技术 ·方法

地震散射波模拟成像在金属矿勘探中的应用

李战业[1],尹军杰[2],王 赟[2]
(1. 青海省地质调查院,西宁 810012;
2. 中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029)

[摘 要]由于金属矿地质模型一般具有强非均匀性,造成金属矿地震勘探中采集到的信号杂乱,应用常规的反射地震处理技术难以获得可靠的成像效果。而基于惠更斯-菲涅尔原理的散射成像方法能充分利用地震信号中的全波场信息,例如反射波、绕射波、回转波、直达波、转换波等,它们都是散射波的一种表现形式,从而可以获得较好的成像效果。结合中国东部典型铜矿-铜陵冬瓜山铜矿与中国西部典型锡矿-云南个旧锡矿的地质模型,我们模拟了散射波地震记录,并通过散射成像方法获得了高质量的偏移结果,从数值模拟角度证明了散射成像在金属矿地震勘探中具有较好的应用前景。

[关键词]地震数据处理 地震散射波 金属矿勘探 惠更斯-菲涅尔原理
[中图分类号]P618.51 [文献标识码]A [文章编号]0495-5331(2009)02-0080-05

Li Zhan-ye, Yin Jun-jie, Wang Yun. The application of the numerical simulation and imaging of seismic scattered wave in exploration of metal mineral deposits [J]. Geology and Exploration, 2009, 45(2): 80-84.

0 引言

随着中国国民经济的持续快速发展,市场对金属矿产资源的需求日益旺盛,促进了金属矿产资源的勘查工作。尤其近二十年来,原来探明的以露天或浅层(埋深 <500m)为主的金属矿产资源日趋紧张,尽快探查 500～1500m深度范围的深层、隐伏矿产资源是中国国内金属矿产资源勘查目前的重点[1]。

在金属矿产资源的勘查过程中,尤其在隐伏资源的勘探中,地球物理方法技术发挥了巨大的作用。但是,随着勘探深度的加大,传统重磁、电磁等位场方法技术由于存在分辨率低、勘探深度浅的缺点,在油气、煤炭、煤层气等资源领域广泛应用的地震技术被引进到金属矿勘查领域,并发挥了一定的作用[2,3]。

但由于金属矿床一般是非常强的非均质体,具有地质目标尺度小、形状复杂等特点,使得反射地震技术难以有效地解决数据采集、处理的低信噪比特点,造成金属矿床的成像精度较低[4-6]。因此,我们尝试引进散射地震技术来解决金属矿的勘查问题。通过典型金属矿模型的地震散射波场模拟及散射成像试验,从数值模拟的角度证明这种方法会得到好于反射地震技术的成像效果。

1 散射成像的基本原理

实际地质问题往往很复杂,不同尺度的非均匀地质体共生,会形成极为复杂的、多种波相互干涉的地震波场,例如反射波、绕射波、回转波、直达波、转换波等。而根据惠更斯-菲涅尔原理[7],当振动从某点激发向下传播的过程中,地下任意一点都可以被当作二次源,也可以被当作散射点。由该点出发的散射波在地表干涉、叠加最终被检波器记录下来。因此地震采集中记录的信号并非单纯的反射波,而是全波场的概念。可以根据这一原理获得散射模拟记录[8]。

对于地下某个散射点,地震波从震源传播到散射点,被散射点散射后,逆向散射部分从散射点传播到地面,因此地面的每个接收点均能接收到来自散

[收稿日期]2007-12-17; [修订日期]2008-12-02。[责任编辑]杨 欣。
[基金项目]国家自然基金委员会"多分量转换波地震勘探中的面波法静校正研究"(编号:40574055)项目和科技部 973"深部煤炭资源赋存规律、开采地质条件与精细探测基础研究"项目课题 7"深部煤岩多相地质体的地球物理响应"(编号:2006CB202207)联合资助。
[第一作者简介]李战业(1969年—),男,1992年毕业于长春地质学院,获学士学位,工程师,现主要从事金属矿地球物理勘探工作。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

