

文章编号: 1006-6616 (2016) 01-0114-11

# 地下水封油库工程中三维地应力 测量及其应用

郭书太<sup>1</sup>, 崔少东<sup>1</sup>, 王成虎<sup>2</sup>, 孟静<sup>3</sup>, 谭成轩<sup>3</sup>

(1. 中国石油天然气管道工程有限公司, 河北 廊坊 065000;

2. 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085;

3. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

**摘要:** 地下水封油库是一种复杂的地下工程, 在施工期间开展岩体原位应力三维测量, 对设计的开挖和支护方案进行检验和复核, 有利于设计优化和指导施工。采用水压致裂测量方法, 在油库内南北水平、东西水平和垂直3个方向钻探成孔进行地应力测量, 综合3个方向的地应力测量结果, 计算确定三维地应力大小和方向。计算结果验证了设计所使用的勘察阶段地应力测量结果的可靠性, 检验和复核了设计施工方案的合理性, 并进一步评价了地下水封油库围岩稳定性。

**关键词:** 地下水封油库; 三维地应力测量; 油库围岩稳定性

**中图分类号:** P553

**文献标识码:** A

大型地下水封油库是一个复杂的地下空间结构, 在有限的范围内, 包含了三维空间相互交叉或重叠的储油洞室、水幕系统、施工巷道、竖井等。尤其对于大跨度、高边墙的储油洞室, 高度往往达到20~30 m, 宽度在20 m左右。这些地下空间要求尽量以无衬砌岩洞的形式存在, 并且必须要保证50 a甚至更长时间的长期稳定性。原岩应力的存在对洞室稳定性有重要影响<sup>[1]</sup>, 因此有必要对岩体的地应力大小和方向进行测量, 以便对洞室的布置、设计优化和长期稳定性做出可靠的判断<sup>[2~8]</sup>。本文对于正在建设中的某地下水封油库, 在洞室开挖完成后, 于洞室内选取适当的位置进行三维地应力测量, 验证了设计时所用的勘察阶段地应力测量结果的可靠性, 检验和复核了设计的开挖和支护方案的合理性, 为地下工程的安全性评估和油库的运营管理提供了准确的基础数据。

## 1 工程场地条件

本文研究的某地下水封油库拟建库容为 $300 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 储油洞室底板在地表下100 m左右。库址属于低缓丘陵地貌, 占地约 $1 \text{ km}^2$ , 地面高程17~43 m, 表层被第四系覆盖, 局部

收稿日期: 2015-10-29

作者简介: 郭书太 (1966-), 教授级高级工程师, 主要从事岩土工程、油气储运工程等方面的勘察、设计和研究工作。E-mail: cppe\_guost@cnpc.com.cn

通讯作者: 谭成轩 (1964-), 博士, 研究员, 主要从事构造应力场、区域地壳稳定性评价等研究工作。E-mail: tanchengxuan@tom.com

出露基岩。

该地下水封油库大地构造位置属中朝准地台燕山台褶带山海关台拱与辽西台陷交接部位东缘的北镇凸起, 位于朝阳穹褶断束和绥中凸起的交汇处。场区外有3组区域断裂: 近东西向断裂、北东向断裂和北西向断裂, 距离较远, 都在12 km之外, 不会产生直接影响。

场区岩性主要为燕山期花岗岩, 平面形态呈北西—南东的椭圆形, 出露面积7.6 km<sup>2</sup>, 岩石呈浅肉红色, 中粒结构, 块状构造; 含有辉绿岩、角闪闪长玢岩、花岗斑岩等岩脉。表层风化, 全风化及强风化层厚度15~30 m。

## 2 三维地应力测量

### 2.1 测量方法

水压致裂法地应力测量是国际岩石力学学会试验方法委员会颁布的确定岩石应力所推荐的方法, 也是目前国际上能较好地直接进行深孔应力测量的先进方法<sup>[9~10]</sup>。该方法无需知道岩石的力学参数就可获得岩体中现今地应力大小和方向, 并具有操作简便、可在任意深度进行连续或重复测试、测量速度快、测值可靠等特点。

在钻孔内进行的水压致裂法, 是基于与钻孔轴向垂直的二维应力测量方法, 因此只能获得垂直于钻孔轴向的二维应力场。要想获得三维应力场, 需要对相互垂直交汇的3个钻孔分别进行应力测量, 每一个钻孔建立各自的应力平衡方程, 通过坐标变换求解出大地坐标系下的主应力方向和大小<sup>[11~12]</sup>。

### 2.2 测点布置

三维地应力测点位于其中一个洞室内, 包括3个测孔: 东西向水平钻孔JZNS-1、南北向水平钻孔JZWE-2和垂直钻孔JZVZK-3。3个钻孔的布置如图1所示, 其中JZNS-1孔深30.00 m, JZWE-2孔深30.00 m, JZVZK-3孔深60.00 m。

