

金属矿与浅层三维

地震勘探新技术

JINSHUKUANG YU QIANCENG SANWEI DIZHEN KANTAN XINJISHU

© 徐明才 高景华 柴铭涛 刘建勋 等著



地质出版社

国土资源部公益性行业科研专项经费项目
“深部多参数金属矿地震方法技术与示范”
(项目编号: 201111018) 资助出版

金属矿与浅层三维地震 勘探新技术

徐明才 高景华 柴铭涛
刘建勋 王广科 荣立新 著
王小江 张保卫 刘冠军

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

全书由上下两篇共 12 章组成。上篇为深部多参数金属矿地震篇,全面反映了国土资源部公益性行业科研专项经费项目“深部多参数金属矿地震方法技术与示范”的主要研究成果;下篇为浅层三维地震篇,全面反映了浅层三维地震勘探技术和有关北京某地三维地震勘探的主要勘查成果。全书内容丰富,可供从事地球物理勘查相关专业的技术人员阅读,也可供相关专业院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属矿与浅层三维地震勘探新技术 / 徐明才等著.
—北京:地质出版社,2015.8
ISBN 978-7-116-09384-3

I. ①金… II. ①徐… III. ①金属矿床—三维地震法
IV. ①P618.208

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 195060 号

Jinshukuang yu Qianceng Sanwei Dizhen Kantan Xinjishu

责任编辑:吴宁魁 赵俊磊

责任校对:关风云

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号,100083

电 话:(010) 66554642;(010) 66554627 (编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

传 真:(010) 66554686

印 刷:北京地大天成印务有限公司

开 本:889mm×1194mm^{1/16}

印 张:17.5

字 数:510 千字

印 数:1—800 册

版 次:2015 年 8 月北京第 1 版

印 次:2015 年 8 月北京第 1 版印刷

定 价:88.00 元

书 号:ISBN 978-7-116-09384-3

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

前 言

在国内外的地震勘探中,反射地震方法主要用于层控矿产资源勘查,全世界各大油田和煤田大多都是通过地震勘探发现的,而金属矿地震勘探所涉及的区域要比油气和煤田地震勘探复杂得多,利用地震方法勘查金属矿是一个难度很大的课题。尽管如此,经过几代人的不懈努力,复杂条件下的金属矿纵波地震勘探技术已取得了可喜的研究成果,并已初步应用在金属矿勘查中,且取得了较好的地质勘探效果。

由于金属矿地震地质条件的复杂性,单靠纵波反射地震剖面难以有效地解决金属矿勘查中的地质问题。为更好地利用地震方法解决金属矿勘查中的地质问题,国土资源部公益性行业基金立项“深部多参数金属矿地震方法技术与示范”(项目编号:201111018),旨在利用三分量地震、高精度反射地震与地震层析成像等技术解决深部金属矿勘查中的地质问题,减少多解性。

在金属矿地震勘探中,由于地震波是在三维空间传播的,在二维地震勘探中,即使采用偏移处理技术也不可能使在三维空间产生的侧面波归位,并使复杂的地质构造正确成像,在解决复杂地质问题时二维地震技术有着不可克服的缺陷和局限性,在这种情况下,需要开展三维地震勘探。三维地震获得的信息量大,准确度高,能客观真实地反映地下地质构造和隐伏岩体分布,但数据采集的工作量要比二维地震大得多,成本也相对较高,因此,三维地震勘探在金属矿勘查中的应用试验还很少。

为今后更好地开展金属矿三维地震勘探积累经验,结合地质调查开发项目开展了城市浅层三维地震勘探。相对于油气和煤田三维地震勘探,金属矿和浅层三维地震勘探有其自身的特点和难点,如勘探深度浅,震源干扰波严重,表层地震地质条件复杂,探测目标体几何尺度小等。2011年末至2012年初,作者在北京某地开展了浅层三维地震勘探,旨在解决北京市北西向南口—孙河断裂与北东向黄庄—高丽营断裂的接触关系、断层活动性及第四系底界面形态等地质问题。

全书由两部分组成。第一部分为深部多参数金属矿地震篇,全面反映了国土资源部公益性行业科研专项经费项目“深部多参数金属矿地震方法技术与示范”的主要研究成果;第二部分为浅层三维地震篇,全面反映了浅层三维地震勘探技术和有关北京某地三维地震勘探的主要勘查成果。

深部多参数金属矿地震篇由绪论、第一至第八章组成。在绪论中,主要概述了金属矿地震勘探的现状,特别是多分量金属矿地震勘探的现状,目的在于使读者对多分量金属矿地震勘探技术有一个初步的了解。第一章论述了多参数金属矿地震方法,包括高精度反射地震和地面地震层析成像联合勘探技术和多波多分量地震勘探技术;第二章介绍了弹性波参数测试及模型试验研究,包括弹性波参数测试方法,金属矿区岩矿石岩心测试结果分析和金属矿地震地质模型三分量试验;第三章和第四章介绍了多参数金属矿地震数据采集、处理和解释技术;第五章至第八章分别论述了内蒙古准苏吉花铜钼矿区及其外围、新疆天宇铜镍矿区及其外围、内蒙古查干花钼矿区及其外围和新疆喀拉通克铜镍矿地震试验研究成果。对于每个试验研究区,均从试验区自然环境与以往研究程度、地质概况与地震地质条件、试验研究方法、地震地质试验成果分析和试验区成矿有利部位分析等方面讨论了所取得的试验研究成果。

浅层三维地震篇由绪论、第九至第十二章组成。在绪论中,概述了浅层三维地震勘探的必要性和研究现状,第九章介绍了城市三维反射地震方法和城市浅层三维地震的特点;第十章和第十一章分别论述了浅层三维地震数据采集、资料处理和解释技术,第十二章论述了北京某地三维地震勘探实例。

