

文章编号: 1000-7032(2025)07-1209-12

基于闪烁体编码器的 X 射线多能谱成像技术

刘嘉程^{1,2}, 杨 旻^{1,2*}(1. 浙江大学 光电科学与工程学院, 浙江 杭州 310000;
2. 极端光学技术与仪器全国重点实验室, 浙江 杭州 310000)

摘要: X 射线成像技术作为医疗诊断和工业无损检测的核心手段,其成像质量直接影响诊断准确性和检测精度。但传统 X 射线成像技术受限于能量积分探测模式,在复杂场景下的成像对比度明显不足。为突破这一技术瓶颈,多光谱 X 射线成像技术应运而生。本文聚焦基于闪烁体编码器的 X 射线多能谱成像技术,详细阐述基于叠层闪烁体编码和基于侧入射提取 X 射线深度信息的多光谱探测器。通过深入分析材料选择与制备工艺、器件结构设计、算法分析等关键技术环节,全面探讨了该技术的原理、特点及研究进展。总结现有成果及面临的挑战,并对未来发展趋势进行展望,以期多光谱 X 射线成像技术的深入研究与工程应用提供理论指导和实践参考。

关键词: 闪烁体编码器; X 射线多能谱成像; 叠层闪烁体; 侧入射探测器; 算法分析

中图分类号: TL816⁺.1 文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20250060 CSTR: 32170.14.CJL.20250060

Multi-energy X-ray Imaging Based on Scintillator Encoders

LIU Jiacheng^{1,2}, YANG Yang^{1,2*}(1. College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310000, China;
2. State Key Laboratory of Extreme Photonics and Instrumentation, Hangzhou 310000, China)

* Corresponding Author, E-mail: yangyang15@zju.edu.cn

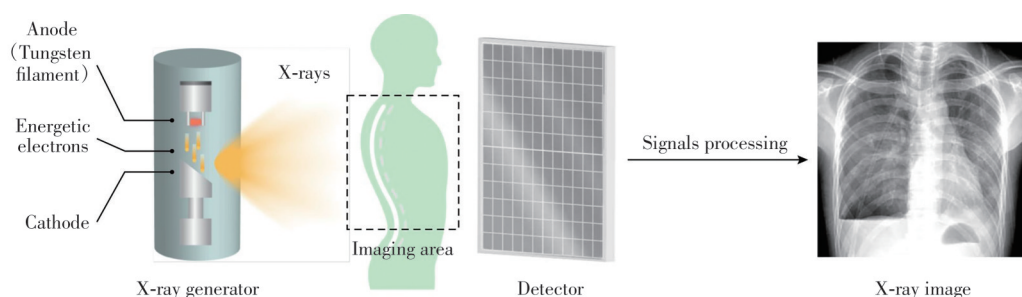
Abstract: X-ray imaging technology serves as a core tool in medical diagnosis and industrial non-destructive testing, where imaging quality directly impacts diagnostic accuracy and detection precision. However, traditional X-ray imaging technology is limited by its energy-integrating detection mode, resulting in insufficient imaging contrast in complex scenarios. To overcome this technical bottleneck, multispectral X-ray imaging technology has emerged. This paper focuses on multi-energy X-ray imaging technology based on scintillator encoders, detailing multispectral detectors utilizing stacked scintillator encoding and side-incident depth information extraction. By thoroughly analyzing key technical aspects such as material selection and preparation, device structure design, and algorithmic analysis, the principles, characteristics, and research progress of this technology are comprehensively explored. The paper summarizes existing achievements and current challenges, while also providing insights into future development trends, aiming to offer theoretical guidance and practical references for further research and engineering applications of multispectral X-ray imaging technology.

Key words: scintillator encoder; multispectral X-ray imaging; stacked scintillator; side incidence detector; algorithm analysis

1 引 言

X 射线成像技术广泛应用于医疗诊断、工业检测、材料科学等领域,对社会发展起到了重要推动作用。X 射线具有较强的穿透能力,利用 X 射

线进行成像,能够探索之前肉眼不可见的物质内部结构,如图 1 所示^[1]。但由于 X 射线的高能量和高穿透特性,我们难以利用光学手段进行调控和探测它的光谱信息。因此,一般意义上的传统 X 射线成像只能通过能量积分来形成图像对比度,

图1 基于闪烁体的X射线成像原理示意图^[1]Fig.1 Schematic diagram of X-ray imaging based on scintillators^[1]

多为黑白灰度图像,信息有限,难以满足复杂检测需求,在一些探测场景中出现了一定的局限性。

在这种环境需求下,多能谱X射线成像技术应运而生,使用不同能量的X射线对物体进行成像,通过获取X射线光谱信息提升成像质量与物质分辨能力。物质对X射线的衰减主要由光电效应和康普顿散射引起,而两者都对X光子的能量存在依赖性,导致不同物质对X射线的吸收特性与X射线光谱具有一定的依赖性。基于以上原理,通过观察和分析不同能量通道上的X射线图像,能够有效区分不同物质并提高图像对比度^[2]。目前主流的多光谱X射线成像技术主要使用光子计数技术,但由于像素集成度较低,无法实现大面阵成像,且在高通量X射线环境下,会产生“堆积”效应^[3],严重削弱探测器的能量分辨能力,有时甚至导致其功能失效^[4]。

闪烁体技术作为传统X射线成像领域的主流技术,具有稳定高效、成本效益和可靠性兼具的特性。在高能粒子或射线的照射下,闪烁体能够发出脉冲性的光亮,在医学成像、高能物理学、环境监测以及安全检查等多个领域扮演着关键角色^[5]。传统商业化闪烁体包括CsI:Tl、 $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO)、NaI(NaI:Tl)等,其具有较大的光产额,但这类闪烁体通常是针对能量积分型成像设计的,通常对全波段X射线都具有很强的吸收性,而且闪烁体发光波长主要集中在绿光区,而多能谱成像应用要求对闪烁体的吸收特性和发光波长有更大的调控维度。因此,目前常用于构建X射线成像的叠层闪烁体材料主要有金属卤化物,如具有高光产率的 Rb_2CuBr_3 ^[6],可实现低检测限的 $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$ 单晶^[7],具有高稳态闪烁产率的 $\text{Cs}_3\text{Cu}_2\text{I}_5$:Tl晶体^[8],无毒、高发射的 CsCu_2X_3 ($\text{X}=\text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$)^[9];还有常用的有机闪烁体,如具有磷光和热活化延迟荧光(Thermally activated delayed fluorescence, TADF)

