

# 洁净室高效空气过滤器使用寿命分析

白思卓 王家梁

中国联合工程有限公司 浙江杭州 310051

**摘要:** 洁净室高效空气过滤器 (HEPA/ULPA) 的使用年限受到多种因素的影响, 相关技术人员需要注重梳理污染负荷、运行条件、过滤器特性、维护系统四个主要因子, 提出阻力监测、粒子浓度监测、理论计算、经验判断四种评估方法, 这样能够有针对性地延长过滤器的使用寿命。研究可为洁净室运营提供理论支撑, 帮助企业在保证清洁生产的前提下优化成本和降低生产风险, 同时为洁净室的优化设计和运行效率提高奠定基础。

**关键词:** 洁净室; 高效空气过滤器; 使用寿命

作为洁净室的关键部件, 高效空气过滤器的工作效率将直接影响颗粒物的控制效率, 而此设备的使用年限又关系到运行的稳定和经济。这就需要工作人员对其进行使用寿命的研究, 实质上就是要通过对关键变量的梳理, 进而构建一套科学的评价和管理系统, 以防止过滤器出现早期故障, 有效延长其使用年限。在理论上, 本项目将弥补“寿命与运行参数”“维护措施与寿命延长”的关联空白, 为阶段选型、运行阶段调控提供依据。同时, 明确寿命影响机制与评估方法, 能帮助运营方规避盲目更换或延迟更换问题, 在保障生产环境安全的基础上优化成本结构, 对于电子、医药、食品等清洁型产业的节能减排发展有重大意义<sup>[1]</sup>。

## 一、影响高效空气过滤器使用寿命的核心因素

### (一) 污染负荷因素

污染负荷是决定过滤器寿命的首要外部变量, 直接影响滤料容尘速度与堵塞周期。洁净室外部环境颗粒物浓度是重要来源, 若周边存在工业粉尘、交通尾气等污染源, 新风会携带更多微粒, 加速滤料杂质积累。室内产尘量与洁净室用途密切相关, 生产工艺中的研磨、设备运转、人员活动均会产生微粒, 若未被前置过滤系统有效拦截, 会直接加重高效过滤器的滤料负担。

### (二) 运行条件因素

运行条件通过对气体流动状况和过滤介质特性的影响, 从而间接地决定了过滤器的使用年限。实际运行风量是核心参数, 每个过滤器都有一个设定的流量区间, 如果超出这个数值, 就会增加滤芯的冲击阻力, 加快颗粒的渗入和积累。当风速小于设定风速时, 虽然可以延缓空气的容纳速率, 但也会造成空气交换次数的减少,

增加局部区域污染物积累。操作温度和湿度对过滤器的性能有很大的影响, 温度升高会加速过滤器的老化和脆性, 使滤料的结构不稳定。湿度高容易造成滤材的潮湿霉变, 影响滤材的使用, 并造成颗粒团聚, 增加了堵塞的概率<sup>[2]</sup>。

### (三) 过滤器本身特性

过滤器本身特征是其固有特征, 它对过滤材料的吸尘量和耐漏率有很大的影响。滤料的材料和结构的不同会引起粉尘浓度的变化, 玻纤过滤材料的纤维细, 孔隙率高, 吸附的颗粒越多, 使用寿命越长。有些人造纤维过滤材料的孔隙比较密集, 容纳粉尘的地方比较少, 使用年限也比较短。初始阻力和允许粉尘容量是生产厂家给出的关键参数, 较小的初始阻力, 有利于减少空气对过滤材料的影响, 使过滤面保持平稳。当过滤介质具有一定的容量时, 过滤材料能够保持较久的饱和状态, 其使用年限也就相应延长。虽然密闭对粉尘的容纳能力没有直接的作用, 但是由于间隙的存在, 使得没有被过滤的气体漏出, 需要及时更新<sup>[3]</sup>。

### (四) 维护与前置过滤系统

前置过滤系统的工作状况和维修次数是保证高效率过滤器使用年限的重要保证。初效和中效滤池起着“前置屏障”的功能, 对大颗粒物起到了截留和降低粒子含量的作用。如果不及时更换前置过滤器, 则滤料的积尘量达到一定程度后, 将丧失过滤性能, 大颗粒物将被直接带到过滤器中, 从而加快了滤芯的阻塞和破碎。常规的巡检和阻力监控次数也会对其使用寿命产生一定的影响, 如果巡检周期太久, 不能及时发现异常阻力和密封件老化, 将使其长期工作在非正常工况下, 从而加快其工作效率的下降。