本论著凝聚了参加国土资源部公益性行业科研专项经费项目“深部多参数金属矿地震方法技术研

究与示范”和北京某地三维地震勘探所有科技人员的心血。如果没有他们的辛勤劳动和持之以恒刻苦研究的精神，本专著就不可能适时地奉献给广大读者。参加“深部多参数金属矿地震方法技术与示范”的科技人员有：徐明才、柴铭涛、高景华、刘建勋、荣立新、王广科、王小江、张保卫、刘冠军、李培、张凯、王凯、郭庆、姜春香、哈立洋等，参加北京某地三维地震勘探的科技人员有：徐明才、罗水余、柴铭涛、高景华、刘建勋、张保卫、王小江、王广科、刘子龙、雍凡、荣立新、李颜贵、刘建生、刘冠军、郭庆等。参加本专著各章节有关内容编写的有：徐明才、高景华、柴铭涛、刘建勋、荣立新、王广科、王小江、张保卫、刘冠军等，全书由徐明才、高景华统稿。

在深部多参数金属矿地震方法技术与示范期间，内蒙古第九地质矿产勘查开发院、新疆地质矿产勘查开发局第六地质队、内蒙古第一地质勘查院和新疆喀拉通克铜镍矿业有限责任公司先后提供了内蒙古准苏吉花铜钼矿区、新疆天宇铜镍矿区、内蒙古查干花钼矿区 and 新疆喀拉通克铜镍矿区地质资料，北京多分量地震技术研究院对获得的三分量金属矿地震资料进行了试验处理。在北京三维数据采集前期准备期间，北京市国土资源局、北京市地质矿产勘查开发局和北京市地质调查研究院有关领导通力协调解决当地居民的赔偿问题以及施工过程中可能遇到的问题，为北京市三维地震勘探的顺利开展奠定了基础。野外数据采集期间，有关专家和领导曾多次亲临现场检查指导工作。对于上述领导和专家的支持和帮助，在此一并表示衷心感谢。

深部多参数金属矿地震和城市浅层三维地震勘探技术十分复杂，有关深部多参数金属矿地震和城市浅层三维地震勘探新技术的专著还未曾出版发行过，本论著是有关这方面的第一本论著，衷心希望这本书能起到抛砖引玉的作用，让更多、更好的有关深部多参数金属矿地震和城市浅层三维地震勘探的著作更快地呈现到读者的面前。由于本专著论述的地震勘探新技术，特别是深部多参数金属矿地震勘探技术的研究程度相对较低，加上作者水平所限，书中难免还有许多不完善和不尽人意之处，欢迎读者批评指正。

目 录

前 言

上篇：深部多参数金属矿地震篇

绪 论	(3)
第一章 多参数金属矿地震方法	(9)
第一节 高精度反射地震	(9)
第二节 地面地震层析成像	(14)
第三节 多波多分量地震	(18)
第二章 弹性波参数测试及模型试验研究	(31)
第一节 弹性波参数测试方法	(31)
第二节 测试结果分析	(33)
第三节 金属矿三分量数值模型试验	(42)
第三章 地震数据采集技术	(53)
第一节 仪器设备、测点放样、激发接收因素试验	(53)
第二节 高精度反射地震与地震层析成像	(57)
第三节 三分量地震	(65)
第四章 数据处理解释技术	(76)
第一节 地震数据处理技术	(76)
第二节 地震资料解释技术	(108)
第五章 多参数地震在准苏吉花铜钼矿区的试验研究	(117)
第一节 试验区自然环境与以往研究程度	(117)
第二节 地质概况与地震地质条件	(118)
第三节 试验研究方法	(121)
第四节 地震地质试验成果分析	(123)
第五节 试验区有利成矿部位分析	(133)
第六章 多参数地震在天宇铜镍矿区的试验研究	(136)
第一节 试验区自然环境与以往研究程度	(136)
第二节 地质概况及地震地质条件	(138)
第三节 试验研究方法	(145)
第四节 地震地质试验成果分析	(148)
第五节 试验区有利成矿部位分析	(157)
第七章 多参数地震在查干花钼矿区的试验研究	(160)
第一节 测区地质环境与以往研究程度	(160)
第二节 地质概况与地震地质条件	(161)

第三节	地震方法示范·····	(169)
第四节	地震地质成果分析·····	(171)
第五节	试验区有利成矿部位分析·····	(179)
第八章	地震方法在喀拉通克铜镍矿勘查中的应用·····	(180)
第一节	概述·····	(180)
第二节	地质概况及地球物理特征·····	(180)
第三节	地震方法技术·····	(184)
第四节	取得的勘查成果·····	(185)
参考文献	·····	(195)

下篇：浅层三维地震篇

绪论	·····	(201)
第九章	浅层三维反射地震方法·····	(205)
第一节	三维反射地震方法·····	(205)
第二节	浅层三维地震的特点·····	(207)
第十章	浅层三维地震数据采集技术·····	(209)
第一节	三维探区的确定·····	(209)
第二节	测量技术·····	(210)
第三节	观测系统设计及方法技术·····	(211)
第四节	三维地震数据采集专业术语·····	(222)
第十一章	浅层三维地震资料处理和解释·····	(224)
第一节	浅层三维地震资料处理·····	(224)
第二节	浅层三维地震解释技术·····	(242)
第十二章	北京某地三维地震勘探实例·····	(251)
第一节	前言·····	(251)
第二节	测区地质概况及地震地质条件·····	(251)
第三节	三维测量·····	(253)
第四节	数据采集·····	(255)
第五节	数据处理和解释·····	(257)
第六节	取得的勘查成果·····	(268)
参考文献	·····	(271)

上 篇

深部多参数金属矿地震篇

绪 论

国内外地震勘探主要用于层控矿产资源勘查，特别是油气田和煤田勘查。能源地震勘探的目的层是油气和煤系地层，能源地震勘探的区域大多为沉积盆地，满足层状介质构造理论的地震方法技术在能源勘查的不同勘探阶段发挥了不可替代的重要作用；金属矿地震勘探所涉及的区域要比能源地震勘探复杂得多，且投入的研究力量和研究经费很少，因此，在能源勘探中已被证明是十分有效的地震勘探方法在金属矿勘查中的作用还不甚明显，应用研究程度较低。

