

CNG 储气罐快开人孔结构应力与密封性分析

何庆中¹, 王志鹏¹, 鲍林晓², 张艳玲³

(1. 四川理工学院机械工程学院, 四川 自贡 643000; 2. 洛阳拖拉机研究所有限公司, 河南 洛阳 471039;
3. 南京南瑞国家电网有限责任公司, 南京 210003)

摘要:采用有限元分析计算方法对某型 CNG 储气罐在工况条件下设备的安全性和快开人孔的密封性进行了有限元应力及变形分析,并依据相关标准对其进行了安全性和密封性评价。研究结果为企业完善设计规范,提高产品的设计质量和设计效率,降低设计生产制造成本打下了良好基础。

关键词:CNG 储气罐;有限元;压力容器;应力;密封性

中图分类号:TE88

文献标志码:A

引言

能源化工工业作为国民经济的命脉,是国民经济发展的支柱产业之一,在国民经济和国防建设中具有不可替代的作用。作为清洁能源的天然气,随着我国能源化工工业的飞速发展,对其需求与日俱增。CNG 储气罐作为天然气开采、输送和供给的重要设备,其具有结构简单、制造成本低和使用寿命长等优点,在工业发展过程中的应用越来越广泛。工程师们往往采取提高 CNG 储气罐内气体压力和容积的方式,尽可能地提升储气罐的储存效率。因此,对 CNG 储气罐的结构进行安全性和密封性的有限元分析,为工程设计提供有力的理论依据,具有十分重要的理论意义和工程应用价值。

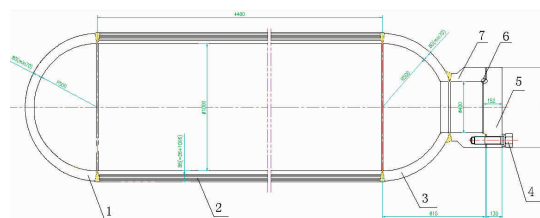
本文以某高压容器企业自主研发的 CNG 储气罐快开人孔结构与密封性为研究对象,利用三维建模软件建立其三维实体模型,再导入有限元软件,采用有限元结构应力与接触应力分析计算方法,经布尔运算和网格划分、材料属性定义、约束和载荷定义,对储气罐筒体与人孔结构及其密封性进行分析计算,并依据 JB4732-95^[1]

和 GB150-2011^[2]进行结构与密封性评价,并提出合理化建议,为 CNG 储气罐优化设计和安全性评价提供一定的理论依据。

1 储气罐的基本结构

CNG 储气罐内装高压(27.5 MPa)的天然气介质,为储气罐筒体多层包扎结构,其结构与上、下球体封头、上球体封头与快开人孔端件之间的连接采用焊接结构,上端面、密封件与人孔盖的装配形式为使用 12 颗 M60×4 紧固螺栓(调质)预紧。

CNG 储气罐基本结构如图 1 所示。



1 下球体封头;2 筒体;3 上球体封头;4 螺栓(M60×4 调质)
5 人孔盖;6 密封垫片;7 快开人孔端件

图 1 CNG 储气罐的基本结构

收稿日期:2012-12-03

基金项目:自贡市科技计划项目(10Q03);四川理工学院重点培育项目(2012PY08)

作者简介:何庆中(1962-),男,四川自贡人,教授,硕士,主要从事机械设计与制造、现代设计方法与机电控制方面的研究,(E-mail) heqingzhong1062@126.com

2 有限元计算及结果分析

2.1 三维模型的建立

对 CNG 储气罐结构进行适当的简化,去除一些与有限元计算无关的特征。CNG 储气罐的尺寸较大,同时由于结构的对称性,因此可以沿 CNG 储气罐的纵向对称面切开,以其 1/4 作为分析模型,如图 2 所示。



图 2 CNG 储气罐三维模型

在有限元应力应变分析时做如下假设:

(1)在各焊接部位无焊接缺陷的条件下,焊接材料的机械性能应不低于被焊接材料的机械性能,为便于理论分析计算,假设焊接材料的机械性能与被焊接材料的机械性能相同,其假设的分析计算结果是偏于安全的^[3]。