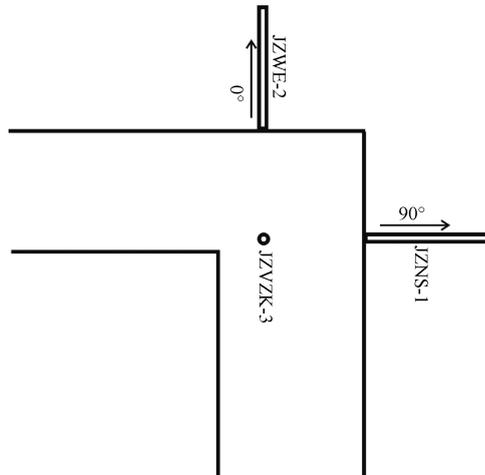


图1 锦州某地下水封油库内地应力测点钻孔布置示意图

Fig. 1 The sketch map showing the arrangement of drilling boreholes for in-situ crustal stress measurement in an underground water-sealed oil storage cave in Jinzhou city

为确保测试结果的可靠性, 根据岩芯状况, 在钻孔中共选择多个深度段进行水压致裂地应力测量, 压裂段长度为0.55 m, 选择在无裂隙的完整岩石、孔径均匀处。

### 2.3 试验结果

按照国际岩石力学学会试验方法委员会推荐的水压致裂法测试程序进行测量, 经资料整理得出各压裂段的破裂压力 ( $P_b$ )、裂缝重张压力 ( $P_r$ )、裂缝闭合压力 ( $P_s$ ) 以及对应的水头压力 ( $P_H$ ) 和孔隙压力 ( $P_0$ ) 等压力参数, 根据压力参数分别计算出各压裂段的最大次主应力 ( $S'_H$ )、最小次主应力 ( $S'_h$ ) 和岩体的原位抗张强度  $T$  [13-15]。

为确定最大次主应力方向, 在部分压裂测试段进行了定向印模测试, 所得印模痕迹清晰、可靠。

JZNS-1 和 JZWE-2 钻孔中水压致裂地应力测量结果如表 1、表 2 所示。

表 1 锦州某地下水封油库水平钻孔 JZNS-1 水压致裂应力测量结果

Table 1 The hydrofracturing crustal stress measurements of JZNS-1 horizontal borehole in an underground water-sealed oil storage cave in Jinzhou city

序号	测试段深度/m	压裂参数/MPa						应力值/MPa		$S'_H$ 方向/(°)
		$P_b$	$P_r$	$P_s$	$P_H$	$P_0$	$T$	$S'_H$	$S'_h$	
1	4.60~5.15	17.63	3.37	3.78	0.00	0.00	14.26	7.97	3.78	
2	6.60~7.15	18.29	3.93	4.09	0.00	0.00	14.36	8.34	4.09	
3	8.60~9.15	17.31	4.64	4.31	0.00	0.00	12.67	8.29	4.31	
4	12.60~13.15	17.95	3.80	4.25	0.00	0.00	14.15	8.95	4.25	
5	14.60~15.15	14.33	4.50	4.38	0.00	0.00	9.83	8.64	4.38	
6	16.60~17.15	20.41	3.94	4.31	0.00	0.00	16.47	8.99	4.31	
7	18.60~19.15	19.14	4.50	4.61	0.00	0.00	14.64	9.33	4.61	
8	20.60~21.15	9.23	4.89	4.87	0.00	0.00	4.34	9.72	4.87	
9	22.60~23.15	12.93	5.18	4.94	0.00	0.00	7.75	9.64	4.94	
10	24.60~25.15	11.65	3.64	2.85	0.00	0.00	8.01	4.91	2.85	
11	26.60~27.15	18.52	3.88	3.91	0.00	0.00	14.64	7.85	3.91	13
12	28.30~28.85	12.85	4.01	3.93	0.00	0.00	8.84	7.78	3.93	18

表 2 锦州地下水封油库水平钻孔 JZWE-2 水压致裂应力测量结果

Table 2 The hydrofracturing crustal stress measurements of JZWE-2 horizontal borehole in an underground water-sealed oil storage cave in Jinzhou city

