

金属材料化学分析方法现状及发展趋势

吴 斌

浙江宁工检测科技有限公司 浙江 宁波 315000

摘要: 本文综述了金属材料化学分析方法的现状及发展趋势,介绍了经典化学分析方法和现代仪器分析方法的基本原理及应用情况,分析了当前金属材料化学分析面临的挑战,针对这些挑战,本文探讨了金属材料化学分析方法的发展趋势,如多种分析技术联用、智能化与自动化分析、高灵敏度与高选择性分析方法的研发、无损检测技术的拓展以及绿色化学分析方法的发展。旨在为金属材料化学分析领域的研究和实践提供参考和指导。

关键词: 金属材料; 化学成分分析; 现状; 发展趋势

引言: 金属材料作为现代社会中不可或缺的基础性材料,在各个领域发挥着至关重要的作用。本文旨在探讨金属材料化学分析方法的现状及发展趋势,介绍了金属材料化学分析的基础,包括金属材料的重要性和化学分析的基本原理。详细分析当前金属材料化学分析方法的现状,包括经典化学分析方法和现代仪器分析方法的应用及局限性。

1 金属材料化学分析基础

金属材料,作为以金属元素为主要成分并具有独特金属特性的材料,是现代社会中不可或缺的基础性存在。它们在工业、农业、国防以及科技等广泛领域发挥着至关重要的作用。从普遍使用的钢铁、铝合金,到高性能的钛合金、高温合金,金属材料因其卓越的力学性能、良好的导电导热性以及优异的加工性能,而深受各行业的青睐。这些材料的不同种类在成分、微观结构以及宏观性能上均展现出明显的差异,这也为它们在不同应用场景下的独特优势奠定了基础。

化学分析,作为一种通过物质的化学性质来深入探究其组成及含量的科学方法,其基础在于物质间的化学反应以及这些反应中量的精确关系。在化学分析的框架内,定性分析主要依赖于化学反应所展现出的独特现象,如颜色的转变、沉淀物的生成或是气体的释放等,来准确判断物质中是否含有某一特定的成分。而定量分析则进一步深入到化学反应的计量层面,通过精确测量反应过程中消耗的试剂数量或新生成的产物数量,从而严谨地计算出被测成分的具体含量,进一步保障了金属材料在不同应用场景下的性能稳定性和安全性^[1]。

2 金属材料化学分析方法现状

2.1 经典化学分析方法

2.1.1 重量分析法

重量分析法是通过使被测组分转化为化学组成一定的化合物或单质与试样中的其他组分分离,然后用称重

方法测定该组分的含量。该方法的原理基于化学反应的定量关系,具有较高的准确度。例如,在测定金属合金中的某金属元素含量时,可通过特定的化学反应将该金属元素转化为沉淀,经过过滤、洗涤、烘干和称重等步骤,计算出该元素的含量。重量分析法适用于常量分析,对仪器设备要求相对较低,但操作过程较为繁琐,分析周期长,且对实验人员的操作技能要求较高。在一些对分析精度要求极高且样品量较大的场合,如标准物质的定值分析,重量分析法仍具有不可替代的作用。

2.1.2 滴定分析技术

滴定分析技术涉及将精确浓度的试剂液(即标准液)逐步加入待测物质溶液中,直至两者按化学计量完全反应。此过程依据反应所消耗的试剂体积与浓度,来确定待测物的含量。根据化学反应的定量关系,滴定分析细分为酸碱、氧化还原、络合及沉淀滴定等类型。对于钢铁中锰含量的检测,常选用氧化还原滴定,即先以特定氧化剂氧化锰,再以标准液滴定剩余氧化剂,据此推算锰量。此技术操作便捷,成本低廉,适用于常量及半微量分析任务。

2.1.3 气体容积测定法

气体容积测定法依据待测气体(或待测物转化成的气体)被吸收(或生成)的体积来量化待测物的量,采用天平滴定管、量气管等工具作为最终计量工具。该方法在金属材料碳、硫含量检测中颇受欢迎。过程中,样品在高温下与氧气反应,碳、硫分别转化成二氧化碳与二氧化硫,随后通过测定这些气体的容积来确定碳、硫含量。此法优势在于设备简便、分析成本低,但分析周期长,且对实验条件管控严苛,环境因素的干扰较为明显。

