

浅谈中子技术在文物中的应用

王文婷

(北京联合大学应用文理学院, 北京, 100191)

摘要: 依托中国先进研究堆(CARR)高通量中子源, 中子科学技术已深入至各个领域。中子技术因其独特的优势, 在文物保护和研究领域扮演着越来越重要的角色。中子衍射、中子活化分析、中子成像等技术各具优势, 如中子衍射可分析文物晶体结构确定制造材料和工艺, 中子活化分析能非破坏性识别定量文物元素揭示成分来源, 中子成像可获取文物内部结构图像。本文旨在深入探讨这三种中子应用技术的基本原理和独特优势, 梳理其在国际文物领域的应用现状, 并对其在国内文物领域的应用前景进行展望, 为国内文物无损分析检测研究提供补充与参考。

关键词: 中子衍射; 中子成像; 中子活化分析

中图分类号: K854

文献标识码: A

一、引言

自 1932 年发现中子和 1939 年中子引起原子核裂变, 中子科学技术已深入至各个领域, 从微观原子到宏观物质乃至星际天体, 深刻地影响着人类的认知和社会的发展。中子技术因其独特的优势, 在文物保护和研究领域扮演着越来越重要的角色。如中子衍射技术、中子成像技术、中子活化分析方法等, 都具有其鲜明的技术优势特色, 但其工作原理也不尽相, 如图 1 所示^[1]。中子衍射技术在考古学中用于分析文物的晶体结构, 帮助确定其制造材料和工艺, 如研究古代陶瓷的烧制技术, 为理解古代文明的生产技术和工艺水平提供重要依据。中子活化分析技术能够非破坏性地识别和定量文物中的元素, 揭示其成分和来源, 如分析古代青铜器的合金成分, 为探究古代贸易路线和文化交流提供线索。中子成像技术则通过获取文物内部结构的图像, 揭示其内部构造和修复痕迹, 为文物的保护和修复提供科学依据, 如观察古代雕塑内部的支撑结构。这些技术的应用大大拓展了考古学的研究范围和深度, 为揭示人类历史和文化遗产提供了新的视角和方法。

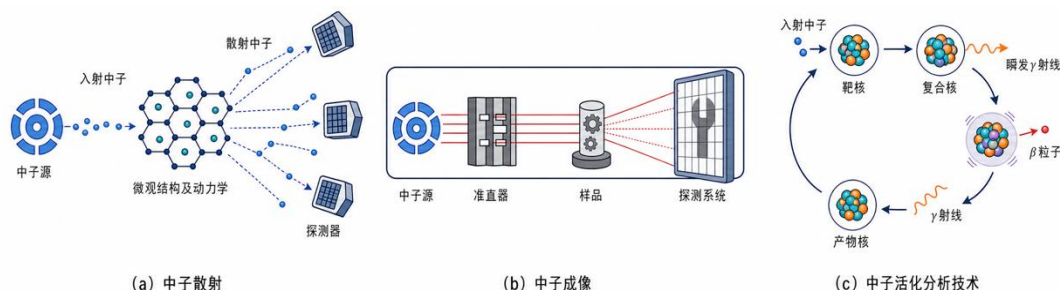


图 1 三种中子原理示意图

二、中子基本特性^[2]

2.1 中子的基本物理特性

中子是由两个下夸克和一个上夸克构成的整体电中性粒子，是组成原子核的成分之一（氢原子除外）。中子不带电，因此不受到原子核外电子的影响，可以穿透电子云与原子核散射进而探测物质结构。中子比相同质量和能量的带电粒子具有更强的穿透能力，也比基于电磁作用的 X 射线有更强的穿透力^[3]（见图 2）。但拥有磁矩，这使得中子能够与物质发生核力和磁相互作用。中子的磁矩主要来源于其内部的夸克运动以及强相互作用，尽管中子整体呈电中性，但其内部的电荷分布并不均匀，导致磁矩的产生。此外，中子还具有波粒二象性，其德布罗意波长与其动量成反比，这一特性在中子衍射等技术中有着重要应用。

