

探讨 X 射线特性的物质识别方法

张海涛

浙江省杭州海关 浙江杭州 310000

摘要: X 射线因其独特的物理特性,在物质识别领域具有广泛的应用前景。本文探讨了基于 X 射线特性的多种物质识别方法,包括双能 X 射线成像技术、X 射线衍射技术、X 射线荧光光谱技术等。通过分析这些技术的原理、优势及应用实例,总结了其在物质识别中的有效性与局限性,并对未来发展方向进行了展望。研究表明,X 射线技术在物质成分分析、违禁品检测、工业材料检测等领域具有重要的应用价值。

关键词: X 射线特性;物质识别;双能成像;X 射线衍射;X 射线荧光

X 射线从发现之日起,就以其能量高、穿透性好和可电离物质的特点,在医学、工业和安检中得到了广泛的应用。物质识别作为 X 射线技术中最重要的一个应用,它能够通过通过对 X 射线和物质作用所产生信号进行分析,来达到快速探测和鉴定物质成分、结构和性能的目的。伴随着科技的进步,根据 X 射线特性进行物质识别的方法也层出不穷,这对相关方面的研究起到了强有力的支撑作用。

1. X 射线的性质

X 射线是一种电磁波,具有极短的波长和极高的能量,其波长主要分布在 0.01 纳米到 10 纳米的范围内。1895 年,德国物理学家威廉·康拉德·伦琴在探究真空管高压放电现象的过程中,意外地发现了 X 射线,这一重大发现标志着现代物理学和医学影像学领域进入了一个全新的时代^[1]。X 射线具有波粒二象性,既呈现出波动的性质,例如干涉和衍射现象等;又带有粒子的性质,能和物质作用而产生光电效应和康普顿散射。这一特有的特性,使得它在许多领域都有广阔的用途。X 射线的穿透能力是其中最突出的一个性能,可以穿透很多可见光不能穿透的材料,例如人体软组织、木材和塑料。X 射线在不同材料中衰减的大小是不一样的,主要是由材料的原子序数、密度和 X 射线能量决定的。通常原子序数越大,密度越高的材料,X 射线衰减越大。在工业检测方面,X 射线能够穿透金属部件并探测出其内部缺陷,例如裂纹和气孔。对于厚度为 10 毫米的铝合金板材,使用 100keV 的 X 射线进行照射,大多数 X 射线能够穿透板材,但是当板材内部存在直径为 1 毫米的气孔时,所穿过的 X 射线强度将发生显著改变,对该改变进行探测即可检测出缺陷是否存在。

2. X 射线特性的物质识别方法

2.1 双能 X 射线成像技术

双能 X 射线成像技术是通过使用不同能量的 X 射线照射物体,然后分析 X 射线在不同能量下的衰减差异,以此来识别物质。这一技术是建立在不同物质在不同能量 X 射线中衰减系数规律不一样的原理上。通常使用两种不同能量的 X 射线源,如低能 X 射线的能量范围是 40 – 80keV,而高能 X 射线的能量范围是 100 – 140keV^[2]。X 射线在物体中传播时,各种物质因原子序数和密度的不同而吸收高低能 X 射线,利用探测器获得高低能 X 射线穿过物体时的强度信息,经复杂算法处理可获得物质有效原子序数和其他参数来分辨不同物质。比如在安检领域,对于常见的有机物(如塑料、纸张等)和无机物(如金属等),有机物对低能 X 射线的衰减相对较小,对高能 X 射线的衰减更小;而无机物对低能 X 射线衰减大,对高能 X 射线衰减也较大。利用双能 X 射线成像技术来处理这些衰减的数据,可以清楚地展示行李中的物品形状,并通过颜色等手段直观地区分各种物质,成功地鉴别出违禁品,其识别的准确性可以超过 90%。

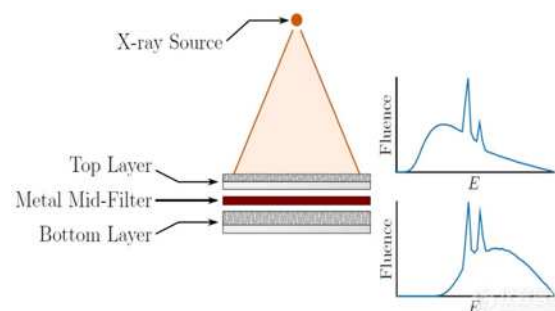


图 1: 双能 X 射线成像技术

2.2 X 射线衍射技术

X 射线衍射技术是根据 X 射线作用于晶体物质所产生的衍射现象，对物质的结构及组成进行分析的技术，一束波长 λ 的 X 射线入射到晶体时，晶体内有规律地排列着的原子对 X 射线有散射作用，从某一方向看，被散射 X 射线之间发生干涉而加强，从而得到衍射图样^[3]。

