

球罐开孔接管区的有限元分析与补强设计优化

徐江涛 江帆

荆门宏图特种飞行器制造有限公司 湖北 荆门 448000

摘要: 球罐开孔接管区因工艺需求和结构等影响,接管位置基本安装在上下极板上。本文基于弹性力学理论,采用有限元法,借助专业软件,剖析接管尺寸、接管结构以及开孔位置对接管开孔不连续处应力的影响。依据等面积补强原则,优化补强元件类型、尺寸及连接方式,以降低应力集中,保障球罐结构安全,为球罐开孔接管区的设计与维护提供理论支持。

关键词: 球罐; 开孔接管区; 应力集中; 有限元分析; 补强设计优化

引言: 球罐在石油、化工等领域应用广泛,开孔接管是满足工艺需求的关键结构。然而,开孔接管区因球壳与接管几何形态差异,结构不连续,易产生应力集中,降低球罐承载能力,引发结构垮塌,如果球罐设备存在压力循环波动,甚至会引起疲劳裂纹,威胁设备安全与人员生命,增加维护成本。因此,深入研究球罐开孔接管区应力水平,并开展补强设计优化,对保障球罐安全可靠运行、提高经济效益具有重要意义^[1]。

本文以2000m³二氧化碳球罐的插入式开孔接管为例进行有限元应力分析计算,并对应力分析结果和线性化结果进行对比,对开孔接管区域的应力水平进行分析,以优化开孔补强设计。

1 球罐开孔接管区设计方案

表1 材料参数表

材料名称	温度/℃	厚度/mm	Et,MPa	泊松比, μ	$[S_m^I]$,MPa	S_{PL} ,MPa	S_{PS} ,MPa
Q490DRL2	50	10~50	198500	0.3	254	381	762
10Ni3MoVD	50	≤ 300	198500	0.3	250	375	750

注: Q490DRL2、10Ni3MoVD材料的屈服强度与标准抗拉强度比值大于0.7。根据GB/T 4732.4第6.2.2条和6.4.2.1条规定, S_{PL} 取设计温度下材料许用应力的1.5倍;为了方便计算和保守考虑, S_{PS} 取设计温度下材料许用应力的3倍。

1.3 分析设计方案的确定

对上述表1和表2的设计参数的球罐上下极开孔接管结构中各接管的厚度、结构等,可采用GB/T 150-2024《压力容器》中的等面积补强方法进行初步设计,再进行有限元应力分析计算。

采用直径为2000mm和直径为2400mm的不同开孔接管的分布圆尺寸,进行相同结构、相同尺寸的插入式^[2]的开孔接管应力分析计算;开孔接管的尺寸分别为DN150、DN200、DN250和DN300。

1.1 设计参数

设计输入条件为:设计压力:2.3 MPa;工作压力:1.6 MPa;设计温度:50/-40 °C;腐蚀裕量:2.0 mm;装量系数:0.85;介质密度:1115 kg/m³;2000m³球罐对应的球罐内直径:15700 mm;球壳材料:Q490DRL2;锻件材料:10Ni3MoVD。

根据以上设计输入条件按照GB/T 12337-2014《钢制球形储罐》中的相关公式计算^[4],本次设计厚度取为42 mm。

1.2 材料参数

材料设计许用应力参数按照GB/T 4732.2-2024中表B.1和B.5进行选取,弹性模量按照GB/T 4732.2-2024中表C.13进行选取,如下表1所示:

2 有限元力学模型和载荷施加

2.1 有限元分析软件选择

几何建模是有限元分析的基础环节,需严格依据球罐实际尺寸和结构特征,搭建完整的三维几何模型,涵盖球壳、接管及后续可能涉及的补强元件,建模过程中需精准还原各部件的连接关系和几何形态,避免因模型简化过度导致分析误差。材料定义需准确输入球罐所用材料的力学性能参数,包括弹性模量、泊松比、密度等核心参数,参数取值需符合材料实际性能,为应力计算提供可靠基础。球罐开孔接管区应力分析计算中,常用的有限元分析软件包括ANSYS、ABAQUS、MSC.Marc等,各类软件具备不同的功能侧重,可满足不同分析场景的需求。本次计算采用美国ANSYS公司的大型通用有限元分析软件-ANSYS(2021R2版本)做前后处理与分析计

算。ANSYS是国际上先进的大型有限元软件之一，已广泛应用于工程上的各种计算与分析。它除了可以进行一般的结构分析外，还可以进行热分析、流体分析等多物理场分析。该计算程序已获得全国锅炉压力容器标准化技术委员会的认可，可以作为我国压力容器分析设计的有限元应力计算和分析的软件。

