

岩芯扫描信息采集技术方法与应用分析

高鹏鑫¹, 王瑞红¹, 张慧军², 邓 晃¹, 沈 迪¹

(1. 国土资源实物地质资料中心, 河北 三河 065201; 2. 全国地质资料馆, 北京 100037)

摘 要: 本文主要目的是研究岩芯扫描信息采集技术的特点、发展现状和适用情况, 为实物地质资料保管单位购置岩芯扫描设备, 开展批量化岩芯扫描, 采集岩芯信息, 建设数字实物地质资料馆提供参考。通过汇总目前已经应用成熟的岩芯扫描信息采集技术方法, 根据每一种技术方法的工作原理、适用范围、对岩芯的要求、扫描速度及扫描精度等, 结合应用实例和解决的地质问题, 对固体矿产勘查、科学钻探、环境调查与评价、油气资源调查等不同种类岩芯适用的扫描方法提出合理建议。

关键词: 岩芯扫描; 实物地质资料; 信息采集; 发展

中图分类号: P618.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4051(2015)S1-0441-06

Technical methods and application analysis on the information collection of core scanning

GAO Peng-xin¹, WANG Rui-hong¹, ZHANG Hui-jun², DENG Huang¹, SHEN Di¹

(1. Cores and Samples Center of Land and Resources, China Geological Survey, Sanhe 065201, China;
2. National Geological Archives of China, Beijing 100037, China)

Abstract: Based on the information acquisition techniques of cores scanning, the characteristics, development and application of cores scanning have been introduced for providing some construction references of the digital geological cores and samples center, which lead the collection agencies to fulfill the equipment purchase and the mass information process of core scanning. According to the operation principle, application scope, cores selecting, scanning speed and scanning accuracy, this paper summarized the current maturely information acquisition techniques of cores scanning, application examples and solved geological problems. Finally, this paper proposed some reasonable suggestions of scanning methods for different cores in solid mineral exploration, scientific drilling, environmental investigation and evaluation, oil and gas resource investigation.

Key words: cores scanning; geological cores and samples; information acquisition; development

实物地质资料馆藏机构是专门负责实物地质资料接收、保管与服务利用的公益性机构。我国实物地质资料实行三级保管, 国家级实物地质资料馆藏机构、各省级实物地质资料馆藏机构和地勘单位、工矿企业等基层实物地质资料保管单位, 保管着海量的岩芯, 涵盖了矿产勘查、科学研究、海洋调查、工程地质勘查、水文地质调查、环境调查等各类岩芯。对于国家和省级实物地质资料馆藏机构而言, 入库保管的岩芯是经过精心筛选的, 具有代表性、典型性和特殊性, 这些岩芯数量少、代表性强、利用价值大, 具有不可替代性, 应尽可能的永久保管。

馆藏珍贵岩芯的永久保管需求与取样测试服务是矛盾的, 因为传统的取样测试需要破坏岩芯, 而岩芯扫描技术最大的优点是不必取样、不破坏岩芯, 又能最大限度地挖掘、提取岩芯中蕴含的各种信息, 是同时实现岩芯长期保管和服务利用的最佳手段。此外, 岩芯扫描后, 其内部蕴含的信息从岩石载体转变为电子载体, 解决了岩芯体积大、质量大、存储成本高、不便于移动等难题, 获取的电子数据可以轻而易举地上网服务, 能够极大地提高服务效率。

岩芯扫描技术的发展日新月异, 目前能够通过岩芯扫描技术获取的岩芯数据种类多达 10 余种, 但是并不是所有种类的岩芯都适用于各种扫描技术方法, 对于实物地质资料馆藏机构而言, 应综合考虑扫描目的、扫描原理、不同扫描技术方法对岩芯性状的要求、扫描速度、扫描精度、扫描数据种类、工

