

文章编号: 1674-2869(2016)06-0605-06

基于有限元的长管拖车气瓶瓶肩结构分析

李大星¹, 魏化中^{1*}, 陶芳泽², 吴斌¹, 高宏¹

1. 武汉工程大学机电工程学院, 湖北 武汉 430205;

2. 中国特种设备检测研究院, 北京 100029

摘要: 为了改善长管拖车气瓶瓶肩的受力状态, 尝试在长管拖车气瓶瓶肩添加一种矩形环凸形结构, 运用 ANSYS 软件分别模拟了环凸形结构离肩距为 10 mm~55 mm、长度为 40 mm~130 mm、宽度为 6 mm~24 mm 范围内的最大位移、最大等效应力和最大轴向应力, 最后与长管拖车气瓶瓶肩不添加环凸形结构的结果对比分析。结果表明: 长管拖车气瓶瓶肩添加环凸形结构可以改善气瓶的受力状态, 减小最大位移大约 3.3%, 最大等效应力大约 10%, 最大轴向应力大约 5%, 气瓶受力状态与环凸形结构位置、长度和宽度大致呈线性关系, 这种设计为长管拖车气瓶的优化设计提供了参考。

关键词: 有限元; 长管拖车气瓶; 环凸形结构; 受力状态

中图分类号: TE834 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1674-2869.2016.06.017

Analysis of Shoulders Structure for Tube Trailer Gas Cylinder Based on ANSYS

LI Daxing¹, WEI Huazhong^{1*}, TAO Fangze², WU Bin¹, GAO Hong¹

1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;

2. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China

Abstract: To improve the stress state of tube trailer gas cylinder, we added a kind of rectangular ring convex structure on the shoulders of tube trailer gas cylinder and used ANSYS software to simulate respectively the maximum displacement, maximum von Mises stress and maximum axial stress, for the ring convex structure at shoulder distance of 10 mm–55 mm, length of 40 mm–130 mm, and width of 6 mm–24 mm. Finally we comparatively analyzed the results with that without ring convex structure. The study shows that adding ring convex structure can improve the stress states and decrease maximum displacement about 3.3%, maximum von Mises stress about 10% and maximum axial about 5%, and the linear relationship between stress state of gas cylinder and position, length and width of ring convex structure is also demonstrated. This design provides a reference for optimum designing of tube trailer gas cylinder.

Keywords: ANSYS; tube trailer gas cylinder; ring convex structure; stress state

1 引言

天然气是一种混合气态化石燃料, 含有多种成分, 大部分是烷烃类气体, 例如甲烷、乙烷、丙烷和丁烷。天然气燃烧后生成物主要是水和二氧化碳, 与传统能源相比, 天然气具有安全、热值高、环

保等特点, 天然气的需求量日益增大^[1]。天然气长管拖车是储存、运输压缩天然气(Compressed Natural Gas, CNG)的专用车, 它是由大容积气瓶通过框架与走行装置或直接与走行装置固定在一起而组成的运输设备^[2]。

长管拖车缠绕气瓶的筒体部分采用碳纤维环

收稿日期: 2016-05-12

作者简介: 李大星, 硕士研究生. E-mail: 1375483210@qq.com

*通讯作者: 魏化中, 教授. E-mail: weihzh@163.com

氧树脂预浸料干法缠绕,复合材料大型 CNG 专用气瓶的内衬可以采用热塑性塑料,如高密度聚乙烯.合适的缠绕张力可以使树脂产生预应力,因此可以提高缠绕气瓶的抗开裂能力.固化工艺是保证树脂充分固化的重要条件,它将直接影响复合材料制品的力学特性.国内正在大力研发碳纤维复合材料 CNG 专用气瓶^[3-7].

长管拖车气瓶筒体材料采用复合材料缠绕可以有效的增强气瓶的强度,内衬也可以使用新型材料,提高气瓶的承载能力.这些优化设计方法已经运用到实际生产过程中.

