

文章编号: 1001-8166(2008)02-0120-09

金属矿地震勘查方法评述

周 平, 施俊法

(中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037)

摘 要: 经过几十年的发展, 金属矿地震勘查方法形成了以 2D、3D、VSP 方法为主的地震反射系列, 提出了地震散射法, 并取得了一定的试验效果。金属矿地震找矿的应用范围得到了扩展, 不再局限于矿体本身, 控矿构造、蚀变晕、重要岩性层等大型深部构造单元成为了地震间接找矿的目标体。目前, 金属矿地震勘查方法, 尤其是 3D、VSP 方法, 面临着成本高、技术难度较大等问题, 应进一步加强基础理论和解释方法研究, 建立金属矿地震技术示范区, 为推广和应用金属矿地震方法开拓思路、积累经验。

关 键 词: 深部找矿; 反射地震法; 地震散射法

中图分类号: P613.4 **文献标识码:** A

数十年来, 非地震方法——如电磁法、感应极化法、位场技术等, 作为近地表矿产勘探的主要手段, 发挥了重要作用。然而, 随着矿产勘查和开发的深入, 近地表矿产资源日渐枯竭, 新发现近地表大型矿床的机会越来越少, 因此, 为继续有效地满足经济和社会发展的需求, 向深部要矿已经成为当前矿产勘查的主要趋势之一。这就需要开发并采用新的深部矿产勘查技术和能够提供矿区背景的技术。相对于传统非地震方法有限的探测深度 (一般 $< 500\text{ m}$), 以及较深部位分辨率不足的问题, 源于石油工业的地震方法, 不仅探测深度可达数千米, 而且在深部分辨率上优势明显, 可以有效探测 500 m 以下的“第二富集带”, 是目前开展深部找矿具有应用前景的方法之一。

应用地震方法寻找金属矿 (也适用于部分非金属矿床, 如金刚石), 不同于石油、煤、盐类等沉积矿产。此类矿区地表和深部地震地质条件往往比较复杂, 层控矿床较少, 多为变质岩或火山岩构造复杂区, 而且地层界面横向连续性差, 矿床规模相对较小, 常常不足以满足地震找矿方法的镜面反射条件和有效分辨率。因此, 金属矿地震方法的应用和推

广受到较大的制约。然而, 随着近几年地震方法技术的不断发展, 应用地震方法寻找金属矿产和一些非金属矿产取得了不少进展与突破。本文试图对此进行归纳总结, 就地震找矿中面临的主要问题探讨, 并对其发展提出一些思考。

1 金属矿地震勘查方法技术的主要进展

主要基于地震反射技术的地震方法用于油气工业已有近 80 年历史, 发展较成熟与完善, 已成为油气勘探最主要的工具和手段。相对于油气沉积环境, 硬岩环境地质条件较为复杂, 除了速度上的变化, 密度差异也是影响地震反射系数的主要因素^[1]。因此, 直到 20 世纪 70~80 年代, 地震方法才开始真正用于金属矿产勘查, 但当时缺乏各类岩石和矿物较为系统的速度—密度等基础信息, 制约了地震方法在找矿中的应用, 一直成效不大。至 20 世纪 90 年代前后, 地球物理学家们开始重视并系统开展了一系列岩石和矿物的物理性质研究, 为地震找矿创造了必要的基础条件; 同时, 还试验性地开展了很多二维 (2D)、三维 (3D) 和垂直地震剖面 (VSP) 等地震找矿方法的应用研究, 并于 2003 年出版了一

* 收稿日期: 2007-09-30; 修回日期: 2007-12-14

* 基金项目: 国土资源部百名优秀青年科技人才计划“地质调查关键技术发展战略研究”资助。

作者简介: 周平 (1981-), 男, 四川乐山人, 研究实习员, 现主要从事地质调查战略研究。E-mail: new385@sohu.com

本名为 *Hardrock Seismic Exploration* 的专集,其中收录了近年来金属矿地震的诸多理论研究和应用进展^[2~6]。

1.1 基础理论

地震反射技术能否探测到潜在反射体并加以成

像,取决于 2 个基本因素:一是矿床或反射界面与周围介质之间的声阻抗差异;二是该反射体的几何特征^[7]。图 1 是近年来常见岩石物理性质系统研究的结果,它显示了常见岩石的声阻抗,是判定地震反射技术能否得以成功应用的先决条件之一。

