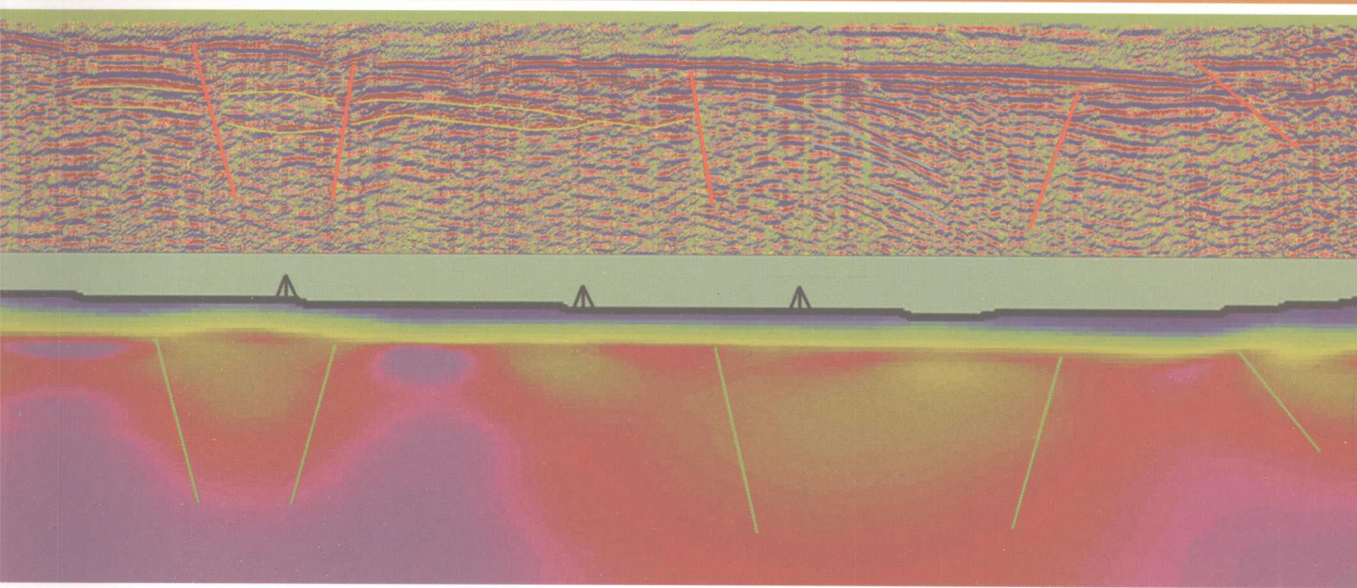


JINSHUKUANG DIZHEN KANTAN

金属矿地震勘探

徐明才 高景华 等著



地质出版社

金属矿地震勘探

徐明才 高景华 柴铭涛 著
王广科 荣立新 刘建勋

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

全书共8章。作者首先对金属矿地震勘探意义、复杂性和目前现状进行介绍,第一章介绍金属矿地震勘探用到的方法,第二章介绍岩石密度、地震波速度及应用,第三章介绍地震波场的物理模型实验,第四章介绍金属矿地震探测中的数值模型研究,第五、六章介绍地震数据采集及处理解释技术,第七章介绍垂直地震剖面在寻找金属矿中应用,第八章介绍运用地震勘探在寻找金属矿中的9个实例。

本书供物探、地质找矿科研人员,及高等院校相关专业师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

金属矿地震勘探 / 徐明才等著. —北京:地质出版社,
2009.7

ISBN 978-7-116-06203-0

I. 金… II. 徐… III. 金属矿—地震勘探 IV. P618.2
P631.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 115842 号

责任编辑:陈军中 李 颖 沈效群 焦恩富

责任校对:李 玫

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) 82324508 (邮购部)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京长宁印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm¹/₁₆

印 张:17.25

字 数:390千字

印 数:1—1000册

版 次:2009年7月北京第1版·第1次印刷

定 价:38.00元

书 号:ISBN 978-7-116-06203-0

(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

早在 1958 年,中国的一些单位就开始了金属矿地震勘探的理论、方法和仪器的研究。20 世纪 60 年代初,曾研制出可以观测高频地震波的轻便 24 道高频地震样机,还进行了磁带地震仪的研制。由于当时国家处于经济困难时期,该项研究被迫停止。1980 年,地质矿产部地球物理地球化学勘查研究所、山西省物探队、中科院地球物理所、中科院电工所合作在山西中条山铜矿区做了一些试验。1987 年至 1991 年,江西省第二物探队、中国地质大学(北京)和地质矿产部地球物理地球化学勘查研究所在安徽铜陵金属矿区曾开展过 3 次金属矿地震试验,并取得了一些试验研究结果。在新疆国家“305”资助的项目中,还开展了地震方法在喀拉通克铜镍矿区的试验研究工作。在此期间有关科研院所和高等院校开展了从金属矿地震勘探理论、方法技术到技术装备的研究,并在不同类型的金属矿区进行了方法应用试验研究,取得了一些重要研究成果,初步形成了一套比较实用的金属矿地震勘探方法技术。