近年来，国内金属矿地震方法技术应用研究取得了一些重大进展。在金属矿勘查区，利用地震方法精确地查清了较大深度范围内深、浅层地质构造之间的关系，圈定出了深部隐伏岩体，刻画了金属矿区断裂系统和构造岩浆对矿体矿化成藏的控制作用，在有利的条件下，探测到了与矿体有关的局部不均匀体。一些地震探测结果已得到钻探验证，取得了较好的勘查效果。例如，徐明才等（2007）在内蒙古拜仁达坝银多金属矿区，利用高精度反射地震方法和地震层析成像技术成功地刻画了控矿构造，并追踪了似层状矿体的分布（图 I-1）。

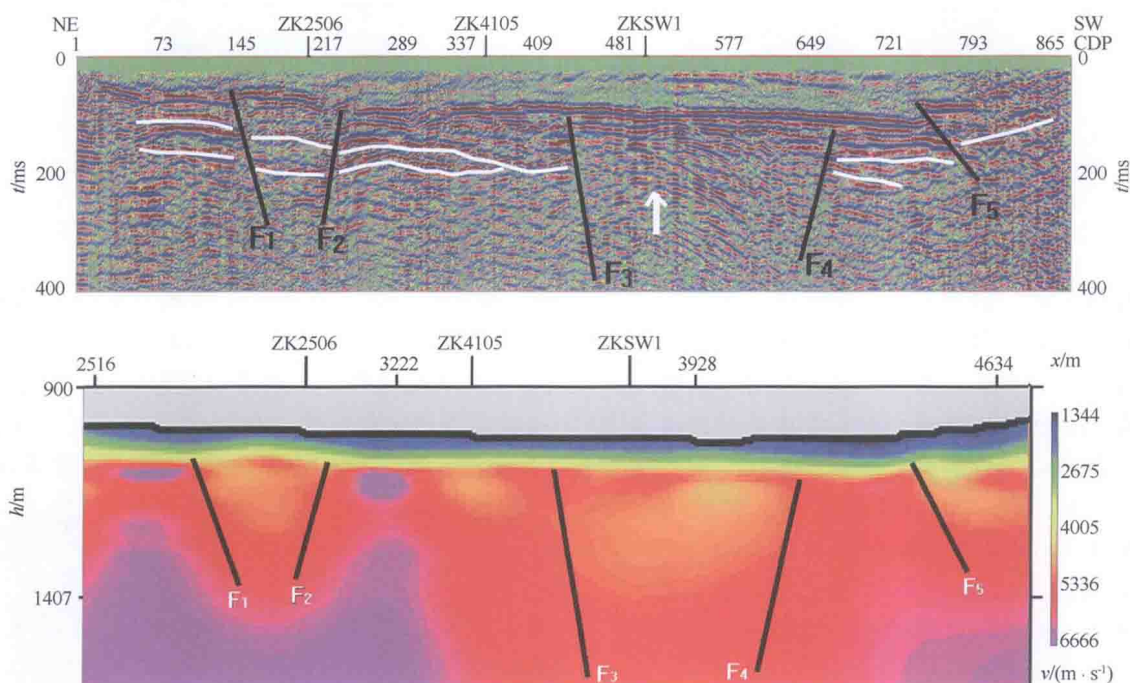


图 I-1 内蒙古拜仁达坝银多金属矿地震剖面（上）和地震层析剖面（下）
（据徐明才等，2007）

中国地质科学院矿产资源研究所和地球物理地球化学勘查研究所承担部重点项目“大型矿集区深部精细结构与巨量金属富集”和“宽频地震探测技术”研究中，联合在铜陵狮子山矿田进行了地震方法试验，利用反射地震发现了主要容矿层“五通组砂岩”的深部分布形态，利用地面地震层析成像技术揭示了试验区的构造和地层分布及隐伏岩体的分布。

在利用散射波成像技术开展金属矿勘探方面，国内外都进行了大量研究。如 T.Bohlen 等（1993）利用 3D 有限差分法研究了结晶岩地区块状硫化矿床的形态和组分对散射波场的影响，发现大型块状硫化物矿体能够产生很强、且复杂的 S 波散射响应；块状硫化物矿体的形态控制着散射波场的方向分

布。刘学伟等（2005）对散射波的基础理论、物理模拟和成像剖面解释进行了研究，通过地质模型的地震散射波场的数值模拟和正演研究，对单炮记录和叠加偏移剖面上散射波的波组特征与其所反映的地质模型之间的对应关系有了初步的认识。高景华等（2004）在新疆小热泉子铜矿床地震勘查试验中，利用散射波地震技术成功地探测到了与块状硫化物矿体有关的地震散射波异常，并得到了钻探验证（图 I-2）。