(2)筒体为多层包扎结构,分析计算时假设为整体结构,其假设的分析计算结果偏于安全^[4]。

(3)将储气罐筒体与上下球封头的厚度视为一致,均

为 80 mm。

2.2 网格划分

在实体模型进行连续体布尔运算检验基础上,对应力集中和结构不连续处划分较致密的网格单元,稀疏网格与致密网格之间通过过渡网格衔接。这样可以在提高计算精度的同时,缩小模型的计算规模^[5]。本模型共生成了 64 914 个节点和 54 320 个六面体网格单元。模型网格划分,如图 3 所示。

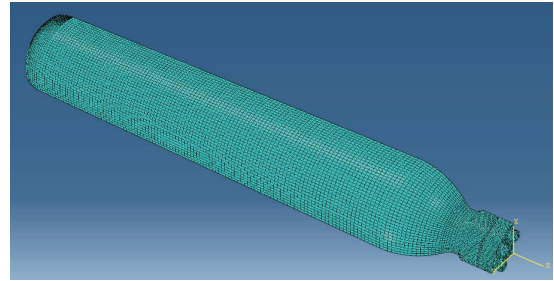


图 3 模型的网格划分

2.3 主要材料的力学性能

CNG 储气罐的主要材料的力学性能参数见表 1。

表 1 主要材料的力学性能^[1]

名称	Q345R(筒体)			35CrMoA(螺栓)		
	强度或极限 (MPa)	弹性模量 (10 ³ MPa)	泊松比	强度或极限 (MPa)	弹性模量 (10 ³ MPa)	泊松比
$\sigma_b/20^\circ\text{C}$	460			780		
$\sigma_s/20^\circ\text{C}$	285	203	0.3	660	203	0.3
$[\sigma]/20^\circ\text{C}$	181			229		

2.4 工况载荷及边界条件

CNG 储气罐的主要工况参数由生产厂家提供,见表 2。

表 2 主要工况参数

名称 工况	计算条件		
	计算压力	计算温度	计算自重
设计工况	27.5 MPa	100 °C	按计算 实体重量

根据工况条件,构建 CNG 储气罐有限元分析模型的边界条件。在 CNG 储气罐及快开人孔结构组件的环向螺栓连接处,以局部直角坐标系为参考坐标,施加 Z 向完全约束,并在周向对称面处建立对称约束边界条件。

根据工艺要求,CNG 储气罐设计工况温度为 100 °C,因此需要在 CNG 储气罐与介质接触的表面同时施加温度载荷和数值为 27.5 MPa 的压力载荷。由于材料在 100 °C 与常温(20 °C)条件下的力学性能相近,因此在应力校核时,采用材料在 20 °C 条件下的力学性能参数。

天然气储气罐快开人孔结构密封性的设计,是在快开人孔上端面与人孔盖之间增垫了一个材料为 L2 的铝合金密封垫片。在密封性分析计算时,依据天然气储气罐快开人孔密封结构设计要求,快开人孔的密封性由 12 颗 M60 × 4(调质)的螺栓紧固,每颗螺栓的预紧应力设计为 133.3 MPa,以保证工况载荷条件下密封垫片的密封性能^[6]。载荷及边界条件约束如图 4 所示。

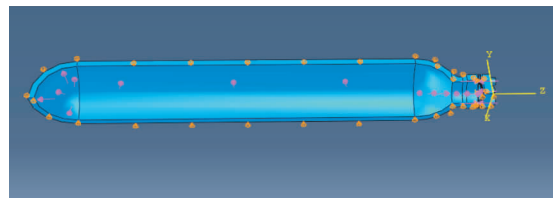


图 4 载荷及边界条件约束图

2.5 有限元计算结果及评价

2.5.1 CNG 储气罐筒体有限元分析结果评价

沿 CNG 储气罐筒体内壁自下球体封头向快开人孔端件方向作筒体 Mises 应力图的路径,如图 5 所示,其相应的沿路径方向的 Mises 应力曲线如图 6 所示。

