

利用 Abaqus 的含氢鼓包缺陷液化气罐安全分析

胡军¹, 刘菲¹, 张早校^{1,2}, 程光旭¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对含氢鼓包缺陷液化气罐的安全运行问题,提出了一种基于 J 积分的安全分析方法. 首先利用外观、磁粉和超声检测等手段确定液化气罐氢鼓包的位置和形貌;然后利用有限元法软件 Abaqus 对缺陷进行模拟分析,得到缺陷处的应力分布,并分别采用直接法(JA)和应力强度因子法(JK)计算裂纹尖端的 J 积分值;最后利用直接法得到的 J 积分结果对该液化气罐进行安全分析. 结果表明:氢鼓包内压力为 5 MPa 时,用 JK 计算的 J 积分值比用 JA 计算的大 1.55 倍;在氢鼓包内压力为 3 MPa 和 1 MPa 时,用 JK 计算的 J 积分值比用 JA 计算的大 0.10 倍. 可见,如果用 JK 进行安全性评价,会过高估计裂纹的扩展;如果利用 JA 进行安全评估,当氢鼓包内压力增加到 3 MPa 时裂纹很有可能会继续扩展,应进行监控或及时对氢鼓包缺陷进行处理.

关键词: 液化气罐;氢鼓包;有限元法;裂纹; J 积分

中图分类号: TB302.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)09-0038-05

Safety Analysis on Liquefied Tank with Defect of Hydrogen Blistering Using Abaqus

HU Jun¹, LIU Fei¹, ZHANG Zaoxiao^{1,2}, CHENG Guangxu¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A J -integral based method is proposed to assess the safety of the liquefied tank with defects of hydrogen blistering. First, measuring tools, magnetic inspection powder and an ultrasonic thickness gauge are used to defect the type, position and morphology. Then Abaqus software is adopted to analyze the deformation and stress distribution, and calculate J -integral value of crack tip through definition (JA) and stress intensity factor (JK). Finally, the J -integrals calculated are compared with a critical value for the material to predict fracture and assess the safety. The results show that the J -integral value by JK is about 155% greater than that by JA when the pressure in hydrogen blistering is 5 MPa, and about 10% greater than that by JA when the pressure in hydrogen blistering is 3 MPa or 1 MPa. It seems that the value calculated by JK will be overestimated for the safety assessment. The safety assessment results by JA indicate that the hydrogen blistering defect with cracks is likely to propagate when the pressure in hydrogen blistering increases to 3 MPa.

Keywords: liquid gas storage tank; hydrogen blistering; finite element method; crack; J -integral

氢鼓包属于氢损伤的范畴,是材质劣化的表现形式之一,它降低了压力容器的强度,导致压力容器的承载应力分布不均,不能保证压力容器的安全使

用. 自 1988 年以来,国内不少单位陆续发现液化石油气球形储罐、卧式储罐、汽车罐车、铁路罐车和钢瓶等出现了氢鼓包^[1-2],严重影响着储罐的安全使

用. 在液化石油气储罐中,常见的氢鼓包类型有外鼓包、内鼓包和内外鼓包^[3],不管是哪一种,它们均可使容器发生变形. 变形后的容器,其钢板截面被分成两部分,从而形成气体空腔(氢鼓包). 有的氢鼓包仅有形状尺寸的微小变化,有的氢鼓包顶部及周边区域产生裂纹,有的氢鼓包出现材质劣化现象. 因此,需要正确分析缺陷产生原因,对设备能否继续使用进行科学的分析和论证,及时消除设备的安全隐患.

从文献来看,对氢鼓包的研究大都着眼于其产生的原因^[4-5],而利用断裂力学方法进行缺陷分析的并不多见. 针对液化石油气储罐材料的分析都是在线弹性理论上采用应力强度因子进行的^[6],这仅在低温下或具有厚截面构件时十分有效. 广泛使用的中、低强度的钢材韧性好,但当裂纹尺寸较小而外载荷较大时,构件缺陷将存在较大的塑性变形,这将使计算结果误差很大.

