

我国某地下油库预可行性研究 地应力测量及其应用分析

侯硯和¹, 孙炜锋², 陈群策¹, 王宝君³, 陈少楠³

(1. 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085; 2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
3. 黑龙江煤田地质 108 勘探队, 黑龙江 鸡西 158100)

摘要: 本文运用水压致裂地应力测量方法, 对我国某地下油库预可行性研究工程场区两个钻孔进行了地应力测量。测量结果表明: 最大和最小水平主应力 (S_H , S_h) 都远大于对应深度处的垂向应力 (S_v), 三向主应力的关系为: $S_H > S_h > S_v$, 应力大小在该深度范围属中等偏大级别; 工程场区最大水平主应力方向近 EW 方向, 与测点外围确定的区域最大水平主应力总体方向较为一致; 建议未来地下硐库长轴接近 EW 分布, 地应力状态、岩体结构构造、岩石强度等基本保证了其岩体稳定性。

关键词: 地下油库; 水压致裂地应力测量; 地应力状态

中图分类号: TU457

文献标识码: A

0 前言

随着我国国民经济的快速发展, 石油消费量快速增长, 对国外石油资源的依赖度日益提高。为提高对国际突发事件的应变能力、保障国家经济安全, 我国应及早建立安全稳定的国家石油储备体系。为此, 我国地下油库建设已提到议事日程, 为确保未来地下硐室岩体稳定性, 对预选库址进行地应力测量及其应用分析是十分必要的。

1 工程场区地质条件概况

1.1 地形地貌

研究地区属于低山风化剥蚀丘陵地貌, 地表为第四系覆盖, 局部基岩出露, 场区内有高程分别为 34.1m 和 32m 的两个小山包连成 NE 向的脊部。工程场区面积约为 1km²。

1.2 地质构造

研究区大地构造位于东亚濒太平洋大型多字型构造体系第二沉降带的松辽平原。根据收集到的场区 1:5 万地质图、1:20 万水文地质图、1:50 万地质图、1:100 万构造图、1:100 万

收稿日期: 2006-03-28

作者简介: 侯硯和 (1961-), 男, 工程师, 从事原地应力测试及应力场研究。通讯地址: 中国地震局地壳应力研究所, 北京 2855 信箱, 邮编 100085。

岩浆岩图等资料，其中只有 1:50 万地质图中有一条推测断层穿过场区，经野外实地核查，发现地表断层迹象出露不明显，仅在局部见到节理密集带，经物探和钻探证实该断层不存在。发育两组构造节理，即 NNW 和 NE 走向，倾角较大。

1.3 地层岩性

(1) 燕山早期花岗岩 (γ_5^{2-2})

场区基岩主要为早白垩世的中粗粒碱长花岗岩，呈 NW—SE 椭圆形。岩石呈浅肉红色，风化层为黄褐色，粗粒结构，块状构造。主要矿物成分为斜长石、钾长石、石英等。地表岩石风化强烈，呈砂土状。根据钻探资料，本区全风化和强风化层厚度大于 15m。

(2) 燕山晚期岩脉

以岩脉形式侵入于燕山早期花岗岩中，主要有细晶花岗岩脉、闪长岩脉和辉绿岩脉、石英斑岩脉、伟晶岩脉等，沿构造节理方向展布。

2 水压致裂法地应力测试及应用分析

工程场区进行了 2 个钻孔 (ZK-1 和 ZK-3) 水压致裂地应力测试 (测试原理及方法见文献^[1-2])，ZK-1 和 ZK-3 钻探深度分别为 135.95m 和 130.28m。下面以 ZK-3 为重点对地应力测试结果及其应用进行分析和讨论。

2.1 ZK-3 钻孔地应力测试结果及分析

根据测试要求以及岩芯情况，选取了 6 个深度段作为水压致裂应力测量的试验段，其中心深度分别为：28.00m、41.00m、71.00m、85.00m、101.00m、115.00m。现场测试记录曲线如图 1 所示。对上述 6 个测段曲线进行分析可以发现，本次试验获得的 6 个测段的压裂曲线形态完整，各压裂参数点 (破裂压力、重张压力和关闭压力) 比较明确。测试结果分别见表 1 和图 2。根据对压裂测试曲线的综合分析，选定了测段中心深度分别为 41.00m、85.00m、115.00m 的 3 个试验段进行印模定向试验，据此获得最大水平主压应力方向分别为 N73°E、N79°E、N86°E (表 1 和图 3)。

