

基于显式分析的 LNG 装车臂拉断阀作用过程研究

周怀发 申永亮

中国石化青岛液化天然气有限责任公司, 山东 青岛 266400

摘 要: 紧急拉断阀(紧急脱离装置)是防止鹤管和软管意外断裂造成泄漏事故的关键设备。根据移动式压力容器充装许可规则,装卸台要有防止装卸用管拉脱的连锁保护装置。目前装车臂安装拉断阀的应用经验较少,且现有实验仅是针对拉断阀个体进行的,人们对其安全可靠存在疑虑,而带臂带液实地测试则冒着损坏设备以及大规模泄漏的风险,经济及安全成本较大。针对这一现状,以国产某 LNG 装车臂为例,利用 LS-DYNA 建立装车臂拉断阀的有限元模型,结合设计参数和实际工况进行仿真计算,得到了拉断阀的作用情形和规律,对拉断阀的设计及使用提出了若干建议。

关键词: LNG; 槽车; 装车臂; 拉断阀; LS-DYNA; 有限元

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2017.03.008

Research on the Breaking of Break-Away Coupling at LNG Loading Arm Based on Explicit Analysis

Zhou Huaifa, Shen Yongliang

Sinopec Qingdao Liquefied Natural Gas Co., Ltd, Qingdao, Shandong, 266400, China

Abstract: Break-away coupling is a key equipment to prevent the leakage caused by the hose breaks unexpectedly. According to the filling permission rules for mobile pressure vessels, interlocking protection device shall be installed on the station to prevent pipeline pull-out. At present, there is little experience in application of break-away coupling in the loading arm, and the existing experiment is only for the individual of the break-away coupling. There are doubts about its safety and reliability, while the field testing with arm and liquid may cause damage to equipment and large-scale leakage, as well as the economic and security costs. In response to this situation, taking certain domestic LNG load-arm break-away coupling as an example, the finite element model of break-away coupling is established by LS-DYNA, and the simulation results under the design parameters and actual working conditions are given. Several recommendations are made for the design and application of break-away coupling.

Keywords: LNG; Truck; Loading arm; Break-away coupling; LS-DYNA; FEM

0 前言

随着清洁能源的快速发展,LNG 接收站的装卸安全性越来越受到重视。槽车外输 LNG 成为重要的运输环节,槽车充装工作涉及人员操作,极易发生泄漏。紧急拉断阀则是在充装过程中为充装安全和设备保护提供的一道屏障。紧急拉断阀作为一种被动防护措施,其实质上是为装车臂设置一处弱点,当整条装车臂受到不可控应力情况下,拉断阀承受的拉力大于额定值时,拉断阀能够及时断裂,避免装车臂其他结构受力破损。与此同时,拉断阀另一项重要功能就是其断裂面两端会自动封闭,防止危险品介质泄漏^[1-5]。

目前常温拉断阀在加油站已经得到广泛使用,低温拉断阀更多地应用在软管和输送管线连接端,王传惠等人和颜录通从拉断阀安全性能角度对 CNG 储配站卸气软管拉断阀进行了实验研究^[6-7]。张斌对低温拉断阀的拉断力进行了探讨^[8],严小刚等人对安全拉断阀往复拉伸疲劳试验的测试装置进行了研究^[9]。徐四忠等人介绍了紧急拉断阀的结构特点、工作原理,总结了软管装车的工程应用和效果^[10]。目前基本没有对低温拉断阀在非软管装车臂的研究,装车臂拉断阀安装应用时间较短、经验少,各种情况下拉断阀断裂情形均不可预知,人们对其安全可靠存在疑虑,而实地测试则冒着损坏设备以及大规模泄漏的风险,经济及安全成本较大。针对这一现状,利用 LS-DYNA 显式动力学程序进行仿真计算,得到了各种工况下拉断阀的断裂情形,针对暴露出的问题,提出了若干建议。

1 槽车紧急拉断阀的仿真模拟

以在用的国产某 LNG 装车臂为例,装车臂结构主要由内臂、外臂、旋转接头、加强筋、附属管线、相关隔离球阀组成。考虑到本次研究对象为装车臂在拉断阀断裂情况下的形态,在建模过程中进行了若干简化^[11-20]:

- 1) 装车臂安装所在立柱简化为固定约束。
- 2) 装车臂所附属的氮气吹扫管线、NG 放空管线对拉断阀的拉断无影响,故模型中未予考虑。
- 3) 装车臂的各类阀门结构复杂,故未在模型中体现,将其重量平均分布在所属管线上。
- 4) 力平衡机构在装车臂法兰连接槽车后作用不大,且不影响装车臂结构强度,故模型中未予考虑。
- 5) 装车臂旋转接头内部结构非常复杂,忽略其复杂的内部密封结构和氮气保压结构。模型中采用同轴自由度的圆柱来实现其旋转功能。

6) 模型中对拉断阀进行简化,拉断阀的致断栓材质设定为弹性可失效结构,其余部件均设定为线弹性体。

由于文中采用的拉断力等数据为低温状态下的数据,所以结构材料均没有考虑温度应力等影响,拉断阀结构断裂示意图见图 1。

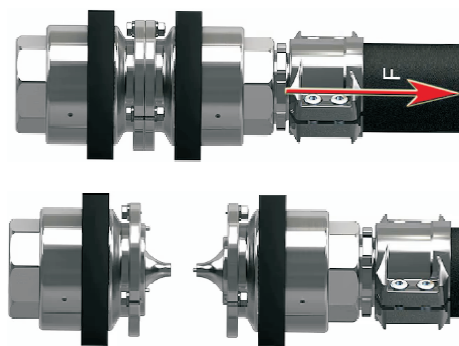


图 1 拉断阀断裂示意图

1.1 显示有限元模型的建立

本文采用 ANSYS 有限元软件对装车臂拉断阀进行前处理,为方便修改参数,整体几何模型采用参数化设计语言 (APDL) 建立,见图 2。建模采用自上而下的方式,逐步建立外臂、内臂、旋转接头、拉断阀变径处,最后进行几何切割以方便划分面网格。模型均采用 solid 164 显式单元划分,整条装车臂大部分结构均采用扫略划分为六面体网格,拉断阀变径处及相连臂划分为四面体网格,见图 3。在装车臂根部加固定约束,在装车臂法兰处加载垂直方向的位移以体现槽车运动。同时在装车臂与旋转接头之间设定自动面面接触以实现旋转接头的旋转功能。

