海上石油天然气储罐安全管理探析

崔　磊（中海石油（中国）有限公司深圳分公司，广东　深圳　518000）

摘　要：随着海洋石油的勘探开发从浅水走向深水，以及国家对能源需求的不断增加，从80年代在渤海建造第一座固定式海上石油天然气储罐后，进入二十世纪以来在南中国海的浮式海上设施上先后建造了三座石油天然气储罐。在海上建造这些储罐，不仅使非整装和边际油气田获得了重生，还可以降低铺设海底管道的投资，增加油气田开发的投资回报率，更重要的是可以为国家能源供给作出杰出贡献。本文介绍目前海上石油天然气储罐安全管理的状况，通过对储罐的存储环境进行一系列的分析，提出相应的预防策略，为今后在迈进深水时建造更多的储罐打好安全管理的基础。

关键词：海上设施；油气田；能源安全；石油天然气储罐；安全管理

西方石油公司在英国北海距苏格兰海岸120英里处的派珀·阿尔法（Piper Alpha）平台于1976年投产，开始仅被用于开采石油，但是不久后就在平台上增加天然气分离压缩机、储罐和外输设施同时用于生产天然气，并于1980年完工，从而导致平台的整体布置过于紧密。

1988年7月6日晚上10点多钟，派珀·阿尔法（Piper Alpha）平台发生大爆炸事故，死亡167人。在第一次爆炸中，就将原油管线和储罐损毁，导致了第二次爆炸。

通过事故调查报告发现，当时平台在改造时缺乏安全标准，导致平台在遭遇第一次爆炸时与凝析油外输泵同层的中控室模块、储罐模块等的防火墙不抗冲击防爆被摧毁，从而引起第二次爆炸和后续的第三次爆炸，最终导致平台的损毁。

液化石油气（LPG）是略为复杂的碳氢混合物气体，其主要成分为丙烷和丁烷，含量超过95%，通常还含有少量丙烯和丁烯。由于液化石油气具有闪点低（一般低于-60℃）、燃点低（470~510℃之间）、爆炸下限低（2~10%），燃烧速度快（火焰传播速度可达2000m/s）的特点，漏气遇火源瞬间发生燃烧爆炸。液态LPG泄漏至大气中极易气化，1m^3液态LPG可迅速转化成250~300m^3气态LPG，可形成2500~12500m^3爆炸性气体。气态LPG的相对密度为1.5~2.0，极易在低洼处聚集，少量液化石油气泄漏扩散后，液化石油气的相对密度大于空气，液态泄漏后向洼处流淌，边流淌边蒸发为气体。泄漏或蒸发的气体不易在空气中扩散，能沿地面飘移很远距离，在飘移途中遇着火源，沿途燃烧爆炸并返回泄漏处，造成大面积、大范围内的燃爆事故。爆炸时，爆炸中心的空气突然减少，大量空气被冲击波带走，瞬间形成中心的负压地带，随着四周空气又迅速填补过来，形成与冲击波相反的强大吸力，这样“一推一拉”加大了破坏程度，使处在冲击波范围内的建筑造成巨大的破坏，人员造成巨大的伤亡。此外，LPG燃烧热值高，低热值约为8.8×10^4kJ/m^3，爆炸速度快，约为2000~3000m/s，1kg液化石油气的爆炸威力约等于4~10kg TNT炸药的力量，因此火灾形成的热辐射和爆炸形成的超压威力大，破坏性强。

液化石油气的火焰中心温度高达1800~2000℃，而储罐或气瓶钢材在温度200℃时强度迅速降低，温度超过300℃时就有破裂危险，同时LPG的膨胀系数较高，储罐或气瓶内的液化石油气，受热膨胀，压力迅速增加，超过容器的耐压极限时，容器发生物理性爆炸。容器爆炸时，破坏性也很大，爆炸碎片可以飞出几十米到几百米。物理性爆炸后，容器内的液化石油气大量逸出，又会造成新的化学性爆炸燃烧。如果在没有堵塞漏源的情况下就迅速灭火，火焰虽然扑灭，但泄漏仍在进行，漏出的气体与空气混合达到爆炸浓度范围时，遇火源又发生新的燃烧爆炸。液化石油气发生新的燃烧爆炸，往往比第一次燃烧爆炸时更容易造成大的损失和伤亡。

液化石油气燃烧时，需要25倍的空气量，而且石油气泄漏后迅速在空气中弥漫扩散，加上燃烧产生大量的一氧化碳和二氧化碳，也会导致人员中毒窒息。

此外，液化石油气的成分主要是丙烷和丁烷，这两类物质均有一定的毒性。丙烷具有窒息及麻醉作用，10%以下的浓度，可引起头晕，高浓度时可出现麻醉状态，意识丧失，以及窒息。丁烷吸入可出现急性中毒反应，如：头晕、嗜睡、恶心及类似酒醉状态，严

