

文章编号:1673-2049(2013)01-0122-05

## 地下工程静电除氡原理与试验

耿世彬<sup>1</sup>, 亓伟<sup>2</sup>, 欧阳特辉<sup>3</sup>, 刘秋林<sup>3</sup>, 肖畅<sup>4</sup>

(1. 中国人民解放军理工大学 国防工程学院, 江苏 南京 210007; 2. 中国人民解放军 92941 部队 96 分队, 辽宁 葫芦岛 125001; 3. 广州军区工程科研设计所, 广东 广州 510516;  
4. 中国人民解放军南京陆军指挥学院 研究生大队, 江苏 南京 210045)

**摘要:**为了解决目前地下工程内部氡污染严重的问题,减少氡污染对地下工程内部工作人员健康的威胁,在综合比较和总结目前各国降氡技术的基础上,针对氡子体的存在形态及其特征,进行了静电除氡技术的可行性分析;研究了静电除尘的机理,对双区静电除氡技术进行了设计和研究,利用静电除尘的方式将结合态氡子体吸附去除;研制了双区静电型除氡装置,并结合工程实际做了相关的试验测试。结果表明:该装置具有高效的净化除氡功能,开机 4 h 后的除氡率在 90% 以上。

**关键词:**地下工程;静电除氡;单区静电场;双区静电场;氡污染

中图分类号:TU943.3

文献标志码:A

## Principle and Experiment of Electrostatic Radon Elimination in Underground Engineering

GENG Shi-bin<sup>1</sup>, QI Wei<sup>2</sup>, OUYANG Te-hui<sup>3</sup>, LIU Qiu-lin<sup>3</sup>, XIAO Chang<sup>4</sup>

(1. School of National Defense Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, Jiangsu, China; 2. 96 Unit, 92941 Military of PLA, Huludao 125001, Liaoning, China; 3. Institute of Engineering Scientific Research and Designing of Guangzhou Military Region, Guangzhou 510516, Guangdong, China; 4. Battalion of Postgraduate, Nanjing Army Command College of PLA, Nanjing 210045, Jiangsu, China)

**Abstract:** In order to solve the serious radon pollution problems in underground engineering at present and reduce the threat to internal staff's health, comprehensive comparison and summary of radon reduction technology at home and abroad were given. In view of the existing form and feature of radon daughters, the feasibility analysis of electrostatic radon elimination technology was carried out. The mechanism of the electrostatic dust removal was studied, and dual-zone electrostatic radon elimination technology was designed and researched. The way of electrostatic dust removal was used to remove bound radon daughters. The dual-zone electrostatic radon elimination device was developed, and the related experiments were done in actual projects. The results show that it has high radon purification efficiency up to 90% after four hours' running.

**Key words:** underground engineering; electrostatic radon elimination; single-zone electrostatic field; dual-zone electrostatic field; radon pollution

## 0 引言

氡是一种无色无味的放射性气体,氡原子能自

发地衰变成氡子体,在整个衰变过程中,会产生一系列新的放射性核素,并释放出 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 射线,这些氡子体一旦被人体吸入,会对人造成体内辐射伤害。

天然放射性氡气的主要成分是 $^{222}\text{Rn}$ ,它来源于铀系的天然放射性衰变系列,大地氡的释放约占全部氡气的 77.7%。地下工程处于地下土壤、岩层包围之中,特别是通风状况不良时氡容易聚集。氡及氡子体广泛存在于地下工程内部,由于地质构造的不同,造成地下工程内部氡浓度(活度浓度,下同)不尽相同,由目前相关测试得知,绝大多数地下工程内部氡浓度超过  $400\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (已建)的限值<sup>[1]</sup>。在相同地质条件下,地下工程内部的氡浓度比地面建筑高出约 1 或 2 个量级,这将严重影响地下工程内部人员的健康。

