

文章编号: 1001-1986(2009)02-0055-04

地震勘探技术的新进展与前景展望

程建远¹, 王寿全², 宋国龙³

(1. 煤炭科学研究院西安研究院, 陕西 西安 710054;
2. 四川省煤炭产业集团有限责任公司 四川成都 610031; 3. 中国地质大学 北京 100083)

摘要: 近年来, 高分辨率地震勘探仪器装备、处理软件升级换代速度明显加快, 地震资料采集、处理与解释出现了一体化的趋势。综述了地震数据采集、资料处理和地质解释上的新进展, 分析了国内地震勘探技术与国外的主要差距, 并结合煤炭地震勘探技术的现状, 提出了未来煤炭地震勘探发展的技术思路。

关 键 词: 地震勘探; 研究进展; 发展趋势

中图分类号: P631 文献标识码: A

The new development and foreground expectation of seismic exploration

CHENG Jianyuan¹, WANG Shouquan², SONG Guolong³

1. Xi'an Branch, China Coal Research Institute, Xi'an 710054, China;
2. Sichuan Coal Industry Group Limited Liability Company, Chengdu 610031, China;
3. China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: Upgrade of seismic equipment and data processing software becomes more and more quickly, and seismic acquisition, processing and interpretation tend to be integrated. Some new development of seismic exploration over the world is summarized in the paper. There exists some gap in the seismic technology between China and other countries. Combined with the actual situation of coal seismic exploration, new technical thinking was put forward for future development of coal seismic exploration.

Key words: seismic exploration; research development; tendency

近年来, 随着电子技术、计算机技术的高速发展, 地震勘探的仪器装备、处理软件升级换代的速度明显加快, 地震资料采集、处理与解释的一体化趋势得到加强。本文将对近年来地面高分辨率地震勘探技术在数据采集、资料处理和地质解释上的最新进展进行综述, 分析影响国内地震勘探技术发展的主要问题, 并结合煤炭地震勘探技术的现状, 阐述未来煤炭地震勘探技术的发展方向与技术思路。

1 近年来国内外地震勘探技术的新进展

1.1 地震采集技术的新进展

一般地讲, 地震野外采集成本占勘探成本的 80% 左右, 因此世界各国为了降低勘探成本、提高勘探效果, 不断研发、更新地震勘探的仪器装备。

地震仪作为地震勘探的核心设备, 从 20 世纪 30 年代至今, 先后经历了光点记录、模拟磁带记录、数字地震仪、遥测数字地震仪、基于 $\Delta\Sigma$ 技术的 24

位 A/D 型遥测数字地震仪和全数字地震仪等 6 个标志性的更新换代。纵观近 5 a 来地震勘探仪器的技术变迁和发展, 可以看出: 以 24 位 A/D 技术($\Delta\Sigma$ 技术)、数字传感技术(MEMS 技术)、网络遥测技术、光纤通讯技术、数字存储技术、高速超大规模硬件技术、硬件功能软件实现技术和超万道大容量采集技术为代表, 地震仪器的研发广泛融合了地震勘探技术、电子技术、计算机技术、通讯技术、数字信号处理技术、数据传输技术的新成就以及新工艺、新材料等方面不断涌现的新发明, 向着技术指标越来越高、工作速度越来越快、采集和预处理能力越来越强、可靠性和稳定性越来越好、自动化和智能化程度越来越高、单道成本越来越低的方向迅猛发展^[1]。

伴随着地震仪器的技术进步, 地震数据采集方法在继续扩大原有的高分辨率三维地震成果应用范畴的基础上, 从采集思路上越来越多地体现出地震采集、处理与解释一体化的总体思路, 从采集技术

收稿日期: 2008-10-26

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2006CB202208); 科技部科研院所技术开发研究专项(NCSTE-2007-JK-ZX-190); 大型油气田及煤层气开发科技重大专项项目(2008ZX05040-003)

作者简介: 程建远(1966—), 男, 陕西乾县人, 博士生导师, 研究员, 主要从事煤矿采区地震勘探的科研工作。

上更多地强调单点(震源)、单道(检波器)、高密度(小道距、小线距)、高保真的采集模式，在采集方法上从最初的小道数二维地震逐渐发展到大道数三维地震、时延地震(四维地震)、矢量地震(三维多波)等；另外，在野外数据采集时，加强了采集方案优化论证、地震资料品质分析和定向照明设计、现场监控处理等基础环节的工作。总之，地震野外数据采集的装备与技术能力，目前已经完全能够满足全球范围内的沙漠、平原、山地、丛林、湖泊、海洋等作业环境的需要，在国内外能源地震勘探领域(油气、煤炭等)已经得到广泛应用，并成为能源地球物理勘探的核心技术^[2]。

