

铀基 X 射线闪烁体研究进展

王玉民¹, 王亚星^{1,2}, 尹雪苗¹, 王旻凹^{1,*}

1. 苏州大学 放射医学与防护学院, 放射医学与辐射防护国家重点实验室, 江苏 苏州 215123;

2. 四川大学 原子核科学技术研究所, 辐射物理及技术教育部重点实验室, 四川 成都 610065

摘要: 贫铀再利用是近年来放射化学领域尤为关注的课题, 研究发现以铀酰离子作为金属中心合成的含铀晶体材料在 X 射线辐照场中产生强烈的闪烁现象。与传统闪烁发光元素相比, 铀元素具有发光效率高、辐射阻滞能力强等本征属性, 为发展新型闪烁体提供了物质基础。近期研究合成的新型铀基闪烁体显现出较高的 X 射线转换效率、强 X 射线衰减系数、较好的辐照与湿度稳定性、以及更短的余辉等优势。本文从铀酰发光原理、铀基晶体闪烁现象的发现、含铀闪烁体材料的优势出发, 主要阐述了基于铀酰本征性质的新型铀基闪烁体用于 X 射线探测方面的研究进展, 提出了提高含铀闪烁体性能的方法思路。研究成果既为处理贫铀资源提供了新的途径, 又为高性能新型闪烁体的设计提供了借鉴。

关键词: 贫铀再利用; X 射线闪烁体; 荧光; 辐射探测

中图分类号: TL81; TL949; O615.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9950(2019)04-0342-07

doi: 10.7538/hhx.2019.41.04.0342

Research Progress on Uranyl-Bearing X-Ray Scintillator

WANG Yu-min¹, WANG Ya-xing^{1,2}, YIN Xue-miao¹, WANG Shu-ao^{1,*}

1. State Key Laboratory of Radiation Medicine and Protection, Soochow University, Suzhou 215123, China;

2. Key Laboratory of Radiation Physics and Technology,

Ministry of Education, Sichuan University, Chengdu 610065, China

Abstract: Resource utilization of depleted uranium is an emerging research subject in the field of radiochemistry. The development of new uranium-bearing functional materials is an alternative route. The authors recently discovered the intense X-ray scintillating phenomenon of uranyl-bearing crystals under X-ray irradiation. Compared to the intensity investigated emitters in conventional scintillators, high emissive nature and high radiation stopping power are the intrinsic features for the uranyl ions, which make them promising in the development of scintillator. In recent works, uranyl-bearing scintillators showed high X-ray-to-luminescence conversion efficiency, high X-ray excited luminescence (XEL), strong X-ray attenuation coefficient (XAC), reduced afterglow as well as decent radiation and hygroscopy hardness. In this contribution, the research progress on the uranyl-bearing X-ray scintillator is

收稿日期: 2019-04-02; **修订日期:** 2019-05-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21806118, 21790374); 挑战计划资助项目(TZ201604)

作者简介: 王玉民(1996—), 男, 江苏盐城人, 放射医学专业, E-mail: 1430509063@stu.suda.edu.cn

* **通信联系人:** 王旻凹(1985—), 男, 湖南岳阳人, 教授, 放射化学专业, E-mail: shuaowang@suda.edu.cn

reviewed. We will discuss the luminescence mechanism, the discovery of scintillating phenomenon of uranyl, and intrinsic advantages based on the uranyl-bearing scintillators, leading us find the idea how to improve the performance of uranyl-bearing scintillator. This work will provide a new strategy for resource utilization of depleted uranium based on the development of uranyl-based optical materials. In addition, we put forward a new route for further designing scintillators with high X-ray detection performance.

