC现象的发生同时由系统的尺寸和系统的组织原则确定, 但有关理论解释基本还是空白. 天然斜坡无疑都是大尺度系统. 若沙堆的SOC性质仅出现于这样小的系统, 从工程的角度看毫无普适性, 因此我们首先必须界定SOC的适用范围. 为此我们设计了两类 3 种沙堆物理实验如下:

(ⅰ) 倾斜平面下半无限松散沙堆边坡坍塌水箱实验

该实验是以最为常见的单面坡失稳坍塌为原型设计的, 分为有水和无水两种. 有水单面坡沙堆模型实验是模拟由于水的入渗破坏坡体内的应力平衡, 导致坡体在重力作用下坍塌的现象. 实验是在宽、高各为 35 cm, 长为 210 cm的水箱中进行的. 实验时先在矩形底盘上用干燥沙石建造单面坡的沙石坡面堆体如图 1 所示, 当斜坡角度α达到干沙的临界坡度时, 开始用固定的速率向水箱缓慢注水, 直至完全淹没沙堆为止. 由于沙堆的水下休止角小于干燥沙堆的临界坡度, 在其过程中会有沙粒坍滑至落沙收集台, 待沙堆稳定后再用相同的速率放干水,然后测量坍滑体的重量. 无水单面坡干沙实验分别在大小两种沙箱中进行(大沙箱高 250 cm, 宽 120 cm, 小沙箱

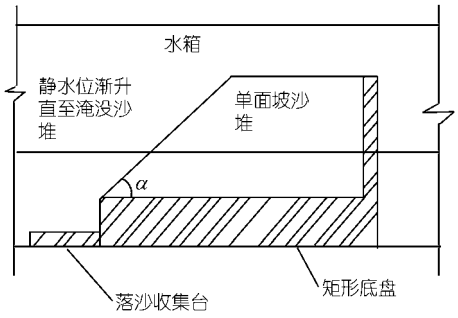

图 1 倾斜平面下半无限松散沙堆边坡坍塌水箱实验示意图

高 30 cm, 宽 40 cm), 沙堆建造方法同图 1, 只是扰动方式是采用向单面坡顶部添加沙粒进行的. 该实验典型的原型是溜沙坡, 特点是能量注入(风化沙石补给)是持续的、缓慢的、均匀的, 能量的耗散相当于注入来说是瞬时的、雪崩式的.

(ii) 水槽沙堆模型实验简况

该实验是以处于临界稳定的斜坡物质在水流扰动下失稳滑动为原型设计的, 实验在宽 30 cm、槽坡设置为水平的玻璃水槽中进行的. 一次实验时先在水槽中放满水深为 20 cm的清水, 然后在静水中通过漏斗缓慢地堆起一个高约 15 cm 的沙堆, 为保证放水时沙堆在垂直于水流方向上能受力均匀, 将沙堆最后构造成两端与槽壁相抵, 顺水槽方向截面为等腰三角形(底角α需等于泥沙水下休止角)的“沙坝”如图 2. 而后以固定的提升量打开尾门放水, 放水过程中处于临界坡的沙堆在动水作用下将会变形坍塌, 水槽中水放完后, 通过称重确定坍滑体占该次实验用沙总量的比例.

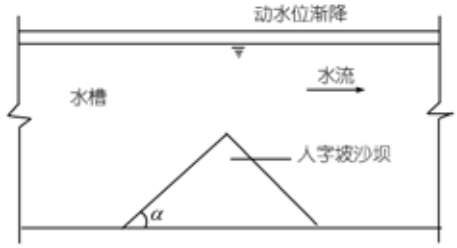

图 2　水槽沙堆模型实验示意图

在上述 3 种实验中,用均匀沙所做的实验结果与Held[2]观察到的现象相同. 但当颗粒的非均匀性增大时仍发现了SOC现象[4~6]. 实验表明与均匀沙相比, 非均匀沙系统动态特性的变化发生在拣选系数$\phi \geqslant 2.85(\phi = \sqrt{d_{75}/d_{25}})$.

2　托卡马克等离子体 SOC 特性研究

天然斜坡重力作用灾害系统的几何尺度一般为数十米至几百米的范围, 在实验室条件下追求几何条件的相似总有差距. 我们认为 SOC 系统的大小尺度应该是由所含组元的数量来度量的, 故我们设计了以组元数目量级的接近为表征的大系统实验.