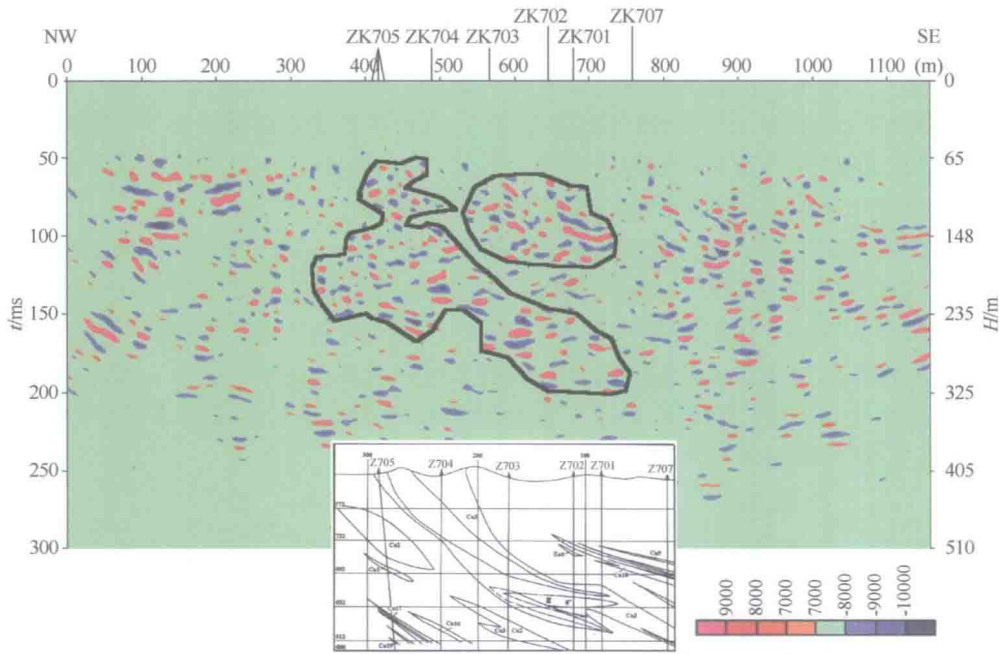


图 I-2 新疆小热泉子铜矿地震剖面及验证剖面，ZK705 为验证孔
(据高景华等，2004)

在俄罗斯，曾开展了大量金属矿地震方法技术研究和勘查工作，取得了十分明显的地质找矿效果；近几年，在加拿大、澳大利亚、南非、芬兰和瑞典等国家也十分重视金属矿地震方法技术研究，相继开展了金属矿岩石波阻抗及反射系数研究、金属矿（块状硫化物）散射波场模拟研究、反射地震直接探测金属矿体试验研究、井中地震成像和 3D 金属矿地震成像研究等，较好地解决了沉积及非沉积矿产勘查中的地质构造、岩性填图、侵入体和蚀变带的圈定等地质问题，取得了较好的地质效果。这些研究成果的一部分分别发表在 2000 年出版的第 65 卷第 6 期和 2012 年出版的第 77 卷第 6 期的《Geophysics》杂志上。由此看出，在国外的金属矿勘查中，地震方法的应用研究已越来越多。

在南非 Witwaterarand 盆地，反射地震勘探已成为该区金矿勘探开发的主要技术手段。C. C. Pretorius（2000）等表明：在南非十号竖井处的地震测量准确地刻画了地下 1000~3500m 深度范围内 Ventersdorp 接触带矿脉（ventersdorp contact reef, VCR）的 3D 结构，并对 20~1200m 落差的断层进行了精确成像（图 I-3）。该试验表明：与钻探相比，地震勘探是一种成本较低的有效

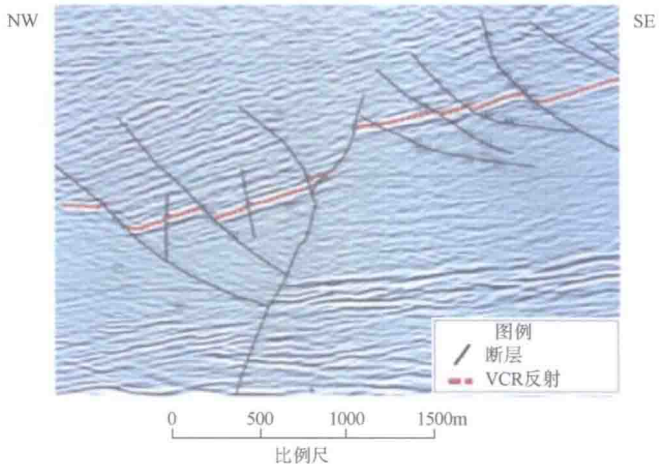


图 I-3 南非金矿地震勘探剖面
(据 C. C. Pretorius et al. , 2000)

探测技术。

在充分认识岩石物性和先期研究的基础上，Milkerreit 等在加拿大 Sudbury 盆地 Trill 地区首次进行了三维金属矿地震勘探 (Bernd Milkereit et al., 2000)。三维金属矿地震勘探试验证实：在 Sudbury 岩浆岩这样的地质条件下，大型矿体能产生典型的地震散射响应。试验结果表明：利用 3D 地震方法，能够对重要的岩性接触带和关键的地质构造进行成像，并能在结晶的岩石中确定和刻画位于结晶岩中的深部掩埋的大型块状硫化物矿体的 3D 空间形态 (图 I-4)。

Matthews 等人在加拿大东部 Halfmile Lake 矿山开展了 2D 和 3D 地震测量，根据探测到的地震振幅异常，在 1300m 处发现了块状硫化物矿体 (图 I-5)。

在金属矿地震勘探中，由于地质构造十分复杂，2D 地震探测到的块状硫化物矿床的位置与矿床的真实位置存在有偏差，且这种偏差随着矿床埋深的增大而增大，在这种情况下，需要开展 3D 地震勘探。图 I-6 表示了加拿大 Bathurst 地区 2D 和 3D 地震探测的结果，在 2D 地震剖面上观测到的强反射是由距离 2D 剖面 700m、埋深约 1200m 处 6~8Mt 的块状硫化物矿床产生的。

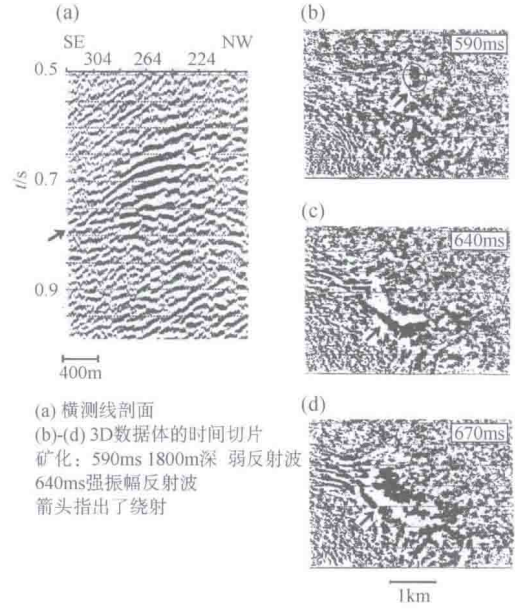


图 I-4 位于 1800m 深度处已知矿化的地震响应 (据 Bernd Milkereit et al., 2000)

