

无损检测技术在文物保护中的应用

王永进 周伟强 赵林娟

(砖石质文物保护国家文物局重点科研基地, 陕西省文物保护研究院, 西安 710075)

摘要: 文物的不可再生性决定了对文物样品的检测具有尽可能少干预、无损检测的非接触性、非破坏性、检测灵度高、时间短、样品所需量小及样品无需制备等特点, 而且在分析过程中不会对样品造成化学的、机械的、化学和热的分解, 是分析科学领域的研究热点之一, 被广泛应用于医学、药物、文物考古、宝石鉴定和庭科学等方面, 本文就近年来我国文物保护工作者在文物样品分析检测工作中无损分析技术的研究进展作一综述。

关键词: 无损 文物 检测

1. 引言

无损检测 (NDT) 在日常生活中经常被人们使用, 有着悠久的历史, 如人们通过拍打西瓜听声音来判断西瓜的好坏, 中医通过号脉来看病, 但真正作为一门技术学科的分支则是新兴的。无损检测技术是建立在现代科学技术基础之上的一门应用性技术学科, 它是在不损伤被检测物体的前提下, 应用物理方法, 研究其内部和表面有无缺陷的手段, 进而评价结构异常、缺陷存在和损伤程度^[1]。无损检测技术是现代工业发展必不可少的有效工具, 近年来无损检测技术有了飞速的发展, 世界各国积极地将不同学科的最新成果应用于无损检测领域, 大力开展无损检测技术的研究工作^[2]。由于无损检测技术对被测物体具有无损伤的特性, 许多研究者把它应用于文物保护研究中, 目的是为了获取与文物产地、制作年代、制作工艺等相关的物理化学信息。

2. 无损检测技术分类及原理

2.1 射线检测技术

射线的种类很多, 其中易于穿透物质的有X射线、 γ 射线、中子射线三种。这三种射线都被用于无损检测, 其中X射线和 γ 射线广泛用于锅炉压力容器焊缝和其他工业产品、结构材料的缺陷检测, 而中子射线仅用于一些特殊场合。射线检测最主要的应用是探测试件内部的宏观几何缺陷 (探伤)。按照不同特征, 如使用的射线种类、记录的器材、工艺和技术特点等, 可将射线检测分为许多种不同的方法。射线照相法是指用X射线或 γ 射线穿透试件, 以胶片作为记录信息的器材的无损的检测方

法。该方法是最基本的,应用最广泛的一种射线检测方法。射线检测适用于绝大多数材质和产品形式,如焊件、铸件、复合材料等。射线检测胶片对材质内部结构可生成缺陷的直观图像,定性定量准确,检测结果直接记录,并可长期保存。对体积型缺陷,如气孔、夹渣等的检出率很高,对面积型缺陷,如裂纹、未熔合类,如果照相角度不适当,则比较容易漏检。射线检测的局限性还在于成本很高,且射线对人体有害。目前,我国射线检测技术的主要研究领域为射线成像缺陷自动识别技术、射线计算机辅助成像技术(CR)、射线实时成像技术(DR)和射线断层扫描技术(CT)。

2.2 超声检测技术

超声波是频率高于20kHz的机械波。在超声探伤中常用的频率为0.5~5MHz。这种机械波在材料中能以一定的速度和方向传播,遇到声阻抗不同的异质界面(如缺陷或被测物件的底面等)就会产生反射。这种反射现象可被用来进行超声波探伤,最常用的是脉冲回波探伤法探伤时,脉冲振荡器发出的电压加在探头上(用压电陶瓷或石英晶片制成的探测元件),探头发出的超声波脉冲通过声耦合介质(如机油或水等)进入材料并在其中传播,遇到缺陷后,部分反射能量沿原途径返回探头,探头又将其转变为电脉冲,经仪器放大而显示在示波管的荧光屏上^[3]。根据缺陷反射波在荧光屏上的位置和幅度(与参考试块中人工缺陷的反射波幅度作比较),即可测定缺陷的位置和大致尺寸。除回波法外,还有用另一探头在工件另一侧接受信号的穿透法。利用超声法检测材料的物理特性时,还经常利用超声波在工件中的声速、衰减和共振等特性。我国超声检测技术的主要研究领域包括检测方法研究和设备研发。在设备研发方面,主要为数字化超声波探伤仪、TOFD超声检测系统、超声成像系统和磁致伸缩超声导波检测系统;在检测方法和技术研究方面,主要针对自动超声检测技术、超声成像检测技术、人工智能技术、TOFD超声检测技术和超声导波检测技术。

