

采空区煤柱 - 顶板系统失稳的力学分析

贺广零^{1,2}, 洪芳³, 王艳苹⁴

(1. 同济大学 土木工程学院、土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092 2. 福建建筑工程学院
土木工程系, 福建 福州 350014 3. 北京核工业第二研究设计院, 北京 100840)

摘要 :基于温克尔假设,把坚硬顶板视为弹性板(突破把坚硬顶板视为弹性梁的传统思想),把煤柱等效为连续均匀分布的支撑弹簧,从而形成煤柱 - 顶板相互作用系统。同时,将煤柱视为应变软化介质,采用近似的 Weibull 分布描述它的损伤本构模型,依据板壳理论和非线性动力学理论对采空区煤柱 - 顶板系统失稳机理进行了研究,得出了系统失稳的突变机制,并给出了系统失稳的数学判据和力学条件。最后以马脊梁矿为工程实例进行分析,结果表明理论分析值与工程实测数据吻合颇好。本文为进一步研究煤柱 - 顶板相互作用系统和制定相关规范提供了重要参考。

关键词 :煤柱 - 顶板相互作用系统;失稳;突变理论

中图分类号 :TU311.2

文献标识码 :A

The analysis of instability of coal pillar & stiff roof system

HE Guang-ling^{1,2}, HONG Fang³, WANG Yan-ping⁴

(1. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China 2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China 3. Fujian University of Technology, Fuzhou 350014, China 4. Beijing Institute of Nuclear Engineering, Beijing 100840, China)

Abstract :Based on the winkler's hypothesis, the stiff roof is assumed as an elastic plate (It is totally different with the conventional idea that the stiff roof is assumed as an elastic beam) and the coal pillars are equal to continuously and uniformly distributed support springs, then the coal pillar and stiff roof interaction system is formed. It is also assumed that the coal pillar is a strain-softening medium which can be described by the approximate Weibull's distribution. The paper presents the instability mechanism of the stiff roof and the coal pillar interaction system by using the Plate Mechanics and the Catastrophe Theory, then the catastrophe mechanism of the system instability is gotten and the mathematical and mechanical instability criterion is given. At last, taking Majiliang coal mine as an example, a good agreement exists between the theoretical and experimental results. The paper will be useful for the further research of the coal pillar and stiff roof interaction system and constitution of relevant codes.

Key words :stiff roof and coal pillar interaction system; instability; catastrophe theory

采空区煤柱 - 顶板系统失稳是世界范围内煤矿矿井中最严重的自然灾害之一。尽管国内外学者在系统失稳发生机理、监测手段及控制等的研究方面取得了重要进展,由于其本身极为复杂,到目前为止,远没有从根本上解决其有效预测和防治问题。文献[1~2]提出煤柱 - 顶板系统失稳是一种材料失稳破坏现象,但没有对失稳发生的条件进行具体

分析。文献[3~6]建立了煤柱 - 顶板系统失稳的突变模型,对系统损伤扩展耗散能量进行分析,但只是定性地解释了系统失稳的机理。文献[7]取一个煤柱及其上部顶板作为一个单元进行了非线性稳定性分析,开辟了煤柱 - 顶板系统研究的新思路,然而,它却忽略了单元与单元之间的相关性。从总体上看,大部分学者都将顶板视为弹性梁。这种近似

处理方法极大地简化了分析过程 ,但其局限性也非常明显 ,它既无法体现顶板的空间效应 ,又无法体现顶板的各向异性 ,所得结果的可靠性不能不让人质疑。基于上述研究的局限性 ,作者将顶板视为弹性板 ,将煤柱等效为连续均匀分布的弹簧 ,利用板壳理论和非线性动力学理论对采空区煤柱 – 顶板系统失稳机理进行了分析。

1 煤柱 – 顶板系统力学简化模型

在采矿工程中 ,应用柱式采煤方法 ,采空区内会留下大量的煤柱 ,这些煤柱支撑着坚硬、难冒顶板岩层。由于煤柱表面逐渐分化和脱落 ,使煤柱的有效刚度减少 ,当达到某一临界值时 ,顶板在顶板上层岩土和自身的重力作用下 ,产生大面积突然冒落 ,引发矿山灾害的发生。本研究从力学理论角度来研究煤柱 – 顶板的失稳机理 ,有助于在更深层次上认识坚硬难冒顶板大面积一次性冒落这一矿山压力现象的本质 ,以便寻求解决顶板冒落的工程控制问题。