“八五”期间,地质矿产部地球物理地球化学勘查研究所和长春地质学院共同完成了地质矿产部科技攻关项目“寻找以铜为主隐伏矿物探新方法新技术研究”中的第 3 课题“金属矿勘查中的地震方法技术研究”;为更好地开展我国金属矿地震方法技术研究,1994 年 11 月 28 日至 12 月 12 日,地质矿产部组团赴俄罗斯进行了金属矿地震勘探方法技术考察;1995 年 9 月 14 日至 10 月 14 日,俄罗斯全俄勘探地球物理研究所研究员卡拉耶夫应邀到我国开展了金属矿地震勘探方面的学术交流,交流内容包括:复杂地震地质条件下的地震波动理论模型的建立和应用、地面地震方法技术、VSP 技术和层析成像技术等。

“九五”期间,吉林大学完成了国土资源部科技项目“金属矿地震勘查技术装备与方法研究”;“十五”期间,中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所分别完成了国土资源部重点科技项目“宽频地震探测技术”和“金属矿地震方法技术研究”;中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所和中国地质大学(北京)等还分别完成了地质大调查项目“地面物探新方法新技术(预)研究”、“用于寻找隐伏金属矿的地面物探新方法新技术”和“金属矿地震数字模拟、物理模拟与特殊处理方法技术研究”等。

几十年来,经过几代人的不懈努力,复杂条件下的金属矿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,取得了较好的地质勘探效果。本专著对已经取得的研究成果进行了梳理总结,涵盖了国土资源部“十五”重点科研项目“金属矿地震方法技术研究”所取得的主要研究成果,也包含了国土资源部“十五”重点科研项目“宽频地震探测技术”和地质矿产部“八五”科技攻关项目“寻找以铜为主隐伏矿物探新方法新技术研究”中第 3 课题“金属矿勘查中的地震方法技术研究”的部分研究成果。

全书由绪论、第一章至第八章、结束语等组成。在绪论中,主要论述了金属矿地震勘探的意义、金属矿地震勘探的复杂性,以及金属矿地震勘探的现状,目的在于使读者对金属矿地震勘探技术有一个初步的了解。第一章论述了在金属矿勘查中采用的主要方法技

术,除常规的反射、折射地震方法外,还重点介绍了在金属矿勘探中的散射波地震方法以及地面地震层析成像方法技术。第二章介绍了金属矿床和岩、矿石的物理性质,受金属矿成因、构造扰动和岩性变质等因素的影响,金属矿区的地震地质条件十分复杂。为更好地开展金属矿地震勘探,了解一些有关金属矿成因方面的知识、与金属矿地震地质条件有关的岩矿石的密度和速度分布特征及其在金属矿地震勘探中的应用是十分必要的。第三章、第四章介绍了与金属矿有关的物理和数值模型的模拟实验结果,该模拟结果对开展金属矿地震勘查具有指导意义。第五章介绍了金属矿地震数据采集技术,包括硬岩环境下的地震数据采集技术和散射波地震勘探技术。第六章介绍了金属矿地震数据处理和解释技术,除对反射地震资料处理技术进行讨论外,还探讨了散射波地震数据处理技术。第七章介绍了垂直地震剖面技术,第八章介绍了地震方法在不同类型金属矿区的应用试验研究,讨论了地震方法在金属矿勘查中的有效性。在结束语中,对金属矿地震勘探的应用和能够解决的地质问题进行了初步总结,指出了金属矿地震勘探的发展方向;即为解决深部找矿钻探前控矿构造和容矿地层的精细地质问题,并较准确地确定矿体和关键构造的位置和形态,三维地震将成为金属矿地震的发展方向。

需要特别说明的是,由于金属矿地震勘探技术十分复杂,研究程度相对较低,加上作者水平所限,本书还有许多不完善和不尽如人意之处,欢迎指正。“万事开头难”这句话为我们自己带来了一点安慰。不管怎么说,本专著是有关金属矿地震勘探的第一本专著,衷心地希望这本书能起到抛砖引玉的作用,让更多、更好的有关金属矿地震勘探的著作更快地呈现到读者的面前,为中国金属矿地震勘探的发展作出更大的贡献。