以弹塑性理论为基础的 J 积分可以描述裂纹尖端的能量释放情况,是裂纹弹塑性体的启裂判据^[7-8],所以本文将其作为 16 MnR 材料的含氢鼓包裂纹开裂的判断依据.

有限元法对复杂裂纹的 J 积分计算表现出其独特的优越性^[9-11],所以本文以西安某液化气站液化气罐检测出的 2 处氢鼓包为对象,采用有限元分析软件 Abaqus 分析了缺陷处的变形和应力,并将直接法(JA)和应力强度因子法(JK)计算的 J 积分值进行了比较,针对裂纹的 JA 计算的 J 积分进行了安全分析.

1 检验及试验测试

在定期检验中发现了西安某液化气站的液化气罐有 2 处存在氢鼓包,该液化气罐规格为直径 $\varnothing 2\,000\text{ mm}$ 、长 $7\,350\text{ mm}$ 、壁厚 $16\sim 18\text{ mm}$,设计压力为 1.8 MPa ,操作压力为 0.70 MPa ,设计温度为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$,操作温度为常温,介质为液化石油气,气罐筒体用材为 16MnR 钢,壁厚为 16 mm ,封头用材为 16MnR 钢,壁厚为 18 mm . 液化气罐由前、后封头和 4 段筒节组焊而成. 为了准确地进行安全分析,需全面掌握氢鼓包缺陷的位置、特征、形貌.

本文通过肉眼、量具和样板等外观检查法在第 1 筒节底部、第 3 筒节底部发现了 2 个外鼓包,鼓包大小为 $80\text{ mm}\times 70\text{ mm}$,高约 2 mm ,鼓包表面呈放射性裂纹,具体位置见图 1.

采用磁粉检测方法对鼓包 1、鼓包 2 顶部及周边区域的裂纹长度进行检测,结果发现:鼓包外侧顶

部有明显龟裂状裂纹,裂纹形貌如图 2 所示,裂纹长度分别为 54 mm 、 37 mm ,裂纹方向近似为轴向;鼓包内侧和周边没有发现裂纹.

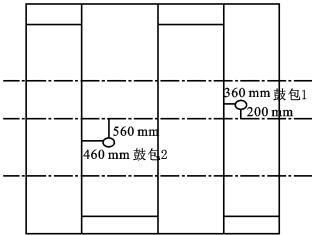
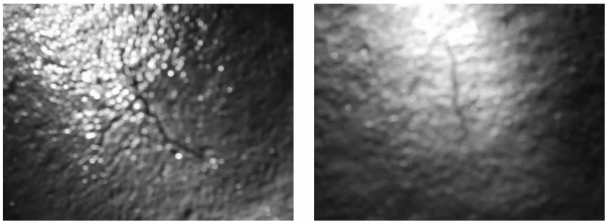


图 1 鼓包具体位置示意



(a)鼓包 1 (b)鼓包 2

图 2 2 个鼓包的磁粉检测裂纹形貌

利用超声检测确定了鼓包两侧的钢板厚度,从检测数据可以得到:鼓包 1 外侧、内侧厚度分别为 5.88 mm 、 10.30 mm ,鼓包 2 内侧、外侧厚度分别为 6.13 mm 、 10.00 mm . 鼓包空腔两侧壁厚之和大致等于容器壳体的壁厚,说明壁厚几乎未减,鼓包向外凸起时,气体空腔靠近外侧.

2 有限元分析

利用 Abaqus 软件对液化气罐裂纹尖端应力的模拟过程如下.

2.1 建立缺陷模型

根据现场监测到的含有较大裂纹的鼓包 1 进行了安全分析,该鼓包 1 高为 2 mm ,内侧和外侧壁厚分别为 10.30 mm 、 5.88 mm . 为了便于建模,取圆整后的鼓包内侧壁厚为 10 mm ,鼓包外侧壁厚为 6 mm ,鼓包高为 2 mm ,并在鼓包顶部生成裂纹 1,在鼓包边缘生成裂纹 2、裂纹 3. 考虑到对称性,得到如图 3 所示的二维有限元模型.