采空区的几何区域近似地简化成为矩形区域 ,可将顶板岩体视为边界固定的弹性矩形平板。如图建立坐标系 oxy ,设弹性矩形平板长度为 $2a$ 、宽度为 $2b$ ($b \leq a$)、厚度为 h ,顶板岩体的弹性模量为 E 、泊松比为 ν 、体密度为 ρ 、抗拉强度极限为 $[\sigma_s]$ 。设上层岩土介质对顶板上表面的压力为均布载荷 q_0 。

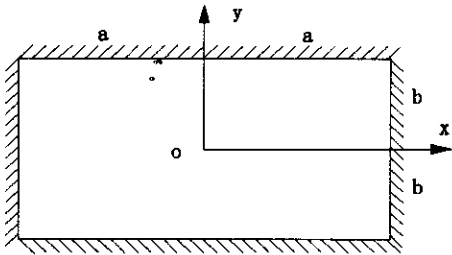


图1 顶板岩体简化为四边固支的弹性矩形平板
Fig.1 The stiff roof is simplified as an elastic rectangular plate fixed at 4 sides

将每个煤柱视为相同的受压弹性直杆 ,其初始小变形时的弹性模量为 E_1 ,平均横截面积为 A ,高度为 H 。假设煤柱是等距分布的 ,其总数目为 n 。可以将这些等距分布的弹性直杆近似地等效成连续分布的温克尔弹性基础^[8] ,记等效弹性系数为 k ,于是有 $n \frac{E_1 A}{H} = 4abk$ 。这样得到等效弹性系数。

$$k = \frac{nE_1 A}{4abH} \tag{1}$$

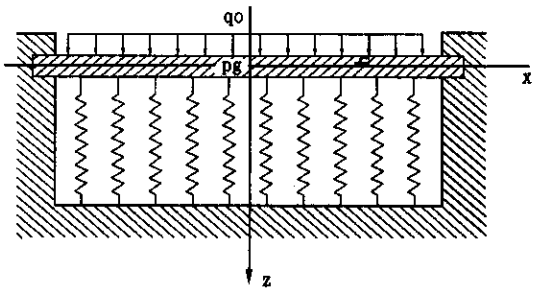


图2 煤柱-顶板系统力学简化模型
Fig.2 The simplified model of coal pillar and stiff roof system

根据弹性基础上的平板弯曲理论^[8] ,顶板下沉位移(挠度) $u(x , y)$ 满足如下基本方程

$$D \nabla^4 w + kw = q \tag{2}$$

其中 $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ 是板的抗弯刚度 , $g = 9.8 \text{ m/s}^2$

是重力加速度 , $\nabla^4 = \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4}$ 为双调和算子。作用在顶板上总的均布载荷 q 可由岩土层对顶板的均布压力载荷 q_0 与顶板的自重载荷 ρgh 叠加而成 ,既有

$$q = q_0 + \rho gh \tag{3}$$

顶板在破坏前的边界条件为固定

$$w|_{x=\pm a} = 0, w|_{y=\pm b} = 0, \frac{\partial w}{\partial x}|_{y=\pm b} = 0 \tag{4}$$

至此 ,确定顶板下沉位移 ,在数学上可被归结为求解微分方程 (2) 在边界条件 (4) 的边界值问题。

根据顶板的下沉位移(挠度)和边界约束条件情况 ,近似假设挠度具有如下解析解的形式^[8]

$$w = \frac{w_0}{a^4 b^4} (x^2 - a^2)^2 (y^2 - b^2)^2 \tag{5}$$

其中 $w_0 = u(0,0)$ 为顶板的最大下沉位移(中心挠度)。显然 ,式(5) 已自动满足边界条件 (4) ,将其代入方程 (2) 的伽辽金弱形式方程^[8]

$$\int_{-a}^a \int_{-b}^b (D \nabla^4 w + kw - q) \cdot (x^2 - a^2)^2 (y^2 - b^2)^2 dx dy = 0 \tag{6}$$

可得顶板中面的最大下沉位移(中心挠度)为

$$w_0 = \frac{441}{128} \cdot \frac{q}{2k + 9D(\frac{7}{a^4} + \frac{4}{a^2 b^2} + \frac{7}{b^4})} \tag{7}$$

