

洁净室高效空气过滤器现场检漏方法的 实验研究——国标《洁净室施工及验收规范》 编制组研讨系列课题之七

中国建筑科学研究院 曹国庆★ 许钟麟 张益昭 张彦国 冯 昕 党 宇 董 林

摘要 高效空气过滤器现场扫描检漏测试是保证洁净室工程质量的必要措施之一,但在实际工程测试时常遇到将高效空气过滤器边框及安装框架处含尘浓度偏高误判为存在漏点的问题,介绍了 IEST 给出的相关测试方法及部分洁净室施工人员采取的非扫描检漏测试方法,通过理论分析及大量实验研究,提出了科学合理的高效空气过滤器扫描检漏测试方法。

关键词 洁净室 高效空气过滤器 扫描检漏 竖直围挡 水平挡板

In situ scanning leak test method for HEPA filters: part 7 of the series of research practice of the national standard task group for the Code for cleanroom construction and acceptance test

By Cao Guoqing★, Xu Zhonglin, Zhang Yizhao, Zhang Yanguo, Feng Xin, Dang Yu and Dong Lin

Abstract In situ scanning leak test for installed high efficiency particulate air (HEPA) filters is a necessary step to guarantee the quality of clean rooms. However, because particle concentration of dead-air spaces, such as where near the filter frame and support structure, is always high in the actual HEPA filter, leaks in dead-air spaces are mistakenly considered to exist. Presents two different relevant leak test methods, and gives a new reasonable method based on theoretical analysis and experimental research.

Keywords cleanroom, high efficiency particulate air filter, scanning leak test, vertical envelop, horizontal clipboard

★ China Academy of Building Research, Beijing, China

①

0 引言

现代空气净化技术的发展,使得空气过滤产业面临着前所未有的机遇和挑战。许多部门对生产、工作环境空气中的悬浮微粒的控制要求越来越严格,从而对空调净化系统末端的高效空气过滤器 (high efficiency particulate air (HEPA) filter) 性能的要求越来越高。洁净度是洁净室综合性能评定的重要指标之一,高效空气过滤器作为尘埃颗粒物进入洁净室的最后一道防线,其自身性能及施工安装质量的优劣直接关系到洁净室能否符合要求。高效空气过滤器现场检漏测试是保证洁净室工程质量的必要措施之一,故即使每台高效空气过滤器在出厂时都经过性能测试,将其安装在洁净室后仍要进行逐台检漏测试。

《洁净室施工及验收规范》(JGJ 71—90)^[1] 附

录六中给出了高效空气过滤器检漏测试的相关条款,指出“检漏时将采样口放在距离被检过滤器表面 2~3 cm 处,以 5~20 mm/s 的速度移动,对被检过滤器整个断面、封头胶和安装框架处进行扫描。”通过大量洁净室综合性能评定检测验收工程发现,过滤器整个滤芯断面及封头胶处采样浓度基本均匀一致,为送风气流浓度,即没有漏点;但当将采样口移动至过滤器边框及其安装框架处等气流死区时,激光粒子计数器测定给出的含尘浓度明显偏高,这可能是送风射流卷吸具有较高含尘浓度的室内空气所致,若据此认定高效空气过

①★ 曹国庆,男,1978 年 12 月生,博士,工程师
100013 北京市北三环东路 30 号中国建筑科学研究院环能院
(010) 64517663
E-mail: cgq2000@126.com
收稿日期:2008-06-12

滤器边框或安装框架处存在泄漏,未必符合实际情况。

本文针对洁净室高效空气过滤器边框及安装框架处的扫描检漏具体操作问题进行了探讨,介绍了 IEST 给出的相关测试方法及部分洁净室施工人员采取的非扫描检漏测试方法,通过理论分析及大量实验研究,给出了既科学合理又方便操作的高效空气过滤器现场检漏测试方法,为制订国标《洁净室及施工验收规范》作参考。

1 理论分析

1.1 弱射流

洁净室高效空气过滤器的现场安装及垂直剖面示意图如图 1 所示,其送风口处一般为 0.5 m/s 左右的低速射流,由于末端过滤器的均流作用使得射流在出风口时成为具有单向流特性的射流,流线彼此平行,出口的湍流特性很小,扩散角度很小,文献[2]将其称为弱射流,其射流示意图如图 2 所示。