射点的信息。根据 Bancroft和 Geiger提出的等效偏移距偏移 (EOM)的方法抽取共散射点道集,再应用克希霍夫积分公式可对散射波进行成像[9-13]。

通过对大量理论模型和实际资料的处理验证,应用的散射信息越多,散射成像的效果越好,而且要好于反射波的成像结果。

2　典型模型模拟与成像

2.1　实例一:铜陵冬瓜山铜矿

铜陵冬瓜山铜矿区域大地构造位置处于扬子板块北缘下扬子坳陷带中的铜陵隆起内。从古生代到中三叠世,该区接受了一套以海相为主的沉积,形成了巨厚的沉积盖层。印支晚期——燕山期以来的历次构造变动,形成了以铜官山背斜为代表的一系列北东、北北东向的褶皱构造以及北北西、北北东向的断裂构造。

铜陵冬瓜山铜矿是受一定层位、层间构造控制的矿床,有利的岩石组合不仅成为赋矿围岩,也是成矿的源岩,尤以其中的黄铁矿层为最;燕山期岩浆-热液活动叠加是成矿的另一关键因素。这两个因素控制了冬瓜山铜矿成为一层控夕卡岩型和斑岩型大型铜矿。主要控矿地层为石炭纪的黄龙组白云岩中所夹的黄铁矿层,与成矿有关的岩浆岩为一套晚侏罗世高钾钙碱性侵入岩组合,形成区内"多层楼"成矿的样式。

经过解放后,尤其是 20世纪 70年代以来的大规模开采,铜陵冬瓜山铜矿地表及浅层资源开发殆尽,目前个别井的开采深度已经达到了 1500多 m。但由于该地区地表地形起伏,金属矿床分布的地层倾角较大、断层较多、岩性横向变化较大、速度较高,

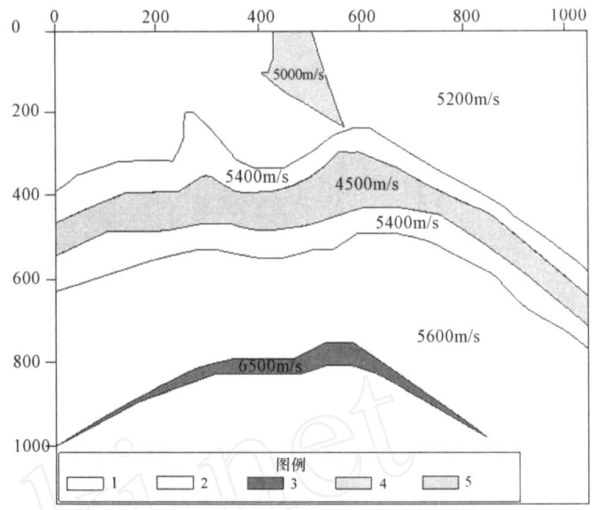

图 1　冬瓜山铜矿典型地震地质模型

Fig 1　Seismic model of a typical geological profile in Dongguashan copper deposit

1—大理岩;2—硅质页岩;3—铜矿;4—石英闪长岩;5—粉细砂岩

1—Marble; 2—Shale; 3—Cu deposits; 4—Quartz diorite; 5—Siltstone

矿体、矿脉尺度较小,要求的勘探目的层较深 (500～1500m),造成了重力、磁法、电磁等常规地球物理勘查的困难,为此,我们从理论模型角度研究分析散射地震法勘查深部金属矿床的有效性。

2.1.1　地震地质模型

如图 1所示为根据铜陵冬瓜山铜矿典型地质剖面建立的地震地质模型。该矿区岩层、矿体特点是:岩层及矿体密度、速度均较高;成层分布为主,夹杂部分不规则岩脉;层间波阻抗差不大,纵向上有速度倒转现象;以中部为界,岩层、矿体产状在左边为左