2 顶板全局塌陷的非线性动力失稳分析

2.1 非线性动力失稳模型

根据前人的研究^[9,10],从边缘形成塑性铰线到内部形成塑性铰线而成为机构,这是顶板破坏的阶段。在顶板破坏阶段结束时,破裂的顶板中部区域的下陷会使其边缘沿水平向内滑移。这里考虑一种极端危险的情形,即顶板边缘则从采空区边界帮底脱落下来,从而失去边界帮底对顶板的支撑。此时,顶板的边缘成为自由边界,这是工程中最最为担心发生的情形。破裂后的顶板板块的内部变形能被全部释放,同时顶板板块的载荷和自重全由煤柱支撑。因此,可以将顶板板块当成受载荷和自重作用并受到的煤柱支撑的刚性平板。这样作为一种简化的分析,可以令抗弯刚度 $D = 0$,则方程(2)退化为

$$kw = 1 \quad (8)$$

2.2 煤柱的本构关系

在顶板破坏的初始阶段,顶板的最大下陷位移较小,故煤柱的压缩变形也较小,对煤柱可以采用线性弹性的应力-应变关系。而煤柱失稳时其压缩变形会较大,因此应该采用非线性弹性的本构关系应力-应变关系。实验表明煤柱的应力-应变关系是具有弱化性质的非线性关系。Hudson 和 Fairhurst 曾用正态分布模型描述这种弱化性质^[11];潘一山、徐曾和等曾用负指数模型^[12];秦四清、唐春安则采用 Weibull 分布模型^[13]。因 Weibull 分布模型具有广泛的适用性,这里采用它来描述煤柱的应力-应变关系,即

$$\sigma = E_1 \varepsilon \exp[-(\varepsilon/\varepsilon_0)^m] \quad (9)$$

式中 E_1 —煤柱的初始弹性模量; $\varepsilon = w/h$ —压缩应变; $\varepsilon_0 = w_0/H$ —应力-应变曲线中峰值点的应变; w —压缩位移,它与顶板下陷位移相同; w_0 —应力峰值点所对应的压缩位移; m —描述局部强度变化的曲线形状参数,称为均匀性指标。

取 $m = 1$ 时,分布为指数型的;取 $m = 5$ 时,很接近正态分布;当 $m \rightarrow \infty$ 时,强度变化趋近于零,材料性质为理想脆性的(如玻璃)。可看出 m 越大,材料的均匀性及脆性程度越大,其应变软化性质就越明显。

由(9)式可知作用在煤柱上的压力载荷 $P =$

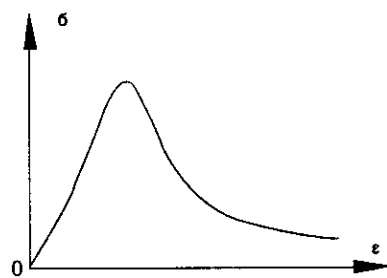


图3 煤柱的 $\sigma - \varepsilon$ 曲线

Fig. 3 The $\sigma - \varepsilon$ curve of coal pillar

σA 与压缩位移 w 之间 $P = K(w)w$, 这里 $K(w) = \frac{E_1 A}{H} \exp[-(w/w_0)^m]$ 是单个煤柱作为等效弹簧的刚度,它不是常数,而与压缩位移 w 有关。可以近似地认为每个煤柱结构和材料性质是一样的,所受到的压力也是均等的。因此,若将等距分布的煤柱近似地等效成连续分布的弹性基础,则弹性基础的等效弹性系数可以表示为

$$k = K(w) = \frac{n}{4ab} K(w) = \frac{n E_1 A}{4abH} \exp[-(w/w_0)^m] \quad (10)$$

显然,这种等效的弹性基础是不同于通常的温克尔线性弹性基础的,它具有指数型非线性性质。

采用 Weibull 分布模型(9)来描述煤柱的本构关系跟实际情况吻合颇好,当然也在数学上带来了相当的复杂性。为了既能满足实际工程的精度需要,又能在数学上有一定的简化,这里使用三次非线性软弹簧模型的 $\sigma - \varepsilon$ 曲线(见图4)来近似地拟合 Weibull 分布模型的 $\sigma - \varepsilon$ 曲线。即假设

