

聚丙烯酰胺基气溶胶固定剂合成及其对碲气溶胶固定效果

肖梦情¹ 詹杰² 李家文² 苏兴东² 刘峰² 王宇拓¹ 陈长稳¹ 周元林¹ 李银涛¹

¹(西南科技大学材料与化学学院 环境友好能源国家重点实验室 绵阳 621000)

²(中广核研究院有限公司 深圳 518028)

摘要 核应急中放射性气溶胶的除控是重要问题,捕获固定是研究气溶胶固定剂对气溶胶净化效果的参量。本文以聚丙烯酰胺为基材,以丙烯酸、丙烯酸羟乙酯为接枝单体,通过化学接枝获得PAM-g-PAA、PAM-g-PHEA以及PAM-g-PAA/PHEA三种接枝产物,通过产物红外光谱分析,证实接枝产物并计算了接枝率;通过样品冷冻干燥及成膜的扫描电镜图(SEM)对比并讨论了不同产物的微观结构;通过表面张力、固定沉降实验(PAM、PAM-g-PAA、PAM-g-PHEA、PAM-g-PAA/PHEA水溶液)对碲(模拟钚)气溶胶的捕获沉降固定效果,并讨论了气溶胶固定机理。结果表明:接枝产物相较于基材PAM表面张力有明显降低;其中单接枝HEA改性聚丙烯酰胺的气溶胶固定剂PAM-g-PHEA更能有效捕获固定碲气溶胶颗粒,其固定沉降效率达94.34%,为雾化固定法净化钚放射性气溶胶提供一种研究思路。

关键词 捕获固定,气溶胶固定剂,沉降率,接枝改性,固定机理

中图分类号 TL13

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0070

引用该文:

肖梦情,詹杰,李家文,等.聚丙烯酰胺基气溶胶固定剂合成及其对碲气溶胶固定效果[J].辐射研究与辐射工艺学报,2024,42(2):020204. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0070.

XIAO Mengqing, ZHAN Jie, LI Jiawen, *et al.* Synthesis of polyacrylamide-based aerosol fixative and its fixation effect on tellurium aerosol[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2024, 42(2): 020204. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0070.



Synthesis of polyacrylamide-based aerosol fixative and its fixation effect on tellurium aerosol

XIAO Mengqing¹ ZHAN Jie² LI Jiawen² SU Xingdong² LIU Feng²

WANG Yutuo¹ CHEN Changwen¹ ZHOU Yuanlin¹ LI Yintao¹

¹(State Key Laboratory of Environmentally Friendly Energy School of Materials and Chemistry, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621000, China)

²(China Nuclear Power Technology Research Institute Co. Ltd, Shenzhen 518028, China)

ABSTRACT The removal control of radioactive aerosols in a nuclear emergency is an important issue, and

基金资助:四川省科技成果转化示范项目(2023ZHCG048)和中广核研究院项目(008-ZB-B-2021-C30-01021)资助

第一作者:肖梦情,女,1999年10月出生,目前为西南科技大学在读硕士研究生,材料与化工专业,E-mail: 812793014@qq.com

通信作者:李银涛,博士,副研究员,E-mail: ytli2002@163.com;

收稿日期:初稿 2023-08-23; 修回 2023-11-08

Supported by Sichuan Science and Technology Achievements Transfer and Transformation Demonstration Project (2023ZHCG048) and China Guangdong Nuclear Research Institute Project (008-ZB-B-2021-C30-01021)

First author: XIAO Mengqing (female) was born in October 1999. Now she is a graduate student at Southwest University of Science and Technology, majoring in materials and chemicals. E-mail: 812793014@qq.com

Corresponding author: LI Yintao, doctoral degree, associate researcher, E-mail: ytli2002@163.com

Received 23 August 2023; accepted 08 November 2023

capture fixation is a parameter for studying the purification effect of aerosol fixatives on aerosols. Herein, PAM-g-PAA, PAM-g-PHEA, and PAM-g-PAA/PHEA were obtained by chemical grafting with polyacrylamide as the substrate, acrylic acid and 2-hydroxyethyl acrylate as grafting monomers. The grafting product was confirmed by infrared spectroscopy and the grafting rate was calculated. The microstructure of different products were compared and discussed by scanning electron microscope images of freeze-drying and film formation. The capture and sedimentation effects of tellurium (simulated polonium) aerosol were studied by surface tension and fixed sedimentation experiments (PAM, PAM-g-PAA, PAM-g-PHEA, PAM-g-PAA/PHEA aqueous solution), and the mechanism of aerosol fixation was discussed. The results showed that the surface tension of the grafted product was significantly lower than that of the substrate PAM. Among them, the aerosol fixing agent PAM-g-PHEA grafted with HEA modified polyacrylamide can more effectively capture and fix tellurium aerosol particles, and its fixed sedimentation efficiency is 94.34%, which provides a research idea for the purification of polonium radioactive aerosol by atomization fixation method.