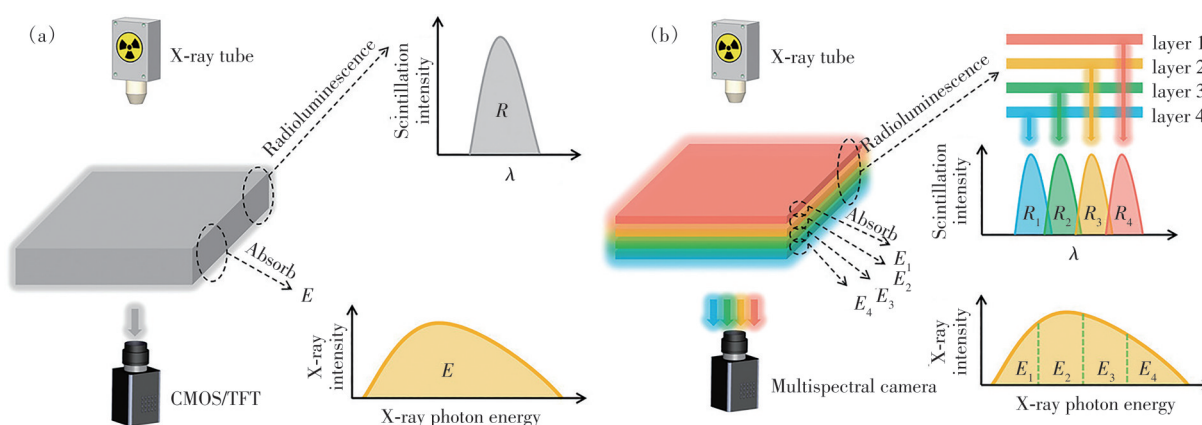
双发射功能的新型温度自适应有机闪烁体PYC、PYB、PYH^[10]。在本文聚焦的X射线多光谱成像技术中,闪烁体编码器作为其中的核心技术,利用不同特性闪烁体将X射线光谱信息转换为可测物理量,经解码重构实现多能谱成像。本文围绕基于闪烁体编码器的X射线多能谱成像技术展开综述,重点介绍基于叠层闪烁体编码和基于侧入射提取X射线深度信息的多光谱探测器相关研究进展。

2 基于多层结构闪烁体编码的多光谱探测器

2.1 叠层闪烁体编码器件的设计

叠层闪烁体的设计核心在于实现不同能量X射线差异性吸收和闪烁光子独立高效传递,可将难以测量的X射线光谱信息编码为易于测量的可见光光谱信息。通过对X射线吸收能力不同、闪烁发光波段不同的多种闪烁体按特殊排列顺序垂直堆叠在入射X射线方向上,形成多层复合结构。一般而言,从上往下,每层闪烁体吸收的X射线能量区间逐渐增加,闪烁发光波段逐渐变短,以避免不同闪烁体发出的闪烁光产生相互作用,影响最终成像分辨率;从而将X射线总能量划分成多个能量区间,并以不同波长的闪烁光子将各能量区间的X射线成像信息区分开,实现多光谱X射线成像。

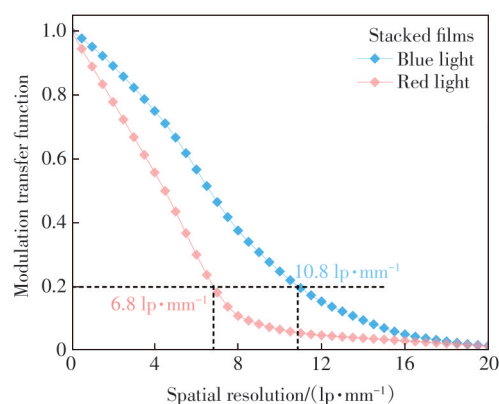
与传统的能量积分型X射线成像(如图2(a)所示)不同,叠层闪烁体多能谱X射线成像主要是通过使用多层不同X射线吸收能力和闪烁光谱的闪烁体,来实现对X射线能量的区分和测量。如图2(b)所示,闪烁体层数决定了可以划分的能量通道,称为X射线能量(光谱)分辨率或能量通道数。由于所有材料对于X射线的吸收系数通常都是随着X射线能量的增加而减小,所以在理想情

图2 (a)能量积分型和(b)多能谱X射线成像系统示意图^[11]Fig.2 (a)Schematic of energy-integrated and (b)multi-energy X-ray imaging systems^[11]

况下,适当选择的每种闪烁体需要一定的厚度来吸收其对应能量段的X射线。图2(b)展示了4个X射线能量通道 $E_1 \sim E_4$ 。闪烁体 $R_1 \sim R_4$ 的RL(Radioluminescence,辐射发光)光谱不应重叠,它们分别主要响应 $E_1 \sim E_4$ 。使用多光谱相机采集每个闪烁体的发光图像,最后将四幅分离的图像融合为一幅多能量X射线图像。在这种情况下,如果使用一台高光谱照相机叠加更多不同发射波段的闪烁体,就能扩大能级范围。

例如,在双层堆叠式闪烁体设计中,杨旸课题组冉鹏等在2022年率先提出了一个双层闪烁体的设计结构^[11],选用蓝光发射的 $\text{Cs}_3\text{Cu}_2\text{I}_5$ 作为下层材料,因其对高能X射线吸收能力强;红光发射的 $\text{C}_4\text{H}_{12}\text{NMnCl}_3$ 作为上层材料,主要吸收低能X射线,满足X射线选择性吸收原则。同时,从顶部到底部,闪烁体辐射发光波长逐渐变短,确保上层闪烁体发出的光对下层透明,实现闪烁光子独立高效传递,从而将X射线光谱探测转化为对各层闪烁体发射光谱的探测。通过实验测试证明,利用该双层堆叠式闪烁体进行双能X射线成像,如图3所示,两层闪烁体均可达到 $5 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ 以上的分辨率,可实现平板X射线成像。

2023年,曾海波、李晓明课题组^[12]则使用两种差异显著的闪烁体材料 $(\text{BA})_2\text{PbBr}_4:\text{Mn}$ 和 $\text{Cs}_3\text{Cu}_2\text{I}_5:\text{Ti}$ 构建双层堆叠式闪烁体结构,同样以发射红光的 $(\text{BA})_2\text{PbBr}_4:\text{Mn}$ 作为上层材料吸收高能X射线,发射蓝绿光的 $\text{Cs}_3\text{Cu}_2\text{I}_5:\text{Ti}$ 作为下层材料吸收低能X射线,并在两层闪烁体中加入一层石英,以实现X射线能量的硬化,达到能谱的有效过滤。同时,通过引入苯乙胺溴化物(PEABr)对 $(\text{BA})_2\text{PbBr}_4:\text{Mn}$ 进行钝化,显著提高了其光产额;通过温度诱导的

图3 斜边法测得的堆叠式闪烁体的调制传递函数(MTF)曲线^[11]Fig.3 Modulation transfer function (MTF) curves of stacked scintillators, tested by the slanted-edge method^[11]

晶体平面取向控制, $\text{Cs}_3\text{Cu}_2\text{I}_5:\text{Ti}$ 的透过率提高到约70%。通过实验证明,随着X射线能量的提高,双层闪烁体发出的闪烁光颜色随X射线能量呈现线性关系变化。

Omar课题组^[13]设计了一种“顶-滤波-底”(Top-Filter-Bottom, TFB)夹层结构的闪烁体,用于单次曝光下的双能量X射线成像。顶部为TADF-Br和Rubrene(红荧烯)复合而成的有机闪烁体,吸收低能X射线并发射橙色光;底部为金属卤化物闪烁体 $\text{BTP}_2\text{MnBr}_4$,吸收高能X射线并发出绿光;中间通过石英层进行能量分离和亮度平衡。如图4所示,随着X射线能量的增加,双层闪烁体的发射光颜色产生了明显的变化,并达到了 $18 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ 的成像分辨率。

在多层堆叠设计中,如四层堆叠式闪烁体,成像系统如图2(b)所示,冉鹏等设计了从顶部到底部选用 FAPbI_3 、 $\text{C}_4\text{H}_{12}\text{NMnCl}_3$ 、 $(\text{C}_8\text{H}_{20}\text{N})_2\text{MnBr}_4$ 和