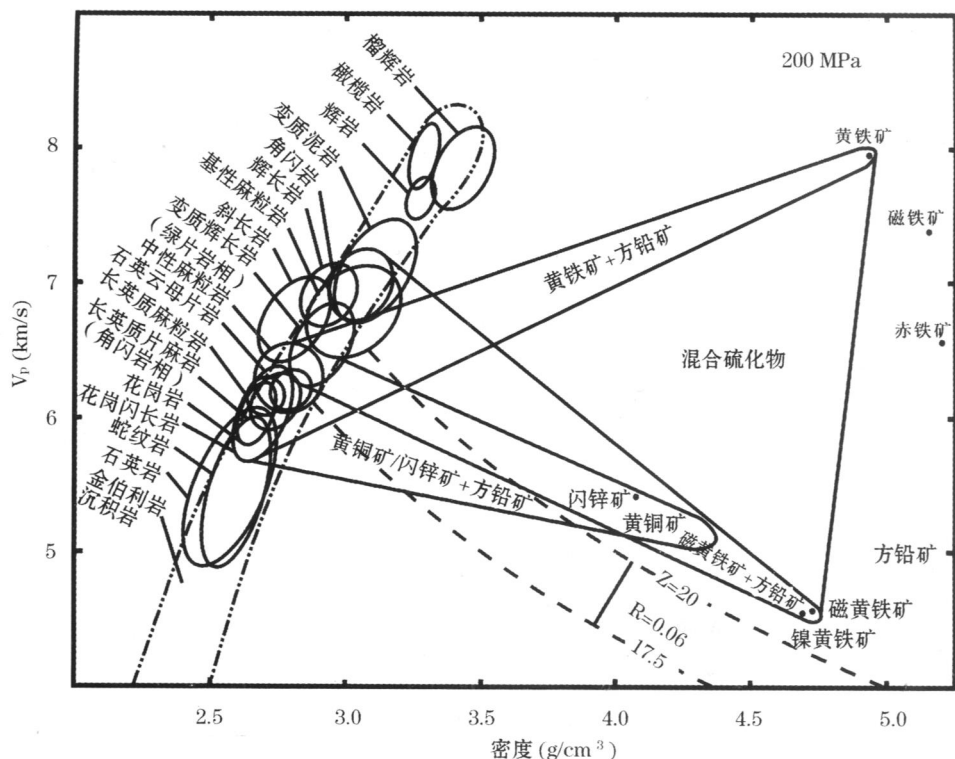


图 1 叠加在常见岩石速度—密度场上的声阻抗 (Z) 常数曲线和 Nafe-Drake 曲线 (双点线)^[7]

Fig 1 Lines of constant acoustic impedance (Z) superimposed on velocity-density fields and Nafe-Drake curve (two points line) for common rocks^[7]

图中显示了黄铁矿、镍黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、赤铁矿、磁铁矿和容矿岩—矿石混合物区的值;反射系数 $R = 0.06$,

足以产生强烈的反射;方铅矿 (处在图示范围以外) 的速度为 3.7 km/s , 密度为 7.5 g/cm^3

Also shown are values for pyrite, pentlandite, pyrrhotite, chalcopyrite, sphalerite, hematite, magnetite, and fields for host rock-ore mixtures. A reflection coefficient (R) of 0.06 is sufficient to give a strong reflection. Galena (off scale) has a velocity of 3.7 km/s and a density of 7.5 g/cm^3

如果已知岩石类型的声阻抗,可根据经验公式

(1) 计算得到反射系数 R :

$$R = \frac{u_2 \rho_2 - u_1 \rho_1}{u_1 \rho_1 + u_2 \rho_2} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (1)$$

式中, u 为速度; ρ 为密度; Z 为声阻抗。

如果两种岩石类型间的阻抗差为 $2.5 \times 10^5 \text{ g/(cm}^2 \cdot \text{s)}$, 则反射系数 $R = 0.06$ 。在几何特征适合的情况下, 这样大的反射系数足以产生强烈的反射。例如, 镁铁质 ($Z \sim 20$) 与长英质火成岩 ($Z \sim 17.5$) 之间的接触面或大多数硫化物矿石 ($Z > 22$) 与大多数围岩之间的接触面, 可以具有强烈的反射性, 而变

辉长岩与斜长岩等岩石之间的接触面却不能产生强烈的反射。

决定一个矿床能否被分辨的第二个因素是其几何特征, 特别是其大小和埋深。若 d , t 和 z 分别代表某一矿床的横向直径、纵向厚度和埋深, v 和 f 分别代表平均地层速度和测量中使用的地震波主频率, 则地震反射法可以分辨的最小厚度可用“ $1/4$ 波长准则”来估算:

$$t_{\min} = v/(4f) \quad (2)$$

而对于厚度较薄的矿床虽也可探测到, 但反射振幅会减小, 这是由于矿床上、下表面的反射干扰所

致。同样,对于任何给定深度的矿床,可以分辨出来的最小横向直径取决于第一菲涅尔区的宽度。

$$d_F = (2zv/f)^{1/2} \tag{3}$$

但直径相当于一个波长的矿床在理想的条件下应该可以被探测到。如一个厚 15 m、直径 60 m 的矿体可以在 1 km 深度作为一个点源被探测到 (假定地层速度为 6 km/s,主频 100 Hz),而直径 >350 m 的矿体可以作为一个反射体被分辨出来。对于更深的矿床,则需达到更大规模才能成像。

1.2 金属矿地震勘查方法

如表 1 所示,当前金属矿地震的主要勘查方法包括基于反射技术的 2D、3D、VSP 等地震反射法系列,以及地震散射法和地震层析成像法等。严格意义上说,由于地震散射法和地震反射法在方法原理

上几乎是相同的,都是地震波入射到地下介质遭遇反射界面后折返的波。所不同的是,在硬岩区普遍存在横向非均匀性和构造复杂性等特征,地震波往往产生散射,而不是发生条件相对较为严格的地震反射。所以,在某种程度上,对于地震找矿,地震反射只是地震散射的一个特例。

虽然国外开展了很多关于地震波散射的模拟和应用研究,但是,较少专门提出“地震散射波法”的概念,而是习惯性地将它们统称为“反射地震法”。例如,在对加拿大萨德伯里的大型块状硫化物矿床进行探测时,观测到的是强烈的散射特征,而非反射响应,但是作者还是将其划归为 3D 地震勘探范畴^[8]。

国内学者在系统开展金属矿地震研究后,认为

表 1 当前金属矿地震勘查方法的特点、应用条件与结果^[7,9~19]

Table 1 Characteristics, applications and results of seismic methods for mineral exploration^[7,9~19]

