

黄岛液化石油气地下储库主洞室岩体稳定性分析

刘伟韬¹, 申建军¹, 何寿迎²

(1. 山东科技大学矿业与安全工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 青岛市勘察测绘研究院, 山东 青岛 266032)

摘要:针对液化石油气(LPG)地下储库具有高边墙、大跨度、不砌衬等特点,在开挖过程中不仅要解决好围岩稳定性问题,更要确保地下洞室群能长期安全稳定的运行。通过对库区钻孔资料与已施工的巷道地质调查结果分析,采用赤平投影法分析了黄岛 LPG 地下储库的主要结构面节理,断层与岩脉的产状。根据块体理论,基于块体稳定分析程序 Unwedge 预测了 LPG 主洞室潜在不稳定块体的几何尺寸及稳定性,结果表明,在洞库的拱顶只有少量不稳定块体产生,发生大型不稳定楔形体的关键地区是在 J2-J3-J4 节理组合的顶部和侧墙,为支护设计提供了依据。

关键词: LPG 地下储库;赤平投影法;块体理论;Unwedge;稳定性分析

文章编号:1003-8035(2014)02-0065-05

中图分类号:P642.2

文献标识码:A

0 引言

随着我国经济社会的快速发展,城市化进程的加快,城市土地日益紧张,因此,地下空间正被人们广泛的开发和利用。例如城市地下轨道交通的发展、地下商场、地下储库的建设等。其中地下 LPG(液化石油气)储库就是人们利用地下空间的又一崭新领域。LPG 地下储库是利用地下洞室及水封技术来储存液化气,具有安全、经济、储量大的优点^[1]。

黄岛 LPG 地下储库工程采用地下水封岩洞储存 LPG。主要包括 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ 丙烷洞库,埋深 130m、 $35 \times 10^4 \text{ m}^3$ 丁烷洞库,埋深 80m。储库洞室为宽 15 ~ 18m,高 26m,截面积为 393.1 m^2 的三心圆拱。

该库址区岩体从总体评估上可满足建设 LPG 洞库“大跨度、高边墙、不衬砌”^[2]的工程要求。由于主洞室地质条件复杂,需要对岩石块体稳定性进行分析。在 LPG 储库稳定研究方面,我国专家学者对此方面的研究处于起步阶段,王芝银教授采用数值模拟的方法模拟试验了石油洞库群的优化设计,为油库的设计提供了参考依据^[2]。段压刚采用 Ansys 对洞库断面形状进行了优化,五心拱能更好的减小拱顶的沉降,并对洞库的间距做了探讨^[3]。Goodman 采用赤平投影法分析了非连续岩体的稳定问题,我国学者石根华提出了在赤平投影上判断滑落体的方法,采用矢量代数数学分析法分析岩体的稳定性,并与 Goodman 合作建立了块体理论^[4]。陈奇等根据地下水封油库的工程特点,分析了此类工程地质灾害类型,列举了工程可能存在的现状地质灾害、施工期地质灾害和运营期地质灾害^[5]。

本文采用赤平投影与块体稳定分析程序

Unwedge 分析了主要结构面,如节理,断层与岩脉,预测了 LPG 主洞室潜在不稳定块体的特征,为分析洞室围岩稳定性和支护设计提供了主要理论依据。

1 库区围岩结构面分析

1.1 节理面分析

通过库区钻孔资料与现场调查,节理面主要有两种组成,均为平直粗糙节理,一种为张性节理,发育显著,没有任何充填物;一种为由充填物充填的节理。岩石节理的优势方向与随机节理的产状如表 1,概率为该组节理在所有统计节理中所占的比例。使用赤平投影对节理面分析(图 1)。

