

# 防 X 射线稀土/聚丙烯复合纤维的制备及性能研究

谷春燕, 孙 宽, 张玉芳, 贾清秀

(北京服装学院, 北京 100029)

**摘 要:** 通过密炼机将纳米稀土和聚丙烯(PP)共混, 然后对共混物进行熔融纺丝, 采用红外、差示扫描量热、X 射线衍射、扫描电子显微镜测试等手段对所得纤维进行结构性能表征, 并将短纤维层压作防辐射测试。实验结果表明, 氧化镧质量分数在 60% 以内, 其在聚丙烯基体中呈纳米级不均匀分散; 随着氧化镧加入量的增加, 铅当量也相应增加, 稀土/聚丙烯复合防护纤维具有较好的 X 射线防护功能。

**关键词:** 稀土; 防 X 射线; 纤维; 铅当量

**中图分类号:** TB33

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2017)09-2633-06

近年来, 随着核科学和核工业的发展, 辐射问题越来越严重, 各种射线对人类以及环境产生的影响也越来越被人们重视, 射线防护材料的开发和应用研究也成为现代生活中必不可少的重要组成部分。核电、航空、医院等工作场所中大部分光子的能量低于 100 keV<sup>[1-3]</sup>。辐射剂量中, 医疗照射剂量占 94%, 而 X 射线诊断占 88%。医疗照射既是人为活动集体剂量的最大来源, 又是利用辐射获利人数最多的实践, X 射线诊断的辐射防护不仅对工作人员十分重要, 对受检者的防护也十分重要<sup>[4]</sup>。目前许多国际组织如国际放射防护委员会(ICRP)、国际原子能机构(IAEA)、世界卫生组织(WHO)等很重视医疗辐照, 以求在不损害医疗效果的条件下, 大大减少集体剂量, 并使每个患者和受检者得到更好的保护, 因此相关人员需要大量的优质防辐射衣服<sup>[5,6]</sup>。

铅作为一种传统的防辐射材料, 应用十分广泛, 但铅毒性大且对能量介于 40~88 keV 之间的医用 X 射线的粒子吸收能力却较差<sup>[7]</sup>。目前使用中的无铅医用 X 射线屏蔽材料主要采用橡胶共混高填充的防辐射功能填料<sup>[8,9]</sup>, 由于橡胶材料具有透气性差、需要硫化加工、不易制备轻薄制品、力学性能低、硫化胶不能回收等缺点, 这种橡胶防辐射服的推广使用存在很大的问题。齐鲁等人在防 X 射线纤维方面做了很多研究, 采用自制固体屏蔽剂填充 PP, 而自制屏蔽剂粒径较大, 导致纤维产生许多缝隙、空洞等结构缺陷<sup>[10-12]</sup>。

我国稀土资源丰富, 稀土应用一直受到国家的高度重视, 从“七五”到“十五”均将稀土应用列为专项。稀土作为新型的 X 射线屏蔽剂在近几年引起了关注。稀土是一种有效的 X 射线屏蔽功能材料, 其防辐射性能随着稀土含量的提高而增加。该材料无毒, 是一种安全有效的防护材料。而目前采用稀土作为射线屏蔽剂与 PP 纺丝制备防 X 射线纤维鲜有人报道。针对以上问题, 本课题以自身具有射线吸收能力的 PP 为基体, 以具有 40~80 keV 的粒子吸收能力的纳米稀土为射线吸收剂, 采用熔融共混复合纺丝法开发出一种质轻且高防护的纤维材料, 详细探究所得纤维材料的结构性能及 X 射线防护功能。

## 1 实 验

**主要原材料:** 纳米氧化镧(La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 纯度>99%, 北京兴泰中研新材料贸易有限公司; 等规聚丙烯(iPP Z30S 纺丝纤维级), 中国石油大庆炼化公司。

**试样制备:** 采用密炼机制备一系列不同含量的稀土/PP 共混料, 造粒备用, 稀土 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 质量分数分别为 23%, 33%, 43%, 50%, 55%, 60%。将所制备的稀土/PP 共混料在 Haake MiniLabII 型双螺杆微量混合挤出仪上纺丝, 纺丝工艺参数: 温度为 215 °C, 喷丝孔直径为 0.1 mm, 螺杆转速为 45 r/min, 卷绕速率为 6 m/min。所得纤维在真空压膜机上压制成形得短纤维层压板, 用于铅当量测试。