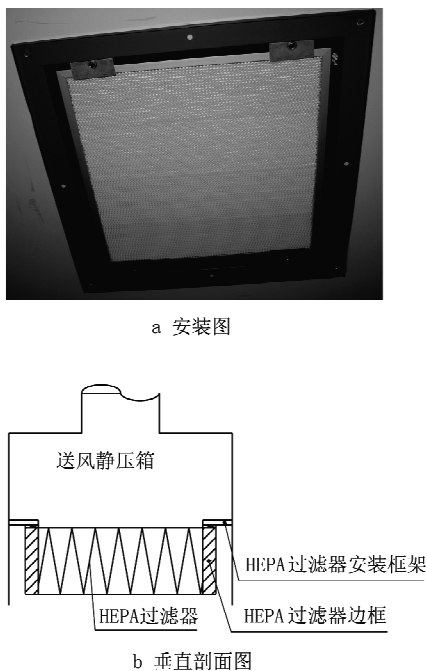


图 1 送风高效空气过滤器现场安装及垂直剖面示意图

由送风射流的流动规律可知,量纲一湍流系数 α 与射流扩散角 θ 及风口形式有关,如式(1)所示。

$$\tan \theta = 3.4\alpha \quad (1)$$

文献[3]给出了不同风口的量纲一湍流系数 α 的经验值,据此可反推出射流扩散角 θ ,由于缺乏

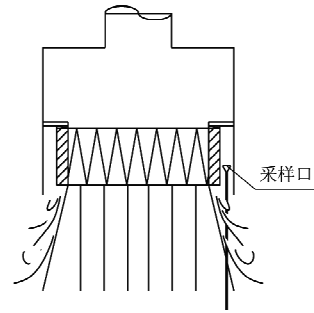


图 2 高效空气过滤器风口送风弱射流示意图

弱射流的湍流系数 α_{HEPA} ,可参阅文献[3]认为 $\alpha_{\text{HEPA}} < 0.066$,即弱射流的湍流系数低于文献[3]给出的最低湍流系数(收缩极好的喷嘴圆射流的湍流系数),则洁净室内高效送风口的射流扩散角 $\theta < 12.6^\circ$,文献[4]同样指出一个高效空气过滤器送风口气流扩散角最大只有十几度。

由图 2 可以看出,当检漏采样口放置在高效空气过滤器边框或安装框架处时,由于弱射流的卷吸作用,会将室内空气卷吸至采样口处,由于室内空气含尘浓度远高于送风含尘浓度,致使采样浓度偏高,若就此判定高效空气过滤器自身或安装存在漏点,并不合理。大量乱流洁净室高效空气过滤器现场检漏测试也证实将采样口移动至高效空气过滤器边框或安装框架处时,采样浓度几乎都偏高。

既然送风射流卷吸作用会引起检漏漏点的误判,则应采取合理措施控制射流卷吸作用的影响,为此 IEST-RP-CC034.2^[5]给出了水平挡板的方法,本文给出了加装竖直围挡的措施。部分洁净室施工方为证实高效空气过滤器不存在漏点,绕开扫描检漏测试,提出了将高效送风口全面封堵仅留一个测试小孔进行尘埃粒子计数采样的方法。

1.2 水平挡板

IEST-RP-CC034.2 给出的在高效空气过滤器送风口下方加装水平挡板的方法如图 3 所示,洁净的送风弱射流撞击到水平挡板后向四周扩散,可以较好地抵制弱射流卷吸室内空气至检漏采样口处。此时若高效空气过滤器自身或安装框架处存在泄漏,则检漏采样浓度高,否则采样浓度基本为送风气流浓度。但该标准并未给出挡板尺寸、与过滤器的距离等参数。

对图 3 进行分析可以看出,当水平挡板距离高效空气过滤器出风段面较近或高效空气过滤器风

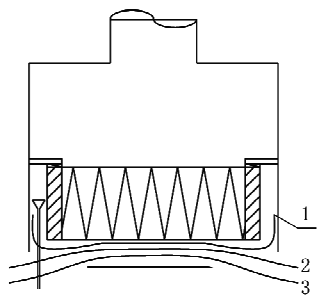


图3 高效空气过滤器风口水平挡板示意图

口送风量较大时,水平挡板引起的水平射流(如流线1~3)风速较大,可能会造成较多的送风气流灌至高效空气过滤器安装框间隙内(如流线1所示),致使检漏采样的空气大部分为洁净的送风气流,当过滤器边框或安装边框自身漏点较小时,有可能引起泄漏点的漏判。

加装水平挡板理论上可以抵制弱射流卷吸室内空气,但在实际工程应用中仍有很多问题不清楚,如水平挡板自身的尺寸及与高效空气过滤器风口出风段面的距离 h 、送风风速等对过滤器边框和安装框架处漏点判断的影响。