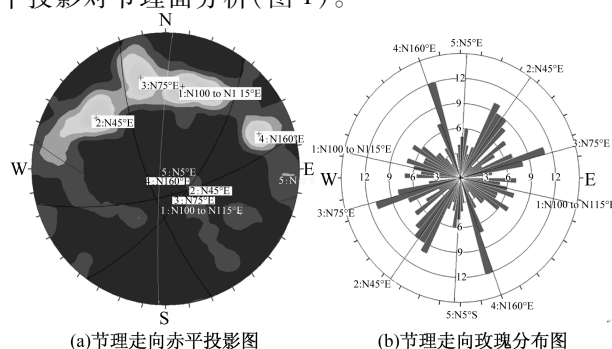


图 1 节理走向赤平投影图与玫瑰分布图

Fig. 1 The stereogram and rosegram of fractures strike

收稿日期:2013-06-13;修订日期:2013-10-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51274135, 51034003);山东省优秀中青年科学家奖励基金项目(BS2011SF016)

作者简介:刘伟韬(1970—),男,山东东明人,教授,博士,从事采矿工程、岩石力学等方面的教学与研究工作。

E-mail:wtliu@sdust.edu.cn

表 1 主要节理产状

Table 1 The character of main fractures

类型	编号	平均走向	倾角	概率(%)
主要节理组	J1	100	40 SW ~ 75 SW	31
	J2	45	50 SE ~ 80 SE	17
	J3	75	50 SE ~ 85 SE	15
	J4	160	65 SW ~ 85 SW	8
小结				71
随机节理组	R1	130	55 SW ~ 40 NE	8.5
	R2	190	60 SE ~ 75 NW	12.5
	R3	30	60 NW	2
	R4	55	30 NW ~ 60 SE	5
	R5	5	20 NW	1
小结				29

从节理的走向来看,节理大多呈东西走向发育,主要的节理 J1 为近东西走向。节理的倾角大都在 40°以上,其最大倾角近垂直,结合 LPG 洞库的设计,轴向为 5°,近南北方向,顶底呈水平向。在轴向及垂向上与节理的优势方向夹角较大,这有利于洞库围岩的稳定,但节理结合其他结构面,可能有不稳定块体的产生。总体而言,围岩完整性较好,并且随开挖深度的增加,围岩的完整性越好。

1.2 断层分析

库区断层主要有两种,一为有明显位移错动,二为张性断层,中间夹有破碎带,宽度为 1 ~ 1.5m 剪切带,由糜棱岩充填物密实,胶结稳定。通过钻孔资料与施工巷道统计的断层剪切破碎带情况,可以将断层划分为 3 组,分别为 F1,F2,F3 三组。F1 组 95°∠30° ~ 85°;F2 组 55°∠55° ~ 80°;F3 组 140°∠80° ~ 90°。赤平投影分析见图 2。

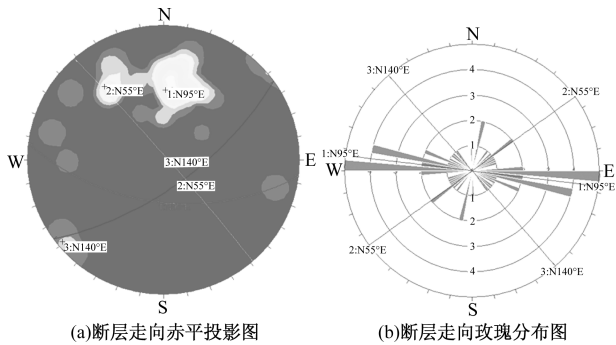


图 2 断层走向赤平投影图与玫瑰分布图

Fig. 2 The stereogram and rosegram of fault strike

在局部断层宽度较大,中间夹层较为破碎,为剪切破碎带。在交通巷道中,存在一些剪切破碎带,断层影响宽度为 1 ~ 1.5m,中间为破碎岩石。施工中,

剪切破碎带表现稳定,破碎岩块胶结在一起。

1.3 岩脉分析

脉岩侵入可分早、晚两期,早期多沿白岗岩近东西向断裂侵入(NE70° ~ SE100°)呈岩墙状,分布较规律;晚期岩脉以中基性为主,分布规律差,常常穿插白岗岩和早期岩脉。早期岩脉有花岗斑岩、石英正长斑岩;晚期岩脉多为中基性,如闪长玢岩、辉绿玢岩、二长岩、球粒状正长斑岩等。岩脉产状:①60°∠77°,0.35m;②105°∠40°,0.40m;③100°∠50°,0.40m;④90°∠60°,0.20m;⑤96°∠55°,0.10 ~ 0.20m;⑥100°∠65°,2 ~ 3m。岩脉走向赤平投影见图 3。