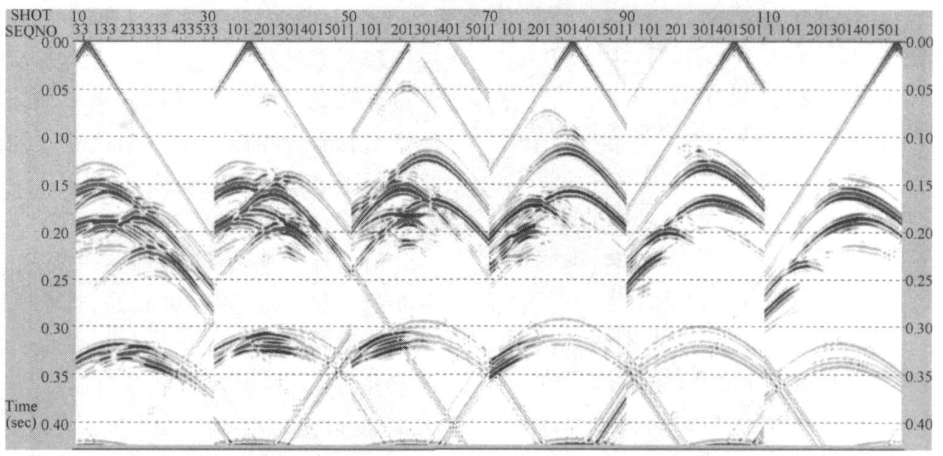

图 2　铜陵冬瓜山铜矿典型模型正演炮集记录

Fig 2　Simulated seismic scattered wave record of the model

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

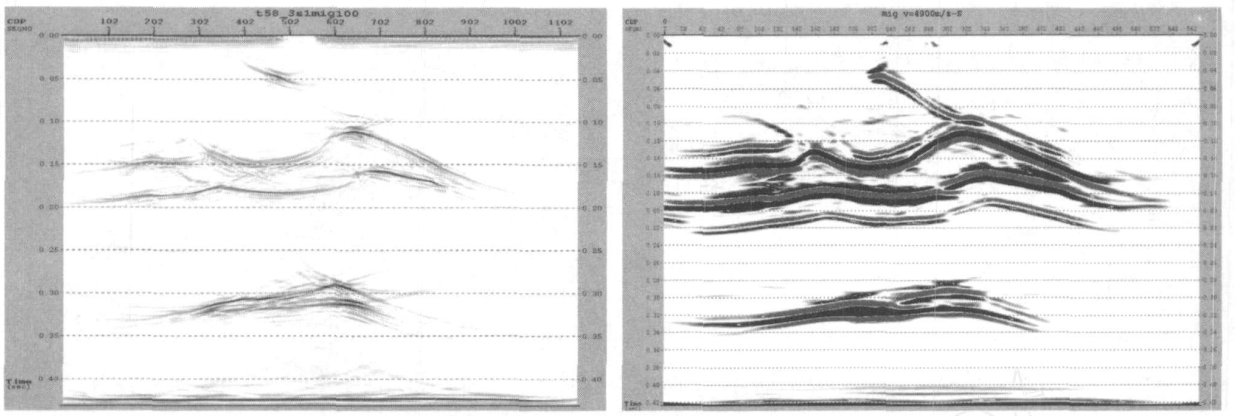

图 3 铜陵冬瓜山铜矿典型模型反射波法叠后偏移剖面(上)和散射波法成像剖面(下)

Fig 3 The migration profiles of the seismic records, in which the upper is the post-stack migration of the reflection wave, and the bottom is the imaging profile of scattered wave.

