

文章编号:1000-582X(2007)03-0133-03

岩盐溶腔顶板稳定性分析及其控制*

刘保县^{1,2},姜德义²,刘新荣³

(1. 西华大学建筑与土木工程学院,四川成都,610039;重庆大学2. 西南资源开发及环境
灾害控制工程教育部重点实验室;3. 土木工程学院,重庆 400030)

摘要:岩盐水溶开采溶腔顶板稳定性及其控制的研究对保证卤井的安全生产和生产效益,对岩盐溶腔储备库的建造和使用都具有十分重要的意义.为此,分析了岩盐溶腔顶板动态平衡过程及失稳发展机制,并利用突变理论研究了岩盐溶腔顶板失稳机理,探讨了溶腔顶板稳定性的影响因素,从而为溶腔稳定性控制打下一定的理论基础.

关键词:岩盐;顶板;稳定;控制

中图分类号:TD321

文献标识码:A

中国是一个岩盐资源十分丰富的国家,已探明地质储量超过44 500亿t,遍及全国19个省区.目前,地下岩盐开采主要采用钻井水溶开采法,这是一种能有效回采地下可溶解矿产资源又能较好保护环境,符合可持续发展要求的采矿工艺技术,具有很好的发展前景.但其技术难度较大.其中,有关岩盐溶腔稳定性及其控制一直是水溶采矿界关注的技术难题.岩盐溶腔稳定性及其控制直接关系到卤井安全生产及生产效益,生产实践表明,卤井的破坏主要是井下技术套管底端受岩盐溶腔上覆岩层的弯曲、破坏和垮塌产生的挤压所致.并且近年来岩盐溶腔被作为一种地下空间加以广泛利用,西方发达国家已在地下建造了大容量的岩盐溶腔储存石油、天然气及处置核工业的放射性废弃物和化学工业的有害物质.中国西气东输配套工程——长江三角洲盐穴储气库项目可行性研究已开始,有关专家业已开始对建立岩盐溶腔石油储备库进行研究.在对于将岩盐溶腔作为储室的开采中,岩盐溶腔稳定性及其控制,直接关系到建造溶腔的成功与否.

1 岩盐溶腔顶板动态平衡过程及其失稳发展机制

随着水溶开采的不断进行,岩盐溶腔不断扩大,岩盐本身所具有的平衡结构受到扰动,为了维持或恢复原有自身的平衡,岩盐将通过应力和变形等方式自动地对其本身结构进行一系列的调整,最后达到新的平衡,但

随着溶腔顶板暴露跨距的进一步扩大,当对岩盐的扰动(破坏)作用超过了岩盐自我调节的限度时,岩盐将随着时间的推移由原来的稳定状态走向失稳,即发生顶板垮塌.此顶板垮塌演化过程是一个由平衡态(稳定)——近平衡态——远离平衡态的过程,也是从无序向有序的演化过程.影响岩盐溶腔顶板稳定性的因素很多,包括盐层和顶板岩层的地质结构、产状、厚度、埋藏深度、力学性质、地应力以及与建井、生产工艺有关的水动力、溶腔形状、大小等等,其中许多因素本身就是动态的参数,是一个非常复杂的动态平衡问题^[1].

2 岩盐溶腔顶板失稳临界突变分析

在自然界,特别是地学,不连续变化的现象非常多,如地震、火山喷发、地磁场倒转、煤瓦斯突出、岩爆等等.近年来,国内外许多学者试图利用突变理论来解释和解决地学中的不连续现象和问题^[2-7].溶腔顶板的失稳是一突变过程,即随着顶板岩层暴露跨度的不断加大,其中所聚积的弹性能越来越高,超过岩层的强度极限,必然导致顶板岩层的脆性破坏.笔者拟采用突变理论研究岩盐顶板稳定性以深入了解顶板岩体运动过程和失稳的发展过程,为溶腔稳定性控制打下一定的理论基础.

