

管系动应变测量和疲劳寿命评估

Dynamic Strain Measurement and Fatigue Life Assessment of Pipeline

陆念文¹ 汪小龙¹ 郭建林² 王庆礼² 赵春光² 陈亦德²

(1. 中国广东核电集团苏州热工研究院, 苏州, 215004;
2. 岭东核电有限公司, 广东深圳, 518124)

摘要: 某核电站调试期间发现电动泵入口管系在小流量运行时振动强烈。本文作者运用电测方法测量了管系实际动态应变, 根据ASME和BS标准估算了管道的疲劳寿命。

关键词: 管系 动态应变 疲劳寿命

Abstract: In a nuclear power plant, violent pipe vibration was found during the functional test of the pump, especially when the pump was run under small flow. The authors of this article measured the dynamic strain of the pipe with strain gauges and calculated the fatigue life of the pipe with ASME and BS codes.

Keywords: Piping Dynamic strain Fatigue life

某核电站调试期间发现辅助给水系统电动泵入口管系在小流量运行时振动强烈。如果现在立即改造管道可能会影响商业运行的时间, 因此核电站委托苏州热工研究院对该管道进行寿命评估, 以探讨在核电站第一个十年大修期间才进行该管道改造的可能性。本文作者运用电测方法测量了该管系实际动态应变, 并将应变结果转化为应力, 然后根据ASME和BS标准估算了管道的疲劳寿命。

1 测量位置的选择

通过现场考察, 根据管系的结构、支架形式, 在如下主要位置布置了电测应变片:

(1) Z型管弯头: 采用三联应变花(0°、45°和90°三轴应变片组合), 布置在两个弯头外壁侧边;

(2) 三通处(离焊缝有一定的距离);

(3) 泵入口管弯头;

(4) 泵入口直管段。

除Z型管弯头处, 其他部位应变片采用单臂或半桥法测量, 以获取该部位的轴向、环向应变。

2 测量仪器及测量通道

本次测量采用的是靖江东华测试技术有限公司开发的DL5937动态应变测量系统。数据采集及频谱分析采用该应变仪的附属软件DHDAS动态数据采集系统, 实测时采样频率设定为1024次/s。

共采用3台应变仪, 每台仪器有8个采集通道, 可采集24个通道, 本次测量利用了其中的20个通道。这20个通道中, 19个用于应变测量, 1个用作接受触发信号。应变单位为微应变。因管壁温度均匀, 接线

综 述
核 电 设 计
工 程 管 理
工 程 建 造
运 行 维 护
核 安 全
核 电 前 期
核 电 论 坛
核 电 经 济
核 电 国 产 化
质 量 保 证
核 电 信 息

不需要温度补偿方式。

3 管系振动特点

共测量了10组振动应变数据，每组数据采集时间为6分钟。电动泵入口管系振动具有以下一些特点：

- (1) 给水流量大于30 m³/h时，没有振动问题。
- (2) 如始终保持管系给水调节阀关闭，没有振动问题。
- (3) 如开启给水调节阀，保持给水流量为15 m³/h时，电动泵入口管道存在明显振动。
- (4) 一旦开启给水调节阀，重新关闭后（即“0流量”工况），发现振动特别剧烈。

(5) “0流量”工况下的动应变最大；给水流量大于15 m³/h而小于30 m³/h时，动应变幅度在流量上升阶段和下降阶段基本相当，但相对于“0流量”工况明显减小；给水流量大于30 m³/h时，动应变已降至极低水平，说明此时没有异常振动。

4 应力计算和寿命评估方法

在测量的10组振动应变数据中，经过检查发现，0流量时入口直管测点（轴向、环向应变）振动应变水平最大。由于管道外壁只承受大气压，大气压与动应力相比很小，可忽略不计。同时管道运行时内压也很小，因此管道的径向应力 σ_r 接近为0，管道表面测点均为二向应力状态。除Z型管道弯头下部应力情况复杂、主应力方向未知外，其他直管表面测点由于约束条件，其主应力方向即为轴向和环向。计算时泊松比 μ 取0.3，弹性模量取210 Gpa。

(1) 把6分钟内0 m³/h流量下采集的应变数据转化为平面主应力数据；

(2) 利用自编程序计算3个主剪应力，得到3个主剪应力的循环波；

(3) 对每条波的每个循环根据ASME SECTION VIII, DIVISION2, APPENDIX 5的方法计算交变应力强度S，找出交变应力强度最大的剪应力波，对该条波某应力水平下的循环次数进行统计；

(4) 根据BS5500 APPENDIX C和ASME VIII DIVISION2 APPENDIX5提供的碳钢疲劳设计曲线，利用线性损伤累积理论（MINER法则）计算管系0 m³/h下6分钟内的疲劳寿命消耗分数（总寿命为1）；

