

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2016.04.007

水压下大应变测试密封技术研究

张小平¹, 李克明¹, 顾超华^{1,2}, 孙国有^{1,2}, 郑津洋^{1,2,3}

(1. 浙江大学 化工机械研究所, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江大学 高压过程装备与安全教育部工程研究中心, 浙江 杭州 310027; 3. 浙江大学 流体动力与机电系统国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要:水压下的应变测试中测试系统的密封防护是应变测量成功与否的关键。针对在水压及大应变条件下, 常规密封防护方法易出现密封防护剂松脱, 难以保证绝缘和密封性能的情况, 文章提出了水压下大应变测试的密封技术。通过试验研究了环氧树脂+硅橡胶、硅橡胶对大应变的适应性, 设计了压力温度的补偿方法和应变测试系统的密封工艺。水压为 2.0 MPa, 应变为 4.5% 的实验案例表明, 文章提出的水压下大应变测试密封技术可行并且有效。

关键词:密封技术; 应变测试; 大应变; 防护剂

中图分类号: TB42

文献标志码: A

文章编号: 1005-2895(2016)04-0032-06

Research on Sealing Technology of Large Strain Measurement under Hydraulic Pressure

ZHANG Xiaoping¹, LI Keming¹, GU Chaohua^{1,2}, SUN Guoyou^{1,2}, ZHENG Jinyang^{1,2,3}

(1. Institute of Process Equipment, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. High-Pressure Process Equipment and Safety Engineering Research Center of Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 3. The State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In the strain measurement under the condition of water pressure, the sealing protection of testing system is the key to the success of strain measurement. However, the seal protective agent in the conventional strain measurement under the condition of water pressure and large strain is easy to loose and it is difficult to guarantee insulation and sealing performance. This paper studied the sealing technology of large strain measurement system under hydraulic pressure. Specifically, the epoxy resin and silicone rubber were selected by experimental study, and the compensation method of pressure and temperature was optimally designed. And then the concrete sealing process of strain measurement system was improved. The feasibility and effectiveness of the sealing technology of large strain measurement under hydraulic pressure was well verified by test case with hydraulic pressure 2.0 MPa and strain 4.5%.

Key words: sealing technology; strain measurement; large strain; protective agent

在研究结构极限承载能力的试验中, 结构在水压作用下往往产生大应变, 有时应变高达 10% ~ 20%, 如压力容器爆破试验和压力管道外压屈曲试验等。先进压水堆核电站创新地采用了钢制安全壳结构作为核岛安全的最后一道屏障, 在严重事故时不仅可进行有效散热且能承受一定的内压, 因此研究钢制安全壳结构的极限承载能力具有重要意义。而在这类研究极限承载能力的试验中, 水压下的大应变测量是确保试验成功的关键。赵连标^{[1]52}、吴宗岱等^{[2]563}早在 20 世纪

80 年代便研究了高液压下应变片的防护方法及导线从构件内部引出的密封装置。钟汉通^[3]、于克江等^[4]对应变测试中压力效应和温度效应进行了试验研究并提出了补偿方法; 林镇诗等^[5]对防护剂的影响及密封防护工艺进行了研究以选择合适的防护剂及密封工艺; 蔡晓闻等^[6]解决了高液压下应变片的绝缘防护、导线引出高压容器时的密封等问题。然而这些技术主要解决应变不高于 2% 的密封防护, 且大多未考虑密封防护措施对大应变的适应性。应变片及其防护措施

收稿日期: 2016-02-03; 修回日期: 2016-03-19

基金项目: 国家重大科技专项 (ZB01K10W09)。

作者简介: 张小平 (1990), 男, 江西吉安人, 硕士研究生, 主要研究方向为核电站用承压设备。E-mail: zhangwwwly@163.com

完全作用于结构的表面,结构的大变形则直接带动应变片及其防护剂的大变形,此时应变片及其防护剂能否始终黏紧结构表面直接影响着绝缘密封性能。本文基于前人的研究,通过试验测试以解决水压下大应变测试的密封防护及相关问题。

1 防护剂选用和压力温度补偿

由于水导电,高压水会渗入应变片基底和胶层而造成应变测量失真,甚至应变片脱落。因此,必须对应应变片及其引线进行防护。水压下应变片的密封保护有机械保护法和化学涂层法。由于机械保护结构往往比较复杂且使用麻烦,通常采用化学涂层法^{[1]53},即在应变片表面及其裸露引线周围涂敷防护剂,以起到密封绝缘效果。