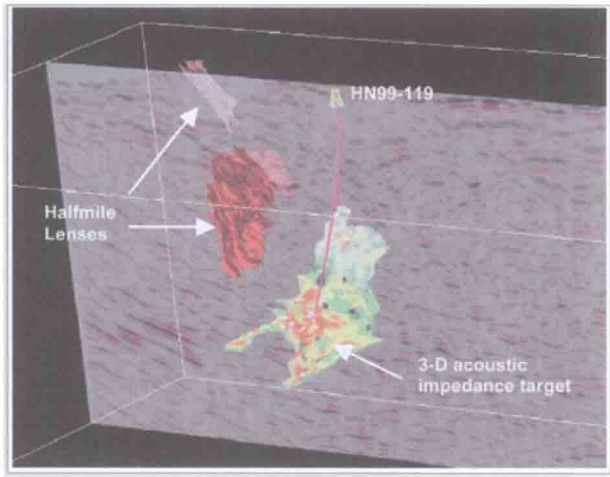


图 I-5 据 3D 地震探测结果，在 1300m 处发现了块状硫化物矿体 (据 David W Eaton et al., 2003)

图 I-7 表示了在澳大利亚 1850~2010 年之间发现的主要矿床 (不包括储量很大的煤、铝土矿和铁矿等矿床) 的覆盖层厚度。即使在矿产资源十分丰富的澳大利亚，找矿的趋势也是趋向深部。

Greenhalgh 等利用反射地震方法在巷道内对已开采矿体采掘面下部的构造进行勘探，利用三分量 VSP 成像技术对未知矿体分布范围和控矿构造进行探测。此外，在其他多个国家多个地区的二维/三维反射地震试验中，利用反射波地震成像技术来确定主要地层界面、断裂分布和控矿构造形态，从而达到间接寻找深部隐伏金属矿的目的。

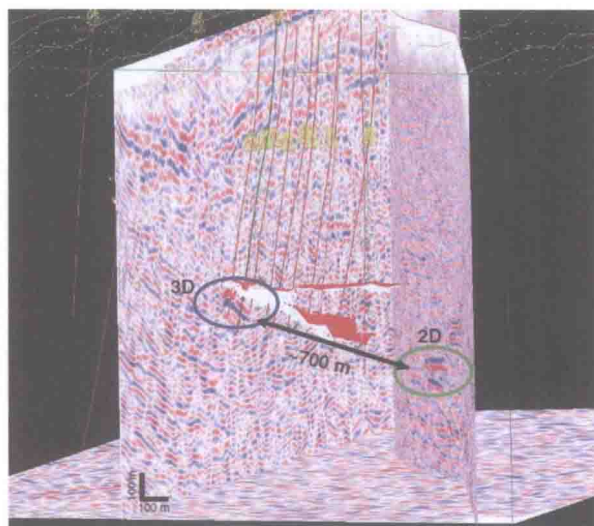


图 I-6 在 2D 和 3D 地震剖面上观测到地震异常的比较
(据 Alireza Malehmir et al., 2012)

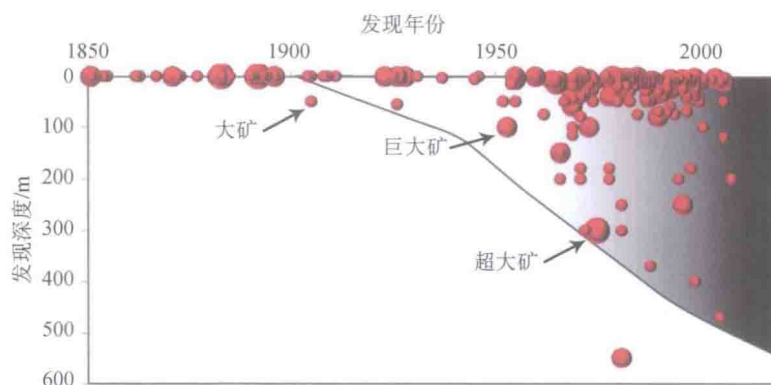


图 I-7 澳大利亚 1850~2010 年之间主要矿床发现的深度
(据 Alireza Malehmir et al., 2012)

大矿 (major) 指的是大于 100 万盎司金、大于 100kt 镍、大于 1Mt 铜；巨大矿 (giant) 指的是大于 5Mt 等价铜；超大矿 (supergiant) 指的是大于 25Mt 等价铜

加拿大阿比提比 (Abitibi) 金矿带是地球上产于太古宙绿片岩中的独特例子，金矿带产于特定的地区内 (长 300km、宽 30~50km)，截至目前已开采约 3400t 金属金。为从区域上调查与金和贱金属成矿作用有关的地层、主要构造和岩性分布，在阿比提比绿片岩带的南部开展了三分量地震试验，试验使用 2 台可控震源激发，扫描频率 10~160Hz，炮间距 25m，道间距 12.5m，每道单个三分量检波器接收，记录道数 795，记录长度 6s，采样间隔 2ms。三分量地震试验剖面长度 10km。图 I-8 表示了在阿比提比矿区获得的三分量地震时间剖面，由此看出，纵波分量 [图 I-8 (a)] 地震记录的信噪比较高，转换波分量 [图 I-8 (b)] 地震记录的信噪比较低。对比图 I-8 (a) 和 I-8 (b) 看出：图 I-8 (a) 中标注 A3 的褶皱构造在图 I-8 (b) 上反映不明显；在纵波分量上的一些倾斜反射波在转换波分量剖面上均不明显，分析原因与共转换点道集选排有关。

弹性波的动力学参数反映了岩矿石的物理力学性质，由岩矿石的密度和纵横波速度可计算岩矿石的泊松比。泊松比一般被认为是对石英 (值低至 0.08) 和镁铁质 (高值大于 0.28) 成分是最敏感的参数 (Holbrook et al., 1988, 1992; White et al., 1992; Christensen, 1996)。在阿比提比绿岩套中，这两类岩石与金和贱金属矿化密切关联，所以泊松比作为勘探指示具有良好的潜力。在这套绿岩发现的特定矿石研究中 (Salisbury et al., 2003)，含有一半以上的铁硫化物，黄铁矿和磁黄铁矿的岩

