

34-42 海上油井密封套管内海水
冻胀特性试验分析* TE5孟广琳¹ 李志军¹ 隋吉学¹ 高树刚¹ 张波² TE551.2¹ (国家海洋环境监测中心, 大连 116023)² (辽河石油勘探局海洋石油开发公司, 盘锦 124000)

摘要 1998年首次进行了海上油井密封套管内海水冻胀特性模拟试验, 建立了一套各种参数的测量系统。文中介绍了管内海水冻结过程、海水过冷温度、结冰水温、轴向冻胀力以及管体应变测量结果。

关键词 套管, 冻胀, 应力, 应变

海上油井、海水

辽河油田盖州滩海区蕴藏着丰富的海底石油天然气资源, 已探明控制和预测地质储量超过1亿t。目前正在开展滨海油田的勘探、钻井以及试采工作。该油田位于我国冰情最严重的结冰海区, 以目前辽河油田现有的条件, 冬季还无法生产, 入冬前必须对已完成的油井进行封井。为了获取将海水注入套管能否保证暴露于空气段的安全越冬数据资料, 1998年9~11月国家海洋环境监测中心与辽河石油勘探局海洋石油开发公司首次对海上井口段海水冻胀特性进行了试验研究。

1 模拟条件和试验装置

在辽东湾冬季寒冷环境中, 灌注海水密封井管在冻结过程中的原型实际被分为三段, 即潮间带上部暴露在空气中的可完全冻结段、中部潮间带的过渡冻结段和潮间带下部保持海水结冰温度的永远不冻结段。模拟条件需考虑的因素包括: 不同重现期的年最低气温、海水的结冰水温、N-80套管内灌注海水并且密封。

采用的试验装置考虑原型条件的各种要素要求, 原则上按原型的三段环境温度条件进行设计。由于是首次进行这类试验, 对一些原型条件进行了简化和替代, 方案如图1所示。

试验中用电冰柜气温替代自然气温, 在电冰柜内设置一隔热恒温箱, 用恒温箱可控气温替代海水结冰温度。模型井管钢材的钢级为N-80, 内径为161.7 mm, 壁厚8.05 mm, 外长度为1010 mm, 在管内灌注盐度 $S = 23.434$ 的海水并进行密封。

2 测试内容及其方法

井管冻胀试验的目的主要是研究井管灌注海水密封后在各种低温环境条件下的海水冻结

收稿日期: 1999-03-20

*国家自然科学基金(49776278)资助

过程、管内结冰水温、结冰冻胀力、以及管体的冻胀变形和破坏程度。拟定的模拟气温的最低温度为: -3°C 、 -5°C 、 -7°C 、 -10°C 、 -15°C 、 -20°C ; 模拟水温(恒温箱)温度为 -1.2°C 。

