

# X 射线荧光光谱在现场分析中的应用评介

邓赛文, 李 松, 王毅民\*, 王祎亚, 梁国立

(国家地质实验测试中心, 北京 100037)

**摘 要:**现场分析对于地矿行业来说是一个永恒的课题, 而 X 射线荧光光谱(XRF)的技术特点又使其成为地质野外现场分析应用最方便和有效的技术之一。文章从陆地野外现场分析和测井、船载和 underwater 现场测量及月岩探测等方面评介 XRF 现场分析的应用。在陆地现场分析方面: 包括仪器研制、野外实验及应用研究; 现场应用涉及矿产勘查、化探、矿山分析、矿区环境调查、岩芯检测、X 射线荧光测井和多功能车载现场分析等。在船载和 underwater 现场分析方面: 评介了船载 X 射线荧光分析仪器在我国大洋多金属结核、海山富钴结壳和深海稀土资源调查中的应用及我国研制的海底金属矿产水下原位分析装备的实验研究。月岩探测方面: 介绍了我国“嫦娥一号”、“嫦娥二号”搭载的 X 射线光谱探测系统的应用。全篇引文 117 篇。

**关键词:** X 射线荧光光谱(XRF); 现场分析; 野外; 测井; 船载; 水下; 地质矿产; 月岩

中图分类号: O657.34

文献标志码: A

文章编号: 1000-7571(2020)10-0076-10

地质与矿产资源的调查研究和开发利用最基本、最先行的当属对资源的野外现场调查与评价, 这是国民经济和社会发展各行业中对野外现场分析需求最强烈的行业。X 射线荧光光谱(XRF)具有快速、经济、制样简单、污染小等与其他分析技术相比难得的技术优势。特别是小型或便携式 X 射线荧光光谱(P-XRF)技术的发展为野外现场分析提供了强有力的技术支持, 而对野外现场分析的强烈需求, 也为这些技术的发展与应用提供了广阔舞台。

虽然 20 世纪 60 年代国外就已有许多利用放射性同位素的 P-XRF 用于现场分析应用的报道<sup>[1-2]</sup>, 但那时国内地质系统还只是采用简易的野外分析箱进行野外现场分析, 而真正有效的野外现场分析是从 20 世纪 70 年代初期引入并开始研制便携式 XRF 仪器以后才开始的。

1970 年国务院总理周恩来在接见参加全国地质工作会议代表时提出了“化验到现场”的号召, 以此为契机, 在国内迅速掀起了一个研制便携式 XRF 仪器和野外现场应用的热潮<sup>[3-4]</sup>。随着仪器和技术的不断进步, 应用也日益广泛, 特别是在地质、有色

和建材领域, 近年来甚至扩展应用到考古和文物等部门, 其应用领域和范围迅速从陆地扩展到海洋和月球。本文将从陆地野外现场分析和测井、船载和 underwater 现场测量及月岩探测等方面评介我国采用 XRF 技术进行现场分析的应用及取得的重要成果。

## 1 专(译)著及评述文献

1977 年《同位素源 X 射线荧光分析仪》出版, 这是国内最早介绍便携式仪器的一本译著<sup>[5]</sup>。1981 年《放射性同位素 X 射线荧光分析》出版, 这是国内最早编写出版的一本 XRF 专著, 对我国早期便携式 XRF 分析仪器研制、技术方法原理及应用产生了重要影响。虽然书目是放射性同位素 XRF, 但其原理、技术方法也适用于整个 XRF 领域<sup>[6]</sup>。其后《X 射线荧光探矿技术》和《原位 X 辐射取样技术》两书都是成都理工大学核分析技术地矿应用研究团队多年利用 XRF 技术服务于地质探矿技术研究的理论探索、方法研究和野外实践的经验总结<sup>[7-8]</sup>。《能量色散 X 射线荧光方法》更是一本重要的 XRF 专著, 由于作者曹利国也是便携式 XRF 技术发展的最早

收稿日期: 2020-05-12

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ050076); 国家自然科学基金项目(41371212, 40902055)

作者简介: 邓赛文(1964—), 男, 研究员, 大学本科, 从事 X 射线荧光光谱分析与计算机应用技术研究; E-mail: dswwing64@sina.com

\* 通讯联系人: 王毅民(1941—), 男, 研究员, 大学本科, 主要从事地质材料分析技术应用与研究; E-mail: wym7852@126.com

参与者,该书内容对20世纪90年代便携式XRF发展产生了重要影响<sup>[9]</sup>。

在现场XRF分析领域有两篇全面评述文章,出于同一作者。“现场X射线荧光分析技术”一文从便携式X射线荧光仪器、现场分析技术和现场应用3方面论述了现场X射线荧光分析技术的进展。这是国内对本专题最全面的一篇评述,特别是在仪器和技术方面。在应用方面从地质矿产普查、环境污染调查、文物现场鉴定和合金分析4个应用领域介绍了其应用进展。在地质矿产普查应用方面特别评价了现场XRF技术在找矿和资源评价方面所发挥的重要作用,相关引文69篇<sup>[10]</sup>。“野外X射线荧光勘查技术及应用进展”一文由仪器设备、方法技术、应用实例和结论4部分组成,引文63篇。应用实例介绍了1:5万化探样品野外快速分析,土壤次生晕多元素现场分析,岩矿石露头测量,圈定矿区范围、示踪热液活动流向,X射线荧光测井确定矿层品位和海底沉积物非破坏性快速分析6部分内容<sup>[11]</sup>。

另外有3篇XRF综合性的评述文献中也有关于XRF在现场分析中应用的专门题目。“地质样品的X射线荧光光谱分析”中有“便携式XRF分析仪的研制与现场分析”一节,引文8篇<sup>[12]</sup>;“我国地质分析中X射线光谱技术的回顾与发展”中有“在野外现场分析中的应用”一节,引文4篇<sup>[13]</sup>;“近30年来地质分析重要成果评介”一文有“野外现场分析技术的发展与实用化”一节,引文14篇<sup>[14]</sup>。

## 2 野外现场分析和测井

### 2.1 早期便携式XRF仪器研制及野外现场分析应用

在原地质部科技项目的支持下,1972年成都地质学院与中国地质科学院合作,1975年成功研制了第一台便携式XRF仪器,并交由上海地质仪器厂批量生产,其后在北京、浙江、安徽、甘肃等地进行了大量的野外应用研究工作<sup>[4]</sup>,遗憾的是鉴于当时的环境条件,这些工作大多没有公开发表。该项合作研究双方都以“携带式放射性同位素X射线荧光仪器”获得了1978年的全国科学技术大会奖。