Key words: resource utilization of depleted uranium; X-ray scintillator; luminescence; radiation detection

贫铀是核燃料制备过程中的副产物,截至2008年,全球贫铀总量约为 1.2×10^6 吨。全球主要核电国家均面临着处理贫铀的难题,提出了多种贫铀处理途径,而我国作为核电后发展国家,贫铀处理难题也是我国核能中长期发展面临的棘手问题^[1]。因此,如何实现贫铀再利用是亟待解决的难题,也是放射化学领域中很多科研工作者致力研究的方向。实际上,铀具有非常特殊的理化性质,其独特的电子结构、氧化还原性质以及多样配位化学等多重性质使得设计合成含铀功能材料在过去几十年里成为处理贫铀资源的重要途径。谢健等^[2]利用铀酰与草酸、丁二酸配体设计了稳定的三维铀酰金属有机骨架材料 UOF,在 X 射线和 γ 射线照射下该化合物晶格中的部分草酸配体断键产生自由基,进而局域能量传递给相邻的铀酰离子,使得化合物荧光淬灭。通过建立荧光淬灭百分比和照射剂量率的函数关系发展了新型的辐射剂量计,研究表明该化合物对 γ 射线的检测下限能达到 1.64×10^{-4} Gy,比商用剂量计检测下限低了两个数量级;Mougel 等^[3]利用铀酰与锰离子构建了具有轮状拓扑结构的 $U_{12}Mn_6$ 的 5f-3d 双金属簇合物,由于五价铀的单电子特性, $U_{12}Mn_6$ 簇在磁场中呈现明显的磁滞回线,研究人员提出了利用铀离子的 5f 电子特性发展磁存储材料的思路;Halter 等^[4]以 U(III) 为金属中心合成了三芳氧基络合物 $[(^{Ad,Me}ArO)_3mes)U]$,该材料首次被用于电催化 H_2O 产生 H_2 的铀催化剂,且其反应转换效率在 1.3 V 的过电压下可达到 $10^6 h^{-1}$,该性能可与目前最先进的同质过渡金属产 H_2 催化剂的转换效率相媲美,显示了铀在催化领域的巨大潜力;此外,Falcone 等^[5]还发现利用铀的高氧化还原活性使得分子铀络合物可在室温条件下实现 N_2 的催化转化,极大地降低了工业上生产氨气的苛刻条件(450 °C、30 MPa)。本文主要介绍以铀作为发光元素合成新型闪烁体

材料,并探讨其在 X 射线探测、医学成像等领域的潜在应用前景。

闪烁体作为一种辐射探测材料,能将 X 射线等高能辐射转化为可见光,在过去 70 年里迅速发展并广泛应用于核能、高能物理、无损安全检查及工业探伤等领域^[6-8]。近年来,由于非侵入式的检查能力,闪烁体在医学成像包括 X 射线成像、计算机断层扫描、核医学成像等方面的应用越来越引起人们的兴趣^[9-10]。理想的闪烁体必须具备以下特点:高光输出、快速响应时间、高辐射阻滞本领、较好的辐照及湿度稳定性,以及较高能量分辨率等^[11]。依照不同的发光机制,闪烁体被划分为不同的种类^[11]。目前商用闪烁体大部分是在晶格基质中掺杂发光离子,比如 $NaI:Tl$ 、 $CsI:Tl$ 以及 $Lu_3Al_5O_{12}:Ce$ 等,这些荧光离子通过活化晶体带隙实现 X 射线向可见光的转换。也有部分闪烁体是以发光主体元素为金属中心,比如 $Bi_4Ge_3O_{12}$ 、 $PbWO_4$ 等,这类材料通过自活化激发的方式实现发光^[11]。这些自活化闪烁体由于组成元素较重,能够更有效地沉积高能射线,在医学成像领域里应用广泛。然而,自活化闪烁体发展颇为缓慢,因为大部分发光离子在浓度较高时均会面临自身淬灭的问题^[12]。

提高闪烁体的高辐射阻滞能力是当前辐射医学成像领域的重要需求,通过利用高辐射阻滞能力和高光转化效率的闪烁体更有利于减缓病人所受的辐射危害^[13]。一般认为材料的辐射阻滞能力与密度(ρ)和有效原子序数(Z_{eff})成正比($\propto \rho Z_{eff}^{3-4}$)^[11,14],因而当前在设计闪烁体材料时的一个关键指标就是提高 ρ 和 Z_{eff} 。例如,利用高 Z_{eff} 的有机金属化合物和纳米粒子作为添加剂能够显著提高塑料闪烁体的辐射阻滞能力和光转化效率^[14]。在过去几十年里,具有高辐射阻滞能力的新型闪烁体材料发展十分有限,其中一个重要原因在于原子序数大且同时具有发光能力的元素

