

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.0207

相对湿度作用下的石膏矿护顶层 突变破坏机制分析

夏开宗^{1,2}, 陈从新¹, 宋许根^{1,2}, 刘秀敏¹, 周意超^{1,2}

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘 要: 依据室内试验所得的石膏岩的基本力学性质随着大气中相对湿度变化的规律, 并结合石膏矿采空区的破坏特征, 将护顶层简化为铅直方向受均布荷载 q 作用的三铰拱分析模型, 建立了相对湿度作用下的石膏矿采空区护顶层的尖点突变模型, 研究了相对湿度作用下护顶层突发破坏的失稳机制。试验结果表明: 石膏岩的力学性质在采空区中环境湿度的作用下, 其强度和变形参数会大大降低。分析和工程计算结果表明: 随着采空区中环境湿度的增加, 支撑体系越不稳定, 越容易跨越分叉集而发生突发失稳破坏; 相空间的控制参数 a 随着采空区中环境湿度的增加, 其代数值是逐渐增大的 (绝对值减小, 由负值向 0 变化), 而控制参数 b 逐渐增大, 系统突发失稳控制参数 (a, b) 的变化路径为向东北方向变化, 该路径是系统较容易发生突发失稳的路径。

关 键 词: 石膏矿; 护顶层; 尖点突变模型; 相对湿度; 控制参数

中图分类号: TD 313

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018)02-0589-09

Analysis of catastrophic failure mechanism of roof bed in gypsum mines induced by relative humidity

XIA Kai-zong^{1,2}, CHEN Cong-xin¹, SONG Xu-gen^{1,2}, LIU Xiu-min¹, ZHOU Yi-chao^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Mechanical parameters of gypsum rock are influenced by the relative humidity in the mine atmosphere. Based on failure characteristics of the roof bed in gypsum mines, we proposed a simplified three-hinged arch analysis model under the uniform load q . Then a cusp catastrophe model was established to investigate instability mechanisms of the roof bed system influenced by the relative humidity. Experimental results show that mechanical parameters of gypsum rock are greatly reduced due to the influence of relative humidity. Analysis and calculation results show that the increase of the relative humidity around the roof bed leads to the instability of support system and the appearance bifurcation set. Therefore, it is more likely that the roof bed undergoes a catastrophic event. The algebraic value of control parameter (a) of the three-dimensional space gradually increases with the increase of relative humidity in the mine atmosphere (i.e., absolute value decreases and changes from negative to zero), and the control parameter (b) gradually increases as well. The path of the control parameter (a, b) of system instability shows the northeast direction, which is the probable path for the system to lose stability.

Keywords: gypsum mine; roof bed; a cusp catastrophe model; relative humidity; control parameter

1 引 言

石膏矿顶底板岩石一般为泥岩等软质岩石, 发育节理、裂隙, 除极少数以纤维石膏为主的矿山采用壁式充填法和房柱式充填法开采外, 绝大多数矿

山采用房柱法开采^[1-7]。在开采过程中, 为了增加顶板的稳固性, 在采空区上部留设一定厚度的石膏护顶层, 由石膏岩组成的护顶层和矿柱共同构成了采空区支撑系统^[8]。近年来, 随着开采深度的加深, 积累了大量未经处理的采空区, 采空区的稳定性越

收稿日期: 2017-02-13

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51274188)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51274188).

第一作者简介: 夏开宗, 男, 1988 年生, 博士研究生, 主要从事边坡稳定性、地下采矿稳定性等方面的研究工作。E-mail: xiakaizhong1988@sina.com

演愈烈,其冒顶、塌陷事故频频发生,已成为我国非金属矿山之首^[1]。造成人员伤亡、道路损毁、房屋倒塌、耕地损失、地下水流失,产生了严重的经济、社会及环境后果。这些事故发生的关键原因之一是,采空区形成后,石膏矿岩由于吸收大气中的水分子而软化,大大降低了石膏矿岩柱-护顶层支撑体系的力学性能^[9],国内外学者在相对湿度对石膏岩的力学行为影响方面开展了一定的研究:Auvray等^[2]在研究法国利夫里-加尔冈的石膏岩老化机制时,发现其物理力学参数随时间变化是由于大气中的水分子造成的;Auvray等^[3]通过室内试验发现大气中的相对湿度强烈地影响侏罗山脉地区的石膏岩力学性质;Yilmaz^[10]指出,对于土耳其中东部瑟瓦斯省盆地的石膏岩来说,当其含水率从干燥状态变为饱和状态时,石膏岩单轴抗压强度和弹性模量分别变化了64.07%和53.05%。Deng等^[11]发现,当太行山隧道的石膏角砾岩的含水状态从4%变化到12%,其弹性模量的损失达到了99%。因此,为了降低事故率,在石膏矿采空区稳定性分析中必须考虑大气中的相对湿度的变化对石膏岩力学性质的影响。

许多学者提到,石膏矿采空区矿柱-护顶层支撑体系的变形破坏是一个复杂的非线性不可逆演化过程,在应力及环境的作用下,矿柱-护顶层结构体系的变形由缓慢稳定的连续变形阶段逐渐发展到状态突然变化的失稳破坏阶段^[1, 12]。而1972年由Thom建立起来的突变理论,其建立的思想均强调系统的非线性、不可逆性及动态的过程^[8, 13-20],并且国内外众多学者在采用突变理论研究煤矿和金属矿采空区稳定性方面^[21-25],取得了诸多有益的成果。这些成果应用于工程具有良好的效果,说明采用突变理论来分析采空区突发失稳是有效的。