从20世纪70年代初我国开展便携式XRF仪器研制和地矿应用工作以来,成都地质学院历经数十年的不断进取,逐步形成了便携式XRF系列仪器研制、技术方法研究和广泛地质应用团队,几乎是全国最大、持续时间最长的研发团队。系统研究了XRF勘查技术理论与工作方法,建立了完整的软件系统和规范的工作程序(这方面的文献很多,这里仅

列几篇综合性论文)<sup>[15-20]</sup>。其中,所承担的重大科研项目“X荧光技术的研究与推广应用”历时20余年,取得重要成果,累计经济效益超过2亿元,获得多项国家发明专利,成果论文数百篇,推广应用单位400多家,涉及几十个矿种,还有多个大型钢铁、有色企业采用其仪器和技术进行产品质量控制。获得1997年度国家科技进步三等奖,这是迄今为止XRF界取得的最高奖项成果。其后在野外现场分析(包括钻孔岩芯现场测量)方面不断取得大量新成果<sup>[21-29]</sup>。

XRF测井仪器、技术方法和应用及X取样技术研究与应用也是成都理工大学研究团队的特色研究工作,在实际应用中也取得许多重要成果。在葛良全的评述中已有较多评述,这两方面的文献都很多,这里只分别罗列一些典型或评介性文献<sup>[30-48]</sup>,更多更详细内容请参见该团队相关研究成果文献。

北京矿冶研究总院也是开展便携式XRF仪器研制的单位之一,其主要目标是金属矿山<sup>[49]</sup>。有色金属工业总公司桂林地质研究院(原冶金部桂林地质研究所)也较早研制和应用轻便XRF仪器进行现场快速分析。利用 $5\text{mCi}^{241}\text{Am}$ 放射源XRF仪器测定了海南岛铁矿样品,收到了较好的效果<sup>[50]</sup>。

国家地质实验测试中心(原岩矿测试技术研究所)梁国立小组与成都地质学院在20世纪70年代合作研制便携式XRF仪器期间,也合作参加了在北京、甘肃、浙江等地大量的野外实验研究工作。其后,为配合地质科学研究院地质矿产研究所富铜富铁找矿项目,该小组与地质学家一起用便携式XRF仪器在福建、广东等地勘查区域进行野外现场测量,为地质找矿及时提供了元素含量数据,大大提高了野外工作效率,缩短了研究与评价进程<sup>[51]</sup>。浙江地质局用手提式XRF仪器测定了矿石中的铁和钨<sup>[52]</sup>。

20世纪90年代中后期,国家地质实验测试中心与中国地质科学院物化探研究所共同开展了新型便携式XRF仪的研制与应用工作。前者采用Si-PIN探测器研制了放射性同位素激发的便携式X射线荧光光谱仪,在钒钛磁铁矿、海洋多金属结核、结壳方面进行了应用研究,取得较好的效果<sup>[53]</sup>;而后者采用俄罗斯的SPECTROSCAN-U便携式波长色散X射线荧光光谱仪,制定了现场测定铜矿区15种元素的方法<sup>[54-55]</sup>。这些成果的应用大大提高了野外现场分析水平。

2015年屈华阳等采用纳克公司的PORT-X 200手持式XRF谱仪建立了矿山现场检测铅锌矿

中 Pb、Zn、Cu、Mo 等元素的方法, 无需样品前处理, 十几秒钟即可准确测定, 有效提高了矿山生产效率<sup>[56]</sup>。

## 2.2 “多功能车载现场实验分析技术装备”研究

21 世纪初, 詹秀春团队完成了“多功能车载现场实验分析技术装备”研究, 其中包括小型偏振-能量色散 X 射线荧光光谱仪、光导比色仪、测汞仪、小型气体质谱仪和部分样品前处理装置。车载实验室现场快速检测了包括 Cu、Pb、Zn、Fe、Ni、Mo 等在内的 30 余种元素<sup>[57-62]</sup>。多功能车载野外实验分析技术装备在青藏高原、内蒙古草原、新疆戈壁、东北大兴安岭、赣南等覆盖区采集并测试了大量样品; 现场分析数据与实验室分析数据(各方法的平均值)的对比结果表明, 20 余种元素的分析数据的一致性良好, 4 个标准物质 GBW07301~GBW07304 的检测结果中, 除低含量 Cu 和 Ga 外, 18 个元素符合多目标地球化学调查规范(1: 250000)规定的误差要求。

## 2.3 便携式 XRF 在岩芯成分分析中的应用

便携式 X 射线荧光光谱仪具有快速、无损分析的特点, 可对钻孔岩芯原位进行定性和定量分析, 具有独特的应用领域和前景。采用 X 射线分析原理研发的 XRF 岩芯扫描仪, 主要是针对沉积物柱状岩芯进行快速、无损的元素成分分析, 可得到元素的含量并给出元素化学组成相对变动的可靠记录, 主要应用于沉积环境相对稳定的深海、湖泊、黄土等的研究。

1997 年, 攀钢集团李林等对铁矿钻孔岩芯 XRF 值与其物理力学性质关系进行了研究, 探讨了岩石 XRF 测量值与岩石物理力学性质的对应关系<sup>[63]</sup>。郑兴国、陈爽等采用便携式 X 射线荧光光谱仪进行了钻探岩芯原位样品的快速定性定量分析, 结合浅钻揭露地表异常, 快速查证地下矿化信息, 对 Ti、Mn、Fe 等元素在地下 0~60 m 的含量随深度的分布特征进行了分析研究<sup>[64-65]</sup>。杜兴胜、张广玉等先后运用现场 EDXRF 分析技术结合钻探快速测定了岩芯样品中元素含量, 发现了部分元素的高值异常并加以验证, 完成了对异常区快速追踪和圈定。实现了真正意义上的现场取样—现场分析—现场评价<sup>[66-67]</sup>。

成艾颖、周锐、马雪洋、辛首臻等采用 XRF 岩芯扫描仪直接对湖泊沉积物岩芯、石笋等样品进行了无损、连续扫描分析, 获得剖面的化学元素含量分布信息。随着校正技术和分析方法日臻完善和国内同行对该方法了解的加深, XRF 岩芯扫描分析技术在

湖泊沉积和环境变化研究领域得到广泛的应用<sup>[68-74]</sup>。

## 2.4 国外便携式 XRF 仪器的应用

随着便携式 XRF 仪器的发展, 应用日益广泛, 特别是近 10 年来, 野外现场应用发展非常迅速。各单位引进不同厂家不同型号的便携式 XRF 仪器, 大都收到良好效果, 引起国内便携式 XRF 仪器研制及应用单位的关注。