序号	测试段深度/m	压裂参数/MPa						应力值/MPa		$S'_H$ 方向/(°)
		$P_b$	$P_r$	$P_s$	$P_H$	$P_0$	$T$	$S'_H$	$S'_h$	
1	4.60~5.15	17.12	4.95	4.35	0.00	0.00	12.17	8.10	4.35	
2	6.60~7.15	17.20	4.71	4.82	0.00	0.00	12.49	9.75	4.82	
3	8.60~9.15	17.16	5.30	4.77	0.00	0.00	11.86	9.01	4.77	
4	10.60~11.15	16.93	5.26	5.08	0.00	0.00	11.67	9.98	5.08	
5	12.60~13.15	15.70	5.12	4.89	0.00	0.00	10.58	9.55	4.89	
6	14.60~15.15	16.73	4.72	4.52	0.00	0.00	12.01	8.84	4.52	
7	16.60~17.15	16.77	4.70	4.42	0.00	0.00	12.07	8.56	4.42	
8	18.60~19.15	16.83	4.45	4.69	0.00	0.00	12.38	9.62	4.69	
9	20.60~21.15	17.45	4.58	4.77	0.00	0.00	12.87	9.73	4.77	
10	22.60~23.15	17.49	4.90	5.01	0.00	0.00	12.59	10.13	5.01	
11	24.60~25.15	18.83	4.40	4.25	0.00	0.00	14.43	8.35	4.25	
12	26.60~27.15	20.17	4.89	5.30	0.00	0.00	15.28	11.01	5.30	15
13	28.60~29.15	16.71	5.34	5.15	0.00	0.00	11.37	10.11	5.15	25

JZNS-1 和 JZWE-2 钻孔中实测最大、最小次主应力大小随水平深度的变化曲线见图 2。从图 2 可以看出, 应力大小在测试水平深度范围内相对较为稳定、变化不大。其中 JZNS-1 在测深为 24.60 ~ 25.15 m 深度的应力值相对较小, 经现场钻孔岩芯观察, 与该试验段附近原生裂隙较发育有关, 水压致裂使原生裂隙重张, 故应力值偏低。

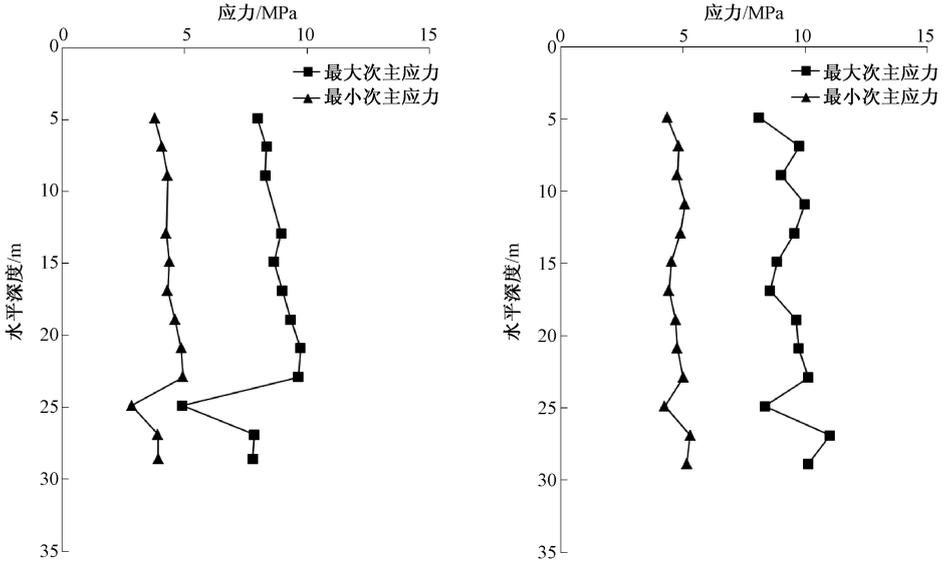


图 2 JZNS-1 (左) 与 JZWE-2 (右) 实测主应力大小随水平深度变化  
Fig. 2 Variation of measured principal stress magnitudes along with horizontal depth in JZNS-1 and JZWE-2 boreholes

钻孔 JZVZK-3 水压致裂地应力测量结果见表 3, 其随垂直深度的变化曲线如图 4。

表 3 锦州地下水封油库垂直钻孔 JZVZK-3 水压致裂应力测量结果

Table 3 The hydrofracturing crustal stress measurements of JZVZK-3 vertical borehole in an underground water-sealed oil storage cave in Jinzhou city