$$\sigma = \tilde{E}_1 \varepsilon + \tilde{E}_3 \varepsilon^3 \quad (11)$$

其中 $\tilde{E}_1 > 0$ 和 $\tilde{E}_3 < 0$ 是通过曲线拟合来确定的材料参数。

不难由(9)知,当煤柱压缩应变 $\varepsilon = m^{-1/m} \varepsilon_0$ 时,压缩应力 σ 取峰值 $[\sigma_m] = E_1 \varepsilon_0 (me)^{-1/m}$ ($e = 2.71818 \dots$ 是自然对数的底,即 Euler 常数),即在峰值点的应力为 $[\sigma_m]$,应变 $\varepsilon = \frac{[\sigma_m]}{E_1} e^{1/m}$;再由

$$(11) \text{ 知: 当 } \varepsilon = \sqrt{\frac{\tilde{E}_1}{-3\tilde{E}_3}} \text{ 时 } \sigma \text{ 取峰值 } \frac{2\tilde{E}_1}{3} \sqrt{\frac{\tilde{E}_1}{-3\tilde{E}_3}} \quad (\text{见图4中的Q点}).$$

令由(9)和(11)给出的两条 $\sigma - \varepsilon$ 曲线,在峰值处的应力和应变均相同,得到

$$\tilde{E}_1 = \frac{3E_1}{2e^{1/m}}, \quad \tilde{E}_3 = -\frac{1}{2e^{3/m}} \left[\frac{E_1}{[\sigma_m]} \right]^3 \quad (12)$$

如果取 $m = 1/\ln \frac{3}{2} \cong 2.5$ 则有

$$\tilde{E}_1 = E_1 \quad \tilde{E}_3 = -\frac{4}{27} \frac{E_1^3}{[\sigma_m]^2} \quad (13)$$

这样,三次非线性软弹簧模型(11)与 Weibull 分布模型(9)的初始弹性模量相同,应力的峰值也相同,而且应力取峰值时的应变也相同。可以说,三次非线性软弹簧模型(11)是 Weibull 分布模型(9)的一个较好的等效模型。

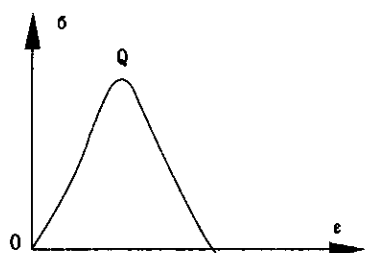


图4 煤柱的软弹簧近似 $\sigma - \varepsilon$ 曲线

Fig. 4 Soft spring approximate $\sigma - \varepsilon$ curve of coal pillar

2.3 非线性动力失稳机制

将等距分布的煤柱等效成连续分布的弹性基础,但是不再是温克尔线性弹性基础,而是由式(11)确定的三次非线性软弹簧弹性基础,其弹性基础的等效弹性系数为

$$k = k(w) = k_1 + k_3 w^2 \quad (14)$$

其中一次等效弹性系数与温克尔线性弹性基础弹性系数相同(见(1)式)。

$$k_1 = \frac{n}{4ab} \frac{E_1 A}{H} \quad (15)$$

三次等效弹性系数

$$k_3 = \frac{n}{4ab} \frac{\tilde{E}_3 A}{H^3} = -\frac{4E_1^3}{27H^2[\sigma_m]^2} k_1 < 0 \quad (16)$$

将(14) - (16)式代入(8)式得到如下三次代数方程

$$w^3 + \alpha w + \beta = 0 \quad (17)$$

其中参数

$$\alpha = k_1/k_3 = -\frac{27H^2[\sigma_m]^2}{4E_1^2} < 0 \quad (18)$$

$$\beta = -q/k_3 = \frac{27abH^3[\sigma_m]^2 q}{nE_1^3 A} > 0 \quad (19)$$

三次代数方程(17)的解依赖于两个参数 α 和 β , 即有 $w = w(\alpha, \beta)$ 其为如图5所示的流形曲面。根据突变理论^[9], 方程(17)的解与尖点突变模型有关。流形曲面在控制参数平面的投影称之为分岔点

