

灾害地质体超前探测技术研究现状与思考

王齐仁 (湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要:总结了地下灾害地质体超前探测技术的研究现状和趋势;针对应用中存在的主要问题,提出了几点思考;对不同灾害地质体采用不同的地震反射波法与直流电法组合,通过数值模拟、模型试验和井下实验的观测和分析,找出有效、快速的综合观测方法,及其应用条件和最佳观测系统,提高超前探测的距离、精度和准确性。

关键词:灾害地质体;超前探测;直流电法;地震反射波法

中图分类号:TD166 **文献标识码:**A

Research actuality and considerations on the advanced detecting technology for hazard geological body

WANG Qi-ren

(College of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Research actuality and trend on the advanced detecting technology for underground hazards geological body have been summarized in this paper. Author has brought forward several thoughts on main problems existing in application. Different methods combination of seismic reflected wave method and DC exploration are used on different hazard geological bodies. That fast and effect integrative detecting methods, condition, its applied conditions and best observation system are found out by observation and analysis on numerical simulation, model test and underground experiment to improve distance, precision and veracity of advanced detection.

Key words: hazard geological body; advanced detection; DC exploration; seismic reflected wave methods

1 引言

地下地质灾害是指在矿山井巷掘进、隧道掘进、露天采场开挖、城市及军事地下工程施工过程中,所出现的突泥、突水、瓦斯突出、岩爆、冒顶与底鼓等灾害性地质现象^[1]。由于人工采掘活动等人为地质作用改变了地下岩体的自然平衡状态,当应力超过其强度时会产生变形,或当工作面前方、巷道四周存在断层、溶洞、陷落柱、瓦斯富集时,就可能导致“矿山淹井”、“瓦斯爆炸”、“塌方”等灾难性事故。因此,研究和应用科学的超前探测理论和技术进行准确的灾害预报,在矿山、隧道、地下工程建设等方面有着广阔的应用前景,不仅具有深远的理论价值,而且对于保护生命、财产安全具有十分重要的实际意义。长期以来,广大地球物理工作者进行了大量的试验研究和实际探测。针对井下安全、生产中的各种地质问题,各国相继开展了红外测温法、井下直流电法、地震波反射法、瑞雷波法、电磁波法(包括无线电波透视法和地质雷达法)等方法用于井下的研究,并取得了较好的地质效果。其中一些方法和仪器在矿区

得到推广和应用,解决了生产中不少实际问题,为探测和预报井下地质灾害做出了重大贡献。超前探测研究正趋向于探测方法综合化,仪器设备安全、轻便化,理论模拟三维化,资料处理可视化等方向发展,在不断提高超前探测精度和准确性的前提下,试图增大超前预报的距离,为地下工程防灾、减灾提供科学依据。

2 超前探测技术的研究现状

2.1 直流电法

目前,用于超前探测的电法勘探主要是直流电阻率法,包括矿井电剖面法、点电源法、巷道顶底板电测深法、层测深法、高密度电阻率法、直流电透视法等。它们都是以研究介质的导电性为基础,通过在地下建立人工直流电场,观测岩层沿测线方向或垂直测线方向的视电阻率变化规律来研究地电场分布规律、剖分地电断面,从而达到解决有关地质问题的目的。这些方法常用于探测巷道顶底板隔水层厚度及埋深、含水层富水段、含水溶洞和断层破碎带等低阻地质体,对独头巷道超前探测含水体有明显的

收稿日期:2005-2-25

作者简介:王齐仁(1963—),男,湖南浏阳人,副教授,博士研究生,从事地球物理勘探教学和科研工作。



地质效果,最大探测距离可达 80 m。直流电法因其设备和现场工作较轻便,对含水、导水构造的判断较准确,在煤矿井巷、隧道工程中侧帮和掌子面的超前探测中得到广泛应用,成为目前井下物探的主要方法之一^[2-8]。

其中,矿井电剖面法、巷道顶底板电测深法与地面工作方法相同,而层测深法是国外上世纪 90 年代发展起来的一种新的井下直流电探方法,其工作方法类似于赤道偶极测深法,主要用于煤层小构造的探测及其含水性评价;高密度电阻率法集电剖面、电测深于一体,采用多电极、多装置、多极距的组合方法(包括 Wenner、Schlumberger、Pole - Pole、Pole - Dipole、Dipole - Dipole 等装置),通过高密度的数据采集和对大量数据的分析处理,获得较完整、准确的地电信息;直流电透视法的工作方法与井下电磁波透视法类似,将供电电极和测量电极分别布置在井下工作面两相邻巷道中,观测和研究两巷道之间工作面内的电场变化规律,以探测工作面顶底板内的含水、导水构造^[3,4,7]。

