

文章编号: 1673-9469 (2018) 04-0079-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.04.017

河北宁晋草厂盐矿覆岩稳定性分析与评价

李阳, 赵兵杰

(河北工程大学 地球科学与工程学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 针对冀中平原宁晋一带采空区极易导致地表过度沉降、塌陷, 土地盐碱化等地质灾害及环境安全问题, 依据矩形板理论和弹性圆板理论对草厂盐矿上覆盖层稳定性进行了分析, 得出溶腔覆岩在矩形板梁理论和无孔弹性圆板理论下的临界水平应力为 4.90×10^8 kN 和 6.89×10^8 kN, 并分析了两种模型下草厂盐矿上覆盖层的稳定可靠性。

关键词: 宁晋草厂盐矿; 覆岩稳定性; 临界水平应力; 分析与评价

中图分类号: P64

文献标识码: A

Overlying strata stability analysis and evaluation of Caochang salt mine in Ningjin, Hebei

LI Yang, ZHAO Bingjie

(School of Earth Science and Engineering, Hebei university of engineering, Hebei Handan 056038, China)

Abstract: There are abundant halite resources with reserves about 100 billion tons in the strata of Paleogene System at Shahejie Formation in Ningjin area of Jizhong plain. However, the mined-out areas formed by solution mining of halite deposits may easily lead to geological disasters and environmental problems such as excessive surface subsidence, collapse, land salinization and so forth. So, how to effectively predict and control roof fall of salt cavities has become the most pressing problem. Based on the rectangular plate theory and the non-porous elastic circular plate theory, the stability of the overlying strata in Ningjin Halite Mine is analyzed. The results show that the critical horizontal stresses of the overlying strata of cavity are and under the two theories, respectively. The stability and reliability of the overlying strata in Ningjin Halite Mine under the above two models are also analyzed.

Key words: Caochang salt mine; overlying strata stability; critical horizontal stress; analysis and evaluation

近年来, 岩盐作为工业原料的需求大大提高, 岩盐水溶开采研究取得了许多重要进展, 水溶开采后形成的巨大溶腔作为一种优良的战略石油、天然气储备场所更受到学者们的广泛重视^[1-2]。为实现安全高效采矿及灾害治理^[3-5], 国内外许多学者针对盐矿采空区顶板破断力学机制进行了研究^[6-13], 但对宁晋地区盐矿水溶开采研究不够充分, 在顶板的实际应用分析方面更是缺少相应定量计算。因此, 本文详细分析了宁晋地区岩盐矿层及围岩矿石特征, 依据矩形薄板理论和无孔弹性圆形板理论^[14-15], 对

研究区覆岩的稳定性进行了深入的研究和定量评价。研究成果为宁晋盐矿区地表塌陷的预防和控制提供了理论依据和数据支持, 对宁晋盐矿的安全生产和灾害治理具有十分重要的意义, 同时也为溶腔用于石油战略储备的可行性提供一定的参考。

1 研究区地质背景

研究区位于华北断拗之临清台陷中的束鹿断凹中部, 向西为宁晋断凸, 向东为新河断凸, 向南为

收稿日期: 2018-06-15

特约专稿

基金项目: 博士专项基金资助项目 (17129033018)

作者简介: 李阳 (1991-), 男, 河北保定人, 硕士, 主要从事岩土工程、地质工程评价方面的研究。

南和断凸,向北为冀中台陷(图1)。

在束鹿断凹中虽有不同方向的多组断层分布,其中走向NE向的北圈里-马乡断层从本矿区东南部通过,但由于这些断层均形成于第三系沉积之前,所以其对新生界地层和赋存于其间的石盐矿层并不构成影响,经以往石油勘查成果资料分析,本研究区内新生界沉积层中无断层分布,石盐矿体总体呈走向近SN,向E倾伏的宽缓单斜构造,研究区构造复杂程度属简单。

