

大型液氢球罐的支柱连接结构与性能对比研究

谢福寿¹, 余帅², 徐旭³, 厉彦忠¹

(1. 西安交通大学 制冷与低温工程研究所, 西安 710049;

2. 上海船用柴油机研究所, 上海 201108;

3. 杭州盈铭深冷真空工程有限公司, 杭州 311703)

摘要: 围绕双层液氢球罐支柱连接设计, 建立热-结构耦合数值模型, 研究大型液氢球罐中支柱与内罐连接处应力与应变的分布规律, 分析不同连接形式对其受力性能及传热性能的影响。研究表明: 支柱与内罐连接部位无论采用标准规定的何种连接结构, 当考虑温度载荷时, 最大应力及应变均大幅增加; 在四种支柱-内罐连接结构中, 直圆形连接结构的最危险处应力值是最小的, 该结构下的最大应力数值为 331.33 MPa, 而直接连接结构具有最好的绝热性能, 该结构下的热流密度为 $758.75 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。由于四种连接形式均能满足应力校核条件, 故从减小漏热的角度出发推荐采用直接连接结构作为支柱与内罐连接部位的连接方式。该研究结果可为大型液氢球罐支柱与内罐连接处的设计和选型提供理论指导。

关键词: 液氢球罐; 连接结构; 有限元; 结构优化

中图分类号: TB657

文献标志码: A

文章编号: 1006-7086(2024)04-0398-10

DOI: 10.12446/j.issn.1006-7086.2024.04.008

Design and Comparative Study on the Pillar Connection Structure for Large Liquid Hydrogen Spherical Tanks

XIE Fushou¹, YU Shuai², XU Xu³, LI Yanzhong¹

(1. Institute of Refrigeration and Cryogenic Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108, China;

3. Hangzhou Yingming Cryogenic Vacuum Engineering Co., Ltd., Hangzhou 311703, China)

Abstract: A thermal structural coupling numerical model was established for the connection of the pillars in a double-layer liquid hydrogen spherical tank. The stress and strain distribution of the connection between the pillar and the inner tank in a large liquid hydrogen spherical tank was studied, and the influence of different connection forms on its mechanical properties and heat transfer performance was analyzed. The results show that the maximum stress and strain increase significantly regardless of the connection structure between the pillar and the inner tank when considering the temperature load. Among the four types of connection structure between the pillar and inner tank, the straight circular connection structure has the least stress value at the most dangerous location, with the maximum stress value of 331.33 MPa, while the direct connection structure has the best thermal insulation performance, with a heat flow density of $758.75 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Since all four connection forms can meet the stress verification conditions, it is recommended to use a direct connection structure as the connection method between the pillar and the inner tank from the perspective of reducing heat leakage. The results can provide theoretical guidance for the design and selection of the connection between the pillar and the inner tank of large liquid hydrogen spherical tank.

Key words: liquid hydrogen spherical tank; connecting structure; finite element; structure optimization

收稿日期: 2024-04-01

基金项目: 国家自然科学基金(52276018)

作者简介: 谢福寿, 副教授, 主要从事液氢储运技术与装备研究。E-mail: xiefushou@xjtu.edu.cn

引文信息: 谢福寿, 余帅, 徐旭, 等. 大型液氢球罐的支柱连接结构与性能对比研究[J]. 真空与低温, 2024, 30(4): 398-407.

XIE F S, YU S, XU X, et al. Design and comparative study on the pillar connection structure for large liquid hydrogen spherical tanks[J]. Vacuum and Cryogenics, 2024, 30(4): 398-407.

0 引言

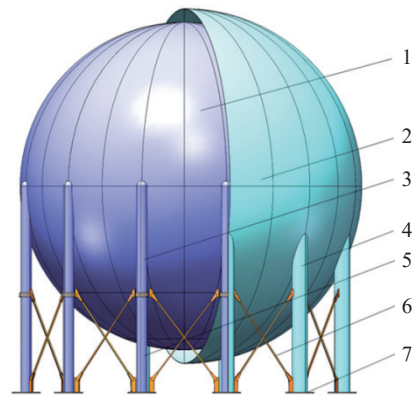
目前,存储液氢的大型储罐通常采用双层球罐结构形式,其中内罐支柱需承受设计压力、液氢静压及内罐自身重力等多种载荷作用,同时其内部温度梯度大,易产生较大的二次应力。此外,支柱部分的漏热量占球罐总漏热量约30%,对整体绝热性能影响较大^[1]。支柱与内罐连接处的结构形式选择与设计对球罐整体综合性能有重要影响。众多学者开展了大型球罐中支柱与球壳的连接形式相关设计与分析研究。李永泰等^[2]针对大型天然气球罐三种正切式支柱与球罐连接结构形式进行了对比分析,结果表明曲形连接板结构能够有效改善连接板与球壳连接处的应力状态。裴召华^[3]针对大型球罐的支撑结构开展了有限元分析,研究了支撑形式及支柱数量等对受力的影响,结果表明采用U形柱加斜U形托板连接结构时球罐具有较好的抗震性能。于晓多等^[4]、于勇等^[5]、占双林等^[6]比较分析了天然气球罐国家标准中提出的四种连接结构的优劣及不同场合的适用情况,得出结论为长圆形连接结构的受力效果相对较好。于广彦等^[7]通过添加斜筋板对性能较好的长圆形结构做了进一步优化,发现优化后结构受力变形状态较好。韦振光^[8]提出了等径三通型和径向半圆托板与长圆形组合型的支撑结构,结果表明该支撑结构能够有效改善球罐最大应力处的应力分布。冯俊爽等^[9]针对低温深冷LNG双层球罐展开研究,结果表明对于深冷球罐采用双支柱的支撑结构形式较为合适。赵帅等^[10]以2 000 m³的大型液氨球罐为研究对象,结果发现球罐支柱与球壳连接处采用U形托板结构型式,可确保支柱与壳体下部焊接容易且可靠。

