

金属矿地震散射波场的数值模拟研究

孙 明, 林 君

(吉林大学, 长春 130026)

[摘 要] 地震方法用于寻找石油、煤田等沉积层控矿床已取得许多成功经验和大量的成果; 对于金属矿可依据微扰理论, 通过地震波散射响应的强弱推断矿体。模拟实验结果表明, 散射波相干性的好坏与杂乱散射体的不均匀性有关: 不均匀性越强, 产生的散射相干性就越好。

[关键词] 地震勘探 金属矿 微扰理论 散射波场

[中图分类号] P [文献标识码] A [文章编号] 0495 - 5331(2001)04 - 0068 - 03

0 引言

随着地质找矿工作向着寻找盲矿和深部隐伏矿方向的发展, 现有的重、磁、电等物探方法, 由于矿体埋藏较深、受热液侵入及构造破碎的影响, 矿体与围岩之间的电性和磁性参数引起的地球物理异常变得很弱, 使得这些方法本来就存在多解性问题变得更加突出。在这种情况下, 利用弹性波运动学和动力学特征发展起来的地震方法充分显示出其潜力和优势。地震方法具有精度高、探测深度大、分辨率高和探测结果准确可靠等特点, 以弥补重磁电方法在寻找深部隐伏矿方面的不足。

在过去的几十年, 地震方法寻找金属矿床的试验工作已进行了不少, 主要是寻找中浅层、缓倾角的金属矿床^[1]。这是由于金属矿通常所处的地质背景相对油气和煤田较为复杂, 主要表现在: (1) 地震地质条件的复杂性: 金属矿形态复杂, 岩性多变, 界面波阻抗差小; (2) 数据采集的复杂性: 地表条件差, 干扰类型多且能量强; (3) 资料处理的复杂性: 尚未形成一套完整的, 较成熟的, 强有力的方法技术。因此, 对复杂的地质体和构造的地震勘探有必要借助弹性波散射理论进行研究。

波在一个无限均匀的介质里, 是以常速度沿着固定的线路不受干扰地向前传播的, 但是若有障碍物嵌入介质, 波的传播路线就会发生变化, 即在其它的未受干扰的入射波的作用下, 障碍物起到一个次生波源的作用, 障碍物上发射出次生波的现象被称作散射。根据微扰理论, 非均匀介质可被分解成参考介质(背景介质)和微扰介质, 则总场为

$$u(r) = u_0(r) + u_s(r) \quad (1)$$

据此可在金属矿勘查中, 根据地震时间剖面上

的散射波的强弱, 研究矿化带, 矿体和围岩的分布。

1 金属矿床的弹性波特性和

由于金属矿的复杂性, 致使地震记录信噪比较低, 干扰严重, 对这些低信噪比的记录进行处理和解释存在诸多问题。

尽管如此, 由于影响地震反射的主要因素是岩石间的波阻抗差异, 一给定岩石的波阻抗 (Z) 是其密度和纵波速度 V_p 的乘积。

文献^[2]对一些矿物的声波速度和密度的测试表明许多金属矿表现出异常的地震特征。虽然不同的矿物的纵波速度 (V_p) 变化范围较大, 或增大或减小, 但较围岩均有较大的密度 (ρ)。因此通常情况下金属矿较其围岩具有较高的波阻抗。这表示金属矿床在其地质背景中可形成较强的反射。因此用地震方法寻找金属矿床是可行的。

2 地震波散射基本理论

广义来说, 地震记录上的所有波都是散射波, 这里的散射波是指由岩体内的不均匀性产生的不规则弱散射。若假定对给定的源-接收器系统, 波通过某种比较简单的标准介质 $C_0(r)$ 时波场为已知, 然后把同样的系统放到某种非标准介质 $C(r)$ 中去, 则波场将发生变化。对于成像来说我们关心的是反散射问题, 即给出观测值, 求介质内的波速变化^[3]。

考虑一波入射到均匀、无限介质内一物体(单包体)上。假设接收器远离物体, 这样, 可以在接收点处把来自物体的散射波看作平面波。称之为“基本散射实验”(图 1)^[4]。

进一步简化, 考虑常密度情况下的声波方程。物体由速度分布 $C(r)$ 来描述, 在地下介质不均匀的

[收稿日期] 2001 - 04 - 04; [责任编辑] 曲丽莉。

[基金项目] 国家重点科技项目(攻关)复杂条件下固体矿产地震勘探技术与方法(96 - 914 - 04 - 01)资助。

情况下,若地震波场近似满足声波方程

$$\left\{ \begin{aligned} \nabla^2 - \frac{1}{C_2(r)} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \end{aligned} \right\} u(r, r_s, t) = \dots \quad (2)$$