在人类实现了第 1 次人工受控核聚变(氢弹)以后, 和平利用聚变能就成为物理学家的心愿. 要实现作为潜在能源的核聚变反应, 只能通过高温等离子的方法. 它必须解决两个主要难题: 等离子体的约束和等离子体的加热. 对于前者, 在实验室条件下目前是用托卡马克装置产生环形强磁场实现磁约束. 对等离子体的加热手段有欧姆加热、高能中性粒子束注入加热等. 欧姆加热是最基本的加热手段, 但它不能将等离子体加热到发生聚变反应所需要的高温, 还需要其他的辅助加热手段. 中性粒子注入是目前较成功的一种等离子体加热法, 但在实践中发现, 当粒子束功率不太高的高能中性粒子注入后, 虽然提高了等离子体的离子温度, 约束性能却变坏了. 这种现象被称为“L 模约束特性”.

托卡马克等离子体当约束条件改变时, 在某种程度上就可能具有SOC的一

些特性. 在SOC沙堆模型中的沙子输运, 在托卡马克等离子体中的对应物理量是横越磁场的粒子输运和能量输运. 在托卡马克等离子体的小截面内, 一般地, 芯部具有较高的密度n_e、温度T_e或热压强, 沿径向向外逐渐减小, 边缘区的等离子体密度、温度或热压强较低. 这样, 在等离子体中存在大量的自由能(由∇n_e, ∇T_e等参数的径向梯度提供), 它们将激发静电湍流和电磁湍流, 从而使托卡马克等离子体约束性能远远低于新经典输运理论的预言, 形成所谓的反常输运问题. 对于湍动等离子体, 可将等离子体参量写成平衡量与涨落量之和:

$$x(t) = \overline{x} + \tilde{x}(t), \tag{1}$$

这里, $x(t)$为所测物理量(T_e, n_e, ϕ_p等)的瞬时值, $\overline{x}$ 为其时间均值, $\tilde{x}(t)$ 即为涨落量的瞬时值. 实验上已发展出多种诊断技术对等离子体湍流进行观察研究, 并发现由静电湍流引起的粒子输运损失Γ_e和能量输运损失Q_e是边缘等离子体反常损失的重要组成部分. 因此, 了解和掌握边缘区湍流的基本特征对探索改善托卡马克等离子体约束性能具有重要意义.

静电探针(又称朗谬尔探针)是一根耐高温的、电的良导体细丝, 除了端点的工作部分外, 其他部分受陶瓷、玻璃等绝缘材料套的保护. 将探针插入到等离子体内部, 通过直接测量流到探针表面的粒子和能量通量, 在简化条件下, 可以推演出局域等离子体参数(n_e, T_e, ϕ_p及其涨落等). 利用静电探针的测量数据, 初步研究了HL-1M托卡马克边界等离子体的静电涨落及其湍动粒子输运的SOC特性.

实验使用的托卡马克装置HL-1M托卡马克等离子体的大半径R = 1.02 m, 小半径为a = 0.26 m. 本实验的典型运行参数为: 纵场B_T = 2.3 T, 等离子体电流$I_p \approx$ 170 kA, 中心电子温度$T_e(0) \approx$800 eV, 弦平均电子密度$n_e = 1\times10^{13}$ cm^{-3}, 工作气体为氢气, 欧姆放电电流和等离子体位移的平台区. 静电三探针(四针结构)装在一个可手动调节升降的支架上, 支架的调节精度为 0.5 mm. 针材料为ϕ = 0.5 mm的石墨丝, 安装成一个边长为 5 mm的正方形阵列, 4 根针径向位置相同. 在四针阵列中, 针 1 和针 2 接成悬浮双探针工作方式, 二者沿环向稍稍错开以避免在同一条磁力线上引起相互间的屏蔽效应(即不使二者通量管重叠), 用于测量离子饱和电流$I_{\rm sat}$, 并假设$n_e \propto I_{\rm sat}$; 针 3 和针 4 为单探针工作方式, 它们测量悬浮电位为ϕ_{f3}和ϕ_{f4}, 二者的均值$\phi_f = (\phi_{f3} + \phi_{f4})/2$ 作为针 1 和针 2 位置附近的悬浮电位值. 这些信号经光电隔离和适当放大后由 1 MHz采样率、12 bit的多道采集器进行记录. 由采样定理知, 得到的数据中的最高频率成分为$f \leqslant$ 500 kHz. 这可以满足要求, 因为实验上发现, 等离子体边界的静电湍动输运, 80%以上是由$f \leqslant$ 300 kHz的扰动分量贡献的.