表 1 ZK-3 钻孔水压致裂应力测量结果

Table 1 Results of hydrofracturing in situ stress measurements at hole ZK-3

测段深度 (m)	测试参数						应力测试结果			
	P_H	P_o	P_b	P_r	P_s	T	S_h	S_H	S_v	应力方向
28.00	0.28	0.28	19.65	8.21	6.23	11.44	6.23	10.20	0.76	
41.00	0.41	0.41	14.89	6.36	5.57	8.53	5.57	9.94	1.11	N73°E
71.00	0.71	0.71	10.71	6.66	4.68	4.05	4.68	6.67	1.92	
85.00	0.85	0.85	11.25	6.21	4.62	5.04	4.62	6.80	2.30	N79°E
101.00	1.01	1.01	15.30	7.56	6.37	7.74	6.37	10.54	2.73	
115.00	1.15	1.15	19.01	8.69	7.10	10.32	7.10	11.46	3.11	N86°E

注： P_H 为水柱压力， P_o 为孔隙压力， P_b 为破裂压力， P_r 为破裂重张压力， P_s 为瞬时关闭压力， T 为岩体的原地抗张强度， S_h 和 S_H 分别为测段处的最小和最大水平主应力， S_v 是按上覆岩体埋深计算的测段处垂向应力，岩石密度取为 2.7g/cm^3 。应力单位：MPa。

