



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103497510 B

(45) 授权公告日 2016. 01. 20

(21) 申请号 201310469854. X

CN 102796266 A, 2012. 11. 28, 权利要求 7.

(22) 申请日 2013. 10. 10

彭思敏等. 原位聚合制备羧酸化多壁碳纳米管 / 聚酰亚胺纳米复合薄膜. 《功能材料与器件学报》. 2011, 第 17 卷 (第 4 期), 第 385-391 页.

(73) 专利权人 哈尔滨工业大学

地址 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区西大直街 92 号

审查员 张德强

(72) 发明人 费维栋 冯宇 孙跃 王秒

(74) 专利代理机构 哈尔滨市松花江专利商标事务所 23109

代理人 牟永林

(51) Int. Cl.

C08L 79/08(2006. 01)

C08K 9/02(2006. 01)

C08K 7/00(2006. 01)

C08K 3/04(2006. 01)

C08G 73/10(2006. 01)

C08J 5/18(2006. 01)

(56) 对比文件

US 20120025110 A1, 2012. 02. 02, 权利要求 9.

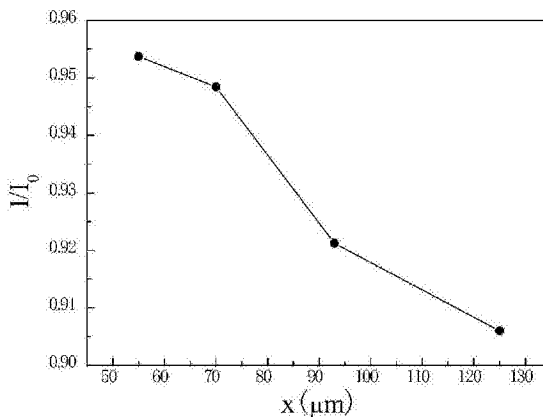
权利要求书2页 说明书5页 附图1页

(54) 发明名称

一种聚酰亚胺 / 碳纳米管 X 射线窗口薄膜的应用

(57) 摘要

一种聚酰亚胺 / 碳纳米管 X 射线窗口薄膜的应用, 它涉及 X 射线应用的材料测试领域, 具体涉及一种 X 射线窗口薄膜的应用。本发明的目的是要解决现有技术制备的铍窗口因有毒不能在裸露空气中使用的问题。聚酰亚胺 / 碳纳米管 X 射线窗口薄膜替代传统的铍窗口, 作为 X 射线窗口材料使用。



1. 一种聚酰亚胺 / 碳纳米管 X 射线窗口薄膜的应用, 其特征在于聚酰亚胺 / 碳纳米管 X 射线窗口薄膜替代传统的铍窗口, 作为 X 射线窗口材料使用;

所述的聚酰亚胺 / 碳纳米管 X 射线窗口薄膜的制备方法是按以下步骤完成的:

一、预混合: 首先将二胺单体和有机溶剂加入容器中, 并在搅拌速度为 600 转 / 分的密封条件下搅拌 40min ~ 80min, 得到单体二胺 / 有机溶剂溶液, 然后加入改性碳纳米管, 密封后置于超声波水浴中震荡处理, 至改性碳纳米管充分分散于单体二胺 / 有机溶剂溶液中, 然后在搅拌速度为 600 转 / 分的密封条件下搅拌 40min ~ 80min, 得到预混液; 所述的有机溶剂的体积与二胺单体的质量比为 13.3mL:1g; 所述的改性碳纳米管与二胺单体的质量比为 0.021:1;

二、终混: 按二酐单体与步骤一所述的二胺单体的摩尔比为 1:1 称取二酐单体, 然后将二酐单体分成六等份, 在搅拌速度为 600 转 / 分的条件下依次将六份二酐单体加入装有步骤一得到预混液的容器中, 且保证当前加入的二酐单体完全地溶解后再加入下一份二酐单体, 当最后一份加入的二酐单体完全地溶解后, 继续在搅拌速度为 800 转 / 分的条件下搅拌 1.5h ~ 2.5h, 然后将容器置于真空塔中 2h, 抽真空去除气泡, 得到待涂膜胶体;