Γ_e沿径向向外传播, 而且很大一部分份额是那些寿命短的(几微秒)不规则周期出现的大脉冲输运过程贡献的, 约14%的大幅值输运事件对总输运量的贡献约

52%, 或者 10%的大输运事件对总体输运的贡献略大于 49%. 这表明, 大输运事件的个数少, 但是影响大. 按照SOC理论, 大雪崩事件和小雪崩事件是同样的原因引起的, 是复杂系统的动力学演化行为的不可预测性的体现, 它们发生的概率服从幂次分布的统计规律: 大事件发生的次数少, 小事件发生的次数多. 对于托卡马克等离子体, 雪崩输运在空间尺度上可以大到小半径的水平, 在时间尺度上可以达到约束时间的长度, 这种规模的输运事件导致等离子体中的粒子和能量的大量损失(反常输运损失), 降低了对等离子体的约束性能, 使等离子体处于低约束模态(L-模态).

在 HL-1M上的等离子体参照系中, Γ_e的自功率谱在 3 个不同频率区段按 f^0, f^{-1}和f^{-4}的幂次规律分布. f^{-1}频率区段的最高频率f_2约为 35 kHz, 对应的时间尺度约为 28.5 μs. 脉冲大小Γ_e的概率密度分布$p(\Gamma_e)$具有长的尾翼, 在一个数量级以上的Γ_e范围内, $p(\Gamma_e)$按Γ_e^{-1}衰减. f^{-1}分布和Γ_e^{-1}分布与SOC特征有关, 即自相似性、无标度性. 这个特征与沙堆模型中沙粒输运的功率谱特征一致, 也与一些具有SOC行为的等离子体湍流输运模型的预言相符. 由于自功率谱$S(f)$与自相关函数构成一个Fourier变换对, 功率谱的f^{-1}特征在自相关函数上也应有所表现. HL-1M上Γ_e的自相关函数分布具有中央峰、长的衰减尾翼. 自相关函数的中央峰揭示了局域扰动的相关信息, 峰的宽度就是湍流的去相关时间的量度. 按峰值的e^{-1}计算宽度, 局域相关时间τ约为 30 μs, 它与由f^{-1}频率区段的最高频率f_2约为 35 kHz确定的去相关时间$\tau = f_2^{-1} \approx 28.5$ μs相当. 自相关函数的缓慢衰减的尾翼, 表明信号中存在长程时间相关的现象, 其时间尺度介于局域扰动的去相关时间与粒子约束时间之间. 在这个时间尺度范围内, 大大小小的输运事件都可能发生.

3　非均匀散粒体自组织临界性机制

3.1　非均匀散粒体组构特性分析

沙堆系统的组构特征包括沙堆颗粒本身的物理特性和颗粒在空间的分布堆积方式等, 这些特征宏观上可以在散粒体的材料特性方面得到体现. 因此, 非均匀度不同沙石材料的土工特性与沙堆性态的关系, 是对散粒体 SOC 研究的切入点之一.

沙石材料土工性质测试沙石级配与沙堆实验用料相同(见表 1), 中值粒径为 2.75 mm. 实验选用大型相对密度仪和大型直剪仪以测定不同非均匀度沙石的孔隙率及摩擦和咬合作用, 两种设备允许的最大粒径均达到60 mm, 大于沙堆实验用料的最大粒径, 符合足尺度原型实验的要求. 本文主要介绍相对密度的测试结果.

