

文章编号: 1000-7032(2026)05-0736-08

铟化合物掺杂塑料闪烁体制备与性能研究

李 雯^{1,2}, 陈楚鑫^{1,2}, 李云云^{1*}, 李焕英¹, 吴云涛^{1*}

(1. 中国科学院上海硅酸盐研究所 功能晶体与器件全国重点实验室, 上海 201899;

2. 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院, 北京 100049)

摘要: 塑料闪烁体具有低成本、环境稳定性好、易于大尺寸制备等优点, 在辐射探测领域有着广泛的应用。常见的塑料闪烁体由于有效原子序数低, 导致探测效率不足, 限制了它们在高能辐射探测领域等进一步应用。已有多种方法将具有高有效原子序数的材料引入到塑料闪烁体中, 其中有机重金属化合物由于具有有机物的部分性质, 可以在聚合物基质中溶解, 为提高塑料闪烁体的射线阻止能力和探测效率提供了一种更有效的途径。本文选用三(2,4-戊二酮酸)铟(Ⅲ)(In(acac)₃)作为掺杂剂, 首次成功制备了一系列不同 In(acac)₃ 掺杂浓度的塑料闪烁体, 系统性研究了掺杂浓度对塑料闪烁体的光学和闪烁性能的影响。随着掺杂浓度的增加, 塑料闪烁体的有效原子序数逐渐增加, 吸收系数增大, 但光产额逐渐降低。其中, 质量分数 3% In(acac)₃ 掺杂塑料闪烁体在光产额和探测效率之间达到均衡状态, 实现了伽马计数率的提升。

关键词: 塑料闪烁体; 铟化合物; 光学性能; 闪烁性能

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20260017

CSTR: 32170.14.CJL.20260017

Preparation and Properties of Indium Compounds
Doped Plastic ScintillatorsLI Wen^{1,2}, CHEN Chuxin^{1,2}, LI Yunyun^{1*}, LI Huanying¹, WU Yuntao^{1*}

(1. State Key Laboratory of Functional Crystals and Devices, Shanghai Institute of Ceramics,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201899, China;

2. Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding Authors, E-mail: liyunyun225@163.com; ytwu@mail.sic.ac.cn

Abstract: Plastic scintillators have been extensively used in the field of radiation detection due to their low cost, good environmental stability, and simple large-scale preparation. Common plastic scintillators generally have insufficient detection efficiency due to their low effective atomic number, which limits their further application in high energy radiation and other fields. There are various methods to introduce materials with high effective atomic number into plastic scintillators. Among them, organic heavy metal compounds, due to their partial properties as organic compounds, can dissolve in polymer matrices, providing a more effective way for plastic scintillators to improve radiation stopping power and detection efficiency. In this work, tris(2,4-pentanedionato)indium(Ⅲ)(In(acac)₃) was selected as a dopant, plastic scintillators doped with different concentrations of In(acac)₃ were successfully prepared for the first time, and the changes in optical and scintillation properties of plastic scintillators with different doping concentrations were systematically studied. As the doping concentration increases, the effective atomic number and absorption coefficient of the plastic scintillator gradually increase, while the light yield progressively decreases. Among them, mass fraction 3% In(acac)₃ doped plastic scintillator achieves an optimal balance between light yield and detection efficiency, resulting in an enhanced gamma count rate.

Keywords: plastic scintillators; indium compounds; optical properties; scintillation properties

收稿日期: 2026-01-15; 修订日期: 2026-02-04

基金项目: 广东省重点领域研发计划(2024B0101070003); 国家自然科学基金(12575331, 12305211, 12575203)

Supported by Guangdong S&T Programm (2024B0101070003); National Natural Science Foundation of China (12575331, 12305211, 12575203)

1 引言

塑料闪烁体自1950年被Marvin G Schorr和Franklin L Torney等^[1]首次研制以来,由于其快衰减时间、良好的光产额、低成本以及易于实现大尺寸与多样化形状加工的特点,在高能物理、辐射环境监测、核安全以及光子计数等领域得到了广泛的应用^[2-3]。塑料闪烁体通常由合适的聚合物单体与初级和次级荧光染料聚合而成。碳和氢等轻元素作为其主要组成元素,因此塑料闪烁体的密度(1.03 g/cm^3)和有效原子序数(4.5)一般较低^[4]。这导致塑料闪烁体对伽马射线辐射的阻止能力和探测效率不足,限制了它们的探测灵敏度和在高能辐射探测领域的进一步应用^[5-6]。为解决这一瓶颈,引入高原子序数元素是直接有效的途径^[7]。