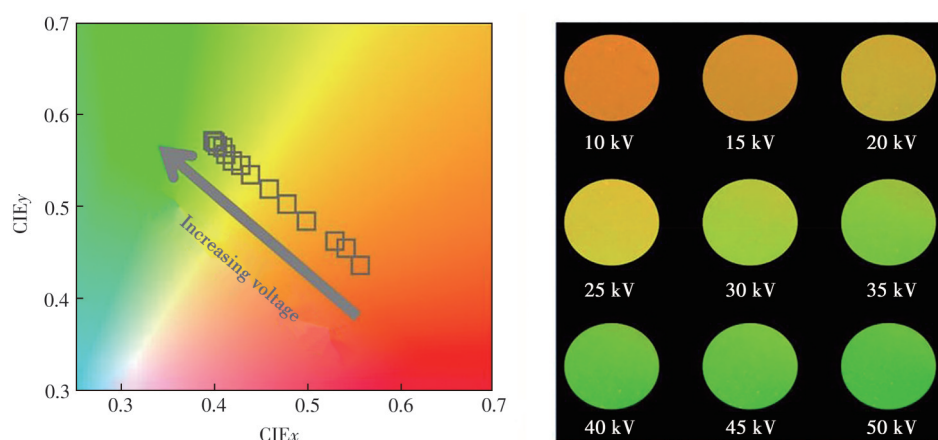


图4 不同管电压对应的CIE坐标以及TFB夹层结构闪烁体的X射线图像颜色随管电压的变化^[13]

Fig.4 The CIE coordinates corresponding to different tube voltages and the variation of X-ray image colors of TFB sandwich structure scintillator with tube voltage^[13]

Cs₃Cu₂I₅四种闪烁体材料,其闪烁光波长依次蓝移(近红外光、红光、绿光、蓝光)且闪烁光谱几乎不重叠,促进闪烁光子独立高效传播;并通过设计合适厚度确保各层对X射线的选择性吸收,以实现更多能量通道的多光谱X射线成像,通过实验验证,每个能量通道的X射线吸收率都达到了50%以上^[11]。

Omar 课题组设计了一种三层堆叠式闪烁体^[14],选择(TPA)₂Cu₂I₄作为第一层闪烁体发射红光,(HTP)₂MnBr₄作为第二层闪烁体发射绿光,

LYSO:Ce作为第三层闪烁体发射蓝光,并根据其各自的X射线吸收能力,精确计算闪烁体的各层厚度。同时,在各层闪烁体之间插入滤波片过滤不同能量的X射线和不同波长的闪烁光,保证能量分离和避免闪烁光串扰。随着X射线能量的增加,如图5所示,闪烁光的颜色逐渐由红色变为蓝色,能够通过发射颜色的变化来准确区分X射线能级。实验证明,该叠层闪烁体可以达到22 lp·mm⁻¹的成像分辨率,满足成像需求。

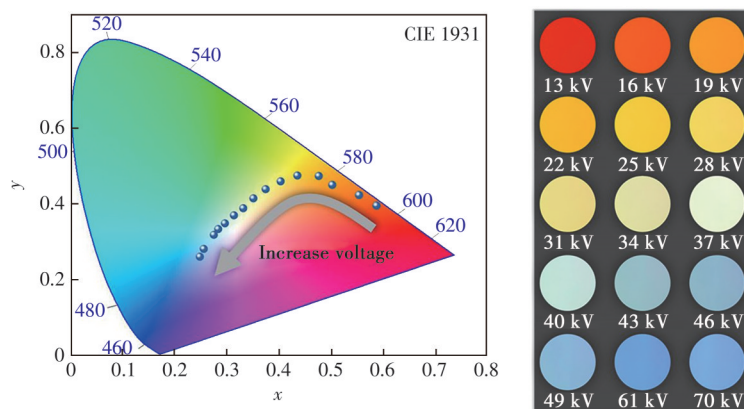


图5 不同管电压对应的CIE坐标以及三层堆叠式闪烁体的X射线图像颜色随管电压的变化^[14]

Fig.5 The CIE coordinates corresponding to different tube voltages and the variation of X-ray image colors of three-layer stacked scintillator with tube voltage^[14]

2.2 闪烁体材料的选择与制备

对于堆叠式闪烁体而言,闪烁体材料的选择也是至关重要的,一般需要选择具有不同的X射线吸收和发光波长的材料,可对不同能量的X射线光子产生响应。在常见的X射线成像场景下,X射线光子与物质的相互作用主要有两种方式:散射和吸收^[15],主要包括光电吸收和康普顿散射,

这两者都和物质的原子序数有关,使得X射线的衰减系数也与物质的原子序数有着密切的联系。因此,可以通过选择合适原子序数的元素组成的闪烁体来对应吸收不同能量的X射线,实现能量信息的区分。

为避免不同闪烁体材料之间的相互激发影响X射线能量的准确分辨,在选择上下层材料时,要

确保顶层闪烁体对低能X射线敏感,可发射长波光,底层闪烁体吸收高能X射线,可发射短波光,同时均需要有较大的吸收-发射位移和独特的光吸收光谱,以尽量减少重吸收重叠^[15]。而针对高空间分辨率的要求,在材料的选择上要尽量选择斯托克斯位移大的材料,以减少材料本身的自吸收。

因而,堆叠式闪烁体常选取具有自俘获激子(Self-trapped excitons, STEs)的材料,如某些金属卤化物,通常会产生100~200 nm的大吸收-发射位移。最近,在惠娟等的研究中,为进一步扩大吸收-发射位移,利用掺杂稀土离子的量子剪裁闪烁体作为顶层^[16],通过能量转移产生新的发光中心,从而将吸收-发射位移扩大到了570 nm。得益于量子剪裁效应,光量子产率超过了100%,同时确保了光吸收和RL发射光谱不重叠,有效防止了堆叠式闪烁体中的相互激发问题。通过计算每层的最佳厚度以吸收特定能量的X射线,探测器在不同能量带表现出明显的吸收差异,增强了对相似密度材料的识别能力。通过概念验证实验,使用不同材料(Fe、Al和PMMA(Poly(methyl methacrylate),聚甲基丙烯酸甲酯))的厚度梯度模型,成功获取了不同能量通道的X射线图像,并建立了材料-能量依赖的校准曲线,证明了探测器在材料识别方面的潜力。

传统闪烁体材料包括氧化物、有机物和其他材料^[17],一般是在高温下通过结晶合成,其放射发光很难在可见光谱范围内进行调节^[18]。对于闪烁体材料的制备,不同材料的制备方法是有一定区别的,多能谱X射线成像主要使用在可见光范围内辐射发光的闪烁体合成,通常采用溶液法和反溶剂法。

溶液法以 $C_4H_{12}NMnCl_3$ 为例,将HCl加入到 $MnCl_2 \cdot 4H_2O$ 和 $C_4H_{12}NCl$ 中,观察到产生大量红色荧光发光材料。搅拌后,加入异丙醇(IPA, Isopropyl alcohol)洗涤沉淀并离心,最后将沉淀物放入烘箱中干燥,得到粉末。