序号	测试段深度/m	压裂参数/MPa						应力值/MPa			$S_H$ 方向/(°)
		$P_b$	$P_r$	$P_s$	$P_H$	$P_0$	$T$	$S_H$	$S_h$	$S_v$	
1	6.60 ~ 7.15	17.12	4.79	4.42	0.06	0.06	12.33	8.41	4.42	3.09	N84°E
2	10.60 ~ 11.15	16.19	4.62	4.03	0.10	0.10	11.57	7.37	4.03	3.20	N58°W
3	14.60 ~ 15.15	15.64	3.94	3.57	0.14	0.14	11.70	6.63	3.57	3.31	
4	18.60 ~ 19.15	13.87	3.98	3.88	0.18	0.18	9.89	7.48	3.88	3.42	
5	22.60 ~ 23.15	15.68	4.02	3.96	0.22	0.22	11.66	7.64	3.96	3.53	N67°E
6	26.60 ~ 27.15	16.93	4.76	4.56	0.26	0.26	12.17	8.66	4.56	3.63	
7	30.60 ~ 31.15	18.41	5.80	5.58	0.30	0.30	12.61	10.64	5.58	3.74	N83°E
8	34.60 ~ 35.15	20.28	7.23	6.61	0.34	0.34	13.05	12.26	6.61	3.85	N88°E
9	38.60 ~ 39.15	14.32	5.68	5.66	0.38	0.38	8.64	10.92	5.66	3.96	
10	44.60 ~ 45.15	18.40	5.74	5.64	0.44	0.44	12.66	10.74	5.64	4.12	
11	48.60 ~ 49.15	17.58	6.54	6.22	0.48	0.48	11.04	11.64	6.22	4.23	N76°E
12	52.60 ~ 53.15	20.87	7.60	7.33	0.52	0.52	13.27	13.87	7.33	4.34	N87°W
13	56.60 ~ 57.15	21.90	8.91	8.93	0.55	0.55	12.99	17.33	8.93	4.44	

从图 4 可以看出, 应力大小在 30.6 m 以上的测试深度范围内相对较为稳定, 变化不大; 但是从 30.6 m 开始, 最大、最小水平主应力大小随深度的增加而逐步增大。同时最大水平

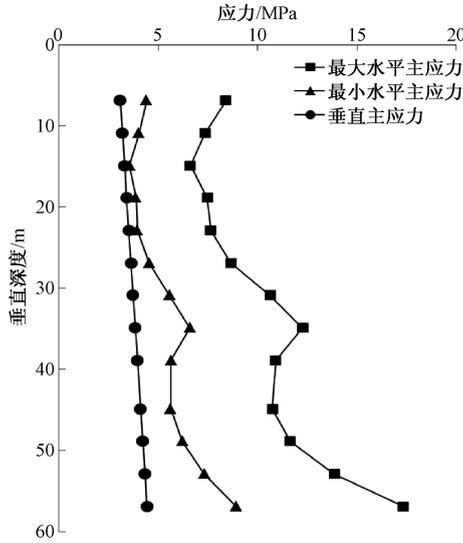


图4 JZVZK-3 实测主应力大小随垂直深度变化趋势

Fig. 4 The variation of measured principal stress magnitudes along with vertical depth in JZVZK-3 borehole

主应力方向在 30.6 m 以上和 30.6 m 以下也有较大的变化, 30.6 m 以上的最大水平主应力方向数据相对较为离散, 但 30.6 m 以下的最大水平应力方向数据较为稳定, 为近东西向。

### 2.4 三维地应力计算

运用三维地应力计算方法<sup>[11~12]</sup>, 依据 JZNS-1、JZWE-2、JZVZK-3 钻孔的二维地应力测量结果及其相对应的钻孔空间方位参数, 进行综合计算, 即可确定地下 110 m 深度三维地应力状态。三维地应力结果见表 4, 其主应力空间位置见图 5。

表 4 锦州某地下水封油库三维应力计算结果

Table 4 The 3D crustal stress calculated results in an underground water-sealed oil storage cave in Jinzhou city

主应力	量值/MPa	方位角/(°)	仰角/(°)	倾伏向
最大主应力 ( $\sigma_1$ )	11.56	59.86	12.32	NEE
中间主应力 ( $\sigma_2$ )	5.84	329.82	11.70	NNW
最小主应力 ( $\sigma_3$ )	3.07	0.27	-78.18	SN

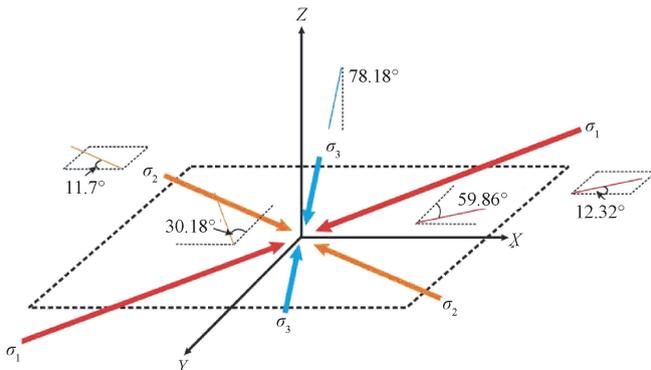


图5 锦州某地下水封油库内水压致裂三维地应力测量结果

Fig. 5 The results of 3D crustal stress measurements using hydrofracturing method in an underground water-sealed oil storage cave in Jinzhou city