近年来,已有多种方法将具有高有效原子序数的材料引入到塑料闪烁体中^[8-9],例如以无机纳米粒子/量子点或有机金属化合物的形式进行掺杂,旨在提高塑料闪烁体对伽马射线的相互作用概率。然而,由于纳米粒子的高比表面积和表面能,加上聚合物的强烈排斥效应,使得纳米粒子在塑料闪烁体内易于团聚,进而产生相分离。这导致塑料闪烁体的透过率一般较低,且随着纳米粒子掺杂量的提高而急剧下降^[10-11]。有机金属化合物与塑料闪烁体均以有机形式存在,可以确保其在聚合物基质中的溶解性,更易于在不引入宏观缺陷的情况下制备混合均匀的掺杂塑料闪烁体,减少因低透过率而造成的光损失问题。例如,Matthieu等^[12]已开发出具有高含量的有机铅化合物掺杂塑料闪烁体,而没有明显的光学性能损失。尽管有机金属化合物掺杂塑料闪烁体已取得了很大的进展,但通常随着掺杂浓度的增加,重原子会猝灭发出的光子,显著降低光产额。例如,Bertrand等^[13]制备了多种有机铋化合物掺杂塑料闪烁体,随着 Bi(Ph)_3 化合物掺杂质量分数最高提升至23.5%,计数率虽明显增加,但光产额从9 900 ph./MeV急剧下降至1 000 ph./MeV。因此,需要在探测效率与光产额之间取得最佳权衡。

此外,有机金属化合物掺杂塑料闪烁体的大多研究都集中在有机铅、锡和铋化合物,对于其他有机金属化合物掺杂塑料闪烁体的研究很少^[14-15]。因此,有必要探寻更多可溶解于塑料基质的有机金属化合物,为进一步改善塑料闪烁体的性能提供更多可能。钨元素与锡元素具有相近的有效原

子序数。有机钨化合物种类繁多,将其作为掺杂剂可增加塑料闪烁体的有效原子序数,进而提升其对伽马射线的阻止能力。部分有机钨化合物已被用于太阳中微子探测用液体闪烁体中,表现出缩短中子俘获时间、增强伽马信号及抑制本底噪声等良好特性^[16-18]。然而,液体闪烁体普遍存在挥发性和泄漏风险,限制了其部分实际应用。考虑到液体闪烁体常用基质烷基苯与塑料闪烁体基质在化学结构上的相似性,有机钨化合物有望成为塑料闪烁体中一种有潜力的掺杂剂,这也为发展新型高性能塑料闪烁体提供了新的可行路径。

本文选用三(2,4-戊二酮酸)钨(Ⅲ)(简写为 In(acac)_3)作为掺杂剂,首次报道了一种有机钨化合物掺杂的聚乙烯甲苯(PVT)基塑料闪烁体,并且系统研究了不同掺杂浓度对样品吸收系数、光学和闪烁等性能的影响。此外,通过工艺优化,引入自由基引发剂,抑制了高掺杂浓度下 In(acac)_3 化合物在塑料闪烁体中的析出现象,成功制备了最高掺杂质量分数为13%的 In(acac)_3 掺杂塑料闪烁体。本研究不仅拓展了有机钨化合物在塑料闪烁体中的应用,为发展高掺杂浓度塑料闪烁体提供了有效的工艺路径,对开发新型高探测效率塑料闪烁体也提供了可行路径和实验依据。

2 实验

2.1 主要原料

选用来源于TCI公司、纯度98%的乙烯基甲苯(VT)作为塑料闪烁体的基质。选择从Sigma-Aldrich公司获得的纯度99%的2,5-二苯基噁唑(PPO)作为初级荧光染料,1,4-双[2-(5-苯基噁唑基)]苯(POPOP)作为移波剂,这两种荧光染料都需要再次烘干后使用。选用从Adamas公司获得的纯度>98%的2,2'-偶氮双异丁腈(AIBN)作为自由基引发剂,用乙醇多次重结晶后使用; In(acac)_3 化合物从Innochem公司获得,纯度99%,经过烘干处理后使用。 In(acac)_3 化学结构式如图1所示。

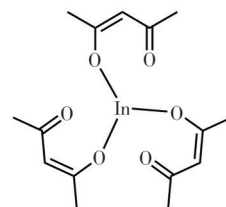


图1 In(acac)_3 的化学结构式

Fig.1 The chemical structure of In(acac)_3

2.2 样品表征

使用 PerkinElmer-Lambda 950 型紫外-可见光分光光度计测试了吸收光谱和透射光谱,测试范围为 200~800 nm。

荧光激发和发射光谱使用 Horiba Jobin Yvon Fluorolog-3 荧光光谱仪测试,激发光源为氙灯。

X 射线发射光谱采用 JF-10 型便携式诊断 X 射线机作为激发源(管电压:50 keV,管电流:0.5 mA),利用积分球收集发射光,通过光纤将收集到的光导入 Horiba FluoroMax + 型荧光光谱仪并采集数据。

闪烁衰减时间通过上海尤谱光电科技有限公司 picoX 5084 X 射线激发闪烁衰减测试系统得到。该测试系统选用滨松 N16432 皮秒脉冲 X 射线光源作为激发源。

光产额通过相对法测量,使用 ^{137}Cs 作为伽马源,选用相同尺寸的商用塑料闪烁体 EJ-200 作为参比样品。Hamamatsu R2059 PMT(工作电压为 -1 700 V)检测到闪烁光,再将信号输出到 Ortec 113 前置放大器和 Ortec 671 光谱放大器,通过 Ortec Easy-MCA-8k 多道分析器将数据传输到电脑来测量脉冲高度谱。为了使光产额的损失最小化,每个样品使用硅油与 PMT 窗口进行耦合,并且包覆相同层数的特氟龙作为反射层。