对掌子面的超前探测主要采用“三极测深”模式“点源法”,从一点供电到两点供电,发展为“三点源法超前探测技术”,它由 3 个三极测深装置(单极—偶极装置)组成,如图 1 所示。在迎头位置沿轴线隔一定距离布置 3 个供电电极 A1、A2、A3,(无穷远极 B 极的距离 BO 应大于 $5 \times AO_{\max}$)分别供电,测量电极 M、N 沿轴线逐点后移,依次测量并记录每个电极供电时产生的电位差,可得到 3 条视电阻率(ρ_s)曲线。将这 3 条 ρ_s 曲线按横坐标对齐,根据高低阻异常特征、相应的位置和曲线起伏的一致性(是否同步)来判断前方是否存在不均匀地质体及其距离。该方法简单轻便、快速高效、施工安全,在煤矿井下超前探测应用较多,积累了较丰富的实践经验,但在

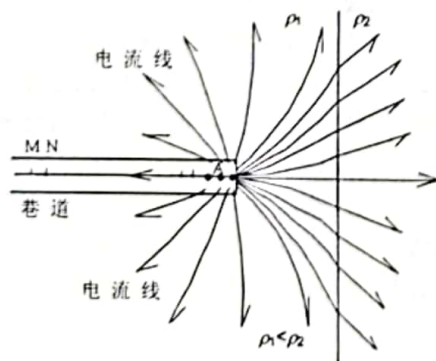


图 1 点电源法超前探测工作示意图

Fig.1 Diagram of advanced detection by point electrical source method

隧道施工中还很少采用。由于目前井下防爆型直流电法仪器供电电流的限制(最大为 80 mA),其探测距离受到影响(一般不超过 100 m),资料解释仍处于定性和半定量阶段^[5-7]。

2.2 地震波法

地震波法包括地震反射法、折射波法、瑞雷波法、槽波地震勘探、声波探测、声发射与微震技术等。其中反射波法和瑞雷波法是目前矿山井巷和隧道掘进工程中常用的超前探测方法^[9-15]。

隧道地震剖面法(TSP法)和隧道垂向地震剖面法(TVSP法)均属于地震反射波法。TSP(Tunnel Seismic Profiling)法是以工作面后方沿巷道布置多个浅钻孔作为炮点来激发地震波,在远离工作面一侧的某一点处接收来自前方界面的反射波,再根据反射波时距曲线实现超前预测预报,如图 2 所示。这方面,TSP202 超前地质预报系统是专门为隧道和地下工程超前探测而研制开发的设备,具有适用范围广、预报距离长、施测时间短、提交成果及时等优点。TVSP(Tunnel Vertical Seismic Profiling)法起源于前苏联的垂直地震剖面法,近年来又被用于隧道、井巷工程的超前探测试验工作。其工作方法是在巷道(隧道)工作面选一个点作震源,在工作面后方一定距离垂直巷道走向打一个钻孔,并在钻孔中安设若干个检波器(单分量或三分量)接收来自前方界面的反射波,如图 3 所示。二者都是利用反射波时距曲线来计算前方结构面的位置和产状^[9-12]。