考虑到组成矿柱和护顶层的石膏岩遇水极易软化,是造成石膏矿采空区塌陷的关键因素之一,所以在石膏矿采空区的突变分析中必须考虑水软化效应对石膏岩力学参数的影响。但现有的突变理论在研究煤矿和金属矿采空区的突发破坏机制中都鲜有考虑水对其结构影响,更不用说在石膏矿采空区的方面,所以使得水软化作用下石膏矿-护顶层支撑体系的突发破坏机制仍然很不清楚。为此,本文根据石膏矿采空区的破坏特征,引入室内试验所得的石膏岩基本力学性质随着大气中相对湿度的变化规律,建立了相对湿度作用下石膏矿采空区突发破坏的尖点突变模型,研究了相对湿度作用下系统突发破坏的失稳机制。所得成果能为石膏矿采空区的稳定性调控提供基本依据。

2 石膏岩的基本力学特性

当石膏岩从地下开采出来后,留下的作为保护采空区稳定性的石膏矿柱及护顶层将长时间暴露于空气中,与水分子的作用显著,其物理力学性质将会发生一系列的变化^[2]。所以,为了获取石膏岩的应力-应变关系和其力学性质随采空区中的相对湿度的变化关系,选取了采空区中的相对湿度指标为环境控制因素,进行了石膏岩在一定相对湿度环境下(天然状态,相对湿度为70%、85%和100%状态)的单轴压缩试验,以及石膏岩在天然和饱和状态下的三轴压缩试验,其成果如图1、2和表1~3所示,

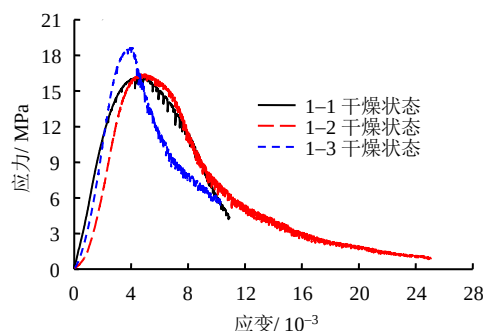


图1 天然状态下的石膏岩单轴压缩应力-应变曲线
Fig.1 Stress-strain curves of natural gypsum rock specimens under uniaxial compression

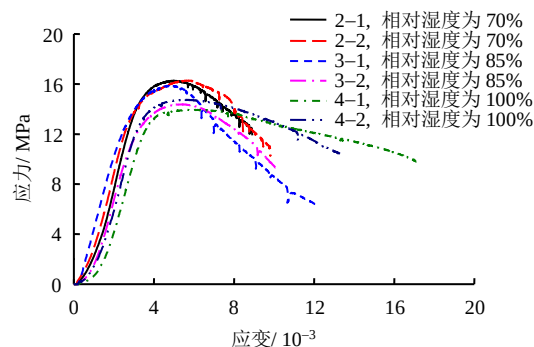


图2 相对湿度为70%、85%和100%状态下的石膏岩单轴压缩应力-应变曲线
Fig.2 Uniaxial compressive stress-strain curves of gypsum rock specimens with relative humidities of 70%, 85% and 100%

表1 不同相对湿度状态下的石膏岩力学参数
Table 1 Mechanical parameters of gypsum rock specimens with different relative humidities

相对湿度状态	抗压强度 σ_m	弹性模量 E
/ %	/ MPa	/ GPa
天然	17.14	6.59
75	16.27	6.26
85	15.12	6.00
100	14.35	5.75

表2 天然试件三轴压缩试验力学参数^[9]
Table 2 Mechanical parameters of natural specimens under triaxial compression tests^[9]

试样 编号	σ_3 / MPa	$\sigma_1 - \sigma_3$ / MPa	σ_c / MPa	c / MPa	φ / (°)	E / GPa
6-1	2.5	23.24	25.76	5.40	29.01	8.61
6-2	5.0	27.94	32.96	5.40	29.01	8.76
5-2	7.5	35.93	43.48	5.40	29.01	10.10
6-5	10.0	34.42	44.44	5.40	29.01	13.34

注: σ_1 为轴向峰值应力; σ_3 为围压; σ_c 为抗压强度; c 为黏聚力; φ 为内摩擦角; E 为弹性模量。

表3 饱和硫酸钙溶液饱和试件三轴压缩试验力学参数^[9]
Table 3 Mechanical parameters of specimens saturated by the solution of calcium sulphate dihydrate under triaxial compression tests^[9]

试样 编号	σ_3 / MPa	$\sigma_1 - \sigma_3$ / MPa	σ_c / MPa	c / MPa	φ / (°)	E / GPa
16-2	2.5	20.50	22.99	4.30	28.66	5.82
16-3	5.0	25.58	30.62	4.30	28.66	5.46
16-4	7.5	28.30	35.82	4.30	28.66	3.68
16-5	10.0	31.61	41.64	4.30	28.66	5.08