1.1 防护剂选用

目前常用的防护剂有环氧树脂、硅橡胶、医用凡士林、酚醛缩醛等^[7]。试验研究和应用实践表明^{[2]565}:环氧树脂和硅橡胶可作为水压下应变片的防护剂。现采用拉伸试验研究这2种防护剂对大应变的适应性。拉伸试验按照标准 GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》执行,拉伸试样截面尺寸为6 mm×12 mm,应变速率为 $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。拉伸试验在浙江大学化工机械研究所的深冷疲劳试验装置——926LXCT150-2上进行。

1.1.1 环氧树脂+硅橡胶

环氧树脂通常结合硅橡胶进行密封。方法为:第1层采用硅橡胶均匀涂覆应变片及周围裸露导线表面,厚度为2~3 mm;10~24 h 硅橡胶完全固化后,第2层再用环氧树脂完全覆盖硅橡胶及其边缘,进行防护密封。剖面图见图1。

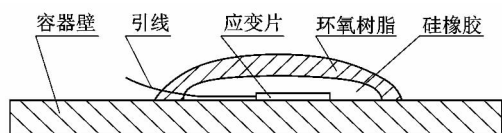


图1 环氧树脂+硅橡胶作防护剂

Figure 1 Protective agent which consisted of epoxy resin and silicone rubber

试验用环氧树脂为KD-504AB胶,硅橡胶为703胶。拉伸试验过程中,实时测量应变,并观察防护剂脱落情况,详见图2。

由表1可见,应变达到1.22%时,防护剂开裂;应变为3.30%时,防护剂整体松脱;随后,应变测量值迅速下降至1.27%。故应变大于1.22%时,防护剂不宜用环氧树脂+硅橡胶。

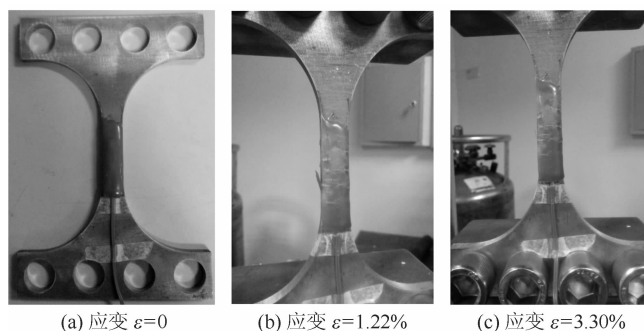


图2 环氧树脂+硅橡胶作防护剂时的拉伸试验

Figure 2 Tensile test (protective agent which consisted of epoxy resin)

表1 拉伸试验过程中防护剂脱落情况

Table 1 Phenomena of tensile test

时间/s	应变/%	现象
15	≤0.20	应变值正常且防护剂无异常
66	1.22	防护剂开裂,难以保证密封
120	3.30	防护剂整体松脱
122	1.27	防护剂松脱,应变迅速下降

1.1.2 硅橡胶

硅橡胶大多弹性模量较小且伸长率较大,同时其绝缘性能良好。因此硅橡胶单独作防护剂时,可能满足大应变测试密封防护的要求。表2所示为常见的密封用硅橡胶力学性能。该系列RTV硅橡胶除了弹性模量较小之外,伸长率均大于100%。其中力学性能较优的有703胶、704胶、81胶,而绝缘性能较优的有703胶、704胶、705胶。综合对比力学性能及绝缘性能,选择703胶作为防护剂。

试验时观察应变片测量值及其防护剂变化情况。应变小于0.2%时防护剂无异常。进一步拉伸,直至应变达到20.0%时,防护剂仍未松脱并无开裂迹象,如图3所示。

同时测量此时标距长度 l 为47.8 mm,标距原长 l_0 为40.0 mm,则该标距的平均应变为 $\varepsilon_m = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{47.8-40.0}{40.0} = 19.50\%$ 。此时实际测量标距内一点的微应变为196 621,即 ε 为19.66%。应变测量值与试样标距的平均应变相差 $\Delta\varepsilon = \frac{\varepsilon - \varepsilon_m}{\varepsilon_m} = \frac{19.66\% - 19.50\%}{19.50\%} = 0.82\%$ 。可见应变不大于20.00%时,硅橡胶对应变片的影响很小,可作为大应变测试的防护剂。