收稿日期: 2015-03-25

作者简介: 高鹏鑫(1986—), 男, 河北承德人, 大学本科学历, 学士学位, 主要研究方向为实物地质资料保管与扫描数字化技术方法。

作成本等多种因素,为不同种类的岩芯,选择合适的扫描技术方法,达到既能降低工作量与工作成本,又能提高工作成效的目的。本文汇总目前已经应用成熟的岩芯扫描技术方法,总结每一种技术方法的应用原理、适用范围、对岩芯的要求、扫描速度及扫描精度等,对不同种类岩芯适用的扫描方法提出建议,为实物地质资料馆购置岩芯扫描设备,开展岩芯扫描提供参考。

1 岩芯扫描信息采集技术方法的特点

岩芯扫描是指将地质工作中形成的岩矿心,通过仪器扫描、数码照相等方法,转化成计算机可存储、处理的文字、图像、数据等信息,对信息进行处理,以数据库的形式进行存储,利用输出设备和系统进行信息展示的过程。岩芯扫描技术不需要对岩芯进行取样,可连续、批量地提取、分析岩芯表面及内部蕴含的各类物化信息,且不对岩芯造成破坏,与传

统的实验室测试分析相比,岩芯扫描具有以下特点。

- 1)岩芯扫描借助各种声、光、电、射线等信号,不必取样、不破坏岩芯,可以反复重复测试,是一种无损的测试分析手段。
- 2)岩芯扫描测试的数据往往是批量的、连续的,获取数据的种类丰富,数据量大。
- 3)测试的速度快,在扫描的过程中即可获得数据。
- 4)大多数岩芯扫描技术获得的数据是基于对岩芯表面测试点范围内的分析测试,测试的范围小,因此容易受局部特征影响,其测试精度一般不如实验室测试的精度高。

2 岩芯扫描信息采集技术方法的种类

目前应用成熟的岩芯扫描信息采集技术方法种类很多,大体可分为三类:一是获取实物表面图像信息;二是获取实物表面的各类化学参数信息,三是获取实物内部的物理参数信息,详细情况见表 1。

表 1 岩芯扫描技术方法汇总表

序号	扫描数据种类	扫描技术种类
1	表面图像扫描	白光扫描、荧光扫描。
2	化学参数扫描	光谱矿物组成扫描、XRF 元素浓度扫描等。
3	物理参数扫描	CT 三维结构构造扫描、P 波速度扫描、伽马密度扫描、磁化率扫描、电阻率扫描等。

3 岩芯扫描信息采集的原理及用途

3.1 表面图像采集

表面图像采集的技术方法包括白光扫描(或自然光扫描)和荧光扫描两种,扫描的目的是获取岩芯的表面的自然光图像或荧光图像。扫描的方式为滚动扫描和平动扫描两种,滚动扫描为对岩芯 360°旋转扫描,岩芯必须为圆柱状,扫描速度慢,主要针对关键层位;平动扫描是扫描镜头与岩芯轴向平行移动的扫描,对岩芯性状无要求,扫描速度快,适用于全孔扫描。

3.1.1 白光扫描

岩芯表面图像是岩芯能够展示的最直接、最基础的信息,最早应用于石油勘查,目前该项技术已经广泛应用于固体矿产勘查、科学研究等领域。岩芯外表面的光信号经传感器转换为电信号,送专用集成芯片进行采样和处理后传送给计算机,完成岩芯表面图像的采集,采用白平衡技术、分色校正技术、高分辨率图像拼接融合等方法,保证岩芯图像的高质量(刘凤民等,2010)。

很多岩芯在长期保管后,由于风化作用,其表面颜色及含油特征等都发生了很大变化,很难反映原始的岩矿实际,给观察利用带来很大困难,因此在岩

芯取心初期即对岩芯进行扫描,可保留其最原始的表面图像信息(刘凤民等,2010)。在固体矿产勘查领域,岩芯扫描图像可以用于对比观察,通过综合观察岩芯扫描图像、岩性描述及其他测试分析数据等,可以对岩芯有初步的认识,甚至可以对一些矿物、蚀变进行初步的鉴定;在油气勘查领域,利用表面图像中颜色的差异,可以对岩芯的粒度、孔隙度、裂隙度等进行半定量的计算。