2.1 岩盐溶腔顶板突变力学模型

假设岩盐溶腔暴露顶板近似为矩形.溶腔顶板长

* 收稿日期:2006-10-29

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(50104013);四川省教育厅青年基金资助项目(0326177)

作者简介:刘保县(1972-),男,西华大学副教授,博士后,主要从事安全技术工程、岩土力学与工程的研究,

电话(Tel.):028-87720979;E-mail:jzytmlbx@mail.xhu.edu.cn.

为 L , 水平宽度取单位长度, 平均厚度为 $h (h \ll L)$, 即为如图 1 所示岩梁. 设岩梁岩体弹性模量为 E , 顶板岩层自重及其上覆岩层的作用力、构造应力等在垂直顶板方向的分力简化为均布力 Q , 岩梁两端受自重及其上覆岩层的作用力、构造应力等在沿顶板方向的分力简化为 N , 均布力 P 为溶腔内液体的支撑力.

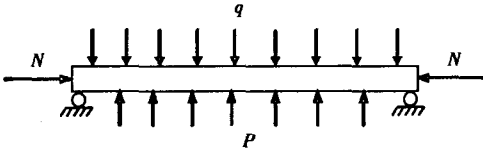


图 1 简化溶腔顶板突变力学模型

梁结构的总势能应由弯曲应变能和载荷在相应位移上所作的功组成, 因此梁结构的势函数可写成^[6-7]:

$$V = U + W_1 + W_2 + W_3, \quad (1)$$

其中, U 为梁的应变能; W_1 为水平力 N 所做的功; W_2 为垂直力 Q 所做的功; W_3 为液体支撑力 P 所做的功.

梁的轴线挠曲线 f , 经傅氏级数展开可近似表示为:

$$f(s) = Y \sin \frac{\pi s}{L}, \quad (2)$$

其中, s 为弧长, $f(s)$ 为挠度, Y 为轴线中点的挠度.

梁的应变能为:

$$U = \frac{EJ}{2} \int_0^L K^2 ds = \frac{EJ}{2} \int_0^L \left(\frac{d^2 f}{ds^2} \right)^2 \left[1 - \left(\frac{df}{ds} \right)^2 \right]^{-1} ds. \quad (3)$$

其中, J 为梁的惯性矩, K 为梁的曲率.

水平力 N 所作的功为:

$$W_1 = -N \cdot \delta = -N \int_0^L \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{df}{ds} \right)^2} \right] ds, \quad (4)$$

其中, δ 为梁水平方向上的压缩量.

垂直均布力 Q 所作的功为:

$$W_2 = \int_0^L Q f(s) ds = \int_0^L Q Y \sin \frac{\pi s}{L} ds = \frac{2QYL}{\pi}. \quad (5)$$

溶腔液体支撑力 P 所作的功为:

$$W_3 = - \int_0^L P f(s) ds = - \int_0^L P Y \sin \frac{\pi s}{L} ds = \frac{-2PYL}{\pi}. \quad (6)$$

将式(3)-(6)代入式(1)得梁的势函数为:

$$V = U + W_1 + W_2 + W_3 = \frac{EJ}{2} \int_0^L \left(\frac{d^2 f}{ds^2} \right)^2 \left[1 - \left(\frac{df}{ds} \right)^2 \right]^{-1} ds - N \int_0^L \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{df}{ds} \right)^2} \right] ds + \frac{2YL}{\pi} (Q - P). \quad (7)$$

2.2 岩盐溶腔顶板失稳的尖点突变模型

对式(7)被积函数泰勒级数展开, 整理可得梁结构势函数的近似表达式为:

$$V = \frac{EJ\pi^6}{16L^5} Y^4 + \frac{\pi^2}{4L} \left(\frac{EJ\pi^2}{L^2} - N \right) Y^2 + \frac{2YL}{\pi} (Q - P). \quad (8)$$

$$\text{设 } Y = \frac{2L}{\pi} \sqrt{\frac{L}{EJ\pi^2}} \cdot x, a = \frac{L}{\pi} \sqrt{\frac{L}{EJ}} \left(\frac{EJ\pi^2}{L^2} - N \right),$$