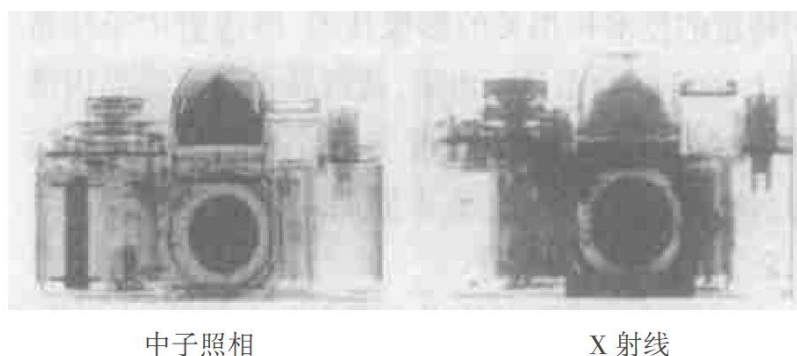


图 2 中子照相与 X 射线照相比较^[3]

2.2 中子的产生方式

自然界中存在少量的自由中子，但其半衰期极短，约为 881.5 秒，最终通过 β 衰变转变为质子。因此，人工产生中子成为主要途径。常见的中子源包括核反应堆和加速器驱动的中子源。核反应堆通过铀等重元素的裂变反应，释放出大量的中子，这些中子经过慢化和反射后，可用于各种中子实验。加速器驱动的中子源则是利用高能质子束轰击重金属靶材，如铀、钚等，引发核反应产生中子。这种方式能够产生高能、高通量的中子束，适用于中子散射等高精度实验。

2.3 中子与物质的相互作用

当中子与物质相互作用时，会发生散射、吸收等现象。散射分为弹性散射和非弹性散射，弹性散射不改变中子的能量，而非弹性散射则会导致中子能量的变化。中子吸收是指中子被物质原子核捕获，形成复合核，随后可能发射 γ 射线或其他粒子。中子与物质的相互作用截面是描述这些相互作用概率的重要参数，它与中子的能量、物质的种类以及原子核的状态密切相关。例如，氢、碳、氧等轻元素对中子具有较大的散射截面，而某些重金属元素则具有较大的吸收截面。

2.4 国内外高强度中子源发展概况^[1]

研究堆或散裂中子源等大型高强度中子源装置，是先进中子科学技术的重要依托。这些

装置需要投入巨大的人力物力建造和运行,全世界约有四十余座研究堆和七座散裂中子源用于开展中子散射、中子成像以及活化分析研究。总体而言,在中子科学技术研究领域,欧美长期处于领先地位,亚洲大洋洲地区近期发展迅速^[4]。我国目前主要有三大高强度中子源,分别是位于北京的中国先进研究堆(China Advanced Research Reactor, CARR)、位于绵阳的中国绵阳研究堆(China Mianyang Research Reactor, CMRR)和东莞的中国散裂中子源(China Spallation Neutron Source, CSNS)。这些中子源已经相继投入运行,在地域、类型和应用侧重等方面相互补充,为当前国内中子科学技术发展和应用提供强有力支撑,也带来了新机遇。

三、基本原理及特点

3.1 中子衍射基本原理及特点^[5]

中子衍射依托中子源大科学装置,能够非破坏性地获取材料内部微结构的统计信息,是建立物质微观、介观和宏观结构与性能内在联系的重要表征手段。中子晶体结构分析原理与X射线基本相同,区别在于散射体的不同:X射线的散射体是核外电子,其相干散射长度与各元素的原子序数成比例,而中子的散射体是原子核,其相干散射长度与各元素的原子序数无关,且各同位素因核结构不同而具有不同的相干散射长度。因此,中子散射可以精确测定较轻原子特别是氢的位置,还可区分元素周期表上的近邻原子,识别同位素^[6]。

中子衍射仪的基本工作原理如图3所示,中子源发出光束,照射到样品上,中子束与样品相互作用,导致中子发生各向散射,弹性散射光束产生衍射,经过线束装置被探测器接收,探测器连接数据采集系统获取结果^[7]。

