LNG加气站增大潜液泵气蚀余量的工艺措施

潘成军

中国石油西南油气田公司成都天然气化工总厂，四川　成都　610213

摘　要：为弄清 LNG 加气站潜液泵因气蚀余量不足而联锁停机的原因，建立了 LNG 加气站气蚀余量模型，对潜液泵气蚀余量下降的原因进行了研究。泵池内 LNG 温度上升较快造成泵入口处 LNG 的饱和蒸汽压迅速增加，LNG 储罐内温度梯度被破坏造成储罐压力下降，LNG 饱和蒸汽压增加和储罐压力下降是潜液泵气蚀余量下降的主要原因。提出增大潜液泵气蚀余量的工艺措施：采取保温、置换 LNG、闪蒸等方法以降低泵池内的温度，增加 LNG 储罐的温度梯度以增加储罐的压力，及时补充储罐内的 LNG 以增大潜液泵的静压头。

关键词：潜液泵；泵池；气蚀余量；NPSH

DOI：10.3969/j.issn.1006-5539.2014.04.008

0　前言

LNG 是目前最清洁、环保的汽车燃料，LNG 加气站逐步推广。LNG 加气站主要设备有 LNG 储罐、LNG 加气机、增压汽化器和 LNG 潜液泵[1]，主要流程有卸车流程、增压流程和加气流程[2]，在每个流程中都要启动 LNG 潜液泵，经常遇到 LNG 潜液泵因气蚀余量不足导致不能正常启动的情况。本文以最常见的 60 m^3 LNG 卧式储罐为例分析了气蚀余量不足的原因，提出了解决措施，对类似 LNG 加气站具有借鉴作用。

1　潜液泵经常空载的原因

1.1　潜液泵出现气蚀征兆

在 LNG 加气站的运行过程中，控制系统经常提示 LNG 潜液泵空载（或打压不足）而联锁保护，原因是 LNG 潜液泵出现了气蚀征兆，抽到汽液混合物而做功很小，在 3 s 内电机电流和出口压力没有达到设定值而触发联锁停机，目的是防止气蚀对 LNG 潜液泵造成损伤，延长 LNG 潜液泵的使用寿命。

1.2　出现气蚀征兆的原因

气蚀余量（NPSH）是指潜液泵在进口处 LNG 的实际压力与 LNG 在该温度时饱和蒸汽压力的差值。当气蚀余量不足时，在 LNG 潜液泵启动瞬间，泵入口处的 LNG 液体一方面会转化为液体的动能，另一方面克服摩擦阻力，会产生压力损失，使压力下降，LNG 泵入口处会形成低压区，该区域 LNG 的沸点降低，当 LNG 温度高于其沸点时即发生剧烈沸腾，LNG 潜液泵就会抽到汽液混合物而联锁保护。

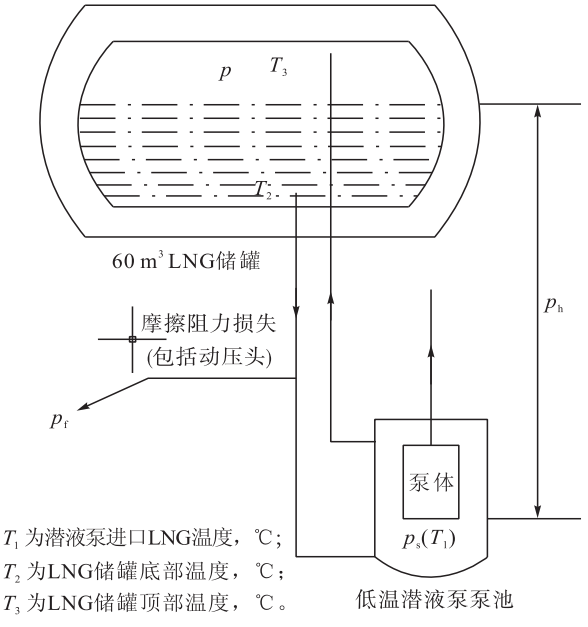

图 1　LNG 加气站低温潜液泵气蚀余量分析示意图

收稿日期：2014-04-24

作者简介：潘成军（1974-），男，四川成都人，工程师，学士，主要从事LNG生产和LNG加气站建设管理工作。

2　潜液泵气蚀余量模型

2.1　NPSH 分析示意图

以卧式储罐、单潜液泵为例的气蚀余量分析示意图见图 1。

2.2　NPSH 计算公式

$$NPSH = p + p_h - p_f - p_s$$

式中：p 为 LNG 储罐的气相压力，Pa；p_h 为 LNG 储罐内液面至泵入口处垂直方向的 LNG 液柱产生的压力，Pa；p_f 为LNG 储罐至泵入口管线摩擦阻力损失（包括动压头），Pa；p_s 为潜液泵进口处 LNG 的饱和蒸汽压力，Pa。