KEYWORDS Capture fixation, Aerosol fixative, Sedimentation rate, Graft modification, Fixation mechanism

CLC TL13

核设施退役以及核事故应急时,产生大量的放射性气溶胶^[1-3]。它们是含有放射性核素的固体或液体微粒在空气或气相环境中分散悬浮所形成的胶溶状分散体系,其粒径约为0.001~100 μm ^[4-6]。当人类长期处于放射性环境中易引发各种疾病,为保护人类健康,捕获清除空气中的放射性气溶胶颗粒是有必要的^[7-8]。

当前,雾化固定技术因其简便灵活的特性常用于捕获清除放射性气溶胶^[9-12]。卢彦志等^[13]以丙烯酸为聚合单体,乙烯基三乙氧基硅烷为功能单体,采用可逆加成-断裂链转移(RAFT)聚合法控制聚合物的分子链,合成低黏度、低表面张力的气溶胶固定剂,表现出较好的雾化效果,对气溶胶颗粒有很好的固定效果。Wu等^[14]以海藻酸钠、多酚、烷基糖苷为原料复合制备低黏度的气溶胶抑制剂,它能够抑制飘浮在空中的铯放射性气溶胶,尤其是对粒径微小、不易沉降的气溶胶颗粒有很好的抑制效果。上述研究放射性气溶胶的控制和去除并没有特定的应用场所,在液态铅铋反应堆正常运行期间,会产生一定的放射性气溶胶钋及钋化物,主要是因为铅铋反应堆受中子的辐照,再经 β 、 α 的衰变会产生 ^{210}Po ^[15-17]。中国核动力研究所^[18]在模拟研究整个装置的过程中发现, ^{210}Po 会以钋或钋化物放射性气溶胶的形式飘浮在空气中或者沉积在地面上。由于 ^{210}Po 是一种具有强烈挥发性的剧毒元素,我们选择与钋的化学性质相似的同主族元素碲作为研究对象。

经研究发现,极性基团与碲之间存在氢键作用,通过氢键作用来捕获碲气溶胶颗粒,在之前

的实验中制备的PAM-g-PAA/PHEA可以有效地在一定时间范围内降低飘浮在空气中的气溶胶的含量。为进一步探究捕获固定碲气溶胶合适的气溶胶固定剂,本文选用润湿性好、形成的氢键对碲气溶胶存在吸附作用的PAM、PAM-g-PAA、PAM-g-PHEA以及PAM-g-PAA/PHEA聚合物水溶液作为气溶胶固定剂,比较不同材料对碲气溶胶颗粒的捕获固定效果,进而确定捕获固定碲放射性气溶胶的有效材料,为进一步净化钋放射性气溶胶的研究提供思路。

1 材料与方法

1.1 材料

聚丙烯酰胺(PAM,非离子型,500万的分子量,上海易恩化工科技有限公司)、丙烯酸(AA,成都市科龙化工试剂厂)、丙烯酸羟乙酯(HEA,上海麦克莱恩生物科技有限公司)、过硫酸铵(APS,成都市科龙化工试剂厂)、去离子水(自制)、无水乙醇、丙酮(成都市科龙化工试剂厂)。

1.2 实验步骤

PAM溶液:将一定量的PAM和200 mL去离子水加入到500 mL四颈烧瓶中,搅拌至完全溶解,得到PAM溶液。

接枝聚合物:将一定量的聚丙烯酰胺和200 mL去离子水加入500 mL四颈烧瓶中。待聚丙烯酰胺完全溶解,温度达到70 $^{\circ}\text{C}$ 后,滴加引发剂(单体含量的1%)过硫酸铵水溶液,然后向四颈烧

瓶中滴加一定量的单体，反应一定时间后得到接枝聚合物。

将4种聚合物溶液放置室温，倒入过量的无水乙醇溶液中，得到不溶于乙醇的聚合物沉淀物。对沉淀物进行提纯，用索氏提取器(以丙酮为溶剂)提纯24 h，提纯后在80℃的真空烘箱中干燥，随后将其研磨成粉末进行相关的表征测试。

1.3 表征方法

1.3.1 红外光谱测定

PAM、PAM-g-PAA、PAM-g-PHEA以及PAM-g-PAA/PHEA的红外光谱图采用溴化钾压片法在Nicolet-5700傅里叶变换红外光谱仪测得。测量波数范围为500~4 000 cm^{-1} ，扫描次数32次。

1.3.2 接枝率的计算

接枝率的计算采用称量法，每次取30 mL样品沉淀、提纯、干燥后称重，按公式(1)计算其接枝率($P, \%$)。

$$P = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中：干燥后的聚丙烯酰胺和接枝聚合物的质量分别用 W_0 和 W_1 表示。