然而,目前对于大型球罐结构性能的研究存在两个方面的不足:(1)球罐存储工质大多为非低温深冷工质,未考虑温度梯度对受力性能的影响;(2)在研究不同支柱-球壳连接形式时仅考虑其对受力的影响,而未考虑传热性能的影响。因此,本文围绕大型液氢双层球罐,拟通过数值模拟方法分别对国家标准中规定的四种支柱-内罐连接结构在无温度载荷和有温度载荷条件下的应力分布规律和传热特点进行研究和对比,探究最适合于大型液氢球罐的支柱-内罐连接形式,以期大型液氢球罐中内罐与支柱连接处的设计提供更为全面、准确的理论指导。

1 液氢球罐结构的物理模型

本文所研究的液氢球罐物理模型如图1所示,

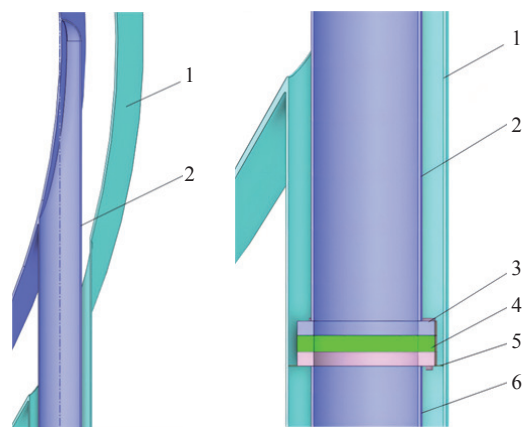
图中省略了诸如管道,梯子等附件。球罐整体可分为内罐、外罐、内支撑结构、外支撑结构及拉杆五大部分,内罐盛放低温液氢,内罐和外罐之间填充隔热材料。内支撑结构起支撑内罐的作用,对于低温液氢球罐,为减少热量的传递,一般将内支柱分为上、下两部分,内上支柱与内罐连接,内上支柱通过上下连接结构与内下支柱连接,上下连接结构中间安装一定厚度的隔热材料玻璃钢进行隔热,上下连接结构的具体形式为法兰螺栓结构,如图2所示。



1. 内罐; 2. 外罐; 3. 内上支柱; 4. 外支柱; 5. 内下支柱; 6. 拉杆; 7. 底座。

图1 液氢球罐物理模型

Fig. 1 Physical model of spherical tank



1. 外罐; 2. 内上支柱; 3. 法兰及螺栓; 4. 玻璃钢; 5. 薄片钢板; 6. 内下支柱。

图2 球罐模型局部放大图

Fig. 2 Partial enlargement of the model

图3为支柱-内罐焊接处有四种常见的连接类型:直接连接结构(a)、托板连接结构(b)、U形连接结构(c)、直圆形连接结构(d)。本文首先采用直接连接结构作为支柱-内罐连接形式进行分析计

算,探究球罐应力和应变分布基本特征,然后开展了不同结构形式的对比分析。

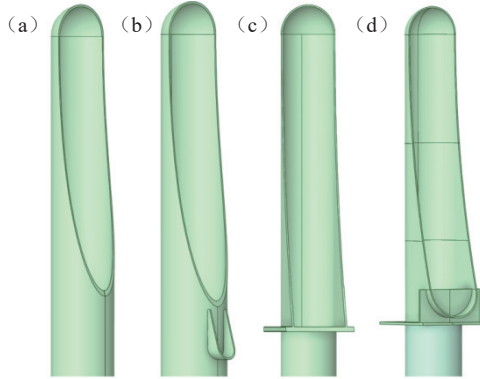


图 3 支柱-内罐连接处四种常见的连接类型示意图
Fig. 3 Four common connection types at the connection between pillar and inner tank

2 数学模型的建立

2.1 热-结构耦合分析模型

由于液氢温度极低,内罐及其支撑结构的受力不仅与机械载荷有关,还应考虑温度载荷的影响,在构建球罐及其支撑结构数学模型的过程中必须同时考虑传热与受力特性,构建热-结构耦合模型。

对于复杂杆型支撑结构,可视为无内热源的定边界条件稳态固体导热,固体导热可直接按照微元法进行积分计算。导热微分方程是基于能量方程和傅里叶导热定律而建立的,其表达式为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