根据三维主应力状态分析可知, 该测点附近的地应力状态为构造应力和自重应力的共同作用, 且水平构造应力起主导作用。

### 3 三维地应力测量的可靠性分析

#### 3.1 地应力大小

地下水封油库前期勘察阶段布置了5个140 m深度的垂直钻孔进行水压致裂地应力测量, 综合分析5个钻孔地应力测量结果<sup>[16-17]</sup>, 获得了地下水封油库区主应力随深度的变化趋势(见图6)。从图6可以看出, 主应力大小总体随垂直深度的增加而增加, 在测试深度范围内, 最大水平主应力( $S_H$ )、最小水平主应力( $S_h$ )和垂直主应力( $S_V$ )三者的大小关系为 $S_H > S_h > S_V$ , 表明该地区岩体内水平应力占主导地位。因为地下水封油库储油洞室和水幕系统的埋深范围为80~120 m, 将这一深度范围内的主应力值进行加权平均, 勘察阶段测得的最大、最小水平主应力的平均值分别为10.21 MPa和6.24 MPa, 地下埋深110 m处的垂直应力值为3.03 MPa。而利用三孔交汇水压致裂法测得的三维应力状态为:  $\sigma_1 = 11.56$  MPa、 $\sigma_2 = 5.84$  MPa、 $\sigma_3 = 3.07$  MPa,  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$ 的仰角分别为 $12.32^\circ$ 、 $11.7^\circ$ 、 $-78.18^\circ$ ,  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 近水平, 而 $\sigma_3$ 近垂直。通过对比分析可以看出, 此次三孔交汇测得的最大、中间和最小主应力与前期勘察阶段测得的最大、最小水平主应力和垂直主应力大小相当, 验证了前期地应力测量结果的可靠性, 检验和复核了设计施工方案的合理性。

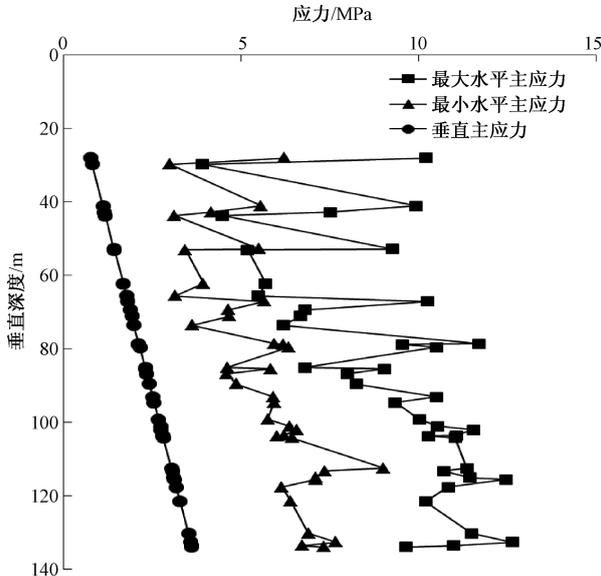


图6 锦州某地下水封油库勘察阶段垂直钻孔地应力测量主应力大小随深度变化

Fig. 6 The variation of principal stress magnitudes obtained at surveying stage along with depth in vertical drilling boreholes of an underground water-sealed oil storage cave in Jinzhou city

#### 3.2 最大主应力方向

表5、图7为地下水封油库区6个垂直钻孔(前期勘察阶段5个和施工期间1个)地应力测量获得的最大水平主应力方向统计结果。

表5 锦州某地下水封油库垂直钻孔地应力测量最大水平主应力方向统计  
Table 5 The statistics of maximum horizontal principal stress orientations in an underground water-sealed oil storage cave in Jinzhou city

孔号	印模段中心深度/m	最大水平主应力方向	孔号	印模段中心深度/m	最大水平主应力方向
ZK1	79.5	N78°E	ZK11	65.5	N77°E
	115.5	N33°E		103.5	N67°E
	132.5	N72°W		121.5	N87°E
ZK3	41.0	N73°E		133.9	N83°E
	85.0	N79°E		116.9	N84°E
	115.0	N86°E	120.9	N58°W	
ZK8	78.7	N62°E	122.9	N67°E	
	93.0	N65°E	JZVZK-3	130.9	N83°E
	104.2	N68°E	134.9	N88°E	
	113.2	N54°W	148.9	N76°E	
	43.7	N82°E	152.9	N87°W	
ZK12	69.3	N71°E			
	99.0	N62°E			