最后,我们特别感谢国土资源部高级咨询委员会孙文珂教授级高级工程师对金属矿地震勘探的一贯大力支持,衷心感谢国土资源部国际合作与科技司黄宗理司长、高平处长对金属矿地震方法技术研究的大力支持和帮助。在金属矿地震方法技术试验研究过程中,物探专家刘士毅和周凤桐等教授级高级工程师对完成项目提出了很好的意见和建议。对上述领导和专家的支持和帮助在此表示诚挚的谢意。

本专著由中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所徐明才、高景华执笔,并得到了科学技术部科技开发研究项目“大探测深度金属地震方法技术研究及应用”专项基金资助。

作者
2007. 12

SEISMIC SURVEY FOR MINERAL EXPLORATION

(Abstract)

Xu Mingcai Gao Jinghua Chai Mingtao Wang Guangke Rong Lixin Liu Jianxun

The seismic survey for base metal exploration is an extremely complex topic. The seismic survey technology under complex conditions have obtained some research results, some good geological prospecting effects. This book is the summary of our research results.

The book consists of the introduction, the first to the eighth chapter and the conclusion. In the introduction, the significance, the complexity as well as the present situation of the seismic survey for mineral exploration are mainly discussed. The goal enables the reader to have a preliminary understanding to the seismic survey technology in base metal investigation. In the first chapter the authors introduce the main method technologies which are used in the mineral investigation, and introduce emphatically the scattered wave seismic method as well as the ground seismic tomography technology except conventional reflection and refraction method. In the second chapter, the metallic ore deposits, physical properties of rocks and ores are stated. The seismic geological conditions in mine are extremely complex due to the influences of metallic ore deposit, structure perturbation and lithologic deterioration factor etc. For developing the mineral seismic survey well, it is essential to understand with the origin of metallic ore deposit, and the density and the velocity distribution characteristics related to seismic geologic conditions, in the application of the mineral seismic survey. The third and fourth chapter discuss the physical and numerical model results related to metallic ore deposit. The results have the guiding sense to carry out the seismic survey in mineral exploration. The fifth chapter expounds the seismic data acquisition technologies for base-metal exploration, including the acquisition technology under hard rock environment. The sixth chapter discusses the seismic data processing and the interpreting technology for mineral investigation. It includes the scattered wave data processing technology besides the seismic reflection data processing technology. The seventh chapter introduces the vertical seismic profile technology. The eighth chapter introduces the results of seismic experiment and application in the different type mineral deposits, the validity of seismic method in the mineral exploration.

Because detecting depth of the seismic method is deep, the resolution high, survey result is reliable, the seismic method has its advantage in mineral exploration for seeking the blind ore body and hidden ore body. The seismic method may detect control structure of the ore, lead

structure of the ore and the underground rock mass, as well as the rock mass with internal inhomogeneity, and may carry on transversal tracing and the connection between ore bodies revealed by drilling according to the seismic section and samples obtained in drilled hole. We can enhance the effects of seeking the deep hidden orebody, and reduce the numbers of drill holes and the exploration cost through analyzing the control structure and the rock mass with internal inhomogeneity detected by seismic survey, as well as the data about the geology and the geophysics, geochemistry, and carrying on the integrated interpretation according to mineralization pattern of the measured area.

Finally, we point out developing direction of the seismic survey the for mineral exploration. In order to solve geological questions of the control structure and the host ore strata, and to determine accurately the ore body and the key structure position and the shape, the three dimensional seismic exploration will become the development direction of the seismic prospecting for metallic ore deposit.

“Everything is difficult at the beginning”, these words give us a little self-comfort. No matter what to say, this book is the first book related to the seismic survey for mineral exploration. We are sure that a great many of better books of the seismic survey for metalliferous deposit will be quickly presented, which will make a greater contribution to development of seismic survey for base-metal exploration in our country.

The writers of this book are professor Xu Mingcai and Gao Jinghua, Chai Mingtao, Wang Guangke, Rong Lixin and Liu Jianxun participated the writing. It covers the main achievements related to the seismic method for the mineral exploration in recent years. The achievements have been obtained by Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS.