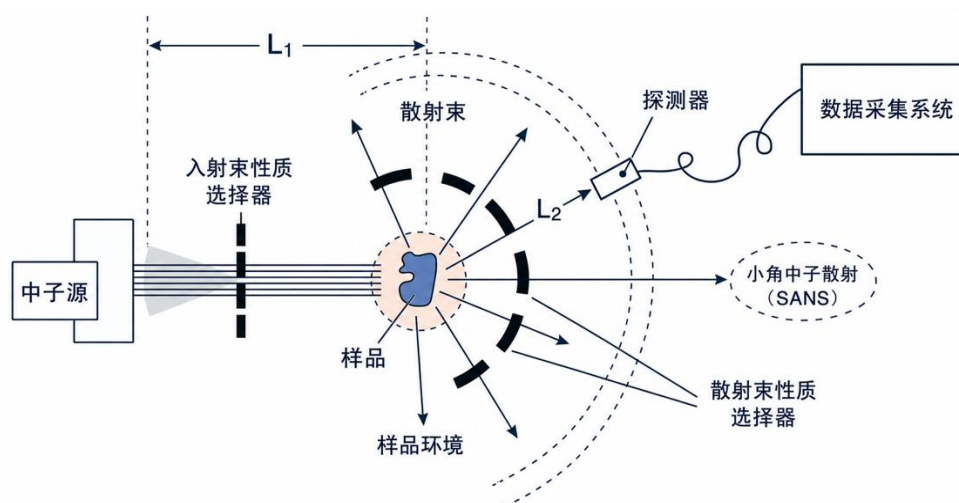


图3 中子衍射仪工作原理示意图

中子衍射可用于定量分析矿物或金属相组成,探查各组成相的晶体结构以及微观结构纹理分析。与X射线衍射相比,中子衍射有几个突出特点。第一,无需取样或提前处理,即可直接进行原位无损分析;第二,由于中子具有较强的物质穿透能力,因此易于穿透表面厚涂层和腐

蚀层,获取内部结构信息;第三,截面为若干平方厘米的中子束,能照射到相当大的体量,得到的结果是具有统计学意义的平均结构信息,避免了单点分析的弊端;第四,中子可以探测到文物中常常存在的赤铁矿和磁铁矿等磁性矿物的磁性顺序^[8]。

3.2 中子成像基本原理及特点^[5]

中子成像是利用中子束穿过物体时的强度衰减变化来获取物体内部结构信息的一种非破坏性检测技术。中子与物质的原子核相互作用,而不是与电子相互作用,这使得中子能够穿透大多数金属和岩石,但会被一些轻元素(如氢、碳、硼和锂)衰减。中子成像通过检测中子束在穿过物体时的强度变化,形成物体的中子图像,从而反映样品内部材料的空间分布、密度、各种缺陷等综合信息^[1]。

中子成像技术包括中子照相和中子层析成像等。所用中子为热中子或冷中子,而目前广泛应用的是热中子^[9]。中子成像设备的工作原理如图4所示,从中子源发出中子束,经过准直器后照射到被测物上,透射中子束被探测器接收,形成可见图像;层析成像设备中增加了更多的探测器,并使被测物沿一个固定轴线旋转^[10]。

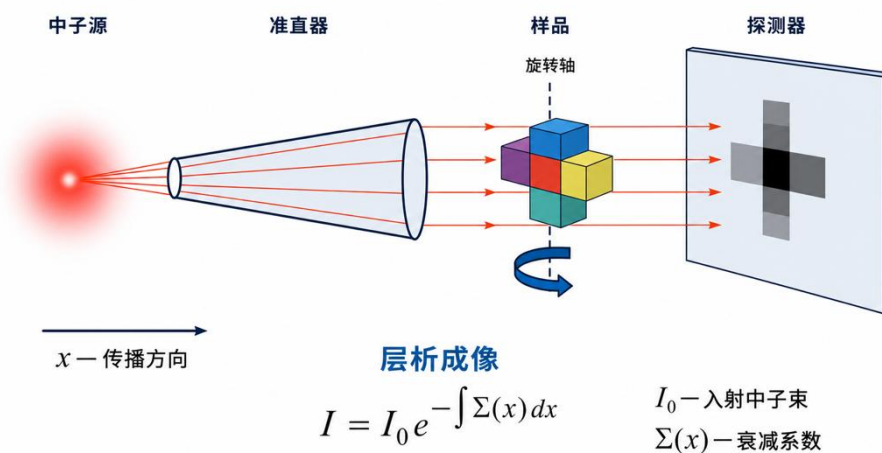


图4 中子层析成像工作原理示意图

与X射线相比,中子成像有其突出的特点。第一,穿透能力,中子具有很强的穿透能力,能够穿透许多对X射线不透明的材料,如铅、铀等重金属以及一些复合材料。因此,在检测这些材料的内部结构时,中子成像具有独特的优势。第二,对轻元素的敏感性,中子对轻元素(如氢、锂等)具有较高的敏感性,能够清晰地显示这些元素在样品中的分布。而X射线成像对轻元素的检测能力相对较弱,容易受到重元素的干扰。第三,无电荷特性:中子不带电,不会受到电场的影响,因此在某些特殊环境下(如强电场区域)能够正常工作,而X射线成像可能会受到干扰^[7]。

