

国内外 LNG 罐区燃爆事故分析及防控措施建议

孙晓平 朱 渊 陈国明 陈 习

中国石油大学(华东)海洋油气装备与安全技术研究中心

孙晓平等.国内外 LNG 罐区燃爆事故分析及防控措施建议.天然气工业,2013,33(5):126-131.

摘 要 由于中国 LNG 工业起步较晚,需多方面借鉴国外先进经验,其中安全生产是重中之重。为此,通过对国内外 1944 年以来 LNG 罐区燃爆事故的统计分析,得出导致事故发生的人的原因占 33%,物的原因占 53%,环境原因占 14%;结合事故发展机理及事故后果分析,得出 LNG 罐区主要燃爆事故模式有:闪火、喷射火、池火灾、蒸气云爆炸、沸腾液体扩展蒸气爆炸。根据这些模式以及过往事故原因,建立了 LNG 罐区燃爆事故树,对火源、LNG 泄漏、储罐超压物理爆炸 3 条关键路径进行了详细分析。结果表明,导致顶事件发生的重要原因和关键节点为:明火、电火花、材料腐蚀老化、附件连接处泄漏、日常误操作、未及时检修等。最后基于事故树分析结果,从罐区周边布置、电气设备安装、生产作业操作、日常维护等方面提出了控制措施及建议,以达到预防减少 LNG 罐区燃爆事故发生的目的。

关键词 国内外 LNG 罐区 燃爆事故 事故模式 事故树 关键路径 控制措施 建议

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2013.05.024

An analysis of foreign and domestic explosion accidents in LNG tank fields and proposals for preventing measures

Sun Xiaoping, Zhu Yuan, Chen Guoming, Chen Xi

(Centre for Offshore Engineering and Safety Technology, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong, 266580, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 33, ISSUE 5, pp.126-131, 5/25/2013. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: LNG industry started late in China and needs more advanced experience from abroad in many aspects, among which safety is the most important one. In view of this, a statistical analysis was made of the explosion accidents occurring in LNG tank fields at home and abroad since 1994. In general, the human factor accounts for 33%, objective reason 53%, and environmental aspect 14%. In combination with the analysis of accident development mechanism and the post-accident consequence, it was concluded that the main explosion types include flash, jet fire, pool fire, vapor cloud explosion, and vapor explosion from the expansion of boiling liquid. On this basis, an accident tree was built for explosions in LNG tank fields, and a thorough discussion was made of three critical routes including ignition source, LNG leakage, and physical explosion due to overpressure in storage tanks. In conclusion, the main cause events are open flames, electrical sparks, material corrosion and aging, junction leakage of attachments, operational errors, untimely maintenance, etc.; according to the analysis results of the accident tree, the positive controlling measures are suggested in the aspects of peripheral location of tank fields, installation of electrical equipment, routine operation and maintenance, and so on, thereby to prevent the explosion accidents in LNG tank fields.

Key words: foreign and domestic, LNG tank field, explosion accident, accident type, accident tree, critical route, controlling measure

基金项目:国家“十二五”科技支撑计划项目(编号:2011BAK03B08),山东省自然科学基金(编号:ZR2011EL048),中央高校基本科研业务费专项资金项目(编号:12CX04060A)。

作者简介:孙晓平,女,1988年生,硕士研究生;研究方向为石油、化工安全工程技术。地址:(266580)山东省青岛市经济技术开发区江西路66号。电话:15588678624。E-mail:sunxiaoping87@163.com

在 LNG 工业发展过程中,伴随着很多事故,造成了大量经济损失和环境污染。尤其是燃爆事故,一旦发生还会造成不可估量的人员伤亡和财产损失。因此,有必要对国内外 LNG 罐区燃爆事故原因进行统计分析,探索不同模式事故发展规律,分析事故发生机理及后果特征。然后结合国内现状,探求 LNG 罐区燃爆事故关键节点及影响因素,提出相应的事故防控建议,为 LNG 工业安全发展提供支持保障。

