

膨胀箱结构优化与流体系统稳压性能研究

张新岩

空装驻新乡地区军事代表室 河南 新乡 453000

摘要: 膨胀箱是闭式流体循环系统稳压的关键设备,其结构影响稳压性能。研究先分析其工作原理与流体系统稳压需求,明确稳压重要性。剖析了主要结构参数并建立数学模型,经验证修正后开展结构优化设计,确定优化目标、约束条件与方法,通过参数迭代获最优方案。最后用CFD仿真技术对流体系统稳压性能仿真分析,结果表明优化后膨胀箱在稳压、结构强度和经济性上协同提升,满足实际需求。

关键词: 膨胀箱;结构优化;流体系统;稳压性能

引言:闭式流体循环系统广泛应用于发动机冷却、数据中心水冷等领域,其稳定运行依赖精准的稳压控制。膨胀箱作为该系统不可或缺的关键设备,通过气液相互作用平衡系统压力、补偿流体体积变化,对维持系统压力稳定起着核心作用。然而,受工况变化、温度波动等因素影响,流体系统压力易异常波动,这对膨胀箱的稳压性能提出了更高要求。因此,深入研究膨胀箱结构优化与流体系统稳压性能具有重要的现实意义。

1 膨胀箱工作原理与流体系统稳压需求分析

膨胀箱是闭式流体循环系统(如发动机冷却系统、数据中心水冷系统)中不可或缺的关键设备,其核心功能是通过气液相互作用平衡系统压力、补偿流体体积变化,而流体系统的稳定运行离不开精准的稳压控制,二者相辅相成、缺一不可。

1.1 膨胀箱的工作原理

膨胀箱的工作原理基于波义耳定律,即一定温度下气体的压力与体积成反比,其核心是通过内部柔性隔膜或胶囊将罐体分为气侧和液侧两个独立腔室实现压力调节。气侧预充一定压力的氮气等惰性气体,液侧则与流体系统管路直接相连,容纳系统内的工作介质。系统冷态初始运行时,水温较低、流体体积最小,此时液侧体积处于最小值,系统压力与气侧预充压力保持平衡。当系统运行升温时,流体体积受热膨胀,多余的膨胀介质进入液侧,压缩气侧气体,使气侧压力升高至系统最大工作压力,实现压力缓冲^[1]。当系统停机或降温时,流体体积收缩,气侧被压缩的气体膨胀,将液侧储存的介质压回系统,补偿体积收缩,防止系统压力过低产生真空或水泵气蚀,通过这种“呼吸”式循环,实现系统压力的动态平衡。

1.2 流体系统稳压需求分析

闭式流体循环系统在运行过程中,受工况变化、温

度波动、介质损耗等因素影响,极易出现压力异常波动,因此稳压需求是保障系统正常运行的核心需求。温度变化是导致压力波动的主要原因,流体受热体积膨胀会使系统压力急剧升高,可能损坏管道、接头、水泵等精密部件;而温度降低导致的体积收缩则会引发负压,造成管道瘪裂、空气吸入等问题。同时,系统运行中的水泵启停、阀门开关会产生水锤现象,形成瞬间高压冲击波,冲击系统部件;微小介质泄漏也会导致系统压力缓慢下降,引发系统频繁启停或报警。另外,流体中溶解的气体若无法及时排出,会形成气堵,影响循环效率和压力稳定性。因此,流体系统需通过稳压装置实现压力精准控制,将压力维持在安全范围,避免各类故障,保障系统高效可靠运行。

2 膨胀箱结构参数分析与建模

2.1 膨胀箱主要结构参数

膨胀箱的主要结构参数可分为几何参数、材料参数和工作参数三类,各类参数相互影响,共同决定其工作性能。几何参数包括罐体总长、总宽、总高、有效容积、进出口管径、隔板厚度及支架尺寸等,其中有效容积是核心参数,直接决定其容纳膨胀介质的能力,需根据系统总水容量和最大膨胀量计算确定;进出口管径影响介质流通效率,隔板厚度则关系到箱体结构强度。材料参数主要包括罐体材料的密度、泊松比、屈服强度和杨氏模量,常用材料为PP5X-1等工程塑料,其性能直接影响箱体的承压能力和抗变形能力。工作参数包括气侧预充压力、最大工作压力、最低工作压力及工作温度,预充压力需与系统静压匹配,工作压力需适应系统运行范围,工作温度则需满足系统工况需求,各参数的合理匹配是保障膨胀箱稳定工作的关键。