1.3.3 表面张力的测定

取PAM、PAM-g-PAA、PAM-g-PHEA以及PAM-g-PAA/PHEA溶液50 mL，采用吊环法用K100表面张力测试仪在20℃下测试。

1.3.4 形貌表征

水溶液的样品制备：取25 mL溶液倒入玻璃皿中，放置在冷冻干燥机中，待干燥后放入液氮中将其脆断；膜体样品制备：取25 mL溶液倒入玻璃皿中，待溶液自然干燥后成膜，将膜体放入液氮中将其脆断，最后使用TESCAN MAIA3扫描电子显微镜在3 kV加速电压下获取其断面图像。

1.3.5 砷气溶胶沉降测试

砷粉(99.99%，45 μm ，上海水田材料科技有限公司)经球磨后其D50为18.8 μm 。在模拟箱(100 cm×80 cm×65 cm)中进行模拟砷放射性气溶胶的沉降试验。模拟箱内充满砷气溶胶，通过雾化喷嘴装置向模拟箱内喷洒体积为100 mL的气溶胶固定剂。用空气动力学粒径谱仪(APS-3321)监测模拟箱内气溶胶颗粒的质量浓度变化来呈现气溶胶沉降的全过程。在每次气溶胶沉降试验中，每次采样时间为20 s，每分钟采样两次，吸气泵的

流量为2 L/min，雾化喷嘴的雾化压力为0.2 MPa。

2 结果与讨论

2.1 产物红外分析

图1显示了不同气溶胶固定剂的红外光谱图。无论是单接枝还是双接枝，其单体与聚丙烯酰胺的结构单元的物质质量比均为1:1。在1 635.26 cm^{-1} 处，聚丙烯酰胺及其接枝聚合物都表现出较强的峰，这是羰基的拉伸振动峰；2 858.2~2 952.5 cm^{-1} 的峰是聚丙烯酰胺主链上C-H的拉伸振动峰。接枝聚合物在3 189.4 cm^{-1} 、1 450 cm^{-1} 、1 355 cm^{-1} 和1 314 cm^{-1} 处新增了几个峰，分别为N-H的拉伸振动峰、 CH_2 的弯曲振动峰以及C-N键的拉伸振动峰和N-H的弯曲振动峰的混合峰。无论是单接枝还是双接枝，均有亚甲基峰的出现，证明了单体均接枝在聚丙烯酰胺的侧链上。单接枝丙烯酸、丙烯酸羟乙酯和双接枝的接枝聚合物的红外光谱图对比可以很明显观察到在1 170 cm^{-1} 处有C-O键的拉伸振动峰，PAM-g-PHEA和PAM-g-PAA/PHEA相较于PAM-g-PAA在此处的峰要更强，归因于前二者接枝单体结构中较多的C-O键。C-O键拉伸振动峰的出现进一步证明丙烯酸和丙烯酸羟乙酯成功接枝在了聚丙烯酰胺上。

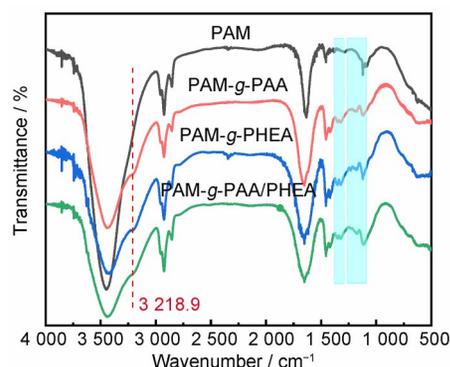


图1 提纯后的PAM、PAM-g-PAA、PAM-g-PHEA以及PAM-g-PAA/PHEA的红外光谱图

Fig.1 Infrared spectra of purified PAM, PAM-g-PAA, PAM-g-PHEA, and PAM-g-PAA/PHEA

2.2 产物接枝率计算

PAM-g-PAA、PAM-g-PHEA以及PAM-g-PAA/PHEA的接枝率计算结果如表1所示。表1中，PAM-g-PHEA接枝率最高，可以初步说明丙烯酸羟乙酯相较于丙烯酸更易接枝在主链聚丙烯酰胺上，通过这3种样品的接枝率的对比发现，PAM-

g-PAA/PHEA的接枝率介于两者中间，出现该现象一方面是考虑到丙烯酸的竞聚率相对较大更易发生自聚，另一方面可能是丙烯酸的引入影响了丙烯酸羟乙酯的接枝，从而导致双接枝聚合物的接枝率降低。

