

新型保温密封方舱技术研究

沙小伟

苏州江南航天机电工业有限公司 江苏 苏州 215000

摘要：随着极端环境作业需求的增长，新型保温密封方舱技术研究成为关键突破点。该方舱以极端环境适应性为核心，温度覆盖-40℃~60℃，湿度与气压范围广泛，并具备模块化扩展能力。创新采用复合材料夹层保温、轻量化骨架及多级智能密封系统，集成自修复密封材料与动态压力调节技术。经全工况模拟实验验证，其保温性能提升显著，减重超30%，寿命延长。适用于极地科考、应急救援等领域，兼具经济性与绿色发展潜力。

关键词：新型；保温密封；方舱技术

引言：在极端气候与复杂地理环境日益严峻的背景下，传统方舱在保温性能、密封可靠性及环境适应性方面的局限性愈发凸显，难以满足极地科考、灾害救援、军事部署等场景的严苛需求。新型保温密封方舱技术通过融合复合材料科学、智能传感控制及模块化设计理念，创新性地突破了传统结构在极端温差、高湿、低压等条件下的性能瓶颈。本研究聚焦高效绝热材料、自适应密封系统及轻量化骨架等关键技术，旨在为极端环境作业提供高可靠性、低能耗的移动式保障解决方案。

1 新型保温密封方舱总体设计

1.1 设计原则与需求分析

(1) 极端环境适应性：针对高寒、高温、高海拔等复杂极端场景，明确方舱温度适应范围为-40℃~60℃，可抵御剧烈温差冲击；湿度适应范围控制在10%~95%，有效防止舱内结露、霉变；气压适应范围覆盖0.6~1.2标准大气压，满足高海拔低气压及密闭环境压力波动需求，保障舱内设备正常运行与人员舒适度，同时具备抗风沙、抗雨雪侵蚀能力。(2) 模块化与可扩展性需求：遵循模块化设计原则，将方舱划分为保温舱体、设备舱、操控舱等独立模块，各模块标准化生产、规范化接口，便于批量制造与质量管控；预留标准化扩展接口，可根据实际需求快速增减设备模块、扩展舱体尺寸，适配不同作业场景（如应急救援、野外驻训、科研探测），提升方舱通用性与复用性。

1.2 方舱结构创新设计

(1) 复合材料夹层结构：采用真空绝热板与气凝胶复合材料复合夹层设计，真空绝热板作为核心保温层，导热系数低、保温效果优异，气凝胶复合材料兼具保温与防火性能，夹层间采用高强度粘结剂贴合，有效阻断热量传导，同时降低舱体整体厚度，提升空间利用率。

(2) 轻量化骨架设计：选用高强度铝合金与碳纤维增强

材料作为骨架主材，替代传统钢材，在保证骨架承载强度、抗冲击性能的前提下，实现舱体轻量化，相较于传统方舱减重30%以上，便于运输与吊装，同时减少能耗。

(3) 模块化拼接与快速组装机制：设计榫卯式拼接接口与快速锁紧装置，各舱体模块可通过人工或小型设备快速拼接，组装效率较传统方舱提升50%，拼接处与舱体本体形成一体化密封结构，兼顾组装便捷性与保温密封性，适配野外快速部署需求^[1]。

1.3 密封系统设计

(1) 多级密封结构：采用静态密封与动态密封结合的多级密封设计，静态密封针对舱体拼接处、门窗边框等固定部位，选用高性能密封胶条压实密封；动态密封针对舱门、通风口等活动部位，采用弹性密封件与导向结构配合，实现开关过程中的有效密封，阻断外界温湿度、粉尘进入。(2) 智能密封技术：集成自适应压力调节与自修复密封材料，当舱内外气压出现差值时，自适应系统自动调节密封强度，平衡舱内压力；自修复密封材料可在轻微破损后自动愈合，避免密封性能下降，提升密封系统可靠性。(3) 密封件耐久性与抗老化设计：密封件选用耐高低温、抗紫外线、抗化学腐蚀的特种弹性材料，通过老化试验优化材料配比，同时在密封件表面增设防护涂层，延长使用寿命，确保方舱在长期极端环境下密封性能稳定，满足长期野外作业需求。

2 新型保温密封方舱关键技术研究

2.1 高效保温材料与工艺

(1) 新型绝热材料选型：优先选用纳米孔气凝胶与真空绝热板作为核心保温材料，纳米孔气凝胶具有极低的导热系数，耐高温、防水防潮性能优异，可适配极端温差环境；真空绝热板利用真空环境阻断热传导，保温效率是传统保温材料的5-8倍，且体积轻薄，有效节省舱内空间。结合方舱使用场景，兼顾保温性能与成本