空气净化技术是采用过滤器从空气中去除氡子体,这是最早提出和最容易实现的方案,但长期以来受到争议,其焦点是空气中的氡子体以结合态与未结合态 2 种形式存在,过滤器收集的是气溶胶和结合到气溶胶上的氡子体,但气溶胶浓度降低将导致未结合态氡子体浓度增高。1990 年美国 EPA 颁布的《住宅空气净化器》中指出:采用空气净化方法在减少氡引起的危险度的有效性方面未得到证实,同时也指出根据现有资料不能中断空气净化器的使用。欧盟 1995 年出版的《室内空气质量对人的影响:室内氡》中基本接受了美国 EPA 的观点,但认为对于主要来源于建筑材料的氡可能会有效果<sup>[2]</sup>。

1992 年 Li 和 Hopke 首先研究使用空气过滤系统对室内普通粒子源的影响。Strei<sup>[3]</sup>采用自动半连续式活性加权粒度分布测量系统,测量包括氡浓度、凝结核计数、氡衰变产物的活度加权粒度分布,认为空气净化作为一种手段可减少独立结构房屋氡子体所带来的风险。Steck<sup>[4]</sup>认为,这些微粒应该包括结合态氡子体和未结合态氡子体,所以空气净化器能够降低氡的衰变产物和总剂量。德国、日本在 20 世纪 90 年代开始氡气溶胶微粒方面的研究,随着测量技术的发展,一些可携带的结合态氡子体、未结合态氡子体连续测量装置被开发出来,并用于氡暴露量和剂量的测量。日本对市场销售的空气净化器进行了测试,结果显示,气溶胶过滤率为  $2\text{ h}^{-1}$  的氡含量(体积分数)可减少 30%~50%。美国 EPA 2000 中提出了高效率微粒空气过滤器与活性炭过滤器结合的空气净化器,对于降低室内氡的水平是一个切实可行的方法。加拿大采样极化玻璃纤维膜观测到潜能浓度(PAEC)和气溶胶浓度明显下降,认为该项技术具有工业应用的潜力,但还未进行实际应用研究。

目前,采用空气净化方法来降低氡浓度的研究

较为常见,因地下环境的复杂性,可能存在净化效率不高、净化材料使用寿命短等问题,因此有必要研究高效、节能、使用寿命长的除氡技术和装置,这对已经建成的、人员活动频繁的地下工程具有重要意义。

## 1 静电除氡技术原理

### 1.1 氡子体的存在形态及特征

氡在常温下是气体,而氡的衰变产物氡子体的存在形态是固体,为纳米级的粒子。在地下工程内部空间中,氡子体一方面可以通过重力作用、惯性力的撞击作用以及布朗扩散作用等物理过程在墙壁、地面和设备表面沉积;另一方面,一部分氡子体会在很短的时间内( $1\sim 100\text{ s}$ )吸附在内部空间的气溶胶粒子表面形成结合态氡子体,这些结合态氡子体可能会沉积在各种物体的表面或继续衰变,进一步产生新的未结合态氡子体。地下工程内部环境空气中结合态和未结合态这 2 种氡子体的存在,给消除氡子体带来一定困难。

氡子体粒径分布呈双峰分布,其未结合态氡子体粒径范围为  $0.5\sim 5\text{ nm}$ ,平均粒径为  $1\text{ nm}$ 。结合态氡子体粒径范围为  $10\sim 1\,000\text{ nm}$ ,平均粒径为  $100\text{ nm}$ 。但实际中由于气溶胶的来源和成分不同,结合态氡子体的粒径有很大差异。

氡的运移受很多因素影响,如氡气对流、渗透、重力固体潮作用、地下水搬运、地应力作用、大气压纵深效应、其他气体流动的带动、地下微气泡携带等,但氡运移的内在机制主要是扩散和团簇运移<sup>[5]</sup>。乐仁昌等<sup>[6]</sup>对氡及氡子体水平扩散系数进行了测量研究,结果表明:氡及氡子体的水平扩散系数与温度的相关系数均为 0.92,两者呈线性正相关关系;在恒温( $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ )条件下,实测的水平扩散系数为  $0.049\text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ;要使氡在空气中的水平扩散系数达到经典值  $0.1\text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ,其环境温度应在  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上。地下工程环境温度相对恒定,空间相对封闭,氡及氡子体的浓度远高于地面工程,封闭房间中氡及氡子体的浓度远高于正常使用房间。