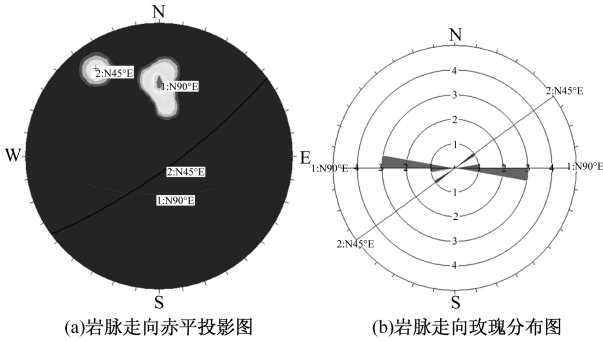


图 3 岩脉走向赤平投影图与玫瑰分布图

Fig. 3 The stereogram and rosegram of veins strike

可以看出,岩脉的走向与储库的轴线方向夹角较大,近 90°,这有利于洞库围岩的稳定。但由于岩脉延伸较长,与附近节理或剪切破碎带相结合,其可能产生的不稳定块体也需要做好分析预测。岩脉的穿插发育,增加了围岩中的弱结构面,增强了洞库围岩的渗透性,这有利于水密封的形成。

2 块体稳定性分析

地下工程稳定性不仅指在施工完毕的短时间内稳定,而对某些工程要求长期稳定^[6-9]。常用的稳定性评价方法主要包括定性经验类比法、安全系数法、解析分析法、数值模拟法等。本文采用块体分析法,利用 Unwedge 软件对洞库结构面形成的块体进行稳定性分析。

Unwedge^[10]是加拿大 Hoek 等根据石根华块体理论开发的,分析坚硬岩体中开挖所形成的块体稳定性软件。Unwedge 是一个适用于结构不连续及地下开挖所形成的三维楔体稳定性分析的交互式软件,用于分析岩体中存在不连续结构面的地下开挖问题。Unwedge 计算潜在不稳定楔体的安全系数,并可对支

护系统对楔体稳定性的影响进行分析。

2.1 块体理论

块体理论^[11]是一种结构分析方法,借助于拓扑学、集合论、几何学和矢量代数学建立的。块体理论假定结构面为平面,不考虑岩块本身的强度破坏,结构体为刚体,失稳的岩块在各种条件下沿着结构面产生剪切滑移^[12]。块体分析主要有作图法与矢量运算法。

2.2 关键块体的判别方法

岩体洞室开挖卸荷后,在工程作用力和自重作用下,首先失稳运动的块体称为“关键块体”^[13]。关键块体的判别是通过力学分析从可动块体中找出。力学分析是依据作用于可动块体上的力的平衡方程计算在不同运动形式下块体的净滑动力值 F 。当其剩余下滑力大于零时,该块体为关键块体;反之,为稳定块体。

(1)脱离岩体运动

$F = |\vec{r}|$,即 F 等于块体自重。

(2)沿单面滑动

$F = |\hat{n}_i \times \vec{r}| - |\hat{n}_i \cdot \vec{r}| \tan \varphi_i$

式中: φ_i —裂隙面 i 的内摩擦角。

(3)沿双面滑动

$$F = \frac{1}{|\hat{n}_i \times \hat{n}_j|^2} [|\vec{r} \cdot (\hat{n}_i \times \hat{n}_j)| \cdot |\hat{n}_i \times \hat{n}_j|] - |(\vec{r} \times \hat{n}_j) \cdot \hat{n}_i \times \hat{n}_j| \tan \varphi_i - |\vec{r} \times \hat{n}_i| \cdot |\hat{n}_i \times \hat{n}_j| \tan \varphi_j |$$

