

地铁车站公共区用空气净化分散设备技术研究及示范

北京市地铁运营技术研发公司
北京星通浩宇科技发展有限公司 王昊 杨谦 王国忱

1. 引言

随着城市发展和人口增长,城市地铁不断新建和扩建,不可否认,地铁给我们带来了无与伦比的便捷,但是由于复杂的多种因素所致,地铁空气污染也是非常严重。相对于地铁外来说,地铁内部是一个相对封闭的空间,地铁车站与外界的空气交换只能通过机械通风和空调系统。当早晚高峰人口密度增大,出现人挨人的情况时,空气流通行会变得非常差,让人无法忍受。地铁内高度密集的人群会释放出大量异味和二氧化碳,并产生各种微生物细菌,加上通风不良、光不足,细菌等生物污染物在地铁这一特定的环境下会长久存活并进行传播。为了解决地铁的空气质量问题,就要使用空气净化设备。

如今地铁车站都已在空调系统内安装了集中式的空气净化设备,所用的净化设备多为高压静电集尘设备和过滤网式净化设备。现有的集中式空气净化设备所处理的污染物主要针对固态污染物和可吸入颗粒物。对于气态污染物和悬浮微生物还有没安装相应的净化设备。本文所介绍的地铁车站公共区用空气净化分散设备是针对于地铁的复杂环境而研发的,安装在地铁站台候车区域,它对于可吸入颗粒物、TVOC、悬浮有害微生物均有净化能力。

2. 地铁内空气污染及处理现状

2.1 地铁内空气污染现状

地铁再运行中车轮与铁轨的摩擦会产生大量含铁屑的颗粒物^[1],同时空气中还悬浮着许多粉尘微粒,包括灰尘、烟尘,人与动物毛发、皮屑等。这些污染物均为可吸入颗粒物,通过呼吸道进入人体后会对人们的身体健康造成极大的威胁。

地铁内的建筑材料和装修材料也会不同程度的释放出三氯甲烷、三氯乙烯、氯仿、甲醛、苯、甲苯、二甲苯等挥发性有机化合物,这些物质有致癌、致畸、致突变性,易被皮肤、粘膜等吸收,干扰人体内的分泌系统,具有遗传毒性,严重威胁着人们的身体健康。

密集的人群,相对封闭的空间,人们一举一动间,每分钟可产生 500 万个细小颗粒,如掉落的皮屑、打喷嚏的飞沫等,这些因素都极利于有害微生物的繁殖^[2],它们通过特异性机制、传染过程和直接毒害途径等导致人类疾病,对人们的生产、生活产生危害和影响。

2.2 地铁内空气治理的现状

在北京地铁 6 号线、10 号线二期、9 号线工程中采用了静电净化除尘设备,与既有线未加装该设备的车站相比,改善了车站的空气品质,为地铁乘客提供了相对健康的乘车环境。

平板式静电净化设备是利用平板电丝形成强静电场^[3],第一阶段使微尘在高能离子电场作用下电离(工作电压大于 8 kV),第二阶段是带电粒子被吸附在静电集尘板上(工作电压大

于 4 KV)。



图 2.1.1

蜂巢式空气净化设备采用蜂巢结构，在每个蜂巢单元中间采用针状棒针尖进行放电；其放电均匀，电压强度高，集尘效率较高，可以彻底杀死病菌，达到高效除尘、灭菌的功效。

长沙地铁在全国范围内率先正式提出“绿色地铁”概念，长沙市轨道交通集团在 2 号线全线 19 个站点，共引进近 300 台大型远大空气净化机，现已全部安装到位，使每天上 10 万搭乘地铁出行的市民享受纯净呼吸。工作人员介绍，该净化机吸附微尘、消除甲醛和杀菌的功能。



图 2.1.2

2.3 地铁空气治理现状的缺点和不足

长沙地铁内作用的高压静电设备，是利用 4000-8000V 高压静电，使有害物质在强电场发生电离，产生自由基，使微生物失活，杀死细菌。此方式杀菌效率可靠，若在地铁站台内使用，却存在以下问题：空气中的悬浮颗粒物过多或者高压电场内有灰尘积累，会产生放电现象，并伴随声响，可能会导致乘客的恐慌，并且对于设备的安全系数要求较高，分散式净化器分布在