1 LNG 罐区燃爆事故统计及模式分析

1.1 事故总体概况

LNG 工业史上第一起重大事故为 1944 年美国克利夫兰 LNG 储气站火灾爆炸事故。本文统计分析了 1944 年至今全球陆上 LNG 罐区燃爆事故 20 起^[1-5]。事故情况简要汇总于表 1。

由表1可以看到,1944年美国克利夫兰重大事故

表 1 LNG 罐区燃爆事故统计表

年份	事故地点	事 故 情 况
1944	美国克利夫兰	储罐材料失效,LNG 泄漏爆炸,131 人死亡
1968	美国波特兰	测压时引发天然气泄漏致储罐爆炸,4 人死亡
1971	意大利拉斯佩齐亚	充装错误操作,罐内翻滚,2 000 t LNG 泄漏
1972	加拿大蒙特利尔	工人误操作,天然气回流到氮气管线,泄漏后引发爆炸,1 人死亡
1973	美国纽约	储罐检修时绝热材料发生燃烧,导致储罐超压爆炸,40 人死亡
1973	英国肯维岛	气压计破损导致 LNG 泄漏,引发蒸气云爆炸
1977	阿尔及利亚阿尔泽	铝制阀门失效,2×10 ³ m ³ LNG 泄漏,1 人死亡
1977	印度尼西亚邦坦	液位报警器失效,储罐过量充装,超压泄漏
1978	阿拉伯联合酋长国达斯岛	储罐底管接头失效,LNG 泄漏
1979	美国马里兰州	LNG 泵密封失效,LNG 蒸气泄漏引发爆炸,1 人死亡,1 人受伤
1983	印度尼西亚邦坦	控制阀失效,换热器超压爆炸,3 人死亡
1985	美国阿拉巴马州	储罐焊口断裂,LNG 泄漏后被点燃,6 人重伤
1987	美国内华达州	易燃绝缘材料起火点燃 LNG 蒸气云
1988	美国马萨诸塞州	法兰垫片失效,114 m ³ LNG 泄漏
1989	英国	气化器排水阀未关闭,LNG 蒸气云喷出后被点燃,两人重伤
1992	美国马里兰州	安全阀未开放,储罐过量充装后,罐壁断裂,95 m ³ LNG 泄漏
1993	印度尼西亚邦坦	线路改修时导致 LNG 管线被破坏,LNG 泄漏
1993	英国曼彻斯特	LNG 翻滚,150 t 天然气排空
2004	阿尔及利亚斯基克达	锅炉爆炸导致 LNG 泄漏气化,引发蒸气云爆炸,27 人死亡,72 人受伤
2009	中国上海	储罐试压引发爆炸,1 人死亡,16 人受伤

对新生的 LNG 产业负面影响相当大,在接下来的 20 多年里几乎没有记载的事故出现,地面储罐发展停滞,地下储罐开始大力发展。随着 LNG 规范、标准的研究和执行,世界 LNG 商业贸易在 70 年代得到迅猛发展,20 世纪 70~80 年代 LNG 罐区燃爆事故达到高峰期。随着安全生产技术的进一步加强,90 年代至今,事故发生率保持在平均每 10 年 4 起,并且伴有下降的趋势。

1.2 事故原因分析

分析过往燃爆事故,总结导致燃爆事故发生的原因及源头,将事故原因按照:人、物、环境分为 3 类(表 2)。

由表 2 可以得出:物的原因占有所有原因的 53%,人的原因占 33%,环境原因仅占 14%。物的原因占最大的比例,应该重点对待,同时人的不安全行为、罐区周围存在的危险环境也是导致罐区燃爆事故发生的不可忽视的原因。综合分析表 2 可以发现,多起燃爆事故是由管线及管线接头、各类阀门、安全监测仪表、法兰等设备引起,在日常生产检查中,这些设备需要重点对待。

