

现代分析表征技术在涂料有害物质检测中的应用研究

彭 军, 朱家俊, 罗宇欣, 陈少丽, 梁楸怡

(广州合成材料研究院有限公司, 广州 510665)

摘要: 涂料作为一种重要的合成材料已在各个领域得以广泛应用,其所含有的有害物质对人体健康和环境的潜在威胁日益受到关注。准确检测涂料中的有害物质是确保涂料安全使用的关键环节。本文详细阐述了气相色谱质谱联用仪、高效液相色谱仪、原子吸收光谱仪、原子荧光光谱仪、电感耦合等离子体质谱仪等现代分析仪器的表征技术在涂料有害物质检测中的应用原理、检测对象及研究进展,并对当前涂料检测技术痛点和未来技术发展趋势进行了分析和展望,以为涂料有害物质检测领域的研究和应用提供参考。

关键词: 现代分析仪器; 涂料; 有害物质检测; 应用; 研究进展

中图分类号:TQ630.7+2 文献标志码:A 文章编号:1007-9548(2026)03-0016-03

Application Research of Modern Analytical Characterization Techniques in the Detection of Harmful Substances in Coatings

PENG Jun, ZHU Jia-jun, LUO Yu-xin, CHEN Shao-li, LIANG Qiu-yi

(Guangzhou Synthetic Materials Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510665, China)

Abstract: Coatings have been widely used in various fields. The potential threat of harmful substances contained in them to human health and the environment is increasingly receiving attention. Accurately detecting harmful substances in coatings is a key step in ensuring the safe use of coatings. This article elaborates on the application principles, detection objects, and research progress of characterization techniques of modern analytical instruments such as gas chromatography-mass spectrometry, high-performance liquid chromatography, atomic absorption spectrometer, atomic fluorescence spectrometer, and inductively coupled plasma mass spectrometer in the detection of harmful substances in coatings. It also analyzes and prospects the pain points and future development trends of current coating detection technology, in order to provide reference for the research and application of harmful substance detection in coatings.

Key words: modern analytical instruments; coating; hazardous substance detection; application; research progress

0 引言

涂料是一种用于保护、装饰和特殊功能(如防腐、导电等)的材料,其成分主要是成膜树脂、稀释溶剂、功能助剂和颜填料,涂料的这些组分本身会含有害化学物质^[1]。与此同时,涂料在制备过程中也会残留未反应的游

离化学物质,这些因素会导致涂料中含有甲醛、苯系物、重金属(如铅、镉、汞等)、邻苯二甲酸酯类增塑剂等有害物质。这些物质在涂料的生产、使用和废弃过程中可能释放到环境中,对自然环境和人类健康会造成危害。因此,研究涂料有害物质检测技术具有重要的意义。现代分析表征手段和先进仪器设备以其优异的技术优势,在涂料有害物质检测中发挥的作用也越来越显著。

1 现代分析仪器在涂料有害物质检测中的应用

1.1 气相色谱质谱联用仪(GC-MS)

GC-MS 主要用于检测涂料中的挥发性有机物

收稿日期: 2025-04-30

作者简介: 彭军(1983—),男,博士,正高级工程师,主要从事涂料性能检测技术和标准化研究工作。E-mail:pengjun08@sinochem.com。

(VOC),如苯系物、卤代烃、醚酯类化合物、醛酮类化合物等。GC-MS能够对这些有害物质进行定性定量分析,为涂料的质量控制和安全评估提供依据。GC-MS检测过程首先是待测样品引入气相色谱(GC)中,通过待测物质在固定相和流动相的保留时间进行物质的分离,分离后的物质再经过质谱(MS),通过将物质电离后形成的离子按质荷比进行分离和检测。GC-MS检测技术是将GC和MS的优势进行互补,GC负责分离混合样品,MS负责对分离的物质进行定性分析,然后通过色谱峰进行定量分析^[2]。GC-MS通过气相色谱实现VOC的高效分离,结合质谱库匹配技术,可鉴定苯系物、醛酮类等500余种化合物。

近年来,为了提高GC-MS对涂料中痕量有害物质的检测能力,研究人员在色谱柱的选择、前处理技术和质谱检测模式等方面进行了大量研究^[3]。在色谱柱方面,新型毛细管色谱柱的研发能大幅提升GC的分离效率,能够更好地分离复杂样品中的组分。在前处理技术方面,固相微萃取(SPME)、吹扫捕集等技术的应用,实现了对样品的高效富集和净化,基质干扰大幅度减少,检测灵敏度也得以提升^[4]。在质谱检测模式方面,选择离子监测(SIM)和多反应监测(MRM)等模式的应用,能够有效地提升测试的灵敏度和选择性,痕量有害物质的检测精度大幅度提升。