重者可出现昏迷，慢性中毒反应易出现头痛、头晕、易疲倦、睡眠不佳等。

1 工艺危险度分析

1.1 方法介绍

危险度评价法规定单元危险度由物质、容量、温度、压力和操作 5 个项目共同确定。其危险度分别按 A=10 分；B=5 分；C=2 分；D=0 分赋值计分，由累计分值确定单元危险度，危险度分级见表 1 和表 2。

1.2 液化石油气工艺危险度分析与评价

按照危险度评价法及对物质、容量、温度、压力、操作分别取值后，对新建的南海某浮式海上生产设施上液化石油气储罐操作进行危险度分析与评价，物质评分 10 分，容量评分 10 分，操作评分 2 分，总分 22 分，其危险等级处于 I 危险程度。因此对储罐应从人、机、料、法及环境五个角度进行严格控制。在设备采购、加工及运输和安装过程中应严格控制质量。此外，还应加强储罐的日常维护，设置储罐防泄漏措施、泄漏监测设施、泄漏控制措施、消防措施等。加强对操作人员的安全教育，增强安全意识，严格按照安全操作规程进行操作。最后，就是还应制定储罐泄漏的现场应急处置预案，并进行定期的应急演练。

2 储罐火灾爆炸风险

本文主要针对南海某浮式海上生产设施液化石油气储罐在泄漏发生火灾爆炸后，采用计算公式对其后果进行定量分析，以评估其风险后果。针对液化石油气储罐的火灾爆炸风险，在设计阶段开展详细的定量风险分析（QRA）以详细评估储罐罐体的安全性。

储罐的存储条件为常温高压，当由于操作失误误使储罐过量充装、压力控制失效或储罐罐体设计、加工缺陷、疲劳、腐蚀或其他第三方破坏时，极易造成液化石油气的泄漏事故。因为液化石油气在常温常压下会迅速的气化，出现严重的闪蒸，从而形成大量的易燃蒸气云，结合液化石油气的爆炸下限又非常低，因此发生火灾及爆炸的风险非常高。

液化石油气的燃烧或爆炸通常有两种情况：一是泄漏后瞬时点燃形成喷射火，喷射火将会导致储罐区域产生高温，从而对泄漏储罐及其他储罐加热，导致罐内液体迅速气化，压力升高，引起储罐破裂，从而演化为沸腾蒸气云爆炸（BLEVE）从而引发更大事故；二是泄漏后的液体，气化形成爆炸性的蒸气云团，在

表 1 危险度评价取值表

分值项目	A（10分）	B（5分）	C（2分）	D（0分）
物质（系指单元中危险、有害程度最大之物质）	①甲类可燃气体 *1；②甲 A 类物质及液态烃类；③甲类固体；④极度危害介质 *2	①乙类可燃气体；②甲 B、乙 A 类可燃燃液体液体；③乙类固体；④高度危害介质 *2	①乙 B、丙 A、丙 B 类液体；②丙类固体；③中、轻度危害介质	不属于左述之 A、B、C 项之物质
容量 *3	①气体 1000m³ 以上；②液体 100m³ 以上	①气体 500~1000m³；②液体 50~100m³	①气体 100~500m³；②液体 10~50m³	①气体＜ 100m³；②液体＜ 10m³
温度	1000℃以上使用，其操作温度在燃点以上	①1000℃以上使用，但操作温度在燃点以下；②在 250~1000℃使用，其操作温度在燃点以上	①在 250~1000℃使用，但操作温度在燃点以下；②在低于 250℃时使用，但操作温度在燃点以上	在低于 250℃时使用，操作温度在燃点以下
压力	100MPa	20~100MPa	1~20MPa	1MPa 以下
操作	①临界放热和特别剧烈的放热反应操作；②在爆炸极限范围内或其附近的操作	①中等放热反应（如烷基化、酯化、加成、氧化、聚合、缩合等）反应操作；②进入空气或不纯物质，可能发生的危险、操作；③使用粉状或雾状物质，有可能发生粉尘爆炸的操作；④单批式操作	①轻微放热反应（如加氢、水合、异构化、烷基化、磺化、中和等）反应操作；②在精制过程中伴有化学反应；③单批式操作，但开始使用机械等手段进行程序操作；④有一定危险的操作	无危险的操作

注：

*1 见《石油化工企业设计防火规范》（GB50160–1992）（1999 年修订版）中可燃物质的火灾危险性分类；*2 见《压力容器中化学介质毒性危害和爆炸危险程度分类》（HG/T20660–1991）表 1、表 2、表 3；*3 ①有触媒的反应，应去掉触媒层所占空间；②气液混合反应，应按反应的形态选择上述规定。

表 2 危险程度分级表

总分值	≥ 16 分	11~15 分	≤ 10 分
等级	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
危险程度	高度危险	中度危险	低度危险

接触点火源后发生爆炸，形成威力巨大的冲击波，使得储罐区及周围建筑物遭受巨大的爆炸冲击，可在瞬间引发灾难性事故。

对储罐的泄漏风险进行分析，单个液化石油气储罐的泄漏频率为 4.098×10^{-3}，整个储罐区域发生泄漏的总频率为：1.639×10^{-2}，储罐发生泄漏的频率高。