对于计算所得的净滑动力 F ,若 $F > 0$,则块体为关键块体,必须加以锚固。反之 $F < 0$,则块体为可能失稳的块体。

2.3 主洞库不稳定块体分析

该洞室水平延伸,走向由北向南,洞室断面宽 7m,边墙垂高 26m,长度为 302 ~ 336m。洞室围岩主要受 4 组优势节理影响。节理面产状如表 2 所示,倾角普遍较陡,大于 45°或近垂直方向,走向倾向于东西方向,与洞库的主轴方向相垂直。

表 2 优势节理发育产状

Table 2 The characters of dominant fractures				
分组	1 组	2 组	3 组	4 组
优势产状	100°∠60°	45°∠65°	75°∠70°	160°∠75°
平均迹长(m)	6.5	4.3	5.7	2.8
强度参数	$c = 0\text{MPa}, \varphi = 20^\circ$			

假定岩体密度为 2.6t/m³;节理是二维连续的;节理特征可用 Mohr-Coulomb 准则描述,节理粘结力为 0MPa,节理摩擦角分别为 16°和 30°;分析中忽略原始地应力对楔形体稳定性的实际影响;实际上楔形体是四面体,在 Unwedge 中由三个相交的不连续体界定;假设自动安全系数等于或大于 1.5 时的安全条件。从结果中,可预计最大楔形体 8.63m,较大的楔形体为 5m,其余都在 0.2 ~ 1m 范围内。随机块体分布见图 4,结果见表 3、表 4,图 5 ~ 图 7。

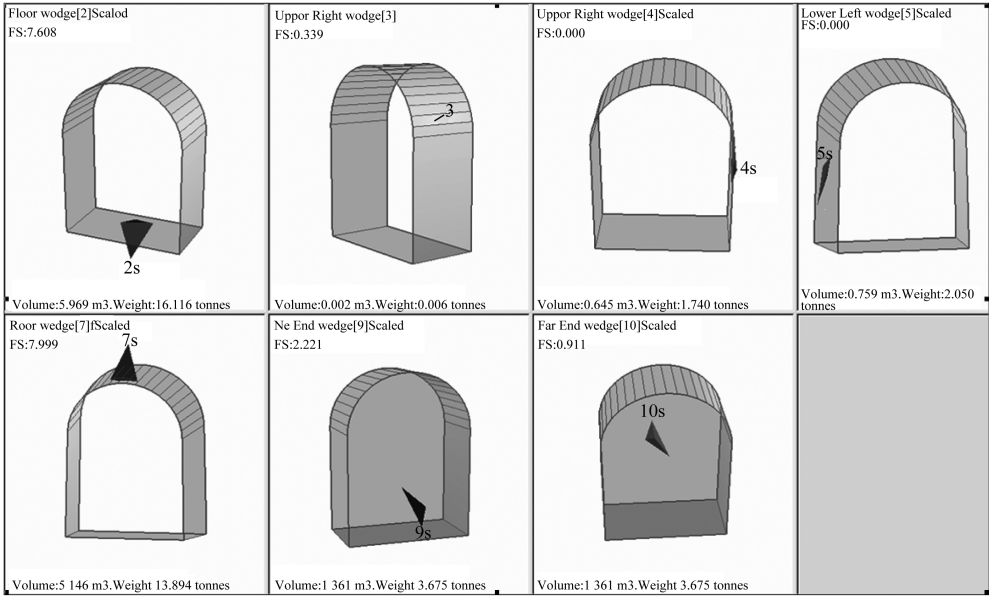


图 4 随机块体的几何形状及位置分布

Fig. 4 The location and form of random block

表 3 随机块体的几何尺寸及稳定性
Table 3 The stability and geometric dimensioning
of random blocks