集, 方程(17)的分岔点集的方程为

$$4\alpha^3 + 27\beta^2 = 0 \quad (20)$$

上式即为煤柱 - 顶板系统失稳的数学判据。

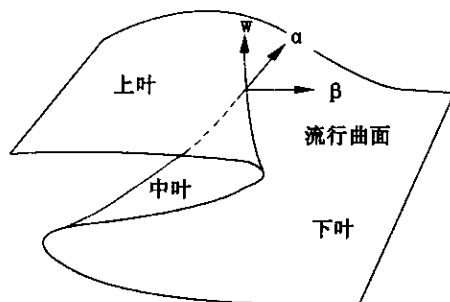


图5 流行曲面

Fig. 5 Manifold surface

将(18)和(19)代入(20)得到顶板 - 煤柱系统的失稳力学条件是

$$A \leq [A] = \frac{4abq}{n[\sigma_m]} \quad (21)$$

此条件表明当煤柱的有效横截面积 A 逐渐减小到其临界值 $[A]$ 时, 由于常参数 $\alpha < 0$, 控制参数 $\beta > 0$ 随 A 的减小而增大, 即可穿越分岔点集(见图6)。根据突变理论, 顶板的塌陷位移(煤柱的压缩位移) w 将产生突跳, 顶板产生极限点失稳, 煤柱 - 顶板系统完全塌陷。

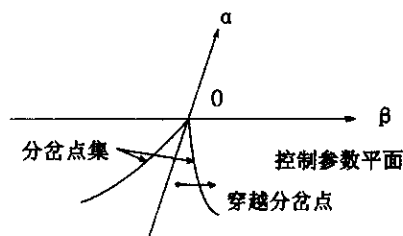


图6 控制参数平面上的分岔点集

Fig. 6 Bifurcation point set in the control parameter plane

3 顶板失稳的工程实例计算

以马脊梁矿为工程实例进行分析。根据该矿的岩层和煤层工程地质及采空区的实际情况^[15], 已知地表下的岩土层厚为 $h_0 = 23.43\text{m}$, 其容重为 $\rho_0 = 1800\text{kg/m}^3$ 。坚硬顶板的厚度 $h = 45.56\text{m}$, 容重 $\rho = 2430\text{kg/m}^3$, 取重力加速度 $g = 9.8\text{m/s}^2$ 。近似地将采空区视为矩形区域, 则坚硬顶板其长度为 $2a = 620\text{m}$, 宽度为 $2b = 500\text{m}$ 。顶板岩石为粗沙岩, 其弹性模量在 $17.3\text{GPa} \sim 45.4\text{GPa}$, 泊松比在 0.12 到 $0.$

36 之间。因顶板岩石非常坚硬,其弹性模量应取上限值 $E = 45.4 \text{ GPa}$,泊松比取平均值 $\nu = 0.24$ 。顶板岩石抗拉强度极限 $[\sigma_s] = 10.3 \text{ MPa}$ 。在煤柱未分化的初始阶段,煤柱群系的总横截面积占采空区面积的比率为 $\eta = 19.4\%$ 。煤柱的高度 $H = 6.32 \text{ m}$,其弹性模量 $E_1 = 1.29 \text{ GPa}$,峰值抗压强度 $[\sigma_m] = 19.9 \text{ MPa}$ 。

作用在顶板上总的均布载荷

$$q = q_0 + \rho gh = 1800 \times 9.8 \times 23.42 + 2430 \times 9.8 \times 45.56 = 1.5 \text{ MPa} \quad (22)$$

其中岩土层对顶板的载荷 $q_0 = \rho_0 gh_0 = 0.4 \text{ MPa}$,它约占总载荷的 27.6%。

顶板的抗弯刚度

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} = \frac{45.4 \times 10^9 \times 45.56^3}{12 \times (1-0.24^2)} = 379.66 \times 10^{12} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \quad (23)$$

煤柱群系的总横截面积 $S = nA = \eta \cdot 4ab$,由公式(1)可算出与煤柱群系相等效的温克尔弹性基础的弹性系数

$$k = \frac{nA}{4ab} \frac{E_1}{H} = \frac{S}{4ab} \frac{E_1}{H} = \eta \frac{E_1}{H} = 19.4\% \times \frac{1.29 \times 10^9}{6.32} = 39.6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{-1} \quad (24)$$

可由公式(7)得到顶板的最大下沉位移(中心点挠度) w_0 与煤柱面积比率 η 之间的关系式为

$$w_0(\eta) = \frac{441}{128} \cdot \frac{q}{2\eta \frac{E_1}{H} + 9D \left(\frac{7}{a^4} + \frac{4}{a^2 b^2} + \frac{7}{b^4} \right)} = \frac{1}{79.08 \cdot \eta + 2.12} \text{ m} \quad (25)$$