张艳春等^[8]讨论了液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)大型储罐不同部位加强圈的设计方法,运用所讨论的设计方法并结合国内某 LNG 接收终端项目的基础数据,对 LNG 储罐加强圈进行设计计算,得出的结果与参考项目吻合较好.李玉坤等^[9]运用有限元软件建立了储罐在不同载荷工况下的有限元数值计算模型,对抗风圈和加强圈分别进行了强度和稳定性计算,给出了罐壁的变形特点及极限风压值.对比分析根据 GB50341^[10]和 API650^[11]设计的抗风圈、加强圈的计算结果,给出了抗风圈和加强圈的设计计算意见,可为大型储罐的设计提供参考依据.蔡昌全等^[12]运用有限

元软件分析了长管拖车应力应变变形情况及其安全系数,得出了气瓶各部分受力变形情况及安全系数的大小.其结果表明,在正常受力情况下防转销钉处并不会成为失效点,而气瓶其它部分存在应力集中的位置.李伟^[13]运用有限元软件计算分析表明,长管拖车气瓶在内压载荷和惯性载荷的共同作用下,气瓶外表面第一圈啮合螺纹根部应力强度较大且高于材料的屈服极限,可能造成具备螺纹结构的应变强化并使得材料变脆.

以上的研究成果均有较高的使用价值,在长管拖车气瓶也可以设计与加强圈相似的结构,以改善长管拖车的受力状态.在长管拖车气瓶在检验过程中,检验员经常在瓶肩附件发现多种缺陷,这些缺陷往往与瓶肩复杂的受力状态和应力集中有着密不可分的关系,受力状态是能否导致缺陷的主要因素之一.针对这种状况,尝试在长管拖车气瓶瓶肩附近设置环凸形结构,使瓶肩附近区域的受力状态得到改善.

2 有限元分析

以某公司生产的长管拖车为研究对象,模拟分析环凸形结构对长管拖车受力状态的影响.其主要的尺寸参数和材料特性分别如表 1 和表 2 所

表 1 长管拖车气瓶的尺寸
Tab. 1 Dimension for tube trailer gas cylinder

material	volume/L	total length/mm	design thickness/mm	bottle diameter/mm	nominal diameter/mm
4130X	2 250	10 980	16.5	80	559

表 2 4130X 材料特性
Tab. 2 Material characteristics for 4130X

strength limit/MPa	elasticity/($\times 10^{11}$ Pa)	yield stress/MPa	poisson's ratio	work pressure/MPa
869	2.1	657	0.3	20

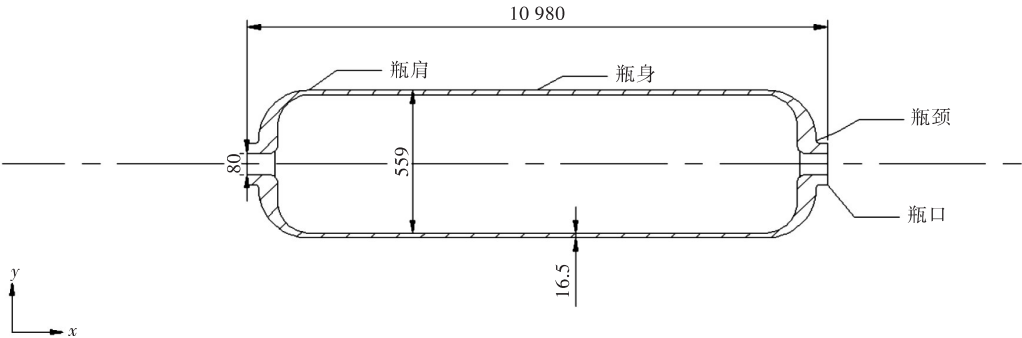


图 1 长管拖车气瓶示意图(单位:mm)
Fig. 1 Schematic diagram of tube trailer gas cylinder (unit:mm)

示,示意图如图1所示.