地铁站台内，大量乘客会从旁经过，难免会与净化器有接触，安全问题不容忽视；另外高压电场在放电的同时会产生臭氧，后续如不对臭氧进行处理，经净化器排出，会对乘客产生危害，如是增加臭氧处理模块，则会增加成本。

目前大多数地铁在通风系统内都已装有集中式的空气净化设备，净化形式有静电集尘式、传统过滤网式。但是在站台和工作间区域普遍没有安装分散式净化设备。这些公共区域在乘客数量多时空气污染会急剧加重，仅有安装在通风系统内的集中式净化设备的话，在净化效果与效率上会明显功力不足。

这种情况下，将分散式净化设备和集中式净化设备结合起来会更有效的解决空气净化问题。所以我们公司针对地铁空气环境和工作模式来研发地铁专用分散式空气净化设备。

3. 分散式空气净化设备

3.1 设备整体结构设计

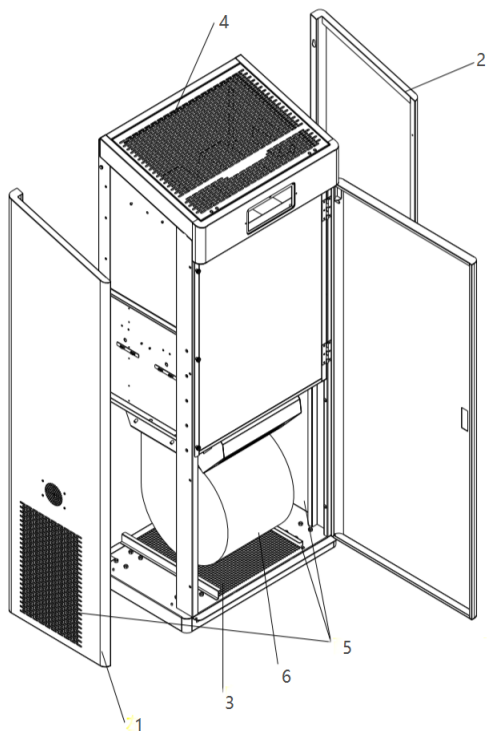


图 2.1.1

- 1、左侧进风口
- 2、右侧进风口
- 3、底部进风口
- 4、顶部斜向出风口
- 5、初效过滤网
- 6、风机

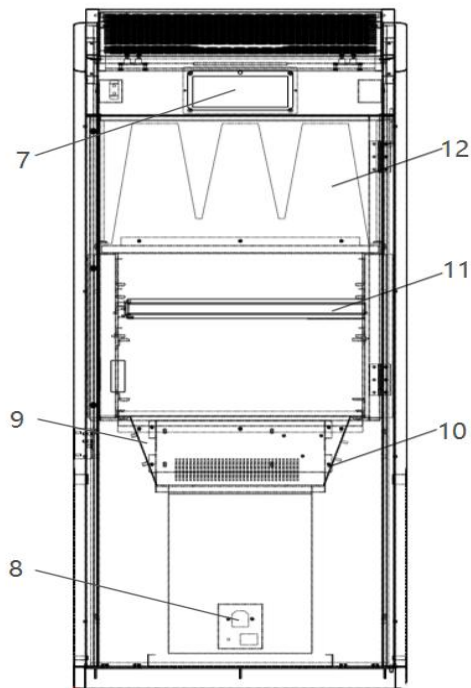


图 2.1.2

- 7、显示面板
- 8、背部电源接口和保险二极管
- 9、导风圈
- 10、控制板
- 11、复合型杀菌净化滤芯
- 12、W 型 3 隔 6 面滤网

由于地铁内空气中的悬浮有害位置密度较大，多处在低处空间内，所以我们将净化设备的进风口设在了机体的下部，同时分成三块进风口，减少进风口局部阻力，降低风噪。污染空气通过初效滤网从进风口进入在风机带动下通过导风圈到达过滤段，首先经过复合型杀菌净化滤网，然后再经过 W 型高效滤网进一步过滤小颗粒污染物，最后通过匀风网，将干净的空气排除。设备的出风口设在顶部，且为斜向上方向，避免直吹人群，保障乘客舒适度。