反溶剂法以 $Cs_3Cu_2I_5$ 为例,将CsI和CuI混合,溶解于DMSO(Dimethyl sulfoxide, 二甲基亚砜)中,加热搅拌至完全溶解形成前驱体溶液,将其快速注入反溶剂IPA或甲醇中,观察到出现大量白色沉淀物。离心后取沉淀用甲苯洗涤,再次离心,沉淀物放入烘箱中进行干燥处理后得到粉末。为

了制备高质量的闪烁体薄膜,前面初步合成的粗粉末须研磨后方可得到最终可用的更为精细的粉末。

除了上述方法,还可以通过结晶法制备闪烁体材料晶体,将合成的前驱体溶液置于密封的反溶剂环境中,经过一段时间的静置,晶体逐渐析出。将晶体取出后进行清洗和研磨,最终得到闪烁体材料粉末。针对金属卤化物闪烁体还有其他制备方法,如采用种晶诱导冷烧结技术制造出一种纹理 TPP_2MnBr_4 (TPP:四苯基膦)透明陶瓷^[19]。

堆叠式闪烁屏的制备通常需要将闪烁体材料粉末制成较薄的闪烁屏。首先,将闪烁体材料粉末与PMMA粉末混合,溶解在溶剂甲苯中。加热搅拌至完全溶解后,将溶液均匀地倒在玻璃模具或基板上。随后,将模具或基板放置在不通风的环境中,让溶剂缓慢蒸发。待溶剂完全挥发后,即可取下得到的闪烁屏。通过精确控制闪烁体溶液的体积,可以调节闪烁屏的厚度,从而满足不同的应用需求。

为适应不同的应用环境,还可将闪烁体制成柔性闪烁屏,如以聚二甲基硅氧烷(PDMS, Polydimethylsiloxane)为载体,通过溶液合成的 Cs_2ZrCl_6 闪烁屏^[20],或利用掺杂镧系元素的纳米材料和柔性基底,实现无平板、高分辨率、三维成像,称为X射线发光扩展成像^[21]。

叠层闪烁体通常还需要考虑层与层之间的光传递和出光效率问题,需要对闪烁体表面进行结构优化。同济大学刘波课题组提出将闪烁体与光子人工微结构相结合的方法,通过周期性排列的介质结构,将导波模式的光子耦合到辐射模式,提高光提取效率,使用光子晶体调控光发射方向,优化探测器的光子收集效率^[22]。这类的结构化设计有助于提高叠层闪烁体的出光效率和增强层与层之间的光学耦合。

2.3 算法分析

在得到拍摄的闪烁光多光谱图像后,还需要对所得的可见多光谱图像进行算法上的解码分析,分离出不同X射线能量通道上的能谱信息,从而获得所需的X射线多能谱图像。

2.3.1 能谱分辨算法

在基于叠层闪烁体的多光谱成像技术中,算法扮演着至关重要的角色,其核心任务是从闪烁体发射的光谱信息中精准解码并重构出X射线光

谱信息。一种常见的实现方法是,依据各层闪烁体针对不同能量 X 射线的吸收特性,同时结合已知的材料参数,构建相应的数学模型,并通过求解该模型来获取所需信息。例如,可以通过测量不同厚度组合的叠层闪烁体在不同能量 X 射线照射下的发光强度,再运用朗伯比尔定律,构建相应的方程组,进而求解出 X 射线的能谱分布。

具体而言,假设第 i 层闪烁体对能量为 E 的 X 射线的吸收系数为 $\mu_i(E)$,厚度为 d_i ,入射 X 射线强度为 $I_0(E)$,经过第 i 层闪烁体后的 X 射线强度为 $I_i(E)$,则有 $I_i(E) = I_{i-1}(E) \times e^{-\mu_i(E)d_i}$ ($i=1, 2, \dots, n$, $I_0(E)$ 为初始入射 X 射线强度)。同时,第 i 层闪烁体在吸收 X 射线后发出的闪烁光强度 L_i 与吸收的 X 射线能量及自身的发光效率等因素相关,可表示为 $L_i = f_i(I_{i-1}(E), \mu_i(E), d_i)$ 。通过测量各层闪烁体的发光强度 L_i ,利用上述关系建立方程组,采用数值计算方法例如迭代法、最小二乘法等求解方程组,从而得到入射 X 射线的能量谱 $I_0(E)$ 。

在实际应用过程中,还需充分考量诸多因素对测量结果所产生的影响,其中闪烁体的自吸收以及散射现象便是不可忽视的关键要素。为了有效应对这些问题,必须对算法进行相应的修正与优化操作。以自吸收为例,可以通过开展实验,精确测量不同厚度闪烁体的自吸收系数,随后将这些系数融入到计算模型当中。如此便能显著提升重构光谱的准确性,进而为后续的分析与研究提供更为可靠的数据支持。

2.3.2 物质识别算法

基于多能谱 X 射线成像的物质识别算法主要使用基物质分解的方法,将物质的线性衰减系数表示为两个已知材料的线性组合,通过解线性方程组得到分解系数,进而计算等效原子序数和电子密度,并以此来判别物质类型^[23]。Alvarez 和 Macovski 提出的算法^[24]是基物质分解的基础。该算法通过测量两种不同能量下的 X 射线衰减,分离出康普顿散射和光电效应这两种相互作用的贡献,推导出材料的有效密度(ρ_{eff})和有效原子序数(Z_{eff})。经过进一步拓展,即可得到两基物质分解模型。

基物质分解方法主要有两种:一是两步法,把图像重建和基物质分解分成两步进行,包括基于图像域和投影域的方法;二是直接迭代法,建立投影数据和分解系数图像之间的直接关系,直接求

解图像^[25]。直接迭代法一般计算过程复杂,耗时较长,应用较少;而两步法则应用范围较广,其中基于图像域的方法对空间几何一致性的要求不高,在应用上更加灵活,计算更加简便^[26]。此外,根据基物质种类数量的不同,还可以分为两基物质分解法和三基物质分解法^[27],相比之下,三基物质分解法在针对复杂材料时比两基物质要更加精确。

Schaff 等运用基于传播的相位对比成像(PBI, Phase-contrast imaging)来改善基物质分解算法^[28]。通过理论分析和模拟实验研究,比较了 PBI 与传统衰减成像在基物质分解中的效果。PBI 在低能量下对软组织和电子密度图像的噪声有抑制作用,而在高能量下则可能增加图像噪声。另外, PBI 对不同材料的影响取决于材料的原子序数和成像参数,低原子序数材料在较高能量下仍能从 PBI 中受益。同时,多能量测量可以提供更稳定的相位恢复,尤其是在双能量测量中可能出现的算法不稳定性可以通过增加第三个能量测量来解决。

Goodsitt 等提出了三基物质分解模型,基于体积守恒及 CT 值加权和原理,通过测量样本的 CT 值与参考标准材料,估计骨、软组织和脂肪的体积分数^[29]。Liu 等利用双能量 CT(DECCT, Dual-energy CT)技术对三种材料的混合物进行定量成像,以准确测量元素组成和质量分数,同时提出了一种基于质量守恒的三基物质分解算法^[30]。该方法在低噪声成像条件下能够准确测量元素浓度,对临床应用中测定三种材料混合物中各化学元素的质量分数具有重要意义,且无需依赖体积守恒的假设。