3　气蚀余量下降原因

3.1　p_f 基本不变

摩擦阻力损失主要由管道和管件的摩擦阻力引起，在设计时要尽量减少弯头和三通，装置一旦建成，摩擦阻力损失基本不变；而由静压头转换成动压头的压力损失变化也很小。因此，可以把 p_f 看成是一个常量。

3.2　p_h 变化很小

p_h 由两部分组成，一部分是 LNG 储罐的最低液位平面到潜液泵进口处 LNG 液柱产生的压力，该部分压力为固定值，由设计安装高度决定；另一部分为储罐内最低液位平面以上的 LNG 产生的压力，该部分压力随着 LNG 加气站的运行不断变化。对于 60 m^3 的 LNG 卧式储罐，p_h 的最低值为 0.008 MPa，最大值为 0.018 MPa，当 LNG 储罐液位逐渐下降时，p_h 也逐渐降低，但变化较小。

3.3　p_s 逐渐升高引起 NPSH 降低

3.3.1　LNG 的相平衡数据

潜液泵在进口处 LNG 的饱和蒸汽压力（p_s）是其温度（T_1）的函数，随着 T_1 升高，p_s 不断上升。用 Antoine 方程 $\ln(p_s)=A-B/(C+T)$ 计算甲烷的饱和蒸汽压与温度的数据见表 1（四川地区 LNG 中甲烷的含量在 98% 以上，甲烷的相平衡数据代表 LNG 的相平衡数据误差较小，可用来指导生产实践活动）。

表 1　甲烷的饱和蒸汽压与温度对应数据表

序号	温度 /℃	饱和蒸汽压 /MPa
1	−161.4	0.102
2	−155.0	0.167
3	−150.0	0.237
4	−145.0	0.326
5	−140.0	0.438
6	−135.0	0.575
7	−130.0	0.740
8	−125.0	0.935

3.3.2　泵池内 LNG 温升较快

a）LNG 泵池进液管线采用真空保温，与 LNG 储罐连接的部分管线采用聚氨酯发泡料保温[3]（约 1.5 m），热量通过进液管线传热给泵池内的 LNG。

b）LNG 泵池上端盖没有真空保温夹层，利用密封在里面的 LNG 气相进行保温，筒体传热方式包括传导、对流和辐射等多种传热方式，热量通过泵池筒体传热给 LNG。

c）LNG 潜液泵电机功率为 11 kW，电机做功的同时会放热[4]。泵运转过程中，放出的热量被 LNG 带走；泵停止后，热量逐步传递给泵池内静止的 LNG。

d）泵池水容积为 0.08 m^3，其中一半被气相和潜液泵占据，泵池内储存的 LNG 很少，外界热量传入后，温度上升较快。

3.3.3　温升造成 NPSH 不足

随着泵池内 LNG 温度的逐渐升高，p_s 逐渐增大，LNG 潜液泵的 NPSH 逐渐减小。当泵进口处 LNG 温度上升至其对应的饱和蒸汽压 $p_s = p + p_h$ 时，泵池内最接近相平衡状态，泵池内压力相对稳定，LNG 潜液泵的 NPSH 为负值，NPSH 严重不足。

3.4　储罐压力下降造成 NPSH 降低

3.4.1　卸车后储罐压力最低

LNG 槽车卸车完成后，LNG 储罐压力最低。由于卸车时 LNG 储罐进液采用上喷淋方式，储罐内的高温气相被部分液化，压力降低，同时，从工厂运输来的 LNG 温度总是低于储罐内 LNG 的温度，使储罐内 LNG 发生对流，储罐内的温度梯度被破坏，储罐内 LNG 最接近相平衡状态。

3.4.2　储罐出现温度梯度

随着热量的传入，储罐内的 LNG 温度逐渐升高。储罐内出现了温度梯度，下部温度低，上部温度高。储罐的压力也不断上升，且高于储罐底部 LNG 的饱和蒸汽压。使用压力 1.2 MPa 的 60 m^3 LNG 卧式储罐不必担心出现 LNG 翻滚现象[5]。

3.4.3　温度梯度减小造成压力下降

如果车载 LNG 气瓶内温度较高的气相回到 LNG 储罐的底部，会减小 LNG 储罐内的温度梯度，LNG 储罐的压力会降低，储罐的压力与储罐底部 LNG 饱和蒸汽压的差值会变小。在乐山市棉竹镇 LNG 加气站，以犍为厂 LNG 为例，当加气时车载气瓶的气相回到储罐底部时，连续加注 0.5 t 左右，压力下降 0.1 MPa 时，就会发生气蚀报警联锁。