计数率测试使用 ^{137}Cs 作为伽马源,选用与光产额相同的测试条件,除了使用 Ortec 570 多道分析器将数据传输到电脑来检测相同时间内不同样品的计数率。所有样品的计数率都在同一测试条件下记录 50 s 获得,以计数/秒(cps)表示。

样品密度通过阿基米德浮力法测试,有效原子序数通过公式(1)计算得出:

$$Z_{\text{eff}} = \sqrt[3]{f_1 \times Z_1^3 + f_2 \times Z_2^3 + \dots}, \quad (1)$$

其中, f_n 是样品中 n 元素的电子总数的分数, Z_n 是 n 元素的原子序数。

3 结果与讨论

3.1 钨化合物掺杂塑料闪烁体制备

在手套箱氮气惰性气氛下,将质量分数 2%

PPO、0.1% POPOP 及掺杂质量分数分别为 0~13% 的 $\text{In}(\text{acac})_3$ 粉末与 97.9%~84.9% 的 VT 单体混合。将混合溶液在室温下超声 30 min,以保证粉末与单体混合均匀。然后,将装有混合溶液的容器完全密封,通过热聚合方法将其置于油浴中加热至 80 °C 后约 3 周聚合。其中,13% 掺杂质量分数的聚合时间稍长,约为 4 周,以保证塑料闪烁体完全成型;否则在后期加工时容易软化,很难进行切割抛光。待聚合完成后,将玻璃容器打碎并取出样品,经切割和抛光获得不同 $\text{In}(\text{acac})_3$ 掺杂浓度的 $\Phi 15 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的样品,如图 2 所示。所有样品的有效原子序数和密度如表 1 所示。随着掺杂浓度的增加,塑料闪烁体的密度并没有显著改变,但有效原子序数显著提高。宏观密度变化不大,主要是因为掺杂剂在引入重金属原子的同时,也引入了轻的有机配体,这使得总密度基本保持不变。然而,有效原子序数反映的是材料与光子的相互作用能力,对高原子序数元素极为敏感。由于钨元素的原子序数远高于碳、氢等元素,从而可以大幅提升塑料闪烁体的平均相互作用截面,显著增强其对 X/γ 射线的阻挡和探测能力。因此,这种掺杂策略能够在维持塑料闪烁体轻质特性的同时,有效优化其对高能光子的探测性能。

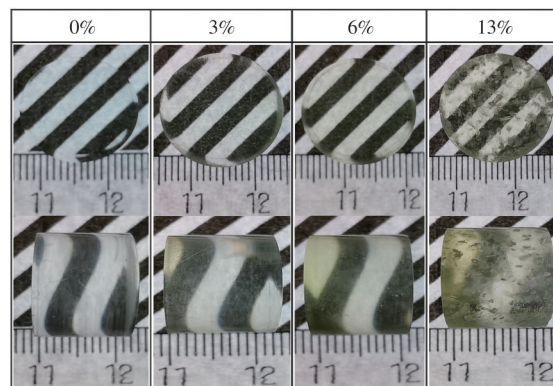


图 2 含有不同浓度的 $\text{In}(\text{acac})_3$ 掺杂塑料闪烁体在日光下的截面和侧面照片

Fig.2 Cross section and side view photographs of $\text{In}(\text{acac})_3$ doped plastic scintillators with different concentrations under daylight

表 1 不同浓度 $\text{In}(\text{acac})_3$ 掺杂塑料闪烁体的性能

Tab. 1 Properties of plastic scintillators loaded with different concentrations of $\text{In}(\text{acac})_3$

$\text{In}(\text{acac})_3$ 含量(wt)/%	有效原子序数	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	衰减时间/ns	相对 EJ-200 光产额/%	计数率/cps
0	5.7	1.02	2.3	95	321
3	9.9	1.02	2.3	48	401
6	12.0	1.03	2.3	28	342
13	15.3	1.05	2.3	24	267

从图2中可以看出,随着 $\text{In}(\text{acac})_3$ 掺杂剂的引入,塑料闪烁体略微显现出淡黄色。除了13%掺杂样品,其他样品均透明、无明显的宏观缺陷。对于13% $\text{In}(\text{acac})_3$ 掺杂样品而言,在聚合前,该掺杂浓度下的 $\text{In}(\text{acac})_3$ 虽然可以完全溶解在VT基质中,但随着聚合时间的延长, $\text{In}(\text{acac})_3$ 逐渐在塑料闪烁体中以微晶的形式弥散析出,类似的析出现象在本团队的有机铜化合物掺杂塑料闪烁体中也曾观察到^[19],这可能是由于有机金属化合物在VT中的热力学溶解度极限大于在PVT中的溶解度极限。

有趣的是,为了进一步加快高掺杂量下塑料闪烁体的聚合时间,在引入0.2% AIBN引发剂、保持聚合温度等工艺不变的情况下,不仅使其聚合时间从最初的4周缩短至2周,而且完全抑制了 $\text{In}(\text{acac})_3$ 的析出现象,如图3所示。但是,这种抑制现象也只适用于有机金属化合物析出量较少的情况,我们试图加入引发剂来制备最高溶解度为20% $\text{In}(\text{acac})_3$ 的掺杂塑料闪烁体,析出现象依旧