表1 PAM-g-PAA、PAM-g-PHEA以及PAM-g-PAA/PHEA的接枝率

Table 1 Grafting rate of PAM-g-PAA、PAM-g-PHEA and PAM-g-PAA/PHEA

样品 Samples	接枝率 / % Grafting rate
PAM-g-PAA	9.07
PAM-g-PHEA	11.75
PAM-g-PAA/PHEA	9.97

2.3 气溶胶固定剂表面张力分析

气溶胶固定剂捕获固定气溶胶颗粒的过程：固定剂雾化喷淋后与气溶胶颗粒在布朗运动的作用下发生碰撞，固定剂通过范德华力、氢键等对气溶胶颗粒进行粘附、捕获、凝并再受重力作用最终沉降。然而，固定剂对气溶胶颗粒的捕获固定性能与其对气溶胶颗粒的润湿性和碰撞频率有关，气溶胶颗粒在一定程度上被低表面张力的气溶胶固定剂润湿。不同气溶胶固定剂的表面张力如图2所示。从图2可以看出，丙烯酸、丙烯酸羟乙酯的引入可以很好地降低聚丙烯酰胺的表面张力，丙烯酸的引入使得聚丙烯酰胺的表面张力降低至45.77 mN/m，丙烯酸羟乙酯的引入使得聚丙烯酰胺的表面张力降低至43.84 mN/m；而双单体的引入使得聚丙烯酰胺的表面张力降低至44.29 mN/m，说明单体的接枝给予了聚合物溶液更低的表面能，可以有效降低表面张力，体现出更好的润湿性。

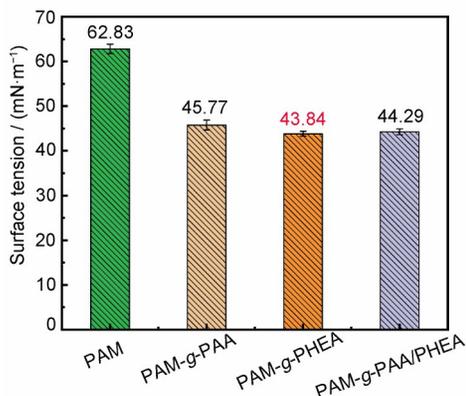


图2 不同气溶胶固定剂的表面张力
Fig.2 Surface tension of different aerosol fixatives

2.4 气溶胶固定剂微观形貌分析

2.4.1 聚合物溶液微观结构

图3显示了PAM、PAM-g-PAA、PAM-g-PHEA以及PAM-g-PAA/PHEA的扫描电镜图(SEM)。从图3可以很明显观察到，PAM、PAM-g-PAA、PAM-g-PHEA以及PAM-g-PAA/PHEA均呈现出不同规则的网络孔状结构，这归因于在水溶液中，聚合物分子之间通过静电作用、范德华力及氢键作用产生的物理缔合。PAM、PAM-g-PAA的结构表面比较光滑，PAM-g-PHEA、PAM-g-PAA/PHEA的结构表面相对粗糙，一方面是因为侧链接枝的聚合物的影响，另一方面是因为单体自身结构的影响。与图4中的断面SEM相比，也能够看出PAM、PAM-g-PAA的图像更加光滑。除此之外，碲粉本身具有一定的团聚作用，不同大小的网状孔隙结构更能捕捉不同粒径的碲粉，PAM-g-PHEA有孔径较小的网络结构，更能捕捉粒径较小的碲粉。

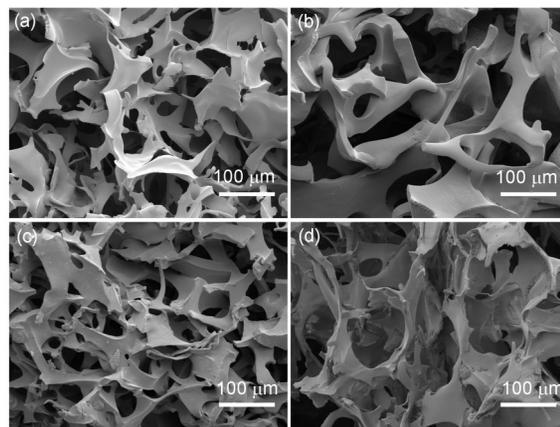


图3 (a) PAM、(b) PAM-g-PAA、(c) PAM-g-PHEA、(d) PAM-g-PAA/PHEA的扫描电镜图

Fig.3 SEM micrograph of (a) PAM, (b) PAM-g-PAA, (c) PAM-g-PHEA, (d) PAM-g-PAA/PHEA