位置	体积 (m ³)	重量 (t)	稳定性系数 F_s
顶部 (7)	5.146	13.894	7.999
东边墙 (3)	0.002	0.006	0.339
东边墙 (4)	0.645	1.74	0
东边墙 (5)	0.759	2.05	0
底板 (2)	5.969	16.116	7.608
端部 (9)	1.361	3.675	2.221
端部 (10)	1.361	3.675	0.911

表 4 主洞块体稳定性分析成果表
Table 4 The main carern block stability

节理组组合	局部点	无支护安全系数	楔形体重量 (t)	楔形体定点 (m)
J1-J2-J4	顶部 [4]	0.33	4.07	5
	侧墙 [7]	0.21	1.08	0.29
J2-J3-J4	顶部和侧墙 [6]	0.27	90.2	8.63
	侧墙 [4]	0.27	8.14	1
	侧墙 [7]	0.051	0.17	0.39
J4-R1-R2	墙壁 [8]	0.0	1.32	0.46
	侧墙 [3]	0.21	0.425	0.22

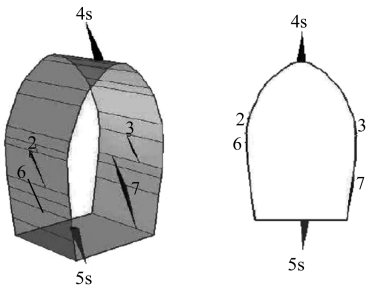


图 5 节理组 J1-J2-J4 形成的楔形体
Fig. 5 Wedge formed by J1-J2-J4 sets

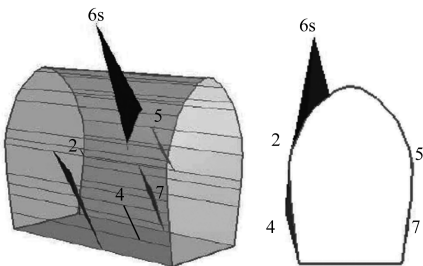


图 6 节理组 J2-J3-J4 形成的楔形体
Fig. 6 Wedge formed by J2-J3-J4 sets

分析结果表明,发生大型不稳定楔形体的关键地区是洞库拱腰和侧墙。如果不进行支护,预计这些地点的楔形体将会很大而且不稳定。

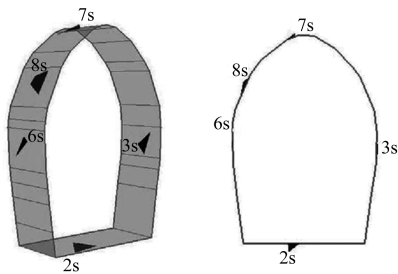


图 7 节理组 J4-R1-R2 形成的楔形体
Fig. 7 Wedge formed by J4-R1-R2 sets

3 结论

(1) 本文利用块体理论对洞库区域内优势节理组合可能产生的不稳定块体进行了分析,分析表明,在洞库的拱顶只有少量不稳定块体产生,在 J2-J3-J4 节理组合的洞冠和侧墙产生较大不稳定块体,在开挖时做好地质素描及支护工作。

(2) 通过采用岩石块体理论对主洞室节理面分析,表明在主洞开挖的过程中有形成潜在楔形块体的可能,在开挖中要做好围岩监测,合理台阶开挖顺序,及时支护,必要时采用锚索等支护手段。

(3) Unwedge 没有考虑到地应力场及水的影响,只能粗糙的进行块体稳定性的评价。在使用中应有其他的软件协同分析相互印证补充。

参考文献:

[1] 袁广祥,尚彦军,史永跃,等. 与地下石油储备库有关工程地质问题研究现状和对策[J]. 工程地质学报, 2006,14 (6):792-800.
YUAN Guangxiang, SHANG Yanjun, SHI Yongyue, et al. Engineering geological issues and measures for storage of oil and gas in underground rock caverns [J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14 (6): 792-800.
[2] 王芝银,郭书太,李云鹏,等. 地下储油岩洞数值模拟的正交试验设计[J]. 油气储运, 2006, 25(9): 33-35.
WANG Zhiyin, GUO Shutai, LI Yunpeng, et al. Orthogonal experimental design of numerical simulation for underground petroleum storage caverns [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2006, 25(9): 33-35.
[3] 段亚刚. 地下大型储备库洞室断面形状优化及合理间距研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
DUAN Yagang. Optimization of cross sections and distance of large underground storage cavern [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007.
[4] Goodman R E, Shi G. . Block theory and its application to