张勤等和龙昌玉等用帕纳科 Minipal4 便携式 XRF 仪为野外现场应用做了方法实验研究<sup>[75-76]</sup>。王戈等在某地野外现场直接用粉末样品, 用 Minipal4 便携式能量色散 XRF 谱仪对水系沉积物样品中 Cu、Zn、As、Ba、Ni、Co、Mo、Mn、Pb、W 和 Sb 等多种元素进行测定, 得到较好的结果<sup>[77]</sup>。杨帆等采用 Minipal4 便携式能量色散 XRF 光谱仪在野外驻地开展了地球化学样品的现场分析工作, 配合浅钻取样技术分析测定了新疆东天山浅覆盖区下覆残积物粉末岩心样品中的 Cu、Pb、Zn、As、Co、Ni、Mn, 建立了上述 7 种元素的野外快速分析方法, 并现场指导浅覆盖区的浅钻化探扫面和异常查证等工作<sup>[78]</sup>。李勇等用 Epsilon3 型偏振能量散射 XRF 谱仪的 Omnina 全自动顺序扫描功能, 建立了无损快速测定钻探岩芯样品中主、次和痕量组分的分析方法。该方法在内蒙古额尔古纳矿区数月的野外试点工作中, 取得了良好的地质找矿效果<sup>[79]</sup>。

韩平等应用 NITON XL3t 600 型便携式 XRF 分析仪对土壤中主要重金属污染物 Cu、Zn、Pb、Cr 和 As 进行预测试, 研究表明检测准确度和精密度良好; 在田间进行原位检测验证该仪器适用于土壤中重金属的快速检测<sup>[80]</sup>, 屈太原等用 NITON XL3t 600 测定了红土镍矿中 Fe、Ni、Cr、Mn、Ti、Zn 和 Ca 等<sup>[81]</sup>。2013—2018 年间有 10 篇采用 NITON XL 系列便携式 XRF 用于地矿样品现场分析的文献<sup>[82-91]</sup>。

王本伟等采用美国伊诺斯 Innov-X Delta SGSM 便携式 XRF 测定了农田土壤样品中的 Pb、Cu、Zn 和 As 等重金属; 徐巧等介绍利用 Innov-X a-6000 便携式 XRF 在科皮亚波泥沟地区寻找铜矿的经历, 对该区 2.5 km<sup>2</sup> 区域进行了勘查, 发现矿化点、矿化线索 5 处, 其中 1 处具有直接经济价值及重要的找矿指示意义; 陈渊等用 Innov-X EPX-50 便携式 XRF 分析了土壤中多种金属元素, 经检验表明, 该仪器可为土壤应急监测提供强有力的技术支持; 崔茂培用 Innov-DP50 便携式 XRF 集成分析仪, 在印尼 Kerta 矿区开展了土壤中 Au、Ag、As、Sb 等多元

素地球化学测量,取得很好的试验效果,展示了该仪器在热液型金矿土壤地球化学勘查工作中的应用前景;詹勇等介绍了用 Innov-X-Explore-9000SDD 便携式矿石分析仪在刚果(金)Kapolowe 铜钴矿 1:25 万土壤地球化学测量中测定了 Cu 和 Co 的品位,为快速圈定异常,指导钻探工程布设,发现矿(化)体,缩短找矿周期,提高找矿效率发挥了很好的作用<sup>[92-96]</sup>。

桂桂兰等考察了奥林巴斯 Olympus Delta Professional 型便携式 XRF 谱仪的检测性能,并对上海市某场地采集的 30 个土壤样品中 Cr、Ni、Cu、Zn、As 和 Pb 分别进行了现场原位检测和实验室制样检测,与电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES)检测结果进行对比表明:该仪器对土壤中重金属检测的准确度和精密度良好,可用于土壤中重金属元素的快速测定<sup>[97]</sup>。

### 3 车载和水上现场分析

#### 3.1 车载现场分析

20 世纪 80 年代中,为配合中国大洋矿产资源调查,国家海洋局第二海洋研究所陈维岳在“向阳红 16”号船上使用便携式 XRF 快速测定了大洋锰结核中的 Mn、Fe 和 Cu,为锰结核调查及时提供了主要资源元素的品位<sup>[98]</sup>。1986—1990 年间国家地质实验测试中心(原地矿部岩矿测试技术研究所)与广州海洋地质调查局合作承担了地矿部《部控 86080 项目》中的“大洋锰结核车载 XRF 现场分析技术研究”,采用大型波长色散 XRF 仪器,制定了快速测定锰结核中 7(主要资源评价元素)、20 和 25 种元素的 3 套分析方案,使我国“海洋四号”大洋调查船的现场分析水平跨入世界先进行列<sup>[99-101]</sup>,在首航的关键时刻及时提供了矿区评价数据,为我国的“先驱投资者开辟区”申请赢得了宝贵时间,为我国在太平洋获得 30 万 km<sup>2</sup> 多金属结核富矿区作出了重要贡献。其后广州海洋地质调查局先后利用国产和进口便携 XRF 在船上快速测定了锰结核中的 Mn、Fe、Co、Ni、Cu 和富钴结壳中的 Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn<sup>[102-103]</sup>。广州海洋地质调查局张学华等研究了手持式 X 射线荧光光谱仪在富钴结壳碎块和浅钴岩心野外现场原位分析中的应用,方法经检验,相对标准偏差(RSD)在 0.3%~3.0%之间,满足富钴结壳样品现场分析的要求。在海上资源勘查现场实际应用表明,手持式 X 射线荧光光谱仪适合于现场原位分析,可满足野外富钴结壳资源快速评价的要求,同

时原位分析能更真实地反映原始富钴结壳岩心不同层位中各元素的变化特征,为进一步研究富钴结壳成矿机制提供更丰富的数据资料<sup>[104]</sup>。

国家海洋局第二海洋研究所赵宏樵等评介了利用同位素源 XRF 海上现场品位速测方法,并和陆地实验室分析方法进行了对比,结果表明所用的现场 XRF 方法和亚硝基-R 盐比色法的结果合格率均不高<sup>[105]</sup>。应该说这个对比与所用仪器和分析方法有关,不具普遍性。而在他的另一篇报道中采用飞利浦 Venus 200-XRF(波长色散仪器)对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、MgO、K<sub>2</sub>O、TiO<sub>2</sub>、Fe、Mn、Co、Ni 和 Cu 共 10 组分的测定就取得了较好的结果<sup>[106]</sup>。

