

应用于地质勘探和矿产开发的 地震层析成像

杨 文 采

1. 什么是层析成像

利用光敏材料,把从物体表面反射的光波记录下来,这就是照象及录象,这种成像方式属于表面成像。另一种是在不切开物体或人体的情况下对其内部结构成像,这种成像的方式又可分为全息成像和层析成像。全息成像技术主要用于对物体内部目标的轮廓成像,而层析成像是对物体进行逐层剖析成像,相当于把物体切成片,然后照像。层析成像是成像技术发展到目前的最高阶段,所谓CT技术乃是计算机辅助层析成像的简称。

不“打开”物体,而了解它的内部结构,常用的办法是用波穿透物体,让波带出关于物体内部的信息。波动现象分为电磁波和机械波两大系列,例如X射线CT属于电磁波层析成像系列,超声CT属于机械波层析成像系列。

电磁法勘探和地震勘探分别使用电磁波或地震波,能否把它们称为层析成像呢?目前还不能。因为这些方法还没有达到对地球内部结构进行“逐层剖析”所要求的分辨率。但是,利用层析成像的原理和方法可以改进它们的数据采集方式,并提高这些方法的分辨率,使之用于地球内部精细结构的探测。

从物体内部图象重建的角度看,一张物体切片的图象是两个空间变量 (x, y) 的函数,称为图象函数,记为 $f(x, y)$,用不同方向的人射波“照射”物体,观测到的波场信息至少是射波方向 θ 和观测点位置 ρ 两个变量的函数,称为投影函数,可记为 $u(\rho, \theta)$ 。1917年数学家拉当证明:已知所有入射角 θ 的投影函数 $u(\rho, \theta)$ 可以恢复唯一的图象函

数 $f(x, y)$ ——拉当变换,这个定理后来成为层析成像的理论基础。总之,层析成像不仅利用波作为探测手段,而且要同时利用各种不同方向投射的波场信息,否则就不叫层析成像。

2. 为什么主要研究地震层析成像

地震层析成像的主要目标,是确定地球内部的精细结构和局部不均匀性,这不仅可以促进地球科学的发展,而且还可以解决许多地质勘探中和矿产资源开发中的难题。既然电磁波和地震波都可以用于地球层析成像,为什么主要兴趣集中在地震层析成像上?

第一个原因是岩石地震波的速度与岩石性质有比较稳定的相关性,适合用来对地球内部成像,而岩石的电学性质(如电阻率和介电系数)变化范围很大,与岩石孔隙中的流体关系密切,因而不利于直接用于岩性和构造的成像,反之,对找水或确定孔隙流体饱和度等专门问题,电磁层析成像反而比地震层析成像有效。

第二个原因是对于主要探测频段的电磁波,其衰减比地震波大得多,对于矿产勘探和采矿工程来说,探测目标的尺度为几米到几百米,对应地震波的波长约为几十米,即频率为数拾赫芝,这种频带的地震波在不松散的岩石中传播几公里后衰减一般不超过120分贝,接收起来没有困难。反之,相应波长的电磁波频段为 10^6 到 10^8 赫芝,在岩石中传播几十米以后就可能衰减100分贝,难以穿透几百米的岩层。

第三个原因是电磁波的速度太快^①,反映波速的到时参数在小尺度内难以测量。地

震波速度为每秒几公里,不仅振幅和到时都易于测量,而且不同的震相可以在记录上区分开,提供了极其丰富的信息。

3. 地震层析成象在90年代能否取得突破性应用效果

虽然医学CT的成就令人信服,但地球探测的环境不像人体探测那样简单可控,地球构造也远不如人体那么有规律。因此,不少人认为地震层析成象做起来太难,目前还谈不上实际应用。是不是真的如此?

其实,早在十年前就有人在北欧的煤矿上进行了地震层析成象试验,并取得了良好效果。在80年代后期,美国国家技术研究所、加拿大多伦多大学在几个油田上做了跨孔地震层析成象试验,我国长江流域规划办公室和西安煤研所也分别在三峡及大同煤矿进行了地震层析成象试验。此外,地矿部物化探所也在三个金属矿上进行了少量试验,都取得了肯定的效果。

地震层析成象可分为跨孔采集、坑道采集、单孔采集及地面采集四种数据采集方式,其中后三种可采用常规的地震仪及震源进行。跨孔采集用的井中震源已由中国科学院电工所研制出来,接收仪器也已由地矿部物化探所研制出样机,可下井1000余米,并距300米左右。除了深层油气储层探测外,地震层析成象数据采集技术不存在很大困难。