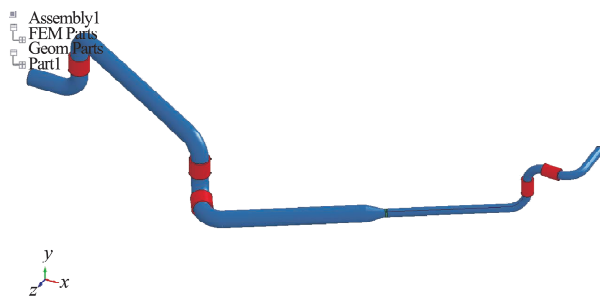


图 2 装车臂几何模型

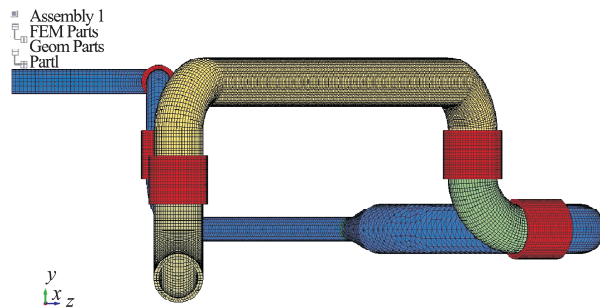


图 3 网格划分

1.2 仿真结果分析

仿真结果采用 LS-PREPOST 软件查看,由图 4 可以看出,装车臂在法兰处外力的作用下会逐渐由初始的蠕

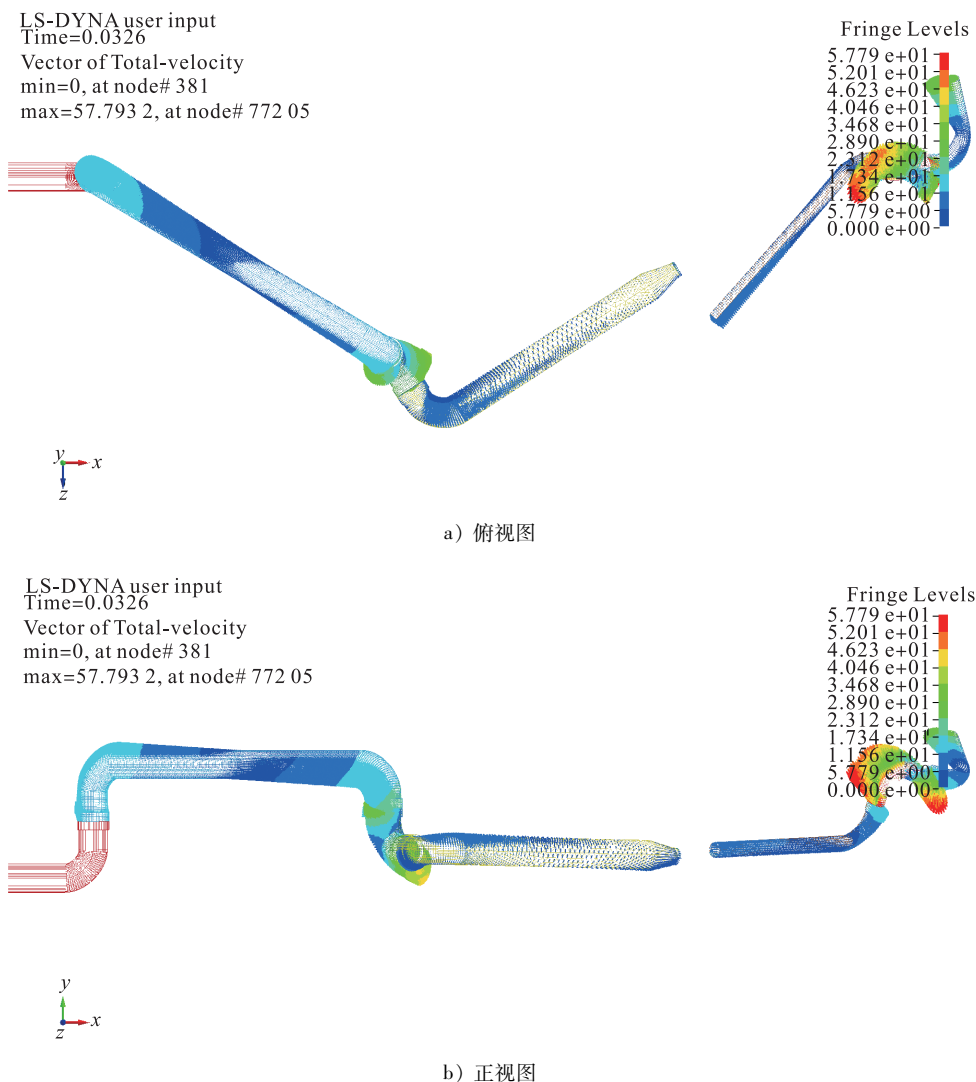


图4 拉断阀断后装车臂形态

缩状态拉伸,当拉力达到失效条件时,拉断阀致断螺栓就发生断裂。装车臂在拉断阀处断裂为两部分。分析可知,在整个过程中,装车臂出现较大振幅的振动,且在旋转接头处振动更为明显。

2 影响因素分析

2.1 槽车意外滑车因素分析

考虑槽车尾部泄漏液体流入导液沟,槽车区场地的地势设计为车头略高于车尾。所以槽车的意外滑动情形一般为向后溜车。LNG 槽车空车一般重 28 t,装满液后为 48 t。槽车的溜车势必会导致装车臂跟随运动。以液相口在左、气相口在右为例,在槽车轻微溜车时,装车臂会跟随转动,不会触发拉断阀断裂。但当溜车距离较大时,装车臂转动余量已耗尽,槽车尾部车体内侧车框会直接撞击装车臂,使拉断阀处产生剪力和弯矩。并且两条装车臂之间也会发生交叉接触。气相臂的转动余量首先耗尽,较早地与车体接触,气相臂拉断阀也会较早达到失效条件而断裂。液相臂拉断阀也会随后达到