由于长管拖车气瓶是对称结构,所以采用 $\frac{1}{8}$ 气瓶体积建立几何模型,如图2所示.为提高ANSYS分析软件的精确性,单元类型采用20节点的solid186,网格划分采用等级为三的自由划分网格,有限元模型如图3所示.在瓶口和侧面施加全约束位移,瓶体中间截面施加Y方向约束,在平行于X轴的瓶体纵截面施加Y和Z方向的位移约束,平行于Z方向的纵截面施加X和Y方向的位移约束,在瓶体内表面施加20 MPa的载荷,然后求解.

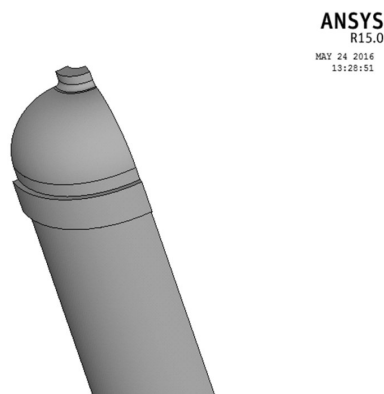


图2 气瓶几何模型

Fig. 2 Geometric model of gas cylinder

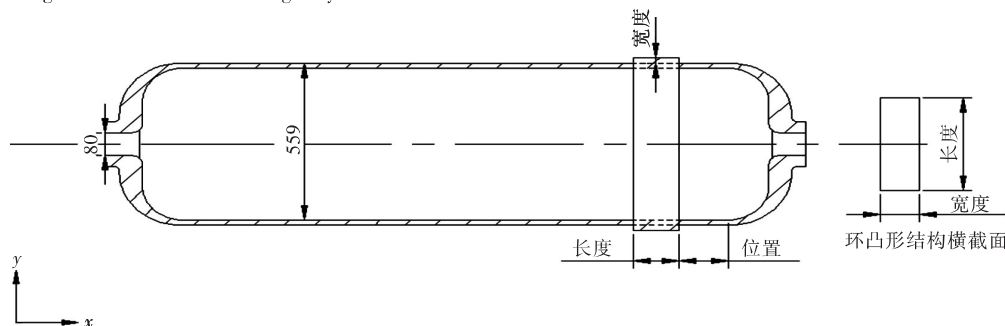


图4 环凸形结构的位置、长度、宽度示意图(单位:mm)

Fig. 4 Schematic diagram of position, length and width of ring convex structure (unit:mm)

的受力情况,其次模拟了当环凸形结构的长度和宽度为100 mm×10 mm时,在上边缘线离瓶肩的距离10 mm~55 mm范围内每5 mm设置环凸形结构的最大位移、最大等效应力和最大轴向应力,再次模拟了当环凸形结构上边缘离瓶肩的距离是40 mm、宽度是16 mm时,长度在40 mm~130 mm范围内每10 mm设置环凸形结构的最大位移、最大等效应力和最大轴向应力,最后模拟了当环凸形结构上边缘离瓶肩的距离是40 mm长度是100 mm时,宽度在6 mm~24 mm范围内每2 mm设置环凸形结构时的最大位移、最大等效应力和最大轴向应力.

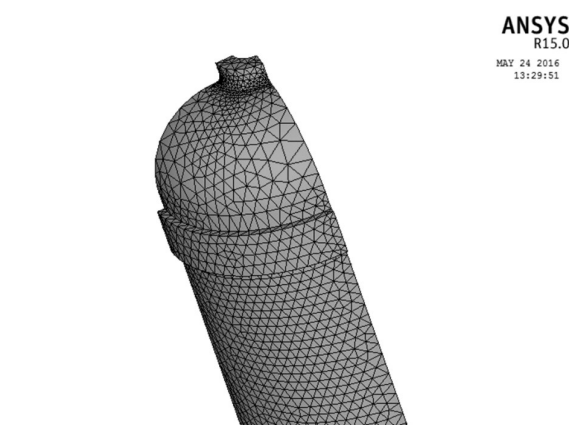


图3 气瓶有限元模型

Fig. 3 ANSYS model of gas cylinder

3 结果与讨论

3.1 模拟条件

长管拖车气瓶瓶肩的环凸形结构的位置与长度宽度如图4所示.