石的泊松比小于 0.20, 而黄铜矿 (CuFeS_2) 和闪锌矿 (ZnS) 矿石的泊松比大于 0.30。这些值不同于所有常见地壳岩石的泊松比。

加拿大弗林弗伦 (FlinFlon) 块状硫化物铜矿床位于斯诺湖绿岩带内。弗林弗伦—斯诺湖绿岩带长约 250km, 出露宽度约 40km。其北面以基塞组片麻岩带为界, 在南面, 其上覆有古生代石灰岩。为研究三分量地震探测隐伏岩体和矿体的有效性, 开展了三分量地震试验。试验使用可控震源和炸药震源激发, 可控震源扫描频率 10~160Hz, 炮间距 20m, 道间距 5m, 每道单个三分量数字检波器接收, 记录道数 600, 排列中间对称激发, 最大炮检距 1500m。试验剖面为弯线。

垂直测区构造走向布置的三分量地震剖面如图 I-9 所示。其中 PP 剖面中的 R_1 为透镜状矿体 (Callinan 矿床) 产生的反射波, 在 PS 剖面上, 该矿体产生的反射波更加复杂。在 PP 和 PS 剖面中的近水平反射 (由椭圆标出的 B1~B3) 都较明显。计算出的这些反射波的 v_p/v_s 值为 1.55~1.69, 指示为长英质成分 (例如, 英云闪长岩的 $v_p/v_s = 1.60$)。与 PP 剖面上的浅层倾斜反射波相比, 能够把 PS 剖面上的低角度浅层反射波归因为为更好地显示数据, 使用了固定的 v_p/v_s 。由 PP、PS 波组计算得到的 v_p/v_s 反映了 v_p/v_s 的变异性。

以往在金属矿勘查中, 反射地震与地震层析成像联合勘探技术的探测深度相对较浅, 为加大探测深度, 需采用较大的道间距, 这时探测精度较低; 而三分量地震技术主要应用在能源勘查中 (黄中玉, 2003), 在国外金属矿勘查中分别见有一篇井中三分量地震 (Gilles Bellefleur, 2004) 和 2 篇地面三分量地震的报道 (David B. Snyder, 2009 和 M. Malinowski, 2011), 国内除报道少量有关金属矿地震模型的试验研究外 (刘建勋, 2012), 未曾见有三分量金属矿地震试验的报道。三分量地震虽在能源勘探中取得了一定的效果, 但仍属于前瞻性、先导性的工作, 即使在石油地震勘探中, 也有人认为多波多分量地震是有待攻克的一块前沿阵地 (王光杰, 2000)。除了金属矿地震记录信噪比低、地震波场复杂和层位识别标定困难外, 在应用方面, 金属矿三分量地震也不全同于能源三分量地震。

近年来, 随着人们认识水平的提高、勘探难度的加大和技术水平及装备的发展, 能源多波地震勘探越来越受到重视, 已经初步开始应用到实际勘查中去。根据国内外多年油气多波地震勘探研究成果可知, 多波地震勘探在如下几方面发挥作用显著:

- 1) 利用横波获得分辨率较高的地震资料, 可以识别小断层、小构造、尖灭及薄层等细微的地质现象。
- 2) 在纵波勘探得不到好资料的某些地区获得好的成像结果, 查清地下构造。
- 3) 利用纵、横波振幅信息直接寻找油气藏。

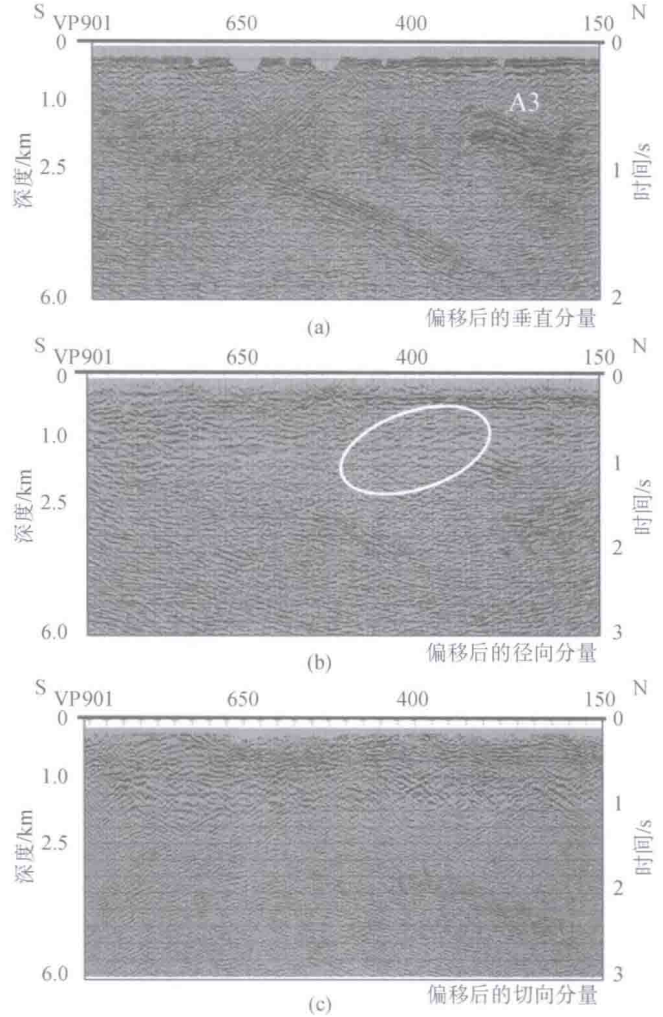


图 I-8 阿比提比矿区三分量地震时间剖面
(据 David B et al., 2009)