2.3 电磁检测技术

电磁无损检测是以电磁技术为基础的检测技术,包括涡流检测、漏磁检测、磁粉检测等,我国电磁检测技术的主要研究领域包括涡流检测技术、远场涡流检测技术、脉冲涡流检测技术、漏磁检测技术和金属磁记忆检测技术。常规涡流检测仪器从模拟式到全数字化已经先后开发了五代,最近开发的仪器采用了包括DSP、阵列探头、多通道、数据转换和分析等先进电子与信息技术,推动了涡流检测技术在管道元件制造过程中的在线检测和换热器的定期检验应用。脉冲涡流检测技术是近年来由国外引进的新技术。在应用领域,我国一些科研院所和检验检测机构开展了在电站锅炉、压力容器、压力管道、飞机、汽轮机、风力发电机和桥梁等结构上使用磁记忆技术的研究,并初步取得成功。

2.4 声发射检测技术

声发射是一种常见的物理现象,各种材料声发射信号的频率范围很宽,从几赫的次声频、20Hz至20kHz的声频到数兆赫的超声频;声发射信号幅度的变化范围也很大,从10m的微观位错运动到1m量级的地震波。如果声发射释放的应变能足够大,就可产生人耳听得见的声音。大多数材料变形和断裂时有声发射发生,但许多材料的声发射信号强度很弱,人耳不能直接听见,需要借助灵敏的电子仪器才能检测出来。用仪器探测、记录、分析声发射信号和利用声发射信号推断声发射源的技术称为声发射技术,声发射技术于20世纪60年代末引入我国,已广泛应用于我国石油、石

化、电力、航空、航天、冶金、铁路、交通、煤炭、建筑、机械制造与加工等领域。目前进行的声发射信号分析和处理的常用方法包括常规参数分析、时差定位、关联图形分析、频谱分析、小波分析、模式识别、人工神经网络模式识别、模糊分析和灰色关联分析等。

2.5 红外检测技术

对于任何物体，不论其温度高低都会发射或吸收热辐射，其大小与物体材料种类、形貌特征、化学与物理学结构（如表面氧化度、粗糙度等）特征有关外，还与波长、温度有关。红外照相机就是利用物体的这种辐射性能来测量物体表面温度场的^[4]。它能直接观察到人眼在可见光范围内无法观察到的物体外形轮廓或表面热分布，并能在显示屏上以灰度差或伪彩色的形式反映物体各点的温度及温度差，从而把人们的视觉范围从可见光扩展到红外波段。早期的红外无损检测由于检测成本、检测精度等原因，主要应用于军事领域，如发动机的检测、管子或容器的泄漏检查等。我国对红外检测技术的研究始于20世纪70年代初，通过近30年的努力，红外技术在我国得到越来越广泛的应用。电力系统是研究与应用红外热成像技术较早的行业。

3. 文物保护中无损检测应用现状

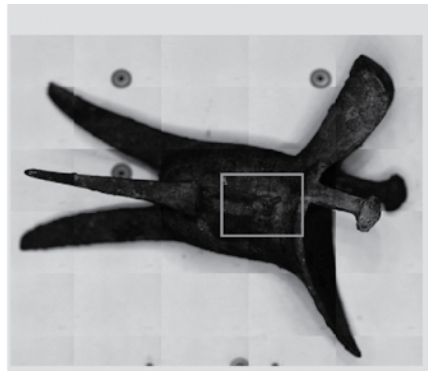
3.1 文物组成成分分析

3.1.1 元素分析（XRF）

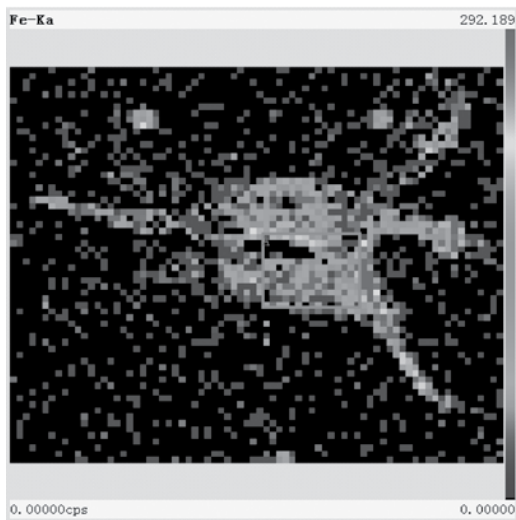
样品被X射线照射后，样品原子会被激发，放射出的特征X射线的能量不同，以及特征X射线的数目正比于元素的浓度，以此来定性分析和定量分析的方法。XRF的分析样品为固体和液体文物。其主要应用于元素定性分析、半定量分析、定量分析（适用于原子序数 $Z \geq 5$ 的元素）。其应用特点是被测文物不受形状大小的限制，XRF有宽的线性测量范围，原则上可分析周期表上从硼到铀的元素。对于同一样品，可进行微量元素分析（ 10^{-6} 量级），也可进行主要和次要元素的常量测定（ 10^{-2} 量级）。XRF无需繁琐的样品制备，部分尺寸不大的固体样品和所有的液体样品可直接放在样品台上测量。图1为一出土青铜爵的XRF扫描图，从图中可以清晰地看出器物中Fe、Cu、Sn、Pb的分布情况，利用计算机可以半定量器物中各元素含量。