式中: T 为温度; t 为时间; x 、 y 、 z 分别为坐标; ρ 为密度; c 为比热容; λ 为导热率。

热-结构耦合问题是实际应用过程中经常会出现的一类问题。由于所研究对象内部温度场的分布不均或材料物理性能的差异会在其内部引起应力,这些都是在进行结构分析时必须予以重点关注的。本文所研究的低温深冷工况就属于上述情况,为此需要先进行相应的热分析,得到材料内部温度场,基于此再进行结构分析,即热-力耦合分析。该分析属于弹性热力学的范畴,可用杨氏模量和泊松比表示为:

$$\begin{cases} \varepsilon_{xx} = \frac{1}{E} [\sigma_{xx} - \mu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})] + \alpha(T - T_0) \\ \varepsilon_{yy} = \frac{1}{E} [\sigma_{yy} - \mu(\sigma_{zz} + \sigma_{xx})] + \alpha(T - T_0) \\ \varepsilon_{zz} = \frac{1}{E} [\sigma_{zz} - \mu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})] + \alpha(T - T_0) \\ \varepsilon_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{2G} \\ \varepsilon_{yz} = \frac{\sigma_{yz}}{2G} \\ \varepsilon_{zx} = \frac{\sigma_{zx}}{2G} \end{cases} \quad (2)$$

式中: ε_{xx} 、 ε_{yy} 、 ε_{zz} 为正应变; σ_{xx} 、 σ_{yy} 、 σ_{zz} 为正应力; ε_{xy} 、 ε_{xz} 、 ε_{yz} 为剪应变; σ_{xy} 、 σ_{yz} 、 σ_{zx} 为剪应力; α 为热膨胀系数; E 为杨氏模量; μ 为泊松比; G 为剪切模量。 E 、 G 、 μ 之间的关系可表示为:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (3)$$

2.2 边界载荷条件

2.2.1 机械载荷

边界条件设置所采用的机械载荷条件如表 1 所列。

表 1 机械载荷条件

Tab. 1 Mechanical load conditions

载荷类型	载荷设置
球罐自重	可通过定义材料密度及设置重力加速度的方式添加,重力加速度取 9.8 m/s^2 。
液氢静压力	由压力计算公式可知 $p=\rho gh$ 可知,液氢对球壳产生的静压力为随高度线性变化的参数,其方向施加于球壳内表面法向向外,最大静压力位于内罐底部约为 0.137 MPa 。
设计压力	取值 0.56 MPa ,施加于球壳内表面法向。
约束施加	支柱底部处于固定状态,设为完全约束;其他如支柱与球壳的连接、支柱与拉杆的连接等采用焊接的方式,设为绑定约束。
对称面	设置为旋转对称面的两个端面。

2.2.2 温度载荷

施加温度载荷时已知内球罐内表面温度及环

境温度,其余部位温度未知且难以通过理论计算方法得出,故在此处采用 ANSYS 热分析模块进行计

算得出。模拟计算时球壳内表面设置为 20 K, 玻璃钢以下部分支柱设置为对流换热条件, 对流换热系数为 15 W/m^2 , 环境温度为 295 K。通过 ANSYS 热分析模块计算得出支柱及球壳上的温度分布如图 4 所示。

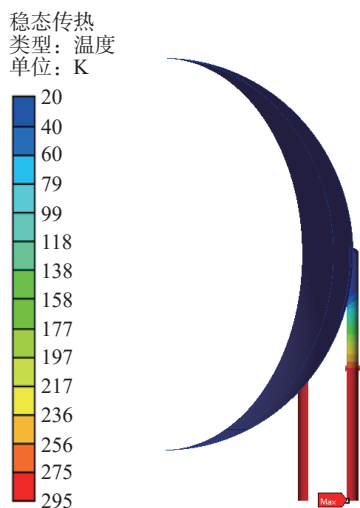


图 4 温度载荷施加示意图

Fig. 4 Schematic diagram of temperature load

2.3 网格无关性验证

根据后续计算得到的球罐结构应力、应变分布特点, 选取三个应力较大位置处应力值进行校核分析: 球壳最底部开孔处、支柱与内罐球壳连接的上部以及支柱与内罐球壳连接的底部, 如图 5 所示。三个位置(1、2、3)处的应力分别命名为 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 , 三个分析点的位置如图 5 所示。在后续分析中一般选取三个位置中应力较大处进行分析。

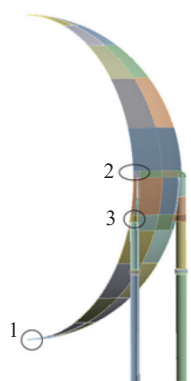


图 5 应力分析位置选取

Fig. 5 Stress analysis location selection

从理论上来说, 网格数量越多越有利于提高精度, 但随着网格数的增加, 计算所需资源及时间也

会显著增加, 因此, 在进行数值模拟计算之前需要进行网格无关性验证, 得到合适的网格尺寸同时保证计算的准确性和计算效率。本节选取 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 作为考核指标进行网格无关性验证, 其中 $\sigma_1(T)$ 、 $\sigma_2(T)$ 和 $\sigma_3(T)$ 分别表示考虑温度载荷时得到的应力大小, 如图 6 所示。可知当网格数为 260 万时, 继续增加网格数量时应力变化值均小于 5%, 综合考虑计算准确性与计算效率, 采用 260 万网格对应的网格尺寸 6 mm 进行后续其他模型的网格划分。