非常稀少。

铀是自然界中存在的最重元素,含铀化合物不仅具有较高的原子序数,同时,铀元素热力学最稳定的化学形态——铀酰离子(UO_2^{2+})又具有本征的绿色荧光^[15]。然而,含铀化合物是否具有闪烁性质却鲜有报道。2018年,本课题组^[16]首次以铀酰作为发光元素设计了以铀为主体的有机无机杂化材料 SCU-9,首次发现含铀材料的 X 射线闪烁特性。在近期的工作中,又进一步挖掘了铀酰无机闪烁晶体材料在发展高辐射阻滞能力、多样化晶格及耐辐照闪烁体材料方面的优越性能^[17]。本工作将从铀酰离子的发光机理、闪烁现象、材料的本征物理性质等方面讨论铀元素在合成闪烁体的优势与可能性。

1 铀酰发光原理

UO_2^{2+} 是铀元素热力学最稳定的化学形态,其构型主要是线型双氧组态 $\text{O}=\text{U}=\text{O}$,这种特殊的化学组成使得 U 的 6d/5f 轨道和 O 的 2p 轨道之间形成了一系列复杂的分子轨道(图 1^[17])。当受到紫外光激发时,其最高占据轨道(HOMO)中的电子($\text{O}=\text{U}=\text{O}$ 的 σ 成键轨道)被激发至最低未占轨道(LUMO)(U 的 5f 空轨道),激发电子弛豫回基态的过程中释放能量形成绿色荧光。由于铀酰的线性振动模式,使得荧光谱表现为“五指峰”状,这也是铀酰的本征特性之一^[18]。与传统闪烁体中镧系元素的 Laporte 4f-4f 禁阻跃迁相比,铀酰的这种独特发光机理是一类分子荧光,不需要额外的荧光敏化剂就能实现较高的发射效率。

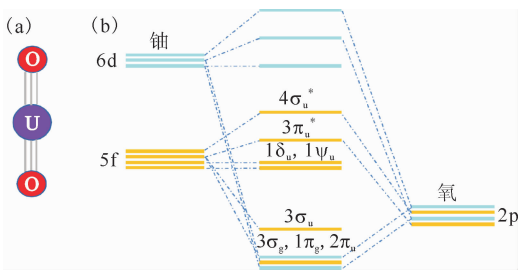


图 1 铀酰离子构型(a)和价轨道示意图(b)^[17]

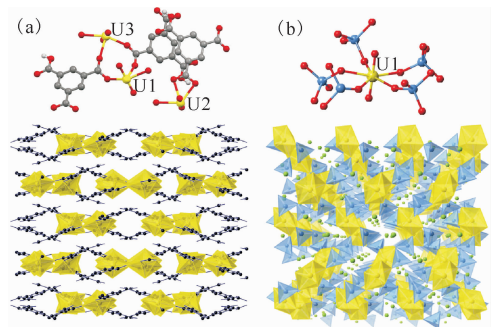
Fig. 1 Schematic of UO_2^{2+} ions(a) and uranyl valence orbitals(b)^[17]

实际上,大部分的无机铀酰化合物和含铀矿物均具有这一本征荧光特性,因此铀晶体材料是一类极具设计能力的发光材料。历史上,铀酰发

光性能也曾被广泛用于陶瓷、餐具等装饰品。虽然贫铀放射性极低(比活度 1.24×10^4 Bq/g),但到目前为止,利用铀酰荧光特性发展的功能材料仍然十分稀缺^[2,19-22]。除铀酰的荧光特性外,铀与其他闪烁体发光元素(如铅、铊、钨等)相比具有更高的 ρ 和 Z_{eff} ,利用铀元素作为发光元素发展的材料拥有更优越的 X 射线衰减系数和阻滞能力。荧光特性和极高的 X 射线衰减系数特性均使得铀元素在 X 射线闪烁体材料研究方面具有巨大潜力。