**收稿日期:** 2016-09-01

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(51273005); 北京市教委市属高校创新能力提升计划项目(TJSHG201510012014); 北京市教委科技发展计划重点项目暨北京自然科学基金资助重点项目(KZ201110012016); 北京市教委青年拔尖人才项目(CIT&TCD201404023)

**作者简介:** 谷春燕, 女, 1988 年生, 硕士生, 北京服装学院材料科学与工程学院, 北京 100029, 电话: 010-64288283, E-mail: 1291168842@qq.com

性能测试：红外光谱分析采用德国 BRUKER OPTIK GMBH 公司的 TENSOR 27 型傅里叶变换红外光谱仪 (TENSOR 27 Fourier Transform Infrared Spectrometer), 扫描范围: 4000~500  $\text{cm}^{-1}$ 。

采用 Seiko Instruments Inc 生产的 6200 型差示扫描量热仪对样品进行升温过程中热量变化的测试。测试条件为: 试样 (重约 5 mg) 放在铝坩埚中, 在氮气气氛的保护下, 以 20  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  的升温速率将温度由 30  $^{\circ}\text{C}$  升到 220  $^{\circ}\text{C}$ , 恒温 5 min 以消除热历史, 随后以 10  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  的降温速率将温度降至 -20  $^{\circ}\text{C}$ , 再以 10  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  的升温速率将温度由 -20  $^{\circ}\text{C}$  升温到 220  $^{\circ}\text{C}$ , 记录样品的升温 and 降温曲线。

采用日本理学电机公司生产的 Rigaku D/Max-III C 型 X 射线衍射仪进行试样测试, 扫描范围: 6~50 $^{\circ}$ ; 扫描速率 5  $^{\circ}/\text{min}$ 。实验条件为: 铜靶 Ni 过滤, 工作电压 40 kV, 电流 50 mA, 连续扫描。

采用德国耐驰公司生产的 TG209F1 热重分析仪对样品进行测试, 温度 30~500  $^{\circ}\text{C}$ , 氮气保护。

采用日本电子公司生产的 JSM-7500F 扫描电子显微镜对喷金样品进行扫描电镜测试。采用日本电子公司生产的 JEM-2100F 场发射高分辨透射电子显微镜对切片样品进行测试。

采用德国飞利浦公司 MG324 高稳定度 X-射线机和奥地利科学研究中心 PTWDCI-8500 精密积分电流计 (采用 120 kV, 2.5 mmAl 的 X 射线) 对稀土/PP 复合纤维层压板进行测试。方法是在片材上取 5 点 (每点为半径 2.5 cm 的圆) 测试, 然后取平均值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 傅里叶红外光谱分析 (FT-IR)

图 1 为稀土及不同填充量的稀土/PP 复合防护纤维的红外谱图。由图 1a 可以看出, 631  $\text{cm}^{-1}$  为稀土  $\text{La}_2\text{O}_3$  的特征峰, 即 La-O 键伸缩振动峰。3601  $\text{cm}^{-1}$  为 O-H 伸缩振动峰, 是由于测试过程中样品吸水造成的。在图 1b 中不同填充量稀土/PP 复合防护纤维中  $\text{La}_2\text{O}_3$  的出峰位置没有发生变化, 1465 和 1380  $\text{cm}^{-1}$  为  $-\text{CH}_3$  的非对称与对称弯曲振动峰, 2840、2950  $\text{cm}^{-1}$  是 C-H 的伸缩振动<sup>[13]</sup>, 从红外谱图上可以看出, PP 的特征峰没有因稀土  $\text{La}_2\text{O}_3$  的加入而发生红移或者蓝移, 氧化镧的加入并未改变 PP 的特征峰, 可知氧化镧与 PP 之间没有发生化学键的作用, 结合其它数据可知  $\text{La}_2\text{O}_3$  和 PP 之间存在一定的物理相互作用。