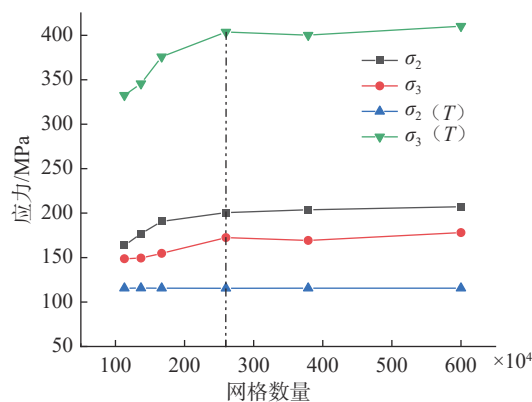


图 6 网格无关性验证

Fig. 6 Grid independence verification

3 计算结果分析

3.1 空载球罐应力、应变分布规律

为了分析比较低温深冷工况工作的球罐与普通工况工作球罐的受力差异, 首先计算了空载球罐即无温度载荷时球罐的受力情况。图 7 为机械载荷作用下球壳及支柱的应力和应变分布情况。在设计压力、物料静压及球罐自身重力的联合作用下, 球罐整体有向下移动和向外膨胀的趋势, 内支柱和外支柱的应变量从上至下呈现逐渐减小的变化趋势。球壳部分变化趋势与支柱相反, 应变最大点出现在内罐底端的开孔处, 应变值约为 4.10 mm。采用直接连接结构时, 球壳上的应力分布比较均匀, 支柱是主要的承压部件, 在支柱与球壳连接的上部应力较大。此外, 如图 8 所示, 由于球壳的顶部和底部开有直径较小的圆孔用于排液、排气, 该部位承压面积较小, 所受压力较大, 导致该开孔位置所受压力最大, 最大等效应力值约为 201.70 MPa。

计算表明三个分析点所处位置的最大等效应力值分别为 $\sigma_1=201.70 \text{ MPa}$ 、 $\sigma_2=200.57 \text{ MPa}$ 以及 $\sigma_3=172.48 \text{ MPa}$ 。根据之前提到的应力分析设计标

准,需要对最危险处即等效最大应力位置处进行应力线性化,再对各种应力组合进行强度校核。在该种连接结构中 1 点和 2 点应力值较为接近,同时进行应力线性化分析,应力线性化一般沿应力最大位置处的厚度方向进行选取,1 点选取的线性化路径为沿着球壳厚度方向,应力线性化得到的结果如图 9 所示。在此处需要注意的是,对最大应力位置校核时由于校核点均为局部点,故应按照一次局部薄膜应力进行处理和分析。

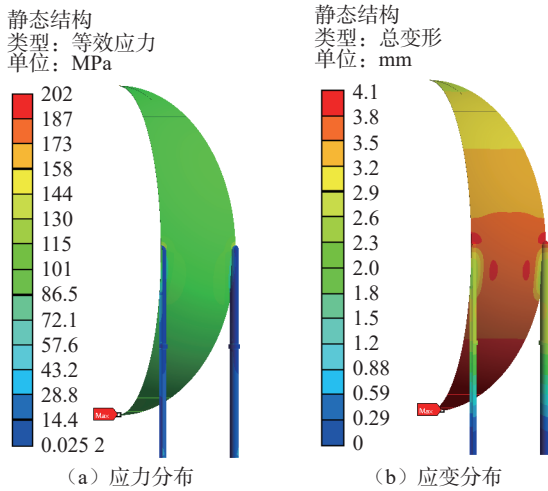


图 7 空载时球壳及支柱的应力和应变分布图
Fig. 7 Stress and strain distribution of spherical shells and struts without liquid hydrogen

对于 2 点,由于该处为支柱与内罐的焊接处,得到的弯曲应力并非由外部载荷直接作用产生,而是结构在受载荷作用时由于材料变形而产生的。根据二次应力的定义,该位置处的弯曲应力属于二次应力。根据以上情况,需要对连接结构位置 2 处的一次局部薄膜应力强度(p_L)和一次加二次应力强度(p_L+p_b+Q)进行校核。根据《钢制压力容器-分析设计标准》相关规定^[11],强度校核需要满足的

条件为: $p_L \leq 1.5K \cdot S_m$ 以及 $p_L+p_b+Q \leq 3S_m$ 。对于所使用的材料类型, S_m 值取为 250 MPa; 正常工况下载荷组合系数 K 值为 1.0, 校核结果如表 2 所列。

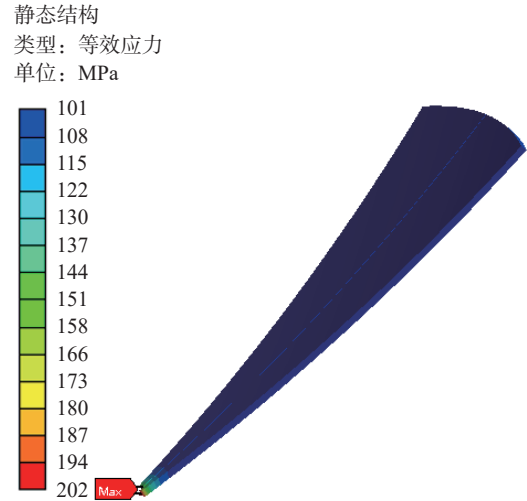


图 8 空载时应力最大位置处(位置 1)放大图
Fig. 8 Enlarged view of maximum stress position without liquid hydrogen

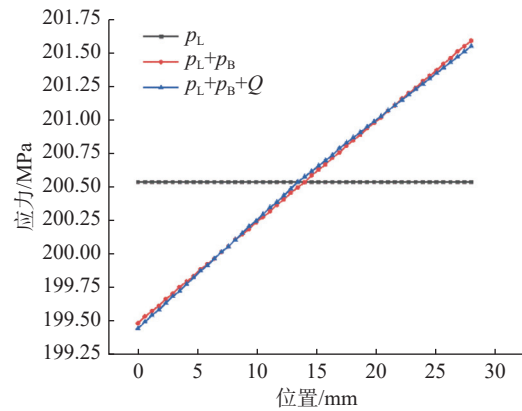


图 9 空载时位置 1 应力线性化结果
Fig. 9 Stress linearization of position 1 without liquid hydrogen