根据草厂勘查区施工的盐1、盐2井资料,该区揭露的赋存地层自上而下依次为:第四系、上第三系明化镇组、馆陶组、下第三系东营组、沙河街组沙一段、沙河街组二至四段(图2)。

2 研究区工程地质条件

2.1 岩土体条件

根据盐1、盐2钻孔实际揭露的岩土体物理特征、岩性结构、水理性质和赋存条件以及岩石力学性质,可将本区岩土体划分为5组,第四系松散层组、风化岩组、砂岩岩组、泥岩岩组、泥灰岩岩组。

其中泥灰岩岩组主要分布在沙河街组沙一段石盐矿体顶底板及石盐矿体的夹层中。岩性以泥灰岩、含泥灰岩为主,厚度0.1~15m,抗压强度20.7~22.3MPa,遇水稳定性好,强度较大(表1)。

2.2 围岩、夹层、矿石岩体特征

2.2.1 上覆与下伏岩体特征

研究区内各石盐矿层顶底板岩性主要为灰质泥岩、泥灰岩、泥质石膏岩等,一般厚度2~

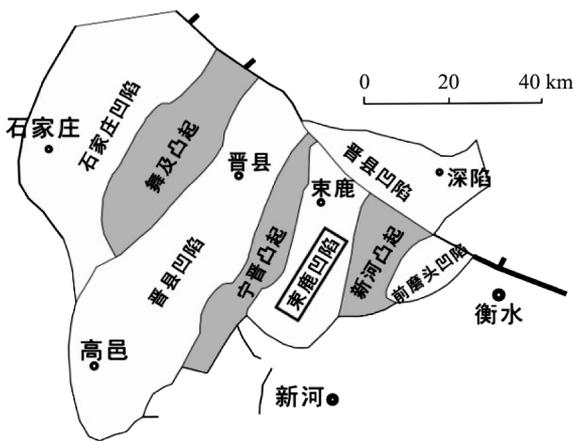


图1 研究区构造分区图
Fig.1 The tectonic zone

6m。抗压强度20.7~29.6MPa,最大抗压强度29.6MPa,最大抗拉强度2.4MPa,一般属中等坚固或较坚固岩体,岩体完整,遇水稳定性好,强度较大,对盐矿层的开采具有良好的维护作用,个别顶板岩体完整性较差。

2.2.2 石盐矿层岩体特征

矿区石盐矿层中含泥岩和泥质石膏夹层,一般厚度为0.01~0.09m,呈薄层或条带状产出,或呈斑点状填充于石盐中,对石盐矿层水溶速度略有影响,矿石颗粒一般中-细晶结构,少量巨晶结构,矿层NaCl平均含量86.354%~94.948%,盐矿层适宜水溶性开采。

2.2.3 夹层岩体特征

矿区内各石盐矿层均含有0.1~2m厚的夹石,岩性主要为灰质泥岩,石膏质泥岩、泥灰岩以及少量石膏岩,呈不等厚状分布于各石盐矿层之中,石盐矿层含夹石率在7.71%~17.71%之间,平均13.71%。各石盐矿层夹石抗压强度相对较低,在矿山开采时比较容易垮塌,从而有利于矿山开采的连续进行。

2.3 水文地质条件

该区内石盐矿床埋藏较深,且新生界地层中分布的断层稀少,地表水、第四系、第三系明化镇组、馆陶组、东营组含水层(组)之间的水力联系微弱,而且上述各含水层(组)距下伏的石盐矿体之距离

地层单位	厚度/m	岩性柱状	图例
第四系	400~550		泥岩
明化镇组	450~500		砾岩
馆陶组	450~550		砂质泥岩
东营组	700~900		细砂岩
			灰质泥岩
沙河街组	一段		含砾砂岩
	二~四段		泥质灰岩 石盐矿 粉砂