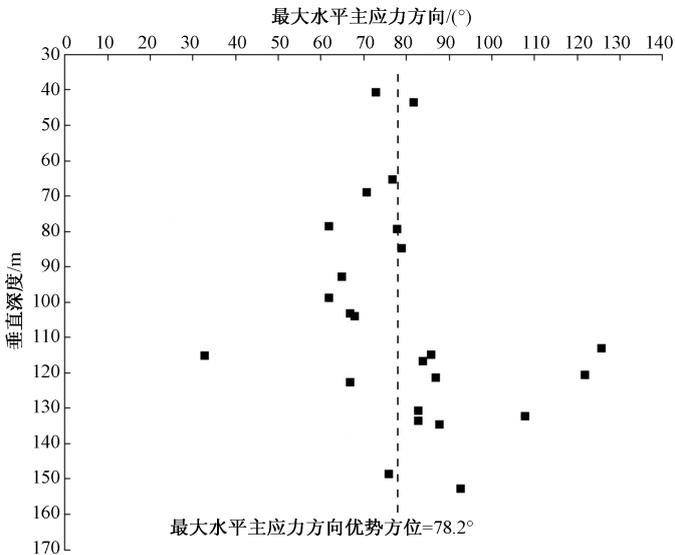


图7 锦州某地下水封油库垂直钻孔最大水平主应力方向随深度变化

Fig. 7 The variation of maximum horizontal principal stress orientations along with depth in vertical drilling boreholes of an underground water-sealed oil storage cave in Jinzhou city

由表5和图7可以看出,垂直钻孔实测最大水平主应力方向优势方位为N78.2°E,而通过三孔交汇地应力测量确定的最大主应力方向为N59.86°E,二者较为接近,并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方向(北东东—近东西,见图8)较为一致<sup>[18-19]</sup>。

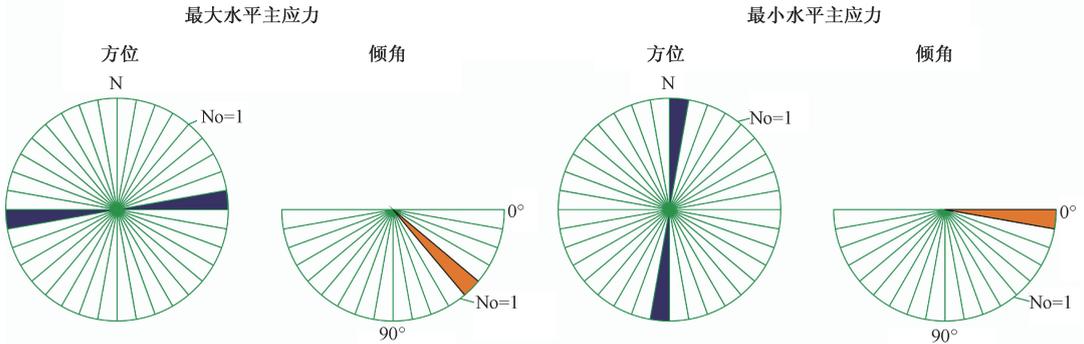


图 8 区域最大、最小水平主应力方向玫瑰花图

Fig. 8 The rose diagram of regional maximum and minimum horizontal principal stress directions

### 3.3 岩体原位抗拉强度分析

由于水压致裂法可以在同一段上连续进行多次测量, 大量的实测结果表明, 初次破裂与其后的重张有显著差别。一般情况下, 破裂压力 ( $P_b$ ) 大于重张压力 ( $P_r$ )。初次破裂不仅要克服岩石所承受的压应力, 而且还要克服岩石本身的抗拉强度 ( $T$ )。而破裂后重张只需克服作用在破裂面上的压应力, 显然二者之差就是岩石的原位抗拉强度, 即  $T = P_b - P_r$ 。

各孔的地应力测量结果中均给出了具有明显破裂压力测段的岩体原位抗拉强度值, 总体看来, 完整岩体中的抗拉强度较高, 一般在 7.75 ~ 15.28 MPa。需要指出的是, 实际钻孔中由于岩体结构构造的非均匀性, 测量得到的原位测量抗拉强度变化较大, 在构造破碎带附近的测量结果往往较小。本文给出的是原位测试结果, 直接反映了岩体的实际力学性质, 为洞室稳定性分析提供了重要数据。

## 4 地应力场对地下水封油库围岩稳定性的影响分析

在水平主应力大于垂直主应力的情况下, 最大水平主应力方向与油库轴线方向夹角越小, 洞壁上承受的压力最小, 越有利于油库稳定; 而最大水平主应力方向与油库轴线方向垂直相交时, 最不利于油库的稳定<sup>[2~4,16]</sup>。设计阶段考虑了最大、最小水平主应力对油库稳定性的影响, 油库沿东西向布置, 而且洞顶采用较平缓的三心拱形, 也有利于洞室的稳定。