国家海洋局第一海洋研究所张颖等在海上调查期间,采用帕纳科 Epsilon3 小型能量色散 X 射线荧光光谱仪对深海沉积物样品进行了现场测试,调查船上的测定值与陆上实验室内的测定值基本一致,两者平均相对偏差基本小于 10%,结果表明该方法能快速、准确测定沉积物中多种元素,为及时判断现场资源分布情况提供了依据,减少了取样的盲目性,这将为我国海洋地质调查工作提供新的技术支持<sup>[107-109]</sup>。张颖等还以粉末压片制样,采用小型台式能量色散 XRF 快速准确进行深海沉积物中稀土元素 Nd、Y 的现场测定。借助深海沉积物中 Nd 和 Y 含量与稀土总量、Nd 与轻稀土量、Y 与重稀土量之间存在的良好的相关性,建立了 3 种相关关系方程,从而可据 Nd、Y 的现场分析值推算出样品中轻、重稀土量及稀土总量,为我国大洋资源勘察提供了一种现场快速评价海底沉积物稀土分布规律的手段和方法,大大提高了大洋资源勘查工作的效率<sup>[110]</sup>。这些工作将车载现场分析扩展到了沉积物和沉积物中稀土元素的分析,分析结果质量也达到了一个新水平。

海洋特别是大洋矿产资源调查需要与调查任务相匹配的车载实验室,X 射线荧光现场分析仪器几乎成了标准配置。20 世纪 90 年代前后,我国大洋调查船的现场分析能力和水平处于世界前列,为我国在国际海底获得“先驱投资者开辟区”作出重要贡献<sup>[99,101,111]</sup>。现在调查船的船载实验室设备更加完善,不断为海山富钴结壳、热液硫化物和深海稀土资源调查作出新贡献<sup>[104,108,110]</sup>。

#### 3.2 水下原位分析

在国家“863”计划的支持下,由成都理工大学葛良全等研制了 ANTG-2001 型海底 X 射线荧光探测系统,提出了天然沉积物水分对现场 X 射线荧光光

谱测量结果影响的散射校正模型。对我国南海某海域海底沉积物进行了水下快速测量,试验表明,该探测系统在无液氮冷却条件下能够实现水底沉积物的原位测量,且一次可同时完成 5~10 余种元素的定性、定量测定,其检出限可达  $(10 \sim 200) \times 10^{-6}$ ,这是一种快速、经济、准确而有效的现场原位分析技术,为我国海洋矿产资源调查提供了新手段<sup>[10-11, 112-115]</sup>。

## 4 月表探测

月球表面元素丰度是研究月表物质成分及分布的基础数据,可提供月球地质演化历史的重要信息。

中国的探月工程和美国的 Apollo (1971, 1972)、欧洲的 SMART-1 (2003)、日本的“月亮神号”探月(2007)和印度的“月船一号”(2008)一样都搭载了 X 射线谱仪用于月表物质成分的测量。美国通过两次 Apollo 任务获得了月表 10% 面积的 Mg、Al 和 Si 的月表丰度比及其分布,欧洲和日本的探测都因探测器的辐射损伤而未获得精确数据,印度的“月船一号”搭载了欧洲 D-CIXS 探测器的改进型,本来可以获得 Mg、Al、Si、Ca、Ti 和 Fe 的绝对丰度数据,但因运行期间太阳处于平静期,只得到了月球一小区域 Mg、Al、Si、Ca、Ti 和 Fe 的元素丰度分布。

我国“嫦娥一号”(2007)也因运行期间太阳处于平静期,只得到了一小区域 Mg、Al 和 Si 的元素分布。而“嫦娥二号”(2010)搭载的 X 射线光谱探测系统,增加了<sup>55</sup>Fe 源在轨道标器对探测器进行标定,特别是在轨期间太阳正处在活跃期,从而保证顺利获得了 Mg、Al、Si、Ca、Ti 和 Fe 的元素丰度分布数据<sup>[116]</sup>。

X 射线谱仪由 X 射线探测器、太阳 X 射线监测器等组成,其中 X 射线探测器探测由月球表面发射的荧光 X 射线,太阳 X 射线监测器观测来自太阳的 X 射线辐射,用于配合月面 X 射线探测,获得元素的绝对丰度<sup>[117]</sup>。

## 5 结语与讨论

现场分析是 XRF 在各应用领域最活跃的一个方面,也是最早较广应用的一个方面,尤其是在地质勘探、矿山等野外现场分析中的应用。如今现场 XRF 技术应用的触角已延伸到陆、海、空地学领域的多个方面,取得了多项令人瞩目的成果;成都地质学院承担的“X 荧光技术的研究与推广应用”历时

20 余年,累计经济效益超 2 亿元,获多项国家发明专利,推广应用单位 400 多家,涉及几十个矿种,成果论文数百篇,获得迄今为止 XRF 界取得的最高奖项国家科技进步三等奖;大洋多金属结核船载 XRF 现场分析使我国大洋调查船的现场分析水平跨入世界先进行列,为我国在东太平洋海盆获得 30 万 km<sup>2</sup>“先驱投资者开辟区”作出了重要贡献;“嫦娥一号”、“嫦娥二号”搭载的 X 射线光谱探测系统获得了大量月面元素丰度分布数据,成为我国探月工程的重要成果。

XRF 现场分析领域的扩展和应用效果最重要的还是取决于仪器设备的性能,在这方面我国与国际水平相比还有较大差距。在许多应用中即使使用了自己搭建制造的设备,但其原理和关键部件仍靠引进,原创较少。近年来国外现场 XRF 分析商品仪器应用文献的大量涌现,表明了我国在现场 XRF 仪器研制、仪器种类和仪器性能方面存在的差距。因此深入研究、广泛关注国外相关技术和应用的发展,仍是仪器研制和应用者应该不断努力的方向。

## 参考文献:

- [1] Rhodes J R, Ahier T G, Boyce I S. Determination of tin in tin ores by radioisotope X-ray fluorescence [J]. Radiochemical Methods of Analysis, 1965, 2: 431.
- [2] Clayton C G. Applications of radioisotope X-ray fluorescence analysis in geological assay mining and mineral processing [C] // Proceeding of Symposium on the Use of Nuclear Techniques in the Prospecting and Development of Mineral Resources, IAEA, 1969: 293-324.
- [3] 便携式放射性同位素 X 射线荧光仪 [J]. 科技简报, 1974 (10): 30-31.
- [4] 成都地质学院核子地球物理研究室. X-射线荧光方法的现场测量 [J]. 物探与化探 (Geophysical and Geochemical Exploration), 1979 (2): 59-65.
- [5] J R 罗兹. 同位素源 X 射线荧光分析仪 [M]. 荣弟, 译. 北京: 原子能出版社, 1977: 1-105.
- [6] 张家骅, 徐君权, 朱节清. 放射性同位素 X 射线荧光分析 [M]. 北京: 原子能出版社, 1981: 1-388.
- [7] 章晔, 谢庭周, 曹利国. X 射线荧光探矿技术 [M]. 北京: 地质出版社, 1984: 1-297.
- [8] 葛良全, 周四春, 赖万昌. 原位 X 辐射取样技术 [M]. 成都: 四川科学出版社, 1997.
- [9] 曹利国. 能量色散 X 射线荧光方法 [M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1998: 1-359.
- [10] 葛良全. 现场 X 射线荧光分析技术 [J]. 岩矿测试 (Rock and Mineral Analysis), 2013, 32 (2): 203-212.