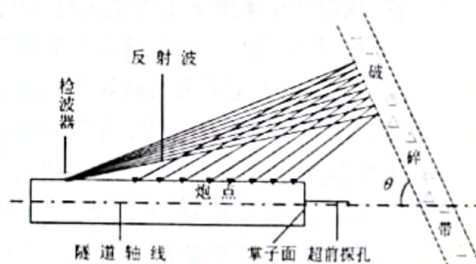


图 2 TSP 法工作示意图

Fig.2 Diagram of TSP method

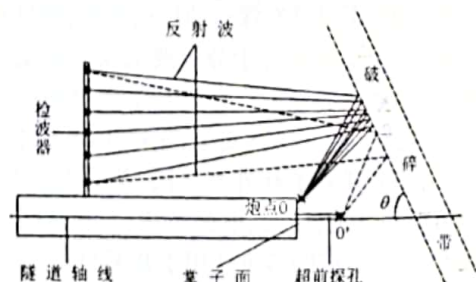


图 3 TVSP 法工作示意图

Fig.3 Diagram of TVSP method

此外,瑞雷波法是利用弹性波中瑞雷面波的传播特征,来探测前方结构面的一种物探方法^[13,14],目前我国研制的MRD-Ⅲ型瑞雷波探测仪已广泛应用于工程实践。该仪器可探测掘进头前方、巷道两帮和顶底板内的断层、陷落柱、溶洞、老窑等含水、导水构造,以及隔水层的位置和埋深。随着高精度、高灵敏度三分量传感器的应用,该仪器的有效探测距离可达50 m,探测范围和精度都有较大提高。

声波探测技术在井下主要用来研究岩石的声学、力学性质,探测岩体缺陷和应力松弛范围,评价其稳定性。

2.3 地质雷达

地质雷达探测方法是以介质的电性、磁性为基础,研究不同频率的电磁波经介质反射、透射、吸收后的能量衰减、频散作用和时间等参数的变化规律,利用宽带高频时域电磁脉冲波的反射特性来探测目标体,用于推测工作面前方地质异常体的形态和空间位置。上世纪70年代初期,由原来的煤炭、地矿部门及一些高校和科研院所进行了仪器设备的研制和野外试验工作。现在,国家地震局、水电、铁道、交通、黄河水利委员会等有关部门以及一些高等院校和工程勘测、检测单位都拥有国产或引进了国外的仪器设备,其实际应用和理论研究正在广泛、深入地进行。该方法对巷道两帮、面积较大的掘进头和顶底板的断层、陷落柱、老窑等含水水体有较好的探测效果,也可对煤与瓦斯突出进行探测和预报,探测距离可达60 m^[15,16]。

2.4 红外测温技术

红外测温技术是以岩石热传导、热辐射性质为基础,在一定的距离和观测精度下测量掌子面上的温度变化。根据含水水体与围岩的温差引起的温度异常场的分布规律,对其进行超前预报。该方法因轻便灵活、快速经济、不影响施工而被广泛采用,对于较小范围内(小于30 m)含水水体(溶洞、断层破碎带、岩溶裂隙发育带等)的超前预报具有较高的准确性,但目前仍局限于定性预报异常体的含水性,对含水量不能进行定量或半定量预报^[17,18]。

3 超前探测存在的主要问题

通常,产生地下地质灾害的岩、煤、水、瓦斯突出体(如断层、溶洞、陷落柱、瓦斯富集区等)与其围岩之间具有较明显的物性(如电性、弹性、放射性、热学性质、声学性质等)差异,为超前探测方法的应用提供了良好的地质—地球物理基础。井下超前探测一般距离探测目标较近,有利于探测精度和准确性的

提高,在矿井安全生产、隧道掘进、地下工程施工等领域取得了良好的地质效果。但多年的应用实践表明,这些方法在探测精度、准确性和探测距离等方面仍然存在许多问题,主要表现在以下几个方面:

a. 理论上井下所建立的人工物理场是“似全空间而非全空间”物理场,而实测中大多数方法都“假定地下场为全空间分布”,或“当极距较小时,电流场是半空间分布的”,反演时往往忽略巷道的影响,客观上存在理论与实际的不相符,探测结果必然存在偏差。

b. 如何在井下工作面小的不利前提下合理地选择物探方法和观测方案将直接影响到探测效果。而目前井下探测大多是地面物探方法加防爆技术,针对井下的应用条件研究还不够深入,方法试验多,理论研究少,对不同方法的使用没有形成相应的技术规程。

c. 井下干扰因素多(生产、运输的爆破、振动、大功率用电等形成复杂的干扰源,即使同一场源也存在多种路径),不利于有效信号的激发和采集,采用常规的传感器(或电极)和接地条件难以确保可靠、有用信息的获取和分离,“多解性”将更加突显,探测的准确性和精度难以保证。

d. 目前对全空间的二维、三维模型进行正反演模拟已趋成熟,但井巷条件下的三维地质—地球物理模型的模拟和计算方法尚须进一步研究;针对直流电场分布规律模拟相对较多,对其他场(如时间场、温度场等)的模拟较少;对巷道顶底板及两侧电法探测的模拟较多,而对掌子面前方存在异常体的模拟计算却很少。超前探测中井巷的空间响应和其它场源的干扰使得地下物理场的分布更加复杂,模拟更加困难。在资料处理方面,适用于地下井巷、隧道条件的三维反演技术还远未达到实际应用的要求^[19-20]。