倾,在右边为右倾,右倾的倾角稍大。

2.1.2 散射波模拟地震记录及成像结果

如图 2所示是采用地震波散射场相位移法波动方程正演模拟的野外地震记录。在不同位置激发、全剖面接收[14]。从炮集记录看,岩层、矿体的散射波主要表现为反射波与绕射波的组合;在不同的炮点位置,接收到的散射波不同,而且差异较大;如图 2中的第 2炮位置,2层硅质页岩顶底界面的反射表现为多组散射波相互干涉叠加;散射波叠加的波前表现为反射波的双曲形态,例如底部铜矿体的散射波;散射波正演模拟较好地模拟野外实际采集的波场信息,波场复杂。因此,可以说明地震散射波模拟技术可以比较真实地模拟深部金属矿体反射及散射信号。应注意的是,由于正演模拟中底边界的处理未采用吸收边界,故可以看到明显的底边界反射能量。

如图 3所示上述炮记录的偏移结果,其中图 3(上)是基于反射波法的叠后偏移剖面,图 3(下)是散射成像剖面。从图 3上、下两图对比可以看到,反射波法叠后偏移浅层的 2个硅质页岩只表现为单一界面,其与围岩的顶底反射没能区分出来;浅层及地表出露的侵入岩体成像不聚焦,难以刻画其准确形态;铜矿体与硅质页岩的岩性突变点不能精确成像,反映的断折点模糊。而散射成像方法获得的剖面中 3个主要层位—2层硅质页岩和 1层铜矿体,包括顶底界面均正确成像。因此可以获得结论:常规反射波法叠后偏移难以对精细构造和陡倾构造成像,而散射波成像方法好一些。

2.2 模型二:云南个旧锡矿

云南个旧锡矿区地处云南省东南部,是我国滇

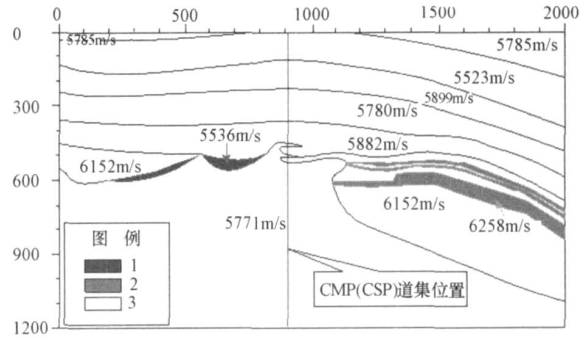

图 4 云南个旧锡矿典型地震地质剖面模型

Fig 4 Seismic model of a typical geological profile in Gejiu tin deposit, Yunnan

1—矿体;2—薄互层;3—结晶岩体

1—Ore body; 2—Thinly interbeded formaton; 3—Cristal rock formation

东南锡矿带上最重要、规模最大的锡多金属矿集区之一。选取该矿区为试验区进行散射波勘探技术的应用研究是具有广泛的代表意义的。在野外观测系统设计和散射波地震资料采集之前,利用该区的地质资料和岩样物性测试数据建立了地质模型,并对其进行了散射波数值模拟。

2.2.1 地震地质模型

所设计的地质模型如图 4。模型的上部为层状分布的结晶岩层,层速度较高,均在 5500m/s以上,垂向速度梯度较小。矿体位于结晶岩层下部,呈透镜状和薄层状。模型中还含有厚度非常小的岩层尖灭带、陡倾角岩层界面和薄互层岩层[15]。经过多次散射正演模拟及对比分析,我们模拟了该模型的地震记录。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