由于 $1m^3$ 液态液化石油气可迅速转化成 $250\sim300m^3$ 气态液化石油气，因此后续以液相液化石油气的泄漏来评估泄漏后的事故后果。从不同泄漏类型发生的频率和可能造成的后果来看，大型泄漏的危险性最高，因此分析大型泄漏可能引发的事故后果。

发生大型液相泄漏后，泄漏分为两个阶段：持续泄漏阶段；监测到泄漏后的衰减泄漏。液化石油气一旦发生大型泄漏，从泄漏至泄漏截止需 2200s，泄漏时间长，期间如有点火源引入，就会发生火灾及爆炸事故。如能在泄漏初期及早采取措施，能有效降低泄漏后可能引发的火灾爆炸事故后果。

针对液化石油气储罐泄漏，分析不同浮式海上生产设施对液化石油气泄漏的贡献。针对中型泄漏、较大泄漏以及大型泄漏，对泄漏贡献最大的是储罐本身的泄漏，因此，在本储罐的设计、选材方面进行了严格的质量把控，满足设计和规范要求，并选用了具有设计和制造资质的厂家产品。除此之外，目前最关键就是在正常的生产过程中，除了应密切关注储罐的运行参数，及时发现并处理存在的隐患外，还应在维护保养期间加强质量把控，只有这样才能助于降低在储存环境下的泄漏风险。

液化石油气储罐单罐储存量为 $700m^3$，密度为 $521.97kg/m^3$，即储存量为 365379kg。液化石油气发生液相泄漏后，由于存在外界风速，会将一部分闪蒸出的气相吹离，假定泄漏后的 LPG 有 10% 的液相达到爆炸极限，即 36538kg。

蒸气云爆炸的 TNT 当量计算公式如下：

$W_{TNT}=1.8TW_fQ_f/Q_{TNT}$

式中：W_{TNT} 为液化石油气等效的 TNT 当量，kg；1.8 为爆炸系数；T 为自由蒸气云当量系数，取 0.04；W_f 为 LPG 最大储存量，kg；Q_f 为液化石油气的燃烧热；Q_{TNT} 为 TNT 的暴热，取 4500kJ/kg。

经计算，36538kg 液化石油气发生爆炸相当于 27026kg 的 TNT 当量。

计算人员死亡半径，通过下式计算：

$R_1=13.6(W_{TNT}/1000)^{0.37}$

经计算死亡半径为：46.1m。

爆炸产生的超压通过下式计算：

$\Delta P_\Phi=0.67R^3/W+0.1$ $\Delta P_\Phi\geqslant1$（MPa）

$\Delta P_\Phi=0.0975^3\sqrt{W/R}+0.1455^3\sqrt{W^2/R^2}+0.585W/R^3-0.00190.01\leqslant\Delta P_\Phi\leqslant1$（MPa）

由计算得知，距离爆炸中心 26m 时，爆炸超压仍有 1.1MPa 强度，足以对设备及人员造成损坏。工艺设备及其他液化石油气储罐的损毁必将会引起更大的事故和风险。

根据上述的液化石油气泄漏风险的分析与评价结论，提出了如下几点要求：一是目前在现有的所有浮式海上设施的储罐均设置了安全可靠的液化石油气泄漏监测装置，并在维修手册中规定了定期进行维护保养，以确保监测装置的处于良好的工作状态。二是为防止发生 BLEVE，液化石油气储罐还设置了专用的水喷淋装置。在储罐周围发生火灾事故时，在无法切断泄漏源时，在安全手册中明确规定禁止直接启动消防进行灭火，而是应及时启动水喷淋装置，对储罐进行降温，防止发生 BLEVE。三是尽管在设计中已在液化石油气储罐区设置防爆型人体静电释放装置，但还是要求作业人员穿戴防静电服装。四是由于液化石油气具有一定毒性，所以一旦发生液化石油气泄漏时，还应注意采取相应措施，避免员工吸入引发中毒反应；为此，在海上设施上配置相应的过滤式防毒面具。五是在储罐维护保养时，应按操作手册进行操作，置换罐内气体，设置专人守护，避免中毒窒息。六是液化石油气储罐上设置有安全可靠的压力控制及液位控制装置，所以需要定期进行维护和保养，保证装置的良好状态。一旦在日常生产运营期间监测到任何的参数异常时，应及时处理，避免引发压力失控或过量充装而带来的风险事故。七是海上设施上已制定有液化石油气发生泄漏以及火灾爆炸的应急预案，且有要求定期进行演练，提高应急状况下的应激反应和人员逃救生能力。八是在生产阶段，需要加强对作业人员，特别是新员工的培训，提高全员的安全意识和安全技能。九是严格按照操作手册、安全手册和维修手册的各项要求进行作业。

参考文献：

[1] 徐润 . 浅析石油储罐安全管理 [J]. 石化技术 ,2018,25(3):2.

[2] 邓玉梅 . 装置运行中储罐安全管理的探讨 [J]. 化工安全与环境 ,2014(30):2.