拉断力而断裂。

分析可知,现有充装操作规程中槽车停稳后需放置挡车块的措施是十分必要的。同时,挡车块的尺寸、强度、位置也要有所要求,一是要同时在两车轮后方配备两个挡车块;二是挡车块的放置位置既不能紧贴车轮,以防止车体进液变重后车轮将挡车块压紧不能取出,也不能距离车轮位置太远,以便溜车时能够在溜车初始及时挡住车轮,避免车辆速度动量过大;三是挡车块的材质强度及摩擦系数要符合规定,防止因槽车将挡车块压碎或者挡车块滑动而失效。

2.2 拉断阀安装位置分析

移动式压力容器充装许可规则没有对拉断阀安装位置做具体规定。由于外臂与内臂除了在旋转接头处连接外,还有弹簧平衡机构相连。拉断阀若安装在内臂上,一是弹簧平衡机构也会被拉断,对装车臂造成更大的损伤;二是现有的拉断阀尺寸会对正常装车流速产生影响。故拉断阀无法安装在内臂上,只能安装在外臂或者与槽车直接相连的臂上。若安装在与槽车直接相连

的臂上,一是该臂配重较高,不便于充装人员连臂操作;二是拉断阀安装在装车臂末端与槽车直接连接处,没有旋转接头等回旋余地,一旦槽车发生移动,所产生的力会直接作用在拉断阀,容易造成常规操作将拉断阀拉断,拉断前基本没有“缓冲期”。

目前装车臂拉断阀是安装在外臂手动隔离阀后的中间部分,一旦拉断阀断裂,槽车会带走法兰面处直到拉断阀部分结构。与橇体连接的装车臂在断裂之后会产生振动,并由于配重的减轻在弹簧平衡机构的作用下向上翘起,最后趋于稳定。

2.3 槽车与装车臂对接位置影响分析

由于目前在用的 LNG 槽车规格不一,气液相法兰接口相对位置不一致。分别针对几种组合情况进行了仿真分析。

槽车装车位在装车岛右侧时,若槽车的气相法兰口位于液相法兰口的右侧,则液相臂伸展幅度较小,气相臂伸展幅度较大。槽车的气相法兰口位于液相法兰口的左侧,则液相臂伸展幅度较大,气相臂伸展幅度较小。槽车装车位在装车岛左侧时,若槽车的气相法兰口位于液相法兰口的右侧,则液相臂伸展幅度较大,气相臂伸展幅度较小。若槽车的气相法兰口位于液相法兰口的左侧,则液相臂伸展幅度较小,气相臂伸展幅度较大。

槽车停靠位置与橇体距离大于装车臂的第一节外臂时,槽车向前开,则伸展幅度较大的装车臂较早被拉断。槽车停靠位置与橇体距离小于装车臂的第一节外臂时,由于伸展较小的臂没有转动空间,导致槽车前进到极限位置时,第一节臂则不能再运动,导致第二节臂直接受拉力而较早被拉断。

2.4 拉断力数值影响分析

目前带金属网套的不锈钢波纹管的 LPG、CNG、LNG 软管的拉断力仅为 400 ~ 600 N,且现有规定数值较为保守,而对于装车臂所用的拉断阀的拉断力则没有明确的要求。由于装车臂强度要远大于不锈钢波纹管强度,装车臂拉断阀的拉断力应远大于不锈钢波纹管拉断阀拉断力,但同时要考虑较大的力对装车臂的旋转接头结构可能造成损伤。目前在用的 ABVC 超低温拉断阀的拉断力为 13 ~ 20 kN。

拉断力过大,可能触发内部簧片脱钩,阀门关闭,但螺栓没有达到拉断的失效条件。从外观上若未能发现拉断阀已密封而进入介质,则很容易形成管线憋压,造成更大的安全隐患。若其中一根螺栓失效,而拉断阀未拉断,则拉断阀处极易发生轻微泄漏。