实验采用漏斗松填法得到最小干密度. 相对密度仪将振动力和静压力联合作用于沙石料上, 使大小颗粒相互充填和挤紧, 可得到试样的最大干密度. 对该

表 1 土工实验沙石级配

累积粒配/%	非均匀沙石/mm														
	0.4	0.7	1.2	2.3	3.0	3.7	4.5	5.1	5.8	8.5	10.8	17.4	20	30	40
Ⅱ(ϕ = 1.53)	0.49	3.11	9.29	38.82	56.00	68.32	76.67	80.55	83.73	91.89	95.81	98.99	100		
Ⅲ(ϕ = 2.15)	4.00	12.01	22.08	42.77	52.00	59.15	66.38	70.63	74.42	85.84	92.50	98.59	100		
Ⅳ(ϕ = 2.55)	7.70	19.47	29.99	42.65	53.90	59.45	65.69	69.87	73.03	80.70	86.25	96.42	100		
Ⅴ(ϕ = 2.96)	11.00	23.85	33.14	46.08	52.00	56.14	61.85	66.68	70.46	78.89	86.87	98.78	100		
Ⅵ(ϕ = 3.50)	9.00	26.92	34.37	47.57	51.00	57.10	62.92	65.38	67.88	76.69	83.91	93.96	96.00	98.50	100
Ⅶ(ϕ = 5.00)	10.00	28.02	34.26	47.73	51.00	53.62	57.77	60.32	61.92	66.79	71.01	78.54	100		

指标的测试, 可以得到不同级配沙石堆积体的颗粒构架、实验步骤为每组沙石样做 4 次平行实验, 结果分析取最小干密度、最大干密度以及加重盘下沉量数据, 经对应换算即最大孔隙率、最小孔隙率与受扰压缩量. 其中, 取沙石混合体的颗粒比重为 2.70.

结果表明, 随着沙石非均匀系数ϕ的增大, 经漏斗松填的最大孔隙率、振实后的最小孔隙率及可压实空隙量(加重盘压缩下沉量, 即对应着孔隙率的变化率)均减小, 内摩擦角的峰、残值也增大. 对比一种沙样中 4 次相对密度的实验结果, 可看出同一组均匀沙石, 每次实验的最疏松或最密实状态都几乎相同, 加重盘下沉量也差不多; 而同一组的非均匀度大的沙石, 在初始孔隙率大致相同的情况下, 最小孔隙率及孔隙率的变化率数据则相当离散(图 3 和图 4), 尤其可压实空隙量数值变化甚剧. 这表明非均匀沙堆在自然堆积过程中具有较大的随机性, 导致微结构空间分布的复杂性, 宏观上体现为密度的差异性.

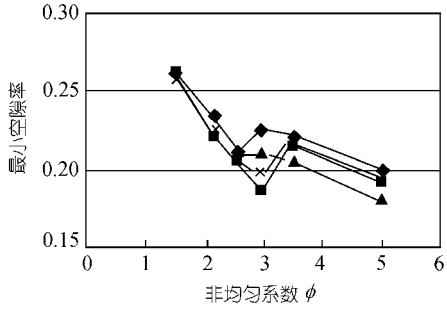

图 3 不同非均匀度沙石的最小孔隙率

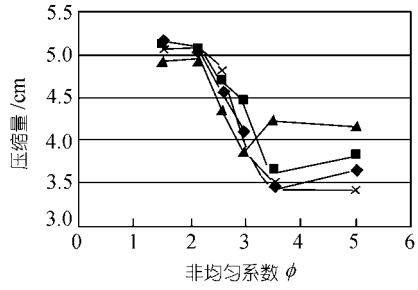

图 4 不同非均匀度沙石的压缩下沉量实验

为了定量地研究沙堆堆积体内部微结构, 我们还进行了沙堆模型堆积计算机模拟实验. 实验的技术关键是解决非均匀离散单元的接触搜索和相互作用规律的问题. 而对颗粒的几何要素描述采用球体简化的处理方法. 沙堆用 10000 颗粒子生成, 其中非均匀沙堆的颗粒级配采用表 1 中的第Ⅴ组(ϕ = 2.96), 但略去了粒径在 1.2 mm 以下的部分. 均匀沙的粒径为 5.8 mm.

实验采用以双向搜索法为基础的多组合重复计算方案, 首先按照级配曲线随机选择颗粒, 然后从顶部逐粒加沙, 沙粒下落后, 当该颗粒的重心在水平面上的投影点位于下承颗粒各接触点构成的多边形在水平面上的投影面积以内时, 判断该位置为其稳定位置,若投影点位于该面积以外时, 则令颗粒沿投影点最接近的多边形的边的垂直方向, 进一步下滑, 直至找到稳定位置为止. 用这样的方法生成三维可视的虚拟沙堆, 再通过顶点部位垂直切开一个剖面, 利用可视化技术直观地观察沙堆内部空间分布堆积结构方式. 均匀沙和非均匀沙堆的剖面分别示于图 5 和图 6, 图 7 是对非均匀沙堆在图 6 方框所示部位的放大.