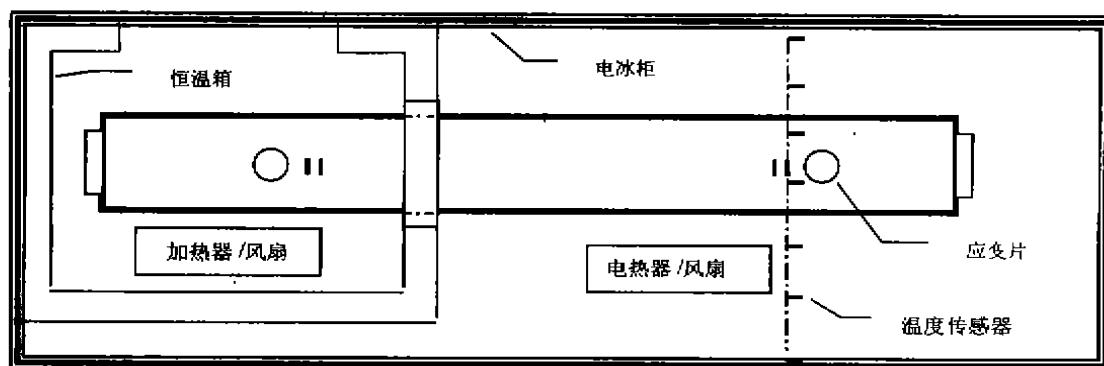


图1 试验简化模型

模拟低温环境温度采用了电冰柜降温和传感器测控电加热器调节温度的方法。测定管内海水冻结过程的温度场分布采用一组(7个)热敏电阻温度传感器, 7个热敏电阻在管内的安排如图2所示。如图1所示, 测定管外模拟气温和模拟水温各采用一个热敏电阻温度传感器; 电冰柜和恒温箱的温度控制采用两路温控组件进行测控; 利用一个液压压力传感器, 将其安装在恒温箱内的井管端部来测定结冰轴向冻胀力变化过程; 利用两个标准电阻应变片, 将其分别安装在模拟气温段管体外壁和模拟水温段管体外壁来测定管体的冻胀应变。

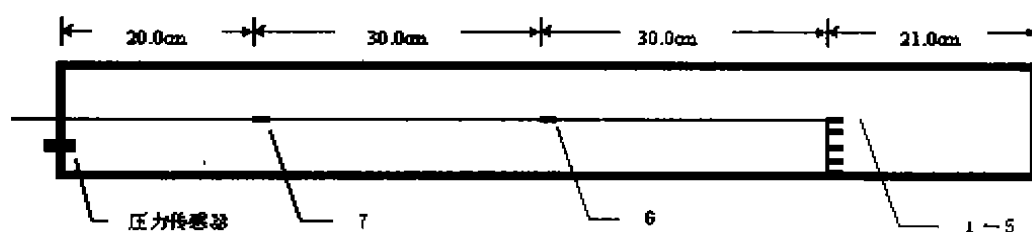


图2 热敏电阻和压力传感器在管内的安排

由上述安排, 试验构成了温度测量系统、压力测量系统、应变测量系统、温度控制系统和辅助观测系统。测量系统均由S319微机数据采集板及其软件控制同步采集和记录数据。

3 海水冻结过程

1998年10月20日~11月25日共进行了6次不同温度的井管海水冻胀模拟试验。第1次至第5次(含有恒温箱模拟水温)试验的典型的海水冻结过程如图3a所示, 第6次(取掉恒温箱, 不模拟水温)试验的海水冻结过程如图4a所示(图3a和图4a中Temp1~Temp7的细微温度变化很