## 二、高效空气过滤器使用寿命的评估方法

### (一) 阻力监测法

阻力检测法是根据过滤材料的表面积尘能力和阻力成正比而得到广泛应用的。将过滤器阻力分为初始阻力、设计阻力和终端阻力，其中，滤器阻力监测法核心信息如表1所示。初始阻力是未容尘时的基准值，由滤料材料、结构和风量确定；所谓的“设计阻抗”就是指在工作过程中，过滤装置在工作时所能承受的最大限度；终

端阻抗是一个重要的替代指标，一般将其设置为两倍于过滤材料的容尘量。每天都要做好阻力测试，并将其做好相应的测试，如有轻微的波动，表示设备运转良好，波动大的有可能是过滤材料的部分阻塞，下降的时候可能是过滤介质的损坏或者是密封的渗漏。这种方法具有直观的数据和可操作性，能够及时地反映出过滤装置的工作状况，为替换方案的制定提供了一个直观的参考，而且监控装置造价低廉，适用于各种类型的洁净室环境<sup>[4]</sup>。

表1 高效空气过滤器阻力监测法核心信息表

类别	定义	关键特征/设定依据	核心作用
初始阻力	过滤器未容尘时的气流阻力	由滤料材质、结构及运行风量决定，为后续阻力监测的基准值	作为阻力变化监测的参照标准
设计阻力	过滤器正常运行时的阻力范围	代表过滤器处于稳定过滤状态，无异常负荷	判断过滤器是否处于正常运行区间
终阻力	过滤器需更换的临界阻力	通常设定为初始阻力的2倍，此时滤料接近容尘饱和，过滤效率开始衰减	作为过滤器更换的核心判定指标
监测操作要求	日常阻力数据记录与分析	每日记录数据并绘制变化曲线；平缓上升为正常，突升可能为滤料局部堵塞，突降可能为滤料破损/密封泄漏	实时追踪状态，及时发现异常
方法核心优势	阻力监测法的突出特点	数据直观、可操作性强、监测设备成本较低	适用于各类洁净室，提供直接更换依据

### (二) 粒子浓度监测法

粒子浓度监控技术是通过测量洁净室内颗粒物的浓度来评价过滤系统的使用年限，其核心思想是，过滤效能的下降将会引起颗粒物的含量增加。首先要确定净化室内颗粒物的含量，各个领域的颗粒物含量指标各不相同，比如医疗级的无菌洁净室需要对0.5微米的颗粒物进行控制，而对于半导体洁净室则需要对0.1微米的颗粒物加以控制。在进行检测的时候，要在重点地区设置一个取样点，并对其进行定时地收集。监测时在关键区域设采样点，定期采集空气样本分析：浓度达标说明过滤效率稳定，波动接近限值或突然超标，排除气流紊乱、外部污染等因素后，那么就可以判断过滤器的过滤效果已经降低，并且它的使用年限也将会走到尽头。

### (三) 理论计算法

理论计算法以容尘量、运行风量和污染物浓度为基础，采用公式计算的方法来确定过滤器的理论使用年限，是一种预防评价方法。这个核心的计算方法是“理论使用年限=额定容尘量/(实际工作通风量-大气颗粒含量)。”

其中额定容尘量由制造商提供，实际风量需风速仪测量，微粒浓度需长期监测取平均值。在计算时需要注意

修正因子：空气流动对数值模拟有一定的干扰作用，应按其变化程度采用0.9~1.1的修正系数。由于污染种类的不同，对滤料的消耗速度有差异，比如对于油雾来说需要增加过滤系数。该方法提出了一种新的工艺方案，可以在装置早期对设备的使用状态进行预测，并为设备的更新规划提供依据，从而防止因设备的突然更换而造成的停机事故，但是由于需要精确的数据获取，若出现较大的误差，将造成计算结果与实际使用情况之间的偏差，需要根据现场监控进行修正。

### (四) 经验判断法

经验判断法是根据同类型洁净室的历史资料和工业实践中的经验进行的，适合无精确监控的场合。其主要原理是在同样的工作状态下，过滤器的寿命是有规律的。如果目前的净化室工艺、污染负荷、操作参数与过去的清洁室的运行参数是吻合的，那么就可以参照过去的更新次数来预测其寿命。而在各个领域，也有普遍的使用经验，如医疗级的洁净室过滤器寿命一般在1-3年左右，而对于电子洁净室来说，过滤器一般在2-4年左右，而食物洁净室一般在1.5-2.5年之间。需要指出的是，如果目前的污染物排放量高于过去的20%，那么其使用年限将会减少<sup>[5]</sup>。