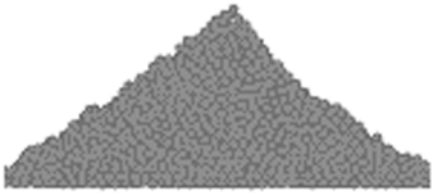

图 5　均匀沙堆剖面

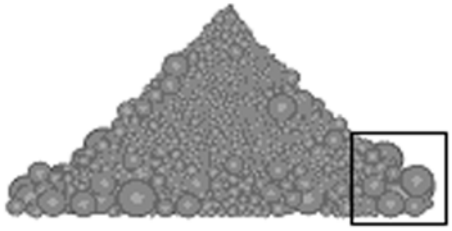

图 6　非均匀沙堆剖面

图 7　非均匀沙堆局部放大图

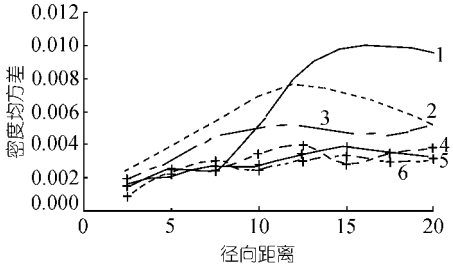

图 8　均匀与非均匀沙堆密度均方差

1. 非均匀分布 H = 30 cm, 2. 非均匀分布 H = 35 cm, 3. 非均匀分布 H = 40 cm, 4. 均匀分布 H = 30 cm, 5. 均匀分布 H = 35 cm, 6. 均匀分布 H = 40 cm.

从图 7 可看出, 由于几个大颗粒聚集, 中间又缺乏小颗粒填充,就形成明显空洞. 可见由于非均匀颗粒堆积组合的随机性, 各局部微结构差异很大. 我们对它们的密度进行统计计量后, 将两类沙堆各局部密度与其平均密度的均方差示于图 8.

密度统计的采样规则为, 在指定高度 H 切一个水平剖面, 在该剖面上以不同

径向距离为半径可定出一个个同心圆, 沿同心圆的圆周进行局部单元体密度分析, 单元体的尺度取以非均匀沙最大粒径的 2 倍为直径的球体. 这样图 8 所绘的各条曲线反映了在沙堆 H 高度上, 沿径向分布各部位密度的均方差.可以看出非均匀沙堆的 3 条曲线都明显高于均匀沙的曲线, 并且曲线的波动幅度较大. 表明非均匀沙各部位的密度差异大,从而证明了非均匀颗粒体微结构空间分布方式的多样性与复杂性.

3.2 大尺度散粒体自组织临界性机制探讨

幂率是系统发展到临界状态并维持在此状态时的行为, 因此幂率也作为SOC 的证据. 系统能够维持在临界状态还必须同时具备两种动力学特征: 其一敏感性, 系统处于临界状态, 微小的扰动引起连锁反应可能导致一场大灾难; 其二鲁棒性(robust), 在大多数情况下一颗沙粒的落下不会引起雪崩, 即使灾难性的雪崩也只包括沙堆的一小部分沙粒, 因而灾难性的雪崩也不能使沙堆的斜度显著地偏离临界坡度.

均匀沙与非均匀沙系统, 都具有组元之间是一种最近邻位置的相互作用、存在着由链式反应体现的长程相关关系等重要性质. 但实验中发现均匀沙不能维持在临界状态, 而出现到达临界坡后, 即发生大规模崩塌而严重偏离临界态的行为.

对于均匀沙沙堆模型在规模较大时不再呈现SOC的原因, 我们同意Carmen等人[7]提出的设想: 沙堆中潜在的势能可能转变成动能和粒子崩塌动力, 导致成团的沙粒被加速. 当沙堆的规模变得较大的时候, 由于上部下落沙粒的可能加速行程变长, 动能增大, 沙粒在下落的过程中以能逐步放大的干扰作用于所经过之局域, 由于惯性作用, 大规模的雪崩不可避免. 我们在实验中观察到, 均匀沙坡面较为平整, 坡面达到失稳临界角时, 各区域基本上均已达到失稳临界状态, 体系没有抗扰耗能储备. 这样在沙粒加速下滑的放大的扰动下, 坡面所有区域均超过稳定极限. 此时系统的鲁棒性消失或减弱, 敏感性占优势, 因此不具备SOC. 相应的当沙堆规模较小的时候, 粒子滑动的可能行程短, 这种加速效应不明显, 系统呈现SOC现象.