### 2.2 差示扫描量热分析 (DSC)

图 2 为所制备的各稀土/PP 复合防护纤维的 DSC 曲线。由图 2 可以看出, 等规聚丙烯 (iPP) 含有 2 种晶

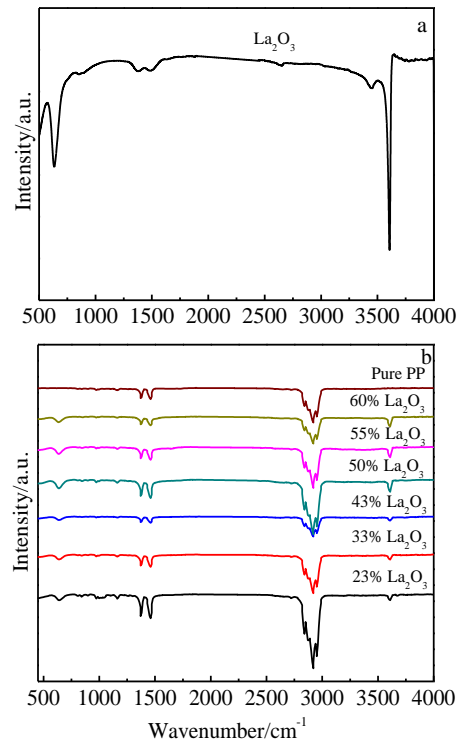


图 1 稀土及不同填充量的稀土/PP 复合防护纤维的红外图谱  
Fig.1 FTIR spectra of rare earth and rare earth/PP shielding fibers filled with different contents of rare-earth

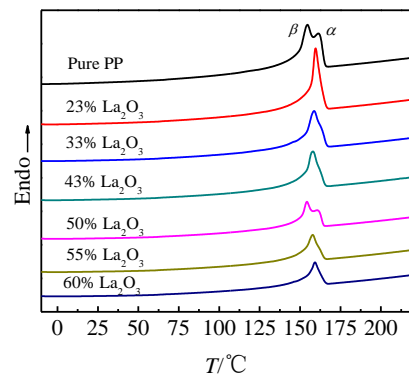


图 2 不同填充量的稀土/PP 复合防护纤维的 DSC 曲线  
Fig.2 DSC thermograms of rare earth/PP shielding fibers filled with different contents of rare-earth

体即  $\alpha$  型和  $\beta$  型, 其中  $\beta$  晶型熔点为 154.5  $^{\circ}\text{C}$ ,  $\alpha$  晶型熔点为 161.6  $^{\circ}\text{C}$ 。稀土含量为 23% 时, 复合纤维的熔点为 159.6  $^{\circ}\text{C}$ , 氧化镧粒子含量从 23% 增加到 43% 时, 破坏了 iPP 部分  $\beta$  型晶体, 导致熔点逐渐下降。当稀土添加量为 50% 时,  $\alpha$  型晶体受到破坏, 其所占比例下降, 复合纤维存在两个熔点, 说明大量稀土粒子的加入会破坏 iPP 的结晶性能。稀土添加量从 55% 增加到 60% 时, 复合纤维的熔点又有所增加, 说明大

量稀土粒子的加入使得 iPP 分子链链段间的位阻增大，链段更难运动造成的。

表 1 给出了所制备的各稀土/PP 复合防护纤维的熔融温度 ( $T_m$ )、熔融吸热焓 ( $\Delta H_f$ ) 及结晶度( $X_c$ )。由于 100% 结晶 iPP 的热焓在不同文献中数值差异较大，在此选择较为权威等规 PP 的文献值，即 165 J/g 用于 iPP 结晶度的计算<sup>[14]</sup>。从表 1 中可以看出 iPP 的结晶度随着稀土含量的增加而降低，这是由于高含量稀土的添加致使 iPP 链段从熔融态到结晶态的分子重排受阻，破坏 iPP 的结晶性能，使得结晶度下降，从 XRD 图谱中可得出同样的结论。