方 法	原理或技术	特 点	应 用	结 果
反 射 地 震 法	反射地震技术	线性布设并规则移动激发点和接收点排列,记录整条测线	踏勘、简单的深部构造	反射地震剖面
		面状布设激发点和接收点排列,检波器多达数千个,数据量要比 2D 多出几个数量级,但处理步骤和方法类似	可引起面外反射 (out-of-plane) 的复杂构造,适合于发现和圈定矿体	生成 3D 数据立方体,加以切割可产生 2D 水平切片 (时间切片)、反射界面切片和 3D 层析图像
		地震计放到钻孔底部,分阶段上提,在钻孔的不同位置接收来自地面或另一钻孔激发的地震波以及从附近反射界面反射回来的波	陡倾斜构造或者缺少反射的情况,适合于圈定矿体	可探测和圈定较陡的矿体
地震散射法	利用反射地震技术寻找与矿体有关的不均匀体	散射信号的强弱除了与界面反射系数相关外,还取决于矿体规模大小、形状、分布等非均匀程度的特征;在模拟时,“成分”和“形状”是两个主要考虑因素	探测与地下矿体有关的地下局部不均匀体,如块状硫化物	确定控矿构造的空间位置,研究与地下矿体有关的非均匀体及它的含矿性等
地震层析成像法	利用地震数据反演地下结构的物质属性,并逐层剖析绘制其图像	依靠相邻地层的速度,而不是波阻抗,常常只是利用首波走时,确定地球内部的精细结构和局部不均匀性	浅地表地层和地质构造的分布	地下地层的速度结构

可利用反射波法探测沉积层控矿床和控矿构造、用散射波法探测与矿体有关的地下局部不均匀体,并在蔡家营多金属矿区、布敦花铜矿区和邹平铜矿区等取得了良好的应用效果^[10,11,15,17]。同时,不少国内学者也已开始关注和研究地震散射波法的理论及

其在找矿中的应用问题,并总结了国内外地震散射波场研究与应用的相关资料,对地震散射波的理论、散射特征等进行了有效研究与归纳^[20,21]。

地面层析成像法通常不直接用于找矿,而是与反射地震法联用。它常常只是利用首波 (可以是作

* 第一菲涅尔区是指以信号传播直线为轴、半径为 r 的类似于一个管道的无遮挡区域;第一菲涅尔区的宽度由反射体深度 (z)、反射体之上的平均速度 (v) 和地震波主频 (f) 共同确定。

为首波出现的折射波、直达波、反射波或绕射波等)走时,而地震反射除此之外,还利用了地震波的振幅和相位信息。前者依据的是相邻地层的速度,后者依据的则是相邻地层的波阻抗。地面层析成像不仅可获得地表至 1 200 m 深度范围内的地层和地质构造的分布,为反射地震剖面的解释提供从地表至较深范围内的有效信息,也可作为反射地震数据的地形改正和偏移处理提供必要的速度资料^[18]。

近年来,随着层析理论和方法技术研究的不断深入,以及计算机技术的发展,地震层析成像技术呈

现出由二维层析向三维层析、由单参数向多参数层析反演、由各向同性介质向各向异性介质等发展的趋势^[13, 14]。另外,值得一提的是,地震层析成像法已被广泛地用于岩石圈和造山带的深部结构、构造以及地幔热柱等领域的研究^[22~25]。

1.3 对不同类型矿床的试验和验证

硬岩区地震找矿是一种新兴技术。表 2 列出了各主要矿床类型的探测条件、探测方法以及案例等信息。虽然对很多矿床类型而言,地震勘探基本处于初级阶段——只是开展了地质基础、矿物物性分

表 2 地震方法在矿产勘查试验或实际勘查中的应用^[8, 26~32]
Table 2 Application of seismic methods in mineral exploration experiment or practice^[8, 26~32]

矿床类型	探测条件	探测方法	案 例
岩金矿床	金为少量组分,不能直接确定。但低温浅成热液型金矿的含矿角砾岩及其周围的蚀变晕、石英—碳酸盐脉型金矿的褶皱轴等有利构造,及含铁建造层控型金矿中的含铁层和黄铁矿都可以成为地震勘探和圈定的优选靶区	反射地震法 ——间接探测	
岩浆型 Ni-Cu-PGE 矿床	超镁铁质岩、镁铁质岩和晚期分异产物都具有足够大的声阻抗差异,相互间可以产生反射,而且超镁铁质或镁铁质岩石与大多数围岩的接触带可以产生反射	反射地震法、地震散射法 ——直接或间接探测	萨德伯里盆地 2D 地震反射测量以及 Trillabelle 矿床的 3D 成像
VMS 矿床 (火山成因块状硫化物矿床)	块状硫化物 (特别是富含黄铁矿者) 声阻抗高,适合用高分辨率地震技术来勘查,在长英质环境中效果尤佳,因为这种环境中的块状硫化物将是仅有的反射体,一般呈现 P 波、S 波和复合反射	反射地震法、地震散射法 ——直接或间接探测	加拿大新不伦瑞克省东北的 Bathurst 矿区, 3D 地震发现 Halfmile Lake 矿床;魁北克省的 Matagami 矿区, VSP 和 2D 地震探测块状硫化物以及重要地层层位与构造
SEDEX 矿床 (喷气沉积型)	黄铁矿和磁黄铁矿通常为主要硫化物,声阻抗大大高于容矿岩石,因此会产生强反射。地震反射测量适合于对控矿的沉积岩和断裂构造进行填图,但矿床本身往往因为其规模较小而成为衍射体而不是反射体。SEDEX 矿床因为其产在低阻抗的沉积岩内,也应该成为地震勘查的良好对象		
MVT 矿床 (密西西比河谷型)	由于这些矿床的矿体规模小而且硫化物分散在角砾岩内,容矿碳酸盐岩的声阻抗与矿石相似 (除非碳酸盐岩多孔隙或矿石特别富含黄铁矿),采用地震方法很难探测和成像		
斑岩铜矿	矿石矿物声阻抗明显高于容矿岩石,但矿床本身因品位低而不大可能为地震方法探测到。因此,地震测量主要是为了确定局部和区域构造。不过,若黄铁矿矿晕中的黄铁矿含量足够高,则可探测黄铁矿晕并将其作为下伏铜矿床的声波标志物	反射地震法 ——间接探测	
不整合面型铀矿床	不整合面一般发育良好的红土风化层,矿床本身总是环绕着强烈蚀变晕。高分辨率反射法可圈定小型的板状可采矿体,而伴生的蚀变晕因其声阻抗低且范围大而有可能被探测到	反射地震法 ——直接或间接探测	
DCG 矿床 (铁氧化物—铜—金型)	DCG 矿床都产在声学特征透明的低声阻抗环境,但矿体本身的边界清楚且以声阻抗非常高的赤铁矿和磁铁矿为主,因而应当是地震勘查和圈定的良好目标	反射地震法 ——直接探测	
金伯利岩型 金刚石矿床	金刚石在容矿岩石中属痕量组分,不能直接确定。但金伯利岩的声阻抗往往比围岩低很多,因而可以探测其接触带、圈定金伯利岩岩筒侧壁,勘察圈定火山口底、以及确定识别岩筒的标志等	反射地震法 ——间接探测	加拿大安大略省 James Bay Lowlands 的 Victor 金伯利岩井下地震成像试验