三、涂膜和热亚胺化处理: 利用涂膜机将待涂膜胶体涂覆在干净的玻璃板上, 然后依次在温度为 80℃ 下处理 8h、温度为 120℃ 下处理 1h、温度为 150℃ 下处理 1h、温度为 200℃ 下处理 40min、温度为 250℃ 下处理 30min、温度为 280℃ 下处理 30min、温度为 310℃ 下处理 30min 和温度为 340℃ 下处理 3h, 然后自然冷却至温度为 20℃ ~ 100℃, 得到带薄膜的玻璃板, 将带薄膜的玻璃板放入去离子水中进行脱膜处理, 得到的薄膜在温度为 90℃ ~ 110℃ 干燥 5h ~ 10h, 即得到聚酰亚胺 / 碳纳米管 X 射线窗口薄膜。

2. 根据权利要求 1 所述的一种聚酰亚胺 / 碳纳米管 X 射线窗口薄膜的应用, 其特征在于步骤一中所述的改性碳纳米管是按以下方法制备的:

方法 1: 向碳纳米管中加入浓盐酸, 超声处理 8h, 用离心机进行固液分离, 离心 1 次, 用蒸馏水冲洗, 冲洗至洗出液 pH 值呈中性为止, 于 80℃ 真空烘箱中干燥 2h, 即得到改性碳纳米管; 所述的碳纳米管与浓盐酸的体积比为 0.2g:200mL; 所述的碳纳米管为单壁碳纳米管或多壁碳纳米管;

方法 2: 向碳纳米管中加入混酸, 室温超声 8h, 加蒸馏水稀释, 然后静置 12h, 倒去上清液, 再利用孔径为 0.22 μm 的聚四氟乙烯薄膜过滤, 然后采用去离子水洗涤, 洗涤至滤液的 pH 值为 5.8 ~ 6.2 为止, 最后在温度为 80℃ 下干燥 24h, 即得到改性碳纳米管; 所述的碳纳米管与混酸的体积比为 0.2g:100mL, 其中所述的混酸由质量分数为 98% 的 H₂SO₄ 和质量分数为 60% 的 HNO₃ 按质量分数为 98% 的 H₂SO₄ 与质量分数为 60% 的 HNO₃ 的体积比为 3:1 混合而成; 所述的蒸馏水与混酸的体积比为 12:1; 所述的碳纳米管为单壁碳纳米管或多壁碳纳米管。

3. 根据权利要求 2 所述的一种聚酰亚胺 / 碳纳米管 X 射线窗口薄膜的应用, 其特征在于步骤一中所述的二胺单体为二氨基二苯醚、对苯二胺、4,4'-二氨基二苯砜或 4,4-二氨基二苯甲烷。

4. 根据权利要求 2 所述的一种聚酰亚胺 / 碳纳米管 X 射线窗口薄膜的应用, 其特征在于步骤一中所述的有机溶剂为 N,N-二甲基乙酰胺、N,N-二甲基甲酰胺或 N-甲基吡咯烷酮。

5. 根据权利要求 2 所述的一种聚酰亚胺 / 碳纳米管 X 射线窗口薄膜的应用, 其特征在

于步骤二中所述的二酐单体为均苯四甲酸酐、联苯四甲酸二酐、偏苯三酸酐、二苯酮二酐或二苯醚二酐。

一种聚酰亚胺 / 碳纳米管 X 射线窗口薄膜的应用

技术领域

[0001] 本发明涉及 X 射线应用的材料测试领域,具体涉及一种 X 射线窗口薄膜的应用。

背景技术

[0002] 因为在 X 射线波段内,材料对 X 射线的吸收系数随材料中原子序数的减少而减少,铍(Be)的原子序数为 4,且拥有化学性质稳定、延展性好等特点,作为传统的 X 射线窗口材料被广泛应用在同步辐射光源,电子显微镜, X 光探测仪以及 X 射线衍射仪上,但是铍有剧毒,并且十分昂贵,难以在新型 X 射线应用领域中被广泛使用,例如,某些 X 射线衍射仪中的高、低温附件真空腔所用的 X 射线窗口,其形状呈弧状,且裸露在空气中,铍窗口因有毒且加工困难而不能使用。所以,在 X 射线被广泛用于材料结构研究的今天,急需一种新型的窗口材料来替代传统的铍窗口。