表 2 空载时最危险位置处应力线性化结果

Tab. 2 Results of stress linearization at the most dangerous position without liquid hydrogen

位置	一次局部薄膜应力/MPa	一次局部薄膜的应力许用极限/MPa	一次加二次应力/MPa	一次加二次的应力许用极限/MPa
1	200.53	375	201.54	750
2	96.69	375	200.57	750

3.2 满载球罐应力、应变分布规律

由于本文所研究的对象为大型液氢储罐,介质液氢为深冷液体,在满载液氢时设计温度为 20 K,在该温度下工作的球罐不仅需要考虑机械载荷的

影响,还需考虑温度载荷的影响。图 10 为机械载荷和温度载荷共同作用下球壳及支柱的应力和应变分布情况。考虑温度载荷时,根据材料热胀冷缩的原理可知,球壳及上支柱由于温度很低会有较大

的收缩,在应力及应变图中也可以看出这一特性。由于材料在低温情况下产生了收缩,且球壳直接与液氢接触,收缩较为明显,变形量较大。支柱也会产生收缩但由于上支柱通过法兰与下支柱相连接,而下支柱底部是固定住的,因此在球壳发生收缩偏移时支柱会产生拉力阻止偏移,最终导致应力最大位置出现在球壳与支柱连接处,如图5所示的位置3处。如图10和图11所示,此时支柱与球壳连接处的最大应力为403.7 MPa,位于支柱与球壳下端连接处。针对位置3处进行应力线性化分析,其分析和校核结果如图12和表3,从表3中可看出该结构能够满足强度要求。

趋势与没有温度载荷时相反。由于支柱底部是固定的,支柱从上至下位移应变值是趋于递减变化的。球壳部分从上至下的应变值趋于递减变化,且应变最大点位于球壳上极板的开孔处,其大小约为40.4 mm。

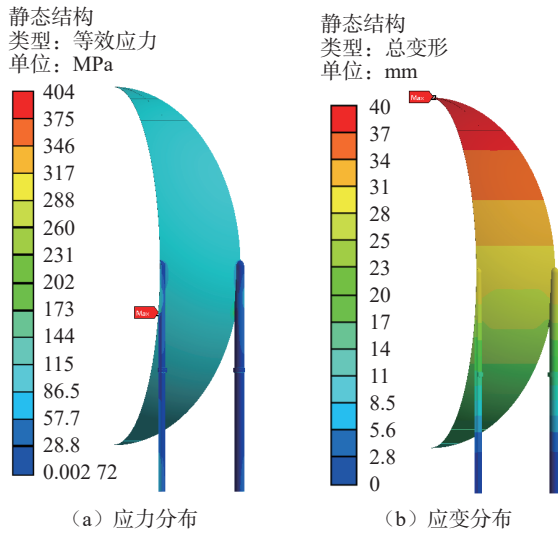


图10 满载时球壳及支柱的应力和应变分布图
Fig. 10 Stress and strain distribution of spherical shells and struts considering liquid hydrogen

此外,对于应变来说,在不考虑温度载荷时,在设计压力,物料静压及球罐自身重力的联合作用下,球罐整体有向下移动和向外膨胀的趋势,加上温度载荷后,由于温度效应引起的应变使材料收缩,且温度效应引起的应变远大于压力及重力等引起的应变,因此球壳上的应变从上至下逐渐减小,变化

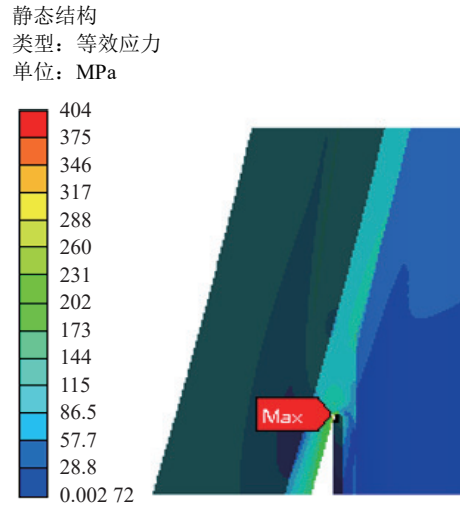


图11 满载时应力最大位置处(位置3)放大图
Fig. 11 Enlarged view of maximum stress position considering liquid hydrogen

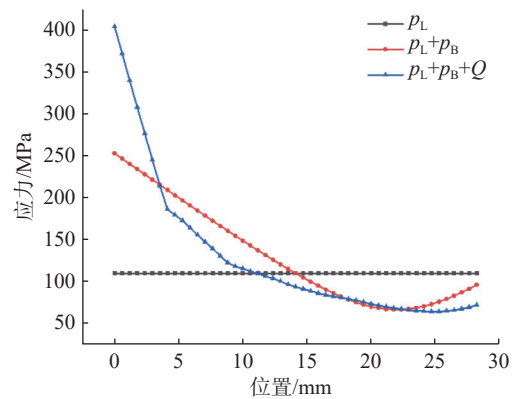


图12 满载时位置3应力线性化结果
Fig. 12 Stress linearization of position 3 considering liquid hydrogen