其中, 单轴压缩试样放入恒湿环境的时间为 75 d (2.5 个月), 而三轴压缩试样的饱和溶液采用的是硫酸钙溶液, 岩样均来自于中国荆门市石膏矿。

从表 1~3 可以看出, 依托工程的石膏岩力学性质在空气中的水分子作用下, 相对初始状态有较明显的软化特性, 其强度和变形参数会大大降低: 当大气中的相对湿度从天然状态变为相对湿度 100% 状态时, 石膏岩的弹性模量和单轴抗压强度减少达到了 12.7% 和 16.3%, 究其原因是石膏岩遇水溶解和重结晶作用, 使其矿物流失, 变得疏松多孔, 力学性质发生软化^[9]。将这种水对岩石介质的化学作用可导致介质强度部分丧失, 称之为水致弱化。对于不同介质, 水致弱化函数的具体形式可根据试验数据拟合得出。如龙辉等^[26]根据 Vutukuri 等于 1974 年研究所得的石英质页岩强度随相对湿度变化的试验曲线进行类比, 引入一个假设的单调下降的水致弱化函数来反映水对介质强度的影响。Deng 等^[11]通过对石膏角砾岩的试验拟合曲线发现其弹性模量的水致弱化函数 $g(w)$ 为负指数分布。Yilmaz 等^[27]通过对 250 多个石膏岩岩样的试验数据分析, 认为其单轴抗压强度和弹性模量的水致弱化函数可以表现为自然对数形式。由于本文石膏岩的试验数据不足够多, 因此, 获取不同相对湿度作用下石膏岩强度和变形的弱化函数具体形式不具有一般的代表意义, 但从已经开展的室内试验可以看出 (如图 3 所示), 石

膏岩的单轴抗压强度和弹性模量的水致弱化函数是一个单调下降的函数, 在这里分别记为 $g_{\text{ucs}}(w)$ 、 $g_{\text{em}}(w)$ 。图 3 中含水状态 1、2、3、4 分别为天然状态、相对湿度为 75%、85%、100% 的状态。

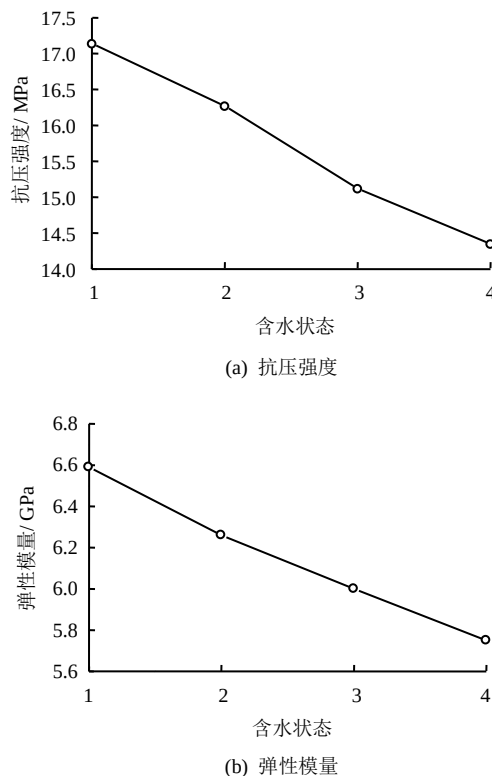


图3 不同相对湿度下的抗压强度和弹性模量
Fig.3 Unconfined compressive strength and elastic modulus under different relative humidities

3 石膏矿采空区的分布及破坏特征

根据对大量石膏采空区分布及其特性进行了现场实际勘查, 得到其采空区分布情况如图 4 所示。图中, 矿柱尺寸为 $R \times S$, R 为矿柱沿垂直进路方向宽度, S 为矿柱沿进路方向长度; 矿柱间距为 $L \times T$, L 为沿垂直于进路方向的宽度, T 为沿进路方向长度。

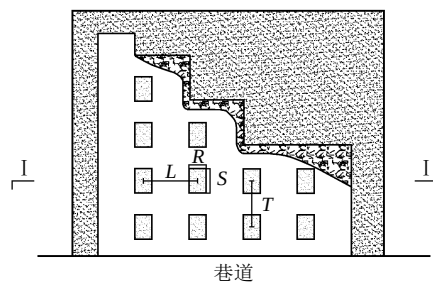


图4 石膏矿采空区调查参数示意图
Fig.4 Investigation parameters of mined-out area in gypsum mine

廖文景^[28]根据对中国的河北、湖南、山东、广西等省几十家石膏矿实地踏勘调查及几起重大事故案例分析,认为石膏矿采空区的形式及原因主要为以下两个方面:①矿柱失稳,导致顶板大面积坍塌,甚至造成地表塌陷;②矿柱稳定,护顶层破坏。在护顶层破坏方式中,当矿柱与采空区面积比较低时,由于采空区护顶层中部弯矩较大,且石膏岩的抗拉强度一般比较小,室内试验揭示^[29]:石膏岩的室内单轴抗拉强度约为 2 MPa,而抗压强度约为 17 MPa(见表 1)。所以,在护顶层下方 E 处首先出现裂纹(如图 5 所示),该裂纹因爆破振动、风化等影响会逐渐贯穿护顶层,断裂后的护顶层下沉,绕图中 H 点旋转,左、右矿柱护顶层上方的弯矩增大,该处岩层也逐渐贯穿护顶层,这与肖国喜^[30]通过模型试验所得的石膏岩顶板的破坏过程是一致的。之后,由于护顶层 1、2 的对角线 HK 要比直角边 HE 长出许多,使得回转过程中护顶层 1、2 与矿柱上方的岩层互相挤压, H 、 K 处的石膏岩在应力集中等因素作用下逐渐破碎,接触面积逐渐增大。