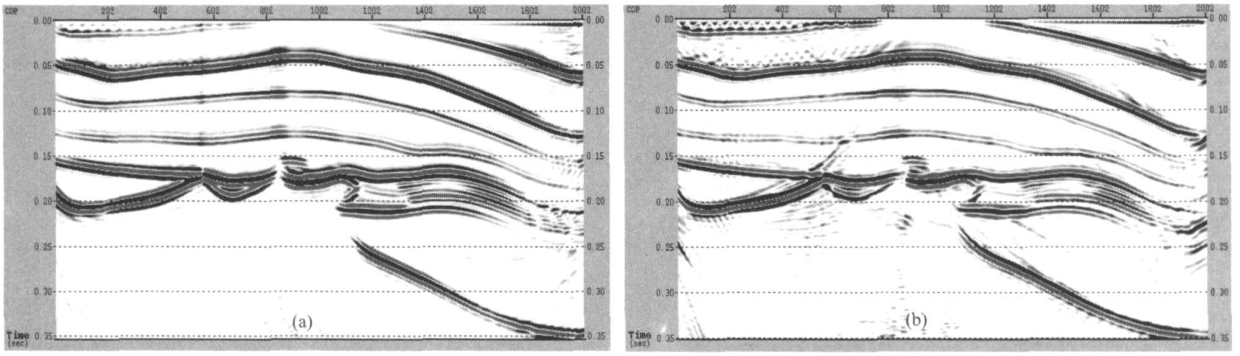

图 5　Kirchhoff叠前时间偏移剖面

(a)散射波法; (b)反射波法

Fig 5　Pre-stack time migration profiles with Kirchhoff method, in which a is the result of scattered wave imaging, and b is the reflecting one.

2.2.2　成像效果分析

为了便于说明散射成像方法与常规反射成像法的区别,我们通过反射波法与散射波法对比的方式进行。由散射波法和反射波法得到的 Kirchhoff叠前时间偏移剖面如图 5a和图 5b。散射波法的偏移效果非常理想,散射能量准确归位,各岩层界面及矿体边界清晰,各突变点收敛,背景干净。反射波法的偏移剖面中,除了背景噪声较强外,上部结晶岩层的成像较好,但由于只使用了反射波成分,散射能量未完全收敛,其能量较散射波成像结果弱;矿体所在部位及岩层尖灭带的成像效果较差,尽管也能较准确地描述整体构造特征,但存在明显的能量归位误差。总体而言,散射波法归位准确,反射波法能量归位欠佳。

3　结论

铜陵冬瓜山铜矿及云南个旧锡矿散射波地震数值模拟及成像处理结果说明:

1) 对于金属矿模型,地震信号多表现为散射信号,基于散射原理的模拟技术可以相对较好地模拟野外实际地震信号。

2) 相对于反射波法地震成像,散射波法可使复杂的、以散射信息为主的金属矿体及其它不均匀构造岩体准确归位,特别是弱有效散射信息,这些信息往往来自断层、间断点、陡倾角构造等复杂构造部位。因此可以说,散射成像能够充分利用散射波的各类有效信息,提高成像质量,保证散射波的正确偏移归位,是复杂地质构造和非均匀地质体精确成像的有效方法。

[参考文献]

[1] 滕吉文. 强化开展地壳内部第二深度空间金属矿产资源地球物理找矿、勘探和开发 [J]. 地质通报, 2006, 25(7): 767～771.
Teng Ji-wen. Strengthening geophysical exploration and exploitation of metallic minerals in the second deep space of the crustal interior [J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(7): 767-771.

[2] 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.
Xu Ming-cai, Gao Jing-hua, Cai Ming-tao, et al. A study of seismic technology exploring blind metal deposit[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1997, 21(6): 468～474.

[3] 吕庆田,侯增谦,史大年,等. 铜陵狮子山金属矿地震反射结果及对区域找矿的意义 [J]. 矿床地质, 2004, 23(3): 390～398.
Lv Qing-tian, Hou Zeng-qian, Shi Da-nian, et al. The results of reflection seismology and its significance for the metal deposit exploration, Shizishan field in Tongling[J]. Ore geology, 2004, 23(3): 390～398.

[4] 徐明才,荣立新,刘建勋,等. 地震方法在拜仁达坝银铅锌多金属矿区的应用试验研究 [J]. 地质与勘探, 2007, 43(4): 61-64.
Xu Ming-cai, Rong Li-xin, Liu Jian-xun, et al. Application of seismic method at bairendaba Ag-Pb-Zn polymetallic deposit in inner Mongolia. Geology and Exploration, 2007, 43(4): 61-64.

[5] 梁光河,蔡新平,张宝林,等. 浅层地震勘探方法在金矿深部预测中的应用 [J]. 地质与勘探, 2001, 37(6): 29-33.
Liang Guang-he, Cai Xin-ping, Zhang Bao-lin, et al. The application of seismic exploration method in deep prediction of gold deposits. Geology and Exploration, 2001, 37(6): 29-33.