* 应用地震方法勘查金伯利岩的研究较为典型,在此一并列出。

析、模拟分析等前期工作,真正的勘探试验或应用正在或将要进行。但是,这样的前期工作却是必要的,因为它在一定程度上为今后的地震找矿工作指明了方向和目标。

1.4 有效探测控矿因素,实现间接找矿

地震方法源于油气工业,它对于探测层控或沉积类矿产相对简单适用。但是,大多数金属矿产均产在具有复杂地质背景的硬岩地区;而且相对于油气田来说,此类矿床规模一般不大,横向连续性差,采用地震方法直接探测矿体难度较大。由于块状硫化物矿床无论在规模上,还是在满足地震反射的条件方面,均较为理想^[33]。在近年来的地震探测中,有直接找到块状硫化物矿床的案例。如加拿大新不伦瑞克省的 Halfmile 湖火山成因块状硫化物矿床便是通过 3D 地震直接探测发现的。在经过 2D 地震测线得到了最优化的野外采集参数后,进行了覆盖面积为 18 km² 的 3D 地震探测,直接找到了深达 1 000 m 和 1 600 m 的块状硫化物矿体^[34]。到目前为止,地震方法直接探测其它类型矿床的成功率要低一些。

为此,需要开拓地震找矿的新思路,利用地震方法探测深部控矿构造,实现间接找矿。根据“成矿系统”的成功经验,Dunmond 等^[35]提出了“成矿系统”(mineral system)的概念,认为流体的来源、运移、沉淀是成矿作用的 3 个最重要环节,构造则是控制流体的主要因素。据此,他们以西澳东戈尔德菲尔德(Eastern Goldfields)矿田为例,运用地震技术,确定了金控矿构造框架,进而模拟地壳深部流体运移的路径和过程。结果显示,东戈尔德菲尔德成矿省的上地壳部分发育有许多断层,但只有少数几条断层穿透了滑脱面,成为地壳深部流体向上运移的主要通道,并在流体运移过程中发生交代和耦合作用,从而具有地震反射性;矿化流体沿着这些贯穿上地壳滑脱面的主断层向上,流入上地壳的绿岩带中,在断层系统的顶壁断块内聚集成矿。因此,以矿体周围的控矿构造等较大尺度的地质体为目标,如控矿断层、重要岩性接触带等,可极大地增加发现深部新矿体的机会^[8, 35~37]。

地震勘查技术还可用于地质界面的成像。加拿大萨德伯里盆地的深部铜镍矿勘查是一个很好的实例。研究显示,萨德伯里盆地是由陨石撞击而成,在萨德伯里火成岩杂岩体(SIC)下盘接触带附近赋存有大量硫化物镍矿床,但其埋藏深度较大(一般 > 1 000 m,甚至 2 500 m),很难采用一般方法直接

探测矿体。但是,因为 SIC 是由苏长岩、辉长岩和花斑岩组成的岩性组合,且 SIC 上覆岩石为角砾岩和变质沉积岩,波阻抗相对要小许多,相对于 SIC 下盘赋存的硫化物而言,SIC 上覆岩石属地震反射“透明体”,所以,采用 3D 地震直接探测到了 SIC 及其下盘,对 SIC 下盘进行成像,从而可为实现间接找矿创造有利条件^[8]。另外,重要的岩性标志层也是地震探测的目标之一。如在南非的威特沃特斯兰德(Witwatersrand)盆地,含金矿的礁体通常不足 2 m 厚,不能用反射地震法直接探测,但是,却可通过确定重要标志层来推断含金矿礁体的位置^[38]。

1.5 主要进展

综上所述,金属矿地震的主要进展具体表现以下 3 个方面:

(1) 地震找矿的方法已有反射地震法、地震层析成像法、地震散射法等,并且地震散射法概念的提出及其在找矿效果上的应用,确实取得了不少令人欣慰的成果^[10, 11, 15, 18, 39, 40]。

(2) 反射地震法经过多年不断发展与完善,已形成以 2D、3D 和 VSP 为主的反射方法系列。虽然目前开展 3D 和 VSP 找矿成本相对较高,但它们在探矿应用上的效果是非常显著的,为地震深部找矿提供了更多可选的有效方法和技术^[7, 8, 17, 35~37]。

