

# 1000m<sup>3</sup>氢气球形储罐的应力分析设计

秦浩浩

荆门宏图特种飞行器制造有限公司 湖北 荆门 448000

**摘要:** 氢气球罐是目前气态储氢的重要途径, 本文以1000m<sup>3</sup>氢气球罐的分析为例, 对球罐通过有限元软件ANSYS进行应力分析, 对球罐支柱与球壳连接方式不同, 针对正切及正割式支柱支撑形式, 对正割的不同距离, 对连接处局部应力进行分析计算, 最终确定合理的支柱连接方式。

**关键词:** 氢能; 球形储罐; 应力分析; 不同支撑形式; 相割; 内切

2023年全国两会期间, 氢能成为能源领域一个新的热点话题。氢能则被视为最具发展潜力的清洁能源, 因此要加快推动氢能产业发展, 挖掘氢潜力。氢能作为一种清洁高效的二次能源, 发展氢能技术对于构建清洁、低碳、安全高效现代能源体系, 保障国家能源安全, 改善大气环境质量, 以及推进能源产业升级等具有重大意义。氢气储存技术的发展对实现氢能大规模应用将起到重要支撑作用, 然而对于大容积、低成本的储氢技术仍是中国氢能产业发展亟需攻克的难点之一, 大型储氢球罐是作为储氢的重要途径, 具备现阶段储氢的各种优势。

氢气属于易爆介质, 爆炸极限为4.1~74.5%, 氢气球罐

应用在绿氢项目, 如光伏、风电等可再生能源电解水制氢的项目中, 属于民生项目, 如果发生泄漏造成火灾、爆炸等安全事故, 势必造成重大的人员伤亡和经济损失, 对于氢气球形储罐的设计的安全性尤为重要。一般氢气球罐会有一些的压力波动, 存在交变载荷的疲劳容器。采用分析设计方法, 引用设计标准为JB4732和GB/T 12337-2014附录D。

本文以1000m<sup>3</sup>氢气球罐为例进行应力分析计算。对支柱内切法和相割法的连接点应力情况进行对比, 合理确定球罐支柱连接方式。

## 1 1000m<sup>3</sup>氢气球罐设计参数及材料

### 1.1 设计参数及数据

表 1 球罐主要设计参数

设计压力/MPa	1.8	容器类别(类)	Ⅲ
工作压力/MPa	1.6	几何容积(m <sup>3</sup> )	974
设计温度/℃	50	工作温度/℃	40
最低设计金属温度/℃	-20	最高允许工作压力/MPa	1.8
腐蚀裕量/mm	1.5	储存介质	氢气
装量系数	1.0	介质特性	易爆
介质密度/kg/m <sup>3</sup>	1.43	设计使用年限/年	20
球壳内直径/mm	12300	场地类别/地面粗糙类别	Ⅱ/B
耐压试验压力/MPa	2.25	地震烈度/地震加速度/地震分组	6(0.05g)/第一组
气密性试验压力/MPa	1.8	基本风压/Pa	400
球壳厚度/mm	31	基本雪压/Pa	350
焊接接头系数	1.0	结构形式(带/柱/式)	三带八柱混合式
整体热处理	需要	球壳材料	Q370R/20MnMo
工作压力波动范围/MPa	0.2~1.6	压力、温度循环次数	30000次

### 1.2 主体结构选材及技术要求

球壳板选用Q370R钢板供货状态为正火, 其机械性能、化学成分应符合GB/T 713-2014《锅炉和压力容器用钢板》的规定。球壳Q370R钢板应逐张进行100%超声检测, 检测结果应符合NB/T 47013.3-2015《承压设备无损检测 第3部分: 超声检测》中的Ⅰ级要求。钢板表面不得

采用硬印做材料标记。

上段支柱用Q370R钢板应符合GB/T 713-2014的规定, 供货状态为正火。下段支柱用Q345R钢板应符合GB/T 713-2014的规定, 供货状态为热轧。钢板表面不得采用硬印做材料标记。