目 次

前 言

SEISMIC SURVEY FOR MINERAL EXPLORATION

CONTENTS

绪 论	(1)
一、金属矿地震勘探的意义	(1)
二、金属矿地震勘探的复杂性	(1)
三、金属矿地震勘探的现状	(3)
第一章 金属矿地震勘探方法	(5)
第一节 地震记录的分辨率	(5)
第二节 反射波地震方法	(9)
第三节 折射波地震方法	(12)
第四节 散射波地震方法	(13)
第五节 地面地震层析成像技术	(28)
第二章 金属矿床和岩矿石的地球物理性质	(34)
第一节 金属矿床	(34)
第二节 岩矿石的密度和地震波速度	(36)
第三节 岩石的地震波速度和密度的利用	(46)
第三章 地震波场的物理模型实验	(52)
第一节 物理模型的建立	(52)
第二节 数据采集	(56)
第三节 实验结果分析	(60)
第四节 小结	(62)
第四章 金属矿地震探测中的数值模型研究	(63)
第一节 自激自收模型实验	(63)
第二节 几个不规则地质体的数值模型实验	(68)
第三节 多次叠加方式的模型实验	(76)
第四节 地面地震层析成像模型实验	(82)

第五章 地震数据采集技术	(89)
第一节 地震波的激发	(89)
第二节 地震波的接收和采集	(96)
第三节 排列方式及观测系统	(101)
第四节 硬岩环境下的地震采集技术	(107)
第五节 地面地震层析成像技术	(110)
第六节 散射波地震采集技术	(111)
第七节 野外静校正调查	(113)
第六章 地震数据处理解释技术	(114)
第一节 金属矿反射地震资料处理技术	(114)
第二节 金属矿散射波地震资料处理技术	(134)
第三节 地面地震层析成像处理技术	(141)
第四节 金属矿地震资料的综合解释研究	(145)
第七章 垂直地震剖面	(151)
第一节 方法的技术原理	(152)
第二节 设备及观测方法	(156)
第三节 资料处理	(159)
第四节 资料解释方法	(167)
第八章 应用试验研究成果	(170)
第一节 山东邹平铜矿区的试验研究	(170)
第二节 内蒙古布敦化铜矿区的试验研究	(177)
第三节 河北蔡家营多金属矿勘查中的试验研究	(186)
第四节 内蒙古林西大井铜金多金属矿区的试验研究	(196)
第五节 新疆小热泉子铜矿的地震方法技术研究	(205)
第六节 甘肃金昌铜镍多金属矿区的试验研究	(214)
第七节 内蒙古拜仁达坝多金属矿区的试验研究	(219)
第八节 铜陵金属矿区的地震探测	(230)
第九节 井中地震在金属矿勘查中的应用	(243)
结束语	(260)
主要参考文献	(262)

CONTENTS

PREFACE

INTRODUCTION	(1)
1. Significance of the seismic survey for metallic ore deposit	(1)
2. Complexity of the seismic survey for metallic ore deposit	(1)
3. Present situation of the seismic survey for metallic ore deposit	(3)
CHAPTER 1 SEISMIC METHOD FOR MINERAL EXPLORATION	(5)
§ 1 Seismic record resolution	(5)
§ 2 Reflection method	(9)
§ 3 Refraction method	(12)
§ 4 Scattering method	(13)
§ 5 Ground seismic tomography	(28)
CHAPTER 2 METALLIC ORE DEPOSIT AND PHYSICAL PROPERTIES OF ROCKS AND ORES	(34)
§ 1 Metallic ore deposit	(34)
§ 2 Density and velocity of rocks and ores	(36)
§ 3 Application of density and velocity in seismic survey	(46)
CHAPTER 3 PHYSICAL MODEL EXPERIMENT	(52)
§ 1 Building physical model	(52)
§ 2 Data acquisition	(56)
§ 3 Analysis of the experiment results	(60)
§ 4 Brief summary	(62)
CHAPTER 4 NUMERICAL MODEL RESEARCH	(63)
§ 1 Self-exciting and self-receiving model experiment	(63)
§ 2 Numerical model experiments of irregular geologic bodies	(68)
§ 3 Model experiments of multi-stack method	(76)
§ 4 Model experiment of ground seismic tomography	(82)
CHAPTER 5 DATA ACQUISITION	(89)
§ 1 Excitatory seismic wave	(89)
§ 2 Receiving and recording of seismic wave	(96)
§ 3 Spread geometry and field setup	(101)
§ 4 Data acquisition technology under hard rock environment	(107)
§ 5 Ground seismic tomography	(110)