复杂尚难解释,有待另文详细探讨和论述)。

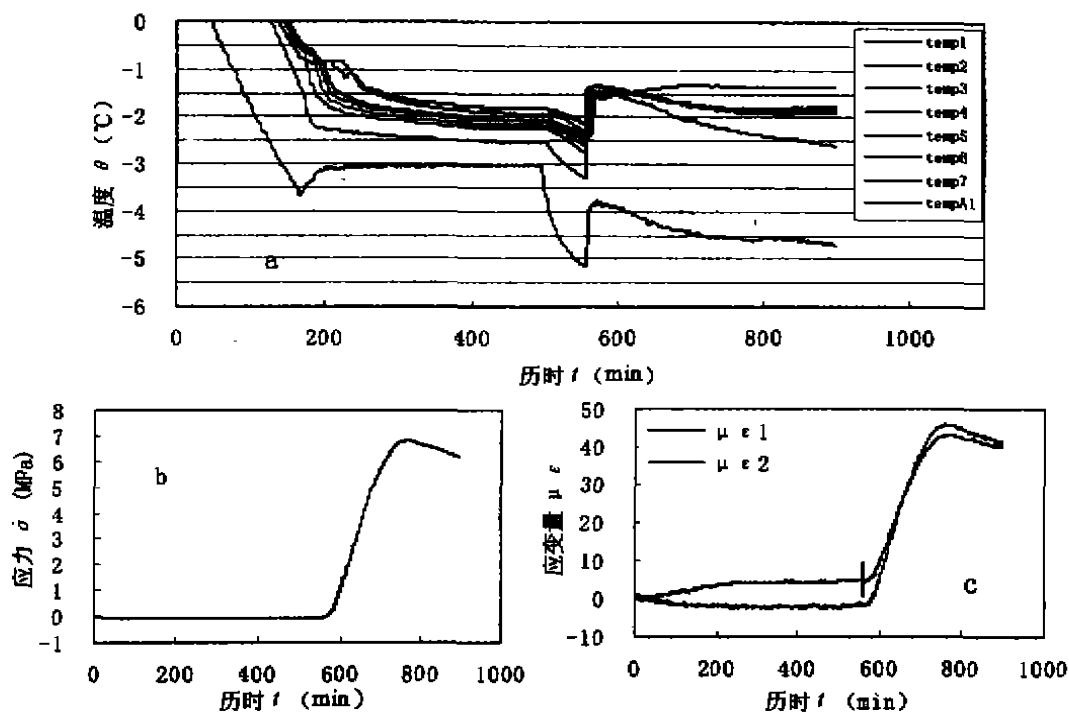


图3 试验2数据中: (a) $\theta-t$; (b) $\sigma-t$; (c) $\mu \epsilon-t$ 关系曲线

图3a的试验结果说明,管内海水冻结过程经历三个阶段:(1)由较高水温达到过冷水温;(2)发生相态激变(系指管内表层水的结冰现象,此时径向内层仍为水)升至结冰水温并开始产生结冰冻胀力;(3)结冰冻胀力增大伴随新的冰—海水相态平衡的结冰温度变化。

图4a的试验结果说明,在不模拟水温即并管两端都暴露于冷气温的情况下,管内海水冻结过程除包括上述过程之外,在模型并管冻胀破坏之时还产生一段卸压后海水二次相态激变产生的温度急速升温和海冰体积急速膨胀的变化,以后随着管内压力的消失,再测量到的管内温度为冰温。

海水冻结过程几个阶段的时间和历时如表1所示。由井管首次渗水(冻胀力下降)的时间可确定相变结冰至渗水过程的历时。

4 海水过冷温度和相变结冰温度

表2给出了海水冻结过程相变前海水的过冷温度和相变后无压力的海水相变结冰温度。由表2可见,过冷海水在管内径向(轴心—管内壁)的温度分布(Temp1~Temp5)是有规律的,径向里部温度高于径向外部温度。管内壁过冷海水最低温度可达 -4.31°C ;轴心过冷海水最低温度可达 -3.00°C 。

相变后海水结冰温度在管内径向的(Temp1~Temp5)温度分布也是有规律的,管内壁温

度除外, 径向里部平均温度低于径向外部平均温度。管内壁海水相变结冰温度最高可达 -1.11°C ; 轴心海水相变结冰温度最高可达 -1.37°C 。由整理出的各次试验相变过程的温度数据说明, 相变首先在井管径向的内壁处出现, 然后逐步扩展至井管的轴心。轴心海水相变结冰温度最低的原因, 理论上可用井管内海水盐度和内压力的变化得到解释, 这两个因素的增大都可以使海水的结冰温度降低。

