

液化天然气项目安全距离探讨

杨晓明¹ 刘顺剑² 杨颜璐³ 廖 勇²

1. 浙江能源天然气集团有限公司, 浙江 杭州 310052;
2. 中国石油工程建设有限公司西南分公司, 四川 成都 610041;
3. 山西天然气有限公司, 山西 太原 030006

摘要:安全距离计算是液化天然气项目建设的一个重要环节,需充分考虑周边公共安全以及自然生态环境安全。分析了国内外液化天然气装置中因安全距离不足引发的典型事故案例,对比了国内相关安全距离的法规、标准和要求,并对国内现有的安全距离确定方法进行了总结。根据我国液化天然气安全距离标准的现状,提出应严格执行以事故后果为主要依据,以数学模型为分析手段的方法,对蒸气云扩散、火灾、爆炸等工况进行研究。从量化风险的角度,判定所采取安全措施对降低风险的有效性,并在此基础上提出设置安全距离的建议。经分析认为,应选择对整体系统影响较大的单元和以事故后果为依据的定量分析方法进行安全距离的确定。该研究结果可为进一步完善 LNG 建设项目安全距离风险评估提供技术服务与支持。

关键词:液化天然气;安全距离;定量风险评价

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2018.03.009

Discussion on Safety Distance for LNG Project

Yang Xiaoming¹, Liu Shunjian², Yang Yanlu³, Liao Yong²

1. Zhejiang Energy Group Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310052, China;
2. China Petroleum Engineering & Construction Corp. Southwest Company, Chengdu, Sichuan, 610041, China;
3. Shanxi Natural Gas Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi, 030006, China

Abstract: The calculation of safety distance is an important link in the construction of LNG project. We should fully consider the public social security of the surrounding people and property and the safety of natural ecological environment in the calculation of safety distance. In this paper, the typical accident cases caused by insufficient safety distance in the domestic and international LNG installations are analyzed, and relevant domestic safety distance regulations, standards and requirements are compared. Finally, the existing methods for determining the safety distance in China are summarized. This paper proposes that the consequences of accidents should be chosen as the main basis, and the mathematical model as the analysis method to perform study on diffusion of steam cloud, fire, explosion and other conditions. From the perspective of quantitative risk, the availability for safety measures to reduce the risk are determined, and suggestions for setting safety distance are also proposed. Through analysis, it is

收稿日期:2017-12-05

基金项目:中国石油工程建设有限公司科学研究与技术开发项目(CPECC 2017 KJ 20)

作者简介:杨晓明(1977-),男,江苏响水人,工程师,学士,主要从事 LNG 接收站、天然气长输管道工程的建设管理工作。

believed that the unit that has a great influence on the whole system should be selected, and the safety distance should be determined by quantitative analysis method based on accident consequences. The results can provide technical service and support for the risk assessment of safety distance in LNG project.

Keywords: LNG; Safety distance; Quantitative risk evaluation

0 前言

安全距离计算是液化天然气(LNG)项目建设的一个重要环节,不仅关系到企业本身安全,而且关系到企业周边居民公共安全和生态环境安全。近几年来,LNG工业发展过程中出现了很多事故,造成大量经济损失和环境污染^[1]。1944年10月20日,美国东俄亥俄州燃气公司LNG设施发生爆炸,爆炸范围波及了克利夫兰市将近2.58 km²的地区,共造成136人丧生,200辆轿车完全毁坏^[2]。2004年1月19日,阿尔及利亚斯基克达LNG提炼厂爆炸,造成27人死亡、72人受伤^[3]。2009年2月6日,中国上海洋山深水港LNG接收站工程在进行中介质气化器调试过程中发生爆炸事故,导致1人死亡、16人受伤^[4]。2013年12月7日,中国榆林市榆阳区上盐湾镇一家LNG加气站,发生LNG泄漏事故,导致4人死亡、3人受伤^[5]。

根据相关机构的统计,截至2017年8月我国已建LNG液化厂(站)172座,接收站13座,此外有近60座LNG液化厂(含调峰站)和20座LNG接收站还处于前期建设准备中^[6]。因此,参考国外权威的LNG安全标准及其防护距离计算的理念,展开LNG项目安全距离计算方面的研究,提出适合于我国要求的LNG安全距离计算的理念,为进一步完善LNG建设项目安全距离风险评估提供技术服务与支持。