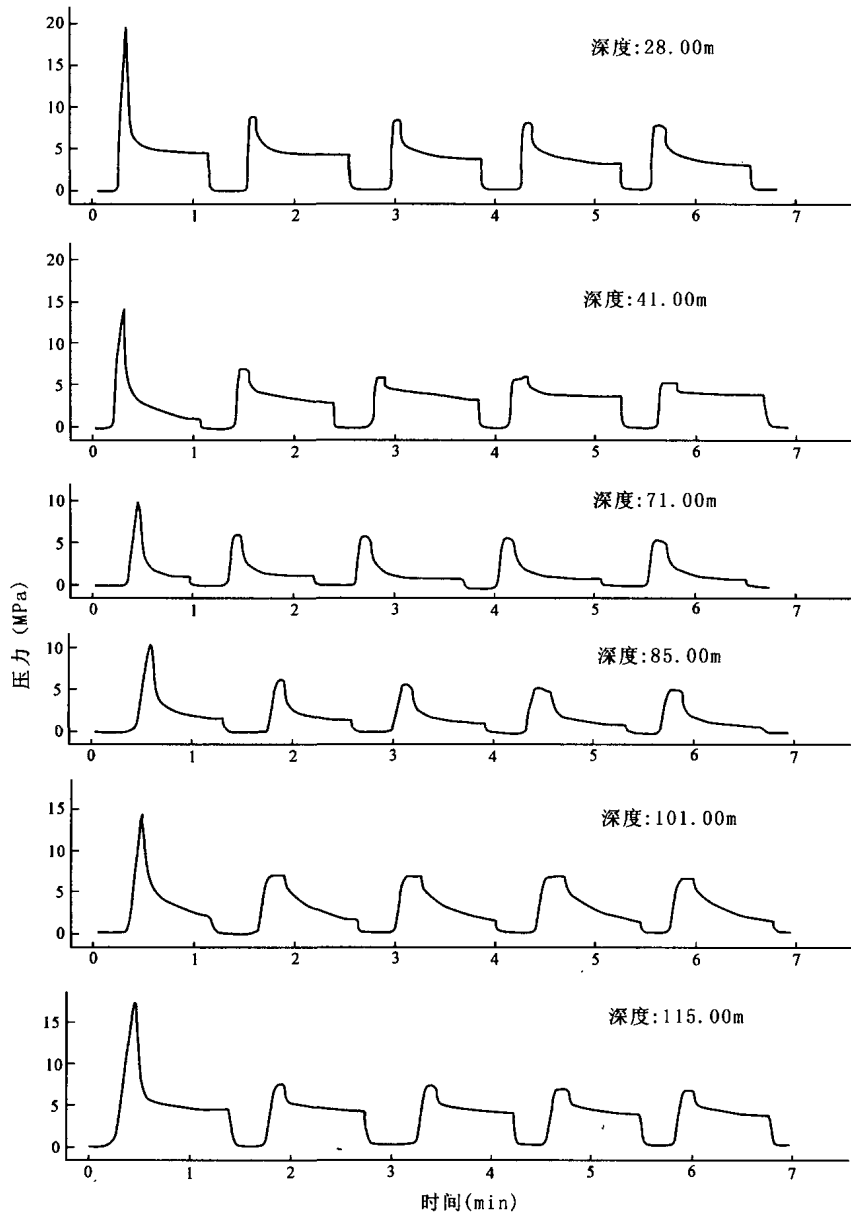


图 1 ZK- 3 钻孔水压致裂应力测量记录曲线

Fig.1 Record curve of hydrofracturing in situ stress measurements at hole ZK-3

对该孔的测试结果进行分析可知，在孔深 28.00m~115.00m 的测试深度范围内，最大水平主应力的量值范围为 6.67~11.46MPa，最小水平主应力的量值范围为 4.62~7.10MPa，将地应力实测结果与按上覆岩层厚度计算得到的垂向应力相比较，对于每一个测试深度段，最大和最小水平主应力都远大于垂向应力，三向主应力的关系表现为： $S_H > S_h > S_v$ ，据此可以认为，该测孔附近存在明显的现今水平构造应力作用，水平构造运动较强烈。根据三个测段印模测试结果得到的最大水平主应力的方向分别为 N73°E、N79°E、N86°E，显示了很好的一致性，表明测区附近最大水平主应力的优势作用方向为 NEE。

另外，从图 2 中可以看出，在孔深 60~85m 左右的深度范围内，应力值明显偏低，这与该深度范围内岩石的完整程度及其岩石力学性质有关，有关综合对比分析见表 2。

2.2 地应力测试结果可靠性分析

应力大小量级属中等偏大，一是由于测点位于东亚濒太平洋构造体系的第二沉降带，二是说明测点地区花岗岩的岩石强度较大。实测地应力大小在钻孔深部变化趋于正常；最大水平主压应力方向比较集中，总体而言，最大水平主应力的方向为近东西方向，与测点外围区域通过震源机制、水压致裂、应力解除、钻孔崩落等确定的区域最大水平主应力总体方向较为一致（图4）^[3-15]。因此，深部所测地应力状态可以反映区域应力场的基本特征。

2.3 未来地下硐库设计建议和岩体稳定性初步分析

依据研究区区域最大水平主应力方向近EW向、岩体中小型裂隙井下数值成像统计表明主体方向为近SN向、地下硐室长轴方向平行最大水平主压应力方向有利于硐室岩体稳定性的工程实践和力学分析、野外露头节理统计等等，建议未来地下硐库长轴方向接近EW向设计分布，地应力状态、岩体结构构造、岩石强度等基本保证了其岩体稳定性，同时也不会发生岩爆等地质灾害，具体有待三维地应力场和岩体稳定性评价进一步分析。

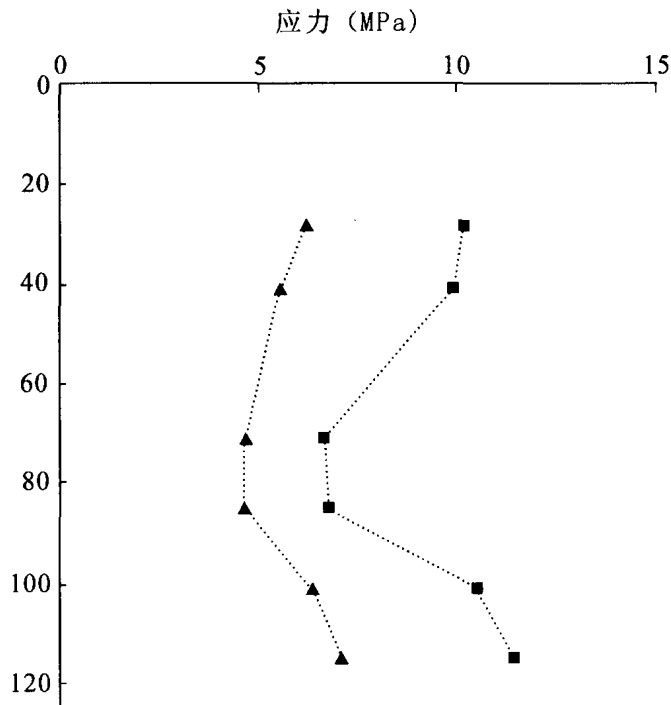


图2 ZK-3 钻孔应力随深度分布图
(黑色三角代表最小水平主应力，黑色方块代表最大水平主应力)。
Fig.2 Stress variation with depth of hole ZK-3