该地区岩石的抗压强度在 80 ~ 100 MPa, 利用强度应力比法评价该工程场区原位应力条件属于中等<sup>[3]</sup>, 不属于高应力状态, 对工程稳定性影响相对较小; 按照开挖后洞室截面周边最大应力和洞室围岩岩体强度之比的分析计算结果, 洞室轴线沿最大水平主应力方向布置, 在开挖过程中, 地下洞室围岩基本以线弹性变形为主, 这一变形破坏特征与地下油库在施工阶段的变形破坏特征基本符合。

三维地应力测量结果与前期二维应力测量结果大小基本一致, 在方向上存在约 18° 的偏差, 由于差异较小, 复核计算结果表明围岩变形仍然以弹性为主, 洞室围岩的变形特征和量值变化不大, 洞室仍是稳定的。

油库内 JZVZK-3 垂直钻孔水压致裂原位地应力测量研究表明, 在深度 35 m 左右存在一

个由于洞库开挖引起的应力集中范围；在 45 m 以下主应力大小具随垂直深度逐渐增大的变化趋势，并且最大水平主应力方向也相对稳定；地下油库的围岩应力松弛区可能在 45 m 的范围内；此次洞内垂直钻孔深度 30 m 以上实测地应力平均值与前期勘察阶段相应深度的实测地应力平均值对比分析显示，最大、最小水平主应力分别降低了 25% 和 35%。

## 5 结论

通过油库内水压致裂三维地应力测量，获得了可靠的地应力大小和方向，其与前期勘察阶段获得的二维地应力测量结果基本一致，进而验证了设计所使用的勘察阶段地应力测量结果的可靠性，检验和复核了设计施工方案的合理性和有效性，进一步评价了地下水封油库围岩稳定性，为未来地下水封油库的安全运营提供了保障。

理论分析可知，由于垂直钻孔水压致裂地应力测量只能获得与钻孔轴向垂直的二维应力，而三维应力测量结果可能与二维应力测量结果存在较大的差异，因此对于重要地下工程，建设过程中在地下空间采用三维地应力测量方法进行地应力大小和方向的复核是非常必要的，有利于对设计的优化和施工的指导。

## 参 考 文 献

- [1] 刘允芳. 岩体地应力与工程建设 [M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2000.  
LIU Yun-fang. Geo-stress and engineering construction [M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2000.
- [2] 王成虎, 刘立鹏, 郭启良, 等. 地应力测量数据分析及对工程稳定性控制设计的意义 [J]. 工程地质学报, 2008, 16 (S): 377~381.  
WANG Cheng-hu, LIU Li-peng, GUO Qi-liang, et al. One method to analyze the measured in-situ stress data and its significance to the project stability design [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16 (Suppl.): 377~381.
- [3] 王成虎, 郭启良, 丁立丰, 等. 工程区高地应力判据研究及实例分析 [J]. 岩土力学, 2009, 30 (8): 2359~2364.  
WANG Cheng-hu, GUO Qi-liang, DING Li-feng, et al. High in-situ stress criteria for engineering area and a case analysis [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30 (8): 2359~2364.
- [4] 谭成轩, 孙伟锋, 孙叶, 等. 地应力测量及其地下工程应用的思考 [J]. 地质学报, 2006, 80 (10): 1627~1632.  
TAN Cheng-xuan, SUN Wei-feng, SUN Ye, et al. A consideration on in-situ crustal stress measuring and its underground engineering application [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80 (10): 1627~1632.
- [5] 谭成轩, 孙叶, 王连捷. 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.  
TAN Cheng-xuan, SUN Ye, WANG Lian-jie. Some problems of in-situ crustal stress measurements [J]. Journal of Geomechanics, 2003, 9 (3): 275~280.
- [6] 景锋, 盛谦, 张勇慧, 等. 不同地质成因岩石地应力分布规律的统计分析 [J]. 岩土力学, 2008, 29 (7): 1877~1883.  
JING Feng, SHENG Qian, ZHANG Yong-hui, et al. Statistical analysis of geostress distribution laws for different rocks [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29 (7): 1877~1883.