2.4.2 膜体断面微观结构

准备4个内径为6 cm的玻璃皿，取不同的气溶胶固定剂25 mL倒入玻璃皿中放置在恒温恒湿箱(温度35 °C，湿度50%)中等待干燥成膜，将膜剥离下来取断面进行测试，结果如图4所示。准备4个内径为6 cm的玻璃皿，取不同的气溶胶固定剂25 mL加入0.5 g碲粉，超声搅拌均匀后倒入玻璃皿中放置在恒温恒湿箱(温度为35 °C，湿度50%)中等待干燥成膜，将膜剥离下来取断面进行测试，结果如图5所示。

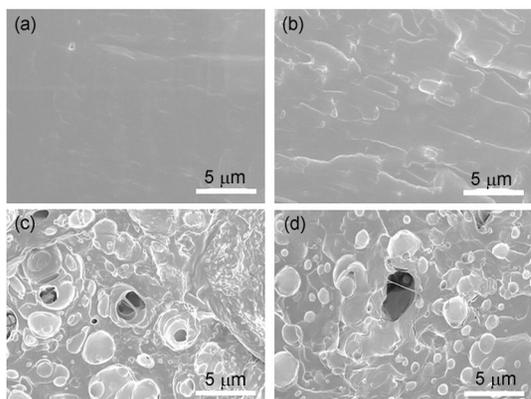


图4 不同气溶胶固定剂成膜后的断面扫描图:(a) PAM; (b) PAM-g-PAA; (c) PAM-g-PHEA; (d) PAM-g-PAA/PHEA
Fig.4 Cross-sectional scans of different aerosol fixatives after film formation: (a) PAM; (b) PAM-g-PAA; (c) PAM-g-PHEA; (d) PAM-g-PAA/PHEA

在实际操作过程中发现PAM干燥后的膜较难剥离，PAM-g-PAA、PAM-g-PHEA以及PAM-g-PAA/PHEA的膜体较易剥离。如图4所示，PAM和PAM-g-PAA的膜截面比较光滑，PAM-g-PHEA相对不平滑并出现一些沟壑；PAM-g-PHEA和PAM-g-PAA/PHEA的膜截面有非常大的差异，截面不光滑且出现一些大小不均的孔洞。由图5可见，PAM截面处光滑且吸附的碲粉含量较少，PAM-g-PAA截面处在沟壑不平滑处有大量粒径不同的碲粉，粒径不同主要归因于碲粉自身的团聚作用。PAM-g-PHEA和PAM-g-PAA/PHEA的截面处明显观察到碲粉大多存在于孔洞附近以及一些不平滑的地方。

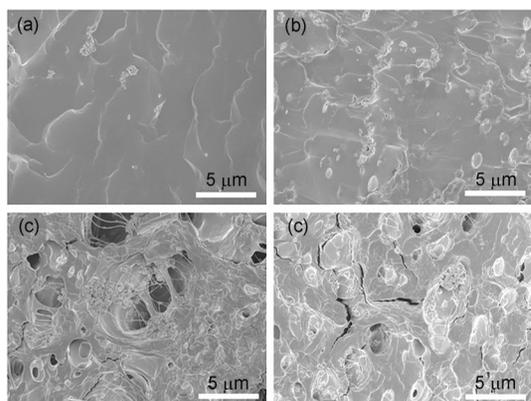


图5 不同气溶胶固定剂与碲粉混合的溶液成膜后的断面扫描图:(a) PAM; (b) PAM-g-PAA; (c) PAM-g-PHEA; (d) PAM-g-PAA/PHEA
Fig.5 Cross-sectional SEM images of solutions mixed with different aerosol fixatives and tellurium powder after film formation: (a) PAM; (b) PAM-g-PAA; (c) PAM-g-PHEA; (d) PAM-g-PAA/PHEA

2.5 气溶胶沉降固定性能

2.5.1 气溶胶沉降分析

聚丙烯酰胺以及接枝物作为气溶胶固定剂，将细小的气溶胶颗粒包裹在其中，通过离子键、氢键、范德华力等可以同时多个气溶胶颗粒捕获，起到架桥的作用。如图6所示，在试管中加入20 mL的溶液、0.5 g的碲粉，超声1 h，观察随着时间变化，碲粉在PAM、PAM-g-PAA、PAM-g-PHEA、PAM-g-PAA/PHEA（从右到左的顺序）溶液中的沉降情况。可以看出，静置48 h后，PAM-g-PHEA溶液中悬浮的气溶胶颗粒浓度较大，相对于其他3种较为浑浊。该现象表明，气溶胶固定剂PAM-g-PHEA与气溶胶颗粒之间的作用力较大，在实际应用场所中作固定剂时能很好地将气溶胶颗粒粘附、凝并、沉降，最终捕获固定更多的颗粒。