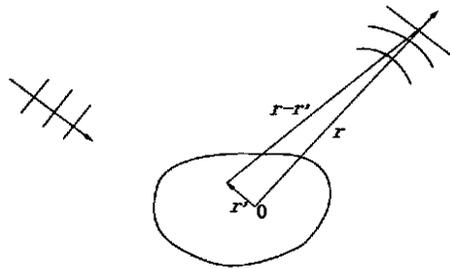


图 1 基本散射实验平面

式中: r_s —声源位置, r_g —接收器位置, 由波的散射理论, $C(r)$ 可表示为参考波速场 $C_0(r)$ 和波速扰动 $C(r)$ 之和, 且满足

$$C^{-2}(r) = C_0^{-2}(r) + p(r) \quad (3)$$

这里 $p(r) = C(r) C_0^{-2}(r)$ (4)

$p(r)$ 表示波速扰动因子, r 表示三维空间的一个点。

我们定义波速扰动即为散射体, 而参考波速场为地震波传播的介质。将式(1)和式(3)代入(2)中, 并在频率域中表示出来, 同时引用自由空间的 Green 函数, 得散射波场的表达式

$$u_s(r_s, r_g, \omega) = \int_{V_0} p(r) e^{i(\omega(r, r_s, r_g))} p(r) d^3 r \quad (5)$$

返回到时间域就得到

$$u_s(r, r_s, r_g) = \int_{V_0} p(r) [t - \omega(r, r_s, r_g)] d^3 r \quad (6)$$

从上面方程可看出, 只要 $p(r) \neq 0$, 即地下介质为不均匀介质, 散射波场 u_s 就会随着震源的激发而产生, 且散射波的强弱与 $p(r)$ 的大小成正比。也就是说, 地下介质的不均匀性越严重, 产生的散射波场就越强。据此可在金属矿勘查中, 根据地震时间剖面上的散射波的强弱, 研究哪些散射波是由矿化带产生的, 哪些散射波是由矿体产生的; 反之, 若地下介质均匀时, 介质速度 $C(r)$ 与背景速度 $C_0(r)$ 相同, 在此情况下, 不产生散射波, 可根据地震剖面上的散射波的频率、振幅等特征, 研究围岩的分布。

3 模拟实验研究

虽然地震波散射理论在最近几十年里取得了显

著的进展, 但对于复杂构造连近似解也不存在。地震波的传播和散射的模拟已经成为广泛使用的工具。为了从波场理论出发研究非均匀介质条件下的地震波场, 选用了理想化的模型。下面从物理和数值模拟两方面分别阐述。

3.1 物理模型实验 (Physical Model Studies)

研究地震波的重要手段之一是物理模型实验。弹性波散射的大部分试验是用二维模型做的, 介质由铝板或纤维板来模拟, 超声波的频率范围在几十千赫兹到 1 MHz, P 波波长 5 mm ~ 100 mm。一般情况下, 金属矿勘查中实际遇到的地质模型结构比较复杂。理论上, 许多复杂的地质模型基本上都可解成一些直立板和水平板的模型之和。因而, 研究直立板地质模型的地震响应是非常有意义的。为计算方便, 设计了一个直立板的二维模型, 模型参数如图 2 所示。

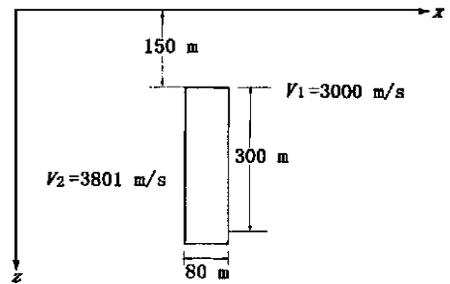


图 2 直立板模型

在图中, 直立板的顶底边界和两侧相对于周围地层可认为是不均匀的。图 3 为该模型的物理模拟结果^[5]。

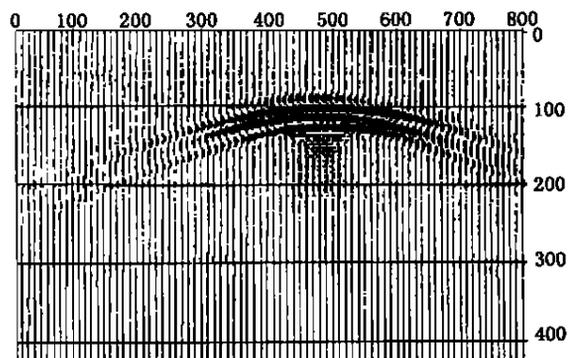


图 3 直立板二维模型的地震响应

震源位于在该记录上 480 点处。在 100 ms 处的绕射波场是直立板的顶界面产生的, 其振幅在板周围很强。离开板后, 振幅有明显的衰减。在绕射波下部, 振幅很弱, 但频率较高的地震波场, 其出现范围在水平方向上与直立板的位置基本吻合。这些弱振幅、高频波就是直立板边界产生的散射波。该散