表2 常用 RTV 硅橡胶性能
Table 2 Properties of RTV silicone rubber

密封硅 橡胶名称	固化前			固化后						
	外观	黏度/ (Pa·s)	表面固化 时间/min	耐温/℃	抗张强度/ MPa	伸长率/%	剪切强度/ MPa	体积电阻率× 10 ¹² /(Ω·cm)	绝缘强度/ (kV·mm ⁻¹)	最大固化 深度/mm
703 胶	乳白色黏稠	12~35	3~35	-60~+150	≥1.2	≥250	≥1.1	≥100.0	≥16	3~5
704 胶	乳白色黏稠	12~35	3~30	-60~+250	≥1.0	≥150	≥0.9	≥100.0	≥14	3~5
705 胶	透明黏稠	8~20	3~30	-60~+200	≥0.4	≥130	≥0.5	≥1 000.0	≥15	3~5
81 胶	红色黏稠	12~18	3~30	-60~+270	≥0.8	≥150	≥0.8	≥0.1	≥15	3~6
87 胶	乳白色 不流淌胶	200~600	3~30	-60~+150	≥1.5	≥400	≥0.5	≥1.0	≥18	3~5

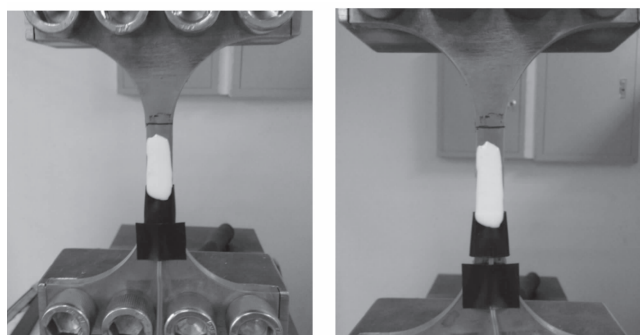
(a) $\varepsilon=0$ 硅橡胶状态(b) $\varepsilon=20.0\%$ 时硅橡胶状态

图3 703 硅橡胶作防护剂时的拉伸试验

Figure 3 Tensile test (protective agent which consisted of 703 silicone rubber)

1.2 温度与压力补偿

在压力作用下,应变片阻值会发生变化,这一现象称为压力效应。压力效应不仅与介质压力、应变片、粘结剂及容器形状等有关,也与防护剂材料及厚度有关。由于在应变片密封过程中难以精确保证防护剂厚度,故应采取措施消除压力效应。同理,也应消除温度变化产生的温度效应。考虑到压力效应及温度效应总是同时存在,可采用内补偿法消除^{[8],[2]580}。选择类型、阻值均相同的工作应变片与补偿应变片,同样的条件粘贴应变片,使补偿块靠近工作应变片位置,并采用同样的密封防护方法,如图4所示。

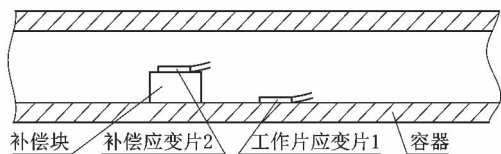


图4 内补偿法示意图

Figure 4 Schematic diagram of internal compensation method

容器内作用压力时,补偿块在容器内部需要承受3向等值的压应力 p ,根据广义胡克定律,可求得粘贴

应变片方向的应变值为

$$\varepsilon_p = \frac{1}{E}[-p - \mu(-p - p)] = \frac{1-2\mu}{E}p。$$

式中: E 为补偿块弹性模量; μ 为补偿块泊松比。

假设压力效应为 ε_p ,温度效应为 ε_t ,由于工作应变片1与补偿应变片2的压力及温度相同,则 $\varepsilon_{t1} = \varepsilon_{t2}$, $\varepsilon_{p1} = \varepsilon_{p2}$ 。同时工作应变片的指示应变为 $\varepsilon_1 = \varepsilon + \varepsilon_{t1} + \varepsilon_{p1}$,补偿应变片的指示应变为 $\varepsilon_2 = \varepsilon_{t2} + \varepsilon_{p2} + \varepsilon_p$,那么工作应变片粘贴位置的实际应变 ε 为

$$\varepsilon = \varepsilon_1 - (\varepsilon_{t1} + \varepsilon_{p1}) = \varepsilon_1 - (\varepsilon_{t2} + \varepsilon_{p2}) = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_p = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \frac{1-2\mu}{E}p。$$