3.2 复合型杀菌净化滤芯结构设计

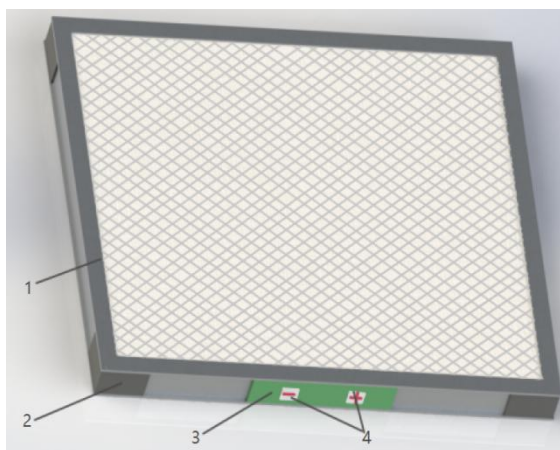


图 2.2.1

- 1、铝合金型材边框

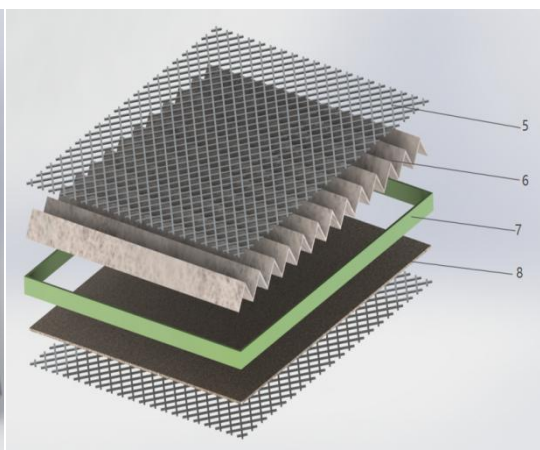


图 2.2.2

- 5、金属保护网

- 2、工程塑料包角
- 3、玻纤板
- 4、供电触点

- 6、改性碳纤维高分子滤网
- 7、紫外 LED 发光模块
- 8、光触媒涂层镍网

该复合型杀菌滤芯集成了杀菌、过滤、净化 TVOC 等多种功能，设计寿命为 18 个月；两面均有金属网保护，避免使用和运输途中损坏内部组成；改性碳纤维高分子滤网中集成了改性陶瓷光谱材料，通过内部的紫外光模块照射高分子滤网和光触媒涂层镍网，实现对空气的净化。

3.3 净化技术介绍

(1) 深紫外杀菌技术

深紫外线（250-280nm）的杀菌原理与浅紫外线(320-400nm)杀菌原理不同，浅紫外线是通过破坏细菌的蛋白质使其死亡，深紫外破坏细菌和病毒的遗传物质；相同的照射剂量下，深紫外线的杀菌能力超过浅紫外几千倍。

深紫外 LED 比紫外灯管杀菌效果更好，且比高压静电杀菌更安全，它没有任何副作物产生，无二次污染。它可以杀灭各种微生物，包括细菌繁殖体、芽孢、分支杆菌、病毒、真菌、立克次体和支原体等。适合空气，水和物体表面消毒。

(2) 浅紫外-光触媒净化技术

光触媒基体具有多级花状结构，不但可吸附室内空气有机挥发性污染物，亦可作为光催化剂 TiO₂ 的良好载体。将光催化技术与吸附技术相结合，二元协同作用净化室内空气污染物，将形成一种新型联用净化技术，对于改善室内空气品质具有重要意义^[4]。

此净化技术将有机污染物吸附到催化剂的表面，在浅紫外光的照射下进而发挥其光降解作用将有毒污染物降解。

(3) 硅铝酸盐陶瓷改性光谱材料

硅铝酸盐陶瓷改性光谱材料，它以宽波段电磁波作为能量，可将空气中水分子电解产生负氧离子、超氧自由基、羟基自由基；同时可将异味分子，醛类、多环芳烃等有机物氧化分解，使之成为无害的二氧化碳和水分子。紫外光为其提供电磁波能量，使其净化空气中有害物质。