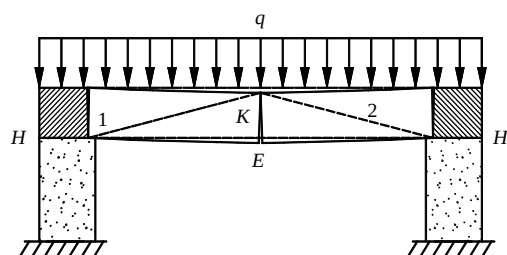


图 5 顶板冒落模型
Fig.5 Model of roof bed caving

4 护顶层简化的力学模型

肖国喜^[30]通过室内模型试验表明:石膏矿采空区的顶板首先是局部发生冒落,并且随着加载力的逐渐增加,顶板破坏快速扩展,发生了类似多米诺效应的破坏,从而最终造成石膏矿采空区大面积冒落的事实。所以,对于小规模大面积冒落以及考虑到大规模大面积冒落总是从某一部分护顶层开始,可以从局部出发来研究这一问题。前苏联科学技术博士利别尔马恩和鲁佩涅持在普氏破裂拱理论基础上,根据力的独立作用原理,考虑采空区上部岩体自重及其他荷载重量作用应力对岩石的影响,并且在理论分析计算中假定^[31-32]:①采空区长度大大超过其宽度;②并且空区的数量无限多,不计边界跨度的影响。

在此假设的基础上,将处理起来非常复杂的采空区三维问题转化为理想的弹性平面问题。在这里

笔者也按此种弹性平面问题来处理石膏矿采空区护顶层的冒落问题,取图 4 所示的 I-I 剖面中含有两个矿柱的单元进行研究。根据如图 5 所示的石膏矿护顶层的破坏特征,潘岳^[33]、王志强^[34]、刘夏临^[35]等将其简化为铅直方向受均布荷载 q 作用的三铰拱,如图 6 所示。

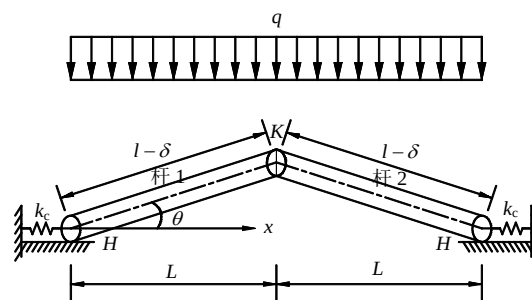


图 6 护顶层的三铰拱的分析模型^[33-35]
Fig.6 Analysis model of roof bed caving^[33-35]

图中,三铰拱端部水平方向受刚度为 k_c 的弹簧支承,此弹性支承反映护顶层对角线比直角边长出相当长度,使得在回转过程中护顶层 1、2 相互挤压而造成其端部受水平应力的作用; θ 为护顶层回转下沉过程中对角线 HK 与 x 轴的夹角; L 、 l 分别为护顶层的原始板底和对角线尺寸,断裂后的护顶层弯曲变形予以略去,在 q 的作用下,护顶层 1、2 发生的主要变形是 H 、 K 处的破坏和 HK 方向的压缩变形,以及在 H 处的水平位移;护顶层冒落前 θ 很小,假设沿 HK 方向受均匀压缩,压缩等效刚度记为 EA , A 为拱杆 1 和拱杆 2 的等效横截面积,并假设护顶层 H 、 K 处沿对角线 HK 方向的累计破碎尺寸为 δ 。

5 护顶层突发破坏机制

5.1 突变理论

突变理论是用来研究不连续现象的,特别适用于描述作用力或动力的渐变导致状态突变的现象。系统所处的状态可以用一组参数描述^[21],也即系统的稳定状态随着参数的变化而变化,当系统从不稳定状态进入稳定状态时,认为系统就会发生突变。

按照 Thom 突变理论的分类定理:控制因子(参量)的个数不大于 4 时,有 7 种类型的初等突变,分别是尖点、折叠、蝴蝶、燕尾、双曲点、抛物脐点和椭圆脐点。在这些突变模型中,由于尖点突变模型是 3 级图像,由二维控制变量和一维状态变量组成,是一种最简单、最实用的模型,因此,大多数学者将问题归结为尖点突变模型去处理。如:夏

开宗等^[36]通过综合考虑地下水的影响，建立了顺层岩质边坡的尖点突变模型；Qin 等^[20]建立了狭窄煤柱-顶板脆性失稳的尖点突变模型；祝云华等^[37]针对破碎状态的深埋隧道围岩突变失稳过程，建立了围岩尖点突变模型。

5.2 尖点突变模型的建立

众所周知，要建立护顶层的尖点突变模型，就必须知道系统的总势能，根据对图 6 所示的护顶层分析模型，系统的总势能由弹簧与拱杆的压缩应变能 U_{el} 、 U_{ec} 及外力功 W 组成^[33-35]，即

$$\Pi = U_{el} + U_{ec} - W \quad (1)$$

设三铰拱等效刚度记为 EA ，则三铰杆拱杆轴力为

$$N = \left(\frac{EA}{l} \right) \Delta l = k_l \Delta l \quad (2)$$

式中： k_l 为拱杆的线刚度， $k_l = EA/l$ ； Δl 为杆的纯压缩量。

引入相对湿度对护顶层弹性模量 E 的水致弱化函数 $g_{em}(w)$ ，于是拱杆的线刚度可得

$$k_l = \frac{g_{em}(w)EA}{l} \quad (3)$$

这样拱杆的压缩应变能为

$$U_{el} = 2 \times \frac{1}{2} \times \frac{g_{em}(w)EA}{l} (\Delta l)^2 \quad (4)$$

而实际上支承弹簧的刚度也受采空区中的环境湿度的影响，其水质弱化函数应该与护顶层弹性模量 E 的水致弱化函数 $g_{em}(w)$ 相等。所以，支承弹簧的柔度 $\lambda_c = 1/(g_{em}k_c)$ ，拱杆的水平分力，也即弹簧 k_c 所受的轴力为

$$N_x = \frac{g_{em}(w)EA}{l} \Delta l \cos \theta \quad (5)$$

由此可得支承弹簧的压缩应变能为

$$U_{ec} = 2 \times \frac{1}{2} \lambda_c \left(\frac{g_{em}(w)EA}{l} \Delta l \cos \theta \right)^2 \quad (6)$$