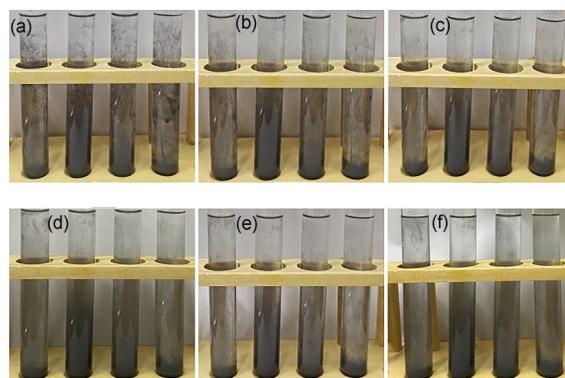


图6 碲粉在PAM-g-PAA/PHEA、PAM-g-PHEA、PAM-g-PAA、PAM溶液中沉降变化的数码照片：
(a) 0 h; (b) 6 h; (c) 12 h; (d) 24 h; (e) 36 h; (f) 48 h
(彩色见网络版)

Fig.6 Digital pictures of the sedimentation variation of tellurium powder in PAM-g-PAA/PHEA, PAM-g-PHEA, PAM-g-PAA and PAM solutions: (a) 0 h; (b) 6 h; (c) 12 h; (d) 24 h; (e) 36 h; (f) 48 h (color online)

2.5.2 气溶胶沉降固定性能分析

气溶胶固定剂对放射性气溶胶颗粒的沉降和固定效率主要由模拟箱体中气溶胶颗粒的质量浓度来评估，气溶胶固定剂对放射性气溶胶颗粒的沉降固定率按公式(2)计算。

$$W = \frac{C_1 - C_0}{C_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中： W 是气溶胶沉降固定率； C_0 是模拟箱体内充满放射性气溶胶的颗粒质量浓度； C_1 是模拟箱体内沉降后的气溶胶颗粒质量浓度。

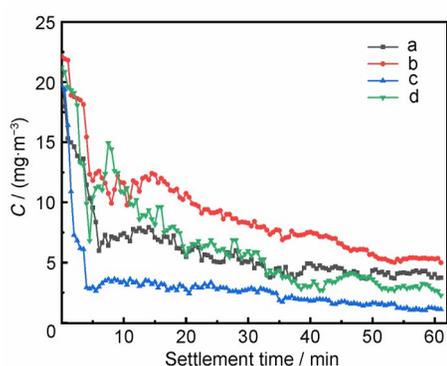


图7 模拟箱体气溶胶颗粒质量浓度随时间的变化
(雾化喷淋 a: PAM 溶液; b: PAM-g-PAA 溶液; c: PAM-g-PHEA 溶液; d: PAM-g-PAA/PHEA 溶液)

Fig.7 Variation of aerosol particle mass concentration in the simulated chamber with time
(Atomized spraying a: PAM solution; b: PAM-g-PAA solution; c: PAM-g-PHEA solution; d: PAM-g-PAA/PHEA solution)

图7显示了PAM、PAM-g-PAA、PAM-g-PHEA以及PAM-g-PAA/PHEA 4种气溶胶固定剂雾化喷淋后碲气溶胶颗粒质量浓度随着时间的变化。从图7可以明显观察到, 喷淋雾化气溶胶固定剂对碲气溶胶颗粒都有一定的捕获能力。PAM-g-PAA相较于PAM溶液对气溶胶颗粒的捕获能力要更弱些, 可能是因为接枝的丙烯酸对气溶胶颗粒没有作用, 甚至存在阻碍作用。PAM-g-PHEA和PAM-g-PAA/PHEA对气溶胶颗粒的捕获能力更强些, 但是单接枝要比双接枝的效果更好, 喷淋改性前后的两种溶液, 碲气溶胶颗粒质量浓度随着时间的变化呈现出的趋势不太相同, 从图7也可以看到, PAM-g-PHEA在4 min内气溶胶颗粒质量浓度呈快速沉降趋势, 从 19.67 mg/m^3 下降到 2.93 mg/m^3 , 随着时间的变化, 气溶胶颗粒质量浓度在 2.93 mg/m^3 上下不断波动。PAM-g-PAA/PHEA雾化喷淋后气溶胶颗粒的质量浓度有所波动, 持续下降; PAM-g-PAA/PHEA溶液在喷淋10 min内, 气溶胶颗粒质量浓度有明显的下降和上升, 波动较大, 10 min之后, 随着时间的变化, 气溶胶颗粒质量浓度在不断下降, 1 h后下降至 2.27 mg/m^3 以内, 波动有部分原因可能是受丙烯酸的影响。与此同时, 根据表2的沉降固定效率也可以很明显观察到, PAM、PAM-g-PAA、PAM-g-PHEA以及PAM-g-PAA/PHEA溶液对碲气溶胶颗粒有捕获固定使其沉降的作用, PAM-g-PHEA溶液的效果更好, 沉降固定效率可以达到94.34%。以上数据表明, HEA单接枝改性的气溶胶固定剂能够有效捕获碲气溶胶颗