3.1.2 荧光扫描

荧光扫描通过特殊的紫外光源照射岩芯,有机质在紫外光的激发下能发出荧光,通过荧光信号采集、处理,含油岩芯以其所含烃类物质的荧光特性显示出明显的可识别性(图 3),在图像中对其面积进行定量计算,得到含油指数等综合数据(陆春峰等,2011)。

应用图像处理及模式识别理论和数学地质方法,进行层理分析、荧光评级、裂缝分析、孔洞分析和砂砾岩砾石定量分析计算,并自动生成图文报表,为研究部门迅速准确地提供各种相应的研究数据,为油气田的储层精细评价、油藏精细描述及成像测井定量分析等相关技术的发展起到很大的推动作用(刘凤民等,2010)。因此可以通过荧光扫描确定油

气勘查岩芯或岩屑的含油性质、含油级别及含油饱满程度等。

3.2 化学参数信息采集

岩芯的化学参数主要是矿物构成和元素浓度。在矿物构成扫描方面,主要应用颜色光谱技术,该技术起源于遥感领域应用的“地物光谱”;在元素浓度扫描方面,X射线荧光光谱(简称 XRF)分析技术是一种新的分析技术,但经过多年的探索以后,现在已经应用成熟,广泛用于冶金、地质、有色、建材、商检、环保、卫生等各个领域。

3.2.1 高光谱矿物扫描分析

高光谱矿物扫描分析基于反射光谱分析技术,

利用光谱仪采集和测量岩芯 400~2500nm 波长范围内的反射波谱,依据其光谱诊断性特征来计算和识别不同的矿物,最终形成矿物学信息。目前市场应用成熟的技术为中低温蚀变矿物(一般为含水硅酸盐矿物)的识别。如在可见光近红外区域(400~1000nm)可识别矿物:铁氧化物矿物、含铁矿物、稀土矿物等;在短波红外区域(1000~2500nm)可识别矿物:烃类物质、含羟基类矿物、磷酸盐类矿物、硫酸盐类矿物、碳酸盐类矿物等,具体见表 2。此外据调研,高温蚀变矿物(无水硅酸盐矿物,如石英、长石、辉石、石榴子石、橄榄石等)的光谱扫描技术在实验室也已经成熟,但尚未做市场应用。

表 2 高光谱技术识别矿物种类一览表

序号	可识别矿物种类	矿 物
1	Al-OH	钠云母、白云母、伊利石、叶蜡石、蒙脱石、高岭石等。
2	Fe-OH	绿脱石、铁蒙脱石等。
3	Mg-OH	绿泥石、滑石、绿帘石、金云母、叶蛇纹石、透闪石、角闪石等。
4	Si-OH	乳白石英石、异极矿等。
5	碳酸盐类	方解石、白云石、铁白云石、菱镁矿、菱铁矿等。
6	硫酸盐类	明矾石、黄钾铁钒、石膏。

在固体矿产勘查领域,矿体往往与蚀变作用在空间上具有某种特定的关系,如斑岩型铜、钼矿的矿体往往与钾化带(特征矿物为钾长石、黑云母、石英)和石英-绢云母化带(特征矿物为石英、绢云母、黄铁矿)关系紧密,可作为寻找斑岩型铜矿标志;而钨、锡、钼、铋等高温矿物,也常与云英岩化(特征矿物为石英和白云母)等高温蚀变作用关系紧密。蚀变作用的发育范围大于矿体的范围或与矿体有固定的上下关系,因此通过对矿山岩芯进行高光谱扫描,掌握重要蚀变作用的发育特征,从而可以在空间上预测矿体的产出位置。

此外,高岭石、蒙脱石等含水硅酸盐矿物一般为采矿过程中的有害矿物,利用高光谱扫描技术对这类矿物的识别度很好,通过对地质勘探钻孔进行高光谱扫描,对高岭石、蒙脱石等矿物进行三维建模,能够很好地指导采矿工作,降低采矿成本。因此,发达国家许多岩芯库和大型矿山应用了此项技术,我国的紫金矿业公司已开展此项扫描工作。