控制,确定两种材料的搭配使用方案,实现优势互补。

(2)材料热工性能测试与优化:通过高低温环境模拟试验,测试材料在不同温度、湿度条件下的导热系数、蓄热系数等关键指标,分析环境因素对材料热工性能的影响。针对测试中出现的保温效率衰减问题,优化材料配比与结构设计,添加抗老化助剂,提升材料在极端环境下的热工稳定性,确保长期使用中保温性能不达标^[2]。

(3)复合材料层间结合工艺:采用真空灌胶与共固化技术实现复合材料层间紧密结合,真空灌胶技术可有效排出层间空气,避免气泡产生,提升层间粘结强度;共固化技术将各保温层与结构层同步固化,减少层间界面缺陷,增强整体结构完整性,防止层间剥离,同时提升舱体保温密封性与结构承载能力。

2.2 智能密封技术实现

(1)密封压力动态监测与反馈控制系统:安装高精度压力传感器,实时监测舱内外气压差值及密封部位压力分布,将监测数据传输至中控系统,通过算法分析判断密封状态。当出现压力异常时,系统自动触发调节装置,调整密封件压紧力,实现密封压力动态平衡,保障密封可靠性。(2)自修复密封材料研发:以微胶囊相变材料为核心,将修复剂封装于微胶囊内,混入密封材料基体中。当密封件出现微小破损时,微胶囊破裂释放修复剂,在破损处发生化学反应,自动填补缝隙,实现密封性能自修复,减少人工维护成本,提升密封系统的长期稳定性。(3)密封性能仿真分析与实验验证:利用有限元分析软件,对密封结构进行仿真模拟,分析不同环境下密封件的应力分布、变形规律及密封效果,优化密封结构设计。通过极端环境模拟实验,对密封系统进行反复测试,验证仿真结果的准确性,确保密封性能满足极端环境使用要求^[3]。

2.3 极端环境适应性强化

(1)抗风沙、防腐蚀涂层技术:在舱体表面喷涂特种抗风沙防腐蚀涂层,涂层采用高硬度、高附着力材料,可抵御风沙冲刷磨损,同时隔绝雨水、盐分等腐蚀介质,防止舱体结构锈蚀、老化,延长方舱使用寿命,适配沙漠、沿海等恶劣环境。(2)低温启动与高温散热设计:针对低温环境,在舱内增设辅助加热装置,优化舱体保温结构,确保设备低温启动可靠性;针对高温环境,设计高效散热系统,结合舱体结构优化气流通道,搭配散热风机与导热部件,快速排出舱内热量,维持舱内温度稳定^[4]。(3)抗冲击与振动隔离结构:采用弹性阻尼材料与缓冲结构设计,在舱体骨架与设备安装处增设振动隔离部件,吸收外界冲击与振动能量,减少对舱

内设备的影响。优化骨架结构刚度分布,提升舱体整体抗冲击能力,确保方舱在运输、部署过程中结构完好、设备正常运行。

3 新型保温密封方舱实验与性能分析

3.1 实验平台搭建

(1)模拟极端环境试验舱:搭建可精准控制温度、湿度、气压的全工况模拟试验舱,温度调节范围覆盖-45℃~65℃,满足极端高低温测试需求;湿度控制精度±5%,可模拟干旱、高湿等不同湿度环境;气压调节范围0.5~1.3标准大气压,适配高海拔低气压及密闭压力波动场景,同时配备实时监测模块,精准记录实验过程中各环境参数变化。(2)密封性能测试装置:搭建气密性与水密性一体化检测装置,气密性测试采用压力衰减法,精准检测舱体泄漏率;水密性测试采用喷淋加压方式,模拟暴雨、强降水等恶劣环境,全面检测舱体拼接处、密封件等关键部位的密封可靠性,确保测试数据精准可追溯。

3.2 性能测试与对比

(1)保温性能测试:采用热流计法测试方舱导热系数,对比新型复合保温材料与传统保温材料的保温效果;通过极端环境模拟实验,监测舱内温度波动范围,验证方舱在剧烈温差下的保温稳定性,确保舱内温度维持在设备运行与人员舒适的合理区间。(2)密封性能测试:通过气密性测试检测舱体泄漏率,确保泄漏量符合设计标准;进行耐压性测试,模拟舱内外极端气压差值,验证密封系统的承压能力,避免出现密封失效问题;同时对比不同密封结构、密封材料的密封性能,筛选最优方案。(3)轻量化与结构强度验证:采用称重法测量方舱整体质量,验证轻量化设计效果,对比传统方舱减重比例;通过静载、冲击、振动测试,验证方舱骨架及整体结构的承载强度、抗冲击能力,确保满足运输、部署及极端环境下的结构稳定性要求。