3 基于侧入射闪烁体编码的多能谱 X 射线探测器

叠层闪烁体成像适合能量通道数要求不多,但迫切需要大面阵实时动态成像的应用场景。依照类似的先编码再解码的化难为易的思路,可以设计其他类型的编码器,以应对其他应用场景的需求。比如在扫描 CT 成像中,并不需要大面阵成像,但是需要更多的能量通道数。针对这些典型应用需求,2024 年,杨旻课题组冉鹏等利用一种闪烁体材料,仅改变 X 射线照射路径,实现了多能谱 X 射线探测器,并获得更高的能量分辨率^[31]。

这种侧照式闪烁体编码器结构,根据不同能量X射线的穿透能力差异,使得闪烁体受激发产生的闪烁光强度分布不均匀。利用X射线衰减的朗伯比尔定律,分析推导出闪烁光的强度分布与入射X射线光谱的数学关系,并建立通用的数学解析模型,解码重构入射X射线的光谱,得到多能谱的X射线成像效果。

3.1 器件设计

侧照式闪烁体与传统的垂直入射式闪烁体的区别主要是X射线与闪烁体的几何映射关系不同。侧照式闪烁体平行放置于入射的X射线束旁,X射线从其侧面斜向射入,具体布局可参看图6。依据X射线在闪烁体中穿透深度与其能量紧密相关的原理,高能X射线光子能够深入闪烁体内部,穿透路径较长;而低能X射线光子则只能在较浅的区域被吸收,穿透深度相对较短。这一特性使得闪烁体上表面的发光强度呈现出不均匀的分布状态,且这种不均匀性与入射X射线的能谱特征紧密相关。

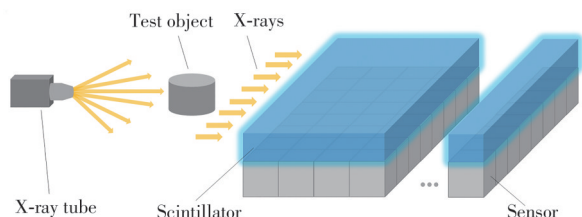


图6 基于侧照闪烁体X射线多能谱成像系统示意图^[31]

Fig.6 Schematic of a side-illuminated scintillator-based X-ray multi-energy imaging system^[31]

$$\begin{cases} R_1 = f_1(I_0(E_1), I_0(E_2), \dots, I_0(E_m), \mu_1(E_1), \mu_1(E_2), \dots, \mu_1(E_m), d_1) \\ R_2 = f_2(I_0(E_1), I_0(E_2), \dots, I_0(E_m), \mu_2(E_1), \mu_2(E_2), \dots, \mu_2(E_m), d_2) \\ \vdots \\ R_n = f_n(I_0(E_1), I_0(E_2), \dots, I_0(E_m), \mu_n(E_1), \mu_n(E_2), \dots, \mu_n(E_m), d_n) \end{cases} \quad (1)$$

其中 $E_1, E_2, \dots, E_m$ 为X射线的 m 个能量通道, $\mu_i(E_j)$ 为第 i 个区域对能量为 E_j 的X射线的吸收系数, d_i 为第 i 个区域的厚度(在均匀划分区域时可简化计算), f_i 为与发光物理过程相关的函数表达式。

在实际应用中,为了精确获取入射X射线的光谱信息,可以利用数值计算技术,如矩阵求解和优化算法等,来有效求解相关方程组。在该过程中,为了提升算法的准确性和稳定性,对测量数据进行预处理是必不可少的环节。具体而言,需要采取一系列措施,包括消除噪声、校正背景光等,以确保数据的纯净度和可靠性。此外,持续优化算法中的关

键参数同样至关重要。通过实验测量或理论计算,可以获得更为精确的吸收系数,进而显著提升算法在重构X射线光谱时的精度。这些改进不仅能够提升算法的准确性和稳定性,还能确保算法在处理复杂光谱数据时的高效性和准确性,从而推动相关领域的技术进步。

3.2 算法分析

在算法方面,主要依据X射线衰减的朗伯比尔定律来建立闪烁光强度分布与入射X射线光谱的数学关系。将闪烁体沿X射线入射方向均匀划分成多个区域,对于每个区域,根据朗伯比尔定律可得:当一束能量为 E 的单体X射线穿过厚度为 d 的闪烁体区域时,其强度衰减为 $I(E) = I_0(E) \cdot e^{-\mu(E) \cdot d}$,其中 $I_0(E)$ 为该区域入射X射线的初始强度, $\mu(E)$ 为闪烁体对能量为 E 的X射线的吸收系数。

鉴于不同能量的X射线在闪烁体中的穿透深度存在差异,这使得各区域的闪烁光强度与入射X射线光谱之间形成了复杂的关联。为了深入探究这种关系,可以对多个区域的闪烁光强度测量值进行详细分析,进而构建超定方程组。具体而言,将闪烁体划分为 n 个区域,并精确测量每个区域的闪烁光强度。对于每个区域,依据朗伯比尔定律,都能得到相应的方程。通过整合这些方程,便形成了一个完整的方程组,如下所示:

键参数同样至关重要。通过实验测量或理论计算,可以获得更为精确的吸收系数,进而显著提升算法在重构X射线光谱时的精度。这些改进不仅能够提升算法的准确性和稳定性,还能确保算法在处理复杂光谱数据时的高效性和准确性,从而推动相关领域的技术进步。

4 多光谱探测与成像应用拓展

基于闪烁体编码器的X射线多能谱成像技术的研究已经取得了众多关键性的突破。特别是在叠层闪烁体编码多光谱探测器这一细分领域,科

研团队成功构建了双层以及四层堆叠式闪烁体的概念原型,并将其应用于多光谱平板 X 射线成像,有力地推动了该技术的发展。

冉鹏等设计的双层堆叠式闪烁体结构在分辨不同密度材料上展现出明显的效果^[11]。如图 7 所示,通过对不同材料组合及厚度优化,在“骨骼-肌肉”模型等实验中,下层闪烁体吸收高能 X 射线发

出蓝色闪烁光,可以清晰辨认出“骨骼”上的缺陷;上层闪烁体吸收低能 X 射线发出红色闪烁光,可以清晰辨认出“肌肉”上的缺陷。通过两层闪烁体的堆叠,能清晰显示出传统平板 X 射线成像难以分辨的细节,有效提升了对相似物质的分辨能力,为医学诊断、工业材料检测等提供了更准确的成像手段。

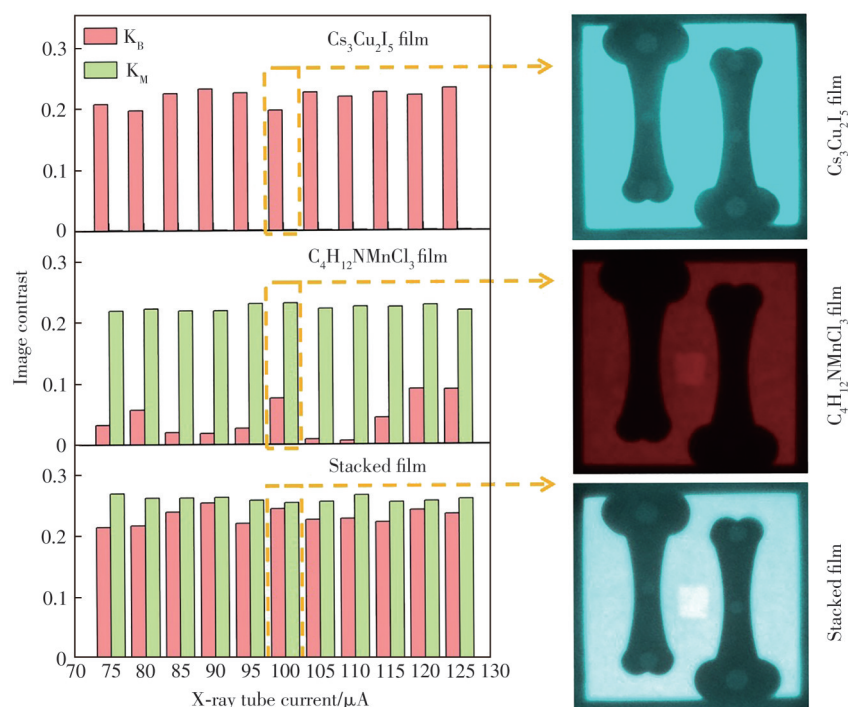


图 7 分离闪烁体以及堆叠闪烁体的骨骼缺陷(K_B)和肌肉缺陷(K_M)的 X 射线成像对比度及其 X 射线成像图^[11]