发明内容

[0003] 本发明的目的是要解决现有技术制备的铍窗口因有毒不能在裸露空气中使用的问题,而提供一种聚酰亚胺 / 碳纳米管 X 射线窗口薄膜的应用。

[0004] 一种聚酰亚胺 / 碳纳米管 X 射线窗口薄膜由改性碳纳米管、二胺单体、二酐单体和有机溶剂制备而成,所述的改性碳纳米管与二胺单体的质量比为 0.021:1;所述的二酐单体与二胺单体的摩尔比为 1:1;所述的有机溶剂的体积与二胺单体的质量比为 13.3mL:1g。

[0005] 一种聚酰亚胺 / 碳纳米管 X 射线窗口薄膜的制备方法,具体是按以下步骤完成的:

[0006] 一、预混合:首先将二胺单体和有机溶剂加入容器中,并在搅拌速度为 600 转 / 分的密封条件下搅拌 40min ~ 80min,得到单体二胺 / 有机溶剂溶液,然后加入改性碳纳米管,密封后置于超声波水浴中震荡处理,至改性碳纳米管完全充分分散于溶剂中,然后在搅拌速度为 600 转 / 分的密封条件下搅拌 40min ~ 80min,得到预混液;所述的有机溶剂的体积与二胺单体的质量比为 13.3mL:1g。所述的改性碳纳米管与二胺单体的质量比为 0.021:1;

[0007] 二、终混:按二酐单体与步骤一所述的二胺单体的摩尔比为 1:1 称取二酐单体,然后将二酐单体分成六等份,在搅拌速度为 600 转 / 分的条件下依次将六份二酐单体加入装有步骤一得到预混液的容器中,且保证当前加入的二酐单体完全的溶解后再加入下一份二酐单体,当最后一份加入的二酐单体完全的溶解后,继续在搅拌速度为 800 转 / 分的条件下搅拌 1.5h ~ 2.5h,然后将容器置于真空塔中 2h,抽真空去除气泡,得到待涂膜胶体;

[0008] 三、涂膜和热亚胺化处理:利用涂膜机将待涂膜胶体涂覆在干净的玻璃板上,然后依次在温度为 80℃ 下处理 8h、温度为 120℃ 下处理 1h、温度为 150℃ 下处理 1h、温度为 200℃ 下处理 40min、温度为 250℃ 下处理 30min、温度为 280℃ 下处理 30min、温度为 310℃ 下处理 30min 和温度为 340℃ 下处理 3h,然后自然冷却至温度为 20℃ ~ 100℃,得到带薄膜的玻璃板,将带薄膜的玻璃板放入去离子水中进行脱膜处理,得到的薄膜在温度为 90℃ ~ 110℃ 干燥 5h ~ 10h,即得到聚酰亚胺 / 碳纳米管 X 射线窗口薄膜。

[0009] 本发明优点：一、本发明通过原位聚合法制备了聚酰亚胺/碳纳米管 X 射线窗口薄膜，利用碳材料较小的原子序数和超强的力学性能，且只含有碳 (C)、氢 (H)、氮 (N)、氧 (O) 四种元素，其对 X 射线的吸收较小，因此即达到提高聚酰亚胺基体的力学性能，又保持 X 射线高透射率，且本发明制备的聚酰亚胺/碳纳米管 X 射线窗口薄膜无毒、绿色和加工成型性好，加工方法简单，可工业化大批量生产，且本发明制备的聚酰亚胺/碳纳米管 X 射线窗口薄膜能在裸露空气中使用，所以有效地解决了现有技术制备的铍窗口因有毒不能在裸露空气中使用，且加工困难的问题；二、本发明能够生产环保、经济的 X 射线窗口薄膜，为 X 射线在材料测试领域应用的拓展提供技术保障；三、本发明制备的聚酰亚胺/碳纳米管 X 射线窗口薄膜替代传统的铍窗口，作为 X 射线窗口材料使用。