$$b = \frac{4L^2}{\pi^2} \sqrt{\frac{L}{EJ\pi^2}} \cdot (Q - P).$$

则

$$V = x^4 + ax^2 + bx. \quad (9)$$

所以, 平衡曲面 M 的方程为^[8]:

$$V' = 4x^3 + 2ax + b = 0. \quad (10)$$

分歧点集所满足的方程为^[8]:

$$8a^3 + 27b^2 = 0. \quad (11)$$

即

$$\Delta = 8 \left[\frac{L}{\pi} \sqrt{\frac{L}{EJ}} \left(\frac{EJ\pi^2}{L^2} - N \right) \right]^3 + 27 \left[\frac{4L^2}{\pi^2} \sqrt{\frac{L}{EJ\pi^2}} \cdot (Q - P) \right]^2 = 0. \quad (12)$$

因为只有当 $a \leq 0$ 时才有跨越分歧集的可能, 故得系统发生突跳的必要条件为:

$$N \geq \frac{EJ\pi^2}{L^2}, \quad (13)$$

所以顶板岩盐的弹性模量 E 越小, 采场跨距 L 越大, 或者水平构造应力及自重侧压压力越大, 系统就越容易发生突变, 导致顶板的失稳.

所以溶腔顶板失稳的充要条件为:

$$\left. \begin{aligned} N &\geq \frac{EJ\pi^2}{L^2}, \\ 8 \left[\frac{L}{\pi} \sqrt{\frac{L}{EJ}} \left(\frac{EJ\pi^2}{L^2} - N \right) \right]^3 + \\ 27 \left[\frac{4L^2}{\pi^2} \sqrt{\frac{L}{EJ\pi^2}} (Q - P) \right]^2 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

因此, 岩盐溶腔顶板稳定性不仅与顶板所受垂直力和水平力的联合作用有关, 而且与溶腔顶板跨距的增大及顶板系统的内部特征如顶板岩盐的弹性模量有密切的关系. 水平应力越大、顶板岩层弹性模量越小, 溶腔跨距越大, 越容易引起溶腔顶板突跳破坏.

3 岩盐溶腔顶板稳定性影响因素及控制分析

3.1 地应力对溶腔顶板稳定性的影响

地应力是引起岩盐溶腔顶板破坏的根本作用力, 地应力的大小和方向不同, 对溶腔顶板作用力也不同 (见图 2). 当 $N, Q - P$ 满足 $\Delta < 0$ 时, 控制点 $(N, Q - P)$ 在分歧集的内部; 当 $N, Q - P$ 满足 $\Delta > 0$ 时, 控制点 $(N, Q - P)$ 在分歧集的外部. 只要 $(N, Q - P)$ 不穿越分歧集则系统是稳定的, 不会发生突变, 即不会发顶板垮

塌,当水溶开采使 $(N, Q-P)$ 跨越分歧集时,系统发生突跳,顶板垮塌.因此控制 $(N, Q-P)$ 使其不穿越分歧集,是岩盐溶腔顶板稳定性控制的关键.

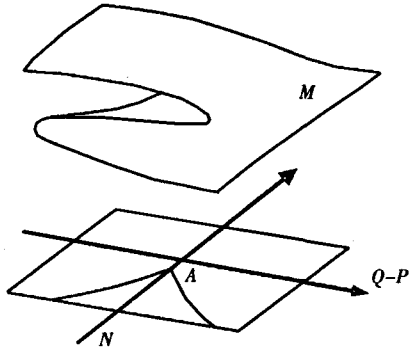


图2 溶腔顶板结构的突变模型

3.2 溶腔顶板跨距对溶腔顶板稳定性的影响

由式(14)可得 $L \geq \sqrt{\frac{E J \pi^2}{N}}$,当 $L = \sqrt{\frac{E J \pi^2}{N}}$ 时即为

溶腔的极限跨距.在地应力变化较小时,同样控制溶腔顶板跨距不超过极限跨距,同样可避免顶板的垮塌.