2.2 材料属性

材料为 16MnR 钢,本构方程采用线弹性方程 $\sigma=E\epsilon$,弹性模量 $E=2.10\times 10^5\text{ MPa}$,柏松比 $\mu=0.3$.

2.3 网格划分

用 Abauqs 进行有限元计算时,如何体现裂纹尖端的应力应变奇异性是解决问题的关键. 本文在

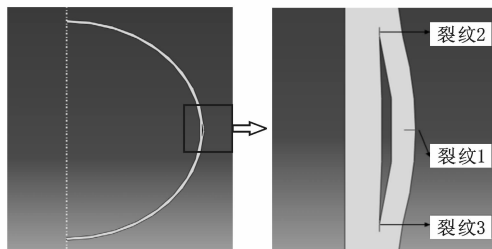


图3 氢鼓包有限元模型

裂纹尖端采用8节点退化奇异二次减缩积分单元(CAX8R),将中间节点移动至靠近裂纹尖端的1/4处,这样单元倒塌后应力和应变满足平方根奇异性.为了用 J 积分进行计算,裂纹尖端需要创建一个环状区域,并在网格划分时需要将模型进行适当的剖分,以便形成四边形结构化网格,再通过撒播种子方法来控制网格的疏密.在容器厚度方向可以撒播4个固定种子,在容器半圆形弧长上撒播80个固定种子,在缺陷环状弧长上撒播24个固定种子.经划分后共生成2 256个网格单元.

2.4 载荷、边界条件及求解

考虑到对称性,用筒体下边界约束 x 轴和 y 轴的位移,即 $U_{1d}=U_{2d}=0$;用筒体上边界约束 x 轴位移,即 $U_{1u}=0$.

为了全面地进行安全评估,设计工况载荷的内压分别取1.8 MPa和0.70 MPa,外压为0.1 MPa.

由于氢可以原子状态渗入金属体内,并在金属内部再结合成分子,由此产生很高的压力,严重时会导致钢表面鼓包或皱折.鼓包内的压力载荷很难测量,本文的鼓包内压力分别取1、3、5 MPa,其与载荷组成下述6种工况:①1.8,5 MPa;②1.8,3 MPa;③1.8,1 MPa;④0.7,5 MPa;⑤0.7,3 MPa;⑥0.7,1 MPa.计算过程忽略了容器的自重和储罐内流体的质量.

2.5 模型准确性验证

为了确保分析的准确性,本文采用全模型完全积分平面应变单元、全模型递减积分平面应变单元、子模型完全积分平面应变单元和子模型递减积分平面应变单元,对工况①进行了模拟.以裂纹1尖端为圆心、以0.025 mm为半径定义裂纹路径,从而得到名义应力 S 随裂纹扩展角 θ 的分布,如图4所示.

从图4可以看出,采用不同单元计算所得的应力与本文采用的全模型递减积分平面应变单元计算所得结果的一致性很好,从而证明了本模型的准确性.

在小屈服范围内, J 积分可以表示为

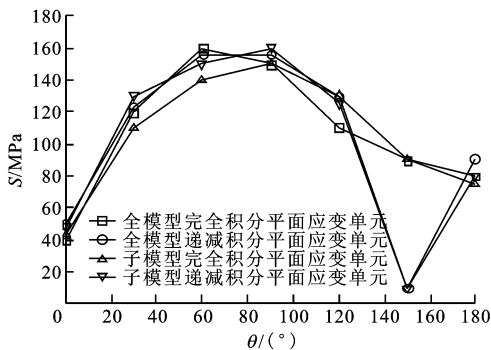


图4 不同单元下裂纹尖端的S分布

$$J = \frac{K_e^2}{E} \quad (1)$$

$$K_e = \lim_{r \rightarrow \infty} (2\pi r \sigma_\theta)^{1/2} \quad (2)$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} [K_I (1 + \cos \theta) - 3K_{II} \sin \theta] \quad (3)$$