§ 6	Acquisition of scattering wave data	(111)
§ 7	Static correction investigation in the field	(113)
CHAPTER 6	PROCESSING AND INTERPRETION	(114)
§ 1	Processing of seismic reflection data	(114)
§ 2	Processing of seismic scattering data	(134)
§ 3	Processing of ground seismic tomography data	(141)
§ 4	Integrated interpretation for metallic ore deposit using seismic data	(145)
CHAPTER 7	VERTICAL SEISMIC PROFILE	(151)
§ 1	Principle of VSP method	(152)
§ 2	Equipment and observation method	(156)
§ 3	Data processing	(159)
§ 4	Data interpretation method	(167)
CHAPTER 8	RESULTS OF APPLICATION RESEARCH	(170)
§ 1	Experimental study at Zouping copper deposit in Shandong province	(170)
§ 2	Experimental study at Budunhua copper deposit in Inner Mongolia Autonomous Region	(177)
§ 3	Seismic experimental research at Caijiaying polymetallic deposit in Hebei province	(186)
§ 4	Experimental research of Dajing Au-copper polymetallic deposit at Linxi county in Inner Mongolia Autonomous Region	(196)
§ 5	Seismic method research at Xiaorequanzi copper deposit in Xinjiang Uygur Autonomous Region	(205)
§ 6	Experiment research at Jinchang polymetallic deposit in Gansu province	(214)
§ 7	Application of seismic method at Bairendaba polymetallic deposit in Inner Mongolia Autonomous Region	(219)
§ 8	Seismic prospecting at Tongling copper deposit in Anhui province	(230)
§ 9	Application of vertical seismic profile in base metal exploration	(243)
CONCLUSION		(260)
REFERENCES		(262)

绪 论

一、金属矿地震勘探的意义

目前,在浅部矿产资源接近枯竭的情况下,向地球深部索取资源已成为资源勘查的必然趋势,但必须解决方法技术问题。

世界上开采深度最深的矿山位于南非,有望达到 5000 m。在中国绝大部分地区,勘查深度较浅,不足 500 m,在 500 ~ 2000 m 之间仍有巨大的找矿空间(第二找矿空间)。中国的深部资源勘查呼唤着方法技术的进步。

随着地质找矿工作向寻找盲矿和深部隐伏矿方向发展,传统的金属矿勘查技术已不能完全满足深部资源勘查的要求。重、磁勘探方法垂向分辨率很低,且位场强度随距离的平方成反比衰减,在探测深部金属矿体方面存在严重不足;直流电法勘探深度太浅,电磁法在深部的分辨率通常又较低。此外,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,使得现有的重、磁、电等物探方法本身就存在的多解性问题变得更加突出,因此它们都面临着改进和发展。在这种情况下,利用地质体弹性波运动学和动力学特性发展起来的地震方法充分显示出其潜力和优势,它可以用来弥补重、磁、电等方法在寻找深部隐伏矿方面的某些不足。

几十年来,物探在寻找隐伏矿中发挥了很大作用,但迄今为止还没有一种地面物探方法能得出与反射地震剖面相媲美的地下图像。与其他物探方法相比,地震方法具有探测深度大、分辨率高和探测结果准确可靠等特点,因而在寻找深部隐伏矿方面,是一种急需开拓的新方法技术。目前,能源地震勘探方法技术从勘探设备、数据采集、处理和资料解释等方面已发展到了很高的水平,为开展金属矿地震勘探和试验研究奠定了基础。

有资料^①表明,地震方法在金属矿勘查的不同阶段能够解决不同的地质问题。尽管如此,金属矿地震方法在解决不同地质勘查阶段的地质问题时,还存在许多难题,这些难题妨碍了该方法在金属矿勘查中的应用。

二、金属矿地震勘探的复杂性

把地震方法应用在金属矿勘查中是一个十分复杂的课题,其复杂性主要表现在以下几方面。

1. 地震地质条件的复杂性

同油气地震地质条件相比,金属矿地震地质条件要复杂得多,主要表现在:

1) 金属矿床形态复杂,矿体规模较小,地层界面连续性差,往往难以满足现有地震反射方法所依据的镜面反射条件。

① 崔林沛,刘素芳.国外金属矿地震勘探调研报告,1993年。

2) 目的层界面波阻抗差一般较小,有效信号振幅弱。在有第四系地层覆盖的地区,第四系盖层与基岩界面(如:火山岩等)之间的波阻抗差又很大,形成能量屏蔽层,严重影响了地震波能量向下传播。

3) 表层结构复杂、岩性多变,从而引起弹性波的激发接收条件及表层的波场图像复杂多变。

2. 数据采集的复杂性

能源地震勘探是在沉积盆地内进行数据采集,金属矿地震勘探一般需在与火成岩和变质岩有关的山区或丘陵地带进行数据采集,其复杂性远大于能源地震勘探。概括起来,金属矿地震数据采集的复杂性主要表现在:

1) 地表条件差、地形起伏大、岩石裸露、有时植被发育、通行条件差,这些因素十分不利于打激发钻孔和野外施工,也给获取静校正资料和在数据处理中消除地形的影响增加了许多困难。

2) 干扰多且能量强而多变。除了面波、声波等震源干扰波外,由地下构造产生的各类转换波、绕射波和侧反射波也同时存在。矿区的工业电、微震干扰也严重。

3) 当表层存在低速风化层时,从深部反射的地震波都近于法线出射于地表,有利于用垂直检波器接收深层反射信号。在金属矿地震勘探中,若表层为裸露岩石,不存在速度很低的风化层时,从深层反射来的地震波并非近法线出射于地表;这时,用垂直检波器接收地震波不能获得最大的振幅。

4) 金属矿区的潜水面一般较深,难以在潜水面以下激发地震波。在潜水面以上激发时,一是能量弱,难以获得较强的反射波;二是激发的高频成分大部分被低速介质吸收。

3. 资料处理的复杂性

金属矿地震资料处理的难点主要有如下几点。

1) 金属矿地震资料处理尚未形成一套完整的方法技术,目前只能借助于现有的常规处理流程处理金属矿地震资料。

2) 缺乏压制在金属矿地震资料中特有的各类转换波,如 P-SV-P 波, P-P-SV 波等。这类转换波速度高、能量强,现有的处理技术难以压制。

3) 缺乏提高弱信号信噪比和分辨率的强有力方法技术。

4) 金属矿地震记录中的波场十分复杂,认识和分离这些复杂的地震波场是处理好金属矿地震资料的基础。目前,还缺少有效地分离金属矿地震记录中复杂地震波场的处理手段。

5) 测区内声波测井、VSP 测量及 PS 测井资料很少,大部分地区都没有速度资料。由于采用的道间距较小、接收排列长度较短,根据地面地震资料求取的叠加速度的精度较低。在没有准确速度资料的条件下,偏移处理的效果就会受到影响,以至于影响资料处理的质量和解释精度。

4. 资料解释的复杂性

目前,金属矿地震资料解释方法技术还处于探索阶段,尚无规则可循,需要在大量工作的基础上积累经验。与常规地震资料相比,存在的主要问题如下。

(1) 难以发现较好的标准层

金属矿区地质构造复杂,各地层之间物性差异较小,反射波组的连续性一般较差,且

反射波振幅弱，难以发现易连续追踪、特征明显、均匀分布于测区的标准层。

(2) 地震波组关系复杂

复杂断块的分布，岩浆岩的侵入及其他复杂构造等严重扰乱了地震波组关系。

(3) 地震相特征不明显

反射层的特征包括反射波的振幅、频率、连续性、丰度、结构和外形等。反射层相同特征的集合体称为地震相。在金属矿地震时间剖面上，很难发现具有这些相同特征的反射层。

(4) 地震层位与地质层位有时难以一致

地震界面是波阻抗面（波阻抗就是速度和密度的乘积），而地质界面一般是岩性界面或地层年代界面。前者是物理界面，后者是地质界面，两者有时是一致的，有时是不一致的。在金属矿地震勘探中，对于某一厚岩层，若岩层内部出现不均匀条带时，地震时间剖面上的某一波组有可能反映的是该不均匀条带，而非某一地质界面。

由于金属矿地震勘探涉及的地形比较复杂，交通不便，激发和接收地震波的成本相对较高，生产效率低。

综上所述，在金属矿地震勘探中，地表地貌、表层地震地质条件、复杂的地质构造等因素是影响金属矿地震数据质量的主要因素。针对上述这些不利因素，必须选择合适的勘探设备和相应的方法技术，采用适合于复杂地表的精度高、性能稳定、轻便的先进地震仪器、可控震源和其他设备等。除此之外，还要强化数据采集、处理和解释工作的一体化的工作模式，即数据采集、处理和解释工作密切配合，最好由同一组人员完成；使数据处理人员熟悉野外工作情况，资料解释人员了解测区地质情况、熟悉要解释的地震剖面是如何得到的，以使最终解释的地震剖面能更好、更客观地反映真实的地质情况。

三、金属矿地震勘探的现状

在国内外的地震勘探中，地震反射方法主要用于层控矿产资源勘查，世界各地的各大油田和部分煤田是由地震勘探发现的。能源地震勘探的目的层是油气和煤系地层，其工作区大多为沉积盆地，所采用的地震方法技术满足层状介质构造的理论。非能源勘查所涉及的区域的地质情况要比能源地震勘探遇到的要复杂得多。