1.3 事故模式分析

通过对已有事故的发展机理及事故后果进行分析,将罐区燃爆事故分为 3 类:罐区火灾、罐区化学爆炸及储罐超压物理爆炸。

表 2 事故原因分类表

分类	事故原因	数量
人的原因	充装误操作,储罐翻滚	7
	试压方法有误	
	N ₂ 管线未关闭,天然气回流被点燃	
	排水阀未关闭,造成 LNG 泄漏爆炸	
	压力测试时未完全隔离,造成天然气泄漏	
	人为关闭安全监测仪表	
物的原因	人员吸烟,明火引燃 LNG 蒸气	11
	储罐罐壁材料缺陷	
	储罐修复时,绝热材料燃烧	
	气压计破损,LNG 泄漏	
	液位报警器失效,储罐超压泄漏	
	阀体焊接失效破裂	
	罐底接管接头低温失效泄漏	
	LNG 输送泵密封失效	
	放空阀失效	
	储罐焊口断裂,LNG 泄漏	
环境原因	富氧环境引发周围绝缘材料燃烧	3
	厂区锅炉爆炸引发 LNG 储罐爆炸	
	线路修改致 LNG 管线遭机械破坏	

1.3.1 罐区火灾

LNG 泄漏后迅速气化为甲烷蒸气,与空气混合形成蒸气云。当浓度达到爆炸极限(5%~15%)时,蒸气云遇火源即产生火焰;蒸气量较少时,发生闪火;泄漏量较多时,蒸气点燃后发生回燃,在 LNG 液池表面燃烧,发生池火灾;在泄漏口直接被点燃,发生喷射火。如:1985 年美国阿拉巴马州 LNG 接收站,蒸气云扩散进入控制室,被点燃发生火灾;1989 年英国 LNG 调峰站,泄漏蒸气云被点燃后,闪火覆盖长度达 40 m。

1.3.2 化学爆炸

LNG 罐区化学爆炸分为以下两种情况:①蒸气云爆炸(UVCE),LNG 泄漏挥发气与空气混合,并随空气流动,在较为密闭的空间遇火源,形成蒸气云爆炸;②沸腾液体扩展蒸气爆炸(BLEVE),当储罐受到火源烘烤、撞击或机械失效时,储罐突然开裂,大量液化气体由罐内喷出,伴随剧烈相变,遇火源则会发生 BLEVE,或者储罐发生超压物理爆炸后,大量蒸气泄漏,遇火源发生 BLEVE^[6-7]。如:1944 年美国克利夫兰储气站火灾爆炸事故;1987 年美国内华达试验基地 LNG 蒸气云爆炸;2004 年阿尔及利亚 LNG 提炼厂蒸气云爆炸。

1.3.3 储罐超压物理爆炸

LNG 为储存在沸点温度下的低温液体,当压力保持恒定时,即可保持恒温。罐内 LNG 属于气液两相共存,在储存、进出液过程中,罐内液体极易发生翻滚,

产生涡旋、间歇泉或者水锤现象。受此影响罐内 LNG 大量挥发,过量蒸气未及时排出时,罐内压力则会持续升高,达到储罐承受极限,从而引发储罐超压物理爆炸。如:1971 年意大利 La Spezia SNAM LNG 接收站,LNG 罐内翻滚,2000 t LNG 泄漏;1993 年英国曼彻斯特燃气公司(British Gas)LNG 调峰站 LNG 翻滚,150 t 天然气排空等。