图2 研究区地层
Fig.2 The stratigraphic column

表1 岩石力学性能试验成果表
Tab.1 The test result table of rock mechanics performance

样品编号	采样深度 /m	岩石名称	比重	抗压		抗拉		抗剪		弹性模量		泊松比
				平均 /MPa	平均 /MPa	内摩擦角	凝聚力系数	切线模量 × 10 ⁵ MPa	变形模量 × 10 ⁵ MPa			
1	2 620.97 ~ 2 621.84	细砂岩	2.59	26.0	0.9	35° 17'	4.4	0.16	0.18	0.21		
2	2 623.34 ~ 2 627.21	泥灰岩	2.63	22.3	1.1	34° 47'	4.0	0.18	0.21	0.24		
3	2 649.86 ~ 2 653.50	钙质泥岩	2.65	26.3	1.5	40° 70'	3.9	0.33	0.29	0.28		
4	2 667.79 ~ 2 673.74	钙质泥岩	2.78	25.2	2.4	39° 27'	5.3	0.20	0.17	0.24		
5	2 680.79 ~ 2 683.28	钙质泥岩	2.58	29.6	2.3	39° 35'	6.1	0.35	0.27	0.19		
6	2 690.57 ~ 2 692.63	钙质泥岩	2.62	29.5	2.0	40° 29'	5.2	0.26	0.22	0.17		
7	2 717.12 ~ 2 720.11	含膏钙质页岩	2.59	25.9	1.0	35° 33'	3.3	0.13	0.14	0.31		
8	2 728.48 ~ 2 730.71	石盐岩	2.21	17.6	1.2	35° 17'	4.1	0.23	0.17	0.24		
9	2 747.45 ~ 2 748.97	石膏质泥岩	2.84	20.4	0.9	37° 20'	3.8	0.15	0.14	0.14		
10	2 775.24 ~ 2 778.12	含膏钙质泥岩	2.93	27.9	1.1	36° 20'	5.4	0.17	0.18	0.21		
11	2 808.55 ~ 2 809.80	石盐岩	2.25	19.4	1.0	34° 27'	3.7	0.18	0.18	0.34		
12	2 848.23 ~ 2 849.40	石膏质泥岩	2.58	18.5	0.7	33° 12'	3.3	0.13	0.14	0.23		

约400 m，其间隔水层为成岩较好的巨厚层泥岩、粉砂质泥岩。

随水溶开采的进行，溶腔发展到一定程度，引发矿层顶板岩石垮落，并形成有顶板冒裂带，经计算，进行石盐矿层开采时形成的矿层顶板冒裂带高度为132.8 m^[6]，具体位置约为2 510.2 ~ 2 643.0 m。至于裂隙带，位于冒落带的上方，一般认为裂隙带的高度大约与冒落带高度相等，即为132.8 m，具体位置约为2 377.4 ~ 2 510.2 m。由此可见，水溶开采时所形成的顶板冒裂带不会导通距盐矿层最近的东营组含水层（组），换言之，区内石盐矿层上覆各含水层对该区进行石盐矿水溶开采不会造成影响。

盐矿开采形成一定的溶腔，产生负压致使石盐矿床下伏底板上拱，但因溶腔始终是充满水的，因此直接作用到矿床底板的压力会被削弱，且石盐矿床下部沙二段砂岩孔隙承压含水层组距石盐矿床120 ~ 150 m，隔水层厚度大，沙二段砂岩水不会影响石盐矿床的正常开采。

3 上覆盖层稳定性分析

依据目前对河北草厂盐矿溶腔形态的探测结果，NY1、NY2、NY3、NY4、NY5井的最大单个溶腔直径约3 000 m，盐矿埋深距地表约2 600 m，盐矿直接上覆盖层厚约400 m，盐矿初采采用单井对流水溶开采模式（图3）。