1 国外现状

20世纪70年代以来,随着石油化工行业迅猛发展,相继发生了意大利塞维索工厂环己烷泄漏、墨西哥的墨西哥城液化石油气爆炸、印度博帕尔农药厂异氰酸甲酯泄漏等与危险化学品有关的恶性重特大工业事故,发达国家结合自身情况先后修正或制定了更为严格的化学品生产安全距离要求措施^[7]。

在美国,危险化学品工厂建设不仅要满足政府部门的要求,还要满足保险公司定量风险计算的要求。美国对化工厂的环境安全设计主要考虑以下各方面的影响:火灾爆炸危险性、电力设计的防爆等级、建筑结构形式、总体布局及设备布置、通风及管道设置等^[8]。

在英国,1974年英国弗里克斯巴勒化工厂发生环己烷蒸气爆炸事故,29人死亡、109人受伤,直接损失700万美元。英国卫生与安全委员会设立了重大危险咨询

委员会,负责研究重大危险源的辨识、评价技术和控制措施,主要考虑危害范围、易燃易爆及毒物事故的后果、危害物质的数量以及危害物质存储方式等因素,并根据这些因素,计算工业设施风险,再转化为安全距离^[9]。

在欧洲,1977年意大利塞维索工厂环己烷泄漏,造成30多人死亡、20余万人紧急疏散。这一事故促使欧共体于1982年6月发布《工业活动中重大事故危险法令》(《塞维索指令》)。该法令明确提出:各成员国应根据土地使用规划的政策预防重大事故,减少事故损失;各成员国应确保土地使用规划的相关政策满足实际需要,确保危害设施与居民区、公共活动区和特殊敏感或重要区域之间保持适当的安全距离^[10];凡拥有重大危险装置的企业在向政府提交安全报告时,必须运用定量风险评估技术对其拥有的特种设备进行风险评估^[11]。

2 国内现状

目前,国内相关法规初步借鉴了国外的有关条款要求,公布了针对危险化学品安全距离的确定方法主要有“基于风险的”方法、“基于后果的”方法和“通用的”经验距离三种方法^[12-13]。这三种方法的侧重点都不一样,前两种方法均考虑了事故发生后对人和环境的影响。其中,第一种方法更加全面地考虑了事故发生的可能性,能更加客观地表征风险,但是步骤繁琐,结论更适合宏观判定;而第二种方法确定是可能发生的最大灾害,一般安全距离结论较大,不是客观地体现风险大小。第三种方法依赖以往的运行经验和相关资料,是一种实用性较好的方法,被绝大多数规范所采纳,但在必要时,应根据当地的具体情况并结合第一种、第二种方法来综合判定。

我国颁布的《安全生产法》和《危险化学品安全管理条例》已从法律、法规层面规定生产经营单位的建设项目要求科学预测评价突发性事件或事故可能引发的风险,提出风险防范和应急措施,确保与周边单位、居民区、人员密集场所等重要目标和敏感场所之间应保持适当的安全距离。《中华人民共和国城市规划法》明确规定,各项建设工程的选址、定点不得妨碍城市的发展、危害城市的安全、污染和破坏城市环境、影响城市各项功能的协调。

原安全监管总局第40号令《危险化学品重大危险源监督管理暂行规定》引入了定量风险评价方法来提高重大危险源安全管理决策科学性。该规定提出在一级、二级等级别较高的重大危险源中危险化学品存量较高时,应采用更为先进、严格并与国际接轨的定量风险评价的方法进行安全评估,以更好地掌握重大危险源的现实风险水平,采取有效控制措施。通过定量风险评价确定重大危险源的个人和社会风险值,不得超过其规定的个人和社会可容许风险限值标准,超过个人和社会可容许风险限值标准的,危险化学品单位应当采取相应的措施降低风险^[14]。

在GB 50016-2014《建筑设计防火规范》中“防火间距”的定义是“防止着火建筑的辐射热在一定时间内引燃相邻建筑,且便于消防扑救的间隔距离^[15]。”所以在规范中通常所见的“防火间距”主要是为了避免火势蔓延而设置,若用防火间距来衡量中毒、爆炸事故的安全距离,明显是不够的^[15]。因此在GB 50183-2004《石油天然气工程设计防火规范》(后简称GB 50183-2004)中就提出了对LNG工程需进行热辐射和蒸气云扩散的后果计算来校核安全间距,并给出了相关边际条件和判定结果^[16]。在SH/T 3160-2009《石油化工控制室抗爆设计规范》中亦对控制室的抗爆设计做出了规定,而设计的依据就要求进行相关的爆炸后果校核或采用通用值并征得业主同意^[17]。