1.3 竖直围挡

在高效空气过滤器送风口下方加装一定长度的竖直围挡后如图4所示,弱射流边界和挡板相交后,把过滤器下方气流和环境气流隔开,卷吸的空气不再是具有较高含尘浓度的室内空气,当气流

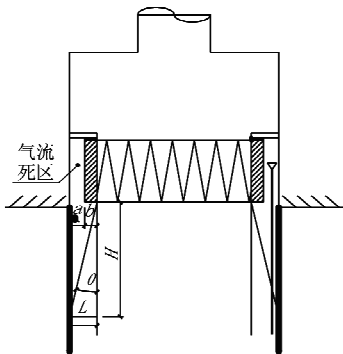


图4 高效空气过滤器风口竖直围挡示意图

死区中气流逐渐被稀释后,此后卷吸的气流将是经过高效空气过滤器过滤后的洁净空气。此时若高效空气过滤器边框或安装框架处存在泄漏,则检漏采样浓度高,否则采样浓度基本为送风气流浓度,即可准确地判断漏点。

由图4可知,要控制弱射流卷吸室内空气作用的影响,则应加设的竖直围挡最小高度用式(2)计

算。

$$H = \frac{L}{\tan \theta} = (a + b) \cot \theta \quad (2)$$

式中 H 为从过滤器底面算起的竖直围挡最小高度,mm; L 为高效空气过滤器滤芯边缘距送风静压箱相邻边壁的水平距离,mm; a 为高效空气过滤器边壁与送风静压箱相邻边壁的水平距离,一般为20~40 mm; b 为高效空气过滤器边框宽度,一般为15~20 mm; θ 为高效空气过滤器弱射流扩散角,一般不大于 10° 。

在洁净室工程中,竖直围挡的最小高度一般为 $(40 \text{ mm} + 20 \text{ mm}) \cot 100^\circ = 340 \text{ mm}$,若考虑一定的安全因素,建议竖直围挡高度不小于400 mm。

1.4 封堵高效送风口至仅留测试孔

洁净室高效空气过滤器现场检漏测试一般均采用“扫描”检漏的方法,但部分洁净室施工方为验证高效空气过滤器是否存在漏点,绕开“扫描”检漏测试,提出了将高效送风口全面封堵仅留一个测试小孔进行采样的方法,认为只要测试小孔的采样粒子数非零,即证明存在漏点,否则即无漏点。具体操作方法为将高效送风口的扩散孔板用透明胶或其他遮挡物全部封堵,仅留一测试小孔,如图5所示。

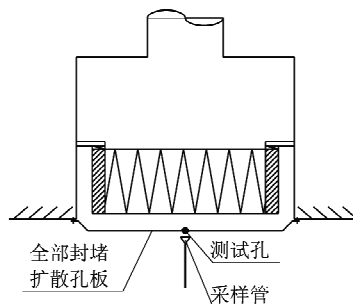


图5 封堵高效送风口至仅留测试孔检漏方法示意图

由流体力学可知,阻力与风量的关系如式(3)^[6]所示。

$$\Delta p = SQ^2 \quad (3)$$

式中 Δp 为高效空气过滤器进出风两侧的静压差,Pa; S 为阻抗, kg/m^7 ; Q 为风量, m^3/s 。

因漏点两端的压差等于过滤器进出风两侧的压差,则可得非洁净空气比如式(4)所示。

$$\beta = \frac{Q_{\text{Leak}}}{Q_{\text{HEPA}}} = \sqrt{\frac{S_{\text{HEPA}}}{S_{\text{Leak}}}} \quad (4)$$

式中 β 为非洁净空气比; Q_{Leak} 为通过漏点泄漏的

非洁净空气量; Q_{HEPA} 为通过高效空气过滤器的洁净空气量; S_{Leak} 为漏点的阻抗; S_{HEPA} 为高效空气过滤器的阻抗。

在封堵高效送风口的过程中,由于高效空气过滤器及漏点的阻抗不变,由式(4)可知非洁净空气比 β 不变。

封堵高效送风口至仅留测试孔后,送风静压箱区域内的静压与高效空气过滤器出风断面至扩散孔板间区域的静压都将升高,且升高后两者近似相等,通过测试孔送出的送风量锐减,通过漏点漏出的非洁净空气量也相应锐减,但非洁净空气比 β 不变,故此种测试方法的主要问题在于漏出的非洁净空气将被严重稀释,采样浓度接近高效送风气流浓度,很容易引起漏点的漏判。