- [11] 葛良全,赖万昌,张庆贤,等.野外 X 射线荧光勘查技术应用进展[J].地质学报,2013,87(增刊):204-206.
- [12] 马光祖,梁国立.地质样品的 X 射线荧光光谱分析[J].岩矿测试(Rock and Mineral Analysis),1992,11(1-2):37-43.
- [13] 王毅民,王晓红.我国地质分析中 X 射线光谱技术的回顾与发展[J].岩矿测试(Rock and Mineral Analysis),2000,19(4):275-285.
- [14] 王毅民,陈幼平.近 30 年来地质分析重要成果评介[J].地质论评(Geological Review),2008,54(5):653-669.
- [15] 章晔.放射性同位素 X 射线荧光技术在地质勘探中的应用[J].核技术(Nuclear Technique),1981(3):13-18.
- [16] 章晔.放射性同位素 X 射线荧光技术在矿产资源中的应用[J].核电子学与探测技术(Nuclear Electronics and Detection Technology),1983,3(4):64-65,63.
- [17] 章晔,谢庭周,周四春,等.核地球物理学的 X 射线荧光技术在我国固体矿产资源中的研究与应用[J].地球物理学报(Acta Geophysica Sinica),1989,32(4):441-450.
- [18] 曹利国,丁益民,王剑.X 射线荧光方法进行野外找矿及成矿规律研究的现状和前景[J].地球物理学进展(Progress in Geophysics),1998(4):110-121.
- [19] 周四春,谢庭周,葛良全,等.X 荧光勘查金矿技术的应用与进展[J].物探化探计算技术(Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration),1996,18(S1):66-69.
- [20] 庾先国,倪师军,滕彦国,等.现场核技术方法在勘查金矿中的进展及应用[J].矿物岩石地球化学通报(Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry),1999,18(1):55-58.
- [21] 周四春,赵琦,陈慈德.多参数 X 荧光测量现场地球化学勘查金矿技术研究与应用[J].矿物岩石(Mineral Petrol),1998,18(4):99-103.
- [22] 赖万昌,葛良全,周四春,等.新一代高灵敏度手提式 X 荧光仪的研制[J].物探与化探(Geophysical & Geochemical Exploration),2002,26(4):321-324.
- [23] 林延畅,葛良全,赖万昌.新一代手提式多元素 X 荧光仪在地质普查中的应用[J].物探与化探(Geophysical & Geochemical Exploration),2002,26(4):325-328.
- [24] 赖万昌,葛良全,吴永鹏,等.现场高灵敏度 X 射线荧光探矿技术的研究[J].地质与勘探(Geology and Prospecting),2004,40(1):60-63.
- [25] 葛良全,赖万昌,林延畅.现场 X 射线荧光检测技术研究[J].四川地质学报(Acta Geologica Sichuan),2006,26(2):117-120.
- [26] 徐海峰,李成文,葛良全,等.手提式 X 荧光分析仪在矿产普查中寻找伴生矿的应用研究[J].核电子学与探测技术(Nuclear Electronics & Detection Technology),2009,29(2):445-448.
- [27] 郑兴国,陈方强,葛良全,等.钻孔岩芯多元素原位 X 荧光分析技术及应用[J].金属矿山(Metal Mine),2011(4):104-107,161.
- [28] 杨海,葛良全,熊盛青,等.一套基于 X 射线荧光测量的快速找矿方法[J].物探与化探(Geophysical & Geochemical Exploration),2014,38(4):723-728.
- [29] 陈爽,葛良全,张庆贤,等.便携式 X 荧光仪原位测量浅钻岩芯的应用[J].现代矿业(Modern Mining),2015,31(7):114-116.
- [30] 章晔,谢庭周,梁致荣,等.X 射线荧光测井仪的研制及其在金属矿上的应用[J].成都地质学院学报(Journal of Chengdu College Geology),1982(2):77-84.
- [31] 章晔,谢庭周,梁致荣,等.放射性同位素 X 射线荧光测井技术在锡矿、锑矿和重晶石矿的应用[J].核技术(Nuclear Techniques),1985(9):9-12,51-52.
- [32] 葛良全,周四春,谢庭周,等.X 射线荧光测井井液的影响与校正[J].物探化探计算技术(Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration),1996,18(S1):39-41.
- [33] 葛良全,周四春,谢庭周,等.新型 X 射线荧光测井仪的研制与初步应用[J].成都理工学院学报(Journal of Chengdu University of Technology),1997,24(1):107-111.
- [34] 葛良全,周四春,谢庭周,等.井孔原位快速测定元素含量的井中 X 辐射取样技术[J].有色金属:矿山部分(Nonferrous Metals: Mining Section),1997(1):1-5.
- [35] 葛良全,章晔,程业勋,等.放射性同位素 X 荧光测井技术的研究[J].核技术(Nuclear Techniques),1997,20(1):18-23.
- [36] 申凤君,葛良全,杨强,等.X 射线荧光测井仪系统研制[J].核技术(Nuclear Techniques),2011,34(4):304-308.
- [37] 葛良全,章晔.同位素源 X 射线荧光仪在某铅锌矿巷壁 X 取样中的应用[J].核技术(Nuclear Techniques),1989,12(1):24-31.
- [38] 周四春,章晔,谢庭周,等.X 取样方法的研究和应用(一)——测量几何条件的最佳化[J].核电子学与探测技术(Nuclear Electronics & Detection Technology),1990,10(1):12-18.
- [39] 周四春,章晔,谢庭周,等.X 取样方法的研究和应用(二)——一种适合于 X 取样的新散射校正方法[J].核电子学与探测技术(Nuclear Electronics & Detection Technology),1990,10(4):228-232.
- [40] 周四春.X 取样方法的研究和应用(三)——克服矿化不均匀效应的方法研究[J].核电子学与探测技术(Nuclear Electronics & Detection Technology),1991,11(1):42-46.
- [41] 周四春,章晔,谢庭周,等.X 取样方法的研究和应用(四)——X 取样方法在锡矿上的应用[J].核电子学与