1.2 高效液相色谱仪(HPLC)

HPLC主要用于检测涂料中半挥发性有机物和不挥发性有机物,如烷基酚聚氧乙烯等。通过HPLC可以准确测定涂料中烷基酚聚氧乙烯的含量。HPLC的流动相是液体,这与GC以气体作为流动相是不同的。其他检测原理和GC类似,都是通过各组分的分配系数不同,从而实现混合物质的分离。分离后的物质通过不同类型的检测器,将光电信号转换为检测信号,通过色谱峰的大小进行定量分析。

HPLC技术自发明以来,研究人员一直致力于通过提升和优化色谱条件来提升HPLC的测试灵敏度和分离效率,并开发了新型的固定相和检测器,结合梯度洗脱技术,可以更好地分离复杂样品中的组分^[5]。二极管阵列检测器的应用,提高了对痕量物质的检测能力,可以检测出更低浓度的有害物质。针对热不稳定物质(如多环芳烃),HPLC采用紫外-二极管阵列检测器(UV-DAD),在C18色谱柱中实现梯度洗脱。创新性地引入超临界流体萃取(SFE)前处理技术,可将样品前处理时间从4h缩短至30min,回收率提高至(92±3)%。此外,HPLC与质谱联用(HPLC-MS)技术的发展,进一步提高了对复杂样品中未知有害物质的定性分析能力。

1.3 原子吸收光谱仪(AAS)

AAS主要用于检测涂料中的铅、镉、汞、铬等重金属元素。这些重金属元素在涂料中可能以颜料、填料等形式存在,当涂料长期使用或废弃后,重金属元素可能会存在于自然环境中,造成土壤、水源等污染,进而危害人类健康。原子吸收光谱仪基于物质在气态下对特定波长光的吸收特性进行定量分析^[6]。待测样品通过火焰燃烧或石墨炉变为基态原子蒸气,仪器光源发出的特定波长的光通过这些原子蒸气时会吸收一部分光而使得光强度变弱,仪器通过降低的光强度来实现对样品中待测元素含量的测定。

近年来,通过对样品前处理、原子化技术和背景校正技术等方面的改进,AAS的检测精准度得到了提升。在样品前处理方面,微波消解、高压消解等技术的应用,能够快速、完全地消解涂料样品,大幅提升了样品的消解效率。在原子化技术方面,石墨炉原子化器的应用提高了对痕量重金属元素的检测能力,其检测限可低至0.001~0.1 μg/L^[7]。在背景校正技术方面,氘灯背景校正、塞曼效应背景校正等技术的应用,有效降低了背景信号的干扰,提高了检测的准确性。

1.4 原子荧光光谱仪(AFS)

AFS也用于测试涂料中的重金属元素,和AAS相比,AFS在检测这些元素时具有更高的灵敏度和准确性,能够满足涂料中痕量重金属元素的检测需求。AFS的原理是基于原子荧光光谱法,当样品中的待测元素被激发到高能态后,会跃迁回基态并发射出特定波长的荧光。痕量待测元素含量可通过检测荧光强度进行定量。

AFS在仪器结构和检测技术方面不断改进。例如,采用双道原子荧光光谱仪可以同时检测两种元素,提高了检测效率;氢化物发生技术的应用,将待测元素转化为挥发性氢化物,实现了对痕量元素的富集和分离,进一步提高了检测灵敏度^[8]。此外,研究人员还开发了新型的荧光检测器和数据处理软件,提高了仪器的自动化程度和检测精度。针对涂料中重金属的检测,还可利用X射线荧光光谱(XRF)技术通过特征X射线能谱实现重金属元素(Pb、Cd、Cr)的快速筛查。新型偏振XRF装置采用多层薄膜晶体管(TFT)探测器,能量分辨率提升至135 eV,可在10s内完成铅含量测定,相对误差小于5%^[9]。

1.5 电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)

ICP-MS可以检测涂料中几乎所有的自然界已知金属元素。与其他分析仪器相比,ICP-MS的优势是灵敏度和检测效率,检出限可以达到PPT级,可以同时检测多种元素,大幅提升检测效率。在涂料有害物质

检测中,ICP-MS 常用于检测铅、镉、汞、铬、砷等重金属元素,以及锌、铜、铁等微量元素。ICP-MS 通过电感耦合等离子体将待测样品元素电离成带电离子,再通过 MS 按照待测元素带电离子的质荷比进行定性定量分析。ICP 具有高温(6 000~10 000 K)、高效电离、稳定性好等优点,能够将几乎所有的元素电离为单电荷离子。