### 2.3 广角 X 射线衍射分析 (XRD)

图 3 为纯 iPP 的 X 射线衍射图谱，表 2 给出了纯 iPP 的 XRD 具体数据。表 2 中，Peak 2 对应面间距为 0.552 nm，为  $\beta$  型晶型特征峰；Peak 1、Peak 3、Peak 4 3 个峰对应面间距分别为 0.6，0.5 和 0.5 nm，为  $\alpha$  型结晶特征峰。由此判定纯 iPP 有 2 种晶体，即  $\alpha$  型晶体和  $\beta$  型晶体。

差热扫描量热法 (DSC) 测定纯 PP 结晶度为 48.2%，而广角 X 射线衍射法 (XRD) 测定纯 PP 结晶度为 81.4%。两者结果差异较大，这是由于测试方法

表 1 不同填充量的稀土/PP 复合防护纤维的 DSC 数据  
Table 1 DSC data of rare earth/PP shielding fibers filled with different contents of rare-earth

La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> content, $\omega/\%$	$T_m/^\circ\text{C}$	$\Delta H_f/\text{J g}^{-1}$	$X_c/\%$
Pure PP	154.5( $\beta$ ) 161.6( $\alpha$ )	79.5	48.2
23	159.6	65.1	39.5
33	158.7	52.6	31.9
43	158.0	45.5	27.6
50	154.3( $\beta$ ) 160.9( $\alpha$ )	39.0	23.7
55	157.9	35.1	21.3
60	159.2	29.7	18.0

Note:  $\Delta H_f^0$  of  $X_c(\text{PP})=100\%$  is 165.0 J/g<sup>[14]</sup>

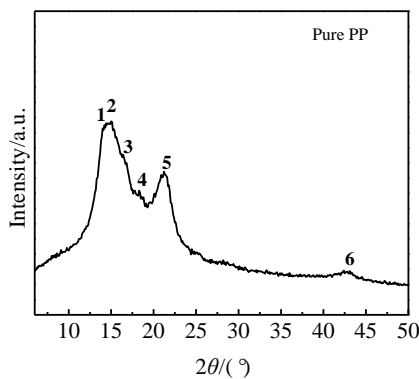


图 3 纯 PP 的 X 射线衍射图谱  
Fig.3 XRD pattern of pure PP

表 2 纯聚丙烯 XRD 数据

Table 2 XRD data of pure PP

Pure PP	Peak positions/( $^\circ$ )	Area integral	Belonging	K	$X_c/\%$
Peak 1	13.4	0.4	Crystal		
Peak 2	14.8	8.4	Crystal		
Peak 3	16.6	1.3	Crystal		
Peak 4	18.4	4.9	Crystal	1.0	81.4
Peak 5	21.1	7.9	Crystal		
Peak 6	42.5	24.9	Crystal		
Base line	-	10.9	Amorphous		

原理不同，DSC 法是在消除热历史的前提下，记录其升温曲线，晶区链在消除热历史的过程中链段发生重排，势必造成晶区链取向度下降，而 XRD 法则直接测定纤维晶区链的取向。两种方法所测结晶度差别较大是由于晶区对各种性能贡献程度不同。

图 4 为不同填充量的稀土/PP 复合防护纤维的 X 射线衍射图。由图 4 可知，La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在  $2\theta=15.7^\circ$  和  $2\theta=27.9^\circ$  出现特征峰。随着 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量的增加，其特征峰愈加明显；当 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 填充量为 23% 时，iPP 的  $\beta$  型特征峰消失，只有  $\alpha$  型特征峰存在，结合 DSC 谱图数据分析判断，稀土添加量为 23% 时，iPP 中部分  $\beta$  型晶体遭到破坏， $\beta$  型峰变弱而  $\alpha$  型峰变强， $\alpha$  型的强峰掩盖了  $\beta$  型的弱峰。随着稀土 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量继续增加，iPP 由  $\alpha$  型的峰变为馒头峰甚至消失，说明高含量稀土 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粒子的添加破坏 PP 的结晶性能，降低了 PP 的结晶度。

### 2.4 热失重分析 (TG)

图 5 为不同填充量的稀土/PP 复合防护纤维的热失重曲线，表 3 列出了各样品的具体热失重数据。当稀土含量从 23% 增加到 43% 时，稀土/PP 复合防护纤维的分解温度逐渐增大，这是由于 PP 两种晶型中的部分  $\beta$  型晶体遭到破坏从而使  $\alpha$  型晶体所占比例增加。这与 DSC 及 XRD 所得结论一致；当稀土 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 添加量为 50% 时，分解温度下降至 373.1  $^\circ\text{C}$ ，这主要是因