(3) 地震找矿应用范围不断扩大。对于深部矿体而言,由于其规模、横向非均质性以及几何形态复杂等因素,直接探测并圈定矿体的难度较大。因此,在进行深部探测时,不再局限于矿体本身,探测目标体已扩展到了控矿构造(如断层)、蚀变晕、矿体接触带、重要岩性标志层等大型深部构造单元,为有效利用地震方法寻找深部矿体提供了更为广阔的思路与空间^[8, 17, 35]。

2 金属矿地震中面临的主要问题

2.1 成本效益

金属矿地震方法已从 1D、2D 发展到 3D、VSP。虽然探测深度加大、分辨率提高,获得的关于地下矿体的信息越来越丰富,数据处理技术也在不断完善,但是,采用新技术和新数据处理方法的成本也在不断上升。因此,成本效益是一个不可忽视的问题。

总体说来,3D 和 VSP 技术相对 1D、2D 技术成本要高。如高分辨率 3D 测量的数据采集和处理费用约为 5 万加元/km²,2D 测量的费用约 6 000 加元/km²,用现有钻孔进行一次 500 m 深的典型 VSP 测量总计需要约 3 万加元^[7, 30, 34]。高成本决定了现

阶段 3D和VSP技术难以大量普及,尽管它们在很多方面拥有其他方法技术所无法比拟的优势。但是,它们确实为深部找矿提供了更多的技术选择。因此,在实际应用与选择的时候,要根据测量的目的和所寻找矿床的类型,选择合适的方法,除了考虑围岩和矿床本身的地质特征和声波性质,最重要的是,还要充分考虑到成本效益问题,以做到最佳选配。

2.2 技术本身的难题

虽然金属矿地震勘查方法与石油地震勘探方法相似,但由于大多数金属矿处在硬岩环境,而不是沉积岩环境,因此在应用地震方法找矿时主要面临以下几个技术问题:

(1) 信噪比(S/N)低:相对于沉积环境,硬岩环境中大多数岩石之间的阻抗差较小(R 分别为约0.1与0.3),信噪比(S/N)较低,反射面不连续,散射响应复杂,难于对围岩中的构造成像。对此,现在还没有很好的可以提供令人满意的高质量的数据采集仪器。

(2) 通常情况下,近地表风化严重,地震检波器与基岩能否耦合良好,是一个具有挑战性的问题。

(3) 由于波场的复杂性,需更强的解译工具。例如,3D数据合成、成像及模拟工具。

(4) 记录到的波场信号一般都很复杂,矿体(如块状硫化物)常常表现为次级散射源,其信号像噪声。因此,需要新的数据处理方法。

(5) 多解性。大多数情况下,地震深部探测获取的是间接信息,在反演时存在着多解性,不能据此有效断定是矿还是其他干扰因素。例如,富磁铁矿岩体和富硫化物岩体引起的散射特征相似。因此,除了需要慎重处理数据外,还应进一步系统开展岩石矿物物理性质研究。

3 对金属矿地震方法发展的思考

虽然近年来金属矿地震技术取得了一些重大进展,但是总体来说,尚处于应用初期或者试验阶段。由于地表露头矿资源的枯竭,需要开展深部找矿,而地震方法相对于传统的非地震方法具有超深的探测能力,因此,这种方法具有广阔的发展前景和应用空间。

我国金属矿地震方法在技术与应用方面,虽与国外存在着一定的差距,但因这种方法发展的特定条件,只要我们抓住机遇,定能赶超国外先进水平。纵观国内外地震找矿的发展趋势,提出以下思考。

3.1 加强金属矿地震的基础理论和解释方法研究

(1) 岩石矿物的横波速度研究。虽然大多数矿石和容矿岩石的纵波速度和密度均已知晓,但我们对横波速度的知识却颇为有限,因而很难或不可能在地震测量中充分利用整个声波场。除非通过实验室研究和实测研究改变这种状况,否则将很难改进对矿体的探测效果。

(2) 解释方法研究。金属矿地震法跟其他地球物理方法探测一样,存在着多解性。为此,需从多学科、多方面着手,综合对比多种信息,系统开展岩石/矿物、岩层组合、甚至构造组合等方面的研究,开发更为先进的软件系统,以达到有效识别目标体的目的。

3.2 扩大地震找矿方法的应用范围,总结其应用条件和前提

(1) 变质晕的声波特征研究。虽然块状硫化物矿床因具有高声阻抗而可以直接用地震方法探测,但许多的其他矿床类型因声阻抗特征不明显而无法探测。不过,有些矿床类型一般环绕着变质晕或与之相伴生。这种变质晕可以作为代用的地震勘探目标。例如,浅成低温热液金矿和不整合面型铀矿总是伴有强蚀变的低品位变质晕,斑岩铜矿通常环绕以明显的同心状蚀变晕。与此类似,VMS矿床下面补给岩墙周围的基底通常发生了强烈蚀变。这些蚀变晕一般由粘土和层状硅酸盐矿物组成,因而有可能具有低声阻抗。但由于对蚀变晕的声波特性尚未进行过系统研究,因此不知道其内部和外部边界是截然的还是渐变的,能否用地震方法探测到。

(2) 磁铁矿—赤铁矿系统研究。虽然磁铁矿和赤铁矿的速度和密度已知,但对其主岩和蚀变产物的速度—密度特性尚未做过系统研究,因而难以模拟典型DCG矿床的声波性状。同变质晕的情况一样,对此也需要进行系统的实验室研究和已知矿床的实测研究。

(3) 断层带特性与流体通道的声波特性研究。许多矿床类型都是沿断层带内的流体通道发育,因此有可能通过对断层带成像来缩小找矿范围或直接找矿。但是有个前提条件,断层带物质与围岩之间存在着声阻抗差,并且断层带本身的厚度要足够大。这对勘探工作将会有很大帮助,但主要障碍在于对断层带内的流体通道和断层带岩石的声波特征未做过系统研究,对其了解不够。为了改变这种状况,可在主要矿区开展一系列已知断层横剖面声波特性研究。