球罐承压用20MnMo锻件应符合NB/T 47008-2017

《承压设备用碳素钢和合金钢锻件》的规定，且还应满足如下要求：①应按NB/T 47008-2017规定进行-20℃夏比（V型缺口）冲击试验，冲击吸收能量应不小于47J为合格，允许其中一个试样的冲击吸收能量低于规定值，但不得低于规定值的70%；②人孔凸缘、人孔法兰、人孔盖锻件级别为Ⅳ级，且应逐件按炉号复验化学成分，按批复验力学性能；其余锻件级别为Ⅲ级。③不得采用硬印做材料标记；

表 2 主材参数

材料名称	温度 ℃	厚度, mm	Rm, MPa	ReLt, MPa	Et, MPa	泊松 比, μ	[Sm]t, MPa
Q370R	50	> 16~36	530	358.75	199500	0.3	220.625
20MnMo	50	≤ 300	530	358.75	199500	0.3	221

2 球罐力学模型及载荷施加

因球壳与支柱连接处的应力较为复杂，支柱与球壳连接焊缝的最低点根据GB/T 12337规定为a点区域，然而常规设计无法准确确定a点的实际应力分布，往往在球壳壁厚留有较大余量，GB/T 12337引用的支柱与球壳连接形式为赤道正切或相割型式。目前球罐基本上都采用赤道正切形式，相割又分为内割及外割，外割对支柱稳定性不利，然而内割偏移距离将直接影响球罐a点的应力值。

以下根据内割偏移距离的不同对球罐a点进行分析设计。对本球罐分别采用正切、内割偏移75mm进行分析计算a点应力，进行对比，从而确定。

2.1 模型及单元选择

球罐整体分析时，考虑到球罐的内部结构以及各管口对整体影响很小，建模时可以忽略。根据球罐的结构和载荷特点，取1/2球罐建模。球壳、支柱和托板采用SOLID186实体单元，拉杆采用LINK10杆单元（仅能受拉不能受压）。球壳SOLID186单元沿球壳壁厚方向划分4层，支柱及托板SOLID186单元沿支柱壁厚方向划分3层。

3D模型采用六面体单元进行网格划分。在形状规整的区域尽量采用映射划分网格，在无法采用映射划分的其它区域，采用扫略划分。在结构不连续及重点关注的区域，网格要密一些，其它区域网格可疏一些。

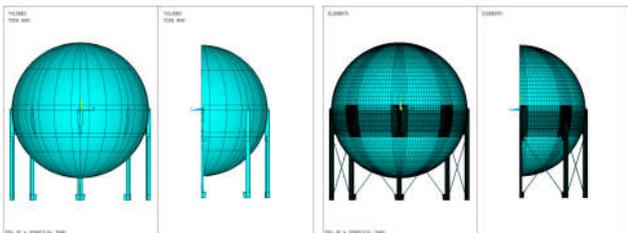


图1 球罐1/2几何模型

图2 球罐1/2有限元模型

2.2 载荷组合工况及施加

根据JB 4732及GB/T 12337附录D的规定，对本球罐进行应力分析时，需要考虑如下载荷组合工况，分别为：

设计工况一为：设计压力+介质重量+设备自重；设计工况二为：设计压力+介质重量+设备自重+风载；设计工况三为：设计压力+介质重量+设备自重+25%风载+地震载荷；设计工况四为：水压试验压力+水的重量（通过液柱静压体现）+设备自重+风载；