射波与随机性较大、无规律的高频干扰不同,具有一定的相干性。在实际工作中可根据散射波的这些特征推断矿体。

3.2 数值模拟实验

数值模拟采用 Gauss 射线束法。将每条射线都可看作一射线束,幅度是沿着束的宽度按 Gauss 函数分布。沿着每一条射线,计算射线束的贡献,它满足抛物线型波动方程,然后把到达接收点的所有射线的贡献加起来。它是在二维非均匀介质中经过改进过的近似射线算法,使限制减少,精度提高。能解决一般射线法所不能计算的地方,如焦散处,临界点处等。数值模拟采用与物理模拟相同的速度模型。直立板的顶界面埋深 150 m,底界面埋深 450 m,直立板周围的速度为 3000 m/s,直立板内的速度为 3801 m/s。采样时间为 0.5 ms。

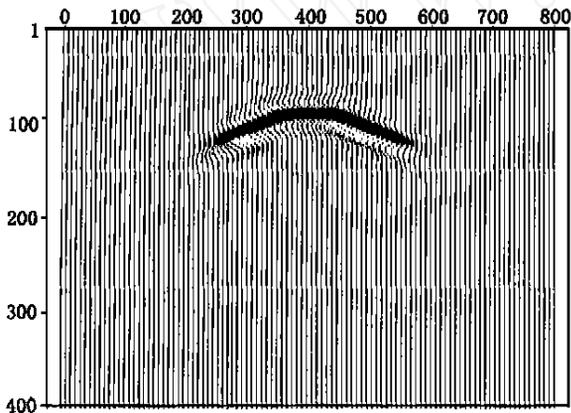


图 4 直立板数值模型的地震响应

图 4 中,在直立板的顶界面约 100 ms 处产生明显的绕射波场,离开板后,振幅有明显的衰减。而且直立板的边界点形态清楚,其对应的位置也精确。在绕射波下部,同样出现了很弱的振幅(较物理模拟弱),但频率较高的地震波场,推测为直立板边界产生的散射波,与直立板的位置基本吻合。这与物理模型实验所得出的结果基本上是一致的。

4 结束语

本文针对非均匀介质 P 波的散射表达式,同时结合模型试验展示了散射波的特征。实验结果表明,地震方法可探测地下岩体及岩体内的不均匀性。金属矿地震勘探应充分利用地震波的散射特征和动力学特征(频率,振幅等)推断隐伏矿体或矿脉。可以预测,散射波场这一高新理论,将在金属矿地震勘探中发挥重要作用。

[参考文献]

- [1] Milkereit B, Eaton D, Wu J, Perron G, Salisbury M, Berrer E, Morrison G. Seismic imaging of massive sulfide deposits: Part Reflection seismic profiling[J]. Econ, Geol, 1996, 91: 829 ~ 834.
- [2] David W. Eaton. Weak elastic - wave scattering from massive sulfide orebodies[J]. Geophysics, 1999, 64: 289 ~ 299.
- [3] 杨文采. 地球物理反演的理论与方法[M]. 北京:地质出版社, 1997.
- [4] Rushan Wu, Nafi Toksoz. Diffraction tomography and multisource holography applied to seismic imaging[J]. Geophysics, 1987, 52: 11 ~ 25.
- [5] 徐明才,高景华. 金属矿地震勘查的方法技术[J]. 有色金属矿产与勘查, 1997, (4): 232 ~ 237.

STUDY OF SEISMIC SCATTERING WAVE FIELD NUMERICAL MODEL FOR METALLIC ORE EXPLORATION

SUN Ming, LIN Jun

Abstract: Seismic techniques have been employed so successfully in petroleum and coal exploration. For metallic ore deposits, orebodies can be deduced based on their scattering response. The result of simulated testing shows that the heterogeneity controls the scattering responses, the more the heterogeneity is, the better the scattering coherence.

Key words: seismic exploration, metallic ore deposit, small perturbation method, scattering wave field



第一作者简介:

孙明(1965年-),男,1987年毕业于长春地质学院应用地球物理专业,1998年获内蒙古大学信号与信息处理专业硕士学位,现在吉林大学攻读博士学位,工程师,主要从事复杂条件下的金属矿地震数据处理工作。

通讯地址:吉林省长春市西民主大街6号 吉林大学朝阳校区信息科学与技术学院 98 博 邮政编码:130026