式(1)~式(3)中: K_e 、 K_I 、 K_{II} 、 θ 、 r 分别为复合型应力强度因子、I型应力强度因子、II型应力强度因子、裂纹扩展角度和裂纹长度.在工况⑤下,根据应力强度因子手册和相关计算,得到 $\theta=121^\circ$, $K_I=0.21 \times 10^9$, $K_{II}=-0.15 \times 10^9$, $r=0.003$ mm, $E=210$ GPa.利用式(1)~式(3)计算的 J 积分值为21.102 kJ/m²,与有限元法计算值22.3 kJ/m²的相对误差仅为5.3%,从而验证了有限元计算结果的准确性.

3 模拟结果及分析

3.1 最优先启裂扩展判断

在几个裂纹同时存在的情况下,它们一般是相互竞争扩展的,即一旦有1个裂纹扩展,另外2个可能会终止扩展.本文利用裂纹尖端的 S 定性地判断了最优先启裂扩展的裂纹.为了全面地分析裂纹尖端在不同位置的应力状态,以裂尖为圆心、以0.025 mm为半径定义裂纹路径.由于裂纹的应力场关于裂纹是面对称的,故仅需分析上半圆的应力状态.不同 θ 下的 S 分布如图5所示.

从图5可以看出,裂纹1尖端的 S 远远大于裂纹2的 S ,据此可以判断裂纹扩展必然首先发生在裂纹1处.

3.2 裂纹尖端名义应力分布

在上述6种工况下,分别对裂纹1尖端的应力分布进行模拟,绘制出典型工况下裂纹尖端 S 云纹图,如图6所示.

从图6可以看出,裂纹尖端明显存在应力集中

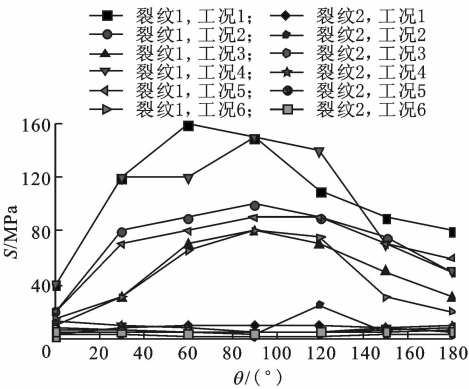


图 5 不同裂纹尖端的 S 分布

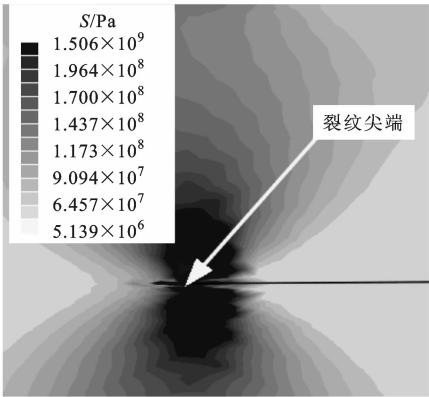


图 6 工况 1 下裂纹 1 附近典型的 S 分布

的现象,并具有较强的应力梯度,最大应力集中区域在裂纹的尖端,而其他工况下的应力分布大致相似。

3.3 J 积分的计算

J 积分是理论上比较严密的应力应变场参量,表征裂纹扩展阻力,适用于描述任意结构的弹性体和弹塑性体的裂纹生长,它在测定和理论分析中能

够避开裂纹尖端连续介质力学不适用的区域,因而是一种适用于弹塑性断裂力学的方法。

本文采用 2 种方法来计算 J 积分,1 种是 JK,另 1 种是 JA. 为了计算二维情况下的 J 积分, Abaqus 定义了围绕裂纹尖端是由单元组成的环形域. 在裂纹尖端,建立了不同的围线域,即第一围线由直接与裂纹尖端节点相连的单元构成,其次围线由与前一个围线相接触的单元组成,以此类推. 本文共建立了 5 个围线域,裂纹尖端的围线域如图 7 所示,6 种工况下得到的 J 积分的值如表 1 所示。