首先模拟了没有环凸形结构的长管拖车气瓶

不设置环凸形结构的长管拖车气瓶的最大位移是0.455 mm,最大等效应力是426 MPa,最大轴向应力是196 MPa.

3.2 模拟结果

图5~图7为最大位移随环凸形结构肩距、长度和宽度变化的结果.图8~图10为最大等效应力随环凸形结构肩距、长度和宽度的结果.图11~图13为最大轴向应力随环凸形结构肩距、长度和宽度的结果.

以上算例中,所有长管拖车的径向应力稳定在380 MPa,变化范围极小,所以不需要考虑环凸形结构不同位置、长度、宽度和厚度的设置对径向

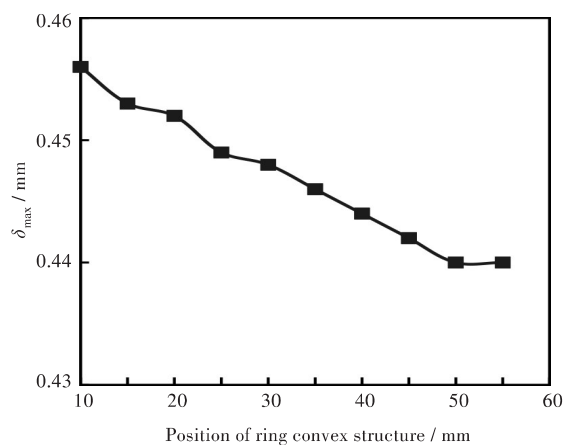


图5 环凸形结构的肩距对应最大位移

Fig. 5 Maximum displacement corresponding to shoulder distance of ring convex structure

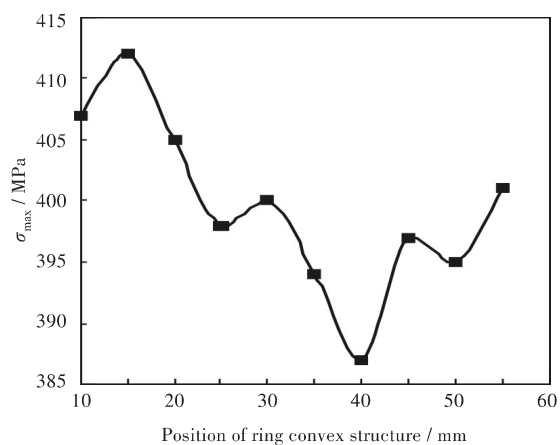


图8 环凸形结构的肩距对应最大等效应力

Fig. 8 Maximum mises stress corresponding to shoulder distance of ring convex structure