综上分析,LNG 罐区主要燃爆事故模式有:闪火、喷射火、池火灾、蒸气云爆炸、沸腾液体扩展蒸气爆炸。总结出 LNG 罐区燃爆事故模式流程图(图 1)。

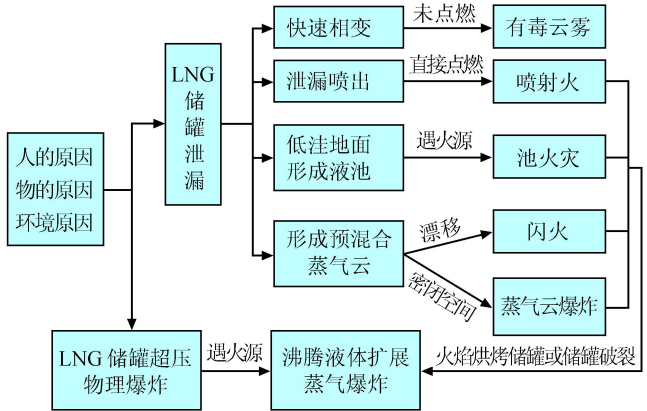


图 1 LNG 罐区燃爆事故模式流程图

2 LNG 罐区燃爆事故树分析

根据事故统计情况及事故类型分析结合国内 LNG 罐区现状,建立以“LNG 罐区燃爆事故”为顶事件的事故树。事故树共 9 层,基本事件 73 个,二阶最小割集 325 个,三阶最小割集 136 个,四阶最小割集 9 个。为方便显示,截取前 6 层事故树(图 2),6 层以下部分用转出符号表示。第二层中间事件为罐区主要燃爆事故类型:“罐区火灾”“罐区化学爆炸”“储罐超压物理爆炸”。结合燃爆三要素以及事故树整体结构发现“火源”“LNG 泄漏”“储罐超压物理爆炸”3 个中间事件在事故树中出现频率较高。因此,下面分别对这 3 方面进行详细介绍,最终得到导致事故发生的关键节点及原因事件。

2.1 火源分析

LNG 罐区火源主要分为 5 类:明火、电火花、雷击火花、撞击火花、静电火花。

1)明火的产生原因为:员工在罐区吸烟、未经允许违章在罐区动火、罐区内其他设备爆炸(比如锅炉)产生的火花。如:2004 年阿尔及利亚基克达 LNG 提炼厂,因厂区内锅炉爆炸;引发 LNG 储罐泄漏继而爆