表2 ZK-3 钻孔地应力测量结果与岩石的完整程度以及其岩石力学性质综合对比
Table 2 Comparison of the results of hydrofracturing in situ stress measurements with the rock quality designation (RQD) and rock mechanics at hole ZK-3

测段深度 (m)	应力测试结果 (MPa)		岩石的完整 程度 (RQD)	岩石力学试验	
	S _{II}	S _h		单轴抗压强度 (MPa)	抗张强度 (MPa)
28.00	10.20	6.23	95	93.259	10.345
41.00	9.94	5.57	92	83.424	8.178
71.00	6.67	4.68	53	78.479	6.231
85.00	6.80	4.62	89	82.122	5.404
101.00	10.54	6.37	95	97.313	7.499
115.00	11.46	7.10	100	96.815	10.322

3 结论

综合上述测试结果及初步分析，得到以下认识和结论：

(1) 地应力测试结果表明，工程场区最大和最小水平主应力都远大于对应深度处的垂向应力，三向主应力的关系为： $S_H > S_h > S_v$ ，据此可以认为，该区存在较强的现今水平构造应力作用。

(2) 在孔深 28.00m ~ 115.00m 的测试深度范围内，最大水平主应力的量值范围为 6.67 ~ 11.46MPa，最小水平主应力的量值范围为 4.62 ~ 7.10MPa。

(3) 钻孔印模定向试验表明，工程场区最大水平主应力方向近 EW 方向，与测点外围其他方法确定的区域最大水平主应力总体方向较为一致。

(4) 建议未来地下硐库长轴接近 EW 分布，地应力状态、岩体结构构造、岩石强度等基本保证了其岩体稳定性。

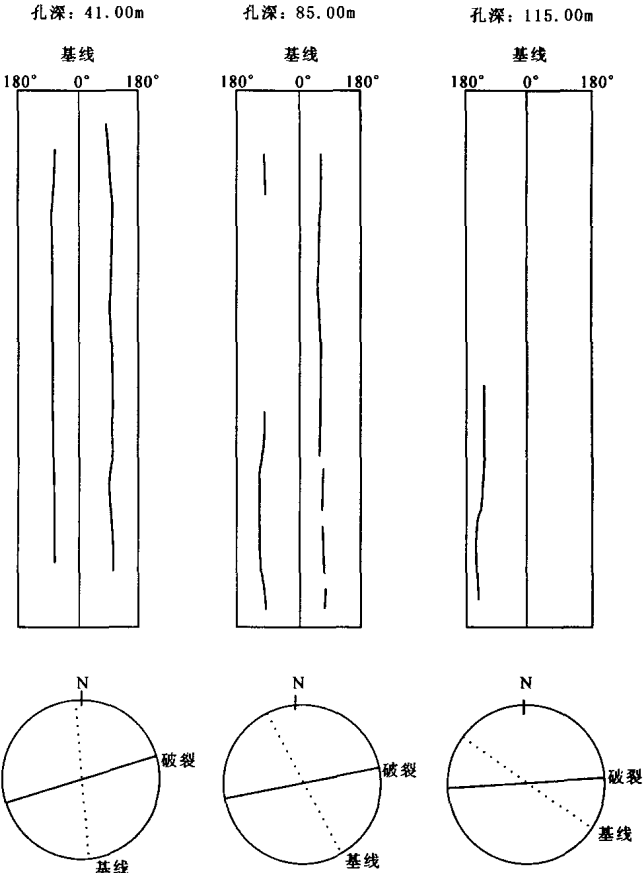


图 3 ZK-3 钻孔印模测试结果
Fig.3 Results of mold measurements of the maximum horizontal principal stress direction at hole ZK-3

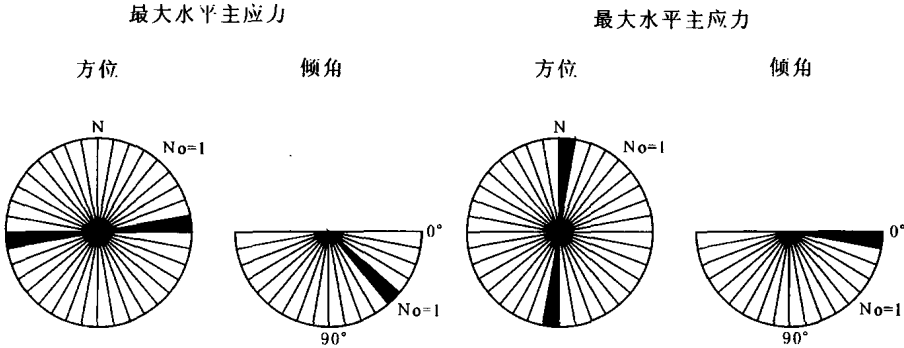


图 4 区域最大水平主应力方向玫瑰花图 (数据范围：E121°-124°、N40°40'-42°)
Fig.4 Rose diagrams of the regional maximum horizontal principal stress directions