3.3 中子活化技术基本原理及特点

中子活化分析是用中子束轰击待分析样品,中子被靶核俘获生成具有一定寿命的放射性

核素,根据这些核素衰变中发射特征伽马射线的性质和强度,从而确定样品中的元素成分和含量的一种分析方法。中子活化技术的基本工作原理如图 5 所示。当中子与原子核相互作用时,中子可以被原子核捕获,形成一个激发态的核即复合核。激发态的核会通过放射性衰变返回到基态,释放出伽马射线或其他粒子。这些放射性衰变产物可以被探测器检测到,根据这些核素衰变中发射特征伽马射线的性质和强度,从而确定样品中的元素成分和含量的一种分析方法。

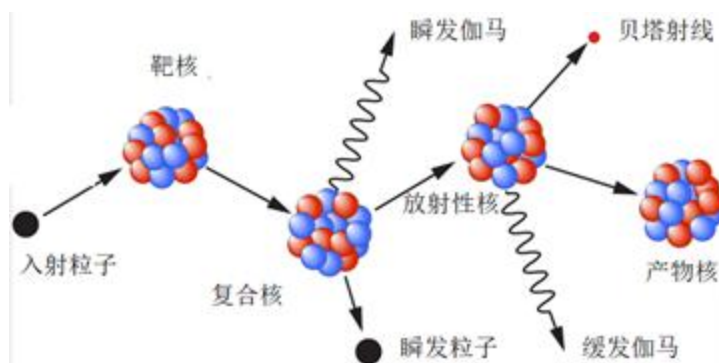


图 5 阐述原子核捕获中子并随后发射伽马射线的过程

中子活化具有突出优势,第一,中子活化分析具有极高的灵敏度,能够检测到样品中极低含量的元素,通常可以达到皮克 (pg) 甚至飞克 (fg) 级别。这使得它在检测微量元素和稀有元素方面具有独特的优势;第二,一次照射可以同时活化样品中的多种元素,通过测量不同能量的 γ 射线,可以同时确定多种元素的含量,提高了分析效率;第三,中子活化分析是一种非破坏性分析技术,样品在分析过程中不会受到明显的物理或化学损伤。这使得样品可以多次使用,特别适用于珍贵样品和不可再生样品的分析。第四,中子活化分析对某些元素具有特定的检测优势,尤其是那些在中子捕获反应中具有较高截面的元素。例如,中子活化分析可以非常有效地检测稀土元素和一些重金属元素。第五,中子活化分析的测量结果通常不受样品基体的影响,即不同基体中的相同元素会产生相似的放射性信号。这使得分析过程更加简单,不需要复杂的基体校正^[7]。

四、应用现状

4.1 中子衍射^[6]

中子衍射技术作为一种无损检测技术,是 X 射线、红外等其他无损检测技术的有益补充手段,但是直至 2000 年左右,中子衍射技术才开始应用于文物领域^[11]。中子衍射技术在考古材料研究中展现了巨大的应用潜力,为考古学家提供了无损、量化且深入材料内部的分析手段。国外的研究实践表明,该技术在石质材料、陶器、青铜器、铁器以及银锡铅合金等多种考古材料的研究中均有显著成果。例如,在罗马 Tivoli 的大理石宫殿建筑研究中,中子衍射技术揭示了大理石的矿相组成和晶粒取向,为器物分类和产源研究提供了新视角。在陶器研究方面,通过对德国 Rhenish 陶器的分析,准确判断了烧制温度和技术,区分了不同类型

陶器。此外,对古罗马青铜器、欧洲火绳枪士兵的腹甲以及古希腊钱币等的研究,均展示了中子衍射技术在合金成分、锈蚀产物分析以及制作工艺研究中的有效性。国内的研究实践同样证明了中子衍射技术的价值。在对宋代铁钱、湖南战国复合剑以及湖北丹江口水库地区出土的战国青铜器的研究中,该技术不仅确定了材料的物相组成和元素成分,还揭示了锈蚀产物和制作工艺等关键信息。这些研究结果不仅丰富了我们古代材料和工艺的认识,也为文化遗产的保护和修复提供了科学依据。