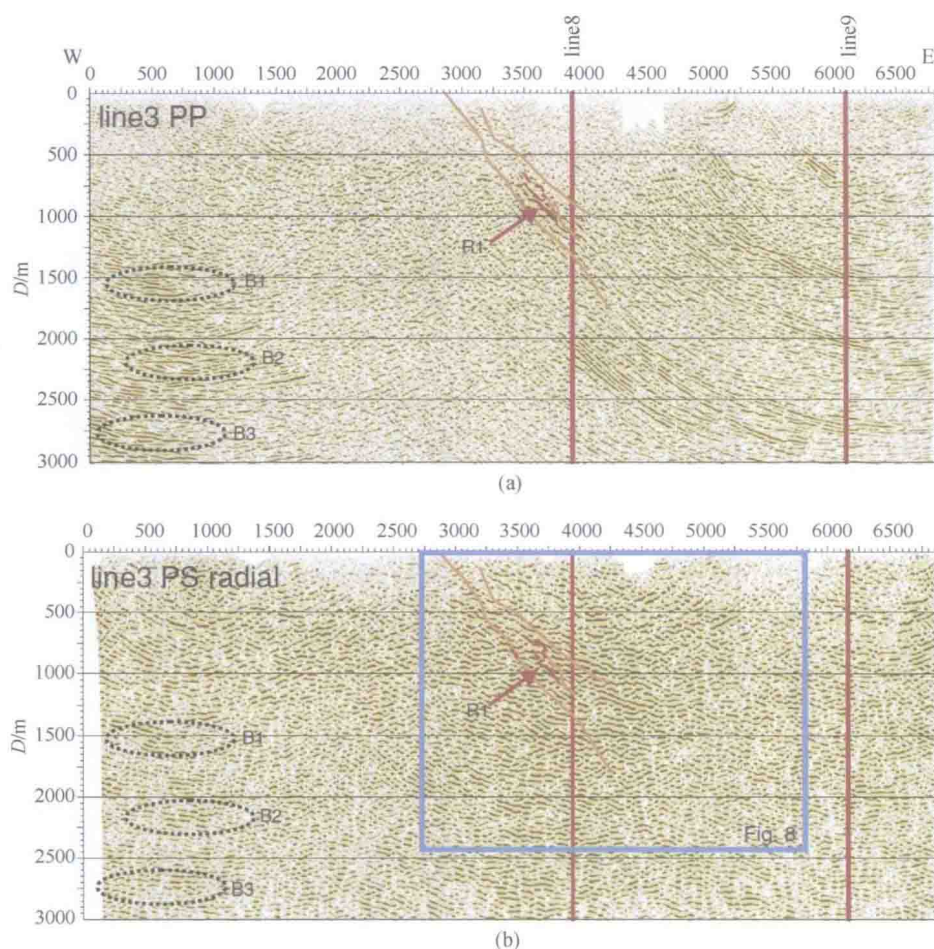


图 I-9 弗林弗伦矿区 PP 和 PS 地震剖面
(据 M. Malinowski, et al. 2011)

4) 可以获得较多的岩性参数, 有利于研究岩性变化, S 波阻抗与 P 波阻抗不同, 所以 PS 波场特别适用于岩性和流体描述。

5) 利用多波地震资料研究介质的方位各向异性, 探测裂隙, 应用 S 波分裂时间特性来描述裂隙和地质灾害。

在复杂条件下的多波多分量地震勘探中, 准确地抽取共转换点道集 (CCP)、地表静校正和波场分离等处理技术在很大程度上会影响多波多分量地震资料的处理效果。由于在抽取共转换点道集前, 无法求取横波的速度, 而抽取共转换点道集又必须知道纵横波速度比, 在此情况下, 不能正确地抽取共转换点道集将直接影响叠加效果。由于横波速度比纵波速度低得多, 在同样的地震地质条件下, 横波表层静校正量要比纵波静校正量大得多, 若不能进行正确的静校正处理, 也直接影响叠加效果。波场分离不好, 也会直接影响叠加效果。由此看出, 影响转换波叠加效果的因素很多。在油气田、煤田等沉积地层内开展转换波地震勘探尚且如此, 在金属矿区开展多波多分量地震勘探的难度要比能源多波多分量地震勘探的难度大得多。

油气多波多分量地震尽管不太成熟, 但在探测油气藏方面已显示出一定的潜力, 而金属矿多波多分量地震探测技术的研究在国内尚属空白, 随着油气多波多分量地震探测技术的发展, 金属矿多波多分量地震可以借鉴一些油气多波多分量地震所采用的新技术、新方法, 但两者也具有明显的差异。例如, 利用多波多分量地震资料直接检测油、气、水的技术在金属矿多波多分量地震勘探中则没有太多的用途。

第一章 多参数金属矿地震方法

在金属矿多参数地震勘探方法中，主要采用高精度反射地震、地面地震层析成像和三分量地震探测。

在高精度地震勘探中，为获取从地表至较深层的地下地层和地质构造的信息，并为反射地震资料的处理提供十分重要的速度信息，需开展地面地震层析成像和高精度地震联合勘探。利用地面地震层析解决表层至较浅部的地层和地质构造问题，利用高精度反射地震解决浅部至中深部（深部）的地质问题，综合解释两者的探测结果，可较好地解决从地表至地下数千米深度范围内的地层和地质构造分布。另一方面，在两者探测相重叠的深度范围内，也可利用两者的探测结果互相印证，以检验所采用方法技术的有效性。地面地震层析成像的速度资料也可作为反射地震资料的地形改正和偏移等处理提供比较准确的速度资料。

高精度反射地震和地面地震层析成像联合勘探弥补了单一地震方法的不足，两种方法所获得的结果相互印证，为复杂条件下金属矿地震资料的解释提供了较多的地震参数和依据。

在金属矿勘查中，有时使用纵波反射地震不能对地下目标体进行精确成像，在此情况下，利用三分量地震中的转换波有可能对地下目标体进行精确成像，三分量地震也是由构造勘探走向岩性勘探的必由之路。

第一节 高精度反射地震

为区别于国外现已采用的全数字采集系统加数字检波器进行单点高密度全波场采集的“高密度地震勘探技术”，国内把提高空间采样密度的地震勘探新技术称为“高精度地震勘探技术”。高精度反射地震勘探是一个相对的概念，它使地震勘探分辨率、成像精度得到不断提高。实际上，从提出高分辨率地震勘探起，就已经进入高精度地震勘探时代。