附图说明

[0010] 图 1 是试验一制备的聚酰亚胺/碳纳米管 X 射线窗口薄膜透光率随其厚度变化曲线图；

[0011] 图 2 是试验一制备的聚酰亚胺/碳纳米管 X 射线窗口薄膜的 X 射线质量吸收系数曲线图。

具体实施方式

[0012] 具体实施方式一：本实施方式是一种聚酰亚胺/碳纳米管 X 射线窗口薄膜，由改性碳纳米管、二胺单体、二酐单体和有机溶剂制备而成，所述的改性碳纳米管与二胺单体的质量比为 0.021:1；所述的二酐单体与二胺单体的摩尔比为 1:1；所述的有机溶剂的体积与二胺单体的质量比为 13.3mL:1g。

[0013] 聚酰亚胺薄膜作为一种特殊的工程材料，被广泛应用在航空、航天、微电子、纳米、液晶、分离膜、激光等领域。因其在性能和合成方面的突出特点，不论是作为结构材料或是功能材料，其巨大的应用前景已经得到充分的认识。热固型聚酰亚胺具有优异的热学与力学性能，起始热分解温度大约在 500℃ 左右，能耐极低的温度，在 -296℃ 的液氮中不会脆裂；抗张强度在 100Mpa 以上，伸长率大于 120%。

[0014] 碳纳米管的硬度与金刚石相当，却拥有良好的柔韧性，可以拉伸。目前在工业上常用的增强型纤维中，决定强度的一个关键因素是长径比，即长度和直径之比。目前材料工程师希望得到的长径比至少是 20:1，而碳纳米管的长径比一般在 1000:1 以上，是理想的高强度纤维材料。

[0015] 本实施方式所述的聚酰亚胺/碳纳米管 X 射线窗口薄膜利用碳材料较小的原子序数和超强的力学性能，提高聚酰亚胺/碳纳米管 X 射线窗口薄膜的力学性能，只含有 (C)、氢 (H)、氮 (N)、氧 (O) 四种元素，其对 X 射线的吸收较小，保持 X 射线高透射率，且无毒，绿色环保。

[0016] 本实施方式所述的聚酰亚胺/碳纳米管 X 射线窗口薄膜替代传统的铍窗口，作为 X 射线窗口材料使用。

[0017] 具体实施方式二：本实施方式与具体实施方式一的不同点是：所述的改性碳纳米管是按以下方法制备的：

[0018] 方法 1：向碳纳米管中加入浓盐酸，超声处理 8h，用离心机进行固液分离，离心 1

次,用蒸馏水冲洗,冲洗至洗出液 pH 值呈中性为止,于 80℃ 真空烘箱中干燥 2h,即得到改性碳纳米管;所述的碳纳米管与浓盐酸的体积比为 0.2g:200mL;所述的碳纳米管为单壁碳纳米管或多壁碳纳米管;

[0019] 方法 2:向碳纳米管中加入混酸,室温超声 8h,加蒸馏水稀释,然后静置 12h,倒去上清液,再利用孔径为 0.22 μm 的聚四氟乙烯薄膜过滤,然后采用去离子水洗涤,洗涤至滤液的 pH 值为 5.8 ~ 6.2 为止,最后在温度为 80℃ 下干燥 24h,即得到改性碳纳米管;所述的碳纳米管与混酸的体积比为 0.2g:100mL,其中所述的混酸由质量分数为 98% 的 H₂SO₄ 和浓质量分数为 60% 的 HNO₃ 按质量分数为 98% 的 H₂SO₄ 与浓质量分数为 60% 的 HNO₃ 的体积比为 3:1 混合而成;所述的蒸馏水与混酸的体积比为 12:1;所述的碳纳米管为单壁碳纳米管或多壁碳纳米管。

[0020] 其他与具体实施方式一相同。

[0021] 具体实施方式三:本实施方式与具体实施方式一或二之一不同点是:所述的二胺单体为二氨基二苯醚、对苯二胺、4,4'-二氨基二苯砜或 4,4'-二氨基二苯甲烷。其他与具体实施方式一或二相同。

[0022] 具体实施方式四:本实施方式与具体实施方式一至三之一不同点是:所述的有机溶剂为 N,N'-二甲基乙酰胺、N,N'-二甲基甲酰胺或 N-甲基吡咯烷酮。其他与具体实施方式一至三相同。

[0023] 具体实施方式五:本实施方式与具体实施方式一至四之一不同点是:所述的二酐单体为均苯四甲酸酐、联苯四甲酸二酐、偏苯三酸酐、二苯酮二酐或二苯醚二酐。其他与具体实施方式一至四相同。