1.3 应变测试系统的绝缘

水压的强渗透力使得应变片的密封防护变得更加困难。为了观察水压的强渗透力对硅橡胶作防护剂时应变片测试系统绝缘的影响,设计了绝缘测试试验。试验在压力管中进行,如图5所示,应变片粘贴在材料为Q345R的试验块上,703硅橡胶作为防护剂,应变片引线通过导线密封接头引出。通过试压泵给压力管加压,压力每增加1 MPa测量1次绝缘电阻及应变片输出电阻,直至管内压力为6 MPa。测试前应变测试系统的绝缘电阻 $\geq 100 \text{ M}\Omega$,应变片输出电阻为119.2 Ω 。

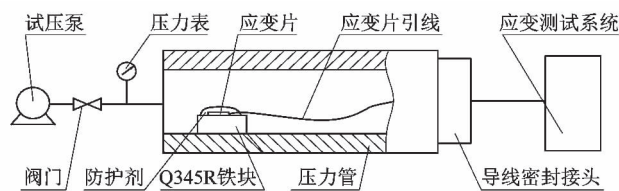


图5 绝缘测试系统

Figure 5 Insulation test

测试结果表明,随着压力增大,应变测试系统的绝缘电阻均 $\geq 100 \text{ M}\Omega$,输出电阻也未变化。由此可知,中低压力下水的渗透性对应变片绝缘性及阻值影响很小,即703硅橡胶具有良好的绝缘性。

2 应变测试系统的密封设计

水压下大应变的测试系统中需密封的部位主要为:应变片、应变片引线、引线与密封接头的连接处及引出装置。测试系统的密封工艺的优劣直接影响着测试系统的防护绝缘性能。

2.1 应变片密封

应变片表面应涂覆2~3层703硅橡胶,每层硅橡胶涂覆厚度1.5 mm左右。第1层防护剂起到保护应变片及防水绝缘的作用。硅橡胶同时可以起到软保护的作用,避免高压下的硅橡胶对应变片产生过大的附加应变。应变片的密封工艺为:

- 1) 应变片粘贴工序完成后,蘸取无水酒精对应变片表面及其周边进行清洗;
- 2) 在应变片表面及周围5.0~10.0 mm均匀涂覆1层703硅橡胶,厚度约为1.5 mm;
- 3) 等硅橡胶固化(约0.5~2.0 h)后,再涂覆第2层硅橡胶,第2层硅橡胶需完全覆盖第1层硅橡胶,厚

度仍为1.5 mm左右;

- 4) 待第2层硅橡胶固化后,根据试验情况可进行涂覆第3层硅橡胶。

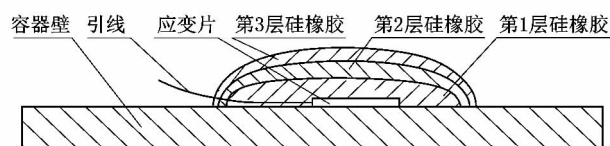


图6 应变片密封示意图

Figure 6 Schematic diagram of strain gauge under sealing protection

2.2 引线及其接头密封

2.2.1 引线密封

应变片引线若直接暴露在水中则会与水导通,必须将焊接引线裸露出的金属线全部进行密封隔绝。电阻应变片连接的引线形式主要有3种:裸露的导线、直接连接端子的引线和绝缘处理的导线,如图7所示。

