

# 大型球罐支柱结构稳定性分析与优化设计

杨 慧

荆门宏图特种飞行器制造有限公司 湖北 荆门 448000

**摘要:** 大型球罐支柱结构稳定性关乎球罐安全运行。本文首先阐述赤道正切柱式、V型柱式等多种支承结构类型与特点,接着分析载荷、基础、结构等因素对稳定性的影响。随后介绍经典力学、有限元等稳定性分析方法,最后从结构形式、尺寸参数、材料选择、连接方式等方面提出优化设计策略,为提升大型球罐支柱结构稳定性提供理论支持与实践参考。

**关键词:** 大型球罐; 支柱结构; 稳定性分析; 优化设计

引言: 在能源、化工等诸多领域,大型球罐作为重要的储存设备,其安全稳定运行至关重要。支柱结构作为大型球罐的关键支撑部分,其稳定性直接影响球罐的整体安全性。一旦支柱结构出现失稳问题,可能引发严重的安全事故,造成巨大的经济损失和人员伤亡。因此,深入分析大型球罐支柱结构稳定性影响因素,并探索有效的优化设计策略,具有重要的现实意义。

## 1 大型球罐支柱结构类型与特点

### 1.1 赤道正切柱式支承结构

赤道正切柱式支承结构在大型球罐中应用广泛。从结构形式与布置方式看,多根圆柱状支柱沿着球壳赤道带均匀分布,支柱中心线与球壳相切或者相割。这种布置方式使得支柱在空间上形成一种有序且稳定的排列,为球罐提供了可靠的支撑。在受力特点与优势方面,该结构受力均匀,能够很好地适应球罐在不同工况下的受力变化<sup>[1]</sup>。其弹性良好,当球罐因温度变化产生热膨胀变形时,支柱可以随之发生一定的弹性变形,避免因刚性约束导致结构损坏。这种结构便于现场组装、焊接以及检修工作。在组装过程中,各支柱的安装相对独立,不会相互干扰;焊接时,由于结构简单,操作空间较大,有利于保证焊接质量;检修时,工作人员可以方便地对支柱及连接部位进行检查和维护。适用场景上,赤道正切柱式支承结构广泛应用于各类大型球罐,尤其适用于对稳定性要求较高、储存介质较为常规的化工、能源等领域。在这些场景中,球罐需要长期稳定运行,赤道正切柱式支承结构能够为其提供可靠的支撑保障。

### 1.2 V型柱式支承结构

V型柱式支承结构具有独特的结构特征与几何参数。支柱在垂直方向与球壳切线倾斜 $15^{\circ}$ - $30^{\circ}$ 的角度,形成V字形,每对V型支柱的间距为1.5-3.0m,支柱截面尺寸与赤道正切柱式相近。这种特殊的几何形状使得结构在

受力时具有独特的表现。在稳定性与承载能力分析上,V型柱式支承结构会产生50-150kN的向心水平力,这种力有助于增强基础的稳定性。同时,支柱自身能够承受80-200kN的水平载荷,无需通过拉杆连接来增强稳定性,减少了结构的复杂性和成本。安装与检修便利性探讨表明,虽然V型柱式支承结构对现场组装要求较为严格,需要精确控制支柱的倾斜角度和安装位置,但一旦安装完成,其结构相对紧凑,占用空间较小。在检修时,由于支柱之间的空间相对开阔,工作人员可以较为方便地对球罐底部和支柱进行检查和维护。

### 1.3 其他支承结构类型

筒形或锥形支承结构具有自身特点。筒形支承结构外形规整,制造工艺相对简单,能够提供较为均匀的支撑力;锥形支承结构则在一定程度上可以调整受力分布,适应不同的载荷需求。钢筋混凝土连续基础支承结构优势明显。它具有良好的整体性和稳定性,能够承受较大的荷载,并且对地基的要求相对较低,适用于地质条件不太理想的地区。可胀缩支承结构原理基于材料的热胀冷缩特性,通过特殊的设计使得支柱能够随着温度变化而伸缩,从而减少因温度应力导致的结构损坏。这种结构在温差较大的地区具有潜在的应用价值,可以有效提高球罐的使用寿命和安全性。

## 2 大型球罐支柱结构稳定性影响因素

### 2.1 载荷因素

大型球罐在运行过程中,承受着多种载荷的作用,这些载荷对支柱结构稳定性有着关键影响。球罐自重与所储存物料的重量共同构成了垂直载荷。球罐自重源于罐体本身的结构材料,而物料重量则取决于储存介质的种类和数量。垂直载荷直接作用在支柱上,使支柱承受轴向压力,若垂直载荷过大,可能导致支柱发生压缩变形甚至失稳。风载荷与地震载荷属于水平载荷范畴。风