4.2 中子成像

中子成像技术利用中子射线高穿透性和元素强辨识力的特点,对物体进行中子照相和层析成像,获取二维和三维结构影像。1935年,Kallmann和Kuhn获得了中子照相技术的首次成功试验^[7]。后来随着中子技术的发展,中子成像技术成为了常规无损分析手段,广泛应用于材料、地质、植物、物理、医药、考古和古生物等多个领域^{[12][13]}。其中在考古领域,中子成像技术,特别是其中的中子层析成像技术和衍射技术一样,都是新型分析技术,其应用仅有二十多年的时间。1996年在德国柏林举办的第五届中子照相大会上,Schillinger首次报告中子层析成像技术在考古领域的应用^[7]。此后,随着数码成像技术的迅速发展和优良探测元件的发展,文物考古领域越来越多地应用了这种原位无损检测技术。例如Eberhard H. Lehmann利用中子成像在博物馆文物非侵入性调查中的应用,尤其针对瑞士文物,成功分析了含高铅量的罗马青铜雕塑等文物的内部结构和成分,揭示了制造工艺和修复细节^[14]。Kenichi Oikawa等利用脉冲中子成像技术研究室町时代助政制造的日本刀晶体结构,发现日本刀在淬火硬化程度、晶粒尺寸和择优取向等方面高度均匀,显示制造工艺精湛^[15]。以上中子成像技术为考古研究提供高精度的内部结构信息,助力揭示文物的材质、制作工艺及历史价值。

4.3 中子活化分析

1932年(英)查德威尔发现了中子。1936年,赫维西和利瓦伊提出中子活化分析,随后于1938年西博格及其合作者应用了带电粒子活化分析。但要直到四十年代中期这种方法还被认为是相当稀奇的。随着1942年费米(美)原子反应堆点火,可得1012中子/(厘米²·秒)左右的中子通量时,中子活化分析作为一种高灵敏度方法的可能性才迅速地得到确认,作为核技术之一的中子活化分析技术建立了^[16]。第一个将NAA应用于文化遗产的实验可以追溯到1960年,当时Emeleus和Simpson发表了通过NAA和 γ 射线光谱分析罗马陶器碎片的第一个研究结果。这个实验的结果使他们能够区分生产工厂^[7]。国内研究者是从20世纪80年代开始将该技术应用于文物样品的成分分析和产地溯源研究^[17]。雷勇等用中子活化分析秦始皇陵兵马俑陶土产地,通过微量元素检测推断出陶土产地范围,为研究秦代陶器制作提供线^[18]。雷勇又在《故宫博物院院刊》研究唐三彩,借助仪器中子活化分析其在两京地区发展轨迹,揭示唐三彩制作工艺及地域文化变迁情况^[19]。杨玉璋和张居中对安徽繁昌

窑青白瓷进行中子活化分析,测定其微量元素组成,为了解繁昌窑青白瓷烧制工艺及原料来源等提供依据^[20]。魏龙和陈刚在《敦煌研究》探讨现代射线技术在文物保护考古中的应用,虽未直接用中子活化,但拓展了文物保护考古技术手段研究范畴^[21]。

五、总结与展望

中子衍射、中子成像与中子活化分析是中子技术在考古领域的三大重要应用,各具特色且相互补充,为考古研究开辟了全新视角。中子衍射技术凭借其无损、量化且深入材料内部的优势,能精准剖析考古材料的物相组成、元素成分、锈蚀产物及制作工艺等关键信息。中子成像技术借助中子射线高穿透性和元素强辨识力,通过照相与层析成像获取文物二维、三维结构影像。随着中子技术的持续进步与多学科融合加深,其在考古领域的应用将更加广泛深入。中子活化分析是一种高灵敏度的分析技术,能够检测到极低含量的元素,它可同时测定多种元素,无需复杂的样品前处理,且分析过程对样品无破坏,保持样品完整性。