2.2 有限元模型

各开孔接管不考虑结构附加外力，水平地震载荷、风载荷对开孔接管部位引起的附加应力，故取上下极各60度的球冠作为力学分析对象。球壳及各接管取2.0mm腐蚀裕量。因为标准接管法兰可以免除计算，所以在建模时不对各凸缘的标准法兰进行建模与分析。

各开孔接管的有限元模型选取20节点的SOLID186单元。通过对模型的布尔运算，最终将模型通过扫略或者

映射的方式全部网格化。在结构/载荷不连续区，网格密一些，而结构或者应力连续区，则网格适当稀疏些，以兼顾计算效率和计算精度。

按照GB/T 12337-2014《钢制球形储罐》的要求，球形储罐的上、下极中板应各设置一个公称直径不小于500mm的人孔，故本文中的应力分析有限元模型都在中间设置了一个公称直径为500mm人孔。

2.3 模型边界条件

开孔接管模型的载荷与边界条件为：1)在球坐标系下(CSYS, 2)下对60度球冠边界施加周向和轴向约束($\Delta UY = \Delta UZ = 0$)；2)在与介质接触的内表面施加计算压力；在管口凸缘端面施加等效压；3)管口位于下极，与介质接触的内表面施计算压力等于设计压力和介质的液柱静压力之和。

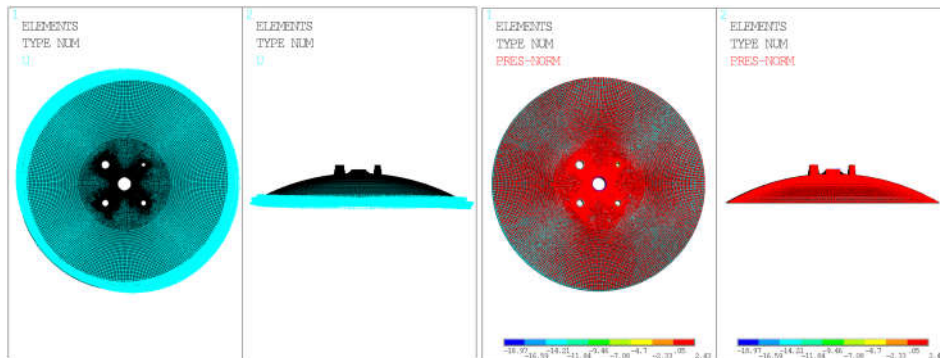


图1 边界条件和载荷条件

2.4 当量应力云图

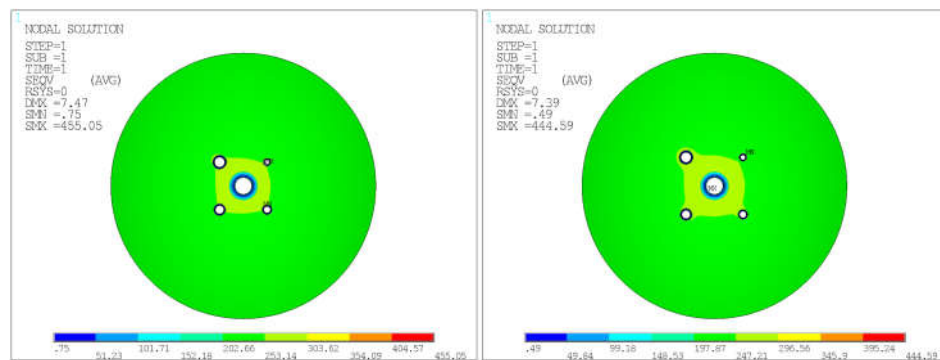


图2 开孔接管分布圆大小为 $\phi 2000\text{mm}$ 和 $\phi 2400\text{mm}$ 的插入式开孔接管应力云图

3 球罐插入式开孔接管区危险截面的线性化路径确定及结果评定

3.1 开孔接管的线性化路径

根据球罐开孔接管区域应力云图的特点以及GB/T 4732.4-2024《压力容器分析设计》附录B第B.2条的应力分类先布置原则，每个开孔接管共设置三条应力线性化路径，第一条设置在接管内表面应力最大点处到接管外表面与球壳外表面的交界处的最短路径上；第二条设置