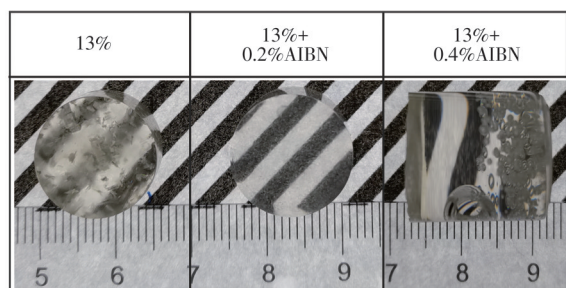


图3 未加入和加入AIBN引发剂的13% $\text{In}(\text{acac})_3$ 掺杂塑料闪烁体在日光灯下的照片

Fig.3 Photographs of 13% $\text{In}(\text{acac})_3$ doped plastic scintillators without and with AIBN initiators under daylight

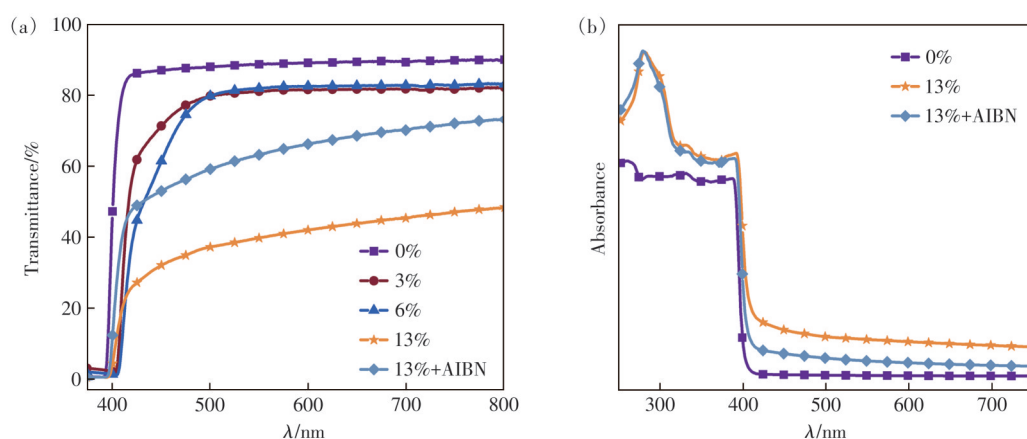


图4 (a)掺杂不同浓度 $\text{In}(\text{acac})_3$ 的塑料闪烁体的光学透射;(b)未掺杂和高掺杂 $\text{In}(\text{acac})_3$ 塑料闪烁体的吸收光谱

Fig.4 (a)Optical transmission of plastic scintillators loaded with different concentrations of $\text{In}(\text{acac})_3$. (b)Absorption spectra of plastic scintillators unloaded and loaded with high concentrations of $\text{In}(\text{acac})_3$

存在。在塑料闪烁体的聚合制备过程中,掺杂剂的析出与基质的固化之间存在一种动力学竞争关系。引发剂的抑制作用可能源于固化与析出之间的动力学平衡,即由于引发剂使塑料闪烁体固化速度大幅提升,掺杂剂分子尚未通过扩散完成相分离和微晶生长,即已完全固化成型。进一步实验发现,低于0.2%的AIBN无法抑制析出,而0.4%的AIBN则导致聚合过于剧烈,易引入气泡等宏观缺陷,如图3所示。此外,过量引发剂可能会充当塑料闪烁体中的部分杂质,形成猝灭中心,影响塑料闪烁体的发光过程。因此,本研究最终选用0.2% AIBN作为优化工艺条件。

3.2 紫外-可见透射和吸收光谱

$\text{In}(\text{acac})_3$ 掺杂PVT基塑料闪烁体的透射和吸收光谱如图4(a)、(b)所示。从图4(a)的透射光谱可以看出,掺杂塑料闪烁体由于显色使得透过率起始位置略微红移,在波长 $>500\text{ nm}$ 区域内,未掺杂样品的透过率为88%,低浓度掺杂的3%和6% $\text{In}(\text{acac})_3$ 塑料闪烁体的透过率约为80%,较未掺杂样品轻微劣化。而由于高掺杂浓度下的析出现象,未加AIBN引发剂的13% $\text{In}(\text{acac})_3$ 掺杂塑料闪烁体的透过率急剧劣化,约为30%。当加入引发剂AIBN于13% $\text{In}(\text{acac})_3$ 样品后,析出现象得到明显抑制,其透过率优化至60%左右,比未加AIBN的样品提高了约1倍。从图4(b)的吸收光谱可以明显看到,掺杂后的样品在250~330 nm范围内出现了来源于 $\text{In}(\text{acac})_3$ 的特征吸收峰,与文献报道的 $\text{In}(\text{acac})_3$ 吸收峰范围在250~330 nm、主峰位于290 nm处的峰位特征一致^[20],这进一步验证了 $\text{In}(\text{acac})_3$ 在塑料闪烁体中的成功掺杂。