综上所述,中子衍射、中子成像与中子活化分析作为无损检测手段的有益补充,可以实现对文物的全方位、多层次分析。在文物领域具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 李天富,武梅梅,焦学胜,等.中国先进研究堆中子科学平台发展现状及展望[J].原子核物理评论,2020,37(3):364-376.
- [2] 陈伯显,张智,杨祎昱编著,核辐射物理及探测学第2版,哈尔滨工程大学出版社有限公司,2021,第391页
- [3] 裴宇阳.中子照相技术及其应用[J].现代仪器,2004,(05):17-22+16.
- [4] Chinese Neutron Scattering Society [EB/OL]. [2019-12-12]
- [5] 赵凤燕,孙满利,铁付德.中子衍射和成像技术在文物领域中的应用进展[J].文物保护与考古科学,2020,32(04):117-124.
- [6] 黄维,中子衍射技术分析考古材料——从原理到应用[J].考古学研究,2022,(02):69-91.
- [7] Loong, C. K., Scherillo, A., & Festa, G. (2017). Scattering techniques: Small- and wide-angle neutron diffraction. In N. Kardjilov & G. Festa (Eds.), *Neutron methods for archaeology and cultural heritage* (pp. 183 – 207). Springer International Publishing.
- [8] Kockelmann, W., & Kirfel, A. (2004). Neutron diffraction studies of archaeological objects on ROTAX. *Physica B: Condensed Matter*, 350(1 – 3), 581 – 585.
- [9] Deschler-Erb, E., Lehmann, E. H., Pernet, L., et al. (2004). The complementary use of neutrons and X-rays for the non-destructive investigation of archaeological objects from Swiss collections. *Archaeometry*, 46(4), 647 – 661.
- [10] 郭广平,陈启芳,邹冠华.中子照相技术及其在无损检测中的应用研究[J].失效分析与预防,2014,9(6):388-393.
- [11] Kockelmann, W., Pantos, E., & Kirfel, A. (2000). Neutron and synchrotron radiation studies of

- archaeological objects. In D. C. Creagh & D. A. Bradley (Eds.), *Radiation in art and archaeometry* (pp. 347 – 377). Elsevier.
- [12] Kardjilov, N., Manke, I., Woracek, R., et al. (2018). Advances in neutron imaging. *Materials Today*, 21(6), 652 – 672.
- [13] Rodzinka, A. E., Fedrigo, A., Scherillo, A., Shortland, A. J., Simpson, St. J., & Erb-Satullo, N. L. (2024). Neutron tomography reveals extensive modern modification in Iron Age Iranian swords. *Journal of Archaeological Science*, 171, Article 106018.
- [14] Lehmann, E. H. (2006). Scientific reviews: Using neutron imaging methods for non-invasive investigation of museum objects. *Neutron News*, 17(1), 22 – 29.
- [15] Oikawa, K., & Kiyanagi. (n.d.). Pulsed neutron imaging based crystallographic structure study of a Japanese sword made by Sukemasa in the Muromachi period. *Materials Research Proceedings*, 15, 207 – 213.
- [16] 钱俊龙.中子活化分析在考古学中应用的 50 年及其展望[J].文物保护与考古科学,2007,(04):5.
- [17] 丁锡祥,王省三. 商代墓葬出土文物——铁刃铜钺锈蚀物中某些痕量元素的中子活化分析[J]. 核技术,1982(4) : 69.
- [18] 雷勇,郭宝发,原思训. 秦始皇陵兵马俑陶土产地溯源的中子活化研究[J]. 核技术,2004,27(1) : 38 - 42.
- [19] 雷勇. 唐三彩的仪器中子活化分析其在两京地区发展轨迹的研究[J]. 故宫博物院院刊,2007(3) : 86 - 127,158.
- [20] 杨玉璋,张居中. 安徽繁昌窑青白瓷微量元素组成的中子活化分析[J]. 核技术,2008,31(7) : 534 - 538.
- [21] 魏龙,陈刚,冯向前,等.现代射线技术与文物保护/考古应用研究[J].敦煌研究,2018,(2):78-86.

Brief Review of Neutron Technology Applications for Cultural Heritage

Wang Wenying

(College of Applied Arts and Sciences of Beijing Union University, Beijing,100191)

Abstract: Relying on the high-flux neutron source provided by the China Advanced Research Reactor (CARR), neutron science and technology have been increasingly applied in various fields. Owing to their unique advantages, neutron-based techniques have played an increasingly important role in the conservation and study of cultural heritage. Neutron diffraction, neutron activation analysis, and neutron imaging each possess distinct capabilities. For example, neutron diffraction can be used to analyze the crystal structures of cultural relics and determine their manufacturing materials and technological processes; neutron activation analysis enables non-destructive identification and quantitative determination of elemental compositions, providing insights into material sources; and neutron imaging can reveal the internal structures of cultural objects through tomographic imaging. This paper aims to provide an in-depth discussion of the fundamental principles and unique advantages of these three neutron-based analytical techniques, summarize their current applications in the international field of cultural heritage research, and explore their prospects for application in domestic cultural heritage studies. It is expected to provide supplementary information and references for non-destructive analytical and detection research of cultural relics in China.

Keywords: Aneutron diffraction; neutron imaging; neutron activation analysis; cultural heritage; non-destructive analysis