- [ 7 ] Martin C D. Characterizing in-situ stress domains at the AECL underground research laboratory [J]. Canadian Geotechnical Journal. 1990, 27: 631 ~ 646.
- [ 8 ] 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.
- [ 9 ] Haimson B C, Cornet F H. ISRM suggested methods for rock stress estimation (Part 3): Hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF) [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40: 1011 ~ 1020.
- [10] 尤明庆. 水压致裂法测量地应力方法的研究 [J]. 岩土工程学报, 2005, 27 (3): 350 ~ 353.  
YOU Ming-qing. Study on the geo-stress measurement with hydro-fracture of borehole [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27 (3): 350 ~ 353.
- [11] 陈群策, 安美建, 李方全. 水压致裂法三维地应力测量的理论探讨 [J]. 地质力学学报, 1998, 4 (1): 37 ~ 44.  
CHEN Qun-ce, AN Mei-jian, LI Fang-quan. Theoretical discussion on 3-D hydraulic fracturing in situ stress measurement [J]. Journal of Geomechanics, 1998, 4 (1): 37 ~ 44.
- [12] 侯明勋, 葛修润. 三维地应力计算模型研究 [J]. 岩土力学, 2007, 28 (10): 2017 ~ 2021.  
HOU Ming-xun, GE Xiu-run. Study on a calculation model for 3D in-situ rock stress tensor [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28 (10): 2017 ~ 2021.
- [13] 丰成君, 陈群策, 吴满路, 等. 水压致裂应力测量数据分析——对瞬时关闭压力 PS 的常用判读方法讨论 [J]. 岩土力学, 2012, 33 (7): 2149 ~ 2159.  
FENG Cheng-jun, CHEN Qun-ce, WU Man-lu, et al. Analysis of hydraulic fracturing stress measurement data: Discussion of methods frequently used to determine instantaneous shut-in pressure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33 (7): 2149 ~ 2159.
- [14] 侯明勋, 葛修润, 王水林. 水力压裂法地应力测量中的几个问题 [J]. 岩土力学, 2003, 24 (5): 840 ~ 844.  
HOU Ming-xun, GE Xiu-run, WANG Shui-lin. Discussion on application of hydraulic fracturing method to geostress measurement [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24 (5): 840 ~ 844.
- [15] 中国地震局地壳应力研究所, 日本电力中央研究所. 水压致裂裂缝的形成和扩展研究 [M]. 北京: 地震出版社, 1999: 82.  
Institute of China Seismological Bureau crustal stress, Japan Central Research Institute of Electric Power Industry. Research on information and extension of hydro-fractures [M]. Beijing: Seismological Press, 1999: 82.
- [16] 王成虎, 郭啟良, 侯硯和, 等. 地下水封油库场址地应力场及工程稳定性分析研究 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32 (5): 698 ~ 705.  
WANG Cheng-hu, GUO Qi-liang, HOU Yan-he, et al. In-situ stress field and project stability of underground water-sealed oil depots [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32 (5): 698 ~ 705.
- [17] 侯硯和, 孙伟锋, 陈群策, 等. 我国某地下油库预可行性研究地应力测量及其应用分析 [J]. 地质力学学报, 2006, 12 (2): 197 ~ 202.  
HOU Yan-he, SUN Wei-feng, CHEN Qun-ce, et al. In situ stress measurement and its application in the pre-feasibility study of an underground oil reservoir in China [J]. Journal of Geomechanics, 2006, 12 (2): 197 ~ 202.

- [18] 谢富仁, 陈群策, 崔效锋, 等. 中国大陆地壳应力环境研究 [M]. 北京: 地质出版社, 2003.  
XIE Fu-ren, CHEN Qun-ce, CUI Xiao-feng, et al. Crustal stress in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003.
- [19] Zoback M L. First-and second-order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map Project [J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97 (B8): 11703 ~ 11728.

## 3D IN-SITU CRUSTAL STRESS MEASUREMENT AND ITS APPLICATION TO UNDERGROUND WATER-SEALED OIL STORAGE CAVE ENGINEERING

GUO Shu-tai<sup>1</sup>, CUI Shao-dong<sup>1</sup>, WANG Cheng-hu<sup>2</sup>, MENG Jing<sup>3</sup>, TAN Cheng-xuan<sup>3</sup>

(1. China Petroleum Pipeline Engineering Corporation, Langfang 065000;

2. Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085;

3. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081)

**Abstract:** Underground water-sealed oil storage cave is a complex underground project. 3D in-situ crustal stress measurement in the constructing process, which can be used to test and re-check for the design scheme of cave excavation and support, is advantageous to the design optimization and the construction. In-situ crustal stress measurements by hydrofracturing method in drilling boreholes along a three dimensional Cartesian coordinate system are conducted, and then the reliable 3D crustal stress magnitudes and directions are calculated from those measuring results. This 3D results examined the in-situ measurements at surveying stage used for designing, and verified the rationality of the design and construction scheme. In addition, the stability of surrounding rock of underground water-sealed oil storage cave was further assessed using the 3D results.

**Key words:** Underground water-sealed oil storage cave; 3D in-situ crustal stress measurement; stability of surrounding rock of cave