从表 1 可以看出,围线 1 的积分值明显偏离了其他几个围线的积分值,这主要是围线 1 处的裂纹尖端受裂纹尖端奇异性影响的结果,所以在计算中应忽略掉. 从 JK 与 JA 的误差可以看出,当氢鼓包内压力为 5 MPa 时,用 JA 和 JK 计算的 J 积分相对误差在 155%左右,这说明此时在裂纹 1 处已发生明显的塑性大变形,用线弹性假设下的应力强度因子法过高地估计了裂纹的扩展. 当氢鼓包内压力小于 3 MPa 时,用 JA 和 JK 计算的 J 积分误差在 0%~13%之

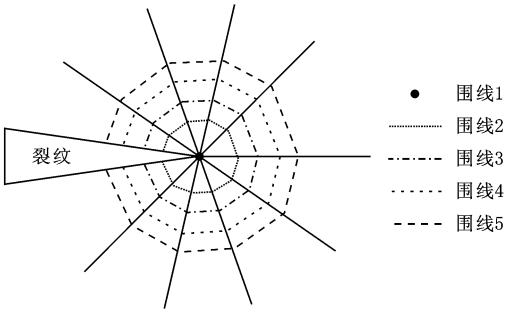


图 7 计算 J 积分时的不同围线

表 1 忽略最差点的 Abaqus 软件对裂纹 1 处 J 积分的估算值 J_{GS}及其平均值 $\bar{J}$

载荷类型	J 积分计算方法	J _{GS} /J · m ⁻²					$\bar{J}$ /J · m ⁻²	相对误差 /%
		围线 1	围线 2	围线 3	围线 4	围线 5		
工况 1	JK	10.0	395.0	648.0	753.0	820.0	654.0	159
工况 1	JA	172.0	245.0	254.0	254.0	256.0	252.0	0
工况 2	JK	1.0	22.4	22.4	22.4	23.4	22.7	5
工况 2	JA	17.0	23.6	24.0	24.2	24.2	24.0	0
工况 3	JK	0.2	2.5	3.2	3.7	4.0	3.3	10
工况 3	JA	0.1	2.9	3.0	3.0	3.1	3.0	0
工况 4	JK	1.0	428.0	556.0	723.0	810.0	629.3	152
工况 4	JA	175.0	240.0	252.0	252.0	254.0	249.0	0
工况 5	JK	15.7	21.8	22.3	22.4	22.6	22.3	0
工况 5	JA	16.4	22.1	22.2	22.3	22.4	22.3	0
工况 6	JK	0.5	2.7	3.1	3.8	4.3	3.4	13
工况 6	JA	1.6	2.1	3.3	3.3	3.3	3.0	0

间,相对较小,说明在这种情况下裂纹1不会发生显著的塑性变形,此时用 J 积分和应力强度因子法都可以对裂纹扩展进行判断。

在不考虑材料性能劣化的情况下,根据文献[12]的试验结果可以得到16MnR钢在30℃时的 J 积分临界值 $J_{IC}=40\text{ kJ/m}^2$ 。据此,可以判断:裂纹1在工况1和工况4下会发生扩展;裂纹1在工况3和工况6下不会发生扩展;在工况2和工况5下,计算得到的 J 积分与 J 积分的临界值相差不大,裂纹有可能发生扩展。同时,也可以判断出,当鼓包内压力大于3 MPa时,裂纹有可能扩展。由此可以得出,此裂纹的扩展与鼓包内压力密切相关,与容器的内压关系不大。当鼓包内压力增加到一定值后,裂纹会发生扩展,应进行监控或及时对裂纹进行处理,以免发生危险。