- 探测技术(Nuclear Electronics & Detection Technology), 1991, 11(2): 91-96.
- [42] 赖万昌, 葛良全, 赵友清, 等. 铁矿石 XRF 现场取样技术的研究与应用[J]. 核技术(Nuclear Techniques), 1995, 18(12): 744-749.
- [43] 吴建平, 赖万昌, 李志扬, 等. 喀拉通克铜镍矿井下应用 X 射线荧光技术研究[J]. 成都理工学院学报(Journal of Chengdu University of Technology), 1995, 22(2): 101-108.
- [44] 方同秀, 周道玉. 狮子山铜矿岩壁 X 取样研究与应用[J]. 物探化探计算技术(Computing Techniques for Geophysical & Geochemical Exploration), 1996, 18(S1): 118-121.
- [45] 葛良全, 赖万昌, 周四春, 等. 原位快速测定矿石品位的 X 辐射取样技术[J]. 金属矿山(Metal Mine), 1997(2): 12-16.
- [46] 葛良全, 周四春, 谢庭周, 等. 井孔原位快速测定元素含量的井中 X 辐射取样技术[J]. 有色金属: 矿山部分(Nonferrous Metals: Mining Section), 1997(1): 1-5.
- [47] 庾先国, 任家富, 郭海, 等. X 荧光现场取样技术在大红山铜矿的应用[J]. 金属矿山(Metal Mine), 2003(10): 43-45.
- [48] 周四春, 王德明, 侯克功, 等. X 荧光取样技术在铜矿山的应用研究[J]. 有色矿山(Nonferrous Mines), 2001, 30(2): 4-7, 11.
- [49] 河北铜矿龙潭分矿, 国营二六一厂三室, 北京矿冶研究院自动化室. 放射性同位素 X 射线荧光分析仪的现场实验[J]. 有色金属: 采矿部分(Nonferrous Metals: Mining Section), 1977(3): 9-15.
- [50] 金涧波. 用透射校正法测定铁矿粉末样品的探讨[J]. 核电子学与探测技术(Nuclear Electronics & Detection Technology), 1983, 3(6): 26-28.
- [51] 中国地质科学院地矿所八室. 用携带式放射性同位素 X 射线荧光分析仪在野外快速测铁[J]. 物探与化探(Geophysical and Geochemical Exploration), 1979(3): 55-58.
- [52] 浙江省地质局实验室. 手提式 X 光荧光分析仪测定矿石中的铁和钼[C]// 全国岩矿分析经验交流会文集. 北京: 科学出版社, 1976: 561-563.
- [53] 陈永君, 邓赛文, 马天芳, 等. 便携式 X 射线荧光分析仪的研制与应用[J]. 岩矿测试(Rock and Mineral Analysis), 2001, 20(2): 136-141.
- [54] 李国会, 陈永君, 樊守忠, 等. 便携式波长色散 X 射线荧光光谱仪及初步应用[J]. 岩矿测试(Rock and Mineral Analysis), 2001, 20(4): 301-304.
- [55] 李国会, 樊守忠, 潘宴山. SPECTROSCAN-U 型便携式波长色散 X 射线荧光光谱仪现场测定铜矿区的 15 种元素[J]. 光谱实验室(Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory), 2003, 20(2): 250-253.
- [56] 屈华阳, 黄生福, 霍巍恒, 等. 手持式 X 射线荧光光谱仪在现场测定铅锌矿中的应用[J]. 冶金分析(Metallurgical Analysis), 2015, 35(7): 32-36.
- [57] 樊兴涛, 李迎春, 王广, 等. 车载台式能量色散 X 射线荧光光谱仪在地球化学勘查现场分析中的应用[J]. 岩矿测试(Rock and Mineral Analysis), 2011, 30(2): 155-159.
- [58] 樊兴涛, 詹秀春, 袁继海, 等. 多功能车载野外实验分析装备在地球化学勘探现场中的应用[J]. 中国科技成果(China Scientific and Technological Achievements), 2013(23): 34-37.
- [59] 蒯丽君, 樊兴涛, 詹秀春, 等. 酸消解-车载偏振能量色散 X 射线荧光法现场测定祁曼塔格多金属矿中高品质铜铅锌[J]. 岩矿测试(Rock and Mineral Analysis), 2013, 32(4): 538-546.
- [60] 翟磊, 詹秀春, 樊兴涛, 等. 应用 S930 树脂富集薄样-X 射线荧光光谱现场分析环境水体中 8 种重金属的方法研究[J]. 岩矿测试(Rock and Mineral Analysis), 2015, 34(1): 118-128.
- [61] 焦距, 詹秀春, 樊兴涛, 等. 能量色散 X 射线荧光光谱法现场测定钾盐钻井泥浆中的钾、溴、铯[J]. 分析试验室(Chinese Journal of Analysis Laboratory), 2016, 35(9): 1111-1116.
- [62] 焦距, 詹秀春, 翟磊, 等. 无外接电源富集装置-手持式 XRF 现场分析水体中重金属[J]. 光谱学与光谱分析(Spectroscopy and Spectral Analysis), 2017, 37(1): 267-272.
- [63] 李林, 王龙, 钟长江. 攀枝花铁矿钻孔岩芯 XRF 值与其物理力学性质关系的研究[J]. 金属矿山(Metal Mine), 1997(4): 42-43.
- [64] 郑兴国, 陈方强, 葛良全, 等. 钻孔岩芯多元素原位 X 荧光分析技术及应用[J]. 金属矿山(Metal Mine), 2011(4): 104-107, 161.
- [65] 陈爽, 葛良全, 张庆贤, 等. 便携式 X 荧光仪原位测量浅钻岩芯的应用[J]. 现代矿业(Modern Mining), 2015, 31(7): 114-116.
- [66] 杜兴胜, 熊超, 窦小平, 等. 现场 X 射线荧光光谱分析在钻孔岩芯测量中的应用[J]. 核电子学与探测技术(Nuclear Electronics & Detection Technology), 2014, 34(6): 775-779.
- [67] 张广玉, 赵世煌, 邓晃, 等. 手持式 X 射线荧光光谱多点测试技术在地质岩心和岩石标本预研究中的应用[J]. 岩矿测试(Rock and Mineral Analysis), 2017, 36(5): 501-509.
- [68] 成艾颖, 余俊清, 张丽莎, 等. XRF 岩芯扫描分析方法及其在湖泊沉积研究中的应用[J]. 盐湖研究(Journal of Salt Lake Research), 2010, 18(2): 7-13.