### 1.2 技术原理

氡子体为金属粒子,很容易与空气中的粉尘结合并形成结合态氡子体,这样可以通过静电除尘的方法达到去除氡子体的目的。

静电除尘器的静电场工作原理:圆孔针状电极在高电压(通常为几千伏)下放电,以采用正电晕为例,此时针尖接正电位,由于针尖处的电场强度非常大,周边气体中的自由电子会高速冲向针尖,从而撞

击空气中的中性分子,使其电子脱离出来形成正离子。这些电子成为自由电子后,又会被针尖吸引而撞击其他分子,形成“雪崩”现象,在针尖附近形成一个稳定的电晕区。自由电子最终被圆孔针状电极吸收,而正离子在气流和电场力的作用下扩散到空气中,与空气中的尘埃附着聚集,成为带电微粒,被平板状静电场吸附,从而达到去除氡子体的目的。

借助静电力从空气中分离悬浮粒子的方法,与其他类似机械分离粒子的方法的根本不同之处在于,分离力直接作用于各粒子上,而不是通过作用于整个气流上的力间接作用在粒子上。静电力直接而高效地被利用,决定了静电除尘器具有去除效率高和能耗低这 2 个主要特点。静电除尘技术的主要原理和步骤为<sup>[7]</sup>:

(1)气体电离:在放电电极附近的强电场区域即电晕区内发生电晕放电,可生成大量高能自由电子和离子。

(2)粒子荷电:经过放电区的气溶胶粒子与高速运动的电子或离子,通过碰撞或扩散效应获得电荷。

(3)粒子迁移:荷电粒子在电场力的作用下迁移至集尘极表面。

(4)粒子的沉积和清除:荷电粒子沉积到集尘极表面后将其清除,从而使氡子体得到去除。

目前,双区电场高压静电方式可捕集 10 nm 以下的粒子,同时可高效捕集纳米级的粒子。

## 2 静电除氡装置设计

### 2.1 整体设计思路

静电除氡的基本方法是在高压电场中让结合态氡子体微粒荷电,从而产生极性,微粒在集尘区就可以被吸附在电场的极板上。因此,让所有的微粒充分荷电,且有效地吸附在电极板上,就能实现除尘降氡的目的。

静电除氡装置主要包括以下 4 个部分:预过滤模块、蜂窝电场模块、平板电场模块、精过滤模块。预过滤模块主要是对空气进行预处理,滤掉空气中大粒径的粉尘、颗粒物;蜂窝电场模块和平板电场模块共同组成蜂窝-平板双区静电型高压电场,为了保证荷电效果,微粒先经过蜂窝电场充分荷电,再到达平板电场区域沉降下来;为了保证除氡效率,精过滤模块再进一步滤掉空气中更小粒径的尘粒。