拉断力过小,则容易造成常规操作导致拉断阀断裂的情况。拉断阀外部一段的重量也影响拉断阀的应力状态,拉断阀的三根致断螺栓并非受同样的拉力。目前的实践经验表明,拉断阀的设计既应考虑正向拉力,也

应考虑弯矩、扭矩带来的切向力。拉断阀拉断后,应对旋转接头进行检查,避免因拉断时旋转接头发生松动等问题带来隐患。

2.5 装车臂伸展情况影响

槽车的停靠位置直接影响两条装车臂的伸展状态,若装车臂与槽车连接后处于极限拉伸状态,拉断阀就受拉力,此时若司机的动作幅度较大就有可能导致拉断阀断裂。即便勉强连接好装车臂,拉断阀也有受拉的预应力状态,在开始装车后,装车臂预冷收缩,极易造成拉断阀断裂。

3 结论与建议

1)不同的装车岛及槽车连接位置下,气相和液相装车臂断裂的先后顺序不一。同一型槽车在同一个装车岛,槽车的停靠位置也对两条装车臂的断裂时间有影响。拉断阀连接时应确保装车臂有较大的旋转冗余度,防止低温造成装车臂受拉断裂。

2)装车臂拉断阀应安装在外臂手动隔离阀后靠近法兰一侧,尽量减小拉断阀另一侧的配重。

3)拉断阀的拉断力数值对装车臂能否保证实现设计功能至关重要,拉断阀致断螺栓的分布及拉断力的大小应进一步优化。除了拉断阀轴向拉力外,还应考虑承受切向力和扭力,以及致断螺栓承受多次外力作用而产生的疲劳破坏。

4)日常维护中要定期检查和测试拉断阀螺栓强度变形情况,避免拉断螺栓低温交变共同造成疲劳强度降低。

5)应尽快建立体现拉断阀具体技术要求的相关标准。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 移动式压力容器充装许可规则: TSG R 4002 - 2011 [S]. 北京: 新华出版社, 2011.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Transportable Pressure Vessel Filling Licensing Regulation: TSG R 4002 - 2011 [S]. Beijing: Xinhua Publishing House, 2011.
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 燃油加油站防爆安全技术: GB 22380.2 - 2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Explosion Protected Safety Technique of the Petrol Filling Station: GB 22380.2 - 2010 [S]. Beijing: China Standards Press, 2011.