1.2 地震处理技术的新进展

目前，无论是石油还是煤炭地震勘探的技术难度越来越大，可以用“低(信噪比低)、深(埋藏较深)、难(条件困难)、隐(隐蔽性强)”几个特点来概括^[3]，这几个特点反映到地震资料处理上，其特点表现为以水平、均匀、层状介质为假设的地震资料常规处理方法和软件，已经愈来愈不适应复杂介质条件的地震勘探资料处理，以往地震资料处理的一些关键模块遇到了难题和挑战，如复杂地表条件下的静校正、陡倾角条件下的叠加与偏移、非均匀介质条件下的动校正等。为了适应这些挑战，地震数据处理的硬件设备中，开始采用以 pc-cluster 集群为特征的并行处理机，以加快处理速度；地震资料处理方法中，已由常规的叠后偏移向叠前偏移发展，地震叠前偏移(时间域或深度域)处理已于 2006 年成为石油地震资料处理的必然要求，且已经开始在煤炭地震资料处理中得到应用^[4]。

另外，多次波压制技术、低信噪比资料处理技术、地表层析静校正技术等应对复杂条件下地震资料处理的关键模块不断发展，服务于处理解释一体化的地震叠前 AVO 技术、叠后约束反演处理技术等也取得了明显的效果。

1.3 地震解释技术的新进展

经过 20 多 a 的发展，地震资料解释的计算机系统，已经从工作站单机版模式、服务器—用户终端模式、服务器—客户端网络模式，发展到多服务器的“服务器-客户端”网络模式；随着微机性价比的迅速提升，基于 Linux 系统的高配置微机工作站已经能够完全胜任地震解释的要求，从而出现了微机解释平台的“Linux 风暴”。

近几年来，地震解释技术发展迅速，地震数据采集、处理、解释一体化的步伐明显加快。所有从事地质科学的人员——不仅仅是地震资料解释专家，也包括地质专家、岩石物理专家、油藏工程师等，联合组成协同工作组^[5]，可以将地震资料、地

质模式、钻井资料和油藏开发史等有机结合起来，地震资料的处理不再是独立的处理步骤，而是整个解释过程中的一部分，其目标就是建立一个非常详细的地质模型，而各种软件的普及使得解释处理过程中的部分工作，可以由越来越新的智能型软件自动完成；三维地震可视化解释技术、虚拟现实解释技术的出现，在物探人员和地质人员之间架起了一座“桥梁”，如今的地震勘探的瓶颈问题不再是数据处理所需要的时间，而是物探解释人员和地质工程师利用这些信息做出综合判定的速度^[6]。

在地震解释的新方法、新技术中，地震属性分析技术、相干体解释技术、方差体解释技术等发展迅速，地震资料除了能够完成常规的构造解释任务外，综合利用地震资料和沉积学知识开展的地震地层学解释、层序地层学解释、地震资料岩性解释和储层精细描述技术等也取得了积极的进展^[7]。

总之，地震勘探技术经过近 80 a 的快速发展，经历了从模拟阶段进入数字时代、从一维勘探发展到三维地震乃至四维地震、从单分量接收到多分量接收、从地面勘探到立体勘探、从构造勘探到岩性勘探、从均匀层状介质到各向异性介质理论等技术进步，取得了一系列技术创新成果。近年来，石油工业的地震勘探技术逐步形成了高精度地震、三维地震连片处理、重磁地震联合反演、精细储层描述等综合勘探技术系列，在交互三维地震构造解释、断层分析、地震反演、属性分析、三维可视化、地质建模与地质统计技术等方面取得了重大的研究进展，促进了复杂油气藏的勘探。据专家预测，在今后一段时间内，石油地球物理勘探技术的发展方向将从目前的勘探地球物理为主，逐渐转向开发地球物理为主；为了满足复杂勘探对象的地下成像、储层描述和油藏检测等新的需求，高密度地震(万道地震采集)、高精度地震(精细解释)、三维可视化与虚拟现实技术以及地震勘探新技术(三维三分量地震—3D3C、全方位纵波地震—AVA、时延地震—4D、三维 VSP—3DVSP、井间地震等)等地震勘探新方法、新技术正在发展、完善和成熟，代表着今后一段时期内地震勘探技术的发展趋势。

2 国内地震勘探技术的主要差距

我国石油、煤炭地震勘探技术整体上处于国际先进水平，但从技术长远发展的角度出发，也还存在着一些明显的差距。

2.1 缺少具有自主知识产权的大型地震仪器装备

目前，国内石油、煤炭行业地面地震勘探的大型仪器装备主要依靠进口，法国的 SERCEL、加拿

大的 ARIES、美国的 IMAGE 和 BOX 仪器等世界几大地震仪器生产制造商的产品，几乎在国内地震勘探市场上占据了垄断地位；同样，用于地面激发地震波的可控震源、VSP 采集及井间地震数据采集的多级多分量检波器等设备也大多依靠进口。