### 2.2 内部结构设计

为了不让空气流经电场时荷电均匀,不存在“死角”,采用圆孔针状结构静电场荷电,集尘区采用平

板式静电场吸附已经荷电的粒子。图 1 为蜂窝结构的排列方式,图 2 为圆孔针状电场电力线分布。

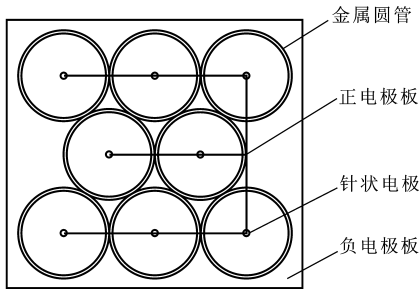


图 1 蜂窝结构的排列方式

Fig. 1 Honeycomb Structure Arrangement

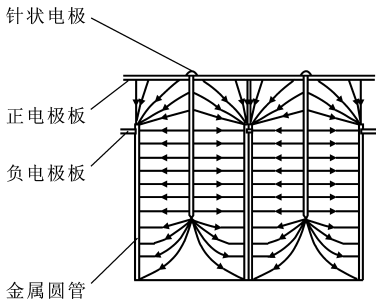


图 2 圆孔针状电场电力线分布

Fig. 2 Distributions of Power Lines of Hole Needle-like Electric Field

图 1 中,金属圆管排列成蜂窝状,由负电极的金属板连接。针状电极由正电极板支架固接,并位于金属圆管的轴心线上,构成电晕极。当电压足够大时,由于电晕极直径较小,特别是在针尖部分的曲率半径更小,其表面的场强非常大,在电极附近的电子会被吸收形成电子“雪崩”现象,从而在电极附近产生大量正离子,在电场力作用下向沉降板移动。这些正离子在移动过程中,会使空气中的粉尘粒子荷电,从而促使粉尘粒子向沉降板移动。

电极附近引起电子“雪崩”的区域称为电晕区。电晕区内电子“雪崩”激化气体分子产生高频辐射(紫外线),可以保持电晕正常发展。当空气流经金属圆管时,空气中的结合态氡子体微粒将被荷电并产生极性,从而被平板吸附电场吸附。圆管荷电电场与平板吸附电场结构示意图如图 3 所示。

圆管针状荷电电场容易排列成蜂窝形结构。这样的结构不仅提高了荷电效果,也最大限度地减小了排气阻力。

与净化空气相比,除氡装置在结构设计时需要考虑沉积粒子对电场的影响。双区电场与单区电场相比,不仅净化效率高,还可以有效防止沉积粒子引起的反电晕现象,清灰也较方便,同时考虑到地下工

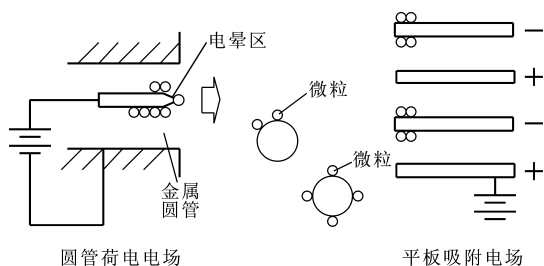


图 3 圆管荷电电场与平板吸附电场

Fig. 3 Tube Charged Electric Field and Flat Adsorption Electric Field

程内部空间较小的特点,静电除氡装置采用占地较小的立式双区电场结构,荷电电场为蜂窝圆孔电场,吸附电场为平板电场,装置内部结构如图 4 所示。



图 4 静电除氡装置内部结构

Fig. 4 Internal Structure of Electrostatic Radon Elimination Device

## 2.3 装置安全与可靠性措施

### 2.3.1 消除电火花引起的不安全因素

荷电电场可以采用正电晕,也可以采用负电晕。采用负电晕时,针尖接负电位,圆管接正电位。此时,针尖在电场作用下发射电子,这些电子使气流中的分子形成负离子,也会使微粒荷电。负电晕的优点是电子发射容易,缺点是容易产生臭氧及电火花发生击穿故障<sup>[8]</sup>。为尽量减少臭氧的产生以及避免电火花引起的不安全因素,应采用正电晕。

### 2.3.2 保证设备的长期运行效果

针状电极结构只要有适当高的电压就容易形成稳定的电晕区,针上不容易聚集微粒,特别是针尖部分。因为绝大部分微粒在被正离子荷电后都受到针尖表面强大的电场排斥力推向圆管或被气流带走。而因圆管具有负极性,容易吸引带正电荷的微粒,工作一段时间后便会在圆管表面形成一层积灰。积灰累积到一定程度,会影响针状电极吸收电子,从而影响正电晕区的形成和对粒子的荷电能力,所以为了提高除氡效果,采用多级多层静电过滤的设计方法,可保证长期工作时的稳定性和可靠性。