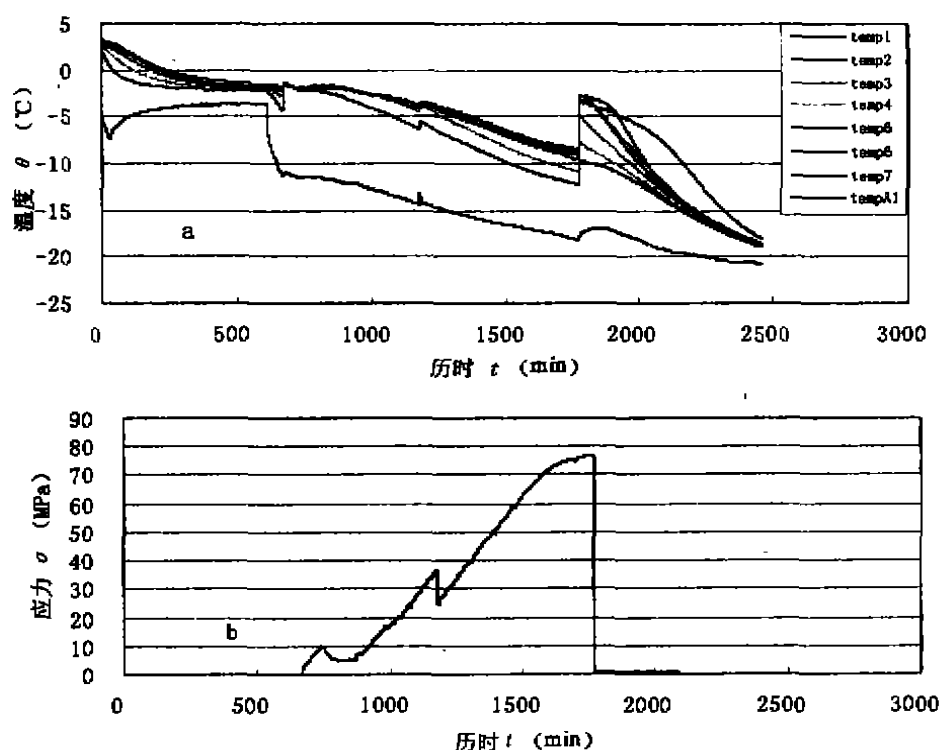


图4 试验6数据中: a $\theta-t$ 、b $\sigma-t$ 关系曲线

表1 海水冻结过程的几个阶段时间和历时

试验	相态激变 时间(min)	首次渗水 时间(min)	二次渗水 时间(min)	螺纹破坏 时间(min)	相变~渗水 历时(min)
1	873~885	1231			358
2	557.0~563.5	768			211
3	609.25~612.70	1051			442
4	618.05~623.00	766			148
5	580.05~584.40	922			342
6	667.20~672.75	745	1180	1773	78
6	二次相态激变时间: 1773~1795(min)				

试验6的温度数据和压力数据说明, 在冻结过程井管产生螺纹破坏时, 由于突然卸载井管内部压力消失, 原在高压、低温状态下处于液体状态的海水立即失去平衡产生相态激

变。由于相变作用潜热远大于冰温变化的内能(热容量), 导致轴心温度的急速升高, 结果如表3所示。

表2 海水相变前的过冷水温度和相变后结冰温度

试验	海水过冷温度(℃)				
	Temp1	Temp2	Temp3	Temp4	Temp5
1	-3.00	-3.06	-3.20	-3.32	-3.53
2	-2.42	-2.49	-2.61	-2.74	-3.29
3	-2.57	-2.62	-2.73	-3.08	-3.87
4	-2.68	-2.70	-2.76	-3.10	-4.11
5	-2.63	-2.64	-2.73	-2.91	-3.53
6	-2.04	-2.11	-2.28	-2.93	-4.31
均值	-2.56	-2.60	-2.72	-3.01	-3.77
试验	海水相变结冰温度(℃)				
	Temp1	Temp2	Temp3	Temp4	Temp5
1	-1.37	-1.33	-1.37	-1.35	-1.40
2	-1.39	-1.35	-1.37	-1.35	-1.40
3	-1.39	-1.35	-1.33	-1.33	-1.38
4	-1.39	-1.31	-1.25	-1.21	-1.20
5	-1.39	-1.27	-1.23	-1.13	-1.11
6	-1.51	-1.39	-1.31	-1.29	-1.28
均值	-1.41	-1.33	-1.31	-1.28	-1.30