地震勘查方法技术虽发展很快，但在不同勘探领域的发展很不平衡。能源（油气、煤田）地震在不同勘探阶段发挥了不可替代的重要作用，非能源地震勘查，特别是金属矿地震在金属矿勘查中的作用还不很明显，应用研究程度较低。

俄罗斯（前苏联），曾开展了大量的金属矿地震方法技术研究和勘查工作，取得了明显的地质找矿效果。近几年，加拿大、澳大利亚和南非等国家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、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，较好地解决了沉积矿产勘查中的地质问题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发表在2000年出版的《Geophysics》第65卷第6期上。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。

在利用散射成像技术开展金属矿勘探方面，国内外研究者都进行了大量研究。如D. W. Eaton（1999）研究了不同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散射波响应；块状硫化物矿体的形态控制散射波场的方向分布。李灿苹、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，通过大量地质模型（单点、多点、层状等）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。徐明才、高景华等（2004）在新疆小热泉子铜矿床硬岩金属矿地震试验中，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。

“八五”期间，中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所主持完成了原地质矿产部科技攻关项目“寻找以铜为主隐伏矿物探新方法新技术研究”中第3课题“金属矿勘查中的地震方法技术研究”，首次将散射波（矿体产生的）作为有效波应用在金属矿勘查中（Xu Mingcai 等，1997）；“九五”期间，吉林大学主持完成了国土资源部科技项目“金属矿地震勘查技术装备与方法研究”；“十五”期间，中国地质大学（北京）和中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所等分别完成了地质大调查项目“金属矿地震数学模拟、物理模拟与特殊处理方法技术研究”和“地面物探新方法新技术（预）研究”及“用于寻找隐伏金属矿的地面物探新方法新技术”。上述研究在方法技术和装备研制方面都取得了阶段性重要研究成果。此外，中国科学院地质和地球物理研究所在甘肃金川和山东招远分别在巷道内开展地震勘查和围绕山丘开展地震层析技术寻找隐伏金属矿，取得了较好的勘查研究成果。

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在承担国土资源部重点项目“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。中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所在完成国土资源部重点项目“金属矿地震方法技术研究”中，对金属矿勘查中的地震方法技术进行了系统研究，包括适合于金属矿地震探测的理论基础、数值模拟、野外数据采集及资料处理解释技术，在资料处理中，还研制了一些适合于金属矿地震资料的处理软件；已初步形成了一套较实用的金属矿地震方法技术，并已试验性地应用到了内蒙古拜仁达坝和甘肃金昌等多金属矿区，取得了较好的地质效果。

目前的金属矿地震探测技术大多是在石油地震勘探技术上发展起来的，在其发展过程中借鉴了已经成熟的石油地震技术，取得了一些成功的试验研究成果。尽管如此，复杂条件下的金属矿地震探测技术要达到实用化和成熟仍面临很多严峻的挑战，如低信噪比、强干扰噪声、不连续反射和复杂地震波场等，迎接这些挑战就必须发展新数据处理和解释技术。

纵观国内外地震勘探的发展趋势，我们认为具有大探测深度、高分辨率、轻便快速的综合金属矿地震勘探技术（包括3D金属矿地震探测技术）是金属矿地震勘探的发展方向。由于地震方法技术的探测深度范围较大，且分辨率较高，并可获得从浅至深的地质构造信息，能够对地下精细结构进行探测，达到多目标深度勘探的目的，可以说金属矿地震勘探技术不但可以在目前的矿产资源勘查中发挥作用，而且也可以在500~2000 m深度的第二找矿空间的矿产资源勘查中发挥重要作用。

第一章 金属矿地震勘探方法

第一节 地震记录的分辨率

在金属矿地震勘探中,由于要探测的地质体(矿体或与控矿有关的地质体)规模较小,提高地震记录的分辨率是必要的。地震记录所反映的各种地质体的清晰度及地层的细节都取决于地震记录的分辨率。所谓“分辨率”就是区分两个以上岩性单元的能力。地震记录的分辨率又分为纵向分辨率和横向分辨率。

一、地震记录的纵向分辨率

假设地震子波是理想的雷克子波,则地震记录的时间分辨率为:

$$t_R = \Delta t = \frac{1}{2.3f^*} \quad (1-1)$$

式中: f^* 是地震子波的视主频。从这个公式出发,只要剖面上主频比较高,就认为其时间分辨率高。如果把地层速度 v 乘以 t_R ,就可得到厚度分辨率:

$$h_R = \Delta h = \frac{\lambda^*}{4.6} \quad (1-2)$$

式中: λ^* 为视波长; h_R 称为厚度分辨率。一个反射波的分辨率接近 $1/4$ 波长。

由于实际地震记录并非为零相位的雷克子波,上述分辨率的定义不太严格。实际上,地震记录的分辨率与频带宽度有关。

若带通子波通频带的低截频为 f_1 ,高截频为 f_2 ,带通子波的振幅包络为:

$$B(t) = \left| \frac{2}{\pi t} \sin(2\pi \frac{f_2 - f_1}{2} t) \right| \quad (1-3)$$