Fig.7 The X-ray image contrast of bone defects (K_B) and muscle defects (K_M) with separated scintillators and stacked scintillators and their X-ray images^[11]

曾海波、李晓明课题组使用自己设计的双层堆叠式闪烁体对不同密度的物体成像,并测量其 RL 光谱^[12]。从图 8 中可以明显看出,随着材料密度的逐渐降低,成像颜色呈现出从青绿色(铁板)到橙红色(A4 纸)的线性变化趋势。这一现象表明,颜色坐标的变化与物体密度之间存在着紧密的线性关系。这种线性关系的发现,为通过颜色来准确判断物体密度提供了一种切实可行的方法。

Omar 课题组使用 TFB 结构闪烁体对昆虫、树叶等生物样本进行成像^[13],如图 9 所示,借助对低能和高能图像进行分解与重建的操作,能够精准区分低密度及高密度组织。其中,低能图像清晰地呈现出翅膀图案,而高能图像则清晰地展现出内部高密度组织,这一特性充分证明了该技术在复杂混合密度物质进行成像时所具有的显著

优势。

在多光谱探测器研究领域,特别是基于侧入射提取 X 射线深度信息方面,采用 $Cs_3Cu_2I_5$ 等高性能材料精心制备了侧照式闪烁体。在此基础上,成功构建了一套具备 8 个能量通道的多光谱 X 射线探测与 CT 成像系统^[30]。实验过程中,通过精确测量闪烁光强度分布,并结合先进的算法重构技术,能够精准捕获 X 射线的光谱信息。该系统在对复杂物体内部结构进行成像以及物质成分的分析时,展现出了卓越的性能,尤其在电子元件检测和生物样本成像等应用场景中,取得了显著的效果,为相关领域的研究和应用提供了有力的技术支撑,有较好的应用前景。

基于闪烁体编码器的多能谱 X 射线成像技术在多个领域展现了差异化应用潜力。在医学成像中,能通过高低能量层分离实现双能 CT 骨密度定

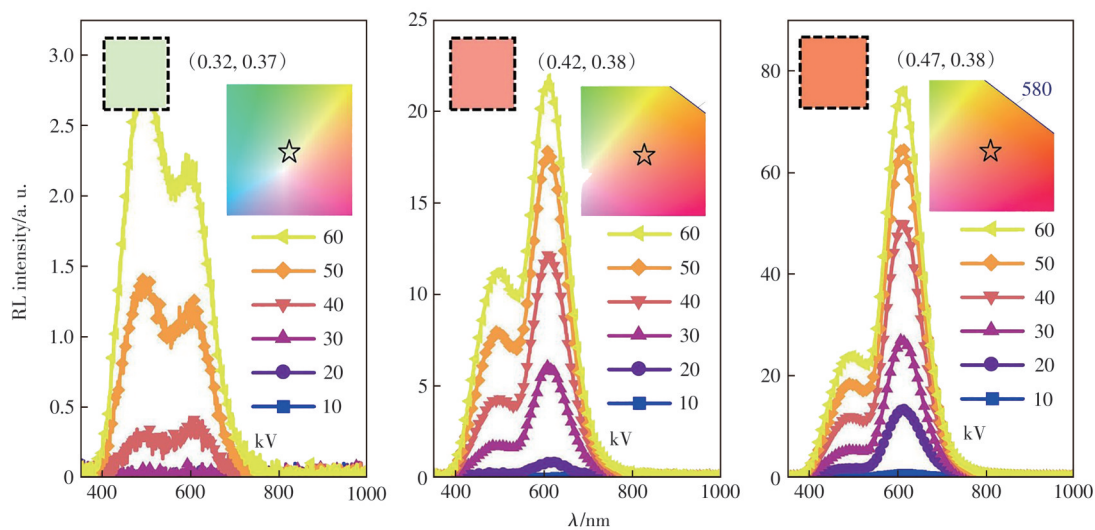


图 8 用铁、铝和 A4 纸的 X 射线成像物体测量的 RL 光谱和预测色度坐标^[12]

Fig. 8 RL spectra and predicted chromaticity coordinates measured with x-ray imaging objects of Fe, Al, and A4 paper^[12]

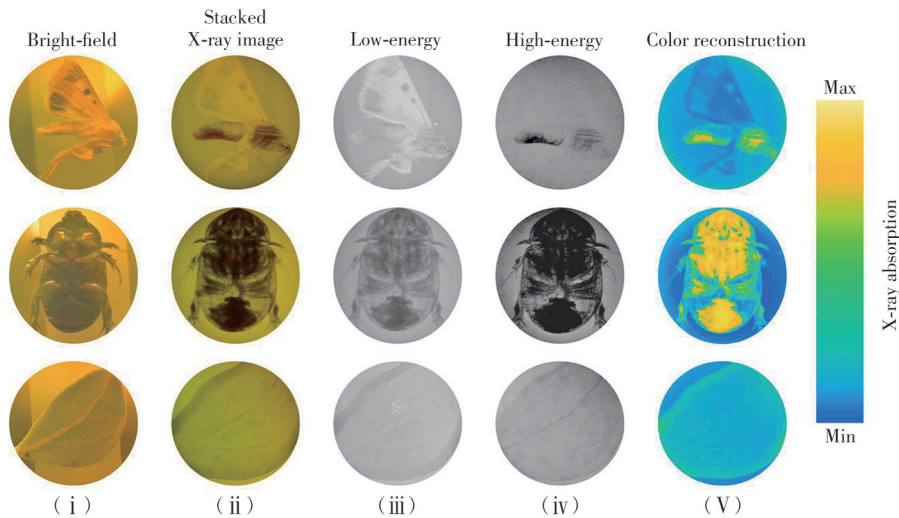


图 9 基于 TFB 夹层结构闪烁体的飞蛾、甲虫和叶片的明场 (i) 和叠加 (ii)、分解 (iii ~ iv) 以及彩色重建 (V) 双能 X 射线图像^[13]

Fig.9 Bright-field (i) and stacked (ii), decomposed (iii – iv) and color reconstructed (V) dual-energy X-ray images of a moth, a beetle, and a leaf based on the TFB sandwich structure scintillator^[13]