[0024] 具体实施方式六:本实施方式是一种聚酰亚胺/碳纳米管 X 射线窗口薄膜的制备方法,具体是按以下步骤完成的:

[0025] 一、预混合:首先将二胺单体和有机溶剂加入容器中,并在搅拌速度为 600 转/分的密封条件下搅拌 40min ~ 80min,得到单体二胺/有机溶剂溶液,然后加入碳纳米管,密封后置于超声波水浴中震荡处理,至碳纳米管充分分散于溶剂中,然后在搅拌速度为 600 转/分的密封条件下搅拌 40min ~ 80min,得到预混液;所述的有机溶剂的体积与二胺单体的质量比为 13.3mL:1g。所述的碳纳米管与二胺单体的质量比为 0.021:1;

[0026] 二、终混:按二酐单体与步骤一所述的二胺单体的摩尔比为 1:1 称取二酐单体,然后将二酐单体分成六等份,在搅拌速度为 600 转/分的条件下依次将六份二酐单体加入装有步骤一得到预混液的容器中,且保证当前加入的二酐单体完全的溶解后再加入下一份二酐单体,当最后一份加入的二酐单体完全的溶解后,继续在搅拌速度为 800 转/分的条件下搅拌 1.5h ~ 2.5h,然后将容器置于真空塔中 2h,抽真空去除气泡,得到待涂膜胶体;

[0027] 三、涂膜和热亚胺化处理:利用涂膜机将待涂膜胶体涂覆在干净的玻璃板上,然后依次在温度为 80℃ 下处理 8h、温度为 120℃ 下处理 1h、温度为 150℃ 下处理 1h、温度为 200℃ 下处理 40min、温度为 250℃ 下处理 30min、温度为 280℃ 下处理 30min、温度为 310℃ 下处理 30min 和温度为 340℃ 下处理 3h,然后自然冷却至温度为 20℃ ~ 100℃,得到带薄膜的玻璃板,将带薄膜的玻璃板放入去离子水中进行脱膜处理,得到的薄膜在温度为 90℃ ~ 110℃ 干燥 5h ~ 10h,即得到聚酰亚胺/碳纳米管 X 射线窗口薄膜。

[0028] 聚酰亚胺薄膜作为一种特殊的工程材料,被广泛应用在航空、航天、微电子、纳米、

液晶、分离膜、激光等领域。因其在性能和合成方面的突出特点,不论是作为结构材料或是功能材料,其巨大的应用前景已经得到充分的认识。热固型聚酰亚胺具有优异的热学与力学性能,起始热分解温度大约在 500℃左右,能耐极低的温度,在 -296℃的液氮中不会脆裂;抗张强度在 100Mpa 以上,伸长率大于 120%。

[0029] 碳纳米管的硬度与金刚石相当,却拥有良好的柔韧性,可以拉伸。目前在工业上常用的增强型纤维中,决定强度的一个关键因素是长径比,即长度和直径之比。目前材料工程师希望得到的长径比至少是 20:1,而碳纳米管的长径比一般在 1000:1 以上,是理想的高强度纤维材料。

[0030] 本实施方式通过原位聚合法制备了聚酰亚胺/碳纳米管 X 射线窗口薄膜,利用碳材料较小的原子序数和超强的力学性能,且只含有碳(C)、氢(H)、氮(N)、氧(O)四种元素,其对 X 射线的吸收较小,因此即达到提高聚酰亚胺基体的力学性能,又保持 X 射线高透射率,且本实施方式制备的聚酰亚胺/碳纳米管 X 射线窗口薄膜无毒、绿色和加工成型性好,加工方法简单,可工业化大批量生产,且本实施方式制备的聚酰亚胺/碳纳米管 X 射线窗口薄膜能在裸露空气中使用,所以有效地解决了现有技术制备的铍窗口因有毒不能在裸露空气中使用,且加工困难的问题。

[0031] 本实施方式能够生产环保、经济的 X 射线窗口薄膜,为 X 射线在材料测试领域应用的拓展提供技术保障。

[0032] 本实施方式制备的聚酰亚胺/碳纳米管 X 射线窗口薄膜替代传统的铍窗口,作为 X 射线窗口材料使用。

[0033] 具体实施方式七:本实施方式与具体实施方式六的不同点是:步骤一中所述的改性碳纳米管是按以下方法制备的:

[0034] 方法 1:向碳纳米管中加入浓盐酸,超声处理 8h,用离心机进行固液分离,离心 1 次,用蒸馏水冲洗,冲洗至洗出液 pH 值呈中性为止,于 80℃真空烘箱中干燥 2h,即得到改性碳纳米管;所述的碳纳米管与浓盐酸的体积比为 0.2g:200mL;所述的碳纳米管为单壁碳纳米管或多壁碳纳米管;

[0035] 方法 2:向碳纳米管中加入混酸,室温超声 8h,加蒸馏水稀释,然后静置 12h,倒去上清液,再利用孔径为 0.22 μm 的聚四氟乙烯薄膜过滤,然后采用去离子水洗涤,洗涤至滤液的 pH 值为 5.8~6.2 为止,最后在温度为 80℃下干燥 24h,即得到改性碳纳米管;所述的碳纳米管与混酸的体积比为 0.2g:100mL,其中所述的混酸由质量分数为 98%的 H₂SO₄和浓质量分数为 60%的 HNO₃按质量分数为 98%的 H₂SO₄与浓质量分数为 60%的 HNO₃的体积比为 3:1 混合而成;所述的蒸馏水与混酸的体积比为 12:1;所述的碳纳米管为单壁碳纳米管或多壁碳纳米管。

[0036] 其他与具体实施方式六相同。

[0037] 具体实施方式八:本实施方式与具体实施方式六或七之一不同点是:步骤一中所述的二胺单体为二氨基二苯醚、对苯二胺、4,4'-二氨基二苯砜或 4,4'-二氨基二苯甲烷。其他与具体实施方式六或七相同。

[0038] 具体实施方式九:本实施方式与具体实施方式六至八之一不同点是:步骤一中所述的有机溶剂为 N,N'-二甲基乙酰胺、N,N'-二甲基甲酰胺或 N-甲基吡咯烷酮。其他与具体实施方式六至八相同。

[0039] 具体实施方式十：本实施方式与具体实施方式六至九之一不同点是：步骤二中所述的二酐单体为均苯四甲酸酐、联苯四甲酸二酐、偏苯三酸酐、二苯酮二酐或二苯醚二酐。其他与具体实施方式六至九相同。

[0040] 采用下述试验验证本发明效果：

[0041] 试验一：一种聚酰亚胺/碳纳米管 X 射线窗口薄膜的制备方法，具体是按以下步骤完成的：

[0042] 一、预混合：首先将 4.5g 二氨基二苯醚和 60mL N' N- 二甲基乙酰胺加入容器中，并在搅拌速度为 600 转 / 分的密封条件下搅拌 60min，得到单体二胺 / 有机溶剂溶液，然后加入 0.095g 多壁碳纳米管，密封后置于超声波水浴中震荡处理，至多壁碳纳米管充分分散于溶剂中，然后在搅拌速度为 600 转 / 分的密封条件下搅拌 60min，得到预混液；

[0043] 二、终混：将 4.95g 均苯四甲酸酐分成六等份，在搅拌速度为 600 转 / 分的条件下依次将六份均苯四甲酸酐加入装有步骤一得到预混液的容器中，且保证当前加入的均苯四甲酸酐完全的溶解后再加入下一份均苯四甲酸酐，当最后一份加入的均苯四甲酸酐完全的溶解后，继续在搅拌速度为 800 转 / 分的条件下搅拌 2h，然后将容器置于真空塔中 2h，抽真空去除气泡，得到待涂膜胶体；

[0044] 三、涂膜和热亚胺化处理：利用涂膜机将待涂膜胶体涂覆在干净的玻璃板上，然后依次在温度为 80℃ 下处理 8h、温度为 120℃ 下处理 1h、温度为 150℃ 下处理 1h、温度为 200℃ 下处理 40min、温度为 250℃ 下处理 30min、温度为 280℃ 下处理 30min、温度为 310℃ 下处理 30min 和温度为 340℃ 下处理 3h，然后自然冷却至温度为 60℃，得到带薄膜的玻璃板，将带薄膜的玻璃板放入去离子水中进行脱膜处理，得到的薄膜在温度为 100℃ 干燥 8h，即得到聚酰亚胺 / 碳纳米管 X 射线窗口薄膜。