4 几点思考

a. 探测方法的选择 井下观测结果是三维空间内任意方位地质体综合响应的迭加,通常单一方法无法准确地确定异常体的空间位置。因此,在对井下超前探测方法开展大量试验工作的同时还需做深入的理论研究,总结各种方法的优缺点及应用条件,进行方法技术的优化和组合。如将目前常用的“三点源法超前探测技术”和“TSP法”联合运用,则可以提高井下超前探测的准确性和精度;激电法在探测含水水体和瓦斯突出体方面具有独特的效果,既可获得视电阻率,又可获得激化率等参数,双频激

电仪可以克服井下因接地电阻过大、信号太弱带来的观测误差,提高观测精度,有利于获取有效信息;将天线进行合理的改造,瞬变电磁法(TEM)和可控源音频电磁法(CSAMT)在掌子面上探测的优势就能得到充分发挥,可避免电极直接接地,只需通过改变工作频率就可控制探测深度,而且实测工作简单轻便;矿井矢量电阻率法技术能更全面地反映地下各向异性介质中电流场的分布及其变化规律,有利于判定地质异常体的空间位置;“震电效应”的研究为多孔介质波动理论奠定了基础,在地震预报、油气和水资源的勘探中逐渐受到重视^[30]。若将其理论和观测方法引入井下地质灾害体的探测,联合运用弹性波场和电场这两种不同性质的物理场的特点,将为井下超前探测提供一种新的理论和方法。根据超前探测目标的基本特征和具体要求,选一种方法作为主要探测手段,再用 1~2 种方法进行辅助探测,采用综合探测方法有利于对探测结果进行客观解释。

b. 数值模拟和模型试验 井下物理场的分布规律较为复杂,巷道、采空区等不导电空间和超低速区的综合影响相互迭加,困扰着超前探测的资料处理与解释。针对不同探测目标如何选择有效方法,如何布置合理的观测系统,充分利用井下空间,都依赖于对巷道周围物理场及其异常规律的认识,依赖于井巷条件下的数值模拟。要实现井下电法资料由一维、二维反演解释向三维反演解释,由定性、半定量解释向定量解释的跨越,提高电法超前探测的应用效果,就必须进行井下三维地电模型的正、反演模拟,分开巷道影响和全空间效应,唯一地确定地电异常的空间位置。因此,必须充分利用有效的数学方法(如有限差分、边界元、有限元、角域法等数值模拟方法及其组合)和先进的计算机技术进行理论模拟,通过联合反演找出定性、定量规律。

加强室内模型建设,模拟不同工作面和巷道的空间响应,将模型试验结果和数值模拟结果进行对比,推导和建立理想条件下典型模型的理论曲线,以指导实测资料的分析解释。

c. 观测系统 观测系统(即场源和观测装置的布置方式,包括源的性质、能量,传感器的性能、安装方式、接地方式和源距等)是否合理将直接影响观测结果,而可靠有用信息的获取、信噪比的高低取决于激发方式和接收方式。因此,必须对理论计算和试验结果进行细致的分析、研究,确定各种观测方法的应用条件,针对不同地质目标,设计最佳观测系统。

对掌子面进行超前探测时,主要采用“三点源法

超前探测技术”和“TSP 法”。在施测时,充分利用超前探孔,将电极布置到探孔中去(如图 4 所示),则更适用于全空间理论,有利于“点源法”的探测和资料的对比解释;将震源布置到探孔前端,有利于激发有效地震波,提高“TVSP 法”的探测精度。