(4) 金伯利岩的特性和几何特征研究。在利用地震方法圈定金伯利岩体方面存在很大的不足。具体来说,虽然在理论上金伯利岩应该可以产生强烈反射,但金伯利岩的岩石学和几何特征变化极大。因此,需要系统研究金伯利岩的声波特征,确定从地表风化带到深部金伯利岩声波变化规律,以便模拟这些岩体的地震响应并确定对其成像的有效技术。

3.3 建立金属矿地震找矿示范区

采用最新的地震找矿技术和方法,虽然效果较为理想,但在应用时还得考虑效益成本等问题。要想普遍推广地震找矿方法,技术本身也存在着诸多不足之处,尚须进一步完善与发展。因此,为加快地震找矿方法的研究,有必要以典型的矿集区为例,着力开展地震找矿试验,从岩石、矿物物性研究、钻孔测井与岩芯物性测量、地层与构造正演模拟以及地震优化采集参数等多学科角度,建立金属矿地震找矿方法的示范基地。

3.4 充分利用油气勘探获取的地震资料,实现盆地中心及边缘地震找矿的重大突破

研究表明,能源矿产与金属、非金属矿产之间存在着某种相互关联。如与油气田、煤和黑色页岩有关的金属矿产资源包括:Fe、Mn、Pb、Zn、Mo、Ni、Cu、Ag、U、稀土、铂族元素等,非金属矿产资源包括石棉、菱镁矿、萤石、钾盐、硫、硼等^[41]。相对于油气工业来说,地震方法用于寻找固体矿产的历史比较短。而数十年来,油气勘探积累了大量的地震资料,这些资料能否为地震找矿服务,油气盆地中心深部及边缘是否存在有较大型的固体矿产资源等问题有待进一步研究。若能充分利用现有的油气勘探地震资料于地震找矿,必能为找矿工作带来新的契机。

致谢:中国地质科学院矿产资源研究所吕庆田研究员为本文的编写提供了大量资料,国土资源部信息中心吴其斌研究员对本文提出了宝贵修改意见和建议,特此表示感谢!

参考文献 (References):

[1] Milkereit B, Eaton D. Imaging and interpreting the shallow crystalline crust[J]. *Tectonophysics*, 1998, 286: 5-18.
[2] Salisbury M H, Milkereit B, Bleeker B. Seismic imaging of massive sulfide deposits, Part I: Rock properties[J]. *Economic Geology*, 1996, 91: 821-828.
[3] Milkereit B, Eaton D, Wu J, et al. Seismic imaging of massive sulfide deposits, Part II: Reflection seismic profiling[J]. *Economic Geology*, 1996, 91: 829-834.

[4] Eaton D, Guest S, Milkereit B, et al. Seismic imaging of massive sulfide deposits, Part III: Borehole seismic imaging of near-vertical structures[J]. *Economic Geology*, 1996, 91: 835-840.
[5] Salisbury M, Eaton D, Bleeker W, et al. Seismic prospecting for massive sulphides[EB/OL]. http://www.mar.dfo.mpa.gc.ca/science/review/e/pdf/seismic_prospe.pdf, 2000.
[6] Eaton D W, Milkereit B, Salisbury M. Seismic methods for deep mineral exploration: Mature technologies adapted to new targets[J]. *The Leading Edge*, 2003, 22(6): 580-585.
[7] Salisbury M, Snyder D. Mineral Deposits of Canada[EB/OL]. http://gsc.nrcan.gc.ca/mindep/method/seismic/index_e.php, 2006.
[8] Milkereit B, Berré E K, King A R, et al. Development of 3-D seismic exploration technology for deep nickel-copper deposits-A case history from the Sudbury basin, Canada[J]. *Geophysics*, 2000, 65(6): 1890-1899.
[9] Yang Wencai, Li Youming, Li Shixiong. Application of Seismic Tomography[M]. Beijing: The Geological Publishing House, 1993. [杨文采, 李幼铭, 李世雄. 应用地震层析成像[M]. 北京:地质出版社, 1993.]
[10] Xu Mingcai, Gao Jinghua, Chai Mingtao, et al. Research of seismic method for base metal exploration[J]. *Geological Exploration for Non-ferrous Metals*, 1997, 6(4): 232-237. [徐明才, 高景华, 柴铭涛, 等. 金属矿地震勘查的方法技术[J]. 有色金属矿产与勘查, 1997, 6(4): 232-237.]
[11] Xu Mingcai, Gao Jinghua, Chai Mingtao, et al. A study of seismic method for detecting concealed metallic deposits[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 1997, 21(6): 468-474. [徐明才, 高景华, 柴铭涛, 等. 寻找隐伏金属矿的地震方法技术研究[J]. 物探与化探, 1997, 21(6): 468-474.]
[12] Eaton D W. Weak elastic-wave scattering from massive sulfide orebodies[J]. *Geophysics*, 1999, 64(1): 289-299.
[13] Gao Xing. Advance and Review in seismic tomography research[J]. *Progress in Geophysics*, 2000, 15(4): 41-45. [高星. 地震层析成像研究的回顾与展望[J]. 地球物理学进展, 2000, 15(4): 41-45.]
[14] Cheng Gu, Ma Zaitian, Geng Jianhua, et al. A review on the growth of seismic tomography[J]. *Progress in Exploration Geophysics*, 2002, 25(3): 6-12. [成谷, 马在田, 耿建华, 等. 地震层析成像发展回顾[J]. 勘探地球物理学进展, 2002, 25(3): 6-12.]
[15] Xu Mingcai, Gao Jinghua, Rong Lixin, et al. An experimental study of seismic scattering event method in the Caijiaying polymetallic ore district[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2003, 27(1): 49-54. [徐明才, 高景华, 荣立新, 等. 散射波地震方法在蔡家营多金属矿区的试验研究[J]. 物探与化探, 2003, 27(1): 49-54.]
[16] Bohlen T, Muller C, Milkereit B. Elastic seismic wave scattering from massive sulfide orebodies: On the role of composition and shape[C]. Eaton D, Milkereit B, Salisbury M, eds. *Hardrock Seismic Exploration*. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, 2003: 70-89.
[17] Xu Mingcai, Gao Jinghua, Rong Lixin, et al. Application pros-