3.1.2 光纤拉曼光谱分析

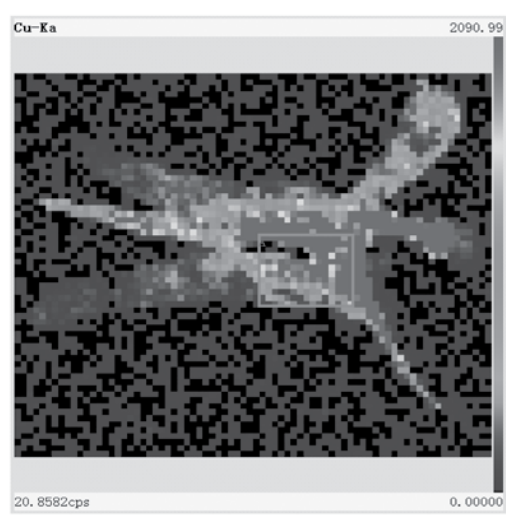
无损检测是文物艺术品科学研究中非常重要的一个研究方向，也是文物艺术品科学保护研究不可或缺的前期分析工作^[5]。1928年，印度化学家GV Raman发现了拉曼效应，激光拉曼光谱技术因能够对分子结构信息进行无损测试而得到广泛的应用。20世纪60年代以后，激光光源的引入使微弱拉曼信号提高，使拉曼光谱在材料、化工、石油、高分子、生物、环保、地质等领域取得很大的应用空间。近十年来，人们开始把光导纤维（以下简称光纤）应用于拉曼光谱研究中。这使拉曼光谱仪可用于现场遥测分析，通过光纤可以无损性地直接分析研究文物的质地成分。这使远距离样品和难以固定在样品台上的大型样品的无损分析测试成为可能。而且光纤探头小巧，可应用于非整直空



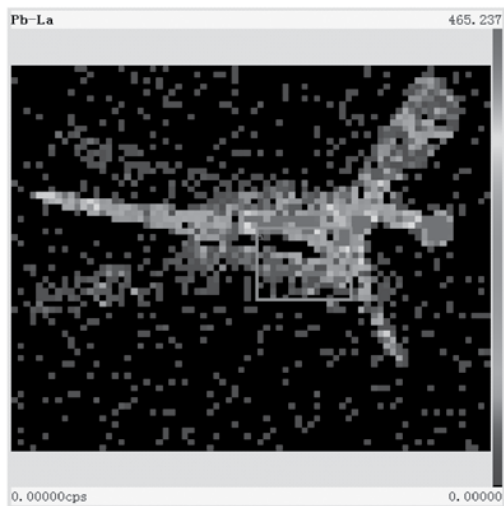
(a) 样品图像



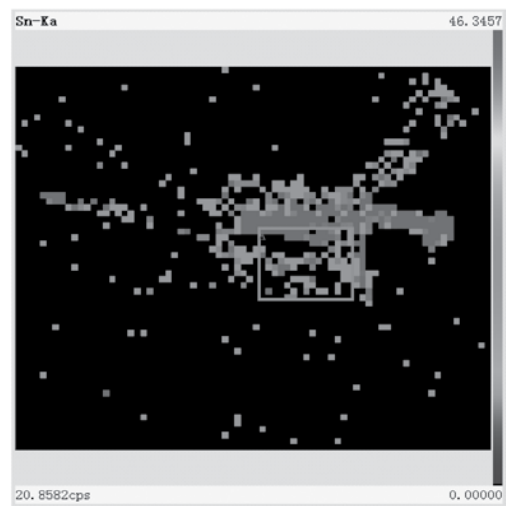
(b) Fe-Ka



(c) Cu-Ka



(d) Pb-Ka



(e) Sn-Ka

图1 青铜爵的XRF扫描图

间和小空间的测试,还可对常规拉曼光谱无法测量的恶劣环境如高温、有害气体等进行检测。

3.1.3 光纤傅里叶变换红外光谱分析

FTIR的发展历程红外光谱仪的发展经历了3个阶段:第一阶段是棱镜式红外分光光度计,它是基于棱镜对红外辐射的色散而实现分光的,其缺点是光学材料制造麻烦,分辨本领较低,而且仪器要求严格的恒温降湿;第二阶段是光栅式红外分光光度计,它是基于光栅的衍射而实现分光的,与第一代相比,分辨能力大大提高,且能量较高,价格便宜,对恒温、恒湿要求不高,是红外分光光度计发展的方向;第三阶段是基于干涉调频分光的傅里叶变换红外光谱仪,它的出现为红外光谱的应用开辟了新的领域,由于红外光谱仪的光学系统对使用环境要求较高,如外界的振动、环境温湿度等因素都对仪器分析结果产生很大影响,近年来国外各大仪器厂商为了满足用户的需求研发了可供在户外使用的不需要样品处理直接对样品分析的便携式红外光谱仪,采用光纤探头方便的对被分析物体的任意地方进行扫描分析,由于仪器是专为户外使用设计的,所以对环境的耐受力很高,目前国外的厂商像PerkinElmer、美国赛默飞世尔尼通都有这样的仪器,但在文物上使用还未见相关报道。