3.2.2 XRF 岩芯扫描

X射线荧光光谱(XRF)分析技术根据分辨 X 射线的方式,分为波长色散 X 射线荧光光谱仪(WDXRF)和能量色散 X 射线荧光光谱仪(EDXRF)。X 射线是一种波长较短的电磁辐射,通常是指能量范围在 0.1~100KeV 的光子。当用高

能电子照射试样时,入射电子被试样中的电子减速,会产生波长连续 X 射线谱。如果入射光束为 X 射线,试样中的元素内层电子受其激发,可产生特征 X 射线,称为二次 X 射线,或称为 X 射线荧光。通过分析试样中不同元素产生的荧光 X 射线波长(或能量)和强度,可以获得试样中的元素组成与含量信息,达到定性和定量分析的目的(尹明等,2010)。

利用 XRF 分析技术可以同时测量样品中从铝 Al(或 Mg)到铀 U 的绝大部分元素的浓度分布图,从微量到高浓度均能反映出来。提供岩芯样本的化学数据,一般用于陆地、海洋、湖泊、河口、冰河的沉积岩芯分析,研究沉积环境和古气候。如通过对 Fe、Ca、K、Si、Al、Ti、Zr、Sr 等元素含量的变化,转化为沉积物中 Fe₂O₃、CaO、K₂O、SiO₂、Al₂O₃、TiO₂ 等化合物含量的变化,综合其磁化率、孢粉、硅藻、矿物、色素等多种指标,对环境指标和古环境演化进行重建(成艾颖等,2010)。

此外,也可作为固体矿产岩芯有用元素浓度的变化趋势、划分地层的重要数据。例如在加拿大马塔加米 Zn-Cu 矿床,运用便携式 X 荧光检测方法获取元素浓度数据,利用 Ti/Zr 对 Al/Zr 图可以迅速的区分矿区内两个视觉上相似但变质程度不同的流纹岩岩芯(图 1),而其中一种流纹岩为钻探的标志层(Ross et al.,2014)。在钻探领域,识别标志层至

关重要,可以帮助钻探者准确地确定目的层,做出一些类似于“是否到达了目标地层层位,还是应该向更深处钻探”等重要决定。

但是,目前 XRF 定量分析仍以硅酸盐类岩石矿物为主,在其他类型的矿石矿物中的应用有限,主要问题在于对标样和待测试样的基体匹配要求比较苛刻,而固态制样技术实现难度较大,目前铁矿、铝土矿等的 XRF 测定已有国家标准方法,其他类型的矿物 XRF 分析方法的应用不是很广泛。有些硫化矿的分析方法正开发研制中(尹明等,2010)。

3.3 物理参数信息采集

如前所述,物理参数包括 CT 内部结构构造扫描,该技术源自于医学领域,目前在油气资源勘查领域应用广泛;磁化率扫描,该技术在固体矿产勘查领域应用较为广泛;同时还有一些原本应用于油田测

井、录井的技术,目前也已经被应用于岩芯扫描领域,如 P 波速度扫描、伽马密度扫描、电阻率扫描等。

3.3.1 CT 三维扫描

CT 扫描利用 X 射线的穿透性,对不同密度的物质有不同的穿透能力,密度越高,穿透能力越低,当 X 光束围绕物体旋转扫描时,从数百个角度进行扫描,计算机负责收集所有信息,并将这些信息合成为三维图像。利用 CT 扫描技术,可以定量计算岩芯内部裂缝宽度、长度、面积、面孔隙度及裂缝孔隙度等参数,计算岩芯中孔洞的大小,观察孔洞的联通状态(图 2)。该技术主要应用于油气资源勘查领域,对油气资源可采储量计算、驱油机理研究等方面有重要参考价值,可以更直观更精确地认识剩余油在油藏中的微观分布。