- rock engineering [M]. Englewood cliffs: Prentice Hall, 1985.
- [5] 陈奇, 武强, 李俊彦. 地下水封石洞油库地质灾害危险性评估—以山东某地下水封石洞油库工程为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(4): 138–141.
- CHEN Qi, WU Qiang, LI Junyan. Some problems of geologic hazard evaluation for underground water-sealed oil storage cave—Taking an oil storage cave in Shandong Province for example [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2006, 17(4): 138–141.
- [6] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1990: 106–107.
- ZHOU Weiyuan. Higher rock mechanics [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 1990: 106–107.
- [7] 胡夏嵩. 低地应力区地下洞室围岩稳定性研究[D]. 西安: 长安大学, 2002.
- HU Xiasong. The study of stability evaluation of surrounding rockmass of underground excavation in the region with low rock stress [D]. Xi'an: Chang'an University, 2002.
- [8] 黄达. 大型地下洞室开挖围岩卸荷变形机理及其稳定性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2007.
- HUANG Da. Study on unloading deformation mechanism and stability of excavating surrounding rock mass of large underground caverns [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007.
- [9] 李攀峰, 张倬元. 某大型地下洞室群围岩稳定性分类研究[J]. 工程地质学报, 2004, 12(1): 25–30.
- LI Panfeng, ZHANG Zhuoyuan, TAO Lianjin. Stability ranking system of rockmass surrounding a large-scale underground cavern group [J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(1): 25–30.
- [10] Unwedge User's Guide. 3D visualization of potentially unstable wedges in the rock surrounding underground excavations and calculation of factors of safety and support requirements for these wedges, 1992–1999 Rocscience, Inc.
- [11] 刘锦华, 吕祖珩. 块体理论在工程岩体稳定性分析中的应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1986: 9–54.
- LIU Jinghua, LU Zuhang. Block theory and its application to stability analysis of engineering rockmass [M]. Beijing: Waterpower Press, 1986: 9–54.
- [12] 李华晔. 地下洞室围岩稳定性分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- LI Huaye. Stability analysis of underground cavern [M]. Beijing: China Waterpower Press, 1999.
- [13] 张华奇, 邬爱清, 石根华. 关键块体理论在百色水利枢纽地下厂房岩体稳定分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2609–2614.
- ZHANG Huaqi, WU Aiqing, SHI Genhua. The application of key block theory in Baise waterpower underground plant [J]. Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2609–2614.

The block stability analysis of main cavern of Huangdao liquefied petroleum gas storage

LIU Wei-tao¹, SHEN Jian-jun¹, HE Shou-ying²

(1. College of Mining and Safety Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. Qingdao Institute of Surveying and Mapping Survey, Qingdao, Shandong 266032, China)

Abstract: Because of the LPG underground storage characteristic of high side-wall, large span, and without lining – up et al, in order to solve the problem of stability of surrounding rock, ensure the long – term safety and stable operation of underground excavations, based on the drilling data and analysis on construction of geological of roadway, this paper analyzed main structural surfaces joints, faults and dykes of the occurrence of Huangdao LPG underground storage using stereographic projection method. According to the block theory, this paper forecasted the LPG main cavity potential unstable geometry size and stability of the block based on the block stability analysis program Unwedge. The results show that in the arch of storage cavern, only few unstable block appears, and the J2-J3-J4 jointing combination top and side walls is the key areas of occurring large unstable wedge, which has provided the main theoretical foundation for the supports design.

Key words: LPG underground storage; projection; block theory; unwedge; stability analysis