需要特别指出的是，杆的纯弹性压缩量 Δl 应为

$$\Delta l = l - \left(L \sec \theta + \lambda_c \frac{g_{em}(w)EA}{l} \Delta l \right) - \delta \quad (7)$$

式 (1) 中 W 为三铰拱位置从 θ_0 （拱杆初始水平倾角）变化到 θ 时荷载 q 所做的功，护顶层下沉过程重力 q 略有减小，但基本不变，故外力功 W 可写成

$$W = 2 \int_0^L q dx (x \tan \theta_0 - x \tan \theta) \quad (8)$$

将式 (4)、(6)、(8) 代入式 (1)，并按 θ 展开。据突变理论中的确定性原则，势函数为 4（即 θ 的展开式中 θ^4 项的系数不为 0）所确定的。它对应着突变理论中的尖点突变模型。故在 Π 中略去 4 次项以上的常量、高阶项及高阶小量，并令

$$x = \eta^{\frac{1}{4}} \theta + \beta \eta^{-\frac{3}{4}} \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} \eta &= \frac{g_{em}(w)EAL^2}{l(1 + \lambda_c g_{em}(w)EA/l)} = \frac{g_{em}(w)EAL^2}{l[1 + EA/(k_c l)]} \\ \beta &= \frac{qL^2}{3} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

最后推导所得

$$\Pi = \frac{x^4}{4} + \left\{ \frac{g_{em}(w)EAL^2}{l[1 + EA/(k_c l)]} \right\}^{\frac{1}{2}} \left(1 + \frac{\delta}{L} - \sec \theta_0 \right) x^2 + qL^2 \left\{ \frac{g_{em}(w)EAL^2}{l[1 + EA/(k_c l)]} \right\}^{\frac{1}{4}} x \quad (11)$$

若令

$$\left. \begin{aligned} a &= 2 \left\{ \frac{g_{em}(w)EAL^2}{l[1 + EA/(k_c l)]} \right\}^{\frac{1}{2}} \left(1 + \frac{\delta}{L} - \sec \theta_0 \right) = 2 \left(1 + \frac{\delta}{L} - \sec \theta_0 \right) \eta^{\frac{1}{2}} \\ b &= qL^2 \left\{ \frac{g_{em}(w)EAL^2}{l[1 + EA/(k_c l)]} \right\}^{\frac{1}{4}} = \frac{qL^2}{\eta^{\frac{1}{4}}} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

可将式 (11) 写成尖点突变的标准形式

$$\Pi_{ab(x)} = \frac{x^4}{4} + \frac{ax^2}{2} + bx \quad (13)$$

式中： x 为状态变量； a 和 b 为控制参数。

相空间的三维空间由状态变量 x 及控制参数 a 和 b 构成，其平衡曲面 M 方程可通过对势函数 $\Pi_{ab(x)}$ 求导得到

$$\frac{d\Pi_{ab(x)}}{dx} = x^3 + ax + b = 0 \quad (14)$$

可以看出，尖点突变的平衡曲面 M 依赖于两个参数 a 和 b ，即有 $x = x(a, b)$ ，其为图 7 所示的流形曲面。从 B 点出发，随着控制变量的连续变化，系统所处的状态沿路径 $B-B'$ 演化到 B' ，状态变量连续变化，不发生突变^[15]；而从 A 点出发沿路径

$A-A'$ 演化, 当接近回折面边缘时, 只要控制参数有微小的变化, 系统所处的状态就会发生突变, 从曲面的顶叶跃迁到底叶。把这些回折点在控制平面上的投影定义为分叉集(如图 7 所示)。根据 Thom^[13] 的研究, 分叉集方程可以表示为

$$D = 4a^3 + 27b^2 = 0 \quad (15)$$

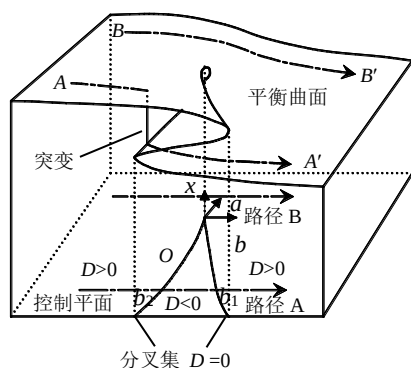


图 7 平衡曲面和分叉集方程

Fig.7 Equilibrium surface and bifurcation set

所以, 分叉集是系统是否处于稳定平衡状态的描述, 它是所有使得状态变量 x 产生突跳(灾变)点的集合。当且仅当控制参数 (a, b) 无论以任何途径通过分叉集时, 系统才能发生突跳。

5.3 相对湿度作用的护顶层失稳破坏机制

从上述分析可知, 系统是否突发失稳取决于控制参数 (a, b) 是否跨越分叉集。从控制参数 (a, b) 表达式(12)来看, 支撑体系突发失稳是系统内部几何物理力学参数和外部因素共同作用的结果。内部几何物理力学参数主要包括护顶层的弹性模量 E 、拱杆初始水平倾角 θ_0 、护顶层的原始板底 L 、对角线尺寸 l 、拱杆 1 和拱杆 2 的等效横截面积 A 、支座处支承弹簧的柔度 λ_c ; 外部因素主要是指上覆岩层集度为 q 均布荷载。采空区中的环境湿度主要对护顶层石膏岩弹性模量 E 起作用而影响控制参数 (a, b) , 从而影响系统的稳定性。