2.2 膨胀箱数学模型建立

基于膨胀箱的工作原理和结构特性,结合流体力学、

热力学及材料力学相关理论,建立膨胀箱的数学模型,重点刻画气液相互作用规律和压力变化特性。模型以气侧气体压缩与膨胀过程为核心,基于波义耳定律建立压力与体积的关系方程,同时考虑流体的热膨胀特性,引入体积膨胀系数、温度变化量等参数,建立介质体积变化与压力波动的关联模型^[2]。针对箱体结构,结合材料特性和边界条件,建立结构应力与变形的力学模型,量化隔板、支架等关键部位的受力情况。建模过程中对冗余结构进行合理简化,忽略不影响核心性能的细节,同时引入安全系数,兼顾模型的精准度和计算效率,通过理论推导明确各结构参数与稳压性能、结构强度之间的量化关系,形成完整的数学模型体系。

2.3 模型验证与修正

在完成膨胀箱模型的初步构建后,为确保模型能精准映射其实际工作状态,提升模型的可靠性与实用性,实验测试与数据对比验证及修正环节至关重要。实验伊始,精心挑选与模型参数完全一致的膨胀箱试样,搭建能模拟实际工况的测试平台。在实验过程中,严格把控工作温度、预充压力等关键参数,运用先进的传感器和测量设备,精准采集压力变化、体积变化、结构变形等多维度实验数据。随后,将实验数据与模型计算结果细致对比,深入剖析偏差来源。着重排查模型中因简化而忽略的因素,像介质粘性对流动的影响、气体泄漏导致的压力变化、结构应力集中引发的变形差异等。针对偏差较大的部分,对模型参数进行针对性调整修正,优化方程系数,补充相关影响因子。经过多次反复的验证与修正,不断缩小模型计算结果与实验数据的偏差,直至将其控制在允许范围内,最终获得贴合实际、精度可靠的膨胀箱数学模型,为后续的结构优化和性能仿真筑牢坚实基础。

3 膨胀箱结构优化设计

膨胀箱的结构优化设计是提升其稳压性能、结构强度和经济效益的关键手段,需以实际工作需求为导向,明确优化目标与约束条件,选择合适的优化方法,通过设计迭代实现结构参数的最优配置。

3.1 优化目标与约束条件

膨胀箱结构优化是一项综合性的工程任务,其核心目标紧密围绕稳压性能、结构强度和经济效益这三个关键维度展开,且三者需相互兼顾、协同优化。稳压性能目标旨在将系统压力波动严格控制在允许的范围内,通过优化设计提升压力调节的响应速度和稳定性,大幅减少压力峰值与谷值之间的偏差,确保系统压力始终处于稳定状态。结构强度目标则聚焦于提升箱体及支架的抗压

力、抗变形能力,有效避免共振现象的发生以及结构损坏问题,从而延长膨胀箱的使用寿命,保障其在高温高压等恶劣工况下能够稳定可靠地工作^[3]。经济性目标要求在充分满足性能要求的前提下,尽可能减少材料用量,降低制造成本,同时优化结构工艺,使生产安装过程更加便捷高效。而约束条件主要包括几何约束、性能约束和工艺约束。几何约束明确限定了各结构参数的取值范围,确保设计在合理的尺寸框架内进行;性能约束则保证稳压效果和结构强度能够达到既定的标准;工艺约束充分考虑了生产加工的可行性,避免出现难以加工的复杂结构,同时严格符合相关行业标准和设计规范。

3.2 优化方法选择

结合膨胀箱独特的结构特点和具体的优化需求,对各类优化方法的适配性进行了全面对比分析,最终选择有限元分析结合响应面法的优化方案,该方案能够很好地兼顾优化精度与计算效率。有限元分析方法借助Ansys等专业软件,可对膨胀箱结构进行细致的静态分析、模态分析等。通过这些分析,能够精准捕捉到关键部位的应力、变形情况,准确识别出结构中的薄弱环节,为后续的优化设计提供坚实可靠的数据支撑,尤其适用于复杂结构的力学性能分析。响应面法通过精心设计实验方案,建立结构参数与优化目标之间的响应关系,并拟合回归方程,从而精准找到参数的最优组合。这种方法避免了盲目迭代,大幅提升了优化效率。该组合方法充分发挥了有限元分析和响应面法的优势,既能够通过有限元分析保证结构性能的精准评估,又能够通过响应面法快速实现参数优化。相较于单一优化方法,它更贴合膨胀箱的结构优化需求,同时兼顾了计算精度和工程实用性,非常适合在工程领域的结构优化应用中推广使用。

3.3 优化设计与结果分析

基于已确定的优化目标、约束条件和优化方法,正式开展膨胀箱结构优化设计工作,通过参数迭代最终得到最优结构方案。首先,选取有效容积、隔板厚度、支架尺寸、预充压力等关键参数作为优化变量,并精心设计实验方案。通过有限元分析,获取各变量对应的稳压性能和结构强度数据,为后续分析提供基础。随后,利用响应面法对获取的数据进行拟合回归方程,深入分析各参数之间的交互影响,从而找到最优参数组合。最后,对优化后的结构进行详细建模和严格验证,对比优化前后的性能指标。结果表明,优化后的膨胀箱在多个方面取得了显著提升。有效容积匹配度得到提高,隔板和支架的应力分布更加均匀,最大应力和变形量显著降低,有效避免共振风险。同时压力调节响应速度加快,压力