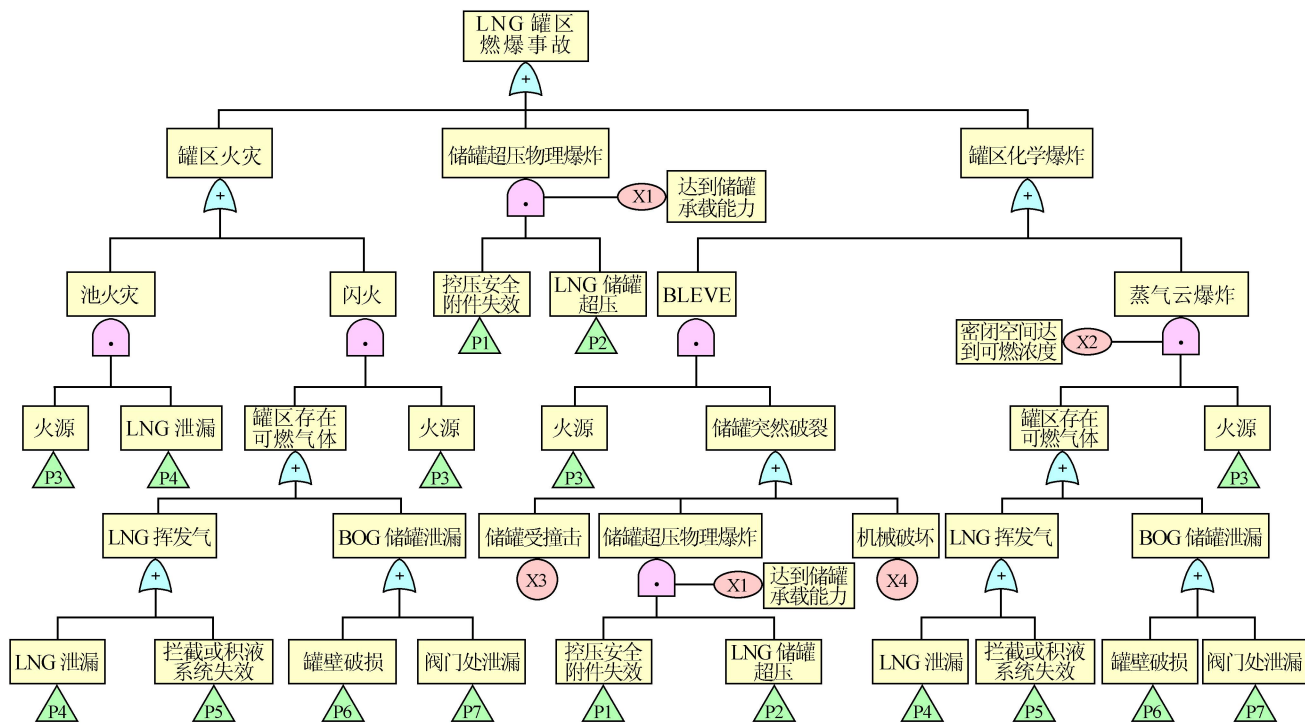


图2 LNG罐区燃爆事故树截图

炸;1972年加拿大蒙特利尔LNG调峰站,LNG泄漏挥发气进入控制室,被吸烟员工点燃,发生爆炸。

2)电火花的原因来自罐区电气设备:未使用防爆电器、防爆电器损坏未及时更换、通信设备射频产生的电火花等。如1979年,美国马里兰州LNG接收站,工人关闭断路器时产生火花,将泄漏的LNG蒸气引燃。

3)其他3类火源:雷击火花^[8]、撞击火花、静电火花暂时没有引起LNG罐区燃爆事故的记录,但是并不代表此3类火源可以被忽略,必须继续做好防范工作,避免任何类型火花的产生。

2.2 LNG泄漏分析

罐区LNG泄漏主要分为3大部分:管道泄漏、储罐泄漏、附件泄漏。纵观过往事故,附件泄漏是造成LNG泄漏最主要的原因。

1)管道泄漏有两种可能:①管壁破损以及接头处泄漏。管壁破损原因包括低温材料不合格、管道预冷不到位、管道预冷开裂、焊接失效、机械破坏,以及地震等自然灾害等。②接头处泄漏原因为腐蚀以及密封性失效。如1978年阿拉伯达斯岛LNG储罐罐底接管低温下材料失效泄漏;1993年印度尼西亚LNG管道遭机械破坏,造成LNG泄漏。

2)储罐泄漏有两种可能:罐底板破损和罐壁破损。①罐底板破损原因有:材料低温老化,储罐基础下沉^[9](地震等自然灾害损坏、支撑材料承载力不足、焊接失

效等)。②罐壁破损原因有:机械破坏、罐壁材料不合格、外保护层腐蚀、地震等自然灾害损坏。如1945年克利夫兰储罐材料失效泄漏;1992年美国马里兰州LNG储罐罐壁脆化断裂。

3)附件泄漏分为3个方面:阀门、法兰、安全仪表连接处。①阀门失效原因有:设计缺陷,质量缺陷,使用缺陷,维修缺陷等。②法兰处泄漏分为两种:正常使用密封面失效以及安装错误导致泄漏失效。③安全仪表连接处泄漏原因有:腐蚀、机械破坏等。如:1983年印度尼西亚邦坦LNG工厂控制阀失效,换热器超压爆炸;1988年美国马萨诸塞州Distrigas LNG公司,114 m³ LNG通过法兰垫片处发生泄漏等。

2.3 储罐超压物理爆炸分析

储罐超压物理爆炸是在“储罐超压”与“控压安全附件失效”两个中间事件同时发生,且“压力达到储罐承载能力”的情况下发生的。

1)储罐超压分为3种情况:试压过程超压、LNG翻滚以及储罐受热烘烤。①试压过程超压事故主要是人为原因:人员监管工作不到位、选择错误的试压方法等。②LNG翻滚是在“LNG存在分层”与“罐内安全检测设备(自动密度仪,液体气化速率监控设备,罐内液体循环泵等)失效”二者同时作用下发生的。造成LNG分层的主要原因有:LNG长期静置、新旧LNG密度差、组分差异、充装时未按照下重上轻的原则^[10]

等。如:1993 英国曼彻斯特 BG 公司 LNG 储罐翻滚事故;2009 年上海洋山深水港在进行管道气密性试压时,误用气压造成管道爆裂。

2)安全附件包括安全仪表和安全阀。失效原因多由人为引起,量程选择失误,误撤销安全阀、警报装置,未及时检修和质量缺陷等。其中“未及时检修”是安全附件失效最主要的原因。如:1977 年印度尼西亚邦坦 LNG 储罐充装时,最高液位报警器人为设置为超压负荷模式,导致储罐超装泄漏;1992 年美国马里兰州 Baltimore LNG 罐区管道安全阀腐蚀未能正常开启,罐内 LNG 翻滚,储罐超压爆炸等。