作用于球罐表面,会产生水平方向的风力,该力大小与风速、球罐的迎风面积等因素相关。地震发生时,地面运动引发惯性力,使球罐受到水平地震力的作用。水平载荷会使支柱产生弯曲变形,改变支柱的受力状态,影响结构的稳定性。温度变化也是不可忽视的因素。球罐在储存物料过程中,会因物料温度变化或环境温度改变而发生热胀冷缩现象,温度变化范围可达 $-40^{\circ}\text{C}$ 至 $120^{\circ}\text{C}$ ,对应的热胀冷缩量为 $0.01\text{--}0.03\text{mm}/^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}$ 。这种温度变化会在球罐和支柱内部产生热应力,热应力可达 $50\text{--}100\text{MPa}$ ,可能导致支柱内部产生微裂纹或使原有裂纹扩展,降低支柱的强度和稳定性。

## 2.2 基础因素

基础是大型球罐支柱结构稳定的重要支撑。基础不均匀沉降会对支柱稳定性产生严重影响。当地基土质不均匀或基础施工存在缺陷时,不同位置的基础沉降量不同,导致支柱倾斜,使支柱承受额外的弯矩,降低结构的稳定性<sup>[2]</sup>。基础刚度与强度对支柱承载能力起着关键作用。基础刚度不足时,在球罐和支柱荷载作用下,基础会产生较大变形,影响支柱的正常受力,降低支柱的承载能力。基础强度不够,则无法有效承受球罐和支柱传递下来的荷载,可能导致基础破坏,进而影响支柱结构的稳定性。基础与支柱连接方式对结构稳定性也有影响。合理的连接方式能够确保基础与支柱之间力的有效传递,使支柱在受力时能够与基础协同工作。若连接方式不当,可能出现应力集中或连接松动等问题,影响结构的整体稳定性。

## 2.3 结构因素

支柱材料性能对稳定性影响显著。材料的强度决定了支柱能够承受的最大应力,韧性影响着支柱在受力时的变形能力,而耐腐蚀性则关系到支柱在长期使用过程中的性能保持。选用性能优良的材料,能够提高支柱的稳定性。支柱几何尺寸对稳定性也有作用。支柱长度增加,其长细比增大,稳定性降低;直径和壁厚的改变会影响支柱的抗弯和抗压能力,合理设计支柱的几何尺寸,有助于提高结构的稳定性。支柱与球壳连接方式影响结构受力。不同的连接方式会导致应力传递路径不同,合理的连接方式能够使应力均匀分布,避免局部应力集中,提高结构的稳定性。拉杆设置可增强支柱水平刚度,为支柱提供侧向支撑,提高支柱在水平方向的稳定性。

# 3 大型球罐支柱结构稳定性分析方法

## 3.1 经典力学分析方法

经典力学分析方法在大型球罐支柱结构稳定性研究

中占据重要地位。欧拉公式作为经典力学中用于分析压杆稳定性的重要工具,在支柱稳定性分析里有着特定应用条件,其计算公式为 $P_{cr} = \pi^2 EI / L^2$ ,适用于理想直杆、两端铰支且材料处于弹性阶段的情况,弹性模量 $E$ 通常取 $206\text{GPa}$ 。然而,实际工程中支柱并非完全理想,可能存在初始弯曲、残余应力等缺陷,初始弯曲值通常为 $0.1\text{--}0.3\text{mm/m}$ ,残余应力可达材料屈服强度的 $30\%\text{--}50\%$ ,这些因素使得欧拉公式的应用存在一定局限性,不能精准反映复杂工况下支柱的真实稳定性。压杆稳定理论在支柱设计中发挥着关键作用。该理论考虑了支柱的长细比、材料性能等因素对稳定性的影响,为支柱的尺寸设计、材料选择提供了理论依据。通过运用压杆稳定理论,可确保支柱在承受轴向压力时不会发生失稳破坏,稳定安全系数控制在 $1.8\text{--}2.5$ 之间,保障球罐整体结构的安全。力学平衡方程是分析支柱受力的基础。在建立力学平衡方程时,需全面考虑支柱所受的各种外力,如重力、风载荷、地震载荷等。通过对这些外力进行合理简化与假设,依据静力学原理建立方程。求解力学平衡方程可得到支柱的内力分布情况,进而评估支柱的受力状态是否满足稳定性要求。

## 3.2 有限元分析方法

有限元分析方法为大型球罐支柱结构稳定性研究提供了更为精确的手段。有限元模型建立需遵循一定原则与步骤,要准确反映支柱的几何形状、材料特性以及边界条件等关键信息。合理的模型划分是保证计算精度和效率的关键,需根据支柱的结构特点选择合适的单元类型和网格密度,网格尺寸通常取 $50\text{--}100\text{mm}$ ,网格质量达标率 $\geq 90\%$ 。材料特性相关设定是有限元分析的重要环节,其中材料本构关系描述了材料在不同应力状态下的变形行为,需根据支柱所用材料的实际性能进行准确设定。边界条件同样也是有限元分析的关键部分,它反映了支柱与周围结构的相互作用关系,合理的边界条件设定能够使分析结果更贴近实际情况。求解过程与结果后处理要点同样不容忽视<sup>[3]</sup>。在求解过程中,需选择合适的求解算法和计算参数,以确保计算的收敛性和准确性。结果后处理则是对计算得到的应力、应变、位移等数据进行深入分析,提取关键信息,评估支柱的稳定性状况。