硅铝酸盐陶瓷改性光谱材料处理空间污染的作用是永久性的，自身不老化，不分解。这是此类材料材料在空气净化器中的创新应用。

4. 实验与数据

4.1 地铁站内空气净化效果测试及数据

测试方法：

在北京 15 号线大屯路东站地铁站台内东侧安装空气净化设备，分别对站台中部位置和距净化设备出风口 0.5 米处进行空气质量检测，从早 7 点到晚 7 点每隔半小时进行空气质量数据记录。

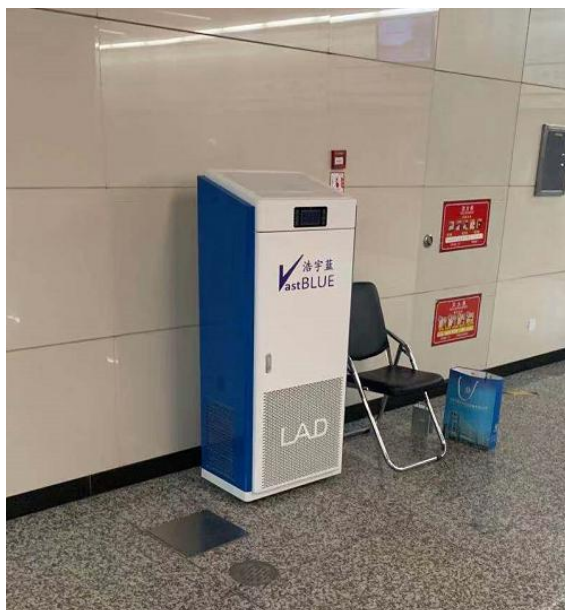


图 4.1.1 空气净化设备在地铁站台安装

（注：由于地铁站台内空间很大，单台净化设备的净化范围有限，所以我们对设备出风口附近进行检测和数据采集）

数据图表：

- (1) 我们进行了为期一周的测试，在这里取两组具有代表性的数据做成折线图，两组数据分别代表空气质量较好和较差的情况。
- (2) 数据中包括了 PM2.5 和 PM10 两项，由于地铁站内空气中甲醛含量稳定在 $0\sim0.02$ 之间，远远小于国家标准，所以未加入数据中。



图 4.1.2 空气质量较好情况下净化效果折线图

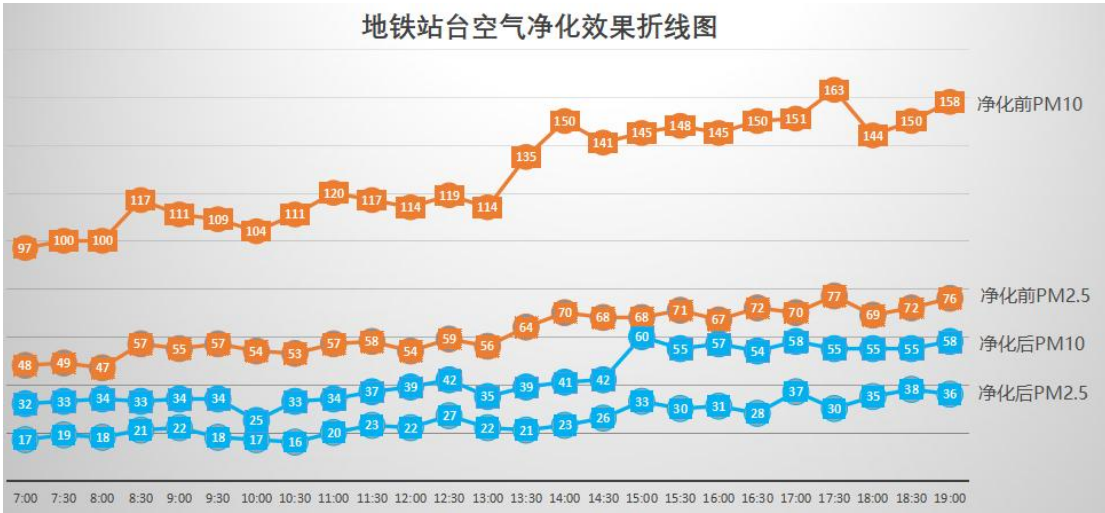


图 4.1.3 空气质量较差情况下净化效果折线图

4.2 颗粒物净化性能检测实验

实验方法:

- (1) 将待测样机放置入测试仓内并接通电源, 检验运转正常, 然后关闭样机。
- (2) 开启背景浓度与环境温湿度控制系统, 控制背景浓度 $0.3\mu\text{m}$ 以上颗粒物浓度小于 1×10^3 个/L, 舱内温湿度达到试验规定状态。
- (3) 点燃试验用标准香烟并放置到发生管内, 当初始浓度控制在 $(5.0\pm 1.0)\text{mg}/\text{m}^3$ 范围内, 停止发生香烟烟雾。混合吊扇继续搅拌 2 min, 以均匀混合测试舱内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度。
- (4) 关闭混合风扇 3 min 后, 测定 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度。
- (5) 开启待检验的样机, 连续净化 180 min 后, 测定舱内 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度。
- (6) 按照步骤 (1~5), 不开启样机, 测试自然衰减。

参照标准: APIAC/LM 01-2015

数据表格:

颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 去除率检测数据							
检测项目	作用时间 (min)	对照组			试验组		去除率 K_t (%)
		初始浓度 C_0 (mg/m ³)	终浓度 C_t (mg/m ³)	自然衰减率 N_t (%)	初始浓度 C_0 (mg/m ³)	终浓度 C_t (mg/m ³)	
$\text{PM}_{2.5}$	180	5.65	4.10	27.43	5.47	<0.001	>99.97

表 4.2 颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 去除率检测数据表格

4.3 空气杀菌性能检测实验

实验方法:

在空间 30m^3 的实验柜内, 即在实验室实验的条件下, 启动送检设备作用 1h 后, 用液体撞击式微生物气溶胶采样器以 $11\text{L}/\text{min}$ 的流量进行采样。采样液的体积为 20ml , 实验组与对照组的采样时间均为 2min。杀灭率实验结果已消除微生物在空气中自然消亡因素的影响。

参照标准:

GB 21551.3-2010 家用和类似用途电器的抗菌、除菌、净化功能 空气净化器的特殊要求

数据表格:

空气净化器除菌功能评价（模拟现场）检测数据								
试验菌种	作用时间 (min)	试验编号	对照组			试验组		除菌率 K_t (%)
			试验前菌落数 V_0 (cfu/m ³)	试验后菌落数 V_t (cfu/m ³)	自然消亡率 N_t (%)	试验前菌落数 V_1 (cfu/m ³)	试验后菌落数 V_2 (cfu/m ³)	
白色葡萄球菌	60	1	1.23×10 ⁵	9.61×10 ⁴	21.87	1.17×10 ⁵	18	99.98
		2	1.11×10 ⁵	8.97×10 ⁴	19.19	1.04×10 ⁵	41	99.95
		3	9.83×10 ⁴	7.43×10 ⁴	24.42	1.07×10 ⁵	47	99.94
		均值						99.96
金黄色葡萄球菌	60	1	1.08×10 ⁵	8.38×10 ⁴	22.41	1.14×10 ⁵	24	99.97
		2	1.22×10 ⁵	8.97×10 ⁴	26.48	1.18×10 ⁵	53	99.94
		3	9.43×10 ⁴	7.30×10 ⁴	21.84	1.01×10 ⁵	47	99.94
		均值						99.95
大肠杆菌	60	1	1.00×10 ⁵	7.67×10 ⁴	23.30	1.09×10 ⁵	18	99.98
		2	8.61×10 ⁴	6.32×10 ⁴	26.60	9.35×10 ⁴	6	99.99
		3	1.10×10 ⁵	8.34×10 ⁴	24.18	1.18×10 ⁵	18	99.98
		均值						99.98
黑曲霉菌	60	1	1.16×10 ⁵	7.91×10 ⁴	31.81	9.30×10 ⁴	59	99.91
		2	1.28×10 ⁵	8.38×10 ⁴	34.53	1.08×10 ⁵	71	99.90
		3	1.06×10 ⁵	7.19×10 ⁴	32.17	1.17×10 ⁵	53	99.93
		均值						99.91

