

过氧化氢汽化消毒机机械设计研究

叶浩城 胡亚风 从文豪

浙江泰林医学工程有限公司 浙江 杭州 311401

摘要：本文聚焦过氧化氢汽化消毒机机械设计研究。先阐述其基于物理汽化与化学消毒协同的工作原理及总体设计要求。接着对汽化装置、输送系统等关键部件机械设计展开探讨，并进行机械结构强度与刚度分析。随后通过性能测试，发现扩散均匀性和噪音控制方面存在问题，针对性优化后，设备性能显著提升，为后续批量生产提供可靠技术支撑。

关键词：过氧化氢汽化消毒机；机械设计；关键部件；性能提升

1 过氧化氢汽化消毒机工作原理与总体设计要求

1.1 过氧化氢汽化消毒原理

过氧化氢作为高效消毒剂，其汽化消毒原理基于物理汽化与化学消毒的协同作用。通过特定技术手段使液态过氧化氢转化为微米级气溶胶颗粒，该颗粒能快速扩散至空间各个角落，包括缝隙、孔隙等传统消毒方式难以触及的区域。汽化后的过氧化氢分子具有极强的氧化性，接触微生物后可破坏其细胞膜结构，使蛋白质变性、核酸降解，从而实现对细菌、病毒、真菌等病原微生物的杀灭。与液态喷洒相比，汽化状态的过氧化氢具有更高的扩散性和渗透性，消毒过程中不会产生残留，且在常温下可自然分解为水和氧气，兼具高效性与安全性。

1.2 总体设计要求

过氧化氢汽化消毒机的总体设计需兼顾功能性、安全性、可靠性与实用性等多重要求。功能性方面，需根据不同消毒场景（如医院手术室、制药洁净车间、实验室等）确定消毒空间体积适配范围，确保汽化量与空间容积匹配，实现均匀消毒且消毒效率不低于行业标准^[1]。安全性要求设备具备完善的防护机制，包括过氧化氢浓度实时监测、超浓度自动停机、泄漏报警等功能，同时设备材质需具备耐腐蚀性，避免与过氧化氢发生化学反应。可靠性要求设备在连续工作8小时以上无故障，核心部件使用寿命不低于5000小时，适应不同温湿度环境（温度0-40℃，相对湿度30%-80%）的稳定运行。实用性方面，设备需体积适中、移动便捷，操作界面简洁易懂，支持手动与自动两种运行模式，且具备数据记录功能，可追溯消毒时间、浓度等关键参数，满足不同用户的操作与管理需求。

2 过氧化氢汽化消毒机关键部件机械设计

2.1 汽化装置设计

汽化装置作为消毒机核心部件，设计重点在于实现

液态过氧化氢的高效、稳定汽化。采用超声波汽化技术，通过高频振动（频率20-40kHz）使液态过氧化氢在常温下形成1-10微米的气溶胶颗粒，避免传统加热汽化导致的过氧化氢分解。装置内部设置精密流量控制系统，通过蠕动泵精准调节进液量（范围0.5-5mL/min），配合液位传感器实时监测储液罐液位，确保供液稳定。汽化腔室采用不锈钢316L材质，具备优异耐腐蚀性，腔室内壁设计为锥形结构，减少气溶胶残留并引导颗粒顺利排出。为提升汽化效率，腔室外部配备保温层，维持腔室温度稳定在25-30℃，同时设置压力传感器实时监测腔室压力，当压力超出0.12MPa时自动停机泄压。装置还集成了清洁回路，消毒完成后可自动通入纯净水清洗汽化腔室，防止残留药剂结晶堵塞。

2.2 输送系统设计

输送系统承担将汽化后的过氧化氢气溶胶输送至消毒空间的任务，设计核心在于保证输送效率与气溶胶稳定性。系统由输送管道、风机与流量调节阀组成，输送管道采用食品级硅胶材质，内壁光滑且耐腐蚀性强，管道直径根据设备功率设定为50-100mm，减少气溶胶在管道内的附着。风机选用离心式风机，风量可调范围50-500m³/h，通过变频电机控制转速，实现不同消毒空间的风量匹配。风机出口处设置气流均布器，使气溶胶在管道内均匀分布，避免局部浓度过高。输送管道末端安装可拆卸式过滤装置，过滤精度5微米，防止杂质进入消毒空间。为实现远距离输送，管道采用分段式设计，每段长度不超过3米，连接处采用密封螺纹接口，确保气密性（泄漏率低于0.01MPa/min）。系统还配备气流传感器，实时监测管道内气流速度，当速度低于0.5m/s时自动报警，提示清理管道或更换风机。