将控制参数 (a, b) 表达式(12)代入分叉集方程式(15)可得

$$32 \left\{ \frac{g_{em}(w)EAL^2}{l[1+EA/(k_c l)]} \right\}^2 \left(\sec \theta_0 - 1 - \frac{\delta}{L} \right)^3 - 27q^2 = 0 \quad (16)$$

在护顶层冒落之前, δ 是从 0 开始逐渐增大的。所以, 依据式(12)可知, 顶板冒落前控制参数 (a, b) 只在图 8 中的 $O b a$ 坐标系中的 $O b_1 G$ 区域。当控制参数 (a, b) 位于 $O b_1 G$ 区域内部时, δ 、 q 、 θ_0 满

足

$$32 \left\{ \frac{g_{em}(w)EAL^2}{l[1+EA/(k_c l)]} \right\}^2 \left(\sec \theta_0 - 1 - \frac{\delta}{L} \right)^3 - 27q^2 > 0 \quad (17)$$

注意到当采空区中的环境湿度逐渐增加时, 石膏岩弹性模量 E 的水致弱化函数 $g_{em}(w)$ 是逐渐减小的, 此时支撑体系参数满足式(16)越不充分, 支撑体系越不稳定, 易跨越分叉集而发生破坏。

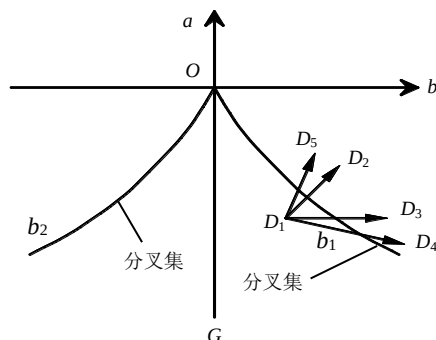


图 8 控制参数 (a, b) 的变化路径

Fig.8 Change path of control parameters (a, b)

另外, 随着采空区中的环境湿度增加, η 是逐渐减小的。所以, 相空间的控制参数 a 随着采空区中环境湿度的增加, 其代数值是逐渐增大的(绝对值减小, 由负值向 0 变化); 而控制参数 b 是逐渐增大的, 控制参数 (a, b) 变化路径可以解释为如图 8 的 D_1-D_2 路径, 向东北方向演化。此路径相对于其他路径来说, 如东西向 D_1-D_3 路径和东南向 D_1-D_4 路径, 是控制参数 (a, b) 最容易跨域分叉集, 系统最容易发生突发失稳破坏的路径。

另外, 潘岳^[33]、王志强^[34]等考虑顶板岩层的流变特性符合 H-K(胡克-凯尔文)体, 随着时间的增加, 分析得出相空间的控制参数 a 和 b 的变化规律和本文考虑相对湿度对护顶层的影响是一致的。所以, 若再考虑护顶层的流变特性, 支撑体系就更加最容易跨域分叉集, 而发生失稳破坏, 其路径可以表示为 D_1-D_5 。

6 计算分析

荆花石膏矿位于湖北省荆门市^[38], 所采膏层主要由泥质石膏矿薄层纤维状石膏及含膏粉砂质泥岩相间组成, 采用的采矿方法为浅孔房柱采矿法开采。矿层护顶层以上岩石为泥质粉砂岩, 计算中上覆岩层密度为 $\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$, 采空区上覆岩层厚度约为 40~120 m, 在这里取厚度 90 m 来研究, 护顶层厚度 $h = 2.5 \text{ m}$, 采空区宽度 $L = 12 \text{ m}$, 于是 $l =$

12.25 m, $\sec \theta_0 = 1.021$, 取 $\lambda_c = 0.25$, 累计破碎尺寸为 $\delta = 20.1$ cm, 通过室内试验, 石膏岩在天然状态, 相对湿度为 75%、85%和 100%状态下的变形参数如表 1 所示。经过现场量测, 该石膏矿采空区的相对湿度约为 75%~85%, 同时考虑支撑系统所处环境为天然状况和相对湿度为 100%两种状况。为此, 分析了天然状态, 相对湿度为 75%、85%和 100%共 4 种状态对控制参数 (a, b) 的影响。

将相关参数代入控制参数 (a, b) 的表达式式 (12), 所得结果如图 9、10 所示。图中含水状态 1、2、3 和 4 分别代表天然状态、相对湿度为 75%、85%和 100%的状态。

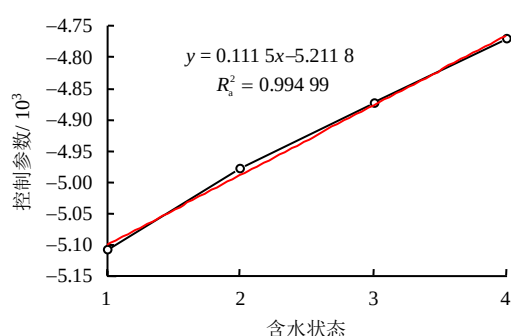


图9 不同相对湿度对控制参数 a 的影响曲线
Fig.9 Curves of control parameter a under different relative humidities

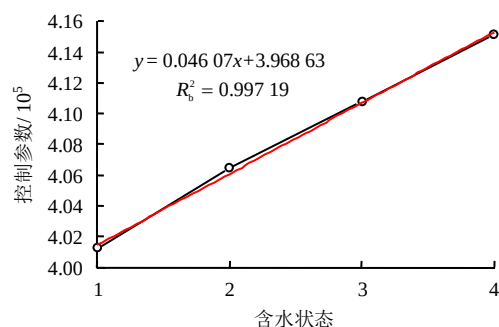


图10 不同相对湿度对控制参数 b 的影响曲线
Fig.10 Curves of control parameter b under different relative humidities