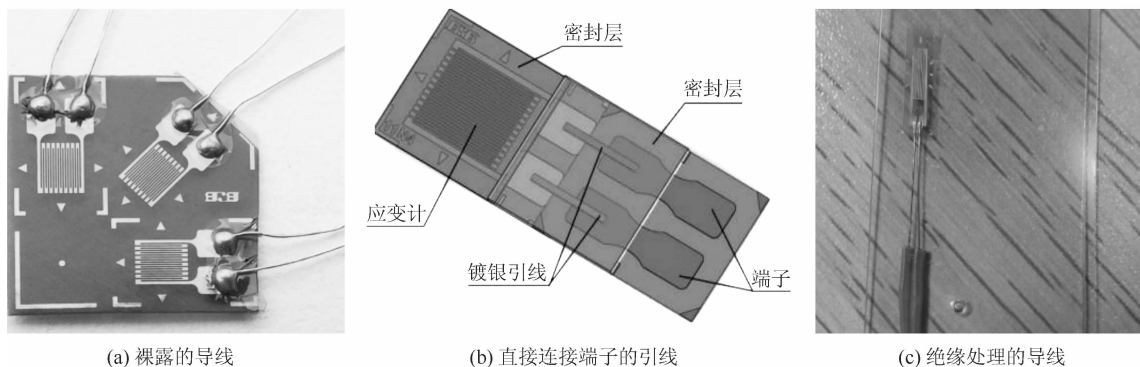


图7 应变片类型

Figure 7 Type of strain gauges

应变片引线密封过程类似于应变片的密封,采用硅橡胶做防护剂,密封2层。不同的是,图7(a)和(c)的引线密封时,需在引线与容器表面之间涂覆1层防护剂或密封层。同时需要注意的是,应变片引线不能绷直而应拐弯,可以避免变形过大导致引线拉断。

2.2.2 导线接头密封

导线接头的连接采用灌封的方法。具体方法为:①将接头一侧导线套上1段热缩管,热缩管长度应明显大于焊接后裸露导线长度;②连接2导线接头并焊接;③移动热缩管使其完全包裹裸露的导线;④采用703硅橡胶灌封绝缘套管,使热缩管中完全充满703硅橡胶,示意图及效果如图8所示。

2.3 导线密封接头

容器中应变片引线的引出主要通过引线导出密封

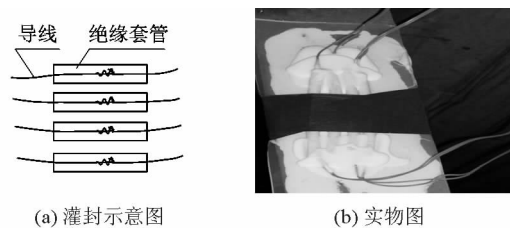


图8 导线接头的密封

Figure 8 Sealing process of wire joint

装置来实现。它应满足密封性能可靠、导线绝缘可靠、结构紧凑、装卸方便、价格便宜、重复使用及引线数目多等要求。图9所示的导线密封接头结构,其螺帽及螺纹内部中空,导线依次穿过阀座中的孔隙、密封剂、钢制过渡环。阀座能承受一定压力。密封剂则完全填充螺帽与阀座之间的空腔,并在密封剂固化前由螺栓带动钢

制过渡环压紧,最终等待密封剂固化。其可根据实际试验需要具体设计接头尺寸、导线根数、螺纹尺寸等。

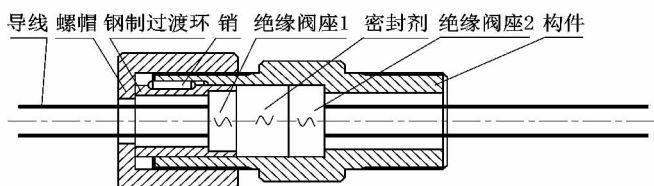


图9 密封接头内部构造图

Figure 9 Internal structure diagram of sealing device of wire

图10为导线密封接头的实物图。导线密封接头的设计压力为5 MPa,通过螺纹连接。螺纹尺寸为M22×1.5,每个密封接头的导线数为28根。经过耐压及气密性测试显示,接头密封效果良好。密封接头上导线数量较多且导线漆包线较细,若在使用过程中装卸比较频繁、密封接头使用环境较差的情况下,密封接头上的导线容易出现破损,导致应变测试线路不绝缘。因此在使用中注意保护密封接头、应变片导线等,防止刚蹭,可以有效的保证密封接头质量。

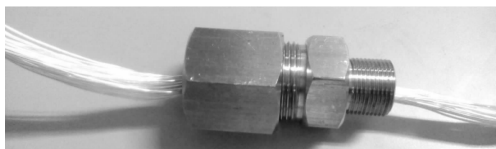


图10 密封接头实物图

Figure 10 Sealing device of wire

3 应用案例

3.1 试验方案

在某钢安全壳椭圆形封头爆破试验中,需测量封头典型部位的应变。试验分3种规格共计6次,封头内外表面布置的应变片数量为71~77片。封头的直径为5 000 mm,高度为1 570 mm,厚度为5 mm,试验装置示意图如图11所示。试验的介质为水,计算试验爆破压力可达2.5 MPa。椭圆形封头理论计算的最大应变可达到15%,则应变片测量的应变极限不低于15%,选用应变片为KFEM-5-120C1,应变仪为UCAM-60。