- pects of the seismic method as discussed from the experimental effects of the method for metal exploration[J]. *Geology in China*, 2004, 31(1): 108-112 [徐明才,高景华,荣立新,等.从金属矿地震方法的试验效果探讨其应用前景[J].*中国地质*, 2004, 31(1): 108-112]
- [18] Xu Mingcai, Gao Jinghua, Rong Lixin, *et al* Combining exploration technique of the ground seismic tomography and the high-resolution seismic method[J]. *Geology and Prospecting*, 2005, 41(4): 83-87. [徐明才,高景华,荣立新,等.地面地震层析成像和高分辨率地震联合勘探技术[J].*地质与勘探*, 2005, 41(4): 83-87.]
- [19] Lei Dong, Hu Xiangyun Review of seismic tomography methods[J]. *Journal of Seismological Research*, 2006, 29(4): 418-426. [雷栋,胡祥云.地震层析成像方法综述[J].*地震研究*, 2006, 29(4): 418-426.]
- [20] Li Canping, Liu Xuewei, Wang Xiangchun, *et al* Seismic wave scattering theory, scattering characteristics and its application[J]. *Progress in Exploration Geophysics*, 2005, 28(2): 81-89. [李灿苹,刘学伟,王祥春,等.地震波的散射理论和散射特征及其应用[J].*勘探地球物理进展*, 2005, 28(2): 81-89.]
- [21] Gou Linlin, Liu Xuewei, Lei Peng, *et al* Review of seismic survey in mining exploration: Theory and reflection seismic methods[J]. *Progress in Exploration Geophysics*, 2007, 30(1): 16-24, 46 [勾丽敏,刘学伟,雷鹏,等.金属矿地震勘探技术方法研究综述[J].*勘探地球物理进展*, 2007, 30(1): 16-24, 46.]
- [22] Zhao D P, Lei J S, Inoue T, *et al* Deep structure and origin of the Baikal rift zone[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 243: 681-691.
- [23] Shamali Z H, Roberts R G, Pedersen L B, *et al* Lithospheric structure of the Tomquist zone resolved by nonlinear P and S teleseismic tomography along the TOR array[J]. *Tectonophysics*, 2006, 416: 133-149.
- [24] Lei J S, Zhao D P. Teleseismic P-wave tomography and the upper mantle structure of the central Tien Shan orogenic belt[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2007, 162: 165-185.
- [25] Zhao D P. Seismic images under 60 hotspots: Search for mantle plumes[J]. *Gondwana Research*, 2007, 12: 335-355.
- [26] Milkereit B, Green A, the Sudbury Working Group. Deep geometry of the Sudbury Structure from seismic reflection profiling[J]. *Geology*, 1992, 20: 807-811.
- [27] Milkereit B, Berrer E K, Watts A, *et al* Development of 3-D seismic exploration technology for Ni-Cu deposits, Sudbury Basin [C] Gubins A G, eds Proceeding of Exploration 97: Fourth Decennial Conference on Mineral Exploration GEO/FX, 1997: 439-448.
- [28] Roy B, Clowes R M. Seismic and potential-field imaging of the Guichon Creek batholith, British Columbia, Canada, to delineate structures hosting porphyry copper deposits [J]. *Geophysics*, 2000, 65(5): 1 418-1 434.
- [29] Salisbury M, Harvey C, Matthews L. The acoustic properties of ores and host rocks in hardrock terranes[C] Eaton D, Milkereit B, Salisbury M, eds Hardrock Seismic Exploration Society of Exploration Geophysicists Tulsa, Oklahoma, 2003: 9-19.
- [30] Adam E, Perron G, Arnold G, *et al* 3D seismic imaging for VMS deposit exploration, Matagami, Quebec [C] Eaton D, Milkereit B, Salisbury M, eds Hardrock Seismic Exploration Society of Exploration Geophysicists Tulsa, Oklahoma, 2003: 229-246.
- [31] Calvert A J, Perron G, Li Y. A comparison of 2D seismic lines shot over the Ansil and Bell Allard mines in the Abitibi Greenstone belt [C] Eaton D, Milkereit B, Salisbury M, eds Hardrock Seismic Exploration Society of Exploration Geophysicists Tulsa, Oklahoma, 2003: 164-177.
- [32] Bellefleur G, Matthews L, Roberts B, *et al* Downhole seismic imaging of the Victor kimberlite, James Bay Lowlands, Ontario: A feasibility study[EB/OL]. <http://dsp-psd.pwgsc.gc.ca/Collection/M44-2005-C1E.pdf>, 2005.
- [33] Salisbury M H, Milkereit B, Ascoug G, *et al* Physical properties and seismic imaging of massive sulfides [J]. *Geophysics*, 2000, 65(6): 1 882-1 889.
- [34] Gingerich J C, Matthews L W, Peshko M J. The development of new exploration technologies at Noranda: Seeing more with hyperspectral and deeper with 3-D seismic [J]. *CM Bulletin*, 2002, 95: 56-61.
- [35] Drummond B J, Goleby B R, Owen A J, *et al* Seismic reflection imaging of mineral systems: Three case histories[J]. *Geophysics*, 2000, 65(6): 1 852-1 861.
- [36] Calvert A J, Li Y X. Seismic reflection imaging over a massive sulfide deposit at the Matagami mining camp, Quebec [J]. *Geophysics*, 1999, 64(1): 24-32.
- [37] Roberts B, Zaleski E, Perron G, *et al* Seismic exploration of the Manitouwadge Greenstone Belt, Ontario: A case history[C] Eaton D, Milkereit B, Salisbury M, eds Hardrock Seismic Exploration Society of Exploration Geophysicists Tulsa, Oklahoma, 2003: 110-126.
- [38] Stevenson F, Higgs R M A, Durrheim R J. Seismic imaging of precious and Base metal deposit in Southern Africa [C] Eaton D, Milkereit B, Salisbury M, eds Hardrock Seismic Exploration Society of Exploration Geophysicists Tulsa, Oklahoma, 2003: 141-156.
- [39] Eaton D, Milkereit B, Salisbury M, *et al* Hardrock seismic exploration [C] Society of Exploration Geophysicists Tulsa, Oklahoma, 2003.
- [40] Lü Qingtian, Shi Danian, Zhao Jinhua, *et al* Seismic method for deeper mineral exploration: Problems and prospects—A case study of Tongling ore district [J]. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24(3): 211-218 [吕庆田,史大年,赵金花,等.深部矿产勘查的地震学方法:问题与背景[J].*地质通报*, 2005, 24(3): 211-218.]
- [41] Tang Kuilian Relationship and its significance between energy minerals and metal, nonmetal minerals [J]. *Geological Science and Technology Abroad*, 1995, 139(3): 1-11. [汤葵联.能源矿产与金属、非金属矿产的相互关系及其重要意义[J].*国外地质科技*, 1995, 139(3): 1-11.]