2 实验研究

高效空气过滤器现场检漏测试按照测试仪器不同,可分为光度计法和光散射粒子计数器法;按照测试所用气溶胶的不同,可分为大气尘法和DOP法。本文用大气尘光散射粒子计数器法进行分析,所得结果同样适用于其他方法。

2.1 竖直围挡实验研究

某洁净室的送风静压箱断面尺寸为 $530\text{ mm}\times 530\text{ mm}$,高效空气过滤器尺寸为 $484\text{ mm}\times 484\text{ mm}\times 220\text{ mm}$,边框尺寸 b 为 18 mm , a 为 23 mm ,设定送风射流扩散角 θ 为 10° ,由式(2)可知所需竖直围挡最小高度约为 233 mm 。实验条件为:室内洁净度级别为30万级,高效空气过滤器送风风速约为 0.5 m/s ,送风含尘浓度(粒径 $\geq 0.5\text{ }\mu\text{m}$)为 0 粒/L ,激光粒子计数器采样流量为 2.83 L/min 。

对该高效空气过滤器边框及安装框架处进行加装竖直围挡壁的检漏实验研究,实验实物图如图6b所示,加装的竖直围挡壁起始高度为 400 mm ,在不卸下围挡壁的情况下直接用刀具依次切削掉 100 mm 高度的围挡,所得实验结果如表1所示。高效空气过滤器加装竖直围挡的起始高度为 400 mm ,采样浓度达到稳定的 0 粒/L 约需 5 min ,高效空气过滤器与送风静压箱安装边框处的间隙容量约为 $(530\text{ mm}\times 530\text{ mm}-484\text{ mm}\times 484\text{ mm})\times 220\text{ mm}=10\,261\,680\text{ mm}^3=10.26\text{ L}$,起始状态充满了非洁净空气,则由激光粒子计数器采样等量空气,约需 $10.26\text{ L}\div 2.83\text{ L/min}=3.6\text{ min}$,理论计算所需时间与实际实验所需时间基本

相符。



a 水平挡板

b 竖直围挡

图6 高效空气过滤器风口水平挡板与竖直围挡实验效果对比分析示意图

表1 高效空气过滤器边框及安装框架处检漏采样浓度 粒/L

	竖直围挡高度/mm				
	400	300	200	100	0
粒径 $\geq 0.5\text{ }\mu\text{m}$	0	757.0	1 450.3	3 956.4	4 774.8
$\geq 5.0\text{ }\mu\text{m}$	0	3.0	5.5	4.5	6.4

对表1进行分析可知:

1) 当竖直围挡高度为 400 mm 时,采样浓度为 0 粒/L ,说明此高效空气过滤器边框及安装框架处无泄漏,过滤器安装符合要求。

2) 随着竖直围挡高度的降低,采样浓度逐渐增大,表明弱射流卷吸室内空气作用随竖直围挡高度的降低而逐渐增强。

3) 竖直围挡最小高度约为 $300\sim 400\text{ mm}$,则由式(2)可反推出实际弱射流扩散角度范围约为 $5.9^\circ\sim 7.8^\circ$ 。

2.2 水平挡板实验研究

实验条件与竖直围挡实验相同,加装水平挡板后,高效空气过滤器边框及安装框架处检漏采样浓度基本均为 0 粒/L ,即使将水平挡板的尺寸减小至过滤器断面尺寸的一半,如图6a所示,采样浓度仍为 0 粒/L 。由于实验所用的高效空气过滤器边框及安装框架处已被证实不存在漏点,故此水平挡板所得结论与竖直围挡实验所得结论一致,即高效空气过滤器边框及安装框架处均不存在漏点。

为了对比分析水平挡板与竖直围挡两者之间的差异,笔者进行了如图6所示的实验研究,即通过塑料管向高效空气过滤器的一端安装框架间隙内送入含尘浓度较高的空气,并通过流量调节阀

调节含尘空气的流量,再对高效空气过滤器边框及安装框架处进行检漏。大量实验结果表明:

1) 当在高效空气过滤器的安装框架间隙内某处送入同样较小流量的非洁净空气时,加装水平挡板的检漏方式在安装框架间隙内各处采样浓度均为 0 粒/L,即检测不到漏点,说明此时水平挡板检漏方式引起了漏点的漏判;而加装竖直围挡的检漏方式在尘源附近区域采样浓度为非零(图 6 实验送入的非洁净空气具有一定的送风速度,会在高效空气过滤器安装框架间隙内碰壁反弹扩散,故非零的采样浓度存在于尘源附近区域且离漏点越近采样浓度越大,实际漏点泄漏出的气流同样具有一定速度,模型实验符合实际工况),表明加装竖直围挡的扫描检漏方式比加装水平挡板的扫描检漏方式更安全可靠。