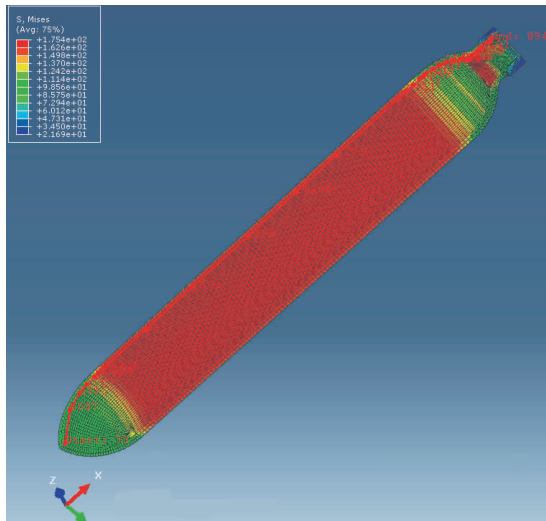


图 5 CNG 储气罐筒体 Mises 应力图

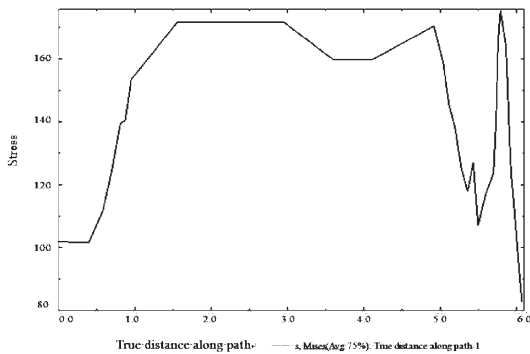


图 6 CNG 储气罐筒体沿路径的 Mises 应力曲线图

由图 5 与图 6 可以看出,CNG 储气罐的最大 Mises 应力出现在 CNG 储气罐快开人孔颈部,为 175.4 MPa。依据 JB4732 - 95、GB150 - 2011 标准的结构定义和所设计的天然气储气罐及快开人孔结构,快开人孔颈部结构属于局部不连续结构,对天然气储气罐总的结构应力和变形无显著影响^[7]。因此,快开人孔颈部结构处的应力按综合应力进行评价。

评价标准: $S_N = Q \leq 3 S_m^{[1]}$ 。

CNG 储气罐快开人孔颈部选用的材料为 Q345R,其许用应力为 181 MPa。快开人孔颈部处:

$$S_N = Q = 175.4 \text{ MPa} < 3 S_m = 543 \text{ MPa}$$

说明 CNG 储气罐设计符合材料的应力极限要求,设计合理。

2.5.2 CNG 储气罐快开人孔结构密封性分析

天然气储气罐快开人孔结构密封性分析计算,重点研究其密封垫在紧固螺栓预紧力(应力)和天然气储气罐内压载荷应力作用下,分析计算预紧螺栓的应力强度和因预紧螺栓受拉弹性变形引起密封垫片上、下密封接

触面的密封性。依据 JB4732 - 95、GB150 - 2011 标准对密封性的评判规范要求,其密封垫的上下断面的密封接触面不低于 30%^[1-2]。

根据紧固螺栓应力分析计算结果(图 7),最大的 Mises 应力为 178.8 MPa,未超过 35CrMoA 材料的许用应力 229 MPa,说明 M60 × 4 紧固螺栓(调质)的强度满足设计要求。