根据布拉格定律 $2d\sin\theta = n\lambda$ ，其中 d 为晶体中原子平面的间距， θ 为衍射角， n 为衍射级数。测量衍射角 θ 并知道 X 射线波长 λ ，便可计算晶体内原子间的距离 d ，从而反推其结构与组成。例如在材料科学中，分析钢铁中的晶体结构，通过 X 射线衍射分析，若测得某一衍射峰对应的衍射角 θ 为 30° ，使用波长为 0.154nm 的 Cu 靶 X 射线（常见 X 射线源），通过计算相应的原子平面间距 d ，并与钢铁中可能出现的晶体结构数据进行比较，可以准确地确定晶体的种类，从而评估钢铁的质量和性能，为钢铁生产工艺的优化提供关键的参考依据。

2.3 X 射线荧光光谱技术

X 射线荧光光谱技术利用高能 X 射线对样品进行照射，从而激发样品内部原子的内层电子，当这些外层电子向内部跃迁时，它们会发出特有的 X 射线荧光。每种元素都有其特定的荧光 X 射线能量和波长，当样品被 $10 - 50\text{keV}$ 的 X 射线激发时，不同的元素会产生不同的荧光 X 射线能量，例如，铁元素的 $K\alpha$ 荧光 X 射线能量大约是 6.4keV ，而铜元素的 $K\alpha$ 荧光 X 射线能量大约是 8.0keV ^[4]。利用探测器测得荧光 X 射线能量及强度，并与标准元素荧光特征谱线进行比较，可对样品元素成分进行定性及定量分析。在进行地质勘查时，通过对矿石成分的分析，可以迅速并准确地确定矿石中的各种元素含量，例如，铁矿石中的铁元素含量可以超过 60% ，同时也可探测到这些杂质元素中的少量硅、铝、钙等元素，这对矿石价值评估及开采利用都提供了重要信息。

2.4 其他 X 射线相关技术

除了上面提到的常规技术，还存在其他与 X 射线有关的技术手段。例如，在 X 射线成像的相位衬度成像技术中，传统的 X 射线成像主要依赖于吸收衬度，这对于软组织和其对 X 射线吸收差异较小的物体来说，其成像效果并不理想。相位衬度成像是利用 X 射线在物体中传播过程中的相位变化实现的。在 X 射线的波长范围为 $0.01 - 0.1\text{nm}$ 时，

生物软组织的折射率与其周围的介质存在细微的差异，这一现象可以通过使用特定的干涉装置等技术来实现，能够实现相位变化到强度变化的成像，与传统吸收衬度成像相比，软组织内肿瘤及其他病灶的探测分辨率提高了几倍，可以探测到 1mm 以下微小病灶。还有 X 射线光电子能谱技术，用 X 射线激发样品表面电子，测量发射出的光电子能量，可获取材料表面元素的化学价态和电子结构信息。例如，在分析金属表面的氧化层时，利用 X 射线光电子能谱技术，可以准确地鉴定金属氧化物中的金属价态，并评估其氧化水平，这对于研究材料的表面特性和防止腐蚀具有至关重要的作用。

表 1: 其他技术

技术手段	描述	应用
X 射线成像的相位衬度成像技术	利用 X 射线在物体中传播过程中的相位变化实现的成像技术	提高软组织内肿瘤及其他病灶的探测分辨率，可以探测到 1mm 以下微小病灶
X 射线光电子能谱技术	用 X 射线激发样品表面电子，测量发射出的光电子能量，获取材料表面元素的化学价态和电子结构信息	分析金属表面的氧化层，鉴定金属氧化物中的金属价态，并评估其氧化水平，对研究材料的表面特性和防止腐蚀具有重要作用

3. X 射线物质鉴定技术应用领域

3.1 违禁品检测

在机场、海关和其他重要地点，违禁品的检测中 X 射线物质识别技术起到了至关重要的作用，安检设备内 X 射线成像系统采用双能 X 射线成像技术等相关技术实现了乘客行李及物品的快速扫描。普通安检 X 射线设备可以探测各种违禁品，例如爆炸物、枪支弹药和管制刀具^[5]。对爆炸物而言，因其主成分大多为有机物，双能 X 射线成像时表现出异于周围物质的衰减特征，利用智能算法及图像识别技术可以精确地识别爆炸物形状及位置。安检设备能够以每分钟 $5 - 10$ 件行李的速度进行检测，这不仅显著提升了安检的工作效率，还确保了检测的准确性高达 95% 或更高，从而有力地维护了公众的安全。安保领域中违禁品检测非常关键，X 射线物质识别技术成了守护安保的一道关键防线，以机场安检为例，每天都有很多乘客和他们的行李需要被迅速而准确地甄别出来。X 射线安检设备是采用双能成像技术来实现 X 射线透过行李物品的，其发射的能量各不相同。低能 X 射线注重轻元素物质的成像，高能 X 射线对重元素物质较为灵敏。X 射线在行李中传播时，不同材料对射线的吸收是不一样的，探测器会接收到被衰减的射线，将其转换成电信号，通过复杂的算法处理产生清晰的图像。管制刀具和