3.2 绝缘检查结果及分析

整个应变测试系统的密封性能良好与否可通过测量各个应变片的绝缘电阻判断。装置灌满水之后,通过加压泵对装置进行预加压,以检测整个测试系统的性能。加压压力为0.2 MPa。应变仪检测各个应变片的绝缘电阻及输出电阻,此前5次试验的绝缘检测结果如表3所示。

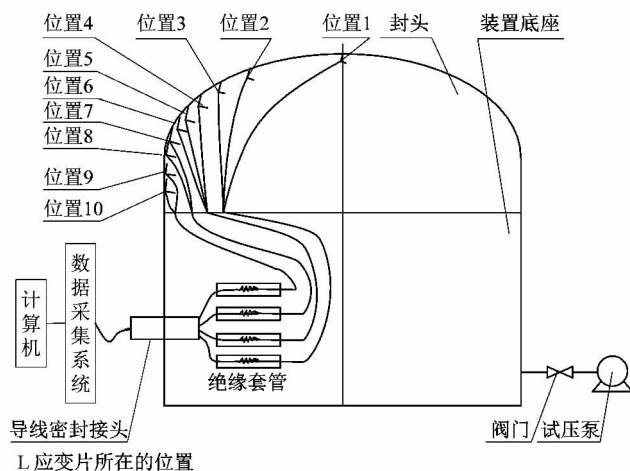


图11 应变测试系统

Figure 11 Measurement system of strain

表3 各次试验前的绝缘检测结果

Table 3 Insulation test results before experiments

试验次数	绝缘电阻 < 100 MΩ 的应变片数量	应变片总数
1	4	71
2	3	75
3	3	75
4	0	75
5	2	77

由表3可知整个应变测试系统的绝缘电阻的合格率均超过94%,个别达到100%。因此该密封系统的绝缘密封性能良好。

3.3 应变测试结果及分析

部分应变测试结果如图12所示,由图可知封头顶点附近一点的应变测量值稳定持续,且随着压力逐步上升,该测量点进入塑性前应变随压力线性增加,进入塑性之后则增速变大。实际应变测量值与理论正好相同,同时测量的最大应变达4.5%,说明应变测试数据稳定有效。封头过渡段上某一位置内外表面的经向应变压力曲线如图12(b)所示,在压力低于1 MPa时,该封头过渡段位置并未发生屈曲,则内外表面的应变非常接近,与理论分析结果一致;在压力高于1 MPa时,封头内外表面的应变测量值均随着压力的增大而增大,且趋势相同,内表面的应变测量值大于外表面的应变。实际上由于该过渡段位置在1 MPa压力下发生屈曲褶皱,并处于内瘪状态,在屈曲后内外表面的变化趋势相同。应变测试结果与理论分析结果也正好吻合。说明该密封防护技术成功地解决了椭圆形封头内表面的应变测试问题。试验结果表明在压力不高于2.0 MPa,应变高达4.5%的水压下大应变测试密封技术可行、有效。