- [69] 成艾颖,余俊清,张丽莎,等.托素湖岩芯 XRF 元素扫描分析及多元统计方法的应用[J].盐湖研究(Journal of Salt Lake Research),2011,19(1):20-25.
- [70] 周锐,李珍,宋兵,等.长江三角洲平原湖沼沉积物 XRF 岩芯扫描结果的可靠性分析[J].第四纪研究(Quaternary Sciences),2013,33(4):697-704.
- [71] 马雪洋,陈豆,阳亚平,等.哈拉湖岩芯 XRF 扫描元素统计分析及其环境意义[J].盐湖研究(Salt Lake Research),2014,22(4):1-10.
- [72] 辛首臻,成艾颖,余俊清,等.岱海近 400 年以来的环境变化:高分辨率 XRF 岩芯扫描结果的研究[J].盐湖研究(Journal of Salt Lake Research),2015,23(2):1-6,33.
- [73] 章桂芳,郑卓,乐远福,等.福州盆地第四纪钻孔 XRF 连续扫描的元素特征及沉积相指示意义[J].光谱学与光谱分析(Spectroscopy and Spectral Analysis),2016,36(9):2971-2977.
- [74] 李东,谭亮成,郭飞,等.Avaatech XRF 岩芯扫描分析方法在石笋 Sr/Ca 测试中的应用[J].中国科学:地球科学(Scientia Sinica Terrae),2019,49(6):1014-1023.
- [75] 张勤,樊守忠,潘宴山,等.Minipal4 便携式能量色散 X 射线荧光光谱仪在勘查地球化学中的应用[J].岩矿测试(Rock and Mineral Analysis),2007,26(5):377-380.
- [76] 龙昌玉,李小莉,张勤,等.能量色散 X 射线荧光光谱仪现场快速测定多金属矿中 17 种组分[J].岩矿测试(Rock and Mineral Analysis),2010,29(3):313-315.
- [77] 王戈,武斌,苏文,等.Minipal4 便携 X 射线荧光光谱仪现场快速测定水系沉积物中多种元素[J].现代仪器(Modern Instruments),2012,18(1):48-52.
- [78] 杨帆,郝志红,刘华忠,等.便携式能量色散 X 射线荧光光谱仪在新疆东天山浅钻化探异常查证中的应用[J].岩矿测试(Rock and Mineral Analysis),2015,34(6):665-671.
- [79] 李勇.ED-XRF 无损测定钻探岩芯样品中主次痕量元素[J].黄金科学技术(Gold Science and Technology),2016,24(4):119-123.
- [80] 韩平,王纪华,陆安祥,等.便携式 X 射线荧光光谱分析仪测定土壤中重金属[J].光谱学与光谱分析(Spectroscopy and Spectral Analysis),2012,32(3):826-829.
- [81] 屈太原,李华昌,冯先进.便携式能量色散 X 射线荧光光谱仪测定红土镍矿中 7 种元素[J].冶金分析(Metallurgical Analysis),2012,32(3):25-29.
- [82] 祁昌炜,朱杰勇,王佳音,等.便携式 X 射线荧光元素分析仪的应用[J].地质与资源(Geology and Resources),2013,22(1):64-66.
- [83] 杨载明.便携式 X 射线荧光光谱仪现场测定高含量钼地质样品中的钒[J].岩矿测试(Rock and Mineral Analysis),2013,32(4):665-667.
- [84] 李向超.便携式 X 射线荧光光谱仪现场测定地质样品中钛[J].冶金分析(Metallurgical Analysis),2014,34(4):32-36.
- [85] 冉景,王德建,王灿,等.便携式 X 射线荧光光谱法与原子吸收/原子荧光法测定土壤重金属的对比研究[J].光谱学与光谱分析(Spectroscopy and Spectral Analysis),2014,34(11):3113-3118.
- [86] DU Guo-dong, LEI Mei, ZHOU Guang-dong, et al. Evaluation of field portable X-ray fluorescence performance for the analysis of Ni in soil[J].Spectroscopy and Spectral Analysis,2015,35(3):809-813.
- [87] 邝荣禧,胡文友,何跃,等.便携式 X 射线荧光光谱法(PXRF)在矿区农田土壤重金属快速检测中的应用研究[J].土壤(Soils),2015,47(3):589-595.
- [88] WANG Bao, YU Jian-xin, HUANG Biao, et al. Fast monitoring soil environmental qualities of heavy metal by portable X-ray fluorescence spectrometer[J].Spectroscopy and Spectral Analysis,2015,35(6):1735-1740.
- [89] 夏天,牛辉,刘毅业.便携式 X 荧光仪在铅锌矿评价野外工作中的应用[J].西部探矿工程(West-China Exploration Engineering),2016,28(7):140-143.
- [90] 张锐,马龙.手持 X 射线荧光光谱法在矿山生产中的应用[J].矿产勘查(Mineral Exploration),2018,9(2):341-345.
- [91] 周曙光,廖世斌,周可法,等.便携式 X 射线荧光光谱仪在岩石样品分析中的应用研究[J].岩矿测试(Rock and Mineral Analysis),2018,37(1):56-63.
- [92] 王本伟,胡文友,黄标,等.便携式 X 荧光光谱(PXRF)测定法在农田土壤重金属分析中的应用[J].矿物岩石地球化学通报(Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry),2012,31(5):522-526.
- [93] 徐巧,杨新雨,付水兴,等.便携式 X 荧光分析仪在智利科皮亚波泥沟铜矿勘查中的应用[J].矿产勘查(Mineral Exploration),2012,3(4):545-548.
- [94] 陈渊,张洁,庄园.便携式 X 射线荧光光谱仪快速测定土壤中多种金属元素[J].环境科学与管理(Environmental Science and Management),2013,38(3):121-123.
- [95] 崔茂培.便携式 XRF 仪在金矿土壤化探找矿中的应用[J].四川地质学报(Acta Geologica Sichuan),2015,35(2):299-302.
- [96] 詹勇,马林霄,曾瑞垠.便携式 X 射线荧光仪在刚果(金)Kapolowe 铜钴矿勘查中的应用[J].矿物学报(Acta Mineralogica Sinica),2015,35(S1):1118-1119.
- [97] 杨桂兰,商照聪,李良君,等.便携式 X 射线荧光光谱法在土壤重金属快速检测中的应用[J].应用化工(Applied Chemical Industry),2016,45(8):1586-1591.
- [98] 陈维岳.大洋锰结核调查船上金属品位速测方法的研究—I.锰、铁、铜的 X 射线荧光光谱测定法[J].东海海