国内的地面地震仪器生产厂家尽管也开发、生产一些大型地震设备，但是由于缺少具有自主知识产权的独占技术，大多限于仿制、研发阶段，没有形成大规模的生产能力，致使国家每年需要花费大量外汇去引进设备；而国外地震仪器设备的研发能力、更新速度很快，有时也给国内用户在硬件的通用性、软件的兼容性等方面造成一定的困难。

2008 年，国家科技重大专项《大型油气田及煤层气开发》项目中，将“全数字万道地震数据采集系统”列入重大装备研发之列，该项目完成后，将缩短我国在地震勘探采集设备生产上与国外的巨大差距。

2.2 商品化的国产地震处理解释软件有待升级与推广

目前，地震野外采集设计软件，主要有美国绿山公司的 Green Mountain 软件、加拿大的 Omini 软件、法国的 CGG 软件、PGS 公司的软件等，国产地震数据采集设计软件，只有北京科浪公司的一款软件；在地震资料处理上，国外软件主要有法国的 CGG 软件、美国的 Promax 软件、帕尔代姆公司的 GeoDepth 软件、Focus 软件以及西方地球物理公司的 Omega 软件等，国内具有自主知识产权的处理软件，仅有东方地球物理公司的 Grisys 处理软件；地震资料交互构造解释、断层分析、地震反演、属性分析、三维可视化、地质建模与地质统计软件，国外软件更新较快，而国内仅有东方公司的 GRISTATION 可以与其抗衡^[8]。

实际上，国内从事地震处理解释软件研发的力量并不薄弱，也形成了诸如 GRISYS、GeoEast、KL、Doublefox 等在内的一些别具特色的专用处理软件，但是在软件功能、界面设计以及推广应用等方面与国外存在着明显的差距。

2.3 地震勘探新方法新技术的研发投入不足

目前，随着地震勘探的对象由简单构造到复杂构造、由构造勘探进入岩性勘探、从简单地表转向复杂地表、由浅层勘探进入深层勘探等新情况的出现，原有的基于水平层状均匀介质的基础理论已经显示出了一些不适应性，各向异性理论、多相介质理论以及非线性算法等，成为世界各国地震勘探的研究热点。

国内地震勘探技术的研发机构主要以中石油、中石化和中海油三大公司所属的研究机构和石油物

探公司以及部分高校研究人员为主，在国家科技部、发改委和石油公司逐年增加投入的情况下，已经取得了不少的研究成果，有力地支持了老油田的潜力挖掘和新油田的发现。但是，与国外同行相比，尽管投入地震新技术新方法的研究人员数量众多，由于体制与机制问题，没有形成跨系统、跨部门、跨专业的集成研究优势，造成低层次、重复性、应用性的研究成果较多，这从发表在国内外刊物上的文章数量与质量就可以看出。

2.4 地震采集处理解释一体化的模式有待完善

地震勘探技术作为地球物理勘探的一项核心技术，在地震地质解释上不可避免地存在着多解性。为了克服这一问题，国外公司比较注重地震正演模拟与反演解释的结合，注重物探技术与地质学、石油工程等其他学科的结合，注重建立多学科的协同工作组，实现勘探开发一体化的综合勘探模式。

在地震采集处理解释一体化方面，在市场经济条件下，我国石油、煤炭、地矿等不同部门在同一区块重复勘探、资料互相封锁的问题尚未解决，即使在同一部门内部，也存在着专业化划分过细、不同专业之间的融合不足等问题，因此在一体化勘探模式方面我们与国外公司还存在着很大的差距。

3 煤炭地震勘探存在的问题与对策

我国煤炭地震勘探技术经过 50 a 的发展，伴随着仪器制造技术、计算机技术和信息技术的发展，出现了几次重大的技术飞跃，目前已经成为煤炭资源地质勘探与开发的首选技术。目前，地震仪器正向遥测遥控、高采样率、多道发展，A/D 转换器达到 24 位；地震资料处理解释技术快速发展，人机联作解释技术日趋成熟；同时，伴随着全球石油价格的波动，煤炭作为基础能源的地位日益凸显，煤炭地震勘探迎来了一个难得的发展机遇，也面临着一些新的挑战。随着煤矿综采机械化技术水平的不断提高，综采放顶煤技术、锚网支护技术、全断面光面爆破技术等综采配套技术发展很快，对于地震勘探的精度又提出了新的更高的要求，如在构造勘探上要求达到探查 3~5 m 的断层、在岩性勘探上要求能够预测煤层厚度变化、裂隙密集带、地应力集中区等。这一切都迫切需要在现有基础上进一步提高地震勘探的技术水平。