3.2 文物真伪辨别

中国文物古器的辨伪是文物、考古学界、收藏学界和古玩商界的首要任务。一般来说,人们从三个方面来辨别古代器物的真伪:古物材质、加工工艺和艺术风格。目前,收藏学界乃至考古学界还是主要根据目视经验来辨认。为了得出更客观可靠的结论,无损检测被广泛应用于古代器物的鉴定。进行真伪辨别常采用的无损分析方法有体视显微镜、偏光仪、分光镜、折射仪、查尔斯滤光镜和紫外灯等,以及比重分析、X射线衍射分析和红外光谱分析等。

3.3 文物无损探伤分析

3.3.1 激光无损探伤

激光技术在无损检测领域的应用不断扩大,并逐渐形成了激光全息、激光散斑、激光超声、激光轮廓测量、激光瞬时热成像等无损检测新技术。

3.3.2 超声波无损探伤

超声波探测对被测物体没有损伤,而且测试简便易行,到目前为止,超声波探测广泛应用于混凝土、铁路钢轨、金属构件的内部空洞、表层缺陷、裂缝深度、抗压强度等检测中,我国的文物保护工作者利用超声波定量探测石质文物的缺陷、风化程度,确定其加固和最佳的保护措施。

3.3.3 X射线照射无损探伤

X射线照相技术以其非破坏性和直观性等优势,越来越受到文物研究者的青睐^[6]。X射线照相技术作为文物检测的常规手段,不仅在世界上许多发达国家得到普遍应用,而且在我国的文物科技研究中也日渐得到重视和普及,为文物研究提供了一个很好的技术支持。在文物保护科学研究中,

会接触到不同材质和厚度的文物，其内部结构及检测目的也各不相同。因此，掌握X射线照相的基本原理尤为重要，需要针对不同的文物合理地选择X射线的强度、能量、曝光量以及焦距等参数，从而获得理想的检测结果及优质的影像。

3.3.4 文物病害产生机理研究

文物发生病害有许多潜在的原因，对于文物表面已经发生病变，探索其产生病变原因非常重要，为有效阻止文物病害继续发展提供科学的方法，特别对于户外大型石窟、庙宇等不可移动文物显得至关重要，红外热像技术的应用为我们搞清楚石窟寺渗水、寺观庙宇壁画盐害提供的客观的依据。图2为笔者为探索石窟壁刻经文风化原因，利用红外热像仪对石窟毛细水分布探测的热图，根据热图不同颜色区域可以区分毛细水活动频繁的区域，为解决石窟内部渗水处理提供依据。



图2 石窟毛细水分布探测的热图

4. 结 论

文物的唯一性和不可再生性决定了对文物的检测分析要尽可能的少干预，无损检测技术的发展在工业上的应用推广很快，但在文物领域的应用还处于初级阶段，有许多仪器虽然可以用来无损检测，但由于其体积大，操作繁琐，对环境要求高等仅适用于室内使用，对我们文物保护工作者来说在保证分析结果的准确性前提下，仪器的便携性显得尤为重要，随着电子技术的发展，手持式的小型仪器越来越多的应用于文物保护领域，而且面扫描技术的发展对于分析文物整体的病害分布、颜料分析、成分组成等一目了然，使文物保护工作者能获得更全面的信息。

参 考 文 献

- [1] 卢杉. 无损检测技术及其进展. 焦作大学学报, 2004, (1): 73-74.
- [2] 田兴玲, 周霄, 高峰. 无损检测及分析技术在文物保护领域中的应用. 无损检测, 2008, (3): 178-182.
- [3] 周正干, 冯海伟. 超声导波检测技术的研究进展. 无损检测, 2006, (2): 57-63.
- [4] 戴景民, 汪子君. 红外热成像无损检测技术及其应用现状. 自动化技术与应用, 2006, (1): 1-17.
- [5] 何秋菊, 杜侃, 张蕊, 等. 光纤拉曼遥测技术在大型文物艺术品无损分析中的应用. 中国文物科学研究, 2011, (2): 52-53.
- [6] 丁忠明, 吴来明, 孔凡公. 文物保护科技研究中的X射线照相技术. 文物保护与考古科学, 2006, (1): 38-46.