- [3] 顾安忠. 液化天然气技术手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2010: 284-345.
Gu Anzhong. Technical Manual of Liquefied Natural Gas [M]. Beijing: China Machine Press, 2010: 284-345.
- [4] 廖志敏, 杜晓春, 陈刚. LNG的研究和应用[J]. 天然气与石油, 2005, 23(3): 28-31.
Liao Zhimin, Du Xiaochun, Chen Gang. Investigation and Application of LNG [J]. Natural Gas and Oil, 2005, 23(3): 28-31.
- [5] 熊光德, 毛云龙. LNG存储和运输[J]. 天然气与石油, 1999, 23(2): 17-20.
Xiong Guangde, Mao Yunlong. Storage and Conveyance of LNG [J]. Natural Gas and Oil, 1999, 23(2): 17-20.
- [6] 王传惠, 席丹. CNG储配站卸气软管加装拉断阀的研究[J]. 煤气与热力, 2012, 32(7): 60-61.
Wang Chuanhui, Xi Dan. Research on Installing Break-away Coupling at Unloading Hose in CNG Storage and Distribution Station [J]. Gas & Heat, 2012, 32(7): 60-61.
- [7] 颜录通. CNG加气站运行中的安全隐患与防范措施[J]. 天然气技术与经济, 2014, 8(2): 53-56.
Yan Lutong. Potential Risks during Operation of CNG Stations and Precautions [J]. Natural Gas Technology and Economy, 2014, 8(2): 53-56.
- [8] 张斌. 对低温拉断阀的拉断力的探讨[J]. 化工管理, 2014, (11): 166-167.
Zhang Bin. Discussion on Pulling-off Force of Low Temperature Break-away Coupling [J]. Chemical Enterprise Management, 2014, (11): 166-167.
- [9] 严小刚, 梁丽君, 曹观标, 等. 安全拉断阀往复拉伸疲劳试验的测试装置研究[J]. 科技资讯, 2013, (4): 116.
Yan Xiaogang, Liang Lijun, Cao Guanbiao, et al. Study on the Test Device of the Reciprocating Tensile Fatigue Test of Safety Pull-off Valve [J]. Science & Technology Information, 2013, (4): 116.
- [10] 徐四忠, 周德勇, 徐水根. 紧急切断阀在低温液体充装中的应用[J]. 深冷技术, 2015, (7): 8-10.
Xu Sizhong, Zhou Deyong, Xu Shuigen. Application of Emergency Release Coupler in Filling of Cryogenic Liquid [J]. Cryogenic Technology, 2015, (7): 8-10.
- [11] 郝亮, 刘永强, 廖英英. 基于ANSYS/LS-DYNA的移动式压力容器动态碰撞仿真分析[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版, 2013, 26(4): 52-56.
Hao Liang, Liu Yongqiang, Liao Yingying. Dynamic Impact Simulation Analysis for Mobile Pressure Vessel Based on ANSYS/LS-DYNA [J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University: Natural Science, 2013, 26(4): 52-56.
- [12] 屈宜生, 胡伟. 液化天然气(LNG)储运罐车泄漏应急处置技术与方法[J]. 中国安全生产科学技术, 2013, 9(4): 99-103.
Qu Yisheng, Hu Wei. Emergency Disposal Technology and Method for Leakage of Liquefied Natural Gas (LNG) Storage Tank [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2013, 9(4): 99-103.
- [13] 韩会林, 孙兰萍, 张圣康. 国内首台LNG槽车装车设备设计[J]. 装备制造技术, 2013, (8): 198-199.
Han Huilin, Sun Lanping, Zhang Shengkang. Design of the First LNG Tanker Loading Arm in China [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2013, (8): 198-199.
- [14] 刘树锋, 周怀发, 孙世一. LNG槽车装车橇测试验收及试运行的控制要点[J]. 油气储运, 2016, 35(4): 444-448.
Liu Shufeng, Zhou Huaifa, Sun Shiyi. Control Points of Skid-mounted LNG Loading Facility during Ex-factory Acceptance and Test Run [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2016, 35(4): 444-448.
- [15] 卢鼎, 任东. 浅谈LNG槽车装车安全隐患[J]. 化工设计通讯, 2016, 42(3): 157.
Lu Ding, Ren Dong. On the LNG Tanker Loading Security Risks [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2016, 42(3): 157.
- [16] 杨建坡. LNG槽车装车操作方式及其优化措施[J]. 油气储运, 2012, 31(增刊1): 41-43.
Yang Jianpo. Loading Mode of LNG Tanker and Its Optimization [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2012, 31(Suppl 1): 41-43.
- [17] 沈艳俐. LNG槽车装卸臂优化改造配重计算[J]. 上海煤气, 2010, (1): 10-12.
Shen Yanli. Optimization of Transformation of LNG Tanker Loading Arm Weight Calculation [J]. Shanghai Gas, 2010, (1): 10-12.
- [18] 宋坤, 衣鹏, 胡贤文. LNG槽车装车橇应用和国产化进程[J]. 天然气与石油, 2013, 31(3): 5-9.
Song Kun, Yi Peng, Hu Xianwen. Application of Skid-mounted LNG Tanker Loading Facility and Its Localization Progress [J]. Natural Gas and Oil, 2013, 31(3): 5-9.
- [19] 贺耿, 王新良, 张德均, 等. LNG槽车装车控制系统设计[J]. 天然气与石油, 2013, 31(3): 66-70.
He Geng, Wang Xinliang, Zhang Dejun, et al. Design of Control System in LNG Tanker Loading Facility [J]. Natural Gas and Oil, 2013, 31(3): 66-70.
- [20] 贺耿, 王正, 包光磊. LNG槽车装车系统的技术特点[J]. 天然气与石油, 2012, 30(4): 11-14.
He Geng, Wang Zheng, Bao Guanglei. Technical Characteristic of LNG Truck Loading System [J]. Natural Gas and Oil, 2012, 30(4): 11-14.