3.3 开采深度对溶腔顶板稳定性的影响

随着开采深度的增加,地应力也相应增加,从而使溶腔的顶板承受的地应力相应增大,因此,溶腔深度也是影响溶腔顶板稳定性的重要因素之一.研究认为深部开采时建造圆柱形的溶腔有利于提高溶腔稳定性.

3.4 溶腔水压对顶板稳定性的影响

由式(14)可知溶腔内的水压力 P 直接影响溶腔顶板的稳定性, P 越大越有利于顶板的稳定性.但实际情况往往相反.这主要是因为:1)人为调控井腔水压力与顶板失稳所产生的力相比是微不足道的;2)顶板岩体在水化作用下自身强度迅速下降,弹性模量 E 也迅速下降,从而导致系统满足式(13),顶板发生失稳.现在广泛采用的油垫采卤法就是用油垫将水和顶板岩体隔开,减少水对顶板的影响,从而达到保护顶板的作用^[9].

3.5 岩体的物理力学性质对顶板稳定性的影响

由式(14)可知,顶板岩体的物理力学性质也是影响顶板稳定性重要因素.由于矿物组成、岩石结构构造的不同,不同岩石的物理力学性质判别很大.岩盐溶腔顶板往往为复合岩石顶板,复合岩石的破坏是一个渐进破坏过程.破坏从强度和弹性模量较小的组分岩石开始,逐渐向强度和弹性模量较大的组分岩石过渡,并在该组分岩石上产生张性拉裂纹,拉裂纹的扩展导致复合岩石最终发生脆性破坏^[10].

4 结语

分析了岩盐溶腔顶板动态平衡过程及失稳发展机制,同时利用突变理论研究了岩盐溶腔顶板失稳机理,分析了溶腔顶板的影响因素及其控制,从而为溶腔稳定性控制打下一定的理论基础.

参考文献:

- [1] 黄森田. 岩盐中后期开采溶腔顶板相对稳定性分析[J]. 中国井矿盐, 2001, 32(5): 33-36.
- [2] 尹光志. 岩石力学中的非线性理论与冲击地压预测的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 1999.
- [3] 唐春安, 徐小荷. 岩石破裂过程失稳的尖点突变模型[J]. 岩石力学与工程学报, 1990, 9(2): 100-107.
- [4] 谢胜华, 侯忠杰. 突变理论在浅埋煤层组合关键层中的应用[J]. 力学与实践, 2002, 24(6): 42-44.
- [5] 潘岳, 王志强, 彭国旗. 用功、能增量方法研究压杆跳屈屈曲[J]. 力学与实践, 2003, 25(6): 43-45.
- [6] 邵爱军, 彭建萍, 刘唐生. 矿坑底板突水的突变模型研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 38-41.
- [7] 谢胜华, 侯忠杰. 突变理论在浅埋煤层组合关键层中的应用[J]. 力学与实践, 2002, 24(6): 42-44.
- [8] 桑博德. 突变理论入门[M]. 凌复华译. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1989.
- [9] 刘新荣, 余海龙, 姜德义, 等. 岩盐顶板复合岩石力学性质试验研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2004, 26(3): 32-35, 58.
- [10] 王建新. 威西矿区延长卤井安全期的技术研究[J]. 中国井矿盐, 2004, 35(35): 21-25.

Analysis and Control on Roof Stability of Rock-salt Cavity

LIU Bao-xian^{1,2}, JIANG De-yi², LIU Xin-rong³

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China;

2. Key Laboratory for the Exploitation of Southwestern Resources & the Environmental Disaster Control Engineering Under the State Ministry of Education;

3. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Analysis and control on roof stability of rock-salt cavity are very important to ensure safety and benefit in production, build and use of repertory of rock salt cavity. Dynamic balance process and instability process of rock-salt cavity roof are studied, and instability mechanism of rock-salt cavity roof is studied with catastrophe theory, and the influencing factor are analyzed, which will be theoretical basis of rock-salt cavity stability control.

Key words: rock-salt; roof; stability; control

(编辑 姚飞)