(5) 计算管系0m³/h下产生振动时的寿命（可连续运行的时间）。

5 泵入口应力强度计算结果和疲劳寿命评价

对取样时间内（6分钟）应力循环次数统计，最大应力强度 $S_{max}=40.7080$ MPa，应力循环共8819次，按2%的比例递减，即98%、96%.....2%统计各应力水平波的循环个数。对每类应力强度根据BS5500 APPENDIX C S-N疲劳曲线，结合波数计算6分钟内消耗的寿命分数，将各应力强度的寿命分数消耗相加，即得管道在6分钟内的寿命分数消耗（总寿命为1）。

5.1 几点说明

(1) 应力强度S在代入疲劳曲线前须乘以几个系数转换成S：

1) 由于评价部位（直管）不存在局部结构不连续情况，疲劳强度减低系数取1；

2) 在焊缝处应乘以应力集中系数，对磨平对接焊缝，应力集中系数为1，对未磨平对接焊缝，焊脚处应力集中系数ASME一般推荐为1.5左右。考虑到疲劳应力问题，假定对接焊缝极其粗糙，类似于填角焊缝，BS5500推荐取极端值2.5，用ASME评价时取极端值3.7（因为BS5500的疲劳曲线用带焊缝的试件制作，所以系数比ASME小）；

3) 实际应力强度应乘以温度修正比（钢材实际工况温度下弹性模量/钢材室温下弹性模量），本试验温度修正比为1。

(2) 应力强度S 无须考虑尺寸和加工表面质量的影响，这是因为在制作疲劳曲线时已考虑了尺寸和表面质量的影响。

(3) 对于BS5500, $S < 33\text{MPa}$ 时设计疲劳曲线对应的循环次数 $>5 \times 10^6$ 次, 可认为其不消耗疲劳寿命; 对于ASME, $S < 48\text{MPa}$ 时设计疲劳曲线对应的循环次数 $>10^{11}$ 次, 可认为其不消耗疲劳寿命。

5.2 计算结果

设管道总寿命为1, 计算出0 m³/h流量振动下6分钟管系消耗的寿命为 $\Sigma d = 362.207 \times 10^{-5}$, 见表1, 则管道寿命按BS5500评价为: 6分钟 $\times (1/\Sigma d) = 1656$ 分钟。

我们同时用ASME标准的S-N疲劳曲线进行了寿命计算, 结果为: 0m³/h流量振动下6分钟消耗的寿命为 $\Sigma d = 0.001886727$, 管系寿命为6分钟 $\times (1/\Sigma d) = 3180$ 分钟。