从图 9、10 中可以看出, 随着大气中的相对湿度的增加, 相空间的控制参数 (a, b) 是近似线性逐渐增大的, 拟合相关系数 $R_a = 0.9975$, $R_b = 0.9986$, 这与 5.3 部分的分析是一致的。当大气中的相对湿度从天然状态变为 100%状态时, 相空间的控制参数 a 增加 336.66, 而控制参数 b 增加 13 912.96。所以, 随着采空区中环境湿度的增加, 控制参数 b 的增幅比控制参数 a 大得多。究其原因是上述的计算中取的累计破碎尺寸 δ 较小, 使得控制参数 a 表达

式中的括号内数值较小 (式 (12)), 如果按上述给出的数据来计算, 仅为 -0.004 25。

7 结 论

(1) 石膏岩力学性质在空气中的水分子作用下, 其强度和变形参数会大大降低: 当大气中的相对湿度从天然状态变为相对湿度 100%状态时, 石膏岩的弹性模量和单轴抗压强度减少达到了 12.7%和 16.3%。

(2) 根据石膏矿采空区的破坏特征, 将护顶层简化为铅直方向受均布荷载 q 作用的三铰拱分析模型, 建立了相对湿度作用下的石膏矿采空区护顶层的尖点突变模型。

(3) 支撑体系突发失稳是系统内部几何物理力学参数和外部因素共同作用的结果, 大气中的相对湿度主要对石膏岩弹性模量 E 起作用而影响控制参数 (a, b)。

(4) 随着采空区中环境湿度的增加, 支撑体系越不稳定, 越容易跨越分叉集而发生突发失稳破坏。

(5) 随着采空区中的环境湿度的增加, 系统突发失稳控制参数 (a, b) 的变化路径为向东北方向变化, 此路径是控制参数 (a, b) 最容易跨越分叉集, 系统最容易发生突发破坏的路径。

参 考 文 献

- [1] 王官宝. 石膏矿冒顶引发冲击地压机理及防治措施研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
WANG Guan-bao. Study on rock burst induced by roof falling and its control methods in gypsum mine[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006.
- [2] AUVRAY C, HOMAND F, SORGI C. The aging of gypsum in underground mines[J]. *Engineering Geology*, 2004, 74(3): 183—196.
- [3] AUVRAY C, HOMAND F, HOXHA D. The influence of relative humidity on the rate of convergence in an underground gypsum mine[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, 45 (8): 1454—1468.
- [4] AL HEIB M M, DIDIER C, MASROURI F. Improving short- and long-term stability of underground gypsum mine using partial and total backfill[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2010, 43(4): 447—461.
- [5] CASTELLANZA R, NOVA R, ORLANDI G M. Evaluation and remediation of an abandoned gypsum mine[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental*

- Engineering**, 2010, 136(4): 629—639.
- [6] BERTOLINI L, CARSANA M, SPADA M. Filling of a flooded gypsum mine with a flowable soil-cement mix[J]. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 2010, 22(6): 628—636.
- [7] 夏开宗, 陈从新, 刘秀敏, 等. 石膏矿矿柱-护顶层支撑体系的流变力学模型分析[J]. **岩土力学**, 2017, 38(10): 2923—2930.
- XIA Kai-zong, CHEN Cong-xin, LIU Xiu-min, et al. Rheological mechanical model of pillar-protective roof supporting system in gypsum mines[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(10): 2923—2930.
- [8] 夏开宗, 陈从新, 刘秀敏, 等. 基于突变理论的石膏矿矿柱-护顶层支撑体系的破坏分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2016, 35(增刊 2): 3837—3845.
- XIA Kai-zong, CHEN Cong-xin, LIU Xiu-min, et al. Study of the failure of pillar-roof system in gypsum mines based on catastrophe theory[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(Supp.2): 3837—3845.
- [9] 周意超, 陈从新, 刘秀敏, 等. 荆门石膏矿岩遇水软化力学特性试验研究[J]. **岩土力学**, 2017, 38(10): 2847—2854, 2864.
- ZHOU Yi-chao, CHEN Cong-xin, LIU Xiu-min, et al. Experimental study on mechanical properties of water-softening gypsum rock in Jingmen[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(10): 2847—2854, 2864.
- [10] YILMAZ I. Influence of water content on the strength and deformability of gypsum[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2010, 47(2): 342—347.
- [11] DENG J H, HUANG X C, LI Y J. Experimental research on the mechanical properties of gypsum breccia with different water content[J]. **Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)**, 2010, 15(2): 250—256.
- [12] WANG J A, SHANG X C, MA H T. Investigation of catastrophic ground collapse in Xingtai gypsum mines in China[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2008, 45(8): 1480—1499.
- [13] THOM R. Stabilité structurelle et morphogénèse[M]. New York: [s. n.], 1972.
- [14] CUBITT J M, SHAW B. The geological implications of steady-state mechanisms in catastrophe theory[J]. **Journal of the International Association for Mathematical Geology**, 1976, 8(6): 657—662.
- [15] HENLEY S. Catastrophe theory models in geology[J]. **Journal of the International Association for Mathematical Geology**, 1976, 8(6): 649—655.
- [16] SAUNDERS P T. An introduction to catastrophe theory[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1980.
- [17] QIN S, WANG S, JIAO J J. A cusp catastrophe model of instability of slip-buckling slope[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2001, 34(2): 119—134.
- [18] QIN S Q, JIAO J J, WANG S J, et al. A nonlinear catastrophe model of instability of planar-slip slope and chaotic dynamical mechanisms of its evolutionary process[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 2001, 38(44—45): 8093—8109.
- [19] QIN S Q, JIAO J J, LI Z G. Nonlinear evolutionary mechanisms of instability of plane-shear slope: Catastrophe, bifurcation, chaos and physical prediction[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2006, 39(1): 59—76.
- [20] QIN S Q, JIAO J J, TANG C A, et al. Instability leading to coal bumps and nonlinear evolutionary mechanisms for a coal-pillar-and-roof system[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 2006, 43(25—26): 7407—7423.
- [21] 陈庆发, 古德生, 周科平, 等. 对称协同开采人工矿柱失稳的突变理论分析[J]. **中南大学学报(自然科学版)**, 2012, 43(6): 2338—2342.
- CHEN Qing-fa, GU De-sheng, ZHOU Ke-ping, et al. Analysis of catastrophe theory for artificial pillar instability in symmetric synergistic mining[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2012, 43(6): 2338—2342.
- [22] PAN Yue, LI Ai-wu, QI Yun-song. Fold catastrophe model of dynamic pillar failure in asymmetric mining[J]. **Mining Science and Technology**, 2009, 19(1): 49—57.
- [23] 赵延林, 吴启红, 王卫军, 等. 基于突变理论的采空区重叠顶板稳定性强度折减法及应用[J]. **岩石力学与工程学报**, 2010, 29(7): 1424—1434.
- ZHAO Yan-lin, WU Qi-hong, WANG Wei-jun, et al. Strength reduction method to study stability of gob overlapping roof based on catastrophe theory[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(7): 1424—1434.
- [24] LIU C L, TAN Z X, DENG K Z, et al. Synergistic instability of coal pillar and roof system and filling