- 洋(Donghai Haiyang), 1987, 5(3): 78-82.
- [99] Wang Yi-min, LIANG Guo-li, TENG Yun-ye. Determination of multiple elements in manganese nodules on board using XRS[J]. *Marine Mining*, 1991, 10(3): 259-264.
- [100] 王毅民, 梁国立, 滕云业. 大洋锰结核中主要金属元素的 X 荧光光谱船上现场分析[J]. *海洋学报 (Acta Oceanologica Sinica)*, 1991, 13(1): 121-124.
- [101] 王毅民. 深海矿产资源研究与开发中的分析技术[J]. *岩矿测试 (Rock and Mineral Analysis)*, 1992, 11(1/2): 179-185.
- [102] 张学华, 吉昂, 卓尚军, 等. SZ-1 型同位素 X 射线荧光分析仪分析多金属结核中锰铁钴镍铜[J]. *岩矿测试 (Rock and Mineral Analysis)*, 1999(2): 46-49, 52.
- [103] 李强, 张学华. 手持式 X 射线荧光光谱仪测定富钴结壳样品中锰铁钴镍铜锌[J]. *岩矿测试 (Rock and Mineral Analysis)*, 2013, 32(5): 724-728.
- [104] 张学华, 李强, 黄雪华, 等. 手持式 X 射线荧光光谱仪在富钴结壳资源勘查中的应用[J]. *岩矿测试 (Rock and Mineral Analysis)*, 2014, 33(4): 512-516.
- [105] 赵宏樵, 吴建之, 曾江宁. 富钴结壳分析方法评述和结果对比[J]. *仪器仪表学报 (Chinese Journal of Scientific Instrument)*, 2001, 22(4 增): 413-414, 423.
- [106] 赵宏樵, 曾江宁, 俞元挺, 等. 富钴结壳主要成分的 X 荧光快速测定[J]. *海洋学研究 (Journal of Marine Sciences)*, 2005, 23(2): 17-23.
- [107] 张颖, 汪虹敏, 王赛, 等. X 荧光光谱仪在实验室-调查船测定海洋沉积物元素的对比研究[J]. *海洋科学进展 (Advances in Marine Science)*, 2018, 36(4): 550-559.
- [108] 张颖, 汪虹敏, 王小静, 等. 深海沉积物元素现场测定及方法对比研究[J]. *分析化学 (Chinese Journal of Analytical Chemistry)*, 2018, 46(4): 570-577.
- [109] 汪虹敏, 张颖, 徐磊, 等. 能量色散 X 射线荧光光谱法测定海洋碎屑沉积物中 28 种元素[J]. *海洋科学进展 (Advances in Marine Science)*, 2020, 38(1): 70-80.
- [110] 张颖, 汪虹敏, 张辉, 等. 小型台式 EDXRF 现场快速测定深海沉积物中稀土元素[J]. *海洋科学进展 (Advances in Marine Science)*, 2019, 37(1): 32-42.
- [111] 王晓红, 王毅民, 张学华. 中国海洋地球化学探测技术的现状与发展[J]. *地球学报 (Acta Geoscientia Sinica)*, 2002, 23(1): 7-10.
- [112] 葛良全, 赖万昌, 周四春, 等. 海底 X 射线荧光探测系统的研制[J]. *成都理工学院学报 (Journal of Chengdu University of Technology)*, 2001, 28(1): 80-85.
- [113] 林玲, 葛良全. 海底 X 射线荧光探测系统的软件研制[J]. *物探化探计算技术 (Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration)*, 2001, 23(4): 338-343.
- [114] 葛良全, 赖万昌, 周四春, 等. 海底 X 射线荧光探测技术及其应用研究[J]. *物探与化探 (Geophysical & Geochemical Exploration)*, 2002, 26(4): 283-286.
- [115] 葛良全, 赖万昌, 林玲, 等. 水底沉积物原位 X 射线荧光测量中水分的影响与校正[J]. *核技术 (Nuclear Techniques)*, 2004, 27(4): 273-276.
- [116] 班超, 郑永春, 张锋, 等. 月球风暴洋地区元素丰度研究: “嫦娥二号” X 射线谱仪探测数据分析[J]. *地学前缘 (Earth Science Frontiers)*, 2014, 21(6): 62-73.
- [117] 申坦. 嫦娥-1 携带的 8 种科学仪器[J]. *国际太空 (Space International)*, 2007(12): 22-27.

## Review on the application of X-ray fluorescence spectrometry in field analysis

DENG Sai-wen, LI Song, WANG Yi-min\*, WANG Yi-ya, LIANG Guo-li  
(National Research Center for Geoanalysis, Beijing 100037, China)

**Abstract:** Field analysis was an eternal subject for geological and mineral industry, and X-ray fluorescence spectrometry (XRF) was the most convenient and effective technologies for field analysis. In the paper, the application of X-ray fluorescence spectrometry in field analysis and logging, shipboard and underwater field measurement and lunar rock exploration was reviewed. In terms of land field analysis, instrument development, field experiment and application research were reported, and the field application were also reported which included mineral exploration, geochemical exploration, mine analysis, mining environment investigation, rock core detection, X-ray fluorescence logging and field analysis of multi-function vehicle. In terms of on-board and underwater field analysis, the application of shipborne on X-ray fluorescence analysis instrument in the survey of ocean polymetallic nodules, seamount cobalt rich crusts and deep-sea rare earth resources in China was reviewed, and the experimental research on underwater in-situ analysis e-

quipment for seabed metal minerals developed by China was also introduced. In terms of lunar rock exploration, the application of X-ray spectrum detection system carried by Chang'e-1 and Chang'e-2 was introduced. There were 117 citations in the paper.

**Key words:** X-ray fluorescence spectrometry (XRF); field analysis; field; logging; shipboard; undersea; geological mineral; lunar rock

## 日立工业材料可靠性鉴定(PMI)分析仪

日立工业材料可靠性鉴定(PMI)分析仪注重稳健性、易用性和准确性,您可将其携带至工厂的每个角落,包括难以触及的测试位置和焊缝。主要应用领域包括石油和天然气上游、石油和天然气中游、电力、所有工厂。PMI分析仪系列包括:

### **X-MET8000**

X-MET8000 是一种手持式 XRF 光谱仪,其大小和质量与手持式电钻相当。电池续航时间长达一整天,方便使用。它可用于测量多种元素,有助于轻元素(镁到硫)的分析,从而有效控制部件和系统。该技术不会对分析表面带来任何损害,也不会留下任何痕迹。

该仪器可测量高达 400 °C 的表面,因此它是测量运行状态下组件的理想选择。您可以选择可调小焦斑准直器,它可将分析光束的尺寸聚焦到 3 mm 以下,这在隔离特定特征(如焊缝)时尤为有价值。

### **PMI-MASTERSmart**

PMI-MASTER 系列采用光学发射光谱法(OES)。OES 是唯一能可靠区分不锈钢 L 级以及为碳当量(CE)计算提供足够详细成分信息的测量技术。OES 也是唯一能够准确测量双相不锈钢和奥氏体不锈钢中氮含量的技术。

PMI-MASTERSmart 是一种真正意义上的便携式高性能 OES 分析仪。它质量轻、结构紧凑,可与可充电电池同时使用。该仪器还能满足 PMI 冶金合金化学测试的严格要求。



**HITACHI**  
Inspire the Next