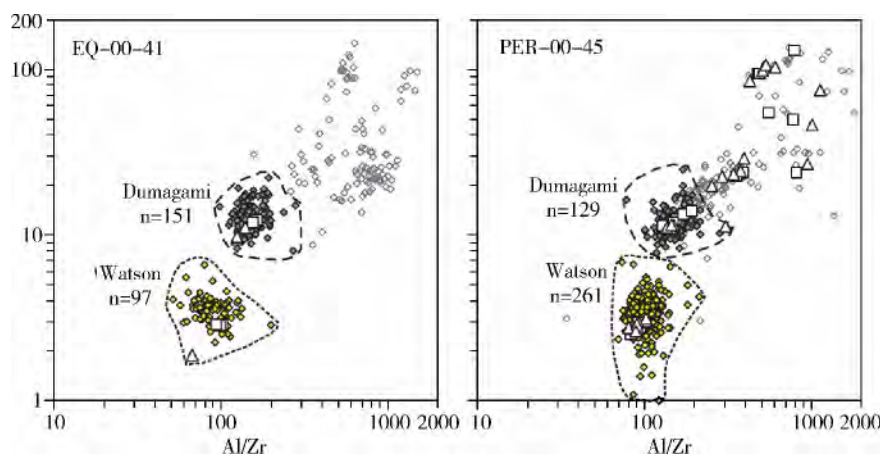


图 1 利用元素浓度相图区分地层并识别标志层(据 Ross et al., 2014)

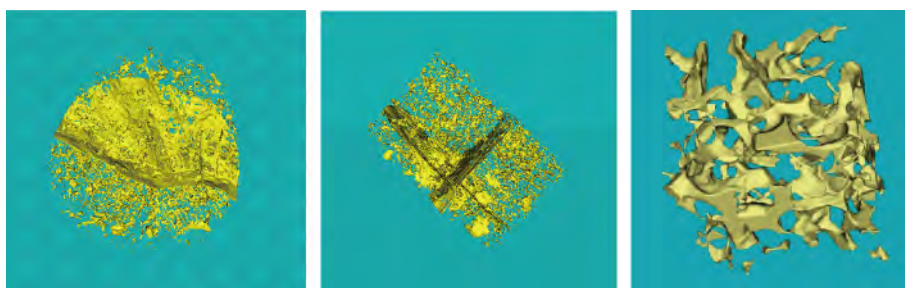


图 2 CT 扫描三维岩芯及内部裂缝、孔洞重建效果图(据滕奇志等,2011)

3.3.2 磁化率

岩石、矿石均具有一定程度的磁化率,其磁化率的大小主要取决于岩石的矿物成分、岩石结构、矿物颗粒大小和形状等因素。通过岩芯对磁化率的测定及其变化规律的研究,建立磁化率与成矿元素含量、环境变化等的关系,从而作为找矿和环境研究的辅助性数据。

磁化率测定应用广泛资源勘查和环境研究。在资源勘查领域,研究磁化率与成矿元素含量的关系,可以对找矿勘查进行指导。如王磊等(2012)在智利月亮山铁氧化物铜金型矿床勘查中,利用磁化率对铁磁性矿物及蚀变岩的现场识别能力和 XRF 快速分析元素含量功能,结合矿床地质划分岩相,确定磁化率和铁、铜含量对应关系:高磁化率-高铁含量-磁

铁矿型、低磁化率-高铁含量-赤铁矿型、低磁化率-低铁含量-蚀变岩型,对月亮山矿区进行深部找矿预测。

此外,在环境磁学领域,岩芯磁化率的扫描测定,获得沉积物的磁学性质,可以研究过去和现在的环境状况,如孟庆勇等(2009)通过对浙-闽沿岸泥质带的长岩芯 EC2005 进行的磁化率岩芯扫描及对比研究,发现磁化率随粒度及沉积环境的变化而变化,从而建立磁化率与环境之间的变化机制。