表3 试验6中第二次相态激变前后的管内温度

二次相变	Temp1(℃)	Temp2(℃)	Temp3(℃)	Temp4(℃)	Temp5(℃)
相变前	-8.76	-8.53	-9.68	-10.94	-12.30
相变后	-2.78	-2.76	-4.90	-7.76	-9.85

5 轴向冻胀力测量结果

由井管材质的各种参数可了解到, 在井管内结冰冻胀力的作用下, 密封井管的最薄弱环节是井管的密封工艺, 其次是螺纹强度, 最后是管体的断裂强度。测量井管内轴向冻胀力的意义和目的是对密封工艺、螺纹强度和管体材质强度的安全性进行检验和断定。

典型的井管轴向冻胀力—时间曲线如图3b所示。图3b的结果说明, 在管内海水由高温降至过冷水阶段, 海水体积的冷缩大于管体的冷缩, 应力测量结果为负压。管内海水的结冰冻胀力从海水相变阶段开始产生并随井管冻结过程的延续而增大。在冻胀力破坏井管的螺纹外焊接密封(向外渗水)之前, 井管内部的冻胀力可达到最大。各次试验渗水前的最大应力如表4所示。表4的结果说明, 渗水前的最大应力与管外冷气温(TempA1)的温度无关; 由管内海水相变至出现渗水的破坏时间范围在78~442 min之间; 影响轴向冻胀力的主要因素是井管的密封工艺。螺纹外焊接密封工艺的密封强度在6.8~8.8MPa之间; 螺纹外焊接并外涂密封胶工艺可达到较高的密封强度; 螺纹外焊接在冻胀渗水后再在外部仅涂密封胶也可使密封强度达到约10 MPa。

图4b是第六次试验不模拟水温影响的轴向冻胀力—时间曲线。第6次试验是在取出了恒温箱让试验井管完全处于电冰柜的气温下进行的, 目的是检验管体的其它环节抗冻胀能力。

图4b的结果显示了井管冻胀破坏的几个重要阶段:(1)海水相变前,冻胀力为负压;(2)相变后冻胀力随井管冻结过程的延续而增大,在渗水前后出现第一个峰值;(3)在二次渗水前后出现冻胀力的第二个较大峰值;(4)螺纹完全胀坏前的最大冻胀力。

表4 各次试验渗水前的最大应力及有关参数

试验	TempA1	破坏时间	渗水前应力	密封工艺
1	-4.40	358	8 240	螺纹外焊接
2	-4.58	211	6.818	螺纹外焊接
3	-5.36	442	7 485	螺纹外焊接
4	-9.70	148	8.797	螺纹外焊接
5	-13.46	342	22.076	螺纹外焊接外涂密封胶
6	-11.49	78	9 948	外涂密封胶

上述的(1)和(2)阶段结果与图3b相一致,而(3)和(4)阶段是前5次试验(含有模拟水温)不可能出现的现象。对于出现(3)阶段的原因,分析认为,在出现第一次渗水之后,由于管内压力的降低,渗水处微缝隙内的过冷却海水以及管内的径向外层的过冷却海水可立即产生相变结冰,封住了冰体内和渗水处的缝隙,效果上可起到对井管密封的作用,并且其密封强度远大于螺纹外焊接密封工艺的强度。第二个较大峰值的出现仍可认为是冰体密封性质的破坏(渗水)。对出现(4)阶段的原因,分析认为,第二次渗水后仍然是由于管内压力的降低使过冷却海水立即产生相变结冰形成冰体对井管的完全冻结密封造成的。此后由于冰体温度很低,管内高压、低温平衡状态下的海水不能再以液体的形态通过冰体,井管已不存在密封强度问题。管内海水在完全冻结成冰之前,冻胀力随管内结冰过程的延续继续增大直到管体的最薄弱环节——螺纹出现脱扣破坏。在螺纹破坏的同时管内海水出现的相态激变说明,管内冻胀力仍受管体薄弱环节的制约。理论上当管体强度足够大且温度不再降低时,管内的冰和高盐度海水可处于相态平衡,冻胀力不再增大,因受管体薄弱环节的限制,本试验没有测量到相态平衡下的冻胀力。表5给出了第六次试验获得的几个阶段的轴向峰值应力和有关参数。