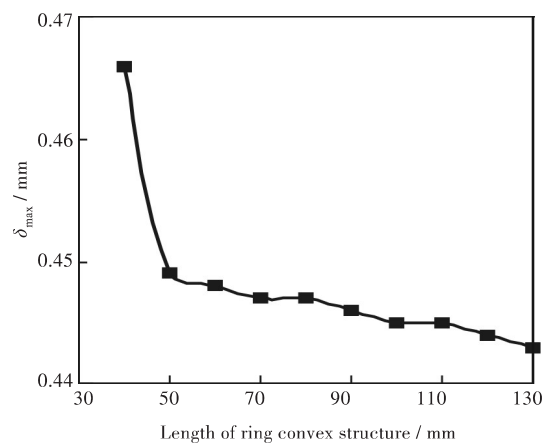


图6 环凸形结构的长度对应最大位移

Fig. 6 Maximum displacement corresponding to the length of ring convex structure

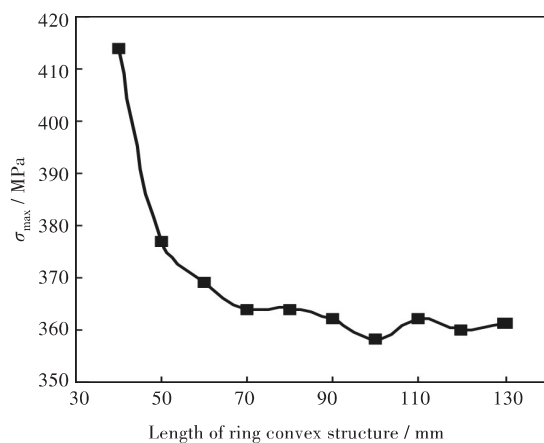


图9 环凸形结构的长度对应最大等效应力

Fig. 9 Maximum mises stress corresponding to length of ring convex structure

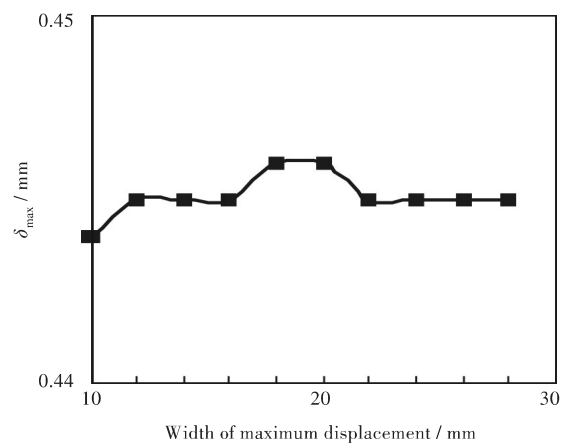


图7 环凸形结构的宽度对应最大位移

Fig. 7 Maximum displacement corresponding to the width of ring convex structure

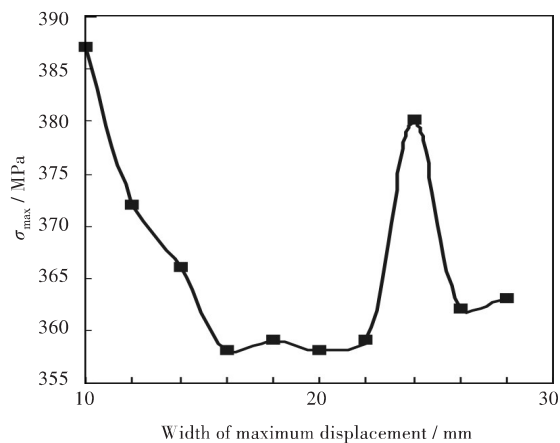


图10 环凸形结构的宽度对应最大等效应力

Fig. 10 Maximum mises stress corresponding to width of ring convex structure

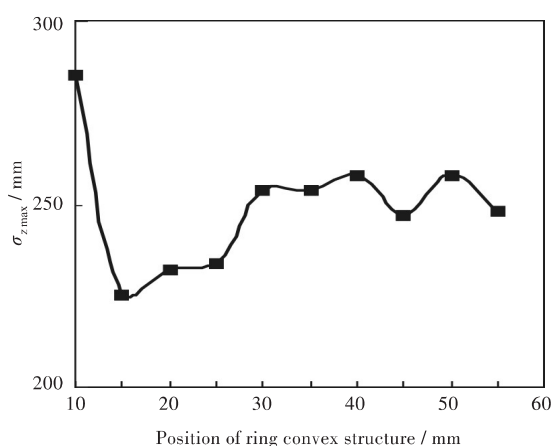


图 11 环凸形结构的肩距对应最大轴向应力

Fig. 11 Maximum axial stress corresponding to shoulder distance of ring convex structure