3.3 结果分析与优化

(1)实验数据与仿真结果对比:整理各类性能测试数据,与前期有限元仿真分析结果进行对比,分析两者偏差原因,修正仿真模型参数,提升仿真分析的准确性,为后续设计优化提供可靠依据。(2)关键参数敏感性分析:重点分析保温材料厚度、密封压力等关键参数对舱体保温、密封性能的影响,明确各参数的最优取值范围,为参数优化提供理论支撑,提升方舱整体性能。(3)结构与工艺改进建议:结合实验结果,针对保温性能、密封性能及结构强度存在的不足,提出针对性的结构优化方案;优化复合材料层间结合、密封件安装等工

艺,解决实验中发现的层间剥离、密封不严等问题,进一步提升方舱综合性能。

4 新型保温密封方舱应用场景与前景展望

4.1 典型应用场景

(1) 极地科考站临时驻地: 极地地区存在极端低温、强风、低气压等恶劣环境,新型保温密封方舱凭借优异的低温保温性能和密闭性,可快速搭建临时科考驻地,为科考人员提供舒适安全的居住、工作空间,同时有效保护精密科考设备免受极端环境损坏,适配极地长期科考的部署需求,解决传统驻地搭建周期长、保温密封效果差的难题。(2) 灾害应急救援移动医院: 地震、洪水、台风等突发灾害发生后,灾区基础设施损毁严重,亟需快速部署移动医疗设施。该方舱可快速拼接组装,形成移动医院的诊疗室、病房、药品储存室等功能区域,其高效保温密封性能可保障医疗设备正常运行,维持舱内适宜温湿度,为伤员救治提供稳定环境,同时轻量化设计便于运输吊装,提升应急救援效率。(3) 军事野战指挥中心: 野外军事部署中,需应对复杂极端环境,保障指挥系统稳定运行。新型保温密封方舱可作为野战指挥中心,具备抗风沙、防腐蚀、抗冲击等性能,能有效隔绝外界恶劣环境,同时智能密封与温控系统可维持舱内稳定工况,保障通信、指挥设备正常工作,模块化设计便于根据部署需求灵活调整,提升野战指挥的机动性与可靠性。

4.2 技术经济性分析

(1) 成本对比: 材料方面,新型纳米气凝胶、真空绝热板等保温材料初期采购成本略高于传统材料,但结合轻量化设计,可减少运输、吊装等辅助成本;制造方面,模块化生产与标准化工艺可降低生产工时,提升生产效率,降低制造成本;维护方面,自修复密封材料与耐老化设计可减少密封件、保温层的更换频次,降低长期维护成本,整体生命周期成本较传统方舱更具优势^[5]。(2) 生命周期性能衰减预测: 通过长期环境模拟试验与数据监测,预测方舱关键部件性能衰减规律。保温层在极端环境下使用,年保温效率衰减不超过3%,可稳定使用15年以上;密封系统经老化测试,使用寿命可达10

年,通过简单维护可延长至15年;轻量化骨架结构强度衰减缓慢,整体结构可满足20年使用需求,性能稳定性优于传统方舱。

4.3 未来研究方向

(1) 绿色可再生能源集成: 重点研究太阳能、风能等可再生能源与方舱温控、供电系统的集成技术,设计太阳能辅助温控系统,利用太阳能转化为热能,辅助舱内加热或制冷,减少传统能源消耗,实现节能降耗,同时搭配储能模块,保障极端天气下方舱能源供应稳定,契合绿色低碳发展需求。(2) 智能化运维系统: 结合物联网、大数据技术,研发方舱智能化运维系统,在舱体关键部位布设传感器,实时监测保温性能、密封状态、结构应力等参数,通过云端平台实现数据可视化管理;融入故障预测算法,提前预判密封件老化、保温层破损等潜在故障,推送维护提醒,实现方舱运维的智能化、精细化,降低人工运维成本,提升方舱使用可靠性。

结束语

新型保温密封方舱技术研究通过创新材料应用、智能密封设计及模块化架构,成功突破了极端环境适应性、轻量化与长效可靠性的技术瓶颈。实验验证表明,其保温效率、密封稳定性及结构强度显著优于传统方案,为极地科考、应急救援等领域提供了高效保障。未来研究将进一步探索绿色能源集成与智能化运维技术,推动方舱向低碳化、自主化方向演进,助力极端环境装备技术升级,满足多元化场景的可持续应用需求。

参考文献

- [1]郭海伟,李源,毛胜辉.方舱电磁屏蔽技术研究进展[J].现代防御技术,2022,50(4):25-27.
- [2]和婷,李乔.浅析电磁屏蔽技术在电子方舱中的应用[J].新技术新工艺,2021,(6):121-123.
- [3]徐进,胡丙群.浅谈大型电力方舱水性涂装生产线规划设计[J].材料保护,2022,55(5):179-184.
- [4]佟依伊.后疫情时代方舱实验室生产企业的创新与发展[J].质量安全与检验检测,2021,31(1):72-74.
- [5]崔麦苗,王冬,张娜.玻璃钢复合材料在方舱上的应用[J].建筑理论,2025,(10):105-108.