对非均匀沙堆, 其材料几何的特点决定了它是微结构空间分布差异很大的堆积体, 在坡面宏观上处于失稳临界角时, 各局域坡度并不一致, 结构的稳定程度也大不相同. 局部亚临界区的存在, 材料内摩擦角的增大, 都提高了系统的鲁棒性. 在雪崩开始时可能会有一粒沙子沿斜坡下滑,只有当这颗沙子滑到一个稳定的位置时, 它才能停止. 如果这些沙子碰到那些极为接近不稳定状态的沙粒, 就会带动这些沙粒下滑. 随着这一过程的继续, 每一个运动着的沙粒都可能停止或继续下滑. 由于非均匀沙较多局部亚临界区的存在,当使得各部分活动性消失

与活动性分叉的概率在总体上平衡, 就能够由不同规模的连锁反应维持着一种临界状态, 这样大尺度的散粒体系统也能呈现 SOC.

我们认为, SOC性质主要取决于系统组元之间的相互作用机制而非尺度. 托卡马克等离子体的密度数量级为 10^{13}个/cm^3, 按组元数而言应属巨量的系统, 但在欧姆加热或L模放电的条件下, 等离子体约束条件下降、等离子体组元之间的相互作用增强, 导致反常输运具有SOC的特征. 我们认为这与大尺度的非均匀沙系统呈现SOC具有相同的物理内涵, 是从另一角度通过更为精密可控实验手段对上述假说的验证. 对土木工程领域的散粒体而言, 组元之间的相互作用多为最近邻颗粒之间的接触作用, 可以说是SOC取决于系统的组构特征. 可进一步推 论: 若系统的组构能对干扰传播形成足够的制约, 限制其各部分敏感性递增的趋势, 从而维持整体的鲁棒性时, 大尺度的系统也能呈现自组织临界性现象.

4　自组织临界性理论在斜坡重力作用灾害研究上的应用

(ⅰ) SOC 的判据

在 SOC 理论中, 目前人们认为 SOC 是一种有限尺度效应, 而我们在实验中却发现散粒体 SOC 与粒径的非均匀性有关. 我们实验沙堆的尺寸都大于 Held 的实验, 尤其是大沙箱无水单面坡干沙实验, 一次实验用沙量达十余吨. 但实验表明 SOC 与颗粒的非均匀性有关, 分析认为 SOC 的形成条件还要求系统同时具备敏感性与鲁棒性两种动力学特征, 工程领域的散粒体系统这种性质可由系统的组构特征所确定. 据此提出了当系统颗粒组构满足同时具备两种动力学特征的条件时, 大尺度的系统也能呈现SOC现象的结论. 天然斜坡物质多由非均匀介质组成, 我们认为有相当一部分天然尺度范围的斜坡重力作用类灾害是可以用沙堆模型解释的, 并与扰动是否来自水的作用或补给物质的作用等扰动方式无关.

沙堆模型反映了一种在自组织作用下的斜坡物质能量耗散普适性过程. 根据普适性原理, 我们可以利用各式各样显示SOC的模型中具有规律性的普适性的经验, 将其用于斜坡灾害研究中, 但首先要判定研究对象是否是SOC现象. 例如由均匀沙组成的沙漠中的沙丘, 就可能受尺度效应的限制而不呈现SOC. 更容易犯的错误是, SOC一定会导致幂律, 所以有人将幂律作为SOC的证据, 但幂律并不一定都是SOC现象, 特别是在研究自然现象时要注意扰动条件的特征. 具有SOC性质的系统, 在临界状态即使是受到一系列微小的均匀的扰动, 每次扰动下表征反应规模的物理量可用幂律描述. 这里需要指出的是, 因为扰动是微小而均匀的, 才能说明这种动力学特性是自组织的结果, 而非在外部强制力下的表现. 如对泥石流研究表明, 泥石流规模与频率间存在幂律关系. 但由于泥石流规模与降雨量密切相关并一般呈正比关系. 现在已有关于沿波罗的海海岸线发生的阵雨的降雨量与发生频率遵循幂定律的报道[8]. 这就提醒了我们, 不能仅仅依据泥

石流规模与频率间的幂律关系就认定泥石流是SOC系统. 在物理学中, 概念比计算更重要, 因此在SOC判断时, 必须将定性的分析与定量的判据相结合.