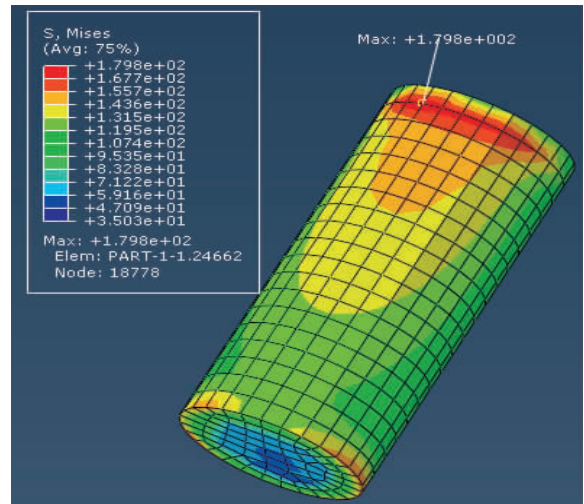


图 7 螺栓 Mises 应力图

从图 8、图 9 密封垫片的密封性能分析结果可以看出,在密封垫片上密封面非滑移接触密封面接近 25%,而非滑移接触密封面与滑移接触密封面之和大于 90%,说明密封垫片上密封面达到密封性能设计要求;对于密封垫片下密封面,尽管在下密封面未存在非滑移接触密封面,但滑移接触密封面所占比例也大于 70%,表面密封垫片下密封面的密封性能也同样达到了设计要求。

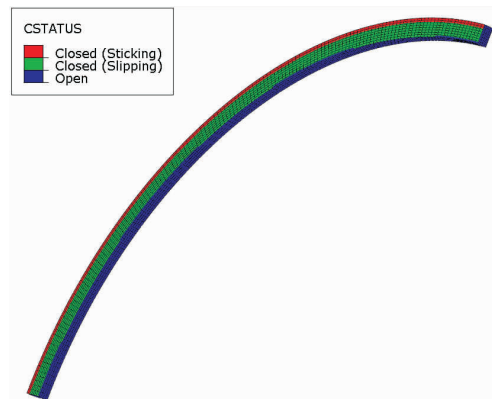


图 8 密封垫片上接触面密封计算结果

3 结论

综上所述,说明:

- (1) 由某高压容器企业开发的 CNG 储气罐,其快开

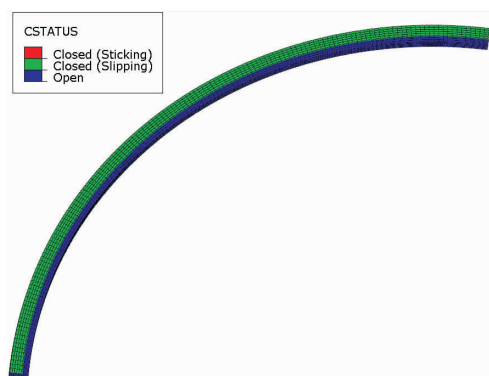


图9 密封垫片下接触面密封计算结果

人孔结构设计合理, 紧固螺栓强度和密封垫片密封性能达到设计要求, 能够满足 CNG 储气罐快开人孔结构强度和密封性的要求。

(2) 本文的分析结果为工厂工程技术人员的产品设计提供了参考, 其产品在实际应用中满足了客户的

需求, 创造了良好的社会和经济效益。

参考文献:

- [1] JB4732-95, 钢制压力容器——分析设计标准[S].
- [2] GB150-2011, 钢制压力容器[S].
- [3] 何庆中, 袁宏远. 多层包扎压力容器包扎焊接制造工艺改进[J]. 压力容器, 2008, 25(10): 45-48.
- [4] 何庆中, 袁宏远, 王勇勤, 等. 多层包扎容器筒体预应力分析计算方法[J]. 化工机械, 2010, 37(2): 148-152.
- [5] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [6] 关庆贺. 压力容器的开孔补强结构优化设计[J]. 装备制造技术, 2011(2): 47-48.
- [7] 唐昕, 雒定明. CNG 地下储气井的应力分析与疲劳分析[J]. 天然气与石油, 2010, 28(3): 49-53.

Analysis of the Structure Stress of CNG Storage Tank and the Airtightness of Its Manhole

HE Qing-zhong¹, WANG Zhi-peng¹, BAO Lin-xiao², ZHANG Yan-ling³

(1. School of Mechanical Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China;

2. Luoyang Tractor Research Institute Co., Ltd., Luoyang 471039, China;

3. Nanjing Nanrui State Grid Limited Co., Ltd., Nanjing 210003, China)

Abstract: The finite element method is applied to analyse the structure stress of CNG equipments and the deformation of manhole, and the corresponding properties of safety and airtightness are evaluated based on related criterions. The researching result helps to perfect designing criterion of enterprises, to improve the design quality and the design efficiency of the products, and to reduce the manufacturing cost.

Key words: CNG storage tank; finite element; pressure vessels; structure stress; airtightness