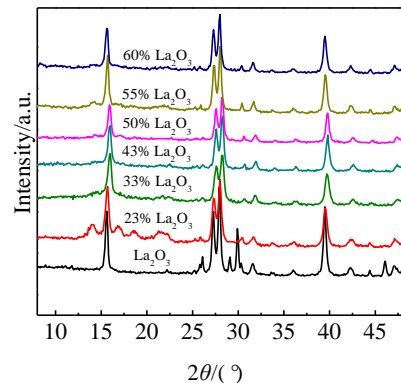


图 4 不同填充量的稀土/PP 复合防护纤维的 XRD 图谱  
Fig.4 XRD patterns of rare earth/PP shielding fibers filled with different contents of rare-earth

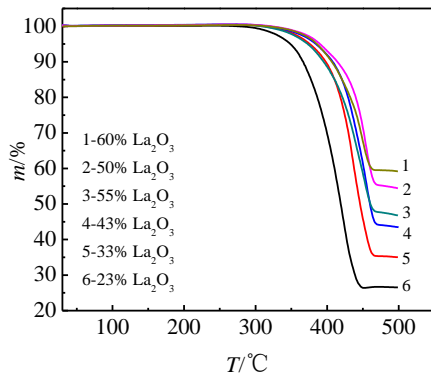


图 5 不同填充量的稀土/PP 复合防护纤维的 TG 曲线

Fig.5 TG thermograms of rare earth/PP shielding fibers filled with different contents of rare-earth

表 3 不同填充量的稀土/PP 复合防护纤维的 TG 数据

Table 3 TG data of rare earth/PP shielding fibers filled with different contents of rare-earth

La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> content, ω/%	T <sub>5%</sub> /°C	T <sub>f</sub> /°C	Residue mass/%
23	348.3	452.1	25
33	375.3	468.0	34
43	384.1	469.0	43
50	373.1	468.9	48
55 <sub>3</sub>	390.2	469.0	55
60	386.3	462.0	60

为大量稀土的添加破坏了 iPP 的结晶性能；随着稀土含量的继续增加，复合防护纤维的分解温度又有所增加，这是因为 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粒子与 PP 之间存在一定的作用力，使得链段的键能增加，分子主链运动困难。所制备复合防护纤维稀土 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的理论含量分别为 60%，55%，50%，43%，33%，23%，从表 3 可知复合纤维在最终分解温度时的残余留量与理论值基本相符。

2.5 扫描电子显微镜分析 (SEM)

图 6 为稀土扫描电镜照片。从图 6 可以看出稀土 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粒径基本在纳米范围内。粒径越小，分布越均匀、越紧密，复合纤维内吸收原子的电子密度越大，从而对

光电子的吸收效率更高，防辐射性能也更好<sup>[15,16]</sup>。

图 7 为稀土 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量 23% 的复合防护纤维扫描电镜照片。从图 7 可看出纤维轮廓圆润清晰，纤维表面相对光滑。为使稀土与 PP 达到良好的共混效果，须采用最佳的共混条件，共混温度 190 °C，适当提高螺杆转速以增加螺杆之间的机械剪切作用，适当增加共混时间均有利于稀土与 PP 的共混。

2.6 透射电镜分析 (TEM)

图 8 为不同填充量的稀土/PP 复合防护纤维的 TEM 照片。从图 8 可以看出当稀土含量从 23% 提高到 60% 时，稀土 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粒径基本在纳米级，但低分数下稀土在基体中分散不是很均匀。虽然采用纳米氧化镧来做射线吸收剂，但由于氧化镧为无机物，其与 PP 基体之间的相容性较差，而实验中稀土的填充量又较高，仅靠密炼机的机械剪切作用不能使稀土在 PP 基体中达到很好的分散，部分颗粒由于未能受到有效的机械剪切作用，不可避免会出现一定的团聚现象。这就使得复合纤维中存在一些无稀土的“缺陷”部分，这些缺陷部分不能阻止辐射线粒子的通过，在一定程度上就降低了这个材料的防辐射性能<sup>[17]</sup>。因此后续实验中采用多层纤维层压制防护材料可减少无稀土的“缺陷”部分，从而提高复合材料的防护性能。