表3 满载时最危险位置处应力线性化结果

Tab. 3 Results of stress linearization at the most dangerous position considering liquid hydrogen

位置	一次局部薄膜应力/MPa	一次局部薄膜应力的许用极限/MPa	一次加二次应力/MPa	一次加二次应力的许用极限/MPa
3	109.81	375	403.67	750

3.3 支柱-内罐连接形式影响研究

在国家标准中,支柱-内罐焊接处有四种常见

的连接类型: 直接连接结构、托板连接结构、U形连接结构、直圆形连接结构,如图3所示^[12]。在前

文中,针对原始结构(直接连接结构)进行了空载与满载工况的球罐受力分析且得到结论在考虑温度载荷时支柱与内罐连接处应力较大,为整个球罐的受力最危险位置。本节将分别探讨另三种支柱-内罐连接结构在不考虑温度载荷和考虑温度载荷时的受力特点,并采用应力线性化的方法对危险位置处的应力进行分类和校核,同时由于四种连接形式与内罐接触面积不同,最终通过支柱漏入内罐的热量也会有差异,本节将在综合考虑受力效果及绝热效果的基础上探究适用于低温深冷工况的支柱-内罐连接方式,为后续分析做准备。经过上述分析可知考虑温度载荷时(满载工况)最大应力远大于不考虑温度载荷时(空载工况)的情况,故本节中都只考虑有温度载荷时(满载工况)的应力及应变情况。

3.3.1 托板连接结构的应力、应变分布

图 13 为托板连接结构在机械载荷和温度载荷共同作用下球壳及支柱的应力和应变分布情况。

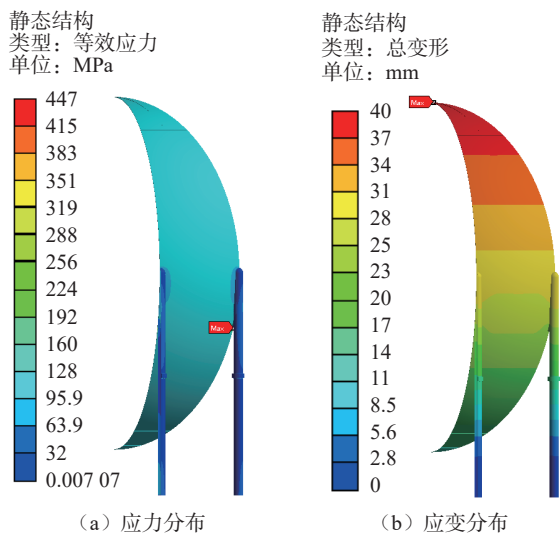


图 13 托板连接结构的球壳及支柱的应力和应变分布图
Fig. 13 Stress and strain distribution of spherical shells and struts for support plate connection structure

由图 14 的局部放大图可知,与无温度载荷时不同的是此时最大等效应力位于托板底部与球壳连接处,这是由于该处温度梯度更大,温度效应产

生的热应力也较大导致的,最大等效应力值为 447.28 MPa。应变最大点同直接连接结构类似,位于球壳上极板的开孔处,其值约为 39.50 mm。等效应力最大位置处的应力分布及应力线性化如图 15 所示,应力线性化结果如表 4 所列,均能满足应力要求。

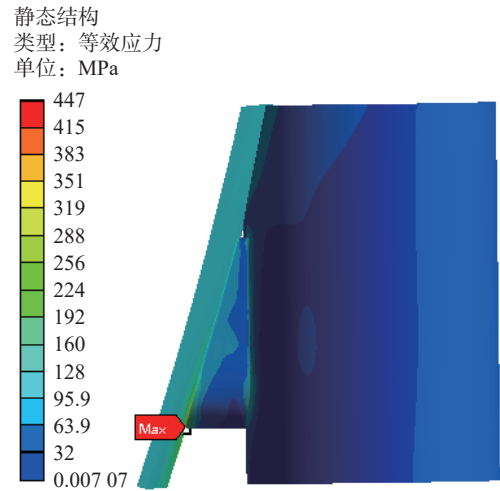


图 14 托板连接结构的应力最大位置处(位置 3)放大图
Fig. 14 Enlarged view of maximum stress position for support plate connection structure

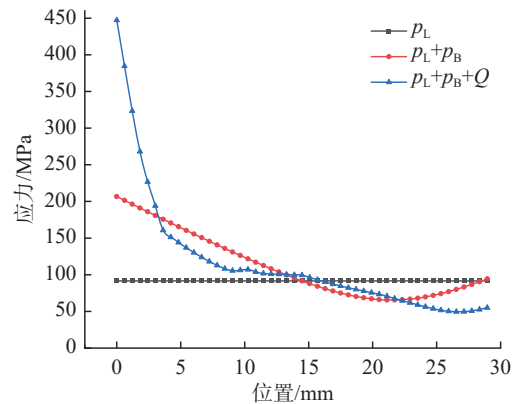


图 15 托板连接结构的位置 3 应力线性化结果
Fig. 15 Stress linearization of position 3 for support plate connection structure

表 4 托板连接结构的最危险位置处应力线性化结果

Tab. 4 Results of stress linearization at the most dangerous position for support plate connection structure

位置	一次局部薄膜应力/ MPa	一次局部薄膜应力的 许用极限/MPa	一次加二次应力/ MPa	一次加二次应力的 许用极限/MPa
3	91.66	375	447.28	750