[6] 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.
Xu Ming-cai, Gao Jing-hua, Rong Li-xin, et al. Combining exploration technique of the ground seismic tomography and the high-resolution seismic method. Geology and Exploration, 2005, 41(4): 83-87.

[7] Aki, K, Richards P. G. Quantitative Seismology. Freeman and Co., San Francisco, 1980.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[8] Wu, R. S., Aki, K. Scattering Characteristics of Elastic Waves by an Elastic Heterogeneity[J]. Geophysics, 1985, 50: 582 - 595.

[9] Bancroft J. C., Geiger H. D. Equivalent offset CRP gather: Presented at 64th SEGMtg, 1994: 672～675.

[10] Bancroft J. C., Geiger H. D, Foltinek D., et al Prestack migration by equivalent offsets and common scatter point (CSP) gathers: 57th Mtg Eur. Assoc. Expl Geophys, Extended Abstracts, Session: 124.

[11] Bancroft J. C. Natural antialiasing in equivalent offset prestack migration: 66th Annual Internat Mtg, Soc. Expl Geophys, Expanded Abstracts, 1996: 1465～1466.

[12] Bancroft J. C. Computational speed of EOM relative to standard Kirchhoff Migration: CREWES Project Research Report, 1998, Vol 9, Ch. 43.

[13] Bancroft, J. C. Optimum CSP gathers with fixed equivalent offset: CREWES Project Research Report, 1998, Vol 9, Ch. 44.

[14] 尹军杰. 地震散射波场特征的数值模拟研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2005.
Yin Jun - jie. Numerical simulation of the seismic scattered wave [D]. Beijing: China University of Geology, 2005.

[15] 勾丽敏. 散射波成像处理技术研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2007.
Gou Li - min. A research of the scattered wave imaging [D]. Beijing: China University of Geology, 2007.

The Application of the Numerical Simulation and Imaging of Seismic Scattered Wave in Exploration of Metal Mineral Deposits

LI Zhan - ye[1], YIN Jun - jie[2], WANG Yun[2]

(1. *Institute of Geological Prospecting, Xining* 810012;
2. *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029)

Abstract: The seismic data collected during the base metal exploration can be hampered by a variety of non - reflecting signals because of the heterogeneity of ore bodies and host rocks. It is difficult to produce a high - quality seismic profile when conventional seismic processing algorithms are applied to the data. According to the Huygens - Fresnel principle, every grid node can be considered as a vibrating source, and geological model can be discrete within the grids. Therefore we have stacked all kinds of waves, including scattered waves from these grids. It seems that the more scattered signals are used and the better the migrated section is. Two geological models are simulated and tested, one is the Tongling copper mine in the eastern China, and another is Gejiu tin mine in Yunnan Province of the south - western China. We have simulated the seismic scattering wave generated high - quality migrated seismic profiles, which match the geological models very well. It proves that imaging of the seismic scattered wave may be an appropriate tool to process the seismic data in base metal exploration.

Key words: seismic data processing, seismic scattered wave, base metal exploration, huygens-Fresnel Principle

衡阳地质探明 3个特大型矿床

2008年以来,衡阳市地质找矿取得重大突破,已探明矿产资源潜在开采价值在 100亿元以上的特大型矿床 3个。衡阳市是有名的有色金属和非金属之乡,地下矿藏丰富。为充分挖掘地下矿产资源,近年来,全市共启动 65个勘探项目,其中商业性探矿权项目 41个、国家项目 24个,已经有 16个勘探项目取得成果,涉及贵金属、有色金属、黑色金属、非金属及煤炭等 12种矿产品。被誉为第二个"水口山铅锌矿"的留书堂铅锌矿,已探明储量为 130万吨,潜在开采价值达 130多亿元,属特大型矿床。石鼓区七里井钙芒硝矿,已探明储量为 2.6亿多吨,潜在开采价值达 300亿元。此外,衡南县塘家冲铅锌多金属矿已探明黄金资源储量为 1.2吨,是湖南发现的第一个红土型金矿。

文章来源:湖南日报

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net