3.1 简直梁矩形板理论模型

宁晋岩盐溶腔暴露上覆盖层近似为矩形的情况下。长为 $L=3\ 000\text{ m}$ ，水平宽度取单位长度，平均厚度为 $h=400\text{ m}(h \ll L)$ ，溶腔内卤水比重 $\gamma=1.20 \times 10^4\text{ N/m}^3$ ，设岩梁岩体弹性模量为 $E=0.21 \times 10^5\text{ MPa}$ ，盖层自重及其上覆岩层的作用力、构造应力等在垂直盖层方向的分力简化为均布力 q ，溶腔内液体的支撑力简化为均布力 p ，岩梁两端受自重及其上覆岩层的作用力、构造应力等在沿盖层方向的分力简化为 N ，如图4所示岩梁。

根据单点突变理论下溶腔覆岩的最小临界水应力公式^[6-7]：

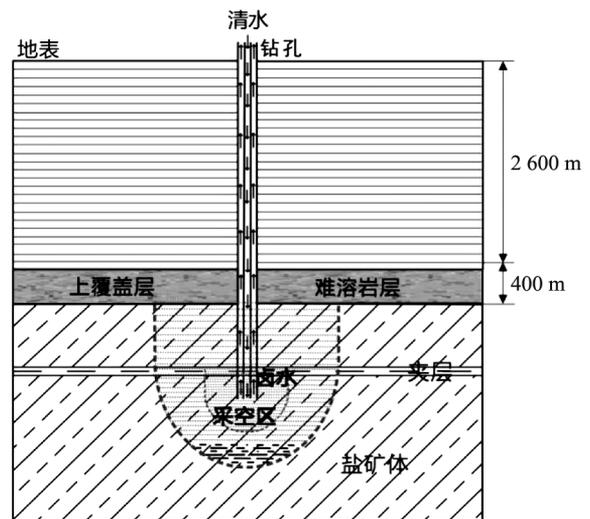


图3 盐矿水溶开采示意图

Fig.3 Sketch map of salt solution mining technology

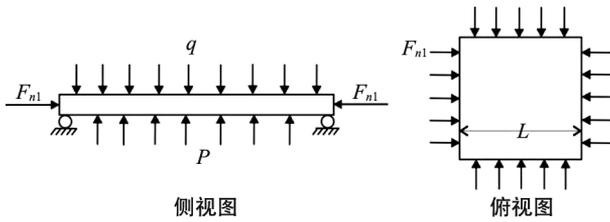


图4 矩形盖层受力模型

Fig.4 Roof mutational damage theory model

$$\begin{cases} F_{n1} \geq \frac{EI\pi^2}{L^2} \\ q > p \\ 8\left[\frac{L}{\pi}\sqrt{\frac{L}{EI}}\left(\frac{EI\pi^2}{L^2}-L^2\right)\right]^3 + 27\left[\frac{4L^2}{\pi^2}\sqrt{\frac{L}{EI\pi^2}}\times\right. \\ \left.(Q-P)\right]^2 \neq 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中 I 为梁的惯性矩:

$$I = \int_0^h H^2 dH = \frac{1}{3}h^3 = 2.13 \times 10^7 \text{ m}^4$$

q 为顶板受向下均布力:

$$q = \sum_{i=1}^n H_i \gamma_i = 520 \text{ m} \times 19 \text{ kN/m}^3 + 500 \text{ m} \times 24.18 \text{ kN/m}^3 + 550 \text{ m} \times 24.3 \text{ kN/m}^3 + 710 \text{ m} \times 25.3 \text{ kN/m}^3 + 400 \text{ m} \times 25.4 \text{ kN/m}^3 = 6.346 \times 10^4 \text{ kPa}$$

p 为卤水向上支撑力:

$$p = \gamma H = 12 \text{ kN/m}^3 \times (520 + 500 + 500 + 710 + 400) = 3.216 \times 10^4 \text{ kPa}$$