粒, 降低一定空间内碲气溶胶颗粒的质量浓度。

表2 不同固定剂的雾化喷淋后气溶胶颗粒的沉降固定效率

Table 2 Settling and fixation efficiency of aerosol particles after atomized spraying of different fixatives

编号 Number	C_0 / $(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	C_1 / $(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	固定率 / % Fixed rate
a	20.565 4	3.738 0	81.82
b	22.152 8	4.997 9	77.44
c	19.671 9	1.112 5	94.34
d	21.235 0	2.272 8	89.30

2.6 固定机理

气溶胶固定的机理如图8所示。气溶胶固定剂雾化喷淋到充满碲气溶胶的箱体后, 气溶胶固定剂液滴与气溶胶颗粒受布朗运动或气流的影响发生碰撞; 气溶胶固定剂液滴浸润气溶胶颗粒, 并通过范德华力、氢键等作用对气溶胶颗粒进行粘附、捕获; 随着两者的接触, 越来越多的气溶胶颗粒会被气溶胶固定剂液滴捕获; 气溶胶固定剂液滴与气溶胶颗粒发生凝聚, 聚集成粒径较大的颗粒。最终, 这些大颗粒受自身重力惯性从空气介质中分离沉降, 此时气溶胶浓度迅速降低, 达到净化空气的目的。

3 结论

本文以聚丙烯酰胺为基材, 引入丙烯酸、丙烯酸羟乙酯进行单、双接枝, 基于溶液聚合的方法制备接枝产物不同的气溶胶固定剂, 研究4种气溶胶固定剂对碲气溶胶颗粒的捕获固定效果。通过产物红外光谱分析, 证实接枝产物并计算了PAM-g-PAA、PAM-g-PHEA以及PAM-g-PAA/PHEA的接枝率; 通过溶液冷冻干燥及成膜的SEM图对比并讨论了4种固定剂的微观结构; 同时, 对4种水溶液的表面张力、固定沉降效果进行了对比实验研究并提出了气溶胶的固定机理。实验结果表明, 接枝后的产物PAM-g-PAA、PAM-g-PHEA以及PAM-g-PAA/PHEA相较于基材聚丙烯酰胺有较低的表面张力; 聚合物水溶液冷冻干燥后的微观形貌表明接枝产物PAM-g-PHEA表面最为粗糙, 更易捕获碲气溶胶; 从固定效果的实验发现, AA的引入并没有提高气溶胶固定剂对碲气溶胶颗粒的捕获固定效果, 反而降低该性能, HEA的引入

则可以较好提高改性能，固定沉降效率达94.34%；AA及HEA同时引入相较于基材也存在性能提升；结合微观结构及固定沉降实验得出了合理的机理分析。因此，引入HEA接枝改性聚丙烯酰胺的气

溶胶固定剂能更有效捕获固定碲气溶胶颗粒，为雾化固定法净化钚放射性气溶胶提供一种研究思路。

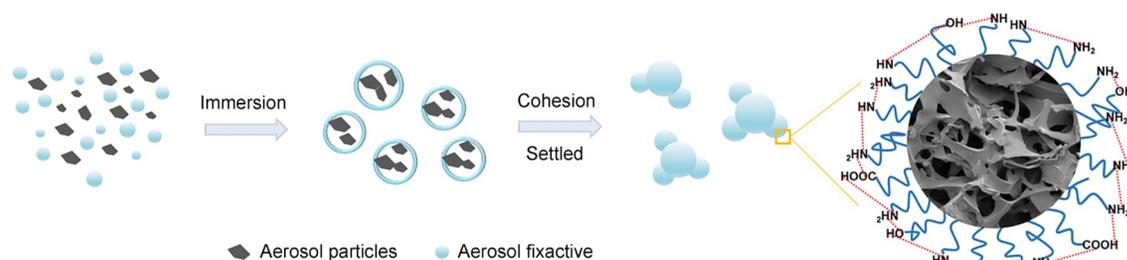


图8 气溶胶固定机理示意图

Fig.8 Schematic of aerosol immobilization mechanism

作者贡献声明 肖梦情负责文章的研究思路和实验方案，撰写文章；詹杰、李家文、苏兴东和刘峰为论文的研究提供了方向和资源；王宇拓和陈长稳在表征和分析上提供了帮助；周元林和李银涛起到了检验与监督的作用。所有作者均已对稿件的最终版本给予了认可。