3.3 荧光激发和发射光谱

从图 5(a) 的荧光激发光谱可以看出, 未掺杂样品的激发光谱的形状与图 4(b) 中的吸收光谱形状极为相似, 在 240~400 nm 范围内都能被吸收后进行激发。然而, 随着 $\text{In}(\text{acac})_3$ 的引入, 掺杂后的塑料闪烁体在 240~320 nm 范围内的激发强度被逐渐减弱, 这与图 4(b) 中在这一波段由于 $\text{In}(\text{acac})_3$ 的掺杂而吸收峰增强相反, 表明吸收的光子并没有被完全激发, 这对于发光可能是不利的。图 5(b) 为制备的不同浓度 $\text{In}(\text{acac})_3$ 掺杂

塑料闪烁体的荧光发射光谱。在 320 nm 激发下, 未掺杂和掺杂样品的荧光发射谱几乎相同, 都展现出一个宽的发射带, 这个发射带由多个发射峰组成, 主峰位于 415 nm, 其他肩峰分别位于 345 nm、360 nm、395 nm 和 440 nm 处。345 nm 和 360 nm 处的肩峰来源于初级荧光染料 PPO 的发射^[21], 而主峰 415 nm 和其他肩峰均来源于移波剂 POPOP 的发射^[22-23], 并未观察到来源于 $\text{In}(\text{acac})_3$ 的新发光峰。因此, 塑料闪烁体的荧光发射仍主要来自于荧光染料。

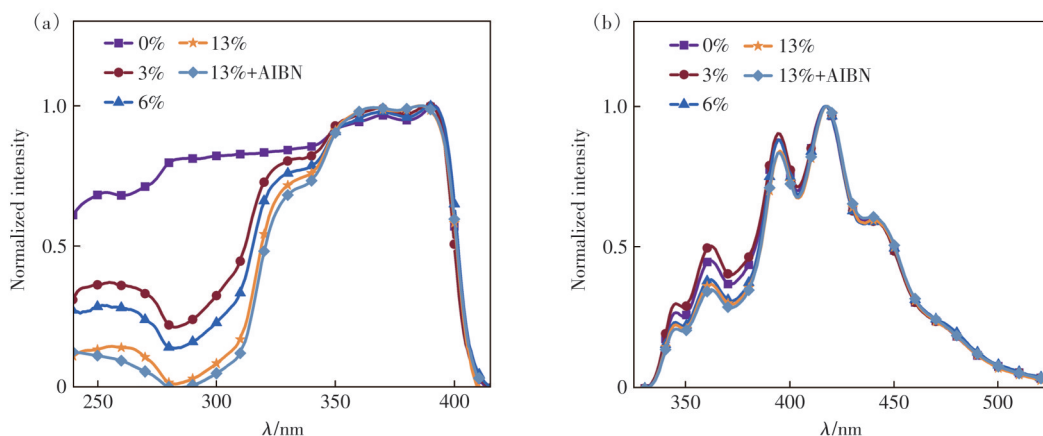


图 5 掺杂不同浓度 $\text{In}(\text{acac})_3$ 塑料闪烁体的 (a) 荧光激发和 (b) 发射光谱

Fig.5 (a) Photoluminescence excitation and (b) photoluminescence emission spectra of plastic scintillators loaded with different concentrations of $\text{In}(\text{acac})_3$

3.4 吸收系数和 X 射线激发发射光谱

基于 XCOM 数据库计算得到的不同浓度 $\text{In}(\text{acac})_3$ 掺杂塑料闪烁体的质量吸收系数与光子能量的关系如图 6(a) 所示。可以看出, 随着掺杂浓度的增加, 塑料闪烁体的质量吸收系数逐渐提高, 这主要归因于有效原子序数的提升增强了材

料与高能光子的相互作用概率。尤其在 40~200 keV 的能量范围内, 质量吸收系数表现出显著提升。不同浓度 $\text{In}(\text{acac})_3$ 掺杂塑料闪烁体的 X 射线激发发射光谱如图 6(b) 所示。未掺杂和掺杂样品都具有 390~550 nm 的宽发射带, 发射峰位基本一致, 主峰位于 425 nm, 肩峰分别位于 440 nm 和