## 3.3 其他分析方法

能量法在支柱稳定性分析中具有独特原理与应用。该方法基于能量守恒原理,通过分析支柱在受力过程中的能量变化来评估其稳定性。能量法能够从整体角度考虑支柱的稳定性问题,为一些复杂结构的稳定性分析提

供了有效途径。实验力学方法在支柱结构研究中也有着重要作用。通过开展实验,可直接获取支柱在不同工况下的实际受力情况和变形数据,为理论分析提供验证依据。然而,实验力学方法也存在一定局限性,实验过程受多种因素影响,如实验设备精度、实验环境条件等,可能导致实验结果存在一定误差。

#### 4 大型球罐支柱结构优化设计策略

##### 4.1 结构形式优化

大型球罐的支承结构形式对整体稳定性起着决定性作用。对现有不同支承结构形式进行科学组合与针对性改进,是提升结构性能的重要途径。赤道正切柱式支承结构具有良好的稳定性,但水平刚度相对不足;裙式支承结构对基础要求较低,不过在抵抗侧向力方面存在一定局限。将这两种结构形式巧妙融合,在赤道正切柱式基础上,于特定位置增设类似裙式结构的辅助支撑构件,能有效增强结构在复杂载荷下的抗变形能力,提升整体稳定性。与此同时,积极探索新型支承结构形式的研发也迫在眉睫。借鉴航空航天领域先进的轻质高强结构理念,尝试构建具有独特几何构型的新型支承体系,利用其特殊的力学传递路径,使球罐支柱在面对风、地震等动态载荷时,具备更强的适应性和稳定性。

##### 4.2 尺寸参数优化

支柱几何尺寸的优化设计需借助精确的力学分析和先进的优化算法。通过建立涵盖多种工况的力学模型,深入分析不同尺寸参数对支柱强度、刚度和稳定性的影响规律。运用智能优化算法,如模拟退火算法、蚁群算法等,在满足设计规范和确保安全的前提下,精准确定支柱长度、直径和壁厚的最优组合。拉杆尺寸与布置方式的优化同样关键。合理调整拉杆直径可改变其承载能力,优化布置角度和间距能显著提高支柱的水平刚度。对于支柱与球壳连接部位,开展精细化设计工作。依据连接部位的应力分布特征,运用有限元分析等手段精确计算连接尺寸,确保应力均匀传递,避免局部应力集中引发结构破坏。

##### 4.3 材料选择优化

高强度材料在支柱结构中展现出巨大的应用潜力。这类材料具有较高的屈服强度和抗拉强度,能在减轻支柱自重的同时,保证结构的承载能力。深入研究高强

度材料的力学性能、加工工艺和耐久性,结合球罐的实际工况和设计要求,将其合理应用于支柱设计,可有效提升结构的整体性能。新型复合材料的发展为支柱设计开辟了新路径。积极探索纤维增强复合材料、陶瓷基复合材料等在支柱中的应用方向,利用其高比强度、高比模量和良好的耐腐蚀性,改善支柱的受力性能和使用寿命。在材料选择过程中,严格遵循材料性能与结构稳定性的匹配原则,确保所选材料能满足不同工况下对支柱稳定性的要求。

##### 4.4 连接方式优化

支柱与基础连接方式的改进与创新是提高结构稳定性的关键环节。采用新型连接构件和先进的连接工艺,如高强度螺栓连接结合预紧力精确控制技术,增强连接部位的刚度和可靠性。优化支柱与球壳连接方式,设计更加合理的连接结构,如采用焊接与机械连接相结合的复合连接方式,提高连接的密封性和强度<sup>[4]</sup>。对于拉杆与支柱连接部位,采取强化措施,如增加连接板的厚度、采用高强度连接件等,确保拉杆能有效传递水平力,提高支柱的整体稳定性。

#### 结束语

大型球罐支柱结构稳定性分析与优化设计是一个复杂且关键的课题。通过对多种支承结构特点的剖析,以及对稳定性影响因素的全面探讨,明确了影响支柱结构稳定性的关键要素。多种稳定性分析方法为准确评估支柱结构性能提供了有力工具。而从结构形式、尺寸参数、材料选择和连接方式等方面提出的优化设计策略,有助于提升支柱结构的稳定性,保障大型球罐的安全可靠运行,为相关领域的发展提供坚实支撑。

#### 参考文献

- [1]谢福寿,余帅,徐旭,等.大型液氢球罐的支柱连接结构设计及性能对比研究[J].真空与低温,2024,30(4):398-407.
- [2]李永泰,张雨晨,李超,等.固定拉杆球罐整体结构水平刚度及自振周期分析计算[J].压力容器,2025,42(3):37-43.
- [3]王凯,刘文才,关国伟.基础沉降发展对球罐结构影响的分析研究[J].石油化工设备,2021,50(4):31-35.
- [4]张楠,程鹏,张浩,等.马来西亚球罐设计计算综述[J].石油和化工设备,2022,25(9):29-32.