将上述已知量代入(1)式可得,

$$\begin{cases} F_{n1} \geq (0.21 \times 10^5 \text{ MPa} \times 2.13 \times 10^7 \text{ m}^4 \times 3.14^2) / 3000^2 \text{ m}^2 = 4.9 \times 10^8 \text{ kN} \\ q - p = 6.346 \times 10^4 \text{ MPa} - 3.216 \times 10^4 \text{ MPa} = 3.13 \times 10^4 \text{ MPa} > 0 \\ 8\left[\frac{L}{\pi}\sqrt{\frac{L}{EI}}\left(\frac{EI\pi^2}{L^2}-L^2\right)\right]^3 + 27\left[\frac{4L^2}{\pi^2}\sqrt{\frac{L}{EI\pi^2}}\right]^2 \times \\ \left.(Q-P)\right]^2 \neq 0 \end{cases}$$

3.2 无孔弹性圆板理论模型

单井水溶开采形成的采空区通常可视为轴对称旋转体处理,实际工程中井眼尺寸相对于整个顶板的横向尺寸很小,故而可将盖层简化为无孔圆形板,从而建立如下图5所示的力学模型,即为在水平径向应力 F 、与竖向均布力 q 共同作用下周边滑动筒支圆板,且溶腔顶直径为 $L=3000 \text{ m}$,平均厚度为

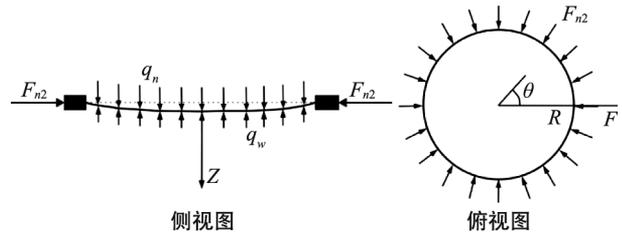


图5 圆形盖层受力模型(改自侯景军,2015)

Fig.5 Roof shear damage theory model

$h=400 \text{ m}$,溶腔内卤水比重 $\gamma=1.20 \times 10^4 \text{ N/m}^3$,设岩梁岩体弹性模量为 $E=0.21 \times 10^5 \text{ MPa}$ 。

盖层周边所受的临界薄膜力公式为^[15]:

$$F_{ncr} = \frac{14.682D}{R^2} \quad (2)$$

盖层边缘薄膜应力的临界值公式为:

$$(\sigma_r^0)_{cr} = \frac{1.224E}{1-\mu^2} \left(\frac{h}{R}\right)^2 \quad (3)$$

盖层周边所受的薄膜力公式为:

$$F_n = h\sigma_r^0 \quad (4)$$

其中 D 为圆形盖层(顶板)的抗弯刚度,其可用下式计算。

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} = \frac{0.21 \times 10^5 \text{ MPa} \times 400^3}{12(1-0.24^2)} = 1.189 \times 10^{17}$$

式中, E 为上覆盖层的弹性模量 $0.21 \times 10^5 \text{ MPa}$, μ 为泊松比 0.24 ; h 为盖层的平均厚度 400 m 。代入式(2)、(3)、(4)得:

$$\begin{cases} (\sigma_r^0)_{cr} = \frac{1.224E}{1-\mu^2} \left(\frac{h}{R}\right)^2 = \frac{1.224 \times 0.21 \times 10^6}{1-0.24^2} \times \\ \left(\frac{400}{1500}\right)^2 = 1.723 \times 10^3 \text{ MPa} \\ F_{n2} = h\sigma_r^0 = 400 \text{ m} \times 1.723 \times 10^3 \text{ MPa} = 6.89 \times 10^8 \text{ kN} \end{cases}$$

4 结论

1) 选用板梁矩形板理论和无孔弹性圆板理论对宁晋草厂盐矿顶板的稳定性进行分析计算,得出两种力学模型下溶腔顶板的临界水平地应力分别为 $4.90 \times 10^8 \text{ kN}$ 和 $6.89 \times 10^8 \text{ kN}$,均超过覆岩本身所能承受的抗压强度,结果表明,岩矿开采之后,其上覆岩层必然会破坏。

2) 应用弹性圆薄板理论对岩盐单井溶腔覆岩进行分析,是对以往顶板稳定性研究成果的补充。

3) 建议采取边抽采边回填的方式进行开采, 而不是开采之后对采空区进行再治理。

参考文献:

- [1] 孙富海, 孔源. 河北邯邢地区盐类矿产的成矿条件和远景分析[J]. 地质与资源, 2013, 22(5): 422-423.
- [2] 梁卫国. 盐类矿床水压致裂水溶开采的多场耦合理论及应用研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2004.
- [3] 郝铁生. 层状盐岩水平储库破坏机理及稳定性研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- [4] 王新新. 我国石油储备发展策略研究[J]. 全球科技经济瞭望, 2014, 29(10): 21-28.
- [5] 袁光杰, 夏焱, 金根泰, 等. 国内外地下储库现状及工程技术发展趋势[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(4): 8-14.
- [6] 姜德义, 任松, 刘新荣, 等. 岩盐溶腔顶板稳定性突变理论分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(7): 1099-1103.
- [7] 刘保县, 姜德义, 刘新荣. 岩盐溶腔顶板稳定性分析及其控制[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2007, 30(3): 133-135.
- [8] 白光顺, 张世涛, 朱杰勇, 等. 用弹性圆薄板理论分析盐岩单井水溶溶腔覆岩关键层[J]. 工程地质学报, 2015, 23(4): 634-640.
- [9] 侯景军, 何俊. 单井对流水溶开采盐矿采空区顶板破坏机理研究[J]. 矿业研究与开发, 2015, 35(4): 96-101.
- [10] 屈丹安, 施锡林, 李银平, 等. 盐穴储气库建槽工程实践与顶板极限跨度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S2): 3703-3709.
- [11] 施锡林, 李银平, 杨春和, 等. 盐穴储气库水溶造腔夹层垮塌力学机制研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3615-3621.
- [12] STAUDTMEISTER K, ROKAHR R B. Rock Mechanical Design of Storage Caverns For Natural Gas in Rock Salt Mass[J]. Int. J. Rock Mech & Min. Sci, 1997, 34: 3-4.
- [13] ALHEID H J, KNECHT M, LIIDELING R. Investigation of the long-term Development of Zones Around in Rock Salt[J]. Int. J. Rock Mech & Min. Sci, 1998, 35: 4-5.
- [14] 梁昆森. 数学物理方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- [15] 吴家龙. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [16] 张国斌, 宋金保. 河北辛集—宁晋石盐资源赋存特征与开发利用评价[J]. 河北煤炭, 2009, 7(4): 7-10.

(责任编辑 王利君)

(上接第73页)

参考文献:

- [1] 李世雄, 李守定, 郜洪强. 河北平原地裂缝分布特征及成因机制研究[J]. 工程地质学报, 2006(2): 178-183.
- [2] 李俊, 李金峰, 莫多闻. 河北平原地裂缝的分布规律及成因初探[J]. 水土保持研究, 2003, 10(3): 62-65.
- [3] 姜凯勇. 河北隆尧地裂缝成因机理分析[D]. 西安: 长安大学, 2013.
- [4] 徐继山, 彭建兵, 马学军, 等. 邢台市隆尧地裂缝发育特征及成因分析[J]. 工程地质学报, 2012, 20(2): 160-169.
- [5] 马润勇. 华北平原典型地裂缝发育地段活动断裂调查与构造应力场数值模拟研究[R]. 西安: 长安大学, 2009: 32-34.
- [6] 王景明. 地裂缝及其灾害的理论与应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2000: 497-510.
- [7] 黄润秋. 地质灾害风险评价与管理[M]. 北京: 地质出版社, 2010: 1-15.
- [8] 卢全中, 彭建兵, 赵法锁. 地质灾害风险评估(价)研究综述[J]. 灾害学, 2003(4): 60-64.
- [9] 张茂省, 唐亚明. 地质灾害风险调查的方法与实践[J]. 地质通报, 2008(8): 1205-1216.
- [10] 陈志新. 地裂缝成灾机理及防御对策[J]. 西安工程学院学报, 2002, 24(2): 17-20.

(责任编辑 王利君)