表 4.3 除菌实验数据表格

4.4 气态污染物净化性能检测实验

实验方法：

- (1) 将待检验的样机按标准要求放置于试验舱内。把样机调节到试验的工作状态，检验运转正常，然后关闭样机。
- (2) 开启高效空气过滤器，净化舱内空气，同时启动温湿度控制装置，使舱内温湿度达到试验规定状态。
- (3) 待舱内颗粒物背景浓度降低到合适水平，记录背景浓度值。关闭高效空气过滤器和温湿度装置。
- (4) 用气体污染物发生装置将气体污染物添加到试验舱内，直至达到相应标准中规定的浓度的（10±2）倍，关闭发生器。风扇搅拌 10 min，使舱内气态污染物混合均匀后关闭风扇。
- (5) 待风扇停止转动后，测定气态污染物的初始浓度，记为 C0。
- (6) 待初始浓度测定后，开启待检验的样机，开始试验。作用 60 min 后，采集试验终浓度样品，记为 Ct。
- (7) 按照步骤（1~6），不开启样机，测试自然衰减。

参照标准：

- (1) GB/T 18204.2-2014 公共场所卫生检测方法第 2 部分：化学污染物 酚试剂分光光度法
- (2) HJ 583-2010 环境空气 苯系物的测定 固体吸附/热脱附-气相色谱法

数据表格：

气态污染物去除率检测数据								
检测项目	作用时间 (min)	对照组			试验组			去除率 K_t (%)
		初始浓度 C_0 (mg/m ³)	终浓度 C_t (mg/m ³)	自然衰减率 N_t (%)	初始浓度 C_0 (mg/m ³)	终浓度 C_t (mg/m ³)	总衰减率 N_t (%)	
甲醛	60	1.01	0.96	5.0	1.16	0.12	89.7	89.1
苯	60	1.11	1.07	3.6	1.01	0.19	81.2	80.5

表 4.4 气态污染物去除实验数据表格

4.5 数据分析

在地铁站内我们对空气净化设备进行了颗粒物净化效果的测试，测试周期为一周，在这一周获取的数据中，我们选择了两组具有代表性数据在文中做了对比，通过折线图我们可以直观的看到在实际的地铁环境内空气在净化前和净化后的差距，净化效果显著，净化后的空气质量等级均为优。

对于细菌、病毒和气态污染物的净化效果测试，由于实验环境较为特殊，所以我们采用了在广州中科检测技术服务有限公司内部做的专业检测的数据。通过表 4.2 可以看到白色葡萄球菌、金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、黑曲霉菌等细菌的杀灭率均达到了 99.9%以上。通过表 4.3 可以看到甲醛、苯这两种气态污染物的去除率 89%和 80%。这两项检测实验和数据计算均是按照国家标准进行的，净化效果属于高效级别。

5. 总结

本文介绍了一种针对于地铁环境研发的新型空气净化分散式设备，该设备在地铁内实地安装并进行了净化效果测试，取得了良好的成绩，有力的证明了该设备高效的净化能力。该设备也通过了第三方专业机构的各项净化性能的检测，在各净化指标上均属于高效级别。此设备符合地铁对于空气净化的标准，适用于地铁这一特殊环境，在未来地铁空气净化中的利用前景广阔。

参考文献:

[1] 聂静,张金良. 地铁族小心特殊污染[N]. 健康报,2008-11-11 (008)
[2] 林民政. 室内空气污染治理研究进展[1]. 海峡科学, 2014 (7) :46-48.
[3] 王灵甫,马书毫. 浅谈静电除尘原理[J]. 城市轨道交通研究, 2012 (5) :22-25
[4] 白月华. 室内空气中挥发有机污染物治理对策[J]. 环境科学与技术,2011,34 (6G) :334-339