2.2 仪器分析方法

2.2.1 光学分析法

光学分析法根据物质与电磁波(包括从 γ 射线至无线电波的整个波谱范围)的相互作用,或者利用物质的

光学性质来进行分析。常见的有吸光光度法（红外、可见和紫外吸收光谱）、原子吸收光谱法、原子荧光光谱法、发射光谱法、荧光分析法、浊度法、火焰光度法、X射线衍射法、X射线荧光分析法、放射化分析法等。其中，分光光度法作为吸光光度法的重要分支，在金属材料分析中应用广泛。例如，采用分光光度法测定钢铁中的硅、磷、锰等元素时，需依据相关国家标准规范进行操作。规范GB/T 223.5详细规定了钢铁中酸溶硅和全硅含量的测定方法，采用还原型硅钼酸盐分光光度法，通过控制溶液的酸度、显色剂用量及显色时间等条件，确保测定结果的准确性；规范GB/T 223.59规定了钢铁及合金中磷含量的测定方法，采用钼磷钼蓝分光光度法，利用磷与钼酸铵在特定条件下生成蓝色络合物，通过测量吸光度来计算磷含量；规范GB/T 223.6则规定了钢铁中锰含量的测定方法，采用高碘酸钠（钾）氧化光度法，在酸性溶液中，锰被高碘酸钠氧化成紫红色的高锰酸，通过测量吸光度确定锰含量。这些规范为分光光度法在金属材料分析中的应用提供了标准化的操作流程和质量控制要求，有助于提高分析结果的准确性和可靠性。

原子吸收光谱法（AAS）基于待测元素的基态原子蒸汽对其特征谱线的吸收，由特征谱线的特征性和谱线被减弱的程度对待测元素进行定性定量分析。该方法具有灵敏度高、抗干扰能力强、分析范围广及精密度高等优点，可用于多种金属元素的微量分析。但其不能同时分析多种元素，对难溶元素测定时灵敏度不高，在测量一些复杂样品时效果不佳；X射线荧光光谱法（XRF）利用基态的原子在被一定频率的辐射线激发后发射出特征荧光的特性，通过测得谱线强度并与标准样品比较，即可确定该元素的含量。该方法是一种非破坏性分析方法，快速且不需要样品预处理，适用于实验室和现场分析，可对多种元素进行同时分析。但它是定性半定量的方法，在金属成分分析中主要作为大概含量的确定。

2.2.2 电化学分析法

电化学分析法根据被测物质的浓度与电位、电流、电导、电容或电量间的关系来进行分析。主要包括电位法、电流法、极谱法、库仑（电量）法、电导法、离子选择性电极法等^[2]。电位法通过测量电极电位来确定被测物质的浓度，具有设备简单、操作方便的特点，常用于测定金属离子的浓度。离子选择性电极法对特定离子具有较高的选择性和灵敏度，可用于一些痕量离子的分析。

2.2.3 色谱分离检测法

色谱分离检测法借助色谱柱，利用固定相（高沸点液体或固体吸附剂）对样品中各组分的吸附或溶解能力的差异，以及化学反应平衡常数的不同，实现组分在移动过程中的有效分离，随后导入检测器进行鉴定。在金

属材料分析领域，气相色谱与液相色谱技术可用于分离并测定金属有机化合物及金属络合物等。此法展现出高分离效率、快速分析以及高灵敏度等优势，适用于复杂样品中微量成分的分离与分析。然而，其所需仪器设备复杂，维护费用高，且对操作人员专业技能有较高要求。

2.2.4 质谱分析法

质谱分析法是将试样在离子源中电离后成为快速运动的正离子，然后在由扇形电场和磁场组成的质量分析器中进行分离，在检测器中鉴定。该方法能够精确测定物质的分子量和分子式，对化合物的结构分析具有重要意义。在金属材料分析中，可用于确定金属有机化合物的结构和组成。质谱分析法具有灵敏度高、分辨率好、分析速度快等优点，但仪器价格昂贵，对实验环境和操作人员的要求极高，且样品前处理较为复杂。

3 当前金属材料化学分析面临的挑战

3.1 复杂样品分析难度大

随着现代工业的发展，新型金属材料不断涌现，如纳米金属材料、金属基复合材料等。这些材料的成分和结构更为复杂，对化学分析方法提出了更高的挑战。纳米材料的特殊尺寸效应和表面效应使其化学性质与传统材料有很大差异，常规的分析方法难以准确测定其成分和结构。金属基复合材料中不同相的分布和界面特性也增加了分析的难度，需要开发更加精准、高效的分析方法和技术。

3.2 痕量和超痕量分析要求高

在一些高端领域，如电子信息、航空航天等，对金属材料中痕量和超痕量杂质元素的含量要求极为严格。这些杂质元素即使含量极低，也可能对材料的性能产生显著影响。集成电路制造中，对硅片等半导体材料中金属杂质的含量要求达到ppt（ 10^{-12} ）级甚至更低。现有的分析方法在痕量和超痕量分析的灵敏度、选择性和准确性方面仍有待进一步提高，以满足这些领域对材料质量的严格要求。

3.3 分析效率与成本的平衡

在实际生产和科研中，需要对大量的金属材料样品进行分析，这就要求分析方法具有较高的效率。然而，一些高精度的分析方法，如质谱分析法，虽然分析结果准确，但仪器设备昂贵，分析成本高，且样品处理和过程耗时较长。如何在保证分析质量的前提下，提高分析效率，降低分析成本，实现分析效率与成本的良好平衡，是当前金属材料化学分析面临的重要问题^[3]。