### 三、延长高效空气过滤器使用寿命的策略

#### (一) 优化前置过滤系统

优化前置过滤系统的关键在于对初效和中效过滤器进行匹配,实现对大颗粒物质的最大截留,降低过滤器的负载。初效除尘器可截留大于5微米的颗粒物,中效除尘器可截留1-5微米颗粒物,两者的过滤效能应匹配高效能过滤器,若高效有效值为H14,中效选F8级比F6级多拦截30%以上的1-5 $\mu\text{m}$ 微粒。比如,电子洁净室的中效过滤器由F6提升到F8,首次更换时间由三个月压缩到两个月,中效由半年压缩到四个月,高效能滤芯的使用年限由十八个月提升到二十四个月。为了防止被污染物质渗透,预处理装置必须在其最初的1.5倍阻力下进行替换,保证了预处理装置的“屏障作用”,并对高效率的过滤器起到了稳定的防护作用。

#### (二) 控制洁净室运行参数

控制运行参数的关键是稳定空气流量、温度和湿度,降低过滤过程中的参数变化。操作时,空气流量控制在规定的范围内,采用变频调速,防止因气流突然下降而引起的过滤负荷。将变频调速技术应用于医疗级无菌净化室内,使空气流量变化范围由 $\pm 15\%$ 调整到 $\pm 8\%$ ,大大减少了空气对过滤材料的影响,使其使用年限由20个月提高到26个月。温、湿度要与过滤材料的性能相适应,玻璃纤维过滤材料的工作环境是10-30 $^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度40%~60%,采用空气调节技术使过滤材料的温度和湿度保持在 $22 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、 $50 \pm 5\%$ ,防止过滤材料的老化和潮湿,有效使用年限比未经处理时提高25%<sup>[6]</sup>。

#### (三) 减少室内外污染带人

想要减少室内外污染带人,就要从人员、物料和新风三个方面建立起有效的保护系统,以减少污染物的引入。工作人员在进入洁净室之前,需要进行不低于30秒钟的风洗,能够将衣服表面80%的颗粒清除掉。如果是公司的电子洁净室,通过这一系统,工作人员携带的颗粒含量降低了50%,有效过滤装置的使用年限达到了18%。在物料方面,在进入之前必须先经过缓冲室内进行清洗和杀菌,然后再用水冲洗将其表面颗粒除去。其中,医疗净化室专门为易产生灰尘的材料设计了专门的工艺,使材料中的灰尘含量降低了60%,同时有效地降低了空气中的灰尘含量。还可以在新风口增加了一段G4级的初效过滤装置,实现了对户外大粒子物质的截留,将一家化学纯净室的空气中引入的粒子数量降低了45%,有效使用年限得到显著提高。

#### (四) 强化日常维护管理

加强维修管理则需要对设备进行全程的维修记录,对设备的使用情况进行定期检查,出现问题及时处理。台账需要记载过滤器的安装时间、初始阻力、日常阻力数据和维修情况,便于跟踪过滤材料的积尘情况。比如,生物制药洁净室通过台账管理,能够提前预判高效过滤器即将达到终阻力。同时,可以利用颗粒计数法,每个季度检测一次过滤器边框和密封胶条的渗漏情况,比如半导体洁净室运用此种方法察觉到三处微小,消除了因无菌气体造成的二次污染,有效使用年限可提高24%。另外,通过对维修工人的操作训练,使维修程序标准化,使过滤器维修时的破损比率显著下降,使用寿命的稳定性得到了明显的提高。

#### 结束语

综上所述,通过对洁净室高效空气过滤器使用年限的研究,识别影响使用寿命的关键因子,进而建立完善的影响因素、评估、策略的理论框架,为我国空气净化技术的科学化管理提供技术支持。从理论价值看,梳理的影响因素填补了寿命与运行参数的关联空白,评估方法提供了标准化判断工具,而寿命延长策略平衡了洁净度与经济性需求。从实践意义看,该分析能帮助运营方规避更换风险,优化成本结构,对依赖洁净环境的行业具有指导作用。在未来的发展环境中,还可以将实时感知和数据分析与使用寿命的预测相结合,促进清洁生产向更高效和智能的方向发展,为清洁生产产业的高品质发展奠定基础。

#### 参考文献

- [1]郭俊材.核空气净化系统高效过滤器效率试验及性能研究[J].模具制造,2025,25(05):144-146.
- [2]殷平.空气净化技术研究(2):电动空气净化设备[J].暖通空调,2025,55(05):1-17.
- [3]张明洋,陈芳芳,濮从政,吴红,翁晓焯,赵鹏鑫,李龙鑫,马力,魏祎程,刘呈坤.功能性空气过滤材料研究进展[J].产业用纺织品,2024,42(12):27-34.
- [4]叶智坚,夏敏莹.家用空气净化器用筒式过滤器的阻力测试方法探究[J].绿色科技,2024,26(20):273-278.
- [5]杨天缘.电致热空气催化净化过滤器设计与性能评价[D].广东工业大学,2024.
- [6]殷平.空气净化技术研究(1):纤维过滤[J].暖通空调,2024,54(05):13-24.