而GB/T 22724-2008《液化天然气设备与安装陆上装置设计》(对标EN 1473-2006)中,主要强调以事故后果为主要依据的危险评价^[18]。因此在重大LNG项目中,以事故后果为主要依据进行LNG(含天然气)泄漏的安全距离计算亦具有充分的合理性^[19]。

3 工程案例研究

以国内东南沿海地区某在建LNG接收站为研究对象,总平面布置分为LNG储罐区、LNG气化区、LNG码头及LNG装车区等。在LNG储罐区设置4台 $20 \times 10^4 \text{ m}^3$ 全包容式储罐,外罐为混凝土结构,内罐直径为84.2 m,外罐直径为88.6 m,储罐总高52.8 m,在每台储罐内安装3台LNG低压输送泵(单泵流量为190 t/h,扬程295 m,介质温度 -162°C);在LNG气化区设置有4台145 t/h的IFV气化器;在LNG码头配置有4台DN 400卸载臂,1台DN 400蒸发气回流臂;LNG装车区共配置有20个装车位。

3.1 主要规范对安全距离的要求

LNG接收站设计主要依据的规范包括GB 51156-2015《液化天然气接收站工程设计规范》(后简称“GB 51156-2015”)、GB 50183-2004。

其中GB 51156-2015明确提出防火间距需符合GB 50183-2004相关规定^[20]。

而GB 50183-2004则直接规定LNG储存总容量大于或等于 $30\,000 \text{ m}^3$ 时接收站与居住区、公共福利设施的间距大于500 m,其数据来源自广东深圳LNG接收终端大鹏半岛西岸称头角场址选择数据,但同时也在规范中也明确了应校核热辐射和蒸气云。

3.2 采用公式进行热辐射距离校核计算

GB 50183-2004热辐射距离校核公式参照美国标准NFPA 59 A《液化天然气(LNG)生产、储存和装运标准》和49 CFR 193《LNG设施:联邦安全标准》编制。关于隔离距离的确定,围堰为矩形且长宽比不大于2时,可用式(1)决定隔离距离:

$$d = F \sqrt{A} \quad (1)$$

式中: d 为到围堰边沿的距离,m; A 为围堰的面积, m^2 ; F 为热通量校正系数,对于 $4\,000 \text{ W}/\text{m}^2$ 为3.5,对于 $9\,000 \text{ W}/\text{m}^2$ 为2,对于 $3\,000 \text{ W}/\text{m}^2$ 为0.8。

该接收站设置的3台储罐均为全包容储罐,拦蓄区即为混凝土外罐,直径88.6 m,最大尺寸与最小尺寸比等于1;LNG储罐区、LNG气化区分别设置有 150 m^3 集液池;LNG装车区设置有 60 m^3 集液池;相关不同区域热辐射影响距离计算结果见表1。

表1 不同区域热辐射影响距离计算结果

区域	面积 / m^2	两类热辐射量影响半径 /m	
		$Q=4 \text{ kW}/\text{m}^2$	$Q=9 \text{ kW}/\text{m}^2$
LNG 储罐拦蓄区	6 163	310	177
LNG 储罐集液池	25	17.5	10
LNG 气化区集液池	25	17.5	10
LNG 码头集液池	16	14	8
LNG 装车区集液池	16	14	8

注:泄漏工况选择执行GB 50183-2004。

当我们采用规范推荐的手算公式进行校核时,可以得出假设出的最大可能池火灾后果对居民影响范围为直径177 m,对50人以上居民聚集区影响范围为直径310 m,较规范要求值500 m更小。

3.3 采用软件进行蒸气云校核计算

根据GB/T 20368-2012《液化天然气(LNG)生产、储存和装运》的设计溢出条件可知:本项目采用了混凝土全容罐,在顶部充装储罐,无低于液面排料口情况下,模拟事故的泄漏量为储罐排料泵在满负荷下10 min流量;在LNG码头、LNG气化区、LNG装车区考虑最大单一事故泄漏源的10 min流量。主要假设场景为LNG从破裂主管线泄漏,持续10 min,泄漏后的LNG

流入集液池,发生闪蒸气化,瞬间产生大量蒸气,形成重气顺风扩散。

本项目主要可能发生的蒸气云扩散安全距离采用挪威船级社安全软件 PHAST 计算,结果见表 2。

表 2 不同区域蒸气云扩散安全距离 单位:m

蒸气云浓度	LNG 码头集液池	LNG 罐区集液池	LNG 装车区集液池	LNG 气化区集液池
2.5 %	67.6	222.0	67.6	222.0
5.0 %	42.6	121.0	42.6	121.0