量分析^[32],准确预测骨质疏松性骨折的发生风险;也可凭借高空间分辨率助力乳腺肿瘤血管成像,通过定量参数区分良性和恶性病变、预测乳腺癌患者组织病理学^[33],能够显著提升疾病诊断的准确性。此外,通过更精准地检测肿瘤组织与正常组织之间的差异,以及区分不同类型的钙化斑块,为临床诊断提供了更为可靠的依据。安全检查领域,可以利用能量阈值分割识别重金属(如机场行李中的毒品或爆炸物);工业检测中,可用于检测材料内部的微小缺陷,成像质量高,甚至可以实现三维检测,直观地表征被遮挡部分的三维形貌^[34];还能分析复合材料的成分分布,从而为材料的质

量控制和性能评估提供有力支持。

在其他应用方面,随着第三代同步辐射光源的普及,X射线光源特性显著提升,推动了新型成像方法的产生,也改进了传统成像方式。上海光源 BL13W 为满足生物医学领域用户需求,积极发展多种 X 射线成像方法,拓展了显微成像在生物医学研究中的应用,如脑中风、骨骼病变等基础问题研究,具有很大的推广潜力^[35]。同步辐射 X 射线光源具有很强的相干性,可以实现 X 射线的相位成像,与本文重点关注的光谱成像具有很强的互补性,有望实现 X 射线强度-相位-光谱的多维光场信息的探测与成像,为 X 射线成像带来更多

的信息维度。

5 挑战与展望

尽管基于闪烁体编码器的 X 射线多能谱成像技术已经取得了显著的进展,但仍面临着诸多挑战。

在材料方面,亟需进一步研发高性能的闪烁体材料,这些材料应具备更高的光产额、更低的自吸收率、更多样的光谱响应范围以及更优异的稳定性等特性。特别是,这些光学特性的性能协同提升问题仍然是重要挑战。与此同时,材料的制备工艺也需要进一步优化,以降低成本、提高生产效率以及材料的一致性。

在器件设计方面,如何进一步提升探测器的空间分辨率、能量分辨率以及响应速度,已然成为当前的核心课题。这迫切需要深入探索更为前沿的纳米光学结构设计理念与制造工艺,通过优化闪烁体的光学结构来削弱信号干扰,降低信号在传输与处理过程中的损失,进而实现探测器整体性能的全方位提升。

在算法研究方面,虽然目前已构建出一系列行之有效的数学模型,但在应对复杂现实状况时,这些模型仍暴露出一定的局限性。例如,在高噪声环境、强散射介质场景,或是面临多种未知因素交织的复杂状况下,算法的准确性与可靠性尚有较大的提升空间。鉴于此,对算法进行持续改进与创新成为当务之急,尤其是要深度融合人工智能及机器学习技术,借助海量的实验数据与模拟数据开展训练和优化工作,以此赋予算法更强的自适应性与泛化能力,使其能够更加精准且可靠地应对各类复杂成像场景,推动算法在实际应用中发挥更为卓越的效能。

在系统集成领域,如何将闪烁体编码器、探测器、信号处理电路以及算法软件等众多组件进行高效整合,以实现设备的小型化、便携化与低成本化,已成为未来亟待攻克的重要难题。这一挑战的攻克,离不开跨学科的深度协作,需要材料科学、电子工程、计算机科学等多个学科领域的协同创新,以期在复杂的系统集成过程中,突破现有的技术瓶颈,推动相关设备向更加高效、便捷且经济的方向发展。

展望未来,随着技术的持续发展与创新,基于闪烁体编码器的 X 射线多能谱成像技术有望在以

下关键领域取得重大突破,为相关行业的进步与科研的深入提供强有力的技术支撑。

(1)在医学成像领域中,致力于实现更高分辨率、更低剂量的物质密度敏感型多能谱成像,以满足医学诊断对精准度的严苛要求。例如,在心血管疾病诊断方面,能够清晰呈现血管壁的病变情况及斑块成分,为临床医生提供更为详尽的诊断依据,助力早期疾病发现与精准治疗方案制定;在癌症诊断领域,显著提高肿瘤组织的辨识度,使肿瘤分期更为准确,为患者提供更为科学、有效的治疗策略,提升治疗效果与患者生存率;多光谱成像可以有效区分骨骼和软组织的成分,为骨质疏松症、关节炎等疾病的诊断提供更精确的信息。

(2)在工业检测领域中,需要满足对微小缺陷和复杂材料结构检测的更高标准,进一步提升工业生产的质量控制水平与产品可靠性。在半导体芯片制造环节,能够更精准地检测缺陷的物质组成,确保芯片的高性能与高可靠性;在航空航天材料检测方面,碳纤维等低密度物质复合材料很难被传统能量积分型 X 射线检测,多能谱成像对这类低密度物质有更高的成像衬度,可以对其内部结构和性能进行更为精确的评估,为航空航天飞行器的安全性与耐久性提供坚实保障。

(3)在材料科学研究领域中,为材料研究提供更为详尽、精确的信息,助力科研人员深入探究材料的微观世界,揭示材料的内在特性与规律,加速新型材料的研发进程,为电子、能源、航空航天等众多高科技领域的发展提供坚实的材料基础。多光谱成像可以更好地对复合材料的成分分布和界面特性进行精确评估,提高对密度相似材料的判别准确率,为复合材料的设计和优化提供重要依据。

总之,基于闪烁体编码器的 X 射线多能谱成像技术具有广阔的发展前景,但也面临着诸多挑战。通过持续的研究和创新,有望克服这些挑战,实现技术的进一步突破和广泛应用,为相关领域带来新的发展机遇和变革。

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.20250060>

参 考 文 献:

- [1] OU X Y, CHEN X, XU X N, *et al.* Recent development in X-ray imaging technology: future and challenges [J]. *Research*, 2021, 2021: 9892152.
- [2] 王春燕, 刘漪. 双能量X射线成像技术 [J]. 医疗设备信息, 2001, 16(10): 27-30.
WANG C Y, LIU Y. Dual-energy X-ray imaging technique [J]. *China Med. Devices*, 2001, 16(10): 27-30. (in Chinese)
- [3] WILLEMINK M J, PERSSON M, POURMORTEZA A, *et al.* Photon-counting CT: technical principles and clinical prospects [J]. *Radiology*, 2018, 289(2): 293-312.
- [4] BORGES A P, ANTUNES C, CURVO-SEMEDO L. Pros and cons of dual-energy CT systems: “one does not fit all” [J]. *Tomography*, 2023, 9(1): 195-216.
- [5] WANG H L, PENG C X, CHEN M H, *et al.* Wide-range color-tunable organic scintillators for X-ray imaging through host-guest doping [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2024, 63(3): e202316190.
- [6] YANG B, YIN L X, NIU G D, *et al.* Lead-free halide Rb_2CuBr_3 as sensitive X-ray scintillator [J]. *Adv. Mater.*, 2019, 31(44): 1904711.
- [7] PAN W C, WU H D, LUO J J, *et al.* $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$ single-crystal X-ray detectors with a low detection limit [J]. *Nat. Photonics*, 2017, 11(11): 726-732.
- [8] CHENG S L, NIKL M, BEITLEROVA A, *et al.* Ultrabright and highly efficient all-inorganic zero-dimensional perovskite scintillators [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2021, 9(13): 2100460.
- [9] ROCCANOVA R, YANGUI A, SEO G, *et al.* Bright luminescence from nontoxic CsCu_2X_3 ($\text{X} = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) [J]. *ACS Mater. Lett.*, 2019, 1(4): 459-465.
- [10] DONG M Y, WANG Z Y, LIN Z Y, *et al.* Temperature-adaptive organic scintillators for X-ray radiography [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2025, 147(5): 4069-4078.
- [11] RAN P, YANG L R, JIANG T M, *et al.* Multispectral large-panel X-ray imaging enabled by stacked metal halide scintillators [J]. *Adv. Mater.*, 2022, 34(42): 2205458.
- [12] HU X D, LUO S H, LENG J, *et al.* Density-discriminating chromatic X-ray imaging based on metal halide nanocrystal scintillators [J]. *Sci. Adv.*, 2023, 9(37): eadh5081.
- [13] SHAO W Y, HE T Y, WANG J X, *et al.* Transparent organic and metal halide tandem scintillators for high-resolution dual-energy X-ray imaging [J]. *ACS Energy Lett.*, 2023, 8(6): 2505-2512.
- [14] HE T Y, SHAO W Y, YIN J, *et al.* Multi-energy X-ray imaging enabled by ΔE -E telescope scintillator [J]. *Matter*, 2024, 7(7): 2521-2535.
- [15] 马文博, 匡翠方, 刘旭, 等. 基于新型金属卤化物半导体和闪烁体的X射线探测与成像研究进展 [J]. 光学学报, 2022, 42(17): 81-99.
MA W B, KUANG C F, LIU X, *et al.* Research progress of X-ray detection and imaging based on emerging metal halide semiconductors and scintillators [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2022, 42(17): 81-99. (in Chinese)
- [16] HUI J, RAN P, SU Y R, *et al.* Stacked scintillators based multispectral X-ray imaging featuring quantum-cutting perovskite scintillators with 570 nm absorption-emission shift [J]. *Adv. Mater.*, 2025, 37(10): e2416360.
- [17] ZHOU F G, LI Z Z, LAN W, *et al.* Halide perovskite, a potential scintillator for X-ray detection [J]. *Small Methods*, 2020, 4(10): 2000506.
- [18] CHEN Q S, WU J, OU X Y, *et al.* All-inorganic perovskite nanocrystal scintillators [J]. *Nature*, 2018, 561(7721): 88-93.
- [19] HAN K, SAKHATSKYI K, JIN J C, *et al.* Seed-crystal-induced cold sintering toward metal halide transparent ceramic scintillators [J]. *Adv. Mater.*, 2022, 34(17): 2110420.
- [20] ZHANG F, ZHOU Y C, CHEN Z P, *et al.* Thermally activated delayed fluorescence zirconium-based perovskites for large-area and ultraflexible X-ray scintillator screens [J]. *Adv. Mater.*, 2022, 34(43): 2204801.
- [21] OU X Y, QIN X, HUANG B L, *et al.* High-resolution X-ray luminescence extension imaging [J]. *Nature*, 2021, 590(7846): 410-415.
- [22] 刘波, 陈鸿, 顾壮, 等. 闪烁体与光子人工微结构 [J]. 物理, 2014, 43(4): 254-262.
LIU B, CHEN H, GU M, *et al.* Scintillators boosted by nanophotonics [J]. *Physics*, 2014, 43(4): 254-262. (in Chinese)

- [23] 郭俏, 姚旭峰. 双能CT图像域基材料分解算法的研究进展 [J]. CT理论与应用研究, 2023, 32(1): 139-146.
GUO Q, YAO X F. Progress of material decomposition algorithms in dual-energy CT imaging [J]. *CT Theor. Appl.*, 2023, 32(1): 139-146. (in Chinese)
- [24] ALVAREZ R E, MACOVSKI A. Energy-selective reconstructions in X-ray computerised tomography [J]. *Phys. Med. Biol.*, 1976, 21(5): 733-744.
- [25] 周正东, 章栩苓, 辛润超, 等. 基于MAP-EM算法的双能CT直接迭代基材料分解方法 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(5): 935-941.
ZHOU Z D, ZHANG X L, XIN R C, *et al.* Direct iterative basis material decomposition method for dual-energy CT based on MAP-EM algorithm [J]. *J. Southeast Univ. (Nat. Sci. Ed.)*, 2020, 50(5): 935-941. (in Chinese)
- [26] 李磊. 双能CT图像重建算法研究 [D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2016.
LI L. *Research on Image Reconstruction Algorithms of Dual Energy Computed Tomography* [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2016. (in Chinese)
- [27] AGOSTINI A, BORGERESI A, MARI A, *et al.* Dual-energy CT: theoretical principles and clinical applications [J]. *Radiol. Med.*, 2019, 124(12): 1281-1295.
- [28] SCHAFF F, MORGAN K S, PAGANIN D M, *et al.* Spectral X-ray imaging: conditions under which propagation-based phase-contrast is beneficial [J]. *Phys. Med. Biol.*, 2020, 65(20): 205006.
- [29] GOODSITT M M, ROSENTHAL D I, REINUS W R, *et al.* Two postprocessing CT techniques for determining the composition of trabecular bone [J]. *Invest. Radiol.*, 1987, 22(3): 209-215.
- [30] LIU X, YU L F, PRIMAK A N, *et al.* Quantitative imaging of element composition and mass fraction using dual-energy CT: three-material decomposition [J]. *Med. Phys.*, 2009, 36(5): 1602-1609.
- [31] RAN P, YAO Q R, HUI J, *et al.* Multi-energy X-ray linear-array detector enabled by the side-illuminated metal halide scintillator [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2024, 18(1): 2300587.
- [32] GRUENEWALD L D, KOCH V, MARTIN S S, *et al.* Diagnostic accuracy of quantitative dual-energy CT-based volumetric bone mineral density assessment for the prediction of osteoporosis-associated fractures [J]. *Eur. Radiol.*, 2022, 32(5): 3076-3084.
- [33] WANG X X, LIU D H, ZENG X F, *et al.* Dual-energy CT quantitative parameters for the differentiation of benign from malignant lesions and the prediction of histopathological and molecular subtypes in breast cancer [J]. *Quant. Imaging Med. Surg.*, 2021, 11(5): 1946-1957.
- [34] 张辉, 张邹铨, 陈煜嵘, 等. 工业铸件缺陷无损检测技术的应用进展与展望 [J]. 自动化学报, 2022, 48(4): 935-956.
ZHANG H, ZHANG Z Q, CHEN Y R, *et al.* Application advance and prospect of nondestructive testing technology for industrial casting defects [J]. *Acta Autom. Sinica*, 2022, 48(4): 935-956. (in Chinese)
- [35] 任玉琦, 王玉丹, 和友, 等. 上海光源X射线成像的生物学应用研究进展 [J]. 生命科学, 2013, 25(8): 762-770.
REN Y Q, WANG Y D, HE Y, *et al.* X-ray imaging and its biomedical applications at SSRF [J]. *Chin. Bull. Life Sci.*, 2013, 25(8): 762-770. (in Chinese)



刘嘉程(2003-),女,浙江金华人,博士研究生,2024年于浙江大学获得学士学位,主要从事闪烁体X射线间接成像的研究。

E-mail: 12430058@zju.edu.cn



杨阳(1986-),男,山西阳泉人,博士,特聘教授,2015年于加州大学洛杉矶分校(UCLA)获得博士学位,主要从事X射线成像领域的研究。

E-mail: yangyang15@zju.edu.cn