2 含铀晶体材料 X 射线闪烁现象的发现

2018年,本课题组^[15]首次在铀酰有机无机杂化晶体 $\text{UO}_2(\text{H}_3\text{L})(\text{H}_2\text{O})$ (SCU-9, H_3L = 均苯三酸)中发现了 X 射线闪烁特性。SCU-9 属于单斜晶系,空间群为 $\text{I}2/a$,整体结构由相互交叠的铀酰链组成,不对称单元包括三个独立的 U 位点和三个有机配体(图 2(a)),由于氢键作用而形成了一个较为致密的三维结构。在使用 X 射线粉末衍射仪进行物相鉴定时,偶然发现其在 X 射线照射下能够发出肉眼可见的绿光。进一步研究了 SCU-9 化合物的 X 射线激发荧光(XEL)性质,得到了与紫外激发完全相同的光谱(图 3^[16-17]),证明铀酰离子是一种自活化闪烁体发光元素。一般来说,无论是 X 射线还是紫外光激发,大多数闪烁体均表现出相同的激发动力学,而能量转移过程主要依赖于闪烁体结构和发光中心元素^[11]。因此,SCU-9 的 XEL 测试明确表明其闪烁现象是铀酰离子的本征属性。



(a)——SCU-9 结构图,(b)——UMO 结构图

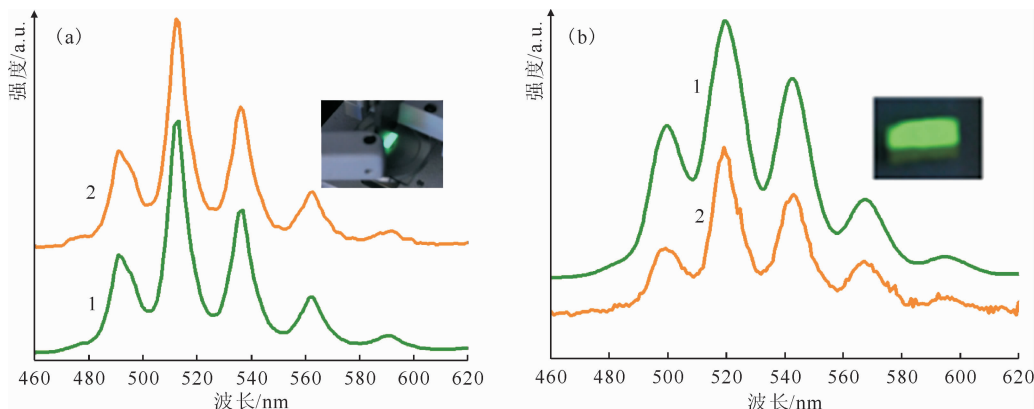
图 2 含铀闪烁体结构图

Fig. 2 Crystal structure of uranyl-bearing scintillators

此外,本课题组设计合成了多类含氧酸根与铀酰离子组成的无机闪烁体(例如硼酸盐^[23]、

磷酸盐^[24]、钼酸盐^[17]、锆酸盐^[25]等),并挑选 $\text{Na}_2\text{UO}_2(\text{MoO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (UMO) 作为含铀无机闪烁体样本进行研究^[17]。如图 2(b)所示,UMO 属于正交晶系,空间群为 $P2_12_12_1$,其不对称单元由两个独立的 Mo 位点、一个 U 位点、两个 Na

位点以及一个结晶水分子组成。并由五角双锥状的 UO_7 、四面体状单体 MoO_4 ,以及存在于 c 轴方向孔道中的 Na^+ 构成了一个致密三维结构。在 X 射线的照射下,UMO 同样能发出绿色荧光(图 3(b))。



插图分别为 SCU-9 和 UMO 在 X 射线照射下的闪烁发光现象

1——紫外激发,2——X 射线激发

图 3 SCU-9 (a)和 UMO (b)在紫外及 X 射线激发下的荧光光谱^[16-17]

Fig. 3 Emission spectra of SCU-9(a) and UMO(b) under UV- and X-ray excitation^[16-17]

3 铀基闪烁体的优势

3.1 铀基闪烁体的闪烁性能

射线响应灵敏度是评价闪烁体材料对射线响应能力的指标,本课题组^[17]研究了 SCU-9 和 UMO 在不同强度 X 射线照射下的 XEL 强度变化,结果示于图 4(a)。如图 4(a)所示,两种闪烁

体的 XEL 强度均随所接受的 X 射线能量增加而增加,具有明显的线性关系。与商用闪烁体 $\text{CsI} : \text{Tl}$ 相比,在所研究的射线能量范围内,三种闪烁体具有相似的斜率值,说明含铀闪烁体实现了 X 射线光子与可检测光子之间的直接转换,含铀闪烁体具有与商用材料相媲美的射线响应能力。