注:泄漏工况选择执行 GB 50183 - 2004。

当采用 PHAST 软件对集液池的蒸气云扩散进行校核时,可以得出相关扩散后果范围对居民影响值,计算结果远低于规范要求。

3.4 控制室抗爆校核

根据 SH /T 3160 - 2009《石油化工控制室抗爆设计规范》解释,一般情况下,控制室抗爆只考虑蒸气云爆炸,而对于蒸气云爆炸,未进行评估时推荐两种参数取参考值:冲击波峰值入射超压最大值 69 kPa,正压作用时间 20 ms;冲击波峰值入射超压最大值 21 kPa,正压作用时间 100 ms^[21]。前者相当于 1 t TNT 在自由空气中爆炸后在距中心距离 30.5 m(100 ft)处所产生的冲击波超压,后者相当于直径 60 m、高 4 m 且包含 6 % 乙烷的气体爆炸距中心距离 75 m 处产生的冲击波超压。但不论采取何种数值均应该得到业主的确认,也可以结合石油化工装置性质、平面布置(主要是泄露点布置)、风向等因素,运用安全模拟分析软件,模拟计算建筑物所处位置的爆炸冲击波参数。本次对居民影响取值 2 kPa /100 ms,对厂内重要设施冲击取值 21 kPa /100 ms。

在风速 2 m /s、大气温度 21℃、大气湿度 50 % 情况下,将主要可能发生的爆炸采用 PHAST 软件计算蒸气云

扩散间距,结果见表 3。

表 3 不同区域蒸气云扩散安全距离 单位:m

LNG 码头集液池	LNG 罐区集液池	LNG 装车区集液池	LNG 气化区集液池
135.2	330.0	135.2	330.0
72.1	150.0	72.1	150.0

注:泄漏工况选择执行 GB 50183 - 2004。

当采用 PHAST 软件对集液池的蒸气云爆炸进行校核时,可以得出相关扩散计算结果较规范要求值 500 m 更小。

3.5 采用定量风险评价

GB /T 22724 - 2008《液化天然气设备与安装 陆上装置设计》要求:LNG 设备安装设计应减小罐区内 对外财产和生命的风险;在站场设计期间应进行危险评价。

国外不同机构的个人风险标准见表 4。

表 4 国外不同机构所采用的界区内个人风险标准

机构	适用范围	每年最大可接受风险值	每年可以忽略不计的风险值
英国安全卫生部	现有危险性设施	10^{-3}	10^{-6}
壳牌石油公司	陆上和海上设施	10^{-3}	10^{-6}
英国石油公司	陆上和海上设施	10^{-3}	10^{-5}
Norsk Hydro 公司	陆上设施	10^{-3}	-
ICI 公司	陆上设施	-	3.3×10^{-5}
挪威石油公司	陆上设施	-	8.8×10^{-5}

本 LNG 接收站失效频率采用挪威船级社安全软件 Safeti 进行计算,主要计算条件及结果见表 5。

LNG 接收站主要人员存在场所个人风险见表 6。

根据以上分析可知,在 LNG 接收站内没有出现 10^{-3} 级的个人风险值,仅出现 10^{-4} 级的个体风险等值线,且覆盖区域较小时,员工个体风险满足标准要求。

表 5 LNG 接收站失效频率计算条件及结果

项目	包含设施	失效模式	失效频率
船舶	4 台 DN 400 卸料臂,1 台 DN 400 气相臂	LNG 船舶拉断卸料臂,泄漏流量:5 304 t /h 的 LNG	24×10^{-5}
卸船 LNG 管线	约 500 m, DN 1000 卸船管	卸船管线应力拉断,泄漏流量:5 304 t /h 的 LNG	0.45×10^{-7}
储存系统	4 座 $20 \times 10^4 \text{ m}^3$ LNG 混凝土全容罐	$20 \times 10^4 \text{ m}^3$ LNG 全容罐顶部塌陷,单罐储存容积约 $9 \times 10^4 \text{ t}$ 的 LNG	4×10^{-8}
LNG 高压泵	5 台 LNG 高压泵(1 台为备用)、1 台再冷凝器	泵的进出口管线拉断,泄漏流量:145 t /h 的 LNG	3.42×10^{-5}
LNG 气化器	4 台 145 t 的 IFV 气化器	IFV 气化器的进口管线拉断,泄漏流量:145 t /h 的 LNG	5×10^{-7}
天然气气体管线	约 1 000 m, DN 400 天然气管线	全口径破裂,泄漏流量:580 t /h 的天然气	1×10^{-5}