在煤柱未分化和脱落的初始阶段时有 $\eta = 19.4\%$,由上式得

$$w_0 = 0.057 \text{ m} \quad (26)$$

即顶板的最大下沉位移约为 6cm,由此可知初始阶段顶板的下沉量相对于顶板厚度来说是很小的,为顶板厚度的 0.13%,这与工程实测结果是非常接近的^[15]。

再由解析解(5)可给出顶板的下沉位移曲面(如图7所示)。图7中 x 和 y 坐标以及垂直坐标的单位为 m。

顶板最大下沉量 w_0 随煤柱面积比率 η 的变化已由(25)给出,绘成曲线如图8所示(纵坐标为顶板最大下沉量 w_0 ,其单位为 m)。由此图可见,当煤柱表面的分化和脱落而使煤柱有效面积逐渐减小时,即当 η 减小时,将会导致顶板最大下沉量 w_0 快速地增大。如果煤柱群系的总横截面积 S 减小 20%,则顶

板最大下沉量 w_0 将比原来增大大约 20%;如果 S 减小 30%,则 w_0 将增大大约 36%;如果 S 减小 50%,则 w_0 将增大 78%。

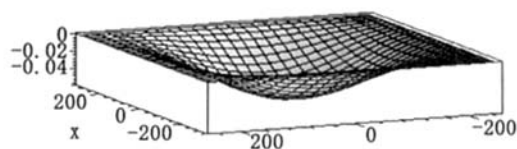


图7 煤柱未分化的初始阶段顶板下沉位移曲面
Fig.7 The stiff roof displacement surface in initial period of coal pillar

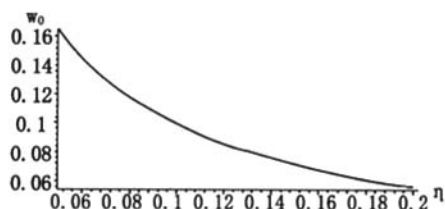


图8 顶板最大下沉量 w_0 随煤柱面积比率 η 的变化曲线
Fig.8 The largest displacement of stiff roof w_0 vary with the coal pillar surface ratio

工程中最为担心发生的极端危险情形是顶板边缘从帮底滑脱而失去支撑,成为自由边界的情形。在此情形下,由失稳条件(21)可知当煤柱面积比率

$$\eta \leq [\eta]_{cr} = \frac{1}{[\sigma_s]} = \frac{1.5}{19.9} = 7.5\% \quad (27)$$

则顶板-煤柱发生突然失稳坍塌。

4 结论

1) 本文突破将坚硬顶板视为弹性梁的传统思想,把坚硬顶板视为弹性板,将煤柱等效为连续均匀分布的软化弹簧(用 Weibull 分布描述)。

2) 影响系统失稳的主要因素有顶板和上覆土层的重力荷载、单位面积煤柱的数量和煤柱的峰值应力。这为进一步研究煤柱-顶板相互作用系统和制定相关规范提供了重要参考。

参考文献:

- [1] 章梦涛. 冲击地压失稳理论及数值计算[J]. 岩石力学与工程学报, 1987, 6(3): 197-204.
- [2] 章梦涛, 徐曾和, 潘一山. 冲击地压和突出的统一失稳理论[J]. 煤炭学报, 1991, 16(4): 48-53.
- [3] 潘岳. 矿井断层冲击地压的折迭突变模型. 岩石力学与工程学报[J]. 2001, 20(1): 43-48.

(下转第 31 页)

游离氧化铁含量的增加,孔隙丰度值并没有一定规律性。

结构单元体定向性分析。从图 5 可以看到各试样孔隙的定向频率在大部分角度区间内都有分布,孔隙的定向性并不十分明显,且各试样孔隙分布定向性没有明显规律。

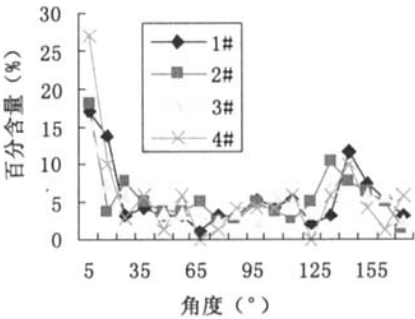


图5 空隙定向频率分布图

Fig.5 Directional distribution of pores

4 结论

- 1) 游离氧化铁含量影响着试样的微观结构特征。从 SEM 照片上可以看到,游离氧化铁含量的增加,试样中的铁膜逐渐增多,使得红土结构趋于致密,土中的较大孔隙逐渐减少。
- 2) 随游离氧化铁含量的增加,各试样微观结构单元体等效粒径相对变大,粒径较小区间含量分布减少,团聚度增加。产生这种现象的主要原因是由于游离氧化铁的胶结作用使得土体中出现了一定“假粉”、“砂性”现象。
- 3) 随游离氧化铁含量的增加,试样中微小孔隙增多,大孔隙相对减少,土体结构趋于紧密。
- 4) 无论是结构单元体还是孔隙,丰度值都基