3.3.3 其他物化参数扫描

P 波速度:P 波是传播速度最快的地震波,在地球物理和地震研究领域使用稍多,利用 P 波在不同界面的反射性质,可用于研究地球内部结构构造。

伽马密度:用于测量岩层的密度,密度测井是划分煤层、划分致密岩层中的裂隙带,以及研究渗透性岩层孔隙度的有效方法。

电阻率:主要用于油气钻探录井,因为含油层具有明显的高电阻特征。

4 岩芯扫描技术方法应用分析

目前应用成熟的岩芯扫描信息提取技术方法繁多,如前所述,能够测试的参数大约 10 余种。每种技术方法由于受其工作原理和技术发展程度等因素限制,其对岩芯的要求、扫描速度等各不相同(表 3)。但总体上讲,岩芯扫描技术作为一种便捷、高效、成本低、无须破坏测试对象的技术方法,既适用于实物地质资料馆藏机构,也适用于地勘单位和工矿企业。对于馆藏机构而言,开展岩芯扫描信息采集工作,将提取的数据以钻孔为单位进行集成,可以将实体岩芯的数字化,建设“数字岩芯库”,既能够提高服务效率和服务水平,也可以大大延长珍贵岩芯的服务寿命。

表 3 几种主要的岩芯扫描信息采集技术方法种类及对岩芯的要求

序号	扫描方法种类	对岩芯要求	扫描速度
1	白光扫描	平扫对岩芯性状无要求,滚动扫描必须为完整岩芯。	扫描速度快,约 50m/h。
2	荧光扫描	对岩芯性状无要求。	
3	高光谱扫描	对岩芯性状要求不高,但完整的岩芯数据精度较好。	扫描速度取决于采样点间隔、单测试点测试时间等因素,采样点间隔越小、单点测试时间越长,测试精度越好,但测试速度越低;约在 1~30m/h 之间。
4	XRF 扫描	高精度的须剖开且平整的岩芯,破碎岩芯可扫,但精度较低;手持式的对岩芯性状无要求。	扫描速度取决于采样点的间隔、单测试点测试时间等因素,采样点间隔越小、单点测试时间越长,测试精度越好,但测试速度越低;一般 15~20s 测试一个采样点,如果采样间隔为 1cm,扫描速度约为 2~3m/h。
5	P 波速度	完整或剖开岩芯,破碎岩芯可测但数据精度较低。	
6	伽马密度	完整或剖开岩芯,破碎岩芯可测但数据精度较低。	
7	磁化率	环状扫描为完整岩芯,点状扫描为剖开岩芯,破碎岩芯可测但数据精度较低。	
8	电阻率	完整或剖开岩芯,破碎岩芯可测但数据精度较低。	
9	自然伽马射线传感器	完整或剖开岩芯,破碎岩芯可测但数据精度较低。	

对于地勘单位和工矿企业而言,一方面大量重复的岩芯经过扫描后即可进行处置(缩减、埋藏或清除),既降低保管成本,又减少资料损失;另一方面,岩芯在钻探取心的第一时间进行扫描,可将岩芯最原始的物化性质记录下来,尽可能降低后期环境对岩芯造成的影响,提高数据质量;此外,通过对岩芯扫描数据的获取与分析,还可以直接指导找矿、采矿等工作。

每种岩芯扫描的方法,均与岩芯的状态(完好、破碎)、种类(固体矿产、科钻、环境调查、地应力等)以及岩芯扫描技术本身的特点有关。不同的岩芯适用于不同的扫描技术方法,选择正确的扫描方法既

能确保后期数据的质量,同时也可提高数据的利用价值,提高工作成效,具体每类岩芯适用的扫描技术方法归纳如下。

1)固体矿产勘查岩芯:此类岩芯数量大,越是矿体部分,岩芯越较为破碎,矿物组成、元素浓度等化学参数相对于其他参数更为重要,因此建议对于该类岩芯开展的扫描方法包括:全岩芯的图像扫描、高光谱矿物扫描和磁化率扫描,由于 XRF 元素浓度扫描速度慢,且对岩芯要求较高,因此建议钻孔中关键层位或需要做补充研究的深度范围采用 XRF 元素浓度分析扫描。

2)科学钻探岩芯:此类岩芯获取成本高、数量

少、研究价值大,十分珍贵,因此建议尽可能多地扫描各种物化参数。建议开展该类岩芯的全岩芯图像扫描、高光谱矿物扫描、XRF 元素浓度扫描、磁化率扫描、CT 结构构造扫描和伽马密度扫描。