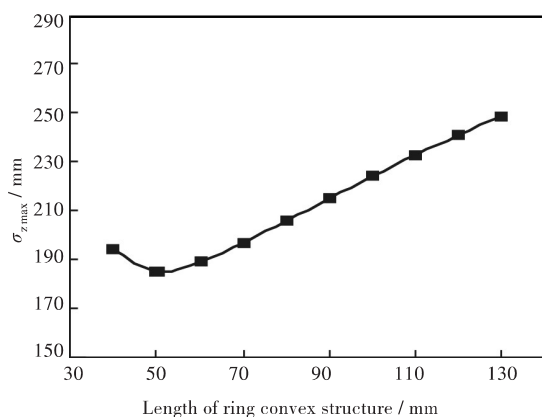


图 12 环凸形结构的长度对应最大轴向应力

Fig. 12 Maximum axial stress corresponding to length of ring convex structure

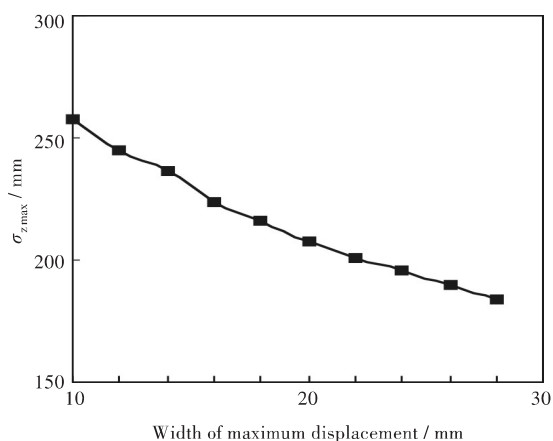


图 13 环凸形结构的宽度对应最大轴向应力

Fig. 13 Maximum axial stress corresponding to width of ring convex structure

应力的影响。

3.3 结果分析

通过以上的分析结果可以看出长管拖车气瓶设置环凸形结构可以有效地减小最大等效应力和轴向应力,改善受力状态。从图5可以看出最大位移随着环凸形结构肩距的增大而减小,大致呈线性关系;从图6可以看出最大位移随着环凸形结构长度的增加而减小,在环凸形结构长度大于50 mm部分,最大应力与环凸形结构长度大致呈线性关系;从图7可以看出最大位移随着环凸形结构宽度的增加大致稳定在0.445 mm;由图8可以看出最大等效应力与环凸形结构的肩距呈非线性关系,在40 mm处出现最小值387 MPa;从图9可以看出最大等效应力在环凸形结构长度40 mm~50 mm处急剧降低,在大于50 mm处呈缓慢下降趋势,大致呈线性关系;从图10可以看出最大等效应力与环凸形结构的宽度呈非线性下降关系;从图11可以看出最大轴向应力随着环凸形结构的肩距增大大致稳定在250 MPa左右;从图12可以看出当环凸形结构大于50 mm时,最大轴向应力随着环凸形结构长度的增加而增加,大致呈线性关系;由图13可以看出最大轴向应力随着环凸形结构宽度的增加而减小,大致呈线性关系。

相对于不设置环凸形结构的长管拖车气瓶而言,有些尺寸的环凸形结构在一定程度上可以改善受力状态,基于以上算例中,例如在离肩距40 mm处设置50 mm×16 mm、60 mm×16 mm、70 mm×16 mm、80 mm×16 mm、100 mm×14 mm、100 mm×16 mm、100 mm×18 mm、100 mm×20 mm、100 mm×22 mm矩形环凸形结构。设置这些尺寸的环凸形结构可以减小最大位移大约3.3%,减小最大等效应力大约10%,减小最大轴向应力大约5%。

对于铝合金材质的气瓶,如果压力密度在门槛压力密度以下时,则裂纹不会扩展^[14]。当气瓶经常在极端情况下运行时可能会导致气瓶局部的应力超过其屈服强度,容易产生鼓包缺陷^[15]。较高的等效应力是导致裂纹扩展和气瓶鼓包等缺陷的重要因素之一,可见改善长管拖车的受力状态有利于避免缺陷的继续扩展。对于有腐蚀成分的CNG专用储罐,在一定程度上可以减缓其损伤速度,例如常见的疲劳损伤和裂纹损伤。