波动被严格控制在允许范围内。优化方案还减少材料用量,降低制造成本,满足工艺约束要求,成功实现稳压性能、结构强度和经济性的协同提升,充分验证优化方案的可行性和优越性,为膨胀箱的进一步发展提供有力支持。

4 膨胀箱流体系统稳压性能仿真分析

为进一步验证膨胀箱的稳压性能,明确其在不同工况下的工作特性,本章采用CFD(计算流体动力学)仿真技术,对膨胀箱流体系统进行全面的稳压性能仿真分析。通过建立精准的CFD仿真模型,模拟实际工作中的各类工况,采集流场分布、压力变化等仿真数据,对仿真结果进行深入分析,验证膨胀箱的稳压效果,识别潜在的性能问题,为膨胀箱的实际应用和进一步优化提供数据支撑。

4.1 CFD仿真模型建立

CFD仿真模型的建立遵循“几何建模—网格划分—物理模型与边界条件设置”的标准流程,确保模型贴合实际工作状态。首先基于膨胀箱的实际结构参数,利用CAD软件建立三维几何模型,简化螺栓、小倒角等不影响流场的冗余结构,保留进出口、隔膜、隔板等关键特征,导出为CFD软件支持的格式。随后进行网格划分,采用高精度二次四面体单元,对边界层、流场变化剧烈的区域进行网格加密,非关键区域适当粗化,控制网格翘曲度、长宽比等指标,确保网格质量,最终得到节点总数和单元数符合计算要求的网格模型。最后设置物理模型和边界条件,选用合适的湍流模型和多相流模型,设定进出口压力、温度、介质属性等参数,模拟实际工作中的气液两相流动,完成CFD仿真模型的建立。

4.2 仿真工况设定

结合膨胀箱的实际工作场景,设定涵盖常规工况、极限工况和特殊工况的仿真工况,全面验证其稳压性能的适应性和可靠性。常规工况设定为系统正常运行状态,温度控制在95℃,预充压力匹配系统静压,模拟流体正常的热胀冷缩过程;极限工况包括高温极限和压力极限,高温工况将温度提升至系统允许的最高值,压力极限设定为安全阀起跳压力,模拟系统异常升温或介质过量膨胀的情况;特殊工况包括水泵启停、阀门开关产生水锤的工况,以及介质微小泄漏的工况,模拟系统运行中的突发

情况^[4]。每个工况均设定合理的仿真时间和迭代步数,明确收敛判据,确保仿真过程稳定,能够准确捕捉不同工况下的压力变化和流场分布特征,为后续结果分析提供全面的数据支撑。

4.3 仿真结果分析

通过CFD仿真软件求解计算,获取各工况下的流场云图、压力变化曲线、速度矢量图等仿真数据,对膨胀箱的稳压性能进行全面分析。常规工况下,仿真结果显示,膨胀箱能够快速响应流体体积变化,压力波动控制在允许范围内,流场分布均匀,无明显涡旋和气堵现象,气液分离效果良好,验证了其常规稳压能力。极限工况下,高温和高压环境中,膨胀箱仍能有效缓冲压力,最大压力未超过额定承压能力,结构变形量在允许范围内,无结构损坏风险。特殊工况下,能够有效吸收水锤冲击能量,缓解压力突变,对介质泄漏引起的压力下降有一定的补偿作用。结合仿真数据,识别出流场局部流速过高、压力分布不均等潜在问题,为膨胀箱的进一步结构优化提供了精准的改进方向,同时验证了优化后膨胀箱的稳压性能达标,满足实际工作需求。

结束语

通过对膨胀箱结构优化与流体系统稳压性能的研究,明确了膨胀箱工作原理、结构参数对稳压性能的影响,建立了数学模型并验证修正。采用有限元分析与响应面法结合的优化方案,实现了结构参数的最优配置,提升了稳压性能、结构强度和经济性。CFD仿真分析进一步验证了优化效果,为膨胀箱实际应用和进一步优化提供了数据支撑。未来可继续探索新材料、新工艺,进一步提升膨胀箱性能,推动闭式流体循环系统发展。

参考文献

- [1]胡梦宜,龚成平,刘定一,等.基于Workbench的膨胀水箱有限元分析与结构优化[J].黑龙江工程学院学报,2025,39(3):42-50.
- [2]赵翔彦,马域,闫树军,等.动车组齿轮箱体模态分析研究[J].测控技术,2022,41(7):81-86.
- [3]于洋磊,曾志新,冯博,等.乘用车膨胀箱结构分析及改进[J].汽车零部件,2021(3):56-61.
- [4]蒋奇,李梦琦,韩晋植.膨胀箱振动特性分析及优化[J].机械研究与应用,2026.1-4.