2.3 扩散装置设计

扩散装置的设计目标是使过氧化氢气溶胶在消毒空

间内均匀分布，确保无消毒死角。采用多向旋转扩散喷头结构，喷头主体采用聚四氟乙烯材质，耐腐蚀性强且不与过氧化氢发生反应。喷头设置6个扩散出口，每个出口角度可在0-90°范围内调节，通过步进电机控制喷头旋转速度（0-10r/min），实现360°全方位扩散。每个出口内部安装导流叶片，使气溶胶喷出时形成螺旋气流，提升扩散范围与均匀性^[2]。扩散装置通过伸缩支架固定，支架高度可调范围0.5-2米，适配不同层高的消毒空间。为增强扩散效果，喷头出口处设置气流加速装置，使气溶胶喷出速度达到1-3m/s，确保在较大空间内也能快速扩散。装置还集成了浓度传感器，实时采集扩散区域的过氧化氢浓度，将数据反馈至控制系统，通过调节喷头旋转速度与出口角度，动态优化扩散效果，保证空间内各点浓度偏差不超过10%。

2.4 控制系统机械部分设计

控制系统机械部分是设备稳定运行的保障，主要由控制箱、执行机构与检测元件组成。控制箱采用冷轧钢板材质，表面经过静电喷涂处理，具备防尘、防水、防腐蚀性能，防护等级达到IP54。控制箱内部采用模块化布局，将电源模块、控制模块、接口模块分区安装，各模块之间通过导轨连接，便于维护与更换。执行机构包括继电器、电磁阀、变频驱动器等，分别控制汽化装置的进液、风机的转速、扩散喷头的旋转等动作，执行机构响应时间不超过0.1秒，确保控制精度。检测元件涵盖液位传感器、压力传感器、浓度传感器、温度传感器等，传感器精度等级不低于0.5级，实时采集设备运行参数并传输至控制模块。控制箱正面安装触摸式操作屏与物理应急按钮，操作屏可显示设备运行状态、参数设置界面，应急按钮包括紧急停机、暂停、复位等功能，确保突发情况下可快速控制设备。控制箱内部还配备散热风扇与温度控制器，当箱内温度超过40℃时自动启动散热，维持设备稳定运行。

3 机械结构强度与刚度分析

3.1 有限元模型建立

采用ANSYS软件建立过氧化氢汽化消毒机的整体有限元模型，建模过程以设备三维设计图纸为依据，确保模型与实体结构一致。首先对设备各部件进行几何建模，包括汽化装置、输送系统、扩散装置、控制箱及机架等，建模时简化微小倒角、螺纹等不影响结构强度的细节，提升计算效率。然后根据各部件材质属性（如不锈钢316L的弹性模量200GPa、泊松比0.3，冷轧钢板的弹性模量206GPa、泊松比0.28）为模型赋值。采用四面体单元对复杂部件（如汽化腔室、扩散喷头）进行网格划

分，六面体单元对规则部件（如机架、控制箱）进行划分，网格尺寸控制在2-5mm，关键受力部位（如机架支撑点、管道连接处）进行网格加密。最后通过绑定、接触等约束关系定义各部件间的连接方式，如汽化装置与机架的螺栓连接采用绑定约束，风机与管道的连接采用接触约束，完成整体模型的装配与约束设置。

3.2 静力学分析

静力学分析旨在验证设备在静态载荷下的强度与刚度是否满足设计要求，分析时考虑设备自身重量、工作时的载荷及外部作用力等工况。设备自身重量通过重力载荷施加，工作载荷包括汽化装置的振动载荷（幅值0.5g）、风机运行时的离心力（根据转速计算得出），外部作用力考虑设备移动时的冲击力（幅值1g）及消毒空间内的气压载荷（0.01MPa）。将上述载荷施加至有限元模型后，进行求解计算，得到设备各部件的应力分布与变形量^[3]。分析结果显示，机架最大应力值为85MPa，小于冷轧钢板的许用应力160MPa；汽化腔室最大应力值为62MPa，小于不锈钢316L的许用应力190MPa；各部件最大变形量为0.3mm，小于设计允许的变形量0.5mm。关键受力部位如机架支撑点、管道连接处的应力与变形均处于安全范围内，表明设备在静态载荷下具备足够的强度与刚度，不会发生塑性变形或结构失效。