- method based on plate model[J]. **International Journal of Mining Science and Technology**, 2013, 23(1): 145—149.
- [25] HU J H, ZHOU K P, LI X B, et al. Numerical analysis of application for induction caving roof[J]. **Journal of Central South University of Technology**, 2005, 12(1): 146—149.
- [26] 龙辉, 秦四清, 万志清. 降雨触发滑坡的尖点突变模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 502—508.
LONG Hui, QIN Si-qing, WAN Zhi-qing. Catastrophe analysis of rainfall-induced landslides[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(4): 502—508.
- [27] YILMAZ I, YUKSEK G. Prediction of the strength and elasticity modulus of gypsum using multiple regression, ANN, and ANFIS models[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2009, 46(4): 803—810.
- [28] 廖文景. 石膏矿采空区积水对矿柱稳定性的影响分析[J]. 采矿技术, 2009, 9(3): 52—58.
LIAO Wen-jing. Effect of water in mined-out area on the ore pillar stability in the gypsum mine[J]. **Mining Technology**, 2009, 9(3): 52—58.
- [29] 陈从新, 周意超. 石膏岩物理力学性质试验报告[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2014.
CHEN Cong-xin, ZHOU Yi-chao. Report on physical mechanics experiment of gypsum rock[R]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [30] 肖国喜. 石膏类矿床采空区失稳机理及防治措施研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2015.
XIAO Guo-xi. Gypsum type deposit goaf instability mechanism and prevention and cure measure research[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2015.
- [31] 陆广, 罗周全, 刘晓明, 等. 露天转地下开采隔层厚度安全分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(1): 132—137.
LU Guang, LUO Zhou-quan, LIU Xiao-ming, et al. Safety analysis of interlayer thickness from open pit to underground mining[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2011, 28(1): 132—137.
- [32] 张敏思, 朱万成, 侯召松, 等. 空区顶板安全厚度和临界跨度确定的数值模拟[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(4): 543—548.
ZHANG Min-si, ZHU Wan-cheng, HOU Zhao-song, et al. Numerical simulation for determining the safe roof thickness and critical goaf span[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2012, 29(4): 543—548.
- [33] 潘岳, 王志强, 张勇. 突变理论在岩体系统动力失稳中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
PAN Yue, WANG Zhi-qiang, ZHANG Yong. Application of catastrophe theory to dynamic instability of rock mass system [M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [34] 王志强, 潘岳. 顶板-锚拉支架系统稳定性的突变理论分析[J]. 金属矿山, 2003, (9): 1—3.
WANG Zhi-qiang, PAN Yue. Analysis of the stability of roof-truss system by catastrophic theory[J]. **Metal Mine**, 2003, (9): 1—3.
- [35] 刘夏临. 基于突变理论的采空区稳定性分析与预测[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2014.
LIU Xia-lin. Analysis and prediction of excavation stability with catastrophe theory[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2014.
- [36] 夏开宗, 刘秀敏, 陈从新, 等. 考虑突变理论的顺层岩质边坡失稳研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 477—486.
XIA Kai-zong, LIU Xiu-min, CHEN Cong-xin, et al. Analysis of mechanism of bedding rock slope instability with catastrophe theory[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(2): 477—486.
- [37] 祝云华, 刘新荣, 黄明, 等. 深埋隧道开挖围岩失稳突变模型研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 805—809.
ZHU Yun-hua, LIU Xin-rong, HUANG Ming, et al. Surrounding rock instability based on catastrophe model of deep-buried tunnel excavation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(3): 805—809.
- [38] 陈从新, 黄平路. 荆门市荆花石膏矿采空区治理可行性评价[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2012.
CHEN Cong-xin, HUANG Ping-lu. Stability evaluation and treatment on mined-out area of Jinghua Gypsum Mine golf in Jingmen city[R]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2012.