2.7 防辐射性能分析

通常由 130 kVp 以下医用 X 射线管电压产生的 X

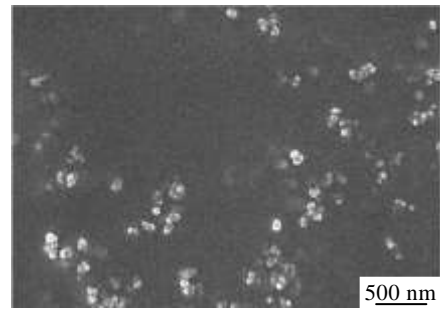


图 6 稀土扫描电镜照片

Fig.6 SEM image of rare earth

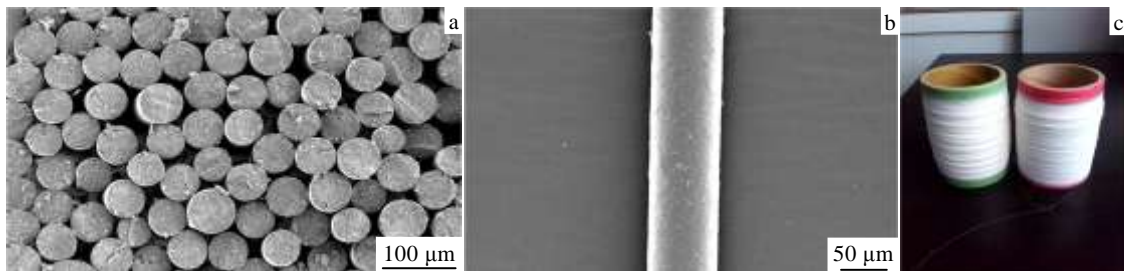


图 7 稀土含量为 23% 的复合防护纤维扫描电镜和实物照片

Fig.7 SEM images (a, b) and digital photograph (c) of rare earth/PP shielding fiber filled with 23% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> rare-earth

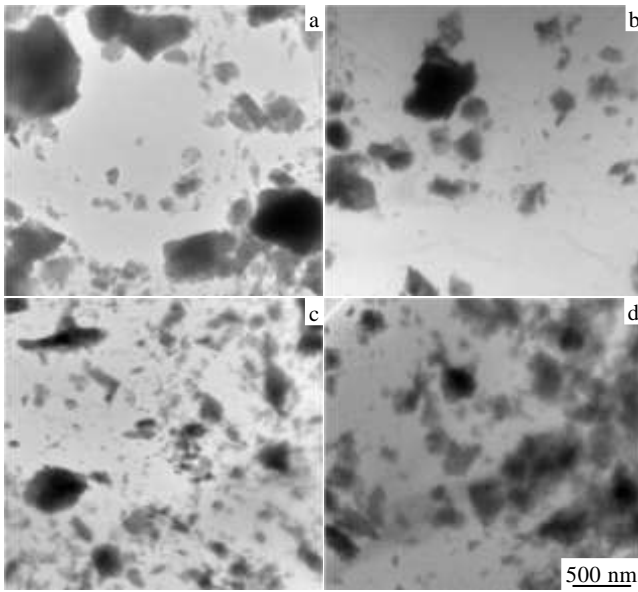


图 8 不同填充量的稀土/PP 复合防护纤维的 TEM 照片  
 Fig.8 TEM images of rare earth/PP shielding fibers filled with different contents of rare-earth: (a) 23% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (b) 33% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (c) 50% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and (d) 60% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