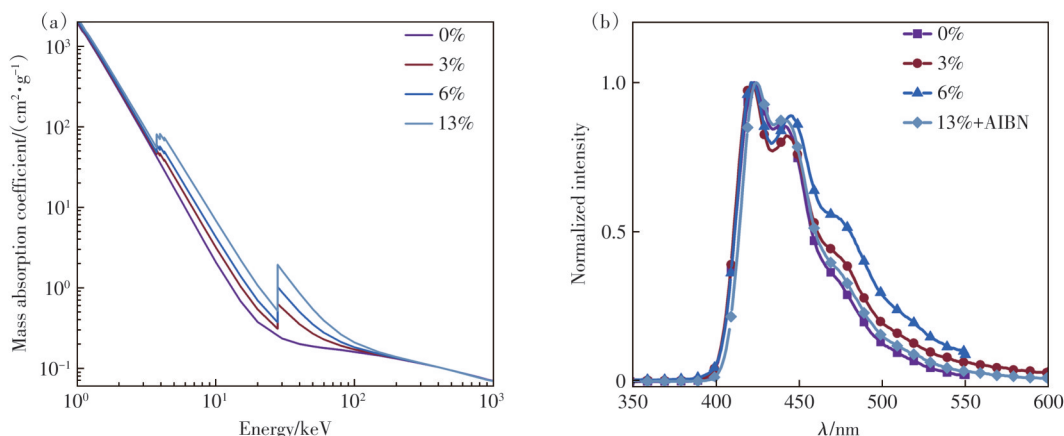


图 6 掺杂不同浓度 $\text{In}(\text{acac})_3$ 的塑料闪烁体的 (a) 吸收系数与能量的关系和 (b) X 射线激发发射光谱

Fig.6 (a) Absorption coefficients as a function of energy and (b) X-ray excited radioluminescence spectra of plastic scintillators loaded with different concentrations of $\text{In}(\text{acac})_3$

465 nm,这3个发光峰都来源于移波剂POPOP的发射。与图5(b)的荧光发射光谱相比,塑料闪烁体的X射线激发发射光谱中初级荧光染料PPO的发射没有被观察到,主要是由于两种发射光谱测试原理不同导致的^[24]。荧光发射光谱测试是在表面模式下进行的,而由于X射线具有一定的穿透深度,X射线激发发射光谱在透射模式下测得。塑料闪烁体受X射线激发后,发射的光子会在塑料闪烁体中经过距离传输再被检测到。在该过程中,初级荧光染料PPO与移波剂POPOP会产生能量传递,因此观察到的最终发光来源于移波剂POPOP。

3.5 闪烁衰减时间

在X射线激发下,不同浓度 $\text{In}(\text{acac})_3$ 掺杂塑料闪烁体的闪烁衰减曲线如图7所示。未掺杂和掺杂塑料闪烁体的闪烁衰减时间几乎相同,都约为2.3 ns,表明 $\text{In}(\text{acac})_3$ 的引入未明显改变材料的快衰减特性。这一现象可能是由于塑料闪烁体的闪烁发光都来源于移波剂POPOP,而 $\text{In}(\text{acac})_3$ 掺杂剂本身不发光,其在能量传递过程中可能仅作为非辐射能量转移的中间体,因此未对整体的闪烁衰减时间造成显著影响,所以衰减时间不会因为掺杂剂改变而显著变化。

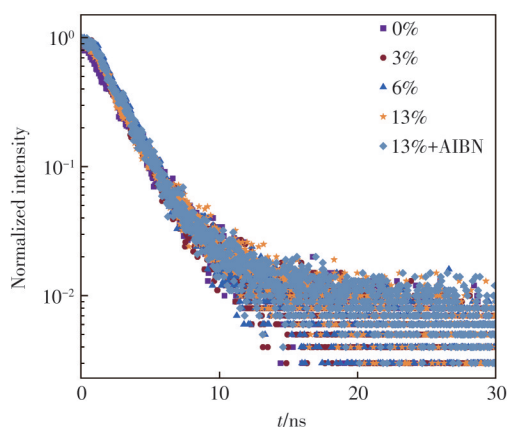


图7 掺杂不同浓度 $\text{In}(\text{acac})_3$ 的塑料闪烁体在X射线激发下的闪烁衰减曲线

Fig.7 X-ray excited scintillation decay profile of plastic scintillators loaded with different concentrations of $\text{In}(\text{acac})_3$

3.6 闪烁光产额和计数率

闪烁光产额测试采用 ^{137}Cs 放射源伽马射线激发,图8为参比样EJ-200与制备的不同浓度 $\text{In}(\text{acac})_3$ 掺杂塑料闪烁体在 ^{137}Cs 辐照下的脉冲高度谱,所有样品都没有显示出明显的全能峰。由闪烁发光过程可知,在康普顿散射中, γ 射线被自由电子散

射,当散射的 γ 射线从探测器逸出时,电子的能量被转移到探测器,反冲电子在康普顿边缘有一个定义明确的最大能量,它对应于从 γ 射线到电子的最大转移能量。因此,该边缘可用于探测器的能量校准以及用于比较来自每个闪烁体的相对光输出^[25]。已知商用塑料闪烁体EJ-200的光产额为10 000 ph./MeV,选用康普顿边缘最高点处的道数来计算样品的相对光产额,得到3%、6%以及添加引发剂后13% $\text{In}(\text{acac})_3$ 掺杂塑料闪烁体的光产额分别约为EJ-200的48%、28%和24%。随着 $\text{In}(\text{acac})_3$ 掺杂浓度的增加,光产额显著降低(约2倍),这可能是由于振动热化等造成非辐射能量耗散,进而导致了 $\text{In}(\text{acac})_3$ 的猝灭效应。