[0045] 利用 X 射线衍射仪对试验一制备的聚酰亚胺 / 碳纳米管 X 射线窗口薄膜进行透光率测试，测试结果如图 1 所示，图 1 是试验一制备的聚酰亚胺 / 碳纳米管 X 射线窗口薄膜透光率随其厚度变化曲线图；使用的设备型号为 X-Pert，生产厂家为荷兰 Philips 公司。在测试过程中均选用 KaCu 靶，操作电压为 40KV，管电流为 40mA，X 射线波长 $\lambda = 0.15406\text{nm}$ ，窗口透光率与窗口材料质量吸收系数和窗口厚度满足下列负指数函数关系，即

$$[0046] \quad \frac{I}{I_0} = e^{-\mu_m \rho x} \quad (1)$$

[0047] 式中 I_0 —入射 X 射线强度

[0048] I —入射线穿过厚度为 x 的物质后的强度

[0049] μ_m —物质的质量吸收系数

[0050] ρ —物质的密度

[0051] x —物质的厚度

[0052] 对公式 (1) 两边同时取对数可得到 $-\ln I/I_0 = \mu_m \rho x$ (2)，根据公式 (2) 绘制试验一制备的聚酰亚胺 / 碳纳米管 X 射线窗口薄膜的 X 射线质量吸收系数曲线图，如图 2 所示，经计算可得试验一制备的聚酰亚胺 / 碳纳米管 X 射线窗口薄膜质量吸收系数约为 $6\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ (ρ 取 $1.35\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)。

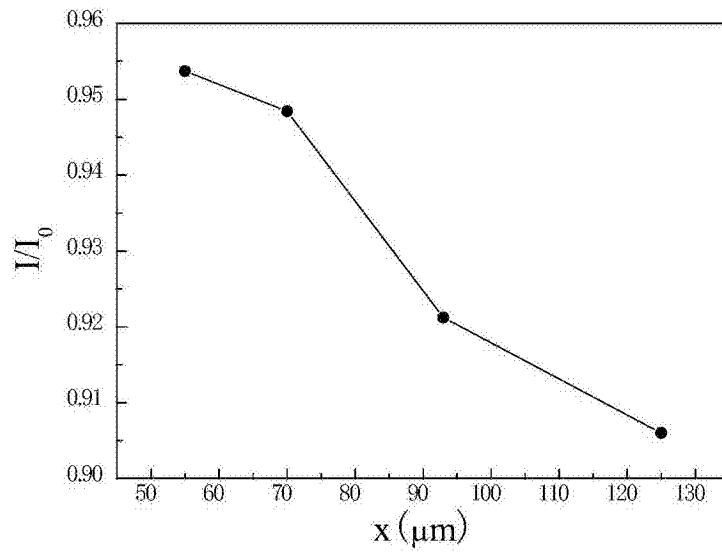


图 1

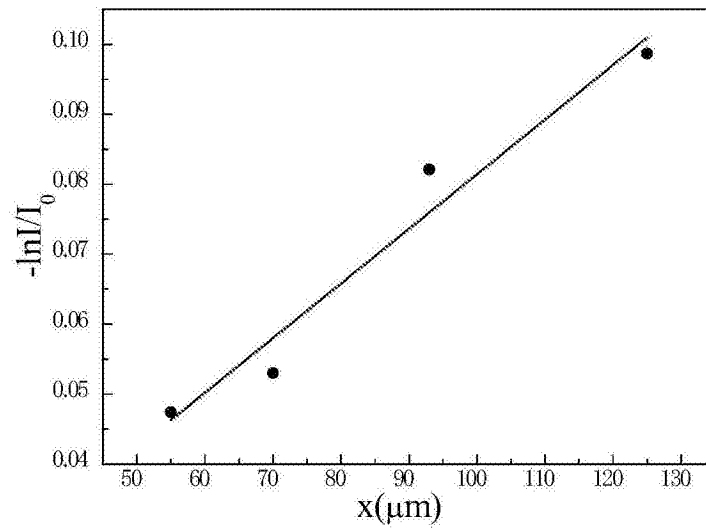


图 2