射线绝大多数粒子，其能量低于 88 keV，为了考察各稀土含量复合纤维的屏蔽效果，选定 120 kVp 管电压作为测试条件。

表 4 给出了各稀土含量复合防护纤维的相关数据及铅当量值。从表 4 可以看出随着稀土氧化镧含量的增加，稀土/PP 复合防护纤维铅当量值逐渐增大，起屏蔽作用的稀土分散相，它在 PP 基体分散性的提高将有利于屏蔽性能的提高，且随着稀土含量的增加，铅当量值也相应增加。当氧化镧含量从 23% 增加到 60% 时，相应铅当量的值从 0.04 mmPb 增加到 0.22 mmPb；从复合防护纤维密度变化来看，随着氧化镧加入量的增加，密度逐渐增大；厚度质量为单位面积复合防护纤维层压板的质量，同样面积下的样品越厚值越大。即材料的密度越大，X 线衰减也越大，其防护效果越好<sup>[18]</sup>。

图 9 为稀土含量为 60% 复合防护纤维铅当量随管电压的变化。从图 9 可以看出同一个样品的防护材料的铅当量并不是一个固定不变的，其铅当量是随着检测时使用的 X 射线峰值管电压变化而变化。改变 X 射线峰值管电压的本质是改变 X 射线光子的能量，X 射线输出量与管电压  $n$  次方成正比<sup>[19]</sup>，在 X 射线束的总过滤不变的前提下，增加 X 射线峰值管电压，也就是增加了 X 射线的高端能量光子的成分，因而使得 X 射线谱的平均能量向高端能量移动<sup>[20]</sup>。稀土元素的 <sup>7</sup>La<sub>139</sub> 的 K 层能量吸收边为 38.9324 keV，一般认为 X 射线

表 4 不同填充量的稀土/PP 复合防护纤维的铅当量值

Table 4 Lead equivalent data of rare earth/PP shielding fibers filled with different contents of rare-earth

La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> content, ω/%	Thickness/mm	Mass of unit area/g cm <sup>-2</sup>	Lead equivalent/mmPb	Density/g cm <sup>-3</sup>
23	3.0	0.31	0.04	1.03
33	4.0	0.42	0.09	1.05
43	4.0	0.44	0.14	1.11
50	4.3	0.50	0.17	1.16
55	3.0	0.43	0.17	1.43
60	3.0	0.46	0.22	1.53

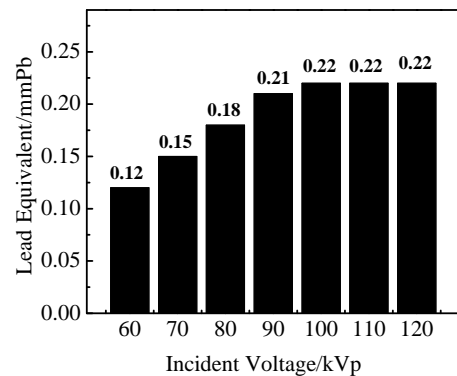


图 9 稀土含量为 60% 复合防护纤维铅当量随管电压的变化

Fig.9 Lead equivalents against kVp on X-ray tube of shielding fiber with 60% content of rare-earth

的等效能量是在 X 射线管电压的 3/5 处<sup>[21]</sup>，当管电压为 100 kVp 时，入射光子的能量主要集中在 40~45 keV，与 La 元素的 K 层吸收边能量接近，易于此复合防护纤维材料的吸收，铅当量值大；当管电压低于 100 kVp 时，入射光子的能量随之降低，远离 La 元素的 K 层吸收边能量，因此 X 射线不能被此复合防护纤维充分吸收，铅当量值小。此稀土/PP 复合防护纤维材料的铅当量随着管电压先增加后稳定在 0.22 mmPb。

### 3 结 论

1) 通过哈克密炼共混、熔纺纺丝制备了不同稀土含量的稀土氧化镧/聚丙烯复合防护纤维，发现当氧化镧质量分数从 23% 增加到 60% 时，氧化镧在 PP 基体中呈纳米级不均匀分散。