4 结 语

1)长管拖车在服役过程中容易在瓶肩附近产生应力集中现象。

2)在保证结构强度时,设置合适尺寸的环凸形结构可以减小最大位移约3.3%,减小最大等效应力约10%,减小最大轴向应力约5%,有利于减小产生缺陷的概率。

3)最大位移与环凸形结构肩距和长度大致呈线性关系,最大等效应力与环凸形结构长度大致呈线性关系,最大轴向应力与环凸形结构肩距、长度和宽度大致呈线性关系。

参考文献:

- [1] 胡克勤. 天然气长管拖车罐体缺陷分析[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2013.
- [2] 李邦宪, 张鹏君, 陈祖志. 长管拖车定期检验案例及剖析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [3] 李晓辉. 车用全复合材料CNG气瓶的安全可靠性分析[D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2007.
- [4] 邢志敏. 复合材料CNG气瓶的力学性能研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2005.
- [5] 段成红, 吴祥, 罗祥鹏. 碳纤维缠绕复合气瓶爆破压力的有限元分析[J]. 玻璃钢/复合材料, 2012(2): 17-39.
- DUAN C H, WU X, LUO X P. Study on microwave curing of epoxy matrix composites[J]. Fiber reinforced plastics/composites[J]. 2012(2): 17-39.
- [6] 蔡金刚. 碳纤维及复合材料发展情况[J]. 玻璃钢/复合材料, 2012(2): 89-93.
- CAI J G. The development situation of carbon fiber and composite materials[J]. Fiber reinforced plastics/composites, 2012(2): 89-93.
- [7] 田振生, 贾晓龙, 柳伯杨, 等. 大型碳纤维复合材料气瓶在压缩天然气储运领域中的研制与应用发展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2013(5): 62-66.
- TIAN Z S, JIA X L, LIU B Y, et al. Research and application progress of large-sized carbon fiber composite cylinder in storage and transportation of compressed natural gas[J]. Fiber reinforced plastics/composites, 2013(5): 62-66.
- [8] 张艳春, 于国杰, 杜国强, 等. LNG大型储罐加强圈设计[J]. 石油与天然气工业, 2011, 40(5): 433-437.
- ZHANG Y C, YU G J, DU G Q, et al. The design of stiffening rings of large scale liquefied narture gas for storage and transportation[J]. Chemical and engineering of oil and gas, 2011, 40(5): 433-437.
- [9] 李玉坤, 孙文红, 梁军会. 大型储罐抗风圈与加强圈设计计算[J]. 油气储运, 2013, 32(2): 125-130.
- LI Y K, SUN W H, LIANG J H. Design and calculation for wind girder and stiffening ring of large-scale oil tank[J]. Oil and gas storage and transportation, 2013, 32(2): 125-130.
- [10] 中国石油天然气集团公司. 立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范: GB 50341-2003[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003: 27-34.
- [11] American Petroleum Institute. weld steel tanks for oil storage: API650-2007[S]. Washington: API publishing services, 2007: 58-62.
- [12] 蔡昌全, 胡克勤, 胡滨. 基于ANSYS Workbench的CNG长管拖车气瓶有限元分析[J]. 化学工程与装备, 2013, 9(9): 27-29.
- CAI C Q, HU K Q, HU B. The analysis of compress nature gas tube trailer based on ANSYS workbench[J]. Chemical engineering and equipment, 2013, 9(9): 27-29.
- [13] 李伟. 长管拖车气瓶口强度数值分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2014.
- [14] 岳忠, 李晓辉, 张树. 基于ANSYS对车用全复合材料CNG气瓶的安全研究[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(3): 77-83.
- YUE Z, LI X H, ZHANG S. Safety research on vehicle-used CNG cylinder with full composite materials based on ANSYS[J]. Journal of China safety science, 2011, 21(3): 77-83.
- [15] 孙旭, 薄柯, 张君鹏, 等. 长管拖车气瓶鼓包失效分析[J]. 理化检验(物理分册), 2013, 49(4): 260-262.
- SUN X, BO K, ZHANG J P, et al. Failure analysis on bulge of tube trailer gas cylinders[J]. Physical testing and chemical analysis (part A: physical testing), 2013, 49(4): 260-262.

本文编辑: 陈小平