4 结 论

本文对氢鼓包缺陷液化气罐进行了检测,并利用Abaqus软件对液化气罐进行了二维有限元分析,再用直接法和应力强度因子法计算了 J 积分。经计算,得出如下结论。

(1)在不同工况下,利用Abaqus对氢鼓包缺陷的应力进行了模拟,并通过对3个裂纹处应力大小的比较,得到了文中所述裂纹1处首先会发生扩展的结论。

(2)利用Abaqus对氢鼓包缺陷处的裂纹1进行了模拟,对JA和JK计算的 J 积分进行了比较,得到氢鼓包内压力为5 MPa时,JA和JK的误差在155%左右,在氢鼓包内压力为3 MPa和1 MPa时,JA和JK的误差在10%左右,所以用JK来评价安全会过高地估计裂纹的扩展性。

(3)利用 J 积分对氢鼓包缺陷进行了安全评估,鼓包内压力增加到3 MPa后,裂纹很有可能会继续扩展,所以应进行监控使用或及时对氢鼓包缺陷进行处理。

参考文献:

- [1] 林树森,李光亚. 400 m³ 液化石油气球罐失效分析[J]. 压力容器, 1997,14(3):54-56.
LIN Shusen, LI Guangya. Failure analysis of LPG spherical tank [J]. Pressure Vessel, 1997,14(3):54-56.
- [2] 黄伟国. 丙烷罐的腐蚀与防腐[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2009,26(3):43-46.
HUANG Weiguo. Corrosion and protection of tank with propane [J]. Petroleum Chemical Corrosion and Protection, 2009,26(3):43-46.

- [3] YEN S K, HUANG I B. Critical hydrogen concentration for hydrogen-induced blistering on AISI 430 stainless steel [J]. Materials Chemistry and Physics, 2003,80(3):662-666.
- [4] EVANS J H. A mechanism of surface blistering on metals irradiated with helium ions [J]. Journal of Nuclear Materials, 1976,61(1):1-7.
- [5] HOSHIHIRA T, OTSUKA T, TANABE T. A study of hydrogen blistering mechanism for molybdenum by tritium radio-luminography [J]. Journal of Nuclear Materials, 2009,390(15):1029-1031.
- [6] 段权,程光旭,姜培正. 16MnR压力容器用钢断裂韧性的概率模型[J]. 西安交通大学学报, 2000,34(4):71-74.
DUAN Quan, CHENG Guangxu, JIANG Peizheng. Probabilistic model of fracture toughness for pressure vessel steel 16MnR [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2000,34(4):71-74.
- [7] SIMHA N K, FISCHER F D, SHAN G X, et al. J -integral and crack driving force in elastic-plastic materials [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2008,56(9):2876-2895.
- [8] SONIDAH M, BABAKR A, BAIRAMOV A. Failure analysis of above-ground storage tank bottom plates [J]. Hydrocarbon Processing, 2008,87(12):119-123.
- [9] AGNES H. Computation of the J -integral for large strains [J]. Communications in Numerical Methods in Engineering, 2008,24(12):1811-1825.
- [10] 李继红,张建勋. 含损伤焊接接头裂纹体 J 积分的有限元数值研究[J]. 西安交通大学学报, 2003,37(9):937-940.
LI Jihun, ZHANG Jianxun. Numerical investigations to J -integral in cracked weldment containing damage based on finite element method [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003,37(9):937-940.
- [11] FENG D Z, ZHANG K D, XU G F. Finite element numerical evaluation of J -integral for cracked ductile cylinders [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1993,46(3):481-489.
- [12] 秦江阳,王印培,柳曾典. 韧脆转变区16MnR钢断裂韧性变化规律研究——断裂韧性双峰的PEIERLS机制[J]. 机械工程材料, 2002,26(2):8-10.
QIANG Jiangyang, WANG Yinpei, LIU Zendian. Fracture toughness variety rule in ductile-brittle transition region of 16MnR: Peierls mechanism of fracture toughness campe-humps [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2002,26(2):8-10.

(编辑 苗凌 王焕雪)