由此可知,带通子波包络的频率为 $\frac{f_2 - f_1}{2}$,其周期就是包络主极值的宽度,地震记录的分辨率实际上取决于地震子波包络主极值的周期。据此,可计算出分辨地层的时间厚度,即纵向分辨率可用下式表示:

$$\text{时间分辨率} \quad \Delta t_{\min} = 2/\Delta f \quad (1-4)$$

$$\text{厚度分辨率} \quad \Delta h_{\min} = \frac{v}{\Delta f} \quad (1-5)$$

式中: v 为速度; $\Delta f = f_2 - f_1$ 为地震记录的绝对频带宽度。

从上式可以看出,地震记录的频带越宽,分辨率就越高。当地震记录的频带无限宽时,对应的子波为一尖脉冲,具有无限高的分辨率。对于某一频率的正弦波,其频谱为单一值,波形为连续振荡的波形,其分辨率趋于零。这显然是两种极限情况。对于实际记录来说,应具有较宽的频带。

在实际工作中，常用相对频带宽度表示地震记录的频带宽度。若 $f_2 = f_1 \times 2^k$ ，则说地震子波有 k 个倍频程。由带通地震子波包络的频率可知该子波的主极值宽度为：

$$W = \frac{2}{f_2 - f_1} = \frac{2}{(2^k - 1)f_1} \quad (1-6)$$

从式 (1-6) 可知，似乎低截止频率越高，分辨率也越高。实际上，低截止频率越高，相对频带宽度越窄，分辨率就越低。且在分母项中， k 是指数项，所起的作用更大。因此，对于高分辨率地震勘探来说，采用提高低截止频率的方法来提高地震记录的分辨率是弊大于利。在金属矿地震勘探中，应采用宽频带地震勘探提高地震记录的分辨率。

二、地震记录的横向分辨率

在用于地质解释的地震时间剖面中，有水平叠加剖面 and 偏移剖面。偏移处理可使反射波归位于正确位置，绕射波收敛于一点，因而，偏移剖面的横向分辨率高于水平叠加时间剖面。然而，在实际地震资料解释中，也经常使用水平叠加时间剖面，为此讨论水平叠加和偏移剖面的横向分辨率是必要的。

1. 水平叠加时间剖面的分辨率

从物理地震学的观点看，反射波是界面上众多点源发出的绕射波叠加的结果，因而涉及一个面；其主要能量集中于界面的法线方向，振幅分布在一条带上；把主要能量分布的条带称为第一菲涅尔带。在第一菲涅尔带内，反射的全部能量到达时差都在二分之一周期范围内，因而产生相长干涉。地面上一个点所接收的反射波能量对应于地下第一菲涅尔带内反射能量总的贡献，因此第一菲涅尔带半径决定了横向分辨率。

在零炮检距情况下，第一菲涅尔带半径 r 与反射界面的深度 z 有如下关系：

$$r = \sqrt{\frac{vz}{2f_c}} \quad (1-7)$$

式中： v 为速度； f_c 为反射波主频。考虑到 $z = vt/2$ ，则 (1-7) 式可表示为：

$$r = \frac{v}{2} \sqrt{\frac{t}{f_c}} \quad (1-8)$$

式 (1-7) 或式 (1-8) 说明，当反射层越浅或频率越高，则第一菲涅尔带半径 r 越小，水平分辨率越高。也就是说，横向分辨率随着深度的增加而降低，随着频率的提高而改善。因此，凡地质体的横向宽度大于第一菲涅尔带半径 r ，则可用地震方法分辨出来；凡小于第一菲涅尔带半径 r 的，则无法分辨。断点、岩性横向变化点、小断块和岩体等在地震剖面上的清晰度，受横向分辨率制约。

2. 偏移时间剖面的分辨率

偏移是地震波场向下延拓的方式，即在每个反射点深度上计算波场。从物理地震学观点，在理论上偏移可使菲涅尔带收敛为一个点。这样，偏移时间剖面上的横向分辨率似乎仅受空间采样率的限制。

三、纵、横向分辨率之间的关系

图 1-1 表明了地震记录纵、横向分辨率的关系。从中可以看出，横向分辨率 ΔH 是纵向分辨率 ΔV 的水平分量：