高精度地震勘探是一项系统工程，各项技术是相互联系、相互制约的。只有统筹设计，整体提高，才能达到高精度地震勘探的目的。

一、反射波时距曲线

1. 单一界面的反射波时距曲线

在倾斜界面情况下，除非测线沿地层倾向布置，否则，地震射线平面与铅垂面不一致。图 1-1 为单一倾斜界面反射波射线路径示意图，设界面倾角为 φ ，界面法线深度为 h ， O 为激发点， S 为接收点，当在上倾方向激发，下倾方向接收时，有

$$t = \frac{1}{v_1} \sqrt{x^2 + 4h^2} + 4hx \sin \varphi$$

若在下倾方向激发，上倾方向接收，则

$$t = \frac{1}{v_1} \sqrt{x^2 + 4h^2} - 4hx \sin \varphi$$

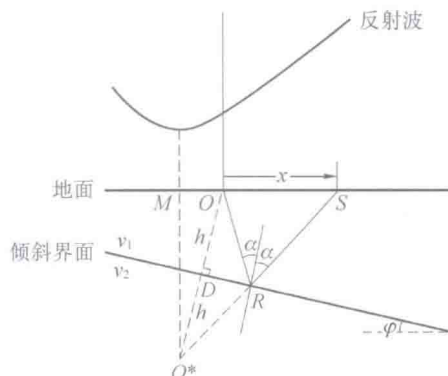


图 1-1 单一倾斜界面反射波射线路径示意图

综合上述两式，有

$$t = \frac{1}{v_1} \sqrt{x^2 + 4h^2} \pm 4hx \sin \varphi \quad (1-1)$$

式中：“±”为当 x 轴与倾向方向一致时取“+”，反之取“-”。

把 (1-1) 写成双曲线形式：

$$\frac{v_1^2 t^2}{(2h \cos \varphi)^2} - \frac{(x \pm 2h \sin \varphi)^2}{(2h \cos \varphi)^2} = 1 \quad (1-2)$$

由此得出，倾斜界面反射波时距曲线为双曲线，但其对称轴不是 t 轴，而在 $x = \pm 2h \sin \varphi$ ，时距曲线极小点在上倾方向偏离原点 $2h \sin \varphi$ 处，据此可以判断反射界面的倾向。

当倾角 $\varphi = 0$ 时，由式 (1-1) 可得到水平界面反射波时距曲线方程：

$$t = \frac{1}{v_1} \sqrt{x^2 + 4h^2} \quad (1-3)$$

对 (1-3) 式求导数，可得出双曲线在各点的斜率为

$$\frac{dt}{dx} = \frac{1}{v_1} \frac{x}{\sqrt{4h^2 + x^2}} = \frac{1}{v_1^*} \quad (1-4)$$

式中： v_1^* 为视速度

当 $x=0$ 时， $dt/dx=0$ ， $v_1^* \rightarrow \infty$ ；

当 $x \rightarrow \infty$ 时， $dt/dx=1/v_1$ ， $v_1^* = v_1$ ，表明该双曲线的渐近线为直达波时距曲线。

视速度还与反射界面的埋深有关，反射界面越深，视速度越大，时距曲线越平缓。

2. 多层介质的反射波时距曲线

设有一组水平层状介质，在 O 点激发，在 S 点接收，第 i 层的速度和厚度分别为 v_i 和 Δh_i ，如图 1-2 所示。第 n 层底界面反射波到达 S 点的传播时间为通过各层的传播时间总和，即时距曲线方程为

$$t = 2 \sum_{i=1}^n \frac{\Delta h_i}{v_i \cos \alpha_i} \quad (1-5)$$

由斯奈尔定律：

$$\frac{\sin \alpha_1}{v_1} = \frac{\sin \alpha_2}{v_2} = \dots = \frac{\sin \alpha_i}{v_i} = P$$

$$\therefore \sin \alpha_i = v_i P$$

有 $t = 2 \sum_{i=1}^n \frac{\Delta h_i}{v_i \sqrt{1 - P^2 v_i^2}}$ ，简化整理后得

$$t^2 = t_0^2 + \frac{x^2}{v_\sigma^2} \quad (1-6)$$

式中： $v_\sigma = \left[\frac{\sum_{i=1}^n t_i v_i^2}{\sum_{i=1}^n t_i} \right]^{1/2}$ ， v_σ 称为均方根速度，也称替代速度或等效速度。

同样地，如果将多层倾斜介质等效为单层倾斜介质，并用替代速度 v_φ 进行替换： $v_\varphi = v_\sigma / \cos \varphi$ ，式中 φ 为第 n 层界面的倾角； v_φ 称为等效速度。可见 $v_\varphi \geq v_\sigma$ 。此时可得时距方程：

$$t = \frac{1}{v_\varphi} \sqrt{x^2 + 4h^2} \pm 4hx \sin \varphi \quad (1-7)$$

3. 弯曲界面反射波时距曲线

当界面弯曲时，反射波时距曲线的形状更复杂。弯曲界面变化多端，难以用一个时距方程来表示。一般是利用它与水平界面的对比，以其视速度的变化，定性绘出弯曲界面的反射波时距曲线。通

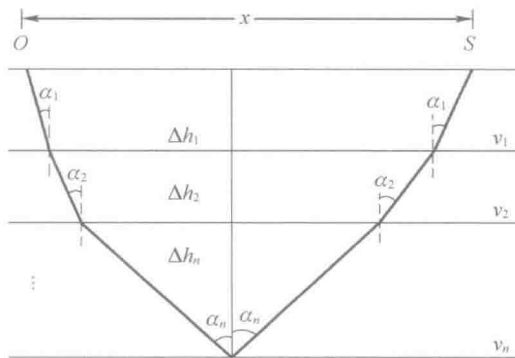


图 1-2 水平多层介质的反射波射线路径示意图