表5 试验6中几个阶段的轴向峰值应力 σ 和有关参数

峰点	TempA1 温度(℃)	时间位置 (min)	峰值应力 (MPa)	密封工艺
1	-11.49	745	9.948	外涂密封胶
2	-14.34	1180	36.891	
3	-18.20	1773	76.212	

6 管体的应力—应变关系

用电阻应变片测量管体应变的意义和目的是对管体冻胀的变形程度和安全性进行检验和断定,由轴向冻胀力(应力)与管体应变的线性段关系可估算管内径向的冻胀力。

典型的应力—应变关系曲线如图5所示,与图3a、图3b对应的应变时间过程曲线如图3c所示。图5的线性关系说明,在管内轴心及径向内层海水处于相态平衡未冻结的情况下,可认为径向应力与轴向应力相等。第一次至第五次试验的应力—应变关系说明管体的变形处于弹性区范围之内,达到密封强度的应力不会使管体产生屈服变形。

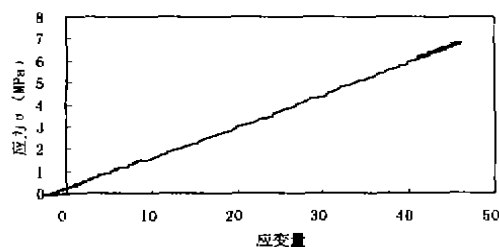


图5 试验2数据中: $\sigma - \mu \varepsilon$ 关系曲线

7 结 论

- 管内海水冻结过程经历三个阶段: (1) 达到过冷水温; (2) 发生相态激变, 过冷水升至结冰水温并开始产生冻胀力; (3) 冻胀力增大伴随新的冰—海水相态平衡的结冰温度变化。
- 管内壁过冷海水最低温度可达 $-4.31\text{ }^{\circ}\text{C}$; 轴心过冷海水最低温度可达 $-3.00\text{ }^{\circ}\text{C}$; 径向里层过冷水温度高于径向外层过冷水温度。
- 管内壁海水相变结冰温度最高可达 $-1.11\text{ }^{\circ}\text{C}$; 轴心海水相变结冰温度最高可达 $-1.37\text{ }^{\circ}\text{C}$, 径向里部平均结冰温度低于径向外层平均结冰温度。
- 在管内结冰冻胀力的作用下, 螺纹外焊接密封井管的最薄弱环节是井管的密封工艺, 其次是螺纹强度。
- 相变前海水体积的冷缩大于管体的冷缩, 管内压力为负压。

作者简介: 孟广琳, 男, 1951年9月出生, 学士, 高级工程师。从事工程海冰专业方面的研究, 曾主持制定国标“工程海冰技术规范”, 在国内外各种刊物发表过40余篇论文。

Analysis of the Test on the Sea Water Frost Heaving Characteristics in the Sealed Bushing of Oil Well in the Sea

Meng Guanglin¹, Li Zhijun¹, Sui Jixue¹, Gao Shugang¹ and Zhang Bo²

¹ National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023

² Liaohe Offshore Petroleum Exploration and Development Company, P.R.China

Abstract First time test on the sea water frost heaving characteristics in sealed bushing of oil well in the sea was made in 1998. A measurement system for the various kinds of parameters is set up. This paper expounds the test results of the freezing process of sea water, the excessive cold temperature of sea water, the frozen water temperature, sea water frost heaving force and the tube strain.

Keywords bushing; frost heaving; stress; posture change