探测巷道顶底板及两侧时,通常采用偶极-偶极装置。由于体积效应,在巷道内进行电阻率测量时,反映的是整个空间的综合效应,即任意巷道面上的观测结果,都含有巷道四壁外测的地质体的信息。而异常大小不仅取决于物性差异也与地质体和观测系统的相对位置、距离和几何尺寸等有关,数值模拟结果亦表明,不均匀体所处位置主要影响它所靠近的侧面上的观测结果。图 5 为有限元模拟计算结果,设巷道边长为 4 m,顶部距离地表 100 m,电阻率取 $10^6 \Omega \cdot m$;底板下方存在截面为 $2 \times 2 m$ 的低阻长方体,其电阻率为 $5 \Omega \cdot m$,走向与巷道垂直,围岩电阻率为 $100 \Omega \cdot m$;采用偶极-偶极装置,点距 1 m, $AB = MN = 1 m$ 。当异常体的横向长度(与巷道轴垂直方向)分别为 2 m、4 m、6 m 时,布置在巷道顶板、两侧和底板上的测线所得到的等视电阻率断面图如图 5 所示^[19]。图 5 反映了异常体横向尺寸变化对顶板、两侧、和底板测线观测结果的影响:无论低阻体横向长度如何变化,顶板测线几乎无异常反映;底板测线上的异常最明显,且随低阻体横向长度增大,异常更加突出;当低阻体横向长度小于巷道宽度时,对两侧的观测结果影响很小,随着低阻体横向长度的

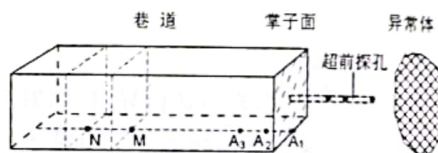


图 4 点源法观测系统布置图

Fig. 4 Diagram of observation system by three points electrical source method

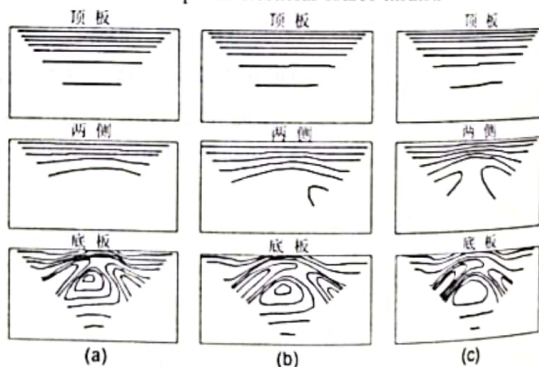


图 5 异常体横向尺寸增大对观测结果的影响

Fig. 5 Effect of abnormal body's vertical size on observation
a——横向长度 2 m; b——横向长度 4 m; c——横向长度 6 m

增大,对两侧的影响也逐渐增强,其异常的突显程度强于顶板而弱于底板。因此,只要测线和观测系统布置合理,异常体的空间位置是可以确定的。

d. 探测距离和探测精度 探测距离和探测精度是相互矛盾的两个方面,即探测距离越大,地质体信息越弱,探测精度就越低。由于地球物理勘探具有体积效应,探测结果是物理场作用范围内各种介质的物性、规模及其与观测系统相对位置关系的综合影响,在探测目标体与围岩之间具有一定的物性差异的前提下,其几何尺寸与埋深的关系(即深径比)决定了能否观测到有效异常。尤其井下直流电法,受到方法特点和井巷条件的限制,探测距离和精度都很难提高。通过数值模拟和模型试验对各种影响因素进行分析,可以确定在某种观测精度下的最大探测距离,或某一探测范围内的最高观测精度。实测中,要根据井下岩体物理、力学性质,充分利用现有井巷条件,确定合理的激发方式(场源的位置、性能)和接收方式(传感器的位置、角度),如图3、图4所示,将震源或电源布置到探孔的前端,有利于有效信息的获取、探测距离的增大和探测精度的提高。另一方面,要及时反馈巷道施工后获得的实际地质情况,与超前预报的距离进行对比,总结成功经验和失败原因,为后期井巷施工的超前预报提供参考。

5 结束语

井下直流电法和地震波反射法各有其优缺点,在矿井和隧道安全施工中都发挥了重要作用。实际应用中,要进一步提高地下地质灾害超前预报的准确性和精度,还必须对灾害体的物理性质和井巷条件各种空间响应进行全面、深入的研究,充分发挥现代数学分析方法、信号采集与数据处理技术和计算工具的作用,通过数值模拟、模型试验和井下实验的观测和分析,获得各种观测方法的应用条件和最佳观测系统,找出针对不同地质灾害体的有效、快速的综合观测方法。