## 3 试验分析

### 3.1 试验基本情况

为验证静电除氡装置的性能,选择某地下坑道式工程进行试验,试验选取工程中的 1 个有密闭门的典型房间。工程被覆山体处于沉积岩与侵入岩的接触区域,山体顶部大部分为石英砂岩,部分为花岗岩;底部大部分为花岗岩,部分为石英砂岩;接触带岩石呈渐变性质,有破碎风化带,但无明显界限。工程试验时除氡装置内部有循环风,测试期间除必要操作外,无人员出入,房间隔绝。试验的环境温度为  $25.5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 26\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度为  $73\%\sim 77\%$ 。

### 3.2 试验过程及结果

首先,测试未开机之前氡子体本底浓度,采用专业氡子体测量仪器 BWL 测量连续时间段内的氡子体浓度,每小时记录 1 次数据,取其平均值。开机运行时,先只开启蜂窝电场模块的电源,平板电场的电源关闭,进行单蜂窝电场静电除氡试验,每小时记录 1 次数据;关机之后,房间密闭 48 h,开机只开启平板电场的电源,关闭蜂窝电场模块的电源,重新测试房间内的氡子体浓度;采用同样的方法测试蜂窝电场模块的电源和平板电场电源同时开启时每小时洞内的氡子体浓度变化。双区静电氡子体浓度和去除率随净化时间的变化曲线如图 5、6 所示。

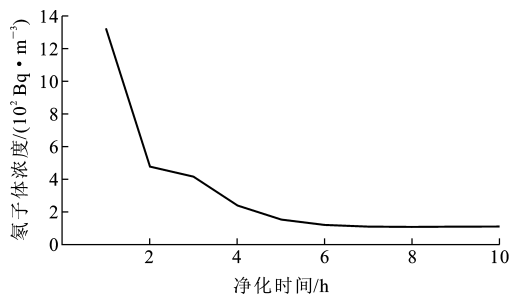


图 5 双区静电氡子体浓度变化曲线

Fig. 5 Variation Curve of Radon Daughters Concentration in Dual-zone Electrostatic Field

试验时在强风和弱风状态下分别进行了测试,在 2 种不同风量下氡子体去除率随净化时间变化的比较如图 7 所示。由图 7 可知,在强风状态下,氡子体去除率比弱风状态下要高。

图 8 为在强风状态下单区静电和双区静电氡子体去除率的比较。

由试验结果可知:双区静电方式除氡装置在开机 4 h 后除氡率在  $90\%$  以上,具有很好的除氡效果;双区静电方式相比单区静电方式具有更高的氡子体去除率。强风状态比弱风状态具有更高的氡子体去

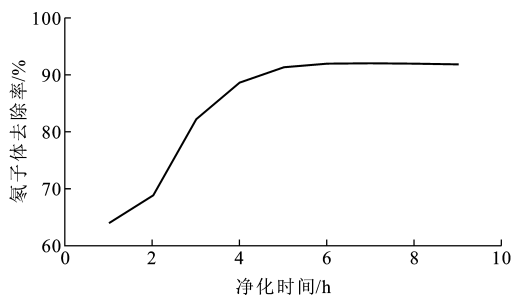


图6 双区静电氡子体去除率变化曲线

Fig. 6 Variation Curve of Rate of Radon Daughters Elimination in Dual-zone Electrostatic Field

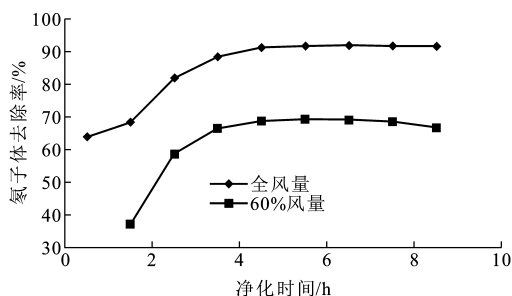


图7 强风和弱风状态下氡子体去除率的比较

Fig. 7 Comparisons of Rates of Radon Daughters Elimination in Strong and Weak Wind Conditions