3.3.2 U形连接结构的应力、应变分布

当考虑温度载荷时, 由于连接板一般厚度较大, 温度梯度较大, 同时刚度较大, 会承受较大的应力, 如图 16 所示。从图 17 的局部放大图中可看出, 该种连接结构的等效应力最大处位于连接板与内罐球壳相连接处, 约为 696 MPa, 已经非常接近材料的许用极限, 故在深冷液氢容器中应尽量避免使用这种连接结构, 在最新的国家标准中也提出今后要逐步取消该种连接结构, 故不再详细讨论该种结构。

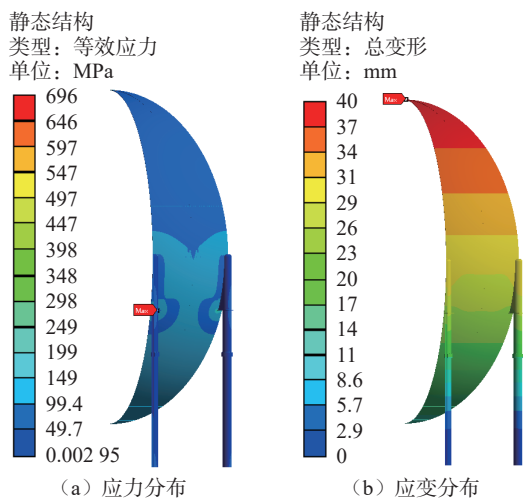


图 16 U形连接结构的球壳及支柱的应力和应变分布图
Fig. 16 Stress and strain distribution of spherical shells and struts for U-shaped connection structure

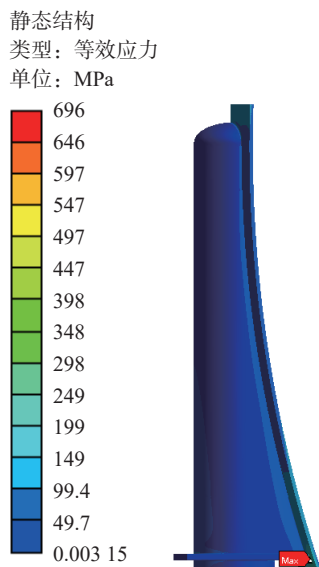


图 17 U形连接结构的应力最大位置处(位置 3)放大图
Fig. 17 Enlarged view of maximum stress position for U-shaped connection structure

3.3.3 直圆形连接结构的应力、应变分布

图 18 展示了机械载荷和温度载荷共同作用下球壳及支柱的应力和应变分布情况。由图 19 可知, 此时等效应力位于球壳与支柱连接处, 支撑结构处的最大应力为 331.33 MPa, 相比于其他三种连接结构, 直圆形连接在低温工况下更加显示出了其优越性, 最危险位置处应力最小。位移变形最大点位于球壳上极板的开孔处, 约为 39.87 mm。应力线性化的位置及结果可参考图 20 及表 5, 均能满足应力要求。

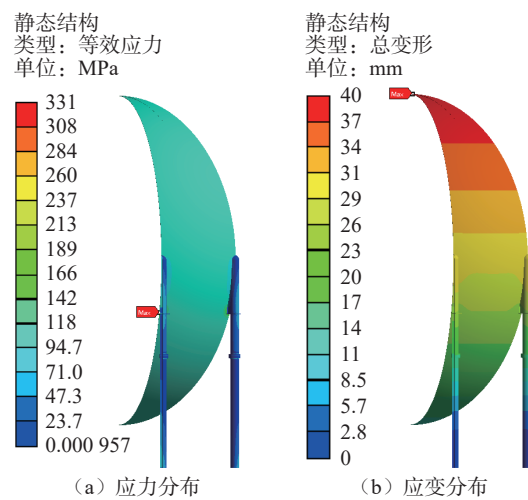


图 18 直圆形连接结构的球壳及支柱的应力和应变分布图
Fig. 18 Stress and strain distribution of spherical shells and struts for straight circular connection structure

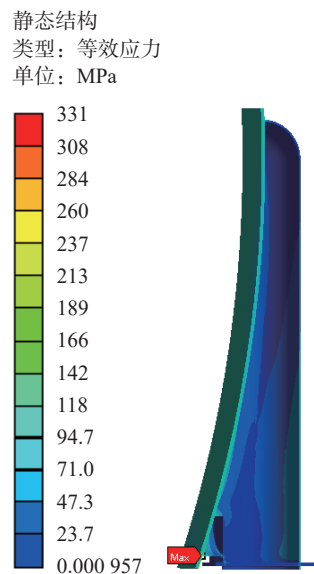


图 19 直圆形连接结构的应力最大位置处(位置 3)放大图
Fig. 19 Enlarged view of maximum stress position for straight circular connection structure

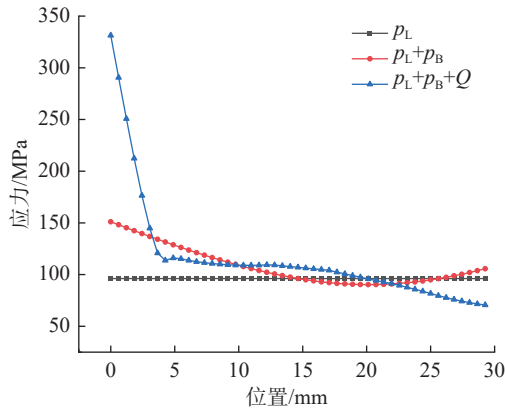


图 20 直圆形连接结构的位置 3 应力线性化结果
Fig. 20 Stress linearization of position 3 for straight circular connection structure