在数据处理和地震层析成象方法研究上,“七·五”期间国家自然科学基金和地震科学联合基金对地震层析成象进行了重点资助,使我国建立了一支很强的理论研究队伍,取得了出色的研究成果,并产生了国际影响。我国不仅拥有可用于成象的大中型计算机系统,而且一些早期用于图象重建的算法(如代数重建)已被普遍使用。因此,目前在地质勘探和采矿工程中推广地震层析成象技术并不存在不可克服的困难,关键在于找准问题,积累经验和筹集开展现场试验的资金。

4. 地震层析成象和地球科学

当今,板块构造学说虽然被普遍接受,但地球科学中许多基本问题仍然争论不休。例如,板块运动驱动机制问题,如果热点假说成立,则在热点附近,地幔将具有柱状的不均匀结构,反之如果热对流模式是正确的,则地幔剖面应体现相应的对称环状结构,它们都与热流分布有关。由于地震波速对温度变化比较灵敏,对地幔波速扰动进行层析成象,为了解地幔结构、研究板块驱动机制等问题都很有意义。

总的来说,目前地球科学的发展要求了解地球内部的精细结构,而地震层析成象是目前了解地球内部精细结构的唯一有希望的手段。目前,全球性的地震台网已经建立,而且已经积累了比较完整的天然地震资料。初步的层析成象研究发现地球内部具有高度的不均匀性。但目前计算机的容量和算法不够先进,不能充分利用尽可能多的地震数据来提高成象的分辨率。例如地幔对流说存在单层对流还是双层对流的分歧,即在深度650公里附近的密度界面到底是相变界面还是化学成分界面的问题。如果上下地幔的分界面是相变界面,它将促进地幔对流;反之如果是物质成分的分界面,它将阻挡和分隔地幔对流。有人曾试图用地震层析技术圈定消减带内洋壳下插的深度。如果下插洋壳明显地穿过650公里的界面则间接证明了相变假说及不存在双层对流模式。遗憾的是,由于所用的数据还不够多,成象结果面不够清晰,这一结果尚未被广泛接受。

5. 地震层析成象和能源勘探开发

地震勘探是找石油天然气的最主要方法。其实,常规地震勘探并不是直接找油气,而是找有利于油气聚集的构造圈闭。由于油气勘探的深入,容易找的构造圈闭大多

① 真空中电磁波的速度 $C=30$ 万公里/秒,介质中波速 $V=C/n$, n 为介质的折射率,对一般岩石 n 在1~5之间。

已被找到,找油气的方向又逐渐转向其它的圈闭类型,如地层岩性圈闭。找岩性圈闭实质就是对反映地下岩石性质的地震波速(或波阻抗)成象,属于地震层析成象的范畴。此外,对已开发油田来说提高产量的关键在于提高采收率,例如,如果能把采收率从目前的30%提高到40%,等于给我国增加了几个大型油田。提高油田采收率的技术关键在于搞清油气储层孔隙率、渗透率和饱和度随空间和时间的分布,从而使采用最合理的开采方案成为可能。近年来,跨孔地震层析成象与四维地震等技术构成了一门新兴的学科——开发地震学,它已成为油气储集层描述和动态监测的最主要手段。

地震层析成象不仅最早应用于煤田勘探,而且在采煤工程中有更重要的作用。目前我国已广泛开展综合机械化采煤(简称综采),综采前要求在盘区内(大小一般为600米×1000米)确定稳定的煤层,其断面大于3米×3米,开采方向上不能有障碍物。如果综采过程中发现障碍而不得不退回,一次就损失20万元。据统计,仅太原西山矿务局四个矿的煤层中陷落柱给综采造成的经济损失每年就达一千万元。由于其它方法的穿透深度都难以达到1000米,目前把盘区内探测前方陷落柱的任务寄托在地震层析成象上。此外地震层析成象在探测小断层等其它综采障碍方面也已取得良好效果。

6. 地震层析成象在工程地质和灾害地质中的应用

举世瞩目的长江三峡高坝电站工程,在技术上也带来严峻的挑战,例如开挖近200米深的船闸航道,将有几万人在狭窄的航道底部施工,万一两侧高边坡发生塌方,则后果不堪设想。因此,必须在施工同时查清高边坡两侧地质构造和工程危体,然而,像岩石裂缝等许多工程危体的尺度很小,常规的勘探难以奏效。长江流域规划办公室预见到地震层析成象在工程危体探测中的重要作

用,“七五”期间已在现场开展了地震层析试验,肯定了地震层析成象的效果。在水利工程方面,我国有许多水库和河堤要堵漏防灾,探测其中裂缝的任务十分艰巨,而地震层析成象以其分辨率高受到广泛重视。