参考文献

- Chae N, Lee M H, Choi S, *et al.* Aerodynamic diameter and radioactivity distributions of radioactive aerosols from activated metals cutting for nuclear power plant decommissioning[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, **369**: 727-745. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.02.093.
- Gonze M A, Renaud P, Korsakissok I, *et al.* Assessment of dry and wet atmospheric deposits of radioactive aerosols: application to Fukushima radiocaesium fallout [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(19): 11268-11276. DOI: 10.1021/es502590s.
- Jia L S, Yang Y P, Wang R Z, *et al.* Emergency evaluation model for nuclear criticality accidents of uranium enrichment facility[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, **983**(1): 012070. DOI: 10.1088/1755-1315/983/1/012070.
- von Schoenberg P, Tunved P, Grahn H, *et al.* Aerosol dynamics and dispersion of radioactive particles[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, **21**(6): 5173-5193. DOI: 10.5194/acp-21-5173-2021.
- Ma Z H, Ma T Y, Wang B S, *et al.* Meso-scale numerical analysis for transport and deposition behaviors of radioactive aerosols under severe nuclear accident[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2022, **150**: 104314. DOI: 10.1016/j.pnucene.2022.104314.
- Yuen W T, Fu S C, Chao C Y H. The effect of aerosol size distribution and concentration on the removal efficiency of an acoustic aerosol removal system[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2017, **104**: 79-89. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2016.11.014.
- Rupp G. Aerosol dynamics and health: strategies to reduce exposure and harm[J]. *Biomarkers*, 2009, **14** (Sup1): 3-4. DOI: 10.1080/13547500903145458.
- Xie D, Wang C H, Ding W, *et al.* Modelling dispersion of radioactive aerosols and occupational dose assessment of workers in a large nuclear plant industrial workshop with a stratified air conditioning system[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2020, **19**: 100828. DOI: 10.1016/j.eti.2020.100828.
- 王天运, 王世琦, 高缨. 环境污染事故放射性气溶胶扩散的应急控制及消除方法[J]. *核安全*, 2021, **20**(3): 17-24. DOI: 10.16432/j.cnki.1672-5360.2021.03.004. WANG Tianyun, WANG Shiqi, GAO Ying. Emergency control and elimination methods of radioactive aerosol diffusion in environmental pollution accidents[J]. *Nuclear Safety*, 2021, **20**(3): 17-24. DOI: 10.16432/j.cnki.1672-5360.2021.03.004.
- Wang K, Ding C N, Jiang S G, *et al.* Application of the addition of ionic liquids using a complex wetting agent to enhance dust control efficiency during coal mining[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, **122**: 13-22. DOI: 10.1016/j.psep.2018.11.011.
- Luo K, Shao C X, Chai M, *et al.* Level set method for atomization and evaporation simulations[J]. *Progress in*

- Energy and Combustion Science, 2019, **73**: 65-94. DOI: 10.1016/j.pecs.2019.03.001.
- 12 Yu H Y, Gu H F, Sun Z N, *et al.* Study on the influence of droplet agglomeration on the removal of aerosol by spray system[J]. Progress in Nuclear Energy, 2021, **140**: 103903. DOI: 10.1016/j.pnucene.2021.103903.
- 13 卢彦志, 刘峰, 詹杰, 等. 气溶胶固定剂PAM-b-PVTES的合成及表征[J]. 精细化工, 2022, **39**(4): 806-811. DOI: 10.13550/j.jxhg.20210997.
- LU Yanzhi, LIU Feng, ZHAN Jie, *et al.* Synthesis and characterization of aerosol fixative PAM-b-PVTES[J]. Fine Chemicals, 2022, **39**(4): 806-811. DOI: 10.13550/j.jxhg.20210997.
- 14 Wu L, Lei S C, Wang Y X, *et al.* A highly efficient biomass compound aerosol suppressant in purifying radioactive cesium droplet aerosols[J]. Molecules, 2022, **27**(19): 6480. DOI: 10.3390/molecules27196480.
- 15 Obara T, Koga T, Miura T, *et al.* Polonium evaporation and adhesion experiments for the development of polonium filter in lead-bismuth cooled reactors[J]. Progress in Nuclear Energy, 2008, **50**(2-6): 556-559. DOI: 10.1016/j.pnucene.2007.11.039.
- 16 Ram R, Vaughan J, Etschmann B, *et al.* The aqueous chemistry of polonium (Po) in environmental and anthropogenic processes[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, **380**: 120725. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.06.002.
- 17 Długosz-Lisiecka M. Aerosol removal coefficients based on ^7Be , ^{210}Pb , and ^{210}Po radionuclides in the urban atmosphere[J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 2021, **78**(3): 209-218. DOI: 10.1007/s10874-021-09422-z.
- 18 Deng L L, Wang Y Q, Zhai Z A, *et al.* Multi-physics model development for polonium transport behavior in a lead-cooled fast reactor[J]. Frontiers in Energy Research, 2021, **9**: 711916. DOI: 10.3389/fenrg.2021.711916.