3 LNG 罐区燃爆事故防控措施

针对事故树定性分析结果,结合事故调研以及国内 LNG 产业现状,提出以下事故防控措施。

3.1 参考规范需注意以下事项

参考已有规范、标准,结合已往事故原因,以下规则措施需要加倍注意:

1)容易引起燃爆事故的设备(如锅炉等)需远离罐区,液化天然气储存总容量大于或等于 $30\,000\text{ m}^3$ 时,与居住区、公共福利设施的距离应大于 $0.5\text{ km}^{[11]}$ 。

2)罐区进行危险等级分级,并配备相应电气设备,可参考美国消防协会 NFPA59A^[12]对危险区域和设备安全等级做出的明确规定。

3)储罐与管道预冷过程中,注意检查管道低温材料是否开裂,焊接部位有无裂纹,阀门是否有冻结、泄漏,用手感觉储罐外壁温度,确保各部件低温状态下运行正常^[10]。

4)试压作业,需根据管道工作条件,管道设计压力超过 0.6 MPa 的不准许做气压试验,脆性材料严禁使用气体进行压力试验^[13-14],选用水或空气作为试验介质。具体操作需严格按照标准执行。

3.2 措施建议

结合事故原因分析及罐区现场调研,为预防罐区燃爆事故,提出以下措施建议。

1)LNG 充装应严格遵照:①不同产地、气源的 LNG 分开储存;②重质或相近密度采用底部充注的原则,严格监控罐内温度及密度,当垂直方向温差大于 0.2 K ,密度大于 0.5 kg/m^3 时,即应确认分层,采用内部搅拌或输出部分液体的方法来消除;在日常储存中,也要定期搅拌,防止 LNG 静置分层。

2)日常检查维护时,要对储罐地基及根桩沉降情况进行检测;阀门、法兰、安全仪表等附件及其他运行设备,需按照各自出厂规定进行保养维护;工作人员要

认真做好管道及各连接处防腐检查工作,并做好工作记录。

3)结合事故直接原因,罐区生产中还应注意:①储罐绝热材料破损后,建议直接更换而非修复,避免绝热材料渗入 LNG,在修复过程中被点燃;②严格控制非工艺性火源,焊接、切割等动火作业只能在特批时间、地点进行;③罐区日常工作应认真仔细,防止出现阀门误打开、隔离失效、管线误移动等现象;④工作人员必须经过严格培训后方可上岗,并且需要定期召开会议,提高员工安全生产意识与安全防范意识。

4 结论

1)从人、物、环境 3 个方面对 LNG 罐区燃爆事故原因进行了统计,结果表明:人的原因占 33%,物的原因占 53%,环境原因占 14%。结合事故发展机理及事故后果分析,得到 LNG 罐区主要燃爆事故模式包括:闪火、喷射火、池火灾、蒸气云爆炸、沸腾液体扩展蒸气爆炸。

2)对 LNG 罐区燃爆事故树 3 条主要路径进行了详细分析,得到各自的主要原因:①火源:明火和电火花;②LNG 泄漏:管壁破损、接头腐蚀失效造成的管道泄漏,罐底板及罐壁老化、腐蚀造成的储罐泄漏,阀门、法兰、安全仪表连接处出现的附件泄漏;③超压物理爆炸:试压方法不当、LNG 翻滚,储罐受热烘烤等,对安全仪表、安全阀的误操作和不及时检修也是导致储罐超压的重要原因。

3)从罐区周边布置、电气设备安装、储罐、管道预冷作业、试压作业、LNG 充装作业、日常检查维护等方面,提出 LNG 罐区燃爆事故防控措施建议,并给出参考标准,为 LNG 产业安全稳定发展提供支持。