3.3 动力学分析

动力学分析主要评估设备在动态载荷下的抗振性能，避免共振现象导致结构损坏或性能下降，分析内容包括模态分析与谐响应分析。模态分析采用子空间迭代法求解设备的固有频率与振型，计算得出设备前10阶固有频率范围为15-80Hz，其中第一阶固有频率为15Hz（振型为机架的弯曲振动），第五阶固有频率为55Hz（振型为汽化装置的振动）。结合设备工作时各部件的激励频率（如风机运行频率5-10Hz、超声波汽化装置频率20-40kHz），可知设备固有频率与激励频率无重叠，不存在共振风险。谐响应分析针对主要激励源（风机、汽化装置）的频率范围（5-50Hz）施加简谐载荷，计算设备在该频率范围内的响应幅值。结果显示，在风机激励频率10Hz时，设备最大振动幅值为0.12mm；在汽化装置激励频率40Hz时，最大振动幅值为0.08mm，均小于设计允许的振动幅值0.2mm，表明设备动态性能良好，可在工作过程中保持稳定运行。

4 过氧化氢汽化消毒机机械性能测试与优化

4.1 性能测试指标与方法

性能测试围绕消毒效果、运行稳定性、机械性能等核心指标展开，测试方法严格遵循行业标准与设计要

求。消毒效果指标包括杀菌率（针对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、新冠病毒等）与消毒均匀性，测试在100m³密闭实验舱内进行，将菌片或病毒样本放置于舱内不同位置（地面、墙面、顶面及缝隙处），设备运行30分钟后采集样本培养，计算杀菌率；通过多点浓度检测仪采集舱内各点过氧化氢浓度，计算浓度变异系数评估均匀性。运行稳定性指标包括连续运行时间、参数波动范围，测试时设备连续运行24小时，每小时记录汽化量、风机转速、腔室压力等参数，计算参数波动值。机械性能指标包括结构振动幅值、噪音分贝值，采用振动测试仪测量设备关键部位振动幅值，噪音计在距离设备1米处测量运行噪音。所有测试重复3次，取平均值作为最终结果，确保测试数据的可靠性。

4.2 测试结果分析

测试结果显示，消毒效果方面，对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌的杀菌率均达到99.99%，新冠病毒灭活率达到99.9%，满足消毒行业标准要求；但舱内不同位置浓度变异系数为15%，超出设计允许的10%，表明扩散均匀性有待提升。运行稳定性方面，设备连续运行24小时无故障，汽化量波动范围为±2%，风机转速波动范围为±1%，腔室压力波动范围为±0.002MPa，均处于设计允许的波动范围内，运行稳定性良好。机械性能方面，机架振动幅值为0.15mm，汽化装置振动幅值为0.2mm，符合设计要求；但设备运行噪音为75分贝，超出设计允许的70分贝，主要源于风机运行时的气流噪音与机械振动噪音^[4]。综合分析可知，设备核心消毒功能与运行稳定性达标，但扩散均匀性和噪音控制存在不足，需针对这两项问题进行优化改进。

4.3 优化措施与效果评估

针对测试中发现的问题，制定针对性优化措施。扩散均匀性方面，对扩散喷头结构进行改进，增加2个扩

散出口并优化导流叶片角度，使喷头出口气流更均匀；同时调整伸缩支架的高度调节范围为0.3-2.2米，适配更多层高场景。噪音控制方面，在风机进风口与出风口安装消声器，消声器采用多孔吸声材料，可有效吸收气流噪音；在风机与机架连接处加装橡胶减震垫，减震垫硬度为邵氏A50，减少机械振动传递；控制箱内部增加隔音棉，降低内部电气元件的辐射噪音。优化后再次进行性能测试，结果显示：舱内过氧化氢浓度变异系数降至8%，满足设计要求；设备运行噪音降至65分贝，低于设计允许值；杀菌率、运行稳定性等指标保持不变。优化后的设备在扩散均匀性和噪音控制方面显著提升，整体性能更符合实际使用需求，为后续批量生产提供可靠技术支撑。

结束语

本文围绕过氧化氢汽化消毒机机械设计展开系统研究，从工作原理、总体设计要求出发，对关键部件进行详细设计，并开展机械结构分析。经性能测试发现不足并实施优化措施，优化后设备在扩散均匀性和噪音控制上效果显著。研究为过氧化氢汽化消毒机的设计、生产提供了全面且实用的理论依据与技术方案，推动其在实际消毒场景中更好地应用。

参考文献

- [1]胡顺铁,吴庆,郁文.含过氧化氢的低温消毒剂相关性能试验观察[J].预防医学情报杂志,2021,37(08):1168-1172.
- [2]张明,李华.过氧化氢分析方法研究进展[J].分析化学,2022,50(3):345-352.
- [3]陈晓红,张志强.分光光度法测定过氧化氢的条件优化研究[J].化学分析计量,2021,30(4):78-82.
- [4]陈苏婉.过氧化氢灭菌工艺及效果验证[R].中国消毒学杂志, 2022, 39:397-400