3)环境调查与评价岩芯:经筛选后进行保管的此类岩芯数量少且一般很完整,针对其研究目的,建议开展全岩芯的图像扫描、XRF 元素浓度扫描和磁化率扫描。

4)油气调查岩芯:此类岩芯取心数量少,且一般较为完整,岩芯的粒度、孔隙度、裂隙度等参数是含油储量及驱油机理的重要评价因素,因此相对于化学参数,油气岩芯的结构构造等物理参数更为重要。建议对于该类岩芯要开展全孔岩芯的白光图像扫描、荧光图像扫描、CT 扫描和电阻率和伽马密度扫描。

参考文献

[1] 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,2010,18(2):8-13.

[2] 刘凤民,吴晓红,邓会娟,等. 岩芯扫描及应用[M]. 北京:地质出版社,2010:1-6.

[3] 陆春峰,吴早平. 岩屑荧光扫描油气检测技术在镇泾油田的应用[J]. 科技情报开发与经济,2011,21(15):192-194.

[4] 孟庆勇,李安春,徐方建,等. 东海内陆架 EC2005 孔沉积物磁化率与粒度组分的相关性研究[J]. 科技导报,2009,27(10):32-36.

[5] Ross P S, Bourke A, Fresia B. Improving lithological discrimination in exploration drill-cores using portable X-ray fluorescence measurements: (2) applications to the Zn-Cu Matagami mining camp, Canada [J]. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, 2014, 14 (2): 187-196.

[6] 滕奇志,唐棠,李征骥,等. 基于粒子群优化的岩石薄片三维图像重建[J]. 电子与信息学报,2011,33(8):1871-1876.

[7] 王磊,李天成,杨新雨. 钻孔岩芯磁化率及 PXRF 测量在智利月亮山铁铜矿区应用与找矿预测[J]. 地质与勘探,2012,48(2):396-405.

[8] 尹明,李家熙. 岩石矿物分析[M]. 北京:地质出版社,2010:1-6.

(上接第 440 页)

是对岩芯最客观的认识研究方法。岩芯岩矿分析数据也是根据深度信息为单位进行记录和存储的,但是由于钻孔所在地的地质环境不同,造成各钻孔测试的主元素和伴生元素的种类、数量也不相同,在建立数据库时存在一定的难度。下一步将研究如何利用 Ruler 控件,使其与岩芯图像和描述信息同步显示。

4 结 语

Web Service 技术是作为互联网发布一种标准机制,利用它开发的系统具有可重构、可移植性好,开发周期短,系统升级维护方便等优点,并能充分利用网络资源,真正做到了资源共享,并且在平台兼容性、稳定性和安全性方面,性能优越。

利用 Web Service 技术,很好的解决了岩芯图像加载速度、页面显示长度和深度不统一等问题,在重要岩芯图像服务系统开发过程中发挥了重要作用。虽然有一些问题需要解决,但在现有的条件下,已经最大程度的发挥了岩芯图像的服务特点。

到目前为止,利用该系统共发布 400 个钻孔十多万米岩芯图像信息,充分体现了国家实物地质资料馆的行业地位,为国家实物地质资料馆在线实物地质资料信息服务提供了便利,在经济发展、政府决策、地质找矿和地质科普等领域发挥了至关重要的影响。

参考文献

[1] 姚华军,贺冰清. 推进地质资料信息服务集群化和产业化的研究[J]. 中国国土资源经济,2009(9):4-7.

[2] 刘跃,吴晓红. 基于多分辨率图像融合算法的岩芯图像拼接[J]. 太赫兹科学与电子信息学报,2014(2):290-294,298.

[3] 刘宁. 岩芯扫描图像分析及其应用研究[J]. 石油实验地质,2004(5):500-504.

[4] 连健. 全国地质资料目录服务中心总体设计研究[J]. 中国地质,2013(5):1675-1682.

[5] 黄燕菊,张林杰. 钻探岩芯高光谱数据管理与分析系统的构建[J]. 世界核地质科学,2010(3):159-163.