此外,随着核电工业的发展,核废料日益增多,何处安放核废料早已成为许多西方国家极为关注的问题,并提出星外空间、深海和陆地深井三个方案。星外空间成本太高,放入深海危害生物和污染占地球表面70%的海洋,在陆地上也很难找到不危害人类生存的地方,因为放射性物质极易污染水源和地表。早在70年代末期,地震层析技术就被用来确定适用存放核废料的致密花岗岩的内部构造,选择核垃圾库的最佳场所。

7. 地震层析成象与金属矿勘探开发

地震勘探在金属矿的应用目前主要限于沉积矿产,这是因为反射地震在地球成层状时才能取得好的效果。金属矿区复杂的地质构造和地形给地震采集和数据处理增加了许多困难,加上地震勘探比其他物探方法成本高,因此应用不普遍。

然而,随着勘探程度的深入,勘探深部盲矿的问题变得越来越迫切,象我国东部的许多重要铜矿区和贵金属矿区,浅部矿体已经采完,而搞清深部地质构造和勘探深部盲矿又缺乏奏效的方法,因此地震方法在金属矿上的应用研究又被提到日程上来。然而,由于常规地震勘探是针对层状沉积盆地上找构造圈闭发展起来的,而金属矿构造复杂,矿体常是鸡窝状等复杂形态,无论在理论上还是方法技术上都无法把已有地震勘探理论直接套用于金属矿区,而只能求助于地震层析成象。从原理上看,地震层析成象不依赖于层状地球模型,可用于探测各种类型的不均匀体,比较适用于金属矿勘探。近年来的试验表明,可能是由于构造变动和蚀变等原因,金属矿体的纵波速度一般比围岩低10%到30%,存在开展地震层析成象的前提条

太古宙四分的新动议

孙大中^①

国际地科联前寒武纪地层分会所提出的元古宙分为古、中、新三个代和十个纪的方案已先后被国际地层委员会和国际地科联执行局所通过。该分会又于今年4月15~18日在英国麦丁堡举行了第九次会议,讨论了太古宙的时代再划分问题。全球各大陆的8个国家13名成员出席了会议。经交流讨论,比较一致的同意了一个太古宙四分及其时代命名的新方案作为分会的初步建议,并将于1994年讨论正式建议。

各国成员按分会的统一要求提出各地区和区段的太古宙综合时间——地层柱共计60个(仅加拿大就提出了33个,也包括中国提出的5个)。所提出的太古宙划分方案有三分和四分两种,除太古宙和元古宙之间界线年龄为2500Ma已被正式通过外,其余比较集中的界线年龄有三个区间,即:2800~2900Ma,3000~3200Ma和3450~3600Ma,以低级变质区(即绿岩带等)的不同时代的地层层序划分和高级

区与低级区之间的间断为主,参考高级区本身的间断以及岩浆活动和变质作用特征,并以确切年龄为依据来对太古宙进行划分。初步建议如下:

一、太古宙划分为四个代,其年龄界线由新到老分别为2500,2800,3200和3600Ma。

二、太古宙四个代的命名由老到新分别是:始太古代(EOARCHAEAN), >3600Ma,下界年龄未定;古太古代(PALAEOARCHAEAN), 3600~3200Ma;中太古代(MESOARCHAEAN), 3200~2800Ma;新太古代(NEOARCHAEAN), 2800~2500Ma。

三、目前对于太古宙只划分到代,是否再分成纪暂未考虑。

这一新方案尽管是初步的,相信会对地球早期历史研究有促进作用,通过进一步研究还会对这一方案进行修改和完善。

① 国际地科联前寒武纪地层分会中国投票成员。

件。充分利用老矿区坑道和钻孔多的特点,开展方式灵活的数据采集并研究相应层析成像反演算法,可望在“八五”期间取得地震层析成像在深部金属矿勘探中的效果。同时,地震层析成像的资料还可以用于矿山工程地质和水文地质研究,为设计合理的开采方案提供基础资料。

参 考 文 献

〔1〕 赫尔曼:由投影重建图象,CT的理论基础。科学出版社1985年

〔2〕 杨文采:应用地震体波的CT技术和地球探查。《中国地震》2卷3期1986年1~13页

〔3〕 杨文采:地球物理反演和地震层析成像。地质出版社1989年第5~7章

〔4〕 Dziewonski, A. M. and Woodhouse, J. H. Global images of the Earth's interior 《Science》 Vol. 236, p. 37~48, 1987年。

〔5〕 Nolet G. (Ed), Seismic Tomography With applications in global Seismology and exploration geophysics D.Reidel publishing com./1987年

(地矿部北京计算中心)