2.3 位移边界及载荷施加条件

球罐整体分析，考虑1/2具备几何和载荷的对称性，在对称面施加对称约束，约束对称面的法向位移，支柱下端面施加固定约束，约束X/Y/Z三个方向的所有位移。

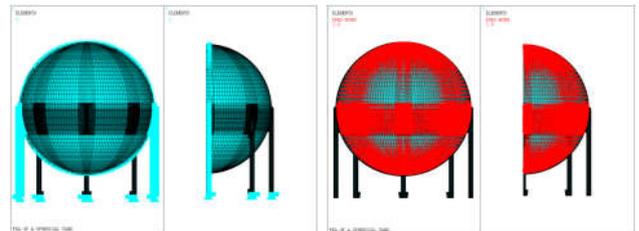


图3 模型位移边界条件

图4 模型载荷施加条件

2.4 应力云图

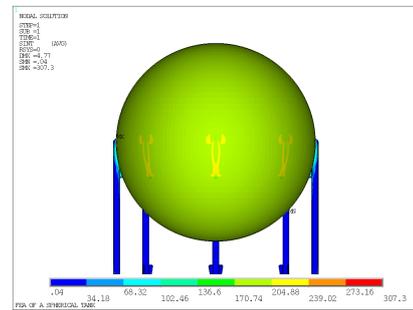


图5 支柱与球壳正切应力云图（工况一）

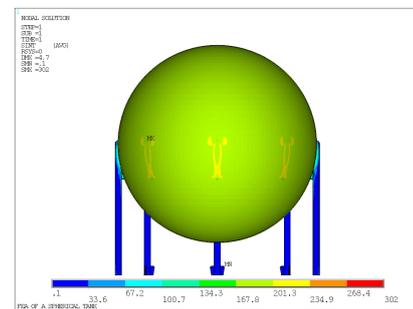


图6 支柱与球壳内割应力云图（工况一）

3 球罐 a 点应力线性化路径的确定

根据球罐分析结果以及应力分布特点，选取如下路径对其进行评定，路径设置在U形托板最底处。具体路径位置见下图：

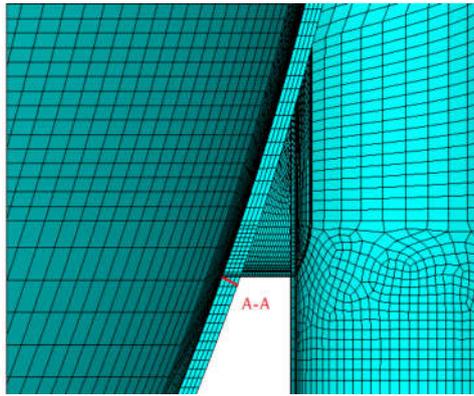


图7 路径设置示意图

#### 4 球壳 a 点截面应力分类及评价

依据JB/T 4732-1955《钢制压力容器-分析设计标准》及GB/T 12337-2014《钢制球形储罐附》附录D对球罐整

体在工况一进行强度评定，支柱与球壳正切评定结果见表3。

表3 支柱与球壳正切校核

路径编号	形式	应力强度 (MPa)	许用极限 (K = 1.0), 单位MPa			评定结果
A-A	内切	S II	209	1.5KStm	$1.5 \times 1.0 \times 220.625 = 330.94$	通过
		S III	260.7	1.5KStm	$1.5 \times 1.0 \times 220.625 = 330.94$	通过
	内割	S II	203.4	1.5KStm	$1.5 \times 1.0 \times 220.625 = 330.94$	通过
		S III	237.2	1.5KStm	$1.5 \times 1.0 \times 220.625 = 330.94$	通过

经过分析，应力值随着支柱向球罐中心偏移，应力最大点不是出现在支柱与球壳接触的最低点，而是向上移，且应力值比正切时要小。对于1000m<sup>3</sup>氢气球罐，采用非正切结构（内割）能起到降低应力值的作用。

#### 5 结论

本文叙述了1000m<sup>3</sup>氢气球罐的设计压力和设计温度的确定，材料的选择，球壳结构的设计以及支柱结构的设计等内容，提出了球罐的支柱结构，采用非正切结

构，支柱中心线向球罐正中心偏移的内割连接形式，对氢气球罐的设计具有一定的参考意义。

#### 参考文献

- [1]JB4732-1995 《钢制压力容器-分析设计标准》(2005年确认)
- [2]GB/T 12337-2014 《钢制球形储罐》
- [3]梅林涛,杨国义,寿比南.球形储罐应力分析及评定[J].压力容器,2002,19(7):15-17