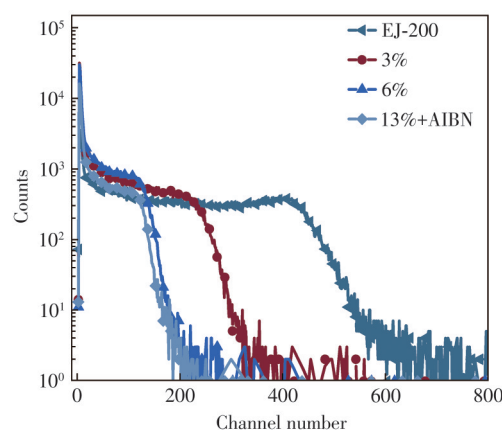


图8 掺杂不同浓度 $\text{In}(\text{acac})_3$ 的塑料闪烁体的脉冲高度谱,以商用塑料闪烁体EJ-200作为参比样品

Fig.8 Pulse height spectra of plastic scintillators loaded with different concentrations of $\text{In}(\text{acac})_3$, and commercial plastic scintillator EJ-200 was used as reference sample

计数率是衡量塑料闪烁体探测器对辐射事件响应能力最直接、最宏观的实验参数,其本质是辐射与物质相互作用后的统计结果。高探测效率确保更多辐射事件通过塑料闪烁体沉积能量,但若掺杂造成光产额下降,使得部分信号丢失,将显著影响最终计数率。因此,需要在探测效率与光产额之间寻求综合平衡,从而确保计数率提升。不同浓度 $\text{In}(\text{acac})_3$ 掺杂塑料闪烁体的计数率统计在表1中。随着掺杂浓度的增加,计数率呈现先升高后降低的变化趋势。与未掺杂样品相比,3%和6% $\text{In}(\text{acac})_3$ 掺杂塑料闪烁体的计数率都有所提升。其中,3% $\text{In}(\text{acac})_3$ 掺杂塑料闪烁体的计数率最高,为401 cps。这一现象反映了掺杂浓度的双重调控作用:在较低掺杂浓度范围内,有

机钢化合物的引入显著提高了材料有效原子序数,增强了伽马射线的相互作用概率,从而提升计数率;而当掺杂浓度进一步增加时,虽然探测效率持续上升,但光产额严重劣化,最终造成计数率下降。

4 结 论

本文选用 $\text{In}(\text{acac})_3$ 作为掺杂剂,成功制备了具有不同掺杂浓度的聚乙烯甲基苯基塑料闪烁体,最高掺杂质量分数可达 13%。通过工艺优化,在塑料闪烁体配方中引入自由基引发剂 AIBN,不仅缩短了塑料闪烁体的聚合时间,还成功抑制了高掺杂量下 $\text{In}(\text{acac})_3$ 在聚合过程中的析出现象,极大地优化了高掺杂浓度下塑料闪烁体的透光率。

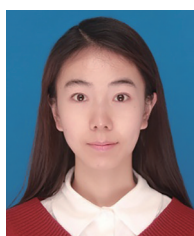
与未掺杂样品相比, $\text{In}(\text{acac})_3$ 的掺杂对塑料闪烁体的荧光和 X 射线激发下的发光性能影响很小,闪烁体的发光依旧主要来源于荧光染料 PPO 或 POPOP。然而,随着 $\text{In}(\text{acac})_3$ 掺杂浓度增加,由于振动热化等造成的非辐射能量耗散导致了 $\text{In}(\text{acac})_3$ 的猝灭效应,使得塑料闪烁体的光产额急剧劣化。其中,3% $\text{In}(\text{acac})_3$ 掺杂塑料闪烁体在保证足够光产额的前提下,由于有效原子序数的显著提升,增强了伽马射线探测效率,实现了计数率的提升。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20260017>

参 考 文 献:

- [1] SCHORR M G, TORNEY F L. Solid non-crystalline scintillation phosphors [J]. *Phys. Rev.*, 1950, 80(3): 474-474.
- [2] 陈鹏, 祝凤荣, 闵振, 等. 塑料闪烁体的性能研究 [J]. 电子制作, 2016(13): 82-83.
CHEN P, ZHU F R, MIN Z, *et al.* Research on the performance of plastic scintillators [J]. *Pract. Electron.*, 2016(13): 82-83. (in Chinese)
- [3] 李雯, 李云云, 秦来顺, 等. 有机锡化合物掺杂聚乙烯甲基苯基塑料闪烁体的制备、光学和闪烁性能 [J]. 发光学报, 2022, 43(2): 201-208.
LI W, LI Y Y, QIN L S, *et al.* Preparation, optical and scintillation properties of organotin compounds doped polyvinyl-toluene-based plastic scintillators [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(2): 201-208. (in Chinese)
- [4] CHEREPY N J, SANNER R D, BECK P R, *et al.* Bismuth- and lithium-loaded plastic scintillators for gamma and neutron detection [J]. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sec. A: Accel., Spectrom., Detect. Assoc. Equip.*, 2015, 778: 126-132.
- [5] MIN S, KIM Y, KO K H, *et al.* Optimization of plastic scintillator for detection of gamma-rays: simulation and experimental study [J]. *Chemosensors*, 2021, 9(9): 239.
- [6] 陈久涛, 宋玉收, 许蕊, 等. 大面积塑料闪烁体适合阈值电压研究 [J]. 核技术, 2023, 46(12): 120403.
CHEN J T, SONG Y S, XU R, *et al.* Appropriate threshold voltage toward high detection efficiency of large-area plastic scintillator [J]. *Nucl. Tech.*, 2023, 46(12): 120403. (in Chinese)
- [7] HAJAGOS T J, LIU C, CHEREPY N J, *et al.* High-Z sensitized plastic scintillators: a review [J]. *Adv. Mater.*, 2018, 30(27): 1706956.
- [8] BERTRAND G H V, HAMEL M, SGUERRA F. Current status on plastic scintillators modifications [J]. *Chem. -Eur. J.*, 2014, 20(48): 15660-15685.
- [9] PANCOKO M, NURI H L, MANAF A, *et al.* Comparative study between fabricated plastic scintillator and existing product for gamma detection [J]. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2022, 2377(1): 012046.
- [10] ZHAO Y S, YU Z B, DOURAGHY A, *et al.* A facile route to bulk high-Z polymer composites for gamma ray scintillation [J]. *Chem. Commun.*, 2008, (45): 6008-6010.
- [11] RAJAKRISHNA K, DHANASEKARAN A, YUVARAJ N, *et al.* Effect of high Z materials loading in the performance of polystyrene-based thin-film plastic scintillators [J]. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sec. A: Accel., Spectrom., Detect. Assoc. Equip.*, 2021, 1008: 165454.
- [12] HAMEL M, TURK G, ROUSSEAU A, *et al.* Preparation and characterization of highly lead-loaded red plastic scintillators under low energy X-rays [J]. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sec. A: Accel., Spectrom., Detect. Assoc.*