表6 LNG接收站主要人员存在场所个人风险

序号	站内位置	个人风险值
1	接收站综合楼	4.2×10^{-4}
2	码头控制室	9.7×10^{-5}
3	门卫	2.0×10^{-4}
4	维修车间	9.5×10^{-5}
5	装车控制室	4.8×10^{-6}
6	主控室	8.3×10^{-4}
7	距离LNG储罐壁500 m处	1×10^{-7}

4 结论

1) 根据本案例实施情况,在LNG项目设计过程中完全可以执行以事故后果为依据的安全间距校核手段,来校核现有安全间距条款无法涉及的爆炸、中毒、扩散等工况。

2) 对LNG储量巨大的LNG接收站、储备库,推荐进一步采用定量风险评价,从量化风险的角度,评价危险化学品危险源对周边环境造成的事故影响的风险可接受程度,来保障周边居民生命财产安全。

3) 根据帕累托定律,系统的风险往往只由少数单元决定,为避免过大的计算量,需通过一定的筛选方法选择出对整个系统影响较大、风险较高的核心单元进行风险计算。

参考文献:

- [1] 孙晓平. LNG液化烃罐区燃爆风险评价及对策研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2013.
Sun Xiaoping. Risk Assessment and Countermeasures of LNG Liquefied Hydrocarbon Tank Area Explosion [D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2013.
- [2] 罗冬林. 从LNG事故浅谈LNG气化站安全管理[J]. 制冷与空调,2012,26(4):419-420.
Luo Donglin. According to the LNG Accident on LNG Gasification Station Safety Management [J]. Refrigeration & Air Conditioning, 2012, 26 (4): 419-420.
- [3] 孙晓平,朱 渊,陈国明,等. 国内外LNG罐区燃爆事故分析及防控措施建议[J]. 天然气工业,2013,33(5):126-131.
Sun Xiaoping, Zhu Yuan, Chen Guoming, et al. An Analysis of Foreign and Domestic Explosion Accidents in LNG Tank Fields and Proposals for Preventing Measures [J]. Natural Gas Industry, 2013, 33 (5): 126-131.
- [4] 田长栓. 关于我国LNG汽车加气站安全运行管理的分析与研究[C]//中国土木工程学会. 中国土木工程学会燃气分会液化石油气专业委员会第29届会议论文集. 重庆:中国土木工程学会,2014.

Tian Changshuan. Analysis and Research on Safety Operation and Management of LNG Vehicle Refueling Station in China [C]//China Civil Engineering Society, Proceedings of the 29th Conference of Liquefied Petroleum Gas Committee of Gas Branch of China Civil Engineering Society. Chongqing: China Civil Engineering Society, 2014.

- [5] 董安科. 历史上十二月发生的危险化学品事故[R]. 北京: 国家安全生产监督管理总局,2017.
Dong Anke. History of Hazardous Chemical Accidents in December [R]. Beijing: State Administration of Work Safety, 2017.
- [6] 王一鸣,李凡荣,汪 民. 中国天然气发展报告[R]. 北京: 国家能源局,2017.
Wang Yiming, Li Fanrong, Wang Min. China Natural Gas Development Report [R]. Beijing: National Energy Administration, 2017.
- [7] 梁 雪,刘 骥,高建明,等. 国内外危险化学品安全距离探讨[J],中国安全生产技术,2008,4(1):86-90.
Liang Xue, Liu Ji, Gao Jianming, et al. The Situation of Safety Distance on Dangerous Chemical and Its Indications [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2008, 4 (1): 86-90.
- [8] 刘 悦. 美国化工厂设计安全规范[J]. 化工设计,2000,10(3):48-49.
Liu Yue. Safety Code for Chemical Plant Design in USA [J]. Chemical Engineering Design, 2000, 10 (3): 48-49.
- [9] 白永忠,党文义,刘昌华. 特大型石油化工装置间安全距离[J]. 大庆石油学院学报,2008,32(6):71-75.
Bai Yongzhong, Dang Wenyi, Liu Changhua. Discussion of Safe Intervals Between Super Petrochemical Installations [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2008, 32 (6): 71-75.
- [10] 李昌桦,杨毓中,徐启铭,等. 意大利萨维索(Seveso)事件[J]. 化工安全与环境,2001,(12):2-5.
Li Changhua, Yang Yuzhong, Xu Qiming. Event in Zaviezo, Italy [J]. Chemical Engineering Safety and Environment, 2001, (12): 2-5.
- [11] 柯兰海(Cornelis Bronke). 对危险物质重大事故灾害的控制—欧盟《Seveso II指令》[J]. 国际石油经济,2004,(5):39-40.
Cornelis Bronke. Control of Major Accident Hazardous Material Accidents-EU Seveso II Directive [J]. International Petroleum Economics, 2004, (5): 39-40.
- [12] 李 凯,张耀文,王 辉,等. “十五”国家科技攻关计划“城市公共安全规划技术、方法与程序研究”专题总结报告[R]. 北京:国家安全生产监督管理局安全科学技术研究中心,2004.
Li Kai, Zhang Yaowen, Wang Hui, et al. Summary Report of the “Tenth Five-Year” National Science and Technology Research Program “Urban Public Security Planning