在接管内表面应力最大点处到接管外表面与球壳内表面的交界处的最短路径上；第三条路径设置在接管与球壳交界处贯穿球壳板的最短路径上^[3]。

3.2 线性化路径结果的应力分类和评定

根据GB/T 4732.4-2024《压力容器分析设计》对开孔接管危险截面的线性化结果进行应力分类和评定，评定具体结果如下表2所示。

表2 线性化结果评定表(只列出N1/N2接管数据)

路径编号	当量应力,MPa			许用极限 (K = 1.0) ,MPa		评定结果
		Φ2000	Φ2400			
N1-A	S _{II}	297.0	288.3	KS _{PL}	375	通过
	S _{IV}	440.0	426.8	KS _{PS}	750	通过
N1-B	S _{II}	293.0	282.3	KS _{PL}	375	通过
	S _{IV}	452.8	448.6	KS _{PS}	750	通过
N1-C	S _{II}	175.6	171.8	KS _{PL}	375	通过
	S _{III}	268.6	264.6	KS _{PL}	375	通过
N2-A	S _{II}	277.8	269.2	KS _{PL}	375	通过
	S _{IV}	421.3	409.2	KS _{PS}	750	通过
N2-B	S _{II}	282.9	275.6	KS _{PL}	375	通过
	S _{IV}	428.5	420.1	KS _{PS}	750	通过
N2-C	S _{II}	206.1	161.0	KS _{PL}	375	通过
	S _{III}	282.4	271.4	KS _{PL}	375	通过

3.4 开孔接管补强位置优化

等面积补强原则是球罐开孔接管区补强设计的基础原则,核心思路是通过增设补强元件增加承载面积,确保开孔处的有效承载面积不低于未开孔状态下的承载面积,以此抵消开孔对球壳截面的削弱作用,均衡应力分布。但是GB/T 150-2024《压力容器》中的等面积补强法是基于开孔补强区域为平面的假设,实际在球罐的开孔补强结构中为一个曲面。根据第四章的分析计算结果,球罐的开孔接管在满足布置的合理性和操作便利性要求的情况下,尽量远离球罐中心线,也能有效降低多个开孔之间会形成应力叠加效应。

4 球罐开孔接管区其他补强设计优化

4.1 开孔接管补强尺寸优化

球罐开孔接管一般采用厚壁管锻件,厚壁管尺寸优化需依据等面积补强原则开展,结合开孔尺寸、球壳壁厚及材料性能,精确定厚壁管关键尺寸参数,确保补强效果的同时,避免尺寸过大造成材料浪费和结构冗余。以上通过对相同公称直径的开孔厚壁管尺寸模型分析,在计算过程中,可以运用等面积补强法先进行计算,不计入焊缝补强面积,并留有20%计算余量。可在保障结构强度的基础上,加快分析计算进程,降低结构自重,提升球罐整体服役性能。

4.2 开孔接管补强连接方式优化

球罐开孔接管区域因球壳与接管的几何形态差异,使得二者连接部位无法实现同步变形,进而产生附加弯曲应力,导致局部应力出现异常升高,这也是球罐开孔接

管区成为应力集中高发部位的核心原因。若球罐存在交变载荷作用下的疲劳工况,球罐开孔接管区易萌生疲劳裂纹,随着服役时间延长和载荷交替作用,裂纹会逐步扩展,最终引发疲劳破坏。可将插入式(对接接头)接管改为嵌入式(对接接头)接管。嵌入式(对接接头)接管结构连续性好,应力分布接近母材,开孔边缘处峰值应力显著降低。在工程实践中也建议将公称直径大于等于250mm的接管改为对接形式^[5]。

结束语

球罐开孔接管区应力问题复杂且关键,通过有限元分析明确各因素对应力集中的影响规律,依据不同结构形式、不同接管位置优化补强设计,能有效降低应力水平,提升球罐结构整体性与安全性,减少维护频次与成本。在实际工程中,应综合考虑球罐工况、工艺需求等因素,合理选择补强方案,确保球罐长期稳定运行,为相关领域发展提供坚实保障。

参考文献

- [1]朱坎,彭瑞,陈中.1000m³球罐开孔对结构安全性能的影响研究[J].广东化工,2025,52(10):78-79,66.
- [2]GB/T 4732-2024《压力容器分析设计》.
- [3]GB/T 150-2024《压力容器》.
- [4]GB/T 12337-2014《钢制球形储罐》.
- [5]侯峰伟,薛睿渊,舒海峰,等.5000m³真空球罐新开DN1000孔后安全性能差异性研究[J].真空科学与技术学报,2023,43(10):834-840.