(ⅱ) SOC 在灾害基础理论研究方面的应用

SOC 是一种崭新的世界观, 也是一种新的方法论. 当灾难降临时, 人们通常归因于某种罕见的环境, 或者是某些强有力的机制的综合作用. 而SOC理论认为许多复合系统自然地朝着一种临界状态进化, 在临界状态下, 由于处于敏感性, 小事件能引发任何规模的连锁反应, 包括灾难性的大事件. 这一理论的启示是小事件和大事件可能有相同的起因, 也就是说巨大的灾难性事件和不为人们所重视的小事件都遵从同样的动力学. 这不仅对某些大型斜坡灾害的触发因素提供了新的解释, 也直接为我们研究灾害提供了方法论. 如在选择实验工点或设计模型时, 我们可以选择最易操作的一种尺度, 而减少了实验对象与原形之间相似律考虑的难度.

(ⅲ) 预测预报

所有的 SOC 系统都属于弱混沌系统, 弱混沌与完全混沌的行为特征有显著区别. 完全混沌系统的特征是存在一个时间尺度, 超越这个时间尺度就不可能预测. 弱混沌系统不存在这样一个时间尺度, 因而可以进行长期预报. 但弱混沌系统存在着依照幂律增长的初始条件的不确定性. 由于这种不确定性的存在, 很难设想能开展有意义的长期预报. 规模与频率的幂次定律描述的是某种量级灾害发生的数目, 这种灾害演变规律在灾势分析、风险评估和危险度区化中或许是有用的, 但不可能据此推断灾害发生时间地点. 对于呈现 SOC 现象的灾害系统, 目前 SOC 理论还可为我们的预报研究少进入误区提供指导. 如研究灾害的周期性可能是徒劳的; 根据扰动的时间进行警报是可行的, 但根据扰动的大小推断灾害的规模并不可靠, 必须承担很大的风险等等.

(ⅳ) 灾害防治工程设计

“频率-规模”关系是防治工程设计的重要依据. 斜坡重力作用灾害的防治工程一般包括坡面防护工程与支挡工程等, 传统的设计是采用安全系数法. 对于呈现SOC现象的灾害系统, 在防治工程参数设计时, 从理论上说工程设计使用期内的最大荷载无法估计, 不宜采用安全系数法, 工程设计时应主要考虑风险性与经济性的综合平衡, 宜采用可靠性设计方法. 可靠性设计的技术关键是确定“破坏概率”, 实用中一般采取将破坏概率定义为某一基准值被超过的概率的做法, 这时频率-规模的幂律分布关系则为计算破坏概率提供了依据. 可贵的是这种分布是根据物理普适性原则得出的, 而不是用统计方法的估计. 根据 SOC 的理论, 大规模坍塌都是发生在临界状态并由链式反应所引起, 在防治工程方案规划时, 传统的削坡工程措施, 是实现使系统偏离临界状态的直接手段. 此外, 既然“链式反应”导致大规模坍塌, 那么设法切断这种“链式反应”也是值得贯彻的理念, 如

采用放平台或框架护坡等措施, 有时可能会是阻止大规模灾害现象的更经济的方案.

参　考　文　献

1 Bak P, Tang C, Wiesenfeld K. Self-organized criticality. Physical Review A, 1988, 11(1): 364~374[DOI]

2 Held G A. Experimental study of critical mass fluctuations in an evolving sandpile. Physical Review Letters, 1990, 65(9): 1120~1123[DOI]

3 Bak P, Chen K. Self-organized criticality. Scientific American, 1991, 264(1): 26~33

4 姚令侃, 方　锋. 非均匀沙自组织性及其应用研究. 水利学报, 1997, 3: 26~32

5 Yao Lingkan, Fang Duo. On the Self-organized criticality of non-uniform sands. International Journal of Sediment Research, 1998, 13(3): 19~24

6 姚令侃, 李仕雄, 蒋良潍. 自组织临界性及其在散粒体研究中的应用. 四川大学学报(工程科学版), 2003, 35(1): 8~14

7 Carmen P, Prado C, Olami Z. Inertia and break of self-organized criticality in sandpile cellular-automata models. Physical Review A, 1992, 45(2): 665~669[DOI]

8 Ole P, Hertlein C, Christensen K. A complexity view of rainfall. Physical Review Letters, 2002, 88(5): 054302[DOI]