参 考 文 献

[1] 国际岩石力学学会试验方法委员会确定岩石应力建议方法，方法 2：采用水压致裂技术确定岩石应力的建议方法 [J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstract. 1987, 24 (1): 53 ~ 73.

- [2] 白世伟, 李光煜. 二滩水电站岩体应力场研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 1982, 1 (1): 45 ~ 55.
- [3] 陈彭年, 陈宏德, 等. 世界地应力实测资料汇编 [M]. 北京: 地震出版社, 1990.
- [4] 李方全, 张伯崇, 等. 三峡坝区水库诱发地震研究 - 茅坪钻孔的现场测试与分析 [M]. 北京: 地震出版社, 1993.
- [5] 陈庆宣, 王维襄, 等. 岩石力学与构造应力场分析 [M]. 北京: 地质出版社, 1998.
- [6] 向文, 李辉. 重力场与构造应力场内在关系的理论研究 [J]. 地壳形变与地震, 1999, 19 (1): 32 ~ 36.
- [7] 游永雄. 重力转换区域构造应力场的研究 [J]. 地球物理学报, 1994, 37 (增刊 II): 259 ~ 271.
- [8] 谭成轩, 孙叶, 等. 构造应力面研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (23): 3970 ~ 3978.
- [9] 谭成轩, 孙叶, 等. 地应力测量值得注意的若干问题 [J]. 地质力学学报, 2003, 9 (3): 275 ~ 280.
- [10] 谢富仁, 崔效锋, 等. 中国大陆及邻区现代构造应力场分区 [J]. 地球物理学报, 2004, 47 (4): 654 ~ 662.
- [11] 谢富仁, 陈群策, 等. 中国大陆地壳应力环境基础数据库, 中国大陆地壳应力环境研究 [M]. 北京: 地质出版社, 2003.
- [12] Martin CD. Characterizing in-situ stress domains at the AECL underground research laboratory [J]. Canadian Geotechnical Journal. 1990, 27: 631 ~ 646.
- [13] Zoback ML. First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map Project [J]. Journal Geophys Res, 1992, 97 (B8): 11703 ~ 11728.
- [14] McGarr A. On the state of lithospheric stress in the absence of applied tectonic forces [J]. Journal Geophys Res, 1988, 93: 13609 ~ 13617.
- [15] Tan Chengxuan, Wang Ruijiang, Sun Ye, et al. Numerical modeling estimation of the 'tectonic stress plane (TSP)' beneath topography with quasi-U-shaped valleys [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41 (2): 303 ~ 310.

IN SITU STRESS MEASUREMENT AND ITS APPLICATION IN THE PRE-FEASIBILITY STUDY OF AN UNDERGROUND OIL RESERVOIR IN CHINA

HOU Yan-he¹, SUN Wei-feng², CHEN Qun-ce¹, WANG Bao-jun³, CHEN Shao-nan³

(1. Geostress Institute of State Seismic Bureau, Beijing 100085, China;

2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;

3. No. 108 Geological Party of Heilongjiang Coal Exploration, Jixi 158100, Heilongjiang, China)

Abstract: Hydrofracturing in situ stress measurements were used to determine in situ stress states of two drill holes for the pre-feasibility study of an underground reservoir at an engineering site in China. Both the maximum and minimum horizontal principal stresses (S_H and S_h) are by far greater than the vertical stress (S_v) at the same depth, and the S_H and S_h are higher than the normal stress state at the depth range, with a relation of $S_H > S_h > S_v$. The maximum horizontal principal stress direction is nearly E-W, which is in accord with the general direction of the regional maximum horizontal principal stress determined by measuring points in surrounding areas. The authors suggest that the long axis of the underground reservoir should be oriented in a nearly E-W direction in the future, and the in situ stress state, rock mass structure and rock strength will in the main ensure the rock mass stability.

Key words: underground oil reservoir; hydrofracturing in situ stress measuring; in situ stress state