表1 $S_{max} = 40.708\text{Mpa}$ 根据BS5500疲劳曲线计算的管系寿命消耗分数

应力强度百分比 S/S_{max}	应力强度S(MPa)	应力强度S(MPa)	每次循环消耗 的寿命分数	6分钟出现波数	6分钟所消耗的 寿命分数
100%~98%	40.70800	99.83152381	$1(1.0 \times 10^5)$	2	2.000×10^{-5}
98%~96%	39.89384	97.83489333	$1(1.1 \times 10^5)$	2	1.818×10^{-5}
96%~94%	39.07968	95.83826286	$1(1.2 \times 10^5)$	1	0.833×10^{-5}
94%~92%	38.26552	93.84163238	$1(1.4 \times 10^5)$	1	0.714×10^{-5}
92%~90%	37.45136	91.84500190	$1(1.5 \times 10^5)$	0	0.000×10^{-5}
90%~88%	36.63720	89.84837143	$1(1.6 \times 10^5)$	3	1.875×10^{-5}
88%~86%	35.82304	87.85174095	$1(1.7 \times 10^5)$	3	1.764×10^{-5}
86%~84%	35.00888	85.85511048	$1(1.8 \times 10^5)$	6	3.333×10^{-5}
84%~82%	34.19472	83.85848000	$1(1.9 \times 10^5)$	9	4.736×10^{-5}
82%~80%	33.38056	81.86184952	$1(2.1 \times 10^5)$	16	7.619×10^{-5}
80%~78%	32.56640	79.86521905	$1(2.4 \times 10^5)$	17	7.083×10^{-5}
78%~76%	31.75224	77.86858857	$1(2.6 \times 10^5)$	28	10.769×10^{-5}
76%~74%	30.93808	75.87195810	$1(2.8 \times 10^5)$	21	7.500×10^{-5}
74%~72%	30.12392	73.87532762	$1(3.2 \times 10^5)$	26	8.124×10^{-5}
72%~70%	29.30976	71.87869714	$1(3.4 \times 10^5)$	39	11.470×10^{-5}
70%~68%	28.49560	69.88206667	$1(3.6 \times 10^5)$	61	16.944×10^{-5}
68%~66%	27.68144	67.88543619	$1(4.2 \times 10^5)$	76	18.095×10^{-5}
66%~64%	26.86728	65.88880571	$1(4.6 \times 10^5)$	91	19.782×10^{-5}
64%~62%	26.05312	63.89217524	$1(5.0 \times 10^5)$	134	26.890×10^{-5}
62%~60%	25.23896	61.89554476	$1(5.6 \times 10^5)$	151	26.964×10^{-5}
60%~58%	24.42480	59.89891429	$1(6.0 \times 10^5)$	164	27.333×10^{-5}
58%~56%	23.61064	57.90228381	$1(7.0 \times 10^5)$	178	25.428×10^{-5}
56%~54%	22.79648	55.90565333	$1(8.0 \times 10^5)$	184	23.000×10^{-5}
54%~52%	21.98232	53.90902286	$1(9.0 \times 10^5)$	193	21.444×10^{-5}
52%~50%	21.16816	51.91239238	$1(10.5 \times 10^5)$	218	20.761×10^{-5}
50%~48%	20.35400	49.91576190	$1(12.0 \times 10^5)$	199	16.583×10^{-5}
48%~46%	19.53984	47.91913143	$1(14.0 \times 10^5)$	151	10.785×10^{-5}
46%~44%	18.72568	45.92250095	$1(16.0 \times 10^5)$	153	9.562×10^{-5}
44%~42%	17.91152	43.92587048	$1(18.0 \times 10^5)$	150	8.333×10^{-5}
42%~40%	17.09736	41.92924000	$1(21.0 \times 10^5)$	119	5.666×10^{-5}
40%~38%	16.28320	39.93260952	$1(25.0 \times 10^5)$	117	4.680×10^{-5}
38%~36%	15.46904	37.93597905	$1(31.0 \times 10^5)$	115	3.709×10^{-5}
36%~34%	14.65488	35.93934857	$1(40.0 \times 10^5)$	131	3.275×10^{-5}
34%~32%	13.84072	33.94271810	$1(46.0 \times 10^5)$	157	3.413×10^{-5}
6分钟内寿命消耗分数 (总寿命为1):					$\Sigma d = 362.207 \times 10^{-5}$

6 分析和结论

(1) BS5500和ASME的疲劳寿命评价方法是基于“安全原则”而不是“可用性”原则, 因此方法本身偏于保守。BS5500疲劳曲线寿命安全系数为15, ASME疲劳曲线寿命安全系数为20;

(2) 用BS5500评价比ASME保守, 这是由两种标准中疲劳曲线制作的差异(所用试件不同)造成的, 本报告计算结果也证实了这点;

(3) 焊缝处应力集中系数的选取是按对接焊缝质量最差时考虑的。实际上, 如果要更精确地评价管系寿命, 可以用有限元方法、焊缝尺寸数据详细计算管道焊缝处的应力集中系数。

考虑上述三个因素, 管系寿命至少为1656分钟。

7 技术水平和推广前景

(1) 本项目首次在我国核电站运用电测技术测量管系动态应力, 而且电测通道达20个, 获得了管系在各种流量下动态应变的完整数据, 对于管系及其部件的结构设计和分析有重大价值。

(2) 使用自编程序分析数据, 该程序短小实用, 计算精确, 属于自主开发的专门程序, 与应变仪联

合使用效果极好。

(3) 综合运用ASME、BS压力容器标准估算危险部位疲劳寿命，计算结果与法马通运用速度评价法估算的寿命结果完全一致，二者相差仅15分钟；该计算结果证明管系在10年内无需作重大结构变更，从而使得电站可以在第一个十年大修期间进行该管系的改造，而无须现在牺牲经济效益推迟商业运行的时间来进行管线的改造，此结果获得了业主方极高的评价。

(4) 通过本项目的实践，总结出一套管系疲劳寿命分析方法。该方法可用于任何电站、化工企业的管道、压力容器等设备，推广运用的范围极为广泛。

参考文献

- [1] 郑秀瑗，谢大吉. 应力应变电测技术[M]. 北京：国防工业出版社出版，第一版
- [2] ASME SECTION VIII, DIVISION2, APPENDIX 5, 1998
- [3] ASME SECTION VIII, DIVISION2, APPENDIX 6, 1998
- [4] ASME SECTION VIII, DIVISION2, APPENDIX G, 1998
- [5] ASME B31.1 POWER PIPING, 1995
- [6] BS5500 APPENDIX C, 1994
- [7] 霍立兴. 焊接结构的断裂行为及评定[M]. 北京：机械工业出版社，第一版
- [8] 蒋智翔，杨小昭. 锅炉及压力容器受压元件强度[M]. 北京：机械工业出版社，第一版