参考文献

- [1] 马强.国内外 LNG 工程建设事故案例[R].大连:中国石油大连液化天然气有限公司,2010.
MA Qiang. LNG project construction accident cases at home and abroad[R]. Dalian: PetroChina Dalian LNG Co., Ltd., 2010.
- [2] Ashton. Safety history of international LNG operations [R]. Hanover: Technical Document, 2009.
- [3] HAMUTUK L, CHARLES S, SANTINA S. Sunrise LNG in Timor-Leste dreams, realities and challenges[R]. Timor-Leste Institute, 2008.
- [4] LAOPU 博客.上海洋山港 LNG 项目工地事故报告[EB/OL]. (2009-02-08) [2012-10-16] <http://laopu68.blog.163.com/blog/static/7038512420091855011127/>.
LAOPU blog. LNG project site accident report of Shanghai Yangshan Port [EB/OL]. (2009-02-08) [2012-10-16] <http://>

- laopu68.blog.163.com/blog/static/7038512420091855011127/.
- [5] Appendix C3. Chronological list of LNG accidents [EB/OL]. (2011-12-09) [2012-10-16] <http://freedownloadb.com/pdf/appendix-c3-c3-1-chronological-list-of-lng-accidents-c3-2-marine-6860138.html>. Cabrillo Port LNG Deepwater Port, 2006. 3.
- [6] 艾飞. LNG 储罐区 BLEVE 爆炸危险性分析及扑救对策 [J]. 科技创新导报, 2010 (34): 80-82.
- AI Fei. Risk analysis of BLEVE in the LNG tank and fighting countermeasures [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2010 (34): 80-82.
- [7] 王三明, 蒋军成. 沸腾液体扩展蒸气爆炸机理及相关计算理论模型研究 [J]. 工业安全与环保, 2001, 27 (7): 30-34.
- WANG Sanming, JIANG Juncheng. Studies on mechanism and correlative theoretic models of boiling liquid expending vapor explosion [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2001, 27 (7): 30-34.
- [8] 孙蔡亮, 宋木泉, 康国山. LNG 分输站雷电风险评估 [J]. 天然气工业, 2010, 30 (7): 83-86.
- SUN Cailiang, SONG Muquan, KANG Guoshan. An investigation into the risk assessment of lightning hazard of LNG sub-transmission stations [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30 (7): 83-86.
- [9] 付子航, 单彤文. 大型 LNG 储罐完整性管理初探 [J]. 天然气工业, 2012, 32 (3): 86-93.
- FU Zihang, SHAN Tongwen. Integrity management system for large LNG tanks [J]. Natural Gas Industry, 2012, 32 (3): 86-93.
- [10] 敬加强, 梁光川, 蒋宏业. 液化天然气技术问答 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 77-81, 128.
- JING Jiaqiang, LIANG Guangchuan, JIANG Hongye. LNG technology answers [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 77-81, 128.
- [11] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 石油天然气工程设计防火规范 GB 50183—2004 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2004: 63-67.
- Ministry of Construction, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. GB 50183-2004 code for fire protection design of petroleum and natural gas engineering [S]. Beijing: China Planning Press, 2004: 63-67.
- [12] Technical Committee on Liquefied Natural Gas. NF-PA59A: Standard for the production, storage and handling of liquefied natural gas (LNG) [S]. Quincy: US National Fire Protection Association, 2006.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 固定式压力容器安全技术监察规程 TSG R0004—2009 [S]. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2009.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. TSG R004-2009 Safety technology supervision for stationary pressure vessels [S]. Beijing: China Labor and Social Security Publishing House, 2009.
- [14] 中国石化兰州化学工业公司化工建设公司. 石油化工剧毒、易燃、可燃介质管道施工及验收规范 SH 3501—1997 [S]. 北京: 中国石油化工总公司, 1997.
- Lanzhou Chemical Industry and Construction Company of Sinopec. SH 3501-1997 Specification for construction and acceptance of hypertoxic and combustibile medium piping engineering in petrochemical industry [S]. Beijing: Sinopec Group, 1997.

(修改回稿日期 2013-03-27 编辑 赵 勤)