4 金属材料化学分析方法的发展趋势

4.1 多种分析技术联用

为了应对复杂样品分析的挑战，提高分析的准确性和效率，多种分析技术联用将成为未来的发展趋势。色

谱-质谱联用技术 (GC-MS、LC-MS) 结合了色谱的分离能力和质谱的鉴定能力, 能够对复杂样品中的微量成分进行准确的定性和定量分析。光谱-电化学联用技术则可以同时获取物质的光学和电化学信息, 为研究金属材料的腐蚀机理等提供更全面的数据。通过将不同分析技术的优势互补, 能够实现对金属材料更深入、更全面的分析。

4.2 智能化与自动化分析

随着人工智能、大数据和自动化技术的日新月异, 金属材料化学分析领域正迎来一场深刻的变革, 智能化与自动化成为未来发展的主流方向。智能化分析仪器凭借其先进的技术, 能够自动辨识样品类型, 智能匹配最佳的分析方法和参数配置, 同时对分析所得结果进行即时的处理与精准判断。依托强大的机器学习算法, 这些仪器能够对海量分析数据进行深度学习, 构建出高效的分析模型, 从而实现对未知样品的迅速、精确分析。另一方面, 自动化分析系统的引入, 则让分析流程实现了从样品进样、预处理、正式分析到数据记录的全自动化操作。这不仅极大地减少了人为因素的干扰, 显著提升了分析的精密度和重复性, 还大幅提高了整体分析效率, 有效减轻了工作人员的劳动强度。

4.3 高灵敏度与高选择性分析方法的研发

针对痕量和超痕量分析的需求, 研发具有更高灵敏度和选择性的分析方法是未来的重要发展方向。新型纳米材料的应用为提高分析方法的灵敏度提供了新的途径。基于纳米粒子的表面增强拉曼光谱技术 (SERS) 能够显著增强拉曼信号, 实现对痕量物质的检测。在选择性方面, 通过设计和合成具有特定识别功能的分子探针, 如冠醚、环糊精等, 可实现对目标金属离子的高选择性检测, 量子点荧光探针、分子印迹技术等也在高灵敏度和高选择性分析方法的研发中展现出巨大的潜力。

4.4 无损检测技术的拓展

无损检测技术在不破坏样品的前提下, 能够对金属材料的内部结构和缺陷进行检测, 对于评估材料的质量和使用寿命具有重要意义。除了现有的超声检测、射线检测、磁粉检测等技术的进一步完善和优化外, 新的无

损检测方法, 如太赫兹检测技术、微波检测技术等将得到更多的研究和应用^[4]。这些技术能够对金属材料的微观结构和性能进行更深入的分析, 为金属材料的质量控制和性能优化提供更有力的支持。

4.5 绿色化学分析方法的发展

随着全球环保意识的日益增强, 绿色化学分析方法在金属材料化学分析领域的应用正逐渐成为焦点。该方法的核心在于最大限度地减少或完全消除分析流程中对环境有害的化学试剂使用及废弃物产生。通过引入微波消解、超声消解等绿色样品预处理手段, 能够有效替代传统的酸消解法, 从而显著降低酸雾排放, 减轻环境污染。在选择分析方法时, 更倾向于那些对环境友好的技术, 比如近红外光谱分析和核磁共振分析等, 这些先进技术无需大量使用化学试剂, 从而进一步减少了污染风险。同时, 对分析过程产生的废弃物进行妥善回收与高效处理, 实现资源的循环利用, 已成为绿色化学分析方法不可或缺的一环。

结束语

综上所述, 金属材料化学分析方法正面临着多方面的挑战, 但同时也迎来了新的发展机遇。通过多种分析技术的联用、智能化与自动化技术的应用、高灵敏度与高选择性分析方法的研发、无损检测技术的拓展以及绿色化学分析方法的发展, 金属材料化学分析将更加精准、高效、环保。未来, 随着科技的不断进步和创新, 金属材料化学分析方法将不断取得新的突破, 为金属材料行业的发展提供更有力的支持。

参考文献

- [1] 颜忠国. 金属材料元素化学分析方法注意要点探讨[J]. 世界有色金属, 2021(17):158-159.
- [2] 王婷. 矿石样品中金属元素化学分析方法的应用研究[J]. 世界有色金属, 2021(15):192-193.
- [3] 王祺. 范映伟. 金属材料损伤分析中的物理冶金分析技术[J]. 宇航材料工艺, 2020, 50(6): 15-30.
- [4] 汪玲玲. 有色金属材料化学分析取样标准的现状研究及建议[J]. 中国金属通报, 2024,(12):125-127.