LNG 潜液泵 NPSH 的降低，主要是潜液泵泵池内温

度上升较快和 LNG 储罐内压力下降造成的。

4 增大气蚀余量的工艺措施

4.1 减缓泵池内 LNG 温升速率

4.1.1 做好泵池及管线保温

a）尽量多使用真空管线，使用聚氨酯发泡料保温时，增大管线的保温半径，使保温管不挂霜、不冒汗。

b）法兰、低温阀门的阀体和泵池上端盖部分，经过液氮预冷、查漏、冷紧后，确认没有泄漏，最好利用有机发泡料进行保温。

4.1.2 置换泵池内的 LNG

a）长时间不加气时，一直小流量启动潜液泵，使泵池内的 LNG 和储罐底部的 LNG 进行置换。

b）长时间不加气时，每隔 30 min 启动潜液泵 1 min，置换泵池内的 LNG。

4.2 闪蒸降低泵池温度

如果无法启动泵来置换泵池内的 LNG，可以利用闪蒸来降低泵池内 LNG 的温度。将泵池的进液和回气阀关闭，放空泵池内的气相，使泵池内压力降低，从而降低 LNG 的沸点，当泵池内 LNG 温度高于其沸点时，就会发生闪蒸而剧烈沸腾，沸腾吸收了 LNG 的热量，使 LNG 的温度下降。

4.3 温度梯度增加储罐压力

长时间将 LNG 储罐底部的 LNG 喷淋到储罐的上部，LNG 储罐的压力会降低 0.05~0.15 MPa，说明温度梯度能大幅提高储罐压力，而 LNG 储罐在最高液位时 p_h 也只能增加 0.01 MPa，可见，p 对 NPSH 的贡献要比 p_h 大几倍，甚至十几倍。

4.3.1 上部回气增大温度梯度

利用 LNG 储罐的上部回气来增大储罐内的温度梯度。车载气瓶内的 LNG 气相回到储罐的上部，由于该部分气相温度高、密度小，在储罐内部无法形成对流，热交换效率很低，从而增大了储罐内的温度梯度，使储罐压力增加。

4.3.2 增压流程增大温度梯度

当刚完成槽车的卸车作业时，$T_2=T_3$、$T_2\leqslant T_1$，$p\leqslant p_s$，$NPSH=(p_h-p_f)+(p-p_s)$，如果较长时间不加气，$p-p_s$ 为负值，使 NPSH 不足，一旦启动潜液泵就会出现气蚀征兆，触发联锁停机。

利用增压汽化器给 LNG 储罐增压，使温度较高的 LNG 气相回到 LNG 储罐的顶部，增大 LNG 储罐内的温度梯度，使 p 增大，从而增大了 NPSH。

4.4 增大 p_h 的值

当 LNG 储罐内液位较低时，应及时补充 LNG，使 p_h 值增大。

5 结论

气蚀余量不足主要是潜液泵泵池内 LNG 比储罐内 LNG 温度升高得快，以及 LNG 储罐内的温度梯度太小造成的。增大气蚀余量的主要工艺措施是采取保温、置换 LNG、闪蒸等方法以降低泵池内的温度，增加 LNG 储罐的温度梯度以增加储罐的压力，及时补充储罐内的 LNG 以增大潜液泵的静压头。

参考文献：

[1] Rush S. Submerged Motor LNG Pumps in Send-out System Service [J]. Pumps and System, 2004, (3):32-37.

[2] 尹劲松，谢福寿. 橇装式 LNG 加气机加气系统及计量系统的优化设计[J]. 天然气工业, 2012, 32(3):105-106.
Yin Jinsong, Xie Fushou. Optimization Design of Skid Mounted LNG Filling Machine Filling, System and Measurement System [J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(3):105-106.

[3] 彭　明，丁　乙. 全容式 LNG 储罐绝热性能及保冷系统研究[J]. 天然气工业, 2012, 32(3):94-97.
Peng Ming, Ding Yi. Thermal Insulation Performance and Cold-insulating System Research of Total Capacity Type LNG Storage Tank [J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(3):94-97.

[4] 付子航. LNG 接收站蒸发气处理系统静态设计计算模型[J]. 天然气工业, 2011, 31(1):83-85.
Fu Zihang. Static Design Calculation Model of Boil Off Gas Treatment System for LNG Receiving Station [J]. Natural Gas Industry, 2011,31(1):83-85.

[5] 王良军，刘　杨. 大型储罐内 LNG 翻滚机理和预防措施[J]. 天然气工业, 2008, 28(5):97-99.
Wang Liangjun, Liu Yang. LNG Stirring Mechanism and Countermeasures in Large LNG Storage Tanks[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(5):97-99.