参考文献

- [1] 张梁,张业成,罗元华,等. 地质灾害灾情评估理论与实践[M]. 北京:地质出版社,1998.
- [2] 刘天放,李志鹏. 矿井地球物理勘探[M]. 北京:煤炭工业出版社,1993.
- [3] 岳建华,刘树才. 矿井直流电法勘探[M]. 江苏徐州:中国矿业大学出版社,2000.
- [4] 王为民. 矿井下探测含水、导水构造的物探方法[J]. 煤田地质与勘探,1996,24(3):54-56.
- [5] 程久龙,王玉和,于师建,等. 巷道掘进中电阻率法超前探测原

- 理与应用[J]. 煤田地质与勘探,2000,28(4):60-62.
- [6] 刘青雯. 井下电法超前探测方法及其应用[J]. 煤田地质与勘探,2001,29(5):60-62.
- [7] 李学军. 煤矿井下点电源梯度法超前探测试验研究[J]. 煤田地质与勘探,1992,20(4):59-63.
- [8] 李金铭,罗延钟. 电法勘探新进展[M]. 北京:地质出版社,1996.
- [9] 张国,赵文,林韵梅. 地下坑道开挖前方结构面超前探测[J]. 工程地质学报,1997,5(2):169-173.
- [10] 刘盛东,吴军,张平松. 地下工程震波技术与应用[J]. 中国煤田地质,2001,13(3):59-61.
- [11] 丁恩宝,凌荣华,马继平. 隧道工程地质预报方法探讨[J]. 工程地质学报,1995,3(1):28-34.
- [12] 朱宝龙,陈强,魏有仪,等. TSP超前地质预报在圆梁山隧道施工中的应用[J]. 水文地质与工程地质,2003(1):81-83.
- [13] 夏宇靖,杨体仁,杨战宁. 瑞雷波勘探方法的原理、特点及应用效果[J]. 煤炭科学技术,1995,23(3):29-33.
- [14] 胡礼忠. 瑞雷波探测新技术在矿井巷道掘进超前探测中的应用[J]. 矿井地质,1997,17(1):32-35.
- [15] 高克德,王连成. 探测隧道掘进前方充水和瓦斯构造[J]. 公路,1994,(9):44-46.
- [16] 王连成. 隧道及工程地质中的快速地质雷达探测方法[J]. 地下空间,1999,19(5):359-362.
- [17] 王洪勇,张继奎,李志辉. 长大隧道红外辐射测温超前预报含水方法研究与应用实例分析[J]. 物探化探计算技术,2003,25(1):11-17.
- [18] 李惠彩. 红外测温法和定点源梯度法在巷道掘进超前探测中的应用[J]. 矿井地质,1997,17(1):88-89,97.
- [19] 黄俊革. 三维电阻率/激化率有限元正演模拟与反演成像[D]. 湘潭:中南大学,2003.
- [20] 艾金(Akin J E). 有限单元法的应用与实现[M]. 北京:科学出版社,1992.
- [21] 宋天霞. 有限单元法理论及应用基础教程[M]. 武汉:华中工学院出版社,1987.
- [22] 杨进. 应用地球物理数值模拟的迭代有限元法[M]. 北京:地质出版社,1996.
- [23] 马在田. 计算地球物理学概论[M]. 上海:同济大学出版社,1997.
- [24] 段本春,朱永盛. 电法二维有限元正演计算的若干新结果[J]. 物探化探计算技术,1994,16(1):56-64.
- [25] 底青云,王妙月. 稳定电流场有限元模拟研究[J]. 地球物理学报,1998,41(2):252-260.
- [26] 陶加祥,戴光明,王华军等. 圆柱体点源场有限元模拟[J]. 物探化探计算技术,2000,22(1):26-29.
- [27] 徐世浙. 地球物理中的有限元法[M]. 北京:科学出版社,1994.
- [28] 阮百尧,熊彬,徐世浙. 三维地电断面电阻率测深有限元数值模拟[J]. 地球科学,2001,26(1):73-77.
- [29] 阮百尧,熊彬. 电阻率连续变化的三维电阻率测深有限元数值模拟[J]. 地球物理学报,2002,45(1):131-138.
- [30] 刘洪. 震电效应研究在资源勘探中的应用前景[J]. 地球物理学进展,2002,17(2):211-217.