2) 随着氧化镧加入量的增加，铅当量也相应增加，具有较好的 X 射线防护功能，所制备稀土/PP 复合防护纤维能够在保证屏蔽性能的前提下满足材料质轻的要求。

#### 参考文献 References

[1] Kipp L, Skibowski M, Johnson R L et al. Nature[J], 2001,



- 414(6860): 184
- [2] Khan M N, Joseph G, Khaykin Y *et al.* *Pacing and Clinical Electrophysiology*[J], 2005, 28(3): 251
- [3] Shimizu Shigeo. *Japan Patent, JP1 1036131*[P]. 1999
- [4] Wu Yi(吴毅), Du Guosheng(杜国生), Lou Yun(娄云). *Protective Against Diagnostic Medical X-radiation*(医用诊断 X 射线的辐射防护)[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2007: 2
- [5] Li Huafeng(李华锋), Song Shaojuan(宋少娟). *Chinese Journal of Radiological Health*(中国辐射卫生)[J], 2010, 19(2): 171
- [6] Hu Huasi(胡华四), Xu Hu(许浒), Zhang Guoguang(张国光) *et al.* *Atomic Energy Science and Technology*(原子能科学与技术)[J], 2005, 39(4): 363
- [7] Hu Yanqiao(胡艳巧). *Thesis for Master Degree*(硕士学位论文)[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2010
- [8] Yuan Xiaolu(原小路). *Thesis for Master Degree*(硕士学位论文)[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2010
- [9] Tang Jie(唐杰), Liu Xiankun(刘显坤), Wei Chengfu(魏成富) *et al.* *Nuclear Electronics & Detection Technology*(核电子学与探测技术)[J], 2007, 27(6): 1142
- [10] Jia Huaming(贾华明), Qi Lu(齐鲁). *China Synthetic Fiber Industry*(合成纤维工业)[J], 2006, 28(5): 30
- [11] Qi Lu(齐鲁), Duan Jinyuan(段谨源), Wang Xuechen(王学晨) *et al.* *Journal of Textile Research*(纺织学报)[J], 1995, 16(02): 23
- [12] Qi Lu(齐鲁), Duan Jinyuan(段谨源). *Polymer Materials Science & Engineering*(高分子材料科学与工程)[J], 1996, 12(1): 135
- [13] He Yan(贺燕), Zhang Huiping(张辉平), Xu Duanfu(徐端夫). *China Synthetic Fiber Industry*(合成纤维工业)[J], 2004, 27(2): 56
- [14] Wunderlich R. *Thermal Analysis*[M]. New York: Academic Press, 1990
- [15] Liu L, He L, Yang C *et al.* *Macromolecular Rapid Communications*[J], 2004, 25(12): 1197
- [16] Wu Xiaofei(吴小飞). *Thesis for Master Degree*(硕士学位论文)[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2007
- [17] He Lei(贺磊). *Thesis for Master Degree*(硕士学位论文)[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2005
- [18] Zhao Shian(赵士庵), Wei kedao(尉可道), Ou Xiangming(欧向明). *China Medical Equipment*(中国医学装备)[J], 2013, 10(2): 8
- [19] Liu L, Zhang L, Hu S *et al.* *U S Patent 8,728,349*[P]. 2014
- [20] Ou Xiangming(欧向明), Zhao Shian(赵士庵), Li Mingsheng(李明生). *China Medical Equipment*(中国医学装备)[J], 2008, 5(6): 4
- [21] Zhao Shian(赵士庵), Ou Xiangming(欧向明). *Chinese Journal of Radiological Health*(中国辐射卫生)[J], 2006, 15(4): 409

## Preparation and Properties of X-ray Shielding Rare Earth/Polypropylene Composite Fibers

Gu Chunyan, Sun Kuan, Zhang Yufang, Jia Qingxiu

(Beijing Institute of Fashion Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Rare earth/Polypropylene (PP) shielding fibers filled with different contents of rare-earth have been prepared by melt spinning. The fibers were characterized by the Fourier-transformed infrared spectroscopy (FT-IR), differential scanning calorimetry (DSC), X-ray diffraction spectroscopy (XRD), and scanning electron micrographs (SEM). Short fibers were compression-molded for the test of lead equivalent. The results show that when the rare earth content is less than 60 wt%, rare earth can be dispersed in the PP matrix with nano-scale, and X-ray shielding performance of the fibers is enhanced with the increase of content of rare-earth.

**Key words:** rare earth; X-ray shielding; fiber; lead equivalent

Corresponding author: Jia Qingxiu, Ph. D., Professor, School of Materials and Engineering, Beijing Institute of Fashion Technology, Beijing 100029, P. R. China, E-mail: jiaqingxiu@163.com