- Equip.*, 2011, 660(1): 57-63.
- [13] BERTRAND G H V, SGUERRA F, DEHÉ-PITTANCE C, *et al.* Influence of bismuth loading in polystyrene-based plastic scintillators for low energy gamma spectroscopy [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2014, 2(35): 7304-7312.
- [14] VAN LOEF E V, FENG P, MARKOSYAN G, *et al.* High energy resolution plastic scintillator [C]. *Proceedings of SPIE 9968, Hard X-Ray, Gamma-Ray, and Neutron Detector Physics XVIII, San Diego*, 2016: 996803.
- [15] SHIRWADKAR U, VAN LOEF E V, MARKOSYAN G, *et al.* Progress on metal-loaded plastic scintillators for nuclear security applications [C]. *2017 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Atlanta*, 2017: 1-3.
- [16] BUCK C, HARTMANN F X, LASSERRE T, *et al.* Luminescent properties of a new In-based organic liquid scintillation system [J]. *J. Lumin.*, 2004, 106(1): 57-67.
- [17] BARABANOV I R, BEZRUKOV L B, GURENTOV V I, *et al.* An indium-loaded organic liquid scintillator for solar neutrino detection [J]. *Instrum. Exp. Tech.*, 2010, 53(4): 513-519.
- [18] DANILOV N A, KRYLOV Y S, TSIVADZE A Y, *et al.* Extraction method for preparing indium-containing liquid organic scintillators for solar neutrino detection for LENS experiment, low-energy neutrino spectroscopy [J]. *Radiochemistry*, 2008, 50(3): 274-280.
- [19] LI W, LI Y Y, NIKL M, *et al.* Preparation and performance of plastic scintillators with copper iodide complex-loaded for radiation detection [J]. *Polymer*, 2022, 249: 124832.
- [20] BUCK C, HARTMANN F X, MOTTA D, *et al.* Energy transfer and light yield properties of a new highly loaded indium (Ⅲ) β -diketonate organic scintillator system [J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2007, 435(4-6): 252-256.
- [21] XU Y W, DENG H Y, LEI H, *et al.* Initiator-free preparation and properties of polystyrene-based plastic scintillators [J]. *J. Polym. Res.*, 2019, 26(8): 177.
- [22] MOSER S W, HARDER W F, HURLBUT C R, *et al.* Principles and practice of plastic scintillator design [J]. *Radiat. Phys. Chem.*, 1993, 41(1-2): 31-36.
- [23] ZHU J, DENG C, JIANG H M, *et al.* The impact of fluorescent dyes on the performances of polystyrene-based plastic scintillators [J]. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sec. A: Accelerators, Spectrom., Detect. Assoc. Equip.*, 2016, 835: 136-141.
- [24] ZHAO H X, YU H, REDDING C, *et al.* Scintillation liquids loaded with hafnium oxide nanoparticles for spectral resolution of γ rays [J]. *ACS Appl. Nano Mater.*, 2021, 4(2): 1220-1227.
- [25] LEE C H, SON J, KIM T H, *et al.* Characteristics of plastic scintillators fabricated by a polymerization reaction [J]. *Nucl. Eng. Technol.*, 2017, 49(3): 592-597.



李雯(1996-),女,陕西宝鸡人,博士研究生,2022年于中国计量大学获得硕士学位,主要从事塑料闪烁体和超快闪烁体领域的研究。
E-mail: liwenLW1996@163.com



吴云涛(1984-),男,浙江杭州人,博士研究生,研究员,博士生导师,2012年于中国科学院上海硅酸盐研究所获得博士学位,主要从事闪烁晶体与器件的研究。
E-mail: ytwu@mail.sic.ac.cn



李云云(1993-),女,安徽淮北人,博士研究生,副研究员,2018年于中国科学院大连化学物理研究所获得博士学位,主要从事塑料闪烁体和超快闪烁体方向的研究。
E-mail: liyunyun225@163.com