表 5 直圆形连接结构的最危险位置处应力线性化结果

Tab. 5 Results of stress linearization at the most dangerous position for straight circular connection structure

位置	一次局部薄膜应力/ MPa	一次局部薄膜应力的 许用极限/MPa	一次加二次应力/ MPa	一次加二次应力的 许用极限/MPa
3	96.22	375	331.33	750

表 6 四种支柱-内罐连接结构的应力、应变值对比

Tab. 6 Comparison of stress and strain values of four kinds of strut - inner tank connection structures

结构类型	最大等效 应力/MPa	位置	一次薄膜 应力/MPa	一次应力+二次 应力/MPa	一次加二次应力的 许用极限/MPa	最大应变/ mm	最大应变位置
直接连接	403.67	支柱与球壳下端连接处	109.81	403.67	750	40.40	球壳上极板的开孔处
托板连接	447.28	托板上端与支柱连接处	91.66	447.28	750	39.50	球壳上极板的开孔处
U形连接	696.02	连接板与球壳相连接处	149.32	696.02	750	40.04	球壳上极板的开孔处
直圆连接	331.33	支柱与球壳下端连接处	96.22	331.33	750	39.87	球壳上极板的开孔处

表 7 不同支柱-内罐连接结构的漏热热流密度对比

Tab. 7 Comparison of leakage heat flux of different strut - inner tank connection structures

连接类型	直接连接	托板连接	U形连接	直圆连接
热流密度/($W \cdot m^{-2}$)	758.75	859.95	945.48	895.19

4 结论

针对双层大型液氢球罐,考虑热应力作用,建立了热-力耦合模型,采用 ANSYS 求解器首先对四种支柱-内罐连接结构(直接连接、托板连接、U形连接、直圆形连接)在无温度载荷和有温度载荷时的应力分布规律和传热规律进行了研究和对比。对得到的危险位置应力进行分类讨论,计算了不同支撑结构类型产生的漏热量。得出如下结论:

(1)基于原始的球罐结构研究表明,支柱与内罐连接部位无论采用何种连接结构,当考虑温度载

3.3.4 四种连接形式性能综合对比

考虑温度载荷时,液氢球罐的受力特点汇总如表 6 所列,此外对于低温球罐,除了满足受力要求外还需尽量提高绝热性能,对于以上四种结构考虑温度载荷时可计算出通过支柱导热进入内罐里面的热流密度,如表 7 所列。

由此可知,四种结构均能满足应力要求,其中直接连接结构和直圆连接结构受力情况最好,相对来说最稳定。同时,直接连接结构由于其与内罐直接接触面积最小,产生的支柱漏热相比于另外三种结构大幅减小。综合考虑,液氢球罐可选取直接连接结构作为内罐与其支柱焊接处的连接方式。

荷时,最大应力及应变均大幅增加。

(2)四种支柱-内罐连接结构中,直圆形连接结构在低温深冷工况下具有较好的受力特点,其最危险处应力值最小,该结构下的最大等效应力为 331.33 MPa。

(3)四种支柱-内罐连接结构中,直接连接结构具有较小的漏热量,该结构下的漏热热流密度为 $758.75 W \cdot m^{-2}$ 。由于四种连接结构均能满足应力校核条件,因此从减小漏热的角度出发可选择直接连接结构作为支柱与内罐连接部位的连接形式。

参考文献:

- [1] 魏巍. 一种双层低温液氢球罐的支撑结构: 112413404[P]. 2021-02-26.
- [2] 李永泰, 黄金国. 球罐支柱型式及其与球壳连接的结构 [J]. *压力容器*, 2003, 20(10): 28-33.
- [3] 裴召华. 大型球罐支撑结构有限元分析及研究 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2013.
- [4] 于晓多, 于广彦. 球形储罐上支柱连接结构的改进 [J]. *炼油与化工*, 2006, 17(1): 64.
- [5] 于勇, 占双林, 赵慧磊, 等. 基于 ASME 大型球罐有限元分析 [J]. *化工学报*, 2015, 66(S1): 165-170.
- [6] 占双林, 邓海军, 赵慧磊. 不同支柱连接结构球罐对比研究 [J]. *化工设备与管道*, 2015, 52(6): 20-23.
- [7] 于广彦, 于晓多. 球形储罐上支柱长圆形连接结构 [C]//第六届全国压力容器学术会议压力容器先进技术精选集, 杭州: 机械工业出版社, 2005: 256-258.
- [8] 韦振光. 等径三通型球罐支柱连接处的应力分析 [J]. *压力容器*, 2011, 28(1): 58-63.
- [9] 冯俊爽, 邹惠忠, 孙娟, 等. LNG 双层球罐的设计、制造及检验 [J]. *辽宁化工*, 2017, 46(9): 908-911.
- [10] 赵帅, 郑娟, 张璐. 2 000 m³ 液氨球罐设计要点 [J]. *石油和化工设备*, 2022, 25(2): 62-65.
- [11] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会. 钢制压力容器-分析设计标准: JB4732-1995 [S]. 北京, 中国标准出版社, 1995.
- [12] 中国国家标准化管理委员会. 钢制球形储罐: GB12337-2014 [S]. 北京: 新华出版社, 2015.

(责任编辑:郭云)