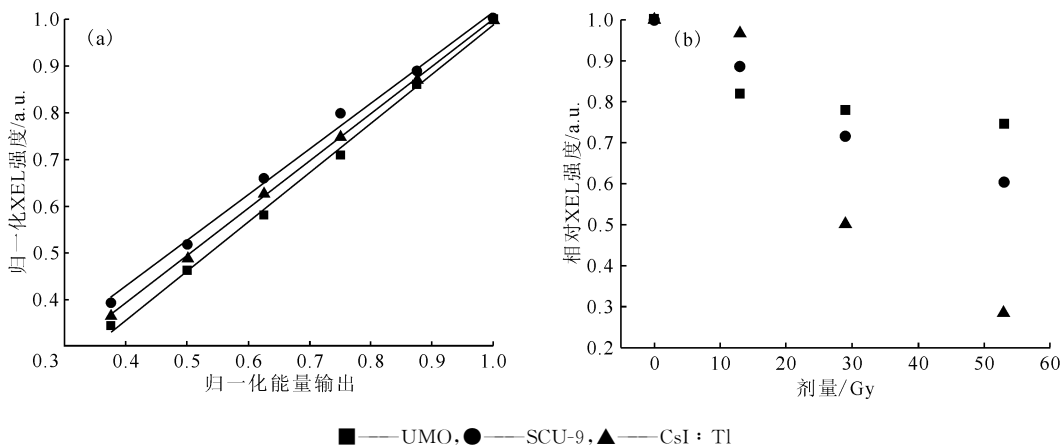


图 4 UMO、SCU-9、 $\text{CsI} : \text{Tl}$ 的 XEL 强度与 X 射线能量密度的线性关系(a)

以及不同剂量 X 射线照射下三种材料的 XEL 强度变化趋势(b)^[17]

Fig. 4 Normalized XEL intensities versus X-ray flux intensity(a), and radiation hardness of UMO, SCU-9 and $\text{CsI} : \text{Tl}$ (b)^[17]

3.2 铀基闪烁体的辐照稳定性

闪烁体在实际应用过程中会受到持续照射,由于辐照效应会使晶格产生缺陷,进而影响发光效率。因此,抗辐照性能是闪烁体材料必须具备的性质。本课题组^[17]选择了三种材料进行比较,分别为商用的离子型晶体 CsI : Tl、铀有机无机杂化晶体 SCU-9、铀无机晶体 UMO。SCU-9 和 UMO 在与商用闪烁体 CsI : Tl 的对比中均表现出明显的优势。如图 4(b)所示,在低剂量率的照射下,通过 XEL 强度变化可看出,CsI : Tl 的耐辐照性能略高于 SCU-9 及 UMO,但随着剂量的增加(达到 30 Gy 以上),CsI : Tl 的荧光强度被迅速淬灭,与之相较,SCU-9 与 UMO 明显具备更高的辐照稳定性,并且 UMO 更优于 SCU-9,也进一步说明铀的无机晶格具备更强的辐射抗性。

3.3 铀基闪烁体的辐射阻滞本领

如前文所述,辐射阻滞能力是目前医学成像领域所用闪烁体材料的重要考量条件之一。具有高辐射阻滞能力的闪烁体能够有效减少患者所受的辐射危害^[13]。铀基闪烁体在密度和有效原子序数方面均表现出明显优势^[11,14]。

从材料基本性能来看,SCU-9 在密度方面存在不足,其密度仅为 2.85 g/cm³,而铀基无机闪烁体

则具有明显的优势。值得注意的是,由于铀元素的引入,无论是 SCU-9 还是无机闪烁体,与大部分常规商用闪烁体相比,在 Z_{eff} 方面均具有明显优势(表 1)。正如前文所述,闪烁体的辐射阻滞本领与 ρ 及 Z_{eff} 存在正比关系($\propto \rho Z_{\text{eff}}^3$)^[11,14],而从表 1 可明显看出,与大部分商用材料相比,铀基闪烁体均具有较高的辐射阻滞能力,即较大的 X 射线衰减系数。此外,无论是铀基闪烁体的结构、密度还是有效原子序数,在可设计性方面均表现出巨大潜力。