2) 当在高效空气过滤器的安装框架间隙内某处送入非洁净空气时,加装水平挡板的检漏方式在安装框架间隙内的扫描检漏采样浓度,随送风量的增大而降低,随水平挡板尺寸(即遮盖高效空气过滤器的有效送风面积)的增大而显著降低,随水平挡板距离高效空气过滤器出风断面距离的减小而降低;而加装竖直围挡的检漏方式采样浓度随送风量的增大而基本不变,在实际的洁净室高效空气过滤器现场检漏测试中,若存在漏点,则加装竖直围挡的检漏方式采样浓度将略有增加。这是由于送风量增大后,送风静压箱内的静压增大,由式(3)可知通过漏点泄漏出来的非洁净空气量增大的缘故。可以看出,由于水平挡板方式下的采样浓度受诸多因素影响,安装尺寸不易确定,在实际应用中不利于有效便捷的操作。

2.3 封堵高效送风口方法

实验条件与竖直围挡实验相同,封堵高效送风口至仅留测试孔后,高效空气过滤器边框及安装框架处检漏采样浓度均为 0 粒/L。同样进行了类似图 6 所示的实验研究,即通过塑料管向高效空气过滤器的一端安装框架间隙内送入含尘浓度较高的空气,并通过流量调节阀调节送入含尘空气的流量,再对高效空气过滤器边框及安装框架处进行检漏。大量实验结果表明:当在高效空气过滤器的安装框架间隙内某处送入含尘浓度较高的空气时,只有紧靠尘源才能检测到漏点,而当离开尘源时只有送入大量的非洁净空气时(即增大非

洁净空气比)才能检测到漏点。显然此种洁净室高效空气过滤器现场检漏方法是不可行的。

3 结论

3.1 洁净室高效空气过滤器现场检漏测试,宜沿送风静压箱外边框加设竖直围挡以降低弱射流卷吸室内空气造成的影响,竖直围挡壁高度 H 与高效空气过滤器送风射流扩散角 θ 、高效空气过滤器滤芯边缘距送风静压箱相邻边壁的水平距离 L 有关,为 $L \cot \theta$,建议 H 不小于 400 mm。

3.2 对于洁净室内单个安装的高效空气过滤器,宜对过滤器四周加设竖直挡板构成围挡以隔绝外部气流的干扰;对于洁净室内满布安装的高效空气过滤器,宜对最外侧过滤器的外侧边框加装竖直挡板,最外侧过滤器的内侧边框及内部过滤器边框因卷吸气流为洁净送风气流可不加竖直挡板。

3.3 洁净室高效空气过滤器送风加设竖直围挡后,可考虑将洁净空气送至高效空气过滤器安装框架间隙内排挤其中残留的非洁净空气,缩短采样时间。若不具备输送洁净空气的条件,可依靠激光粒子计数器采样,抽吸残留安装框架间隙内的非洁净空气一定时间,待采样浓度稳定后再进行检漏测试。

3.4 IEST-RP-CC034.2 给出的在送风高效空气过滤器下方加装水平挡板的检漏测试方法,在实际应用中仍有很多问题值得研究,且可能引起漏点的漏判,因此还不太适合实际使用。

3.5 洁净室高效空气过滤器现场检漏测试,应拆去高效空气过滤器外的孔板或装饰层,进行扫描检漏测试,类似封堵高效送风口至仅留测试孔的检漏测试方法是不可取的。

参考文献:

- [1] 中国建筑科学研究院. JGJ 71—90 洁净室施工及验收规范 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,1990
- [2] 刘华. 洁净空间影响局部百级工作区速度场因素的研究[D]. 北京:中国建筑科学研究院,2000
- [3] 赵荣义,范存养,薛殿华,等. 空气调节[M]. 3 版. 北京:中国建筑工业出版社,2005:151—152
- [4] 许钟麟. 空气净化技术原理 [M]. 3 版. 北京:科学出版社,2003:249—250
- [5] Institute of Environmental Sciences and Technology. IEST-RP-CC034.2 HEPA and ULPA filter leak tests [S]. Rolling Meadows: IEST, 2005
- [6] 蔡增基,龙天渝. 流体力学泵与风机[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2003:140—145