其他金属物品的图像显示出高亮轮廓；爆炸物、毒品和其他有机物由于其原子结构不同于一般的物品，同样表现出独特的成像特征。在先进的图像识别算法的帮助下，安检人员可以迅速地异常物品进行识别，大大提高了安检的效率和精度，有效地制止了违禁品流入公共区域的行为，确保了乘客和市民的出行安全。

3.2 工业材料检测

工业生产中，材料的质量检测、缺陷分析等广泛采用 X 射线物质识别技术，以航空航天领域为例，飞机发动机叶片及其他关键部件的制造中都会用到 X 射线探伤技术对其内部缺陷进行探伤，通过使用 150 – 250keV 的 X 射线对叶片进行检查，可以检测到小于 0.5mm 的微小裂缝和气孔等缺陷，从而确保发动机部件的可靠性和安全性。汽车制造过程中汽车零部件铸造质量检查，利用 X 射线成像来判断铸件内有无缩孔和砂眼，以确保汽车零部件品质，减少次品率和增加生产效益。在工业生产中材料质量关系到产品的性能和安全，X 射线物质识别技术在其中扮演了一个必不可少的角色。机械制造行业中的金属零部件探伤检测中 X 射线能穿透厚重金属发现内部微观缺陷。如汽车发动机缸体铸造后，利用 X 射线探伤仪，发射特定能量 X 射线，当射线遇到内部砂眼、裂纹等缺陷时，穿透强度改变，在成像板或探测器上形成对应阴影。通过对阴影的位置、形状和尺寸的分析，可以准确地判断缺陷的状况，决定是返工还是报废处理。在电子制造领域中，对印刷电路板内的线路连接情况进行检测，X 射线能够清楚地显示出线路的方向，对虚焊和断路进行定位，确保电子产品的品质的稳定性，本实用新型提高了生产合格率，有利于工业生产的高效优质开展。

3.3 医学诊断

在 X 射线物质识别技术中，医学诊断是使用最广泛、最重要的一个领域，X 射线成像技术、X 射线透视、摄影、CT，向医生详细地展示人体内部结构。X 射线透视时，用 X 射线透过人体并在荧光屏或者探测器上产生实时影像可以观察到人体器官动态变化情况，常被用于心肺疾病初诊。

X 射线摄影技术能够捕捉到静态的人体影像，例如胸部的 X 光片，它可以用于检测肺部的炎症、结核和肿瘤等疾病，其空间分辨率可以达到 5 – 10lp/mm（线对 / 毫米），能够清楚地展示肺部的纹理和结构。CT（计算机断层扫描）技术则是医学影像学上的一大突破，它通过人体断层扫描获得系列断层图像，然后经计算机重建获得三维图像。与传统的 X 射线摄影相比，CT 的密度分辨能力增强了 10 – 20 倍，它可以检测到如早期肺癌这样的微小病变，这对于疾病的早期检测和治疗具有至关重要的意义，并为现代医学的进步提供了强大的推动力。

4. 结束语

综上所述，X 射线技术已在物质识别领域显示出较强的应用潜力。通过对已有技术的持续优化和对新方法的探索，X 射线物质识别技术必将在更多的领域中扮演重要角色。在今后的科技深入发展中，X 射线物质识别会变得更加有效和准确，对科学研究以及社会发展都会提供更加强大的支撑。

参考文献：

- [1] 王新, 杨宝璐, 杨诚, 徐捷, 穆宝忠. 基于 X 射线双光谱的物质识别方法研究 [J]. 实验室科学, 2024, 27(03): 30–34.
- [2] 刘斐, 王凤丽, 王新, 方恺, 张锦龙, 王占山. 基于双能 X 射线透射成像与能量色散衍射的物质分类与识别虚拟仿真实验 [J]. 实验室研究与探索, 2024, 43(08): 35–40+46.
- [3] 肖若男, 张立春, 吕弋. X 射线荧光光谱技术的发展及应用 [J]. 大学化学, 2025, 40(01): 227–233.
- [4] 丁子仪, 徐照, 曹敬文, 季涛涛, 周袁媛, 杨彦彦, 李桃生. 低剂量氟水基于 Nrf2 通路诱导肺癌细胞的辐射适应性反应 [J]. 辐射防护, 2025, 45(01): 67–76.
- [5] 杜旺哲, 刘元铭, 牛小森, 王涛. 铝合金压铸件 X 射线图像多任务分割方法研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(01): 15–22.

作者简介：张海涛（1979.6），男，汉族，本科，助理工程师，从事信息工程研究。