本位于0.2-0.4和0.4-0.6区间内,其形态都趋于扁圆或等轴。

5) 随游离氧化铁含量的增加,结构单元体和孔隙的定向性规律并不十分明显。

参考文献:

[1] 王毓华. 中国红土及红粘土分布特征[A]. 中国工程地质新进展论文集[C]. 成都:成都科技大学出版社, 1989. 199-204.

[2] 罗鸿禧,周芳琴,张文敏. 红土的某些微观特性[A]. 第二届全国红土工程地质研讨会论文集[C]. 贵州:贵州科技出版社, 1991. 60-66.

[3] 王清,陈剑平,蒋慧忠. 先期固结压力理论的新认识[J]. 长春地质学院学报, 1996, 26(1): 59-63.

[4] 胡瑞林,王思敬,李向全. 21世纪工程地质学生长点:土体微结构力学[J]. 水文地质工程地质, 1999(4): 5-8.

[5] 施斌,姜鸿涛. 粘性土的微观结构分析技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 864-870.

[6] 雷华阳,肖树芳. 天津地区海积软土微观结构与工程性质初探[J]. 地质与勘探, 2002, 38(6): 39-43.

[7] 谢定义,齐吉琳. 土结构性及其定量化参数研究的新途径[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 651-656.

[8] 李向全,胡瑞林,张莉. 软土固结过程中的微观结构变化特征[J]. 地学前缘, 2003, 7(1): 142-152.

[9] 刘莹. 吹填土固化后强度的形成及影响因素[D]. 吉林大学博士学位论文, 长春: 2000.

[10] 程昌炳,康哲良,徐昌伟. 针铁矿与高岭“胶结本质”的微观研究初探[J]. 岩土力学, 1992, 13(2-3): 122-127.

[11] 王清,陈慧娥,蔡可易. 水泥土微观结构特征的定量评价[J]. 岩土力学, 2003, 24(1): 12-16.

(责任编辑 刘存英)

(上接第 16 页)

[4] 谭云亮. 矿山岩层运动非线性动力学特征研究[D]. 沈阳:东北大学, 1996.

[5] 尹光志. 岩石微裂纹演化的分岔混沌与自组织特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 635-639.

[6] 潘一山,章梦涛. 用突变理论分析冲击矿压发生的物理过程[J]. 阜新矿业学院学报, 1992, 11(1): 12-18.

[7] 秦四清,王思敬. 煤柱-顶板系统协同作用的脆性失稳与非线性演化机制[J]. 工程地质学报, 2005, 13(4): 437-446.

[8] 徐芝伦. 弹性力学(下册)[M]. 北京:高等教育出版社, 1992.

[9] 钱鸣高,石平五. 矿山压力与岩层控制[M]. 北京:中国矿业大学出版社, 2003.

[10] 派克[美]. 钢筋混凝土板[M]. 上海:同济大学出版社, 1992.

[11] HUDSON J A, FAIRHURST C. Tensile strength, Weibull

theory and a general statistical approach to rock failure [A]. The Proceedings of the Southampton 1969 Civil Engineering Materials Conference (Part 2)[C], 1969, 901-904.

[12] 徐曾和,徐小荷,唐春安. 坚硬顶板下煤柱岩爆的尖点突变理论分析[J]. 煤炭学报, 1995, 20(5): 485-491.

[13] QIN SIQING, WANG SIJING, LONG HUI, et al. A new approach to estimating geo-stresses from laboratory Kaiser effect measurement[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 1999, 36: 1073-1077.

[14] 仪垂祥. 非线性科学及其在地学中的应用[M]. 北京:气象出版社, 1995.

[15] 宋永津. 控制煤层坚硬难冒顶板技术[M]. 北京:煤炭工业出版社, 2001.

(责任编辑 刘存英)