3.4 铀基闪烁体的余辉性能

余辉是评估闪烁体材料发光性能的另一项重要指标,尤其与辐射成像效果密切相关,电离辐射诱发的晶体缺陷常常会导致晶体的余辉变长^[27]。商用闪烁体 CsI : Tl 就因其明显的余辉信号而影响了辐射成像质量^[22]。而铀基闪烁体的另一个本征优势就体现在其短余辉特性上。

在 SCU-9、UMO 及 CsI : Tl 的余辉测量结果中可以发现,在关掉 X 射线源后的 30 ms 时,UMO 的余辉降到了最初强度的 0.07%,明显优于 SCU-9 及 CsI : Tl(表 2),这也预示着无机晶格位点比杂化及离子型掺杂晶格更加稳定,进一步表明无机铀基闪烁体在辐射成像方面更具有潜在优势。

表 1 部分商用闪烁体与无机闪烁体物理参数对比结果

Table 1 Comparison results on physical parameters for selected commercial scintillators and uranyl-bearing scintillators

闪烁体类型	化合物	$\rho^{1)} / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	有效原子序数 Z_{eff}	X 射线衰减系数(XAC) ²⁾ / mm^{-1}
部分商用闪烁体	Cs ₂ LiYCl ₆	3.31	44.5	4.65
	CsI : Tl	4.51	54.0	6.23
	BaF ₂	4.88	52.7	6.01
	LSO ³⁾	7.40	66.0	18.69
	BGO	7.13	75.2	26.81
铀基闪烁体	SCU-9	2.85	68.5	9.25
	UBO	3.30	64.3	9.34
	UPO	3.64	69.1	12.50
	UMO	4.20	64.3	16.05
	UGO	5.30	71.8	20.70

注:1) 数据取自参考文献[26];

2) XAC 计算条件是 X 射线能量为 25 keV;

3) LSO:Lu₂SiO₅ : Ce; BGO:Bi₄Ge₃O₁₂; UBO:Na(UO₂)B₆O₁₀(OH) · 2H₂O; UPO:K(UO₂)(PO₄) · 4H₂O; UGO:Na₂(UO₂)-GeO₄

表 2 UMO, SCU-9 及 CsI : Tl 的余辉结果
Table 2 Afterglow results on UMO,
SCU-9, and CsI : Tl

闪烁体	30 ms 余辉/%	100 ms 余辉/%
CsI : Tl	0.45	0.28
SCU-9	0.16	0.12
UMO	0.07	0.06

4 总结与展望

本文简述了铀基新型闪烁体在 X 射线探测方面的研究进展,从铀酰离子的发光原理、多样化晶格结构、闪烁性能等多方面论述了铀元素作为闪烁体发光元素的潜在优势。铀元素的多样化配位能力、高原子序数、本征的荧光特性、材料短余辉等优势均为设计更高性能的新型闪烁体提供了借鉴;同时,发展含铀功能材料也为贫铀资源的处理处置以及实现贫铀再利用提供了新的思路。

参考文献:

[1] Hill D J. Nuclear energy for the future[J]. *Nat Mater*, 2008, 7(9): 680-682.

[2] Xie J, Wang Y X, Liu W, et al. Highly sensitive detection of ionizing radiations by a photoluminescent uranyl organic framework[J]. *Angew Chem Int Ed*, 2017, 56: 7500-7504.

[3] Mougél V, Chatelain L, Pécaut J, et al. Uranium and manganese assembled in a wheel-shaped nanoscale single-molecule magnet with high spin-reversal barrier[J]. *Nat Chem*, 2012, 4: 1011-1017.

[4] Halter D P, Heinemann F W, Bachmann J, et al. Uranium-mediated electrocatalytic dihydrogen production from water[J]. *Nature*, 2016, 530: 317-321.

[5] Falcone M, Chatelain L, Scopelliti R, et al. Nitrogen reduction and functionalization by a multimetallic uranium nitride complex[J]. *Nature*, 2017, 547: 332-335.

[6] Nikl M, Yoshikawa A. Recent R&D trends in inorganic single-crystal scintillator materials for radiation detection[J]. *Adv Opt Mater*, 2015, 3: 463-481.