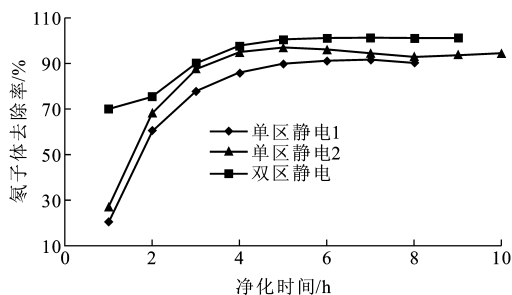


图8 单区静电和双区静电氡子体去除率的比较

Fig. 8 Comparisons of Rates of Radon Daughters Elimination in Single-zone and Dual-zone Electrostatic Fields

除率,究其原因,强风状态加强了室内通过除氡装置的换气次数,使氡子体浓度衰减迅速,整体浓度有所降低。

## 4 结 语

本文中分析了地下工程内部除氡技术的研究现状,根据结合态氡子体可以被静电吸附这一特点,达到间接去除氡子体的目的。针对结合态氡子体不易被俘获的技术难点,采用蜂窝-平板双区静电型高压电场,设计了双区静电型除氡装置,工程试验测试结果表明,静电除氡装置具有较高的氡子体去除率。该静电除氡技术,是对以往建筑隔氡技术和通风降

氡技术的有效补充,此静电除氡装置适用于已建工程和改造工程,尤其是地下空气隔绝环境条件,为地下空间氡污染控制提供了新的技术途径。

## 参考文献:

### References:

- [1] 亓 伟,耿世彬,高虎杉,等.国防工程降氡技术研究现状及应用[J]. 洁净与空调技术,2011(1):38-42.  
QI Wei, GENG Shi-bin, GAO Hu-shan, et al. The Research Status and Application of Radon Reduction Technology in Defense Projects [J]. Contamination Control & Air-conditioning Technology, 2011(1): 38-42.
- [2] 亓 伟. 国防工程静电除氡技术与试验研究[D]. 南京:中国人民解放军理工大学,2012.  
QI Wei. Study on Techniques and Experiments of Electrostatic Radon Elimination in National Defense Engineering[D]. Nanjing: PLA University of Science and Technology, 2012.
- [3] STREIL T. Exploration of Radon Affected Work and Living Places and Methods for the Reduction of the Radon Exposure [J]. Environment Science Health, 1998, 32(6): 27-30.
- [4] STECK D J. Risks from a Radon Decay Product Standpoint[C]//CRCPD. Proceedings of Conference of Radiation Control Program Directors 14th National Radon Meeting. Newport: CRCPD, 2004: 336-341.
- [5] 王 津,刘 娟,陈永亨. 氡及其子体的形成机制及危害研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2011, 28(9): 832-835.  
WANG Jin, LIU Juan, CHEN Yong-heng. Research Progress on Formation and Harming Mechanism of Radon and Its Decay Products[J]. Journal of Environment and Health, 2011, 28(9): 832-835.
- [6] 乐仁昌,何志杰,卢 宇,等. 氡及其子体水平扩散系数测量研究[J]. 核技术, 2010, 33(3): 219-222.  
LE Ren-chang, HE Zhi-jie, LU Yu, et al. Measurement of Horizontal Diffusion Coefficient of Radon[J]. Nuclear Techniques, 2010, 33(3): 219-222.
- [7] 徐玉党. 室内污染控制与洁净技术[M]. 重庆:重庆大学出版社, 2006.  
XU Yu-dang. Indoor Pollution Control and Clean Technology[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2006.
- [8] 刘志强,刘 强. 静电及其在除尘系统中的应用[J]. 衡水学院学报, 2011, 13(1): 105-107.  
LIU Zhi-qiang, LIU Qiang. Static Electricity and Its Application in Dust Removal System [J]. Journal of Hengshui University, 2011, 13(1): 105-107.