Review on Seismic Methods for Mineral Exploration

ZHOU Ping, SHI Junfa

(Development and Research Centre, China Geological Survey, Beijing 100037, China)

Abstract: After dozens of years of development, seismic methods for mineral exploration have been dominated by seismic reflection series, such as 2D, 3D, VSP methods. Seismic scattering has been put forward and some test results have been achieved. Seismic methods for mineral exploration have been applied into more fields than just ore body itself, and the large deep-seated structures, such as ore-controlling structure, alteration zone, and key lithologic layer have become the targets of indirect seismic exploration. At present, seismic mineral exploration methods, especially 3D and VSP, face a few problems, such as high costs and technique difficulties. In order to make the seismic methods for mineral exploration popularizing and applicable, studies of basic theory and interpretation should be strengthened further, and some demonstration areas for seismic mineral exploration should be set up for accumulating more experience and stimulating thoughts.

Key words: Deep mineral exploration; Seismic reflection; Seismic scattering

《地球科学进展》“973项目研究进展”专栏公告

1997年6月4日,国家科技领导小组第三次会议决定要制定和实施“国家重点基础研究发展规划”,随后由科技部组织实施了国家重点基础研究发展计划(亦称“973”)。其战略目标是加强原始性创新,在更深的层面和更广泛的领域解决国家经济与社会发展中的重大科学问题,以提高我国自主创新能力和解决重大问题的能力,为国家未来发展提供科学支撑。

自1998年起至2006年,围绕农业、能源、信息、资源环境、人口与健康、材料、综合交叉和重要科学前沿等领域,已先后批准了297个项目,其中资源环境领域有44项,此外,其他方面含有资源环境和全球变化范畴的项目约有28项,合计达72项,占总项目的24.2%。

为了更好地宣传、交流我国“973”原创性项目的研究成果,提升这些项目的科学价值,《地球科学进展》编辑部自2005年第11期开辟“973项目研究进展”专栏以来,到2006年第12期已刊登了13项的15篇综述论文,得到了广大读者的好评和积极关注,普遍认为增进了对“973”项目的了解,有利于项目之间的交流。为此,我们希望继续不断得到广大“973”项目首席科学家的大力支持和踊跃投稿,扩大刊登“973”项目中有关资源环境和全球变化方面的项目介绍、最新研究成果和进展。该专栏文章可包括以下几方面内容:

(1)对已结题的项目,主要围绕该项目取得的研究成果及其应用价值、发展前景、与国际水平的差距等内容。

(2)对正在进行的项目,主要就项目研究的现状、进展、新成果及发展前景等内容。

(3)对刚申请批准的项目,围绕该项目研究的目的、意义、关键科学问题及其要达到的目标等内容。

凡是无项目首席科学家署名的来稿,最好经首席科学家的同意和认可,并签署意见。撰写的文章要求客观、公正、实事求是,内容完整,数据翔实,应有必要的文献、英文文摘等内容。具体格式要求参阅《地球科学进展》的投稿须知。

专栏负责人:林海 教授 联系方式:linhai@mail.nsf.gov.cn; linh@igs.nrr.ac.cn

编辑部地址:兰州市天水中路8号 730000 电话:0931-4968256

E-mail: adearth@lzb.ac.cn 网址: http://www.adearth.ac.cn

投稿时请注明“973项目研究进展”栏目,栏目稿件经审核达到发表要求的将尽快刊出,免收审稿费,酌收一定的版面费并致稿酬,同时免费赠送全年期刊一套(1~12期)。

欢迎从事“973”项目研究的科学家、学者赐稿;谢谢对我们工作的支持和帮助。

《地球科学进展》编辑部

2008年2月