目前 ICP-MS 检测技术在样品前处理、接口技术和干扰校正等方面进行了深入研究。在样品前处理方面,有微波消解、超声提取等技术与 ICP-MS 的结合。在接口技术方面,新型的离子透镜和采样锥的设计,离子的传输效率和灵敏度得以提升。在干扰校正方面,采用碰撞/反应池技术(如动能歧视技术、反应池技术等),有效消除了质谱干扰,提高了检测的准确性^[9]。此外,ICP-MS 与色谱技术(如 HPLC、GC)联用技术的发展,实现了对金属元素的形态分析,为研究金属元素的毒性和迁移行为提供了更深入的信息。

2 涂料有害物质检测技术面临的挑战

复杂基质的干扰是当前涂料有害物质检测技术面临的挑战之一。涂料样品成分复杂,含有大量的有机物、无机物和高分子材料等,这些基质成分可能与有害物质相互作用,干扰检测结果。例如,在检测重金属元素时,有机物的存在可能导致原子化效率降低,影响检测灵敏度;在检测挥发性有机物时,高分子材料可能吸附或释放目标物质,导致检测结果不准确。提高检测方法的抗干扰和有效消除基质干扰能力是当前面临的一个重要挑战。

痕量物质的检测难度也是面临的另一个难点。当前对痕量有害物质的检测需求越来越高。然而,目前一些检测方法的检测限还不能满足实际检测的要求,特别是对于一些痕量的新型有害物质,如某些新型增塑剂、阻燃剂等,现有的检测方法可能无法准确检测。因此,需要不断开发和改进检测技术,提高对痕量物质的检测能力。

新型有害物质也影响涂料有害物质检测技术的发展。随着涂料研发技术的不断发展,新型的涂料原料和助剂不断涌现,可能引入一些新的有害物质。这些新型有害物质的毒性和危害尚未完全明确,现有的检测方法可能无法对其进行有效检测。因此,需要加强对新型有害物质的研究,建立相应的检测方法和标准,及时应对涂料中可能出现的新的安全风险。

3 涂料有害物质检测技术的发展趋势

多种仪器联用技术的应用是必然发展趋势。单一的分析仪器在检测涂料有害物质时往往存在一定的局限性,如 GC-MS 对不挥发性物质的检测能力有限,

AAS 只能检测单一元素等。多种仪器联用技术(如 GC-MS 与 HPLC 联用、ICP-MS 与色谱技术联用等)可以结合不同仪器的优势,提高检测效率和准确性。未来,多种仪器联用技术将成为涂料有害物质检测的重要发展方向。

智能化检测技术也是涂料有害物质检测技术重要的发展趋势^[11]。随着人工智能技术的日新月异,智能化仪器设备和检测技术将不断应用于检测涂料有害物质。例如,开发智能化的检测仪器,实现自动进样、自动分析、自动数据处理和结果报告;利用大数据技术对检测数据进行分析 and 挖掘,建立涂料有害物质的数据库和风险评估模型,为涂料研发提供更科学的指导^[12]。智能化检测技术将提高检测工作的自动化程度和效率,减少人为误差,实现检测过程的实时监控和远程管理。

快速检测技术的研究是当下效率优先的需要。传统的涂料有害物质检测方法通常需要复杂的样品前处理和较长的分析时间,难以实现快速检测。因此,研究和开发快速检测技术(如便携式检测仪器、现场快速检测试剂盒等)具有重要的现实意义。快速检测技术可以在涂料的生产现场、施工现场等进行实时检测,及时发现和控制有害物质的存在,提高涂料的质量安全管理水平。

绿色检测技术还需积极推进和倡导。涂料检测过程中会消耗大量有机试剂,对试验人员的健康构成潜在危害^[13]。因此,倡导绿色检测技术,采用环保、无毒、无害的前处理方法和检测试剂,减少检测过程中的资源浪费和环境污染,是未来检测技术发展的必然趋势。例如,采用固相萃取、微波消解等绿色前处理技术,替代传统的强酸、强碱消解和液液萃取等方法;开发新型的环保型检测试剂,降低检测过程中的化学污染。

4 结语

现代分析仪器及表征技术在涂料有害物质检测中发挥着至关重要的作用,随着科学技术的不断发展,各种分析设备不断升级,检测方法不断完善。然而,当前涂料有害物质检测技术仍然面临着复杂基质干扰、痕量物质检测难度大、检测方法标准化和规范化不足以及新型有害物质检测等挑战。

未来,应加强多种仪器联用技术、智能化检测技术、快速检测技术和绿色检测技术的研究和应用,不断提高涂料有害物质检测的准确性、效率和环保性,为保障涂料的质量安全和人体健康、保护环境提供有力的技术支持。

(下转第 35 页)