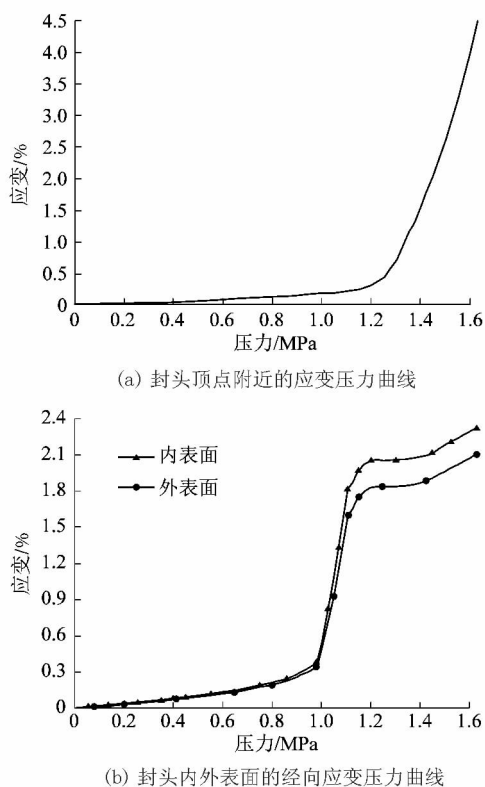


图 12 应变-压力曲线

Figure 12 Strain-pressure curves

4 结论

本文研究了水压下大应变测试系统密封技术的影

响因素和密封工艺流程,并通过实际实验案例验证了密封技术的可行性。得出的主要结论有:①应变大于 1.22% 时,防护剂不宜用环氧树脂+硅橡胶;②应变不大于 20% 时,硅橡胶对应变片的影响很小,可作为大应变测试的防护剂;③实验表明在压力不高于 2.0 MPa,微应变高达 4.5% 的水压下大应变测试密封技术可行、有效。

参考文献:

- [1] 赵连标. 高压液下的应变测量[J]. 动力系统工程, 1986(3): 52 - 59.
- [2] 吴宗岱, 陶宝祺. 应变电测原理及技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982: 564.
- [3] 钟汉通. 超高液压下应变片的压力效应[J]. 华南工学院学报, 1983, 11(1): 83 - 90.
- [4] 于克江. 高压液下应变测量技术的试验研究[J]. 一重技术, 2010(1): 65 - 68.
- [5] 林镇诗, 余建星, 王永更, 等. 深水海底管道屈曲试验数据采集技术研究[J]. 石油矿场机械, 2011, 40(12): 62 - 66.
- [6] 蔡晓闻, 高连新, 常 龙. 套管挤毁试验水下应变测试方法的研究[J]. 钢管, 2009, 38(4): 66 - 69.
- [7] 张如一, 沈观林, 李朝弟. 应变电测与传感器[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999: 105.
- [8] RAMEZANI M, RIPIN Z M. Combined experimental and numerical analysis of bulge test at high strain rates using split Hopkinson pressure bar apparatus[J]. Journal of materials process technology, 2010, 210(8): 1061 - 1069.

(上接第 31 页)

陷管道的主要失效模式,弯矩是局部失效的主要原因之一;极限载荷首要影响参数是焊接缺陷(未焊透)的深度,而该缺陷的其它尺寸对极限载荷的影响不明显。

2) 通过分析联合载荷作用下含未焊透缺陷管道危险点的应力状态,推导出该危险点所在有限单元发生失效时的联合载荷关系式,该公式给出了管道设计允许的最大载荷参考线。

3) 将含焊接缺陷(未焊透)的管道极限载荷数值计算结果以曲线簇形式进行归纳,同时与管道设计许用的最大载荷参考线进行对比,分析出压力管道未焊透缺陷免于评定的安全尺寸参数。

参考文献:

- [1] 胡华胜, 王磊, 傅如闻. 基于 RBI 技术的化工装置压力管道风险评估与在线检验策略研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(6): 171.
- [2] AMERICAN SOCIETY of MECHANICAL ENGINEERS. Manual for determining the remaining strength of corroded pipelines: ASME

B31G—1991[S]. New York: ASME, 1991.

- [3] 韩树新. 含未焊透缺陷工业压力管道的安全性试验研究[J]. 轻工机械, 2008, 26(4): 103 - 106.
- [4] CHEN Haofeng, LIU Y H, CEN Z Z, et al. Numerical analysis of limit load and reference stress of defective piping under multi-loading systems[S]. International journal of pressure vessels and piping, 1998, 75(2): 105 - 114.
- [5] 王飞. 等比例载荷作用下含未焊透缺陷不锈钢管道安全性分析[D]. 杭州: 浙江大学化工机械研究所, 2008: 47 - 53.
- [6] 叶先磊, 史亚杰. ANSYS 工程分析软件应用实例[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [7] 英国中央电力局. 有缺陷结构完整性评定标准: R/H/R6 [M]. 华东理工大学化工机械研究所, 译. 北京: 化工部设备设计技术中心站, 1988.
- [8] 瑞典标准化委员会. 带裂纹构建安全评定规程: SA/FOU-Report 91/01 [M]. 华东理工大学化工机械研究所, 译. 北京: 化工部设备设计技术中心站, 1991.
- [9] CHEN H F, CEN Z Z, XU B Y, et al. A numerical methetical method for reference stress in the evaluation of suructure integrity [J]. International journal of pressure vessel and piping, 1997, 71(1): 47 - 53.