[7] Nikl M. Scintillation detectors for X-rays[J]. *Meas Sci Technol*, 2006, 17: 37-54.

[8] Martin T, Koch A, Nikl M. Scintillator materials for X-ray detectors and beam monitors[J]. *MRS Bull*, 2017, 42: 451-457.

[9] Eriksson L, Melcher C L, Eriksson M, et al. Design considerations of phoswich detectors for high resolution positron emission tomography[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2009, 56: 182-188.

[10] Ronda C, Wiczcerek H, Khanin V, et al. Review-scintillators for medical imaging; a tutorial overview[J]. *ECS J Solid State Sci Technol*, 2016, 5: R3121.

[11] Knoll G F. Radiation detection and measurement[M]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2010.

[12] Imaz I, Hernando J, Ruiz-Molina D, et al. Metal-organic spheres as functional systems for guest encapsulation[J]. *Angew Chem*, 2009, 48: 2325-2329.

[13] Lecoq P, Annenkov A, Gektin A, et al. Inorganic scintillators for detector systems: physical principles and crystal engineering[M]. Heidelberg: Springer, 2017.

[14] Hajagos T J, Liu C, Cherepy N J, et al. High-Z sensitized plastic scintillators: a review[J]. *Adv Mater*, 2018, 30: 1706956.

[15] Morss L R, Edelstein N M, Fuger J, et al. The chemistry of the actinide and transactinide elements[M]. Heidelberg: Springer, 2006.

[16] Wang Y X, Yin X M, Liu W, et al. Emergence of uranium as a distinct metal center for building intrinsic X-ray scintillators[J]. *Angew Chem Int Ed*, 2018, 57: 7883-7887.

[17] Wang Y X, Wang Y M, Dai X, et al. Inorganic X-ray scintillators based on a previously unnoticed but intrinsically advantageous metal center[J]. *Inorg Chem*, 2019, 58: 2807-2812.

[18] Baumann N, Arnold T, Geipel G, et al. Detection of U(VI) on the surface of altered depleted uranium by time-resolved laser-induced fluorescence spectroscopy(TRLFS)[J]. *Sci Total Environ*, 2006, 366: 905-909.

[19] Liu W, Dai X, Xie J, et al. Highly sensitive detecting of UV radiation using a uranium metal organic framework[J]. *ACS Appl Mater Inter*, 2018, 10: 4844-4850.

[20] Wu S, Mei L, Li F Z, et al. Uranyl-organic coordination compounds incorporating photoactive vinylpyridine moieties: synthesis, structural characterization, and light-induced fluorescence attenuation[J]. *Inorg Chem*, 2018, 57: 14772-14785.

- [21] Li F Z, Mei L, Hu K Q, et al. Releasing metal-coordination capacity of cucurbituril macrocycle in pseudorotaxane ligands for the construction of interwoven uranyl-rotaxane coordination polymers[J]. *Inorg Chem*, 2018, 57: 13513-13523.
- [22] Mei L, Hu K, Zhang Z H, et al. Stepwise ortho-chlorination of carboxyl groups for promoting structure variance of heterometallic uranyl-silver coordination polymers of isonicotinate[J]. *Inorg Chem*, 2018, 57: 4673-4685.
- [23] Wang S A, Alekseev E V, Ling J, et al. Polarity and chirality in uranyl borates; insights into understanding the vitrification of nuclear waste and the development of nonlinear optical materials[J]. *Chem Mater*, 2010, 22: 2155-2163.
- [24] Locock A J, Burns P C, Duke M J M, et al. Monovalent cations in structures of the meta-autunite group[J]. *Can Mineral*, 2004, 42: 973-996.
- [25] Li H J, Langer E M, Kegler P, et al. Formation of open framework uranium germanates: the influence of mixed molten flux and charge density dependence in U-silicate and U-germanate families[J]. *Inorg Chem*, 2018, 57: 11201-11216.
- [26] Derenzo S, Boswell M, Weber M, et al. Scintillation properties [EB/OL]. <http://scintillator.lbl.gov/>.
- [27] Kappers L A, Bartram R H, Hamilton D S, et al. Scintillation, afterglow and thermoluminescence of CsI: Tl, Sm[J]. *Mater Sci Eng*, 2010, 15: 012091.