- Technology, Methods and Procedures" [R]. Beijing: Safety Science and Technology Research Center of the State Administration of Work Safety, 2004.
- [13] Jonkman S N, Gelder P H A J M, Vrijling J K. An Overview of Quantitative Risk Measures for Loss of Life and Economic Damage [J]. Journal of Hazardous Material, 2003, 99 (1): 1 - 30.
- [14] 国家安全生产监督管理局. 危险化学品重大危险源监督管理暂行规定[Z/OL]. [2018 - 01 - 10]. https://www.techstreet.com/standards/asce-7-10?product_id=1677786.
- State Administration of Work Safety. Interim Provisions on the Supervision and Management of Major Hazardous Chemicals Hazardous Chemicals [Z/OL]. [2018 - 01 - 10]. https://www.techstreet.com/standards/asce-7-10?product_id=1677786.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑设计防火规范: GB 50016 - 2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 50016 - 2014, Code for Fire Protection Design of Buildings: GB 50016 - 2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for Fire Protection Design of Petroleum and Natural Gas Engineering: GB 50183 - 2004 [S]. Beijing: China Planning Press, 2004.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 石油化工控制室抗爆设计规范: GB 50779 - 2012[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for Design of Blast Resistant Control Building in Petrochemical Industry: GB 50779 - 2012 [S]. Beijing: China Planning Press, 2012.
- [18] 全国天然气标准化技术委员会. 液化天然气设备与安装陆上装置设计: GB/T 22724 - 2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- China Natural Gas Standardization Technology Committee. Installation and Equipment for Liquefied Natural Gas-Design of Onshore Installations: GB/T 22724 - 2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [19] 陈国华, 成松柏. LNG 泄漏事故后果模拟与定量风险评估[J]. 天然气工业, 2007, 27(6): 133 - 135.
- Chen Guohua, Cheng Songbai. Consequence Simulation on LNG Leakage Accidents and Its Quantitative Risk Assessment [J]. Natural Gas Industry, 2007, 27 (6): 133 - 135.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 液化天然气接收站工程设计规范: GB 51156 - 2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for Design of Liquefied Natural Gas Receiving Terminal: GB 51156 - 2015 [S]. Beijing: China Planning Press, 2015.
- [21] The American Society Civil Engineers. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures: ASCE 7 - 10 [S/OL]. [2018 - 01 - 10]. https://www.techstreet.com/standards/asce-7-10?product_id=1677786.

川庆钻探刷新页岩气井压裂 6 项纪录

2018 年 5 月初, 川庆钻探井下作业公司施工的黄 202 井圆满完成 30 段加砂压裂, 累计注入液量 $6.02 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、支撑剂 4 200 t。目前, 这口井正在进行开井、排液、测试求产作业。这口井压裂段数、施工排量、施工压力、液量、加砂量、加砂强度 6 项指标创下中国石油深层页岩气井压裂新纪录。

黄 202 井具有埋藏深度大、地应力绝对值高、水平应力差值大等特点。井下作业公司精心安排、周密筹划, 从设备和安全两个环节强化施工保障。井下作业公司参与施工的 22 台 2500 型压裂车在每段施工后立即进行检泵、排空、试压, 强化设备巡回检查, 及时消除设备故障。该公司从地面安装到施工的各个环节严格按照“三标一规范”的要求, 对高压管汇采用绑带缠绕, 对弯头、井口高压管件安装防护网, 施工中加大巡查力度, 保证了安全生产。

黄 202 井加砂压裂的顺利完成, 为该公司深层页岩气水平井的压裂改造积累了经验。