3.1 集中技术力量，形成团队优势，加强基础理论研究

近年来，我国煤炭行业地震勘探的实物工作量堪称世界第一，地震勘探的应用范围在不断扩大、小构造的解释精度不断得到提高、岩性勘探也取得

了一些进展，但是获得的成果主要局限在一些应用性的研究和技术推广，原因在于：煤炭行业地震新技术新方法研发方面投入的人力、物力、财力远远不足，这在很大程度上制约了煤炭地震勘探技术的发展。

目前，随着国家经济体制、管理体制改革的不断深化，原有的从事煤炭地震勘探技术的科研单位转制为企业、部分高等院校的研究人员热衷创收，造成了煤炭地震勘探基础研究的“缺位”，从 1994 年三维地震在煤矿采区获得重大技术突破以来，近几年的不少科研成果局限于应用技术研究，一些成果出现了低层次的重复等。在现有条件下，迫切需要在国家大型科研项目的支持下，集中各方技术力量，形成团队优势，加强基础理论研究，这些基础研究内容至少应包括煤层气的地震响应特征、薄互层煤层勘探、深层煤矿床地震勘探、全数字高密度地震勘探、沉陷区下组煤勘探、煤矿井下地震勘探等内容。在此基础上，以基础理论研究成果作为支撑，引领煤炭地震勘探技术实现第四次技术飞跃^[9]，以适应煤矿高效安全开采日益增强的地质需求。

3.2 产学研相结合，开展探采对比，发挥现有技术水平

我国东部地区的主要煤矿，大部分接续采区都开展了三维地震勘探，由于在勘探阶段地面钻孔偏少、对本区地质条件的认识程度不高等原因，在地震资料的处理、解释过程中，难免出现技术针对性不强等问题，如三维地震偏移速度百分比难以界定、片面强调信噪比造成的小断层反应模糊以及地震时-深转换速度不准等，给生产部门使用地震资料造成较大的困难^[10]。

与石油地震勘探只能借助钻孔进行验证相比，煤矿开采过程中几乎能够全部验证地震资料，因此煤炭地震勘探成果的探采对比研究具有得天独厚的优势。应将国内外石油地震勘探中广泛采用且臻于成熟的地震资料二次处理、解释、验证、再处理、再解释的反馈模式，应用于煤矿采区三维地震勘探成果的后续应用上，发挥“产、学、研”相结合的优势，开展三维地震成果的探采对比与分析，实现三维地震资料的地质动态解释技术，以期充分发挥三维地震勘探技术应有的效能。目前，在兖州、龙口、峰峰、邢台、淄博等矿区已经开展的工作成果表明，该技术具有良好的地质效果和广阔的推广空间。

3.3 围绕技术难题，进行协同攻关，提高西部煤炭地震勘探精度

在未来的 3~5 a 时间里，煤炭地震勘探技术的推广应用将重点转向西部地区，如我国西南云贵川

复杂碳酸盐岩地表条件下的地震勘探，我国中西部山区、黄土塬区、沙漠戈壁地区等。在我国东部地区业已取得显著成效的煤矿采区三维地震勘探技术，在西部将面临着地表条件复杂(如黄土覆盖、基岩裸露、地表崎岖)和地下条件复杂(如陡倾角、薄互层)等问题带来的激发接收、静校正及地震成像等难题。这些问题在我国西部地区石油勘探中已经得到很好的解决，而对于煤炭地震勘探尚需要开展针对性的研究与攻关。

西部地区的煤炭资源占全国煤炭资源蕴藏量的 2/3 以上，围绕目前困扰煤炭地震勘探的上述技术难题，急需发挥石油、煤炭地震勘探行业的综合技术优势，开展跨行业、跨部门的协同攻关研究。

3.4 加快人才培养，提高服务质量，实现持续稳定发展

目前，我国原有的 15 所煤炭行业高校、42 所中专学校中，已有 14 所“摘煤帽”、“脱矿衣”，中等专业学校也所剩无几；据对 9 所原煤炭高校的不完全统计，1999—2002 年间的地矿类专业毕业生 1 454 人，真正分配到煤炭企业工作的不足 500 人，煤炭人才断档进一步扩大，这将直接威胁到煤炭地震勘探行业的未来发展；另外，近年来煤炭地震勘探行业愈演愈烈的价格战、重价格轻质量的危险倾向，不利于服务质量的提高，最终也将极大地损害业主的利益，需要多方以理性的认识加强行业自律，保持煤炭地震勘探技术的持续健康发展。

参考文献

- [1] 周明非. 地震勘探关键技术发展概览[M]. 北京：石油工业出版社, 2006.
- [2] 熊翥. 21 世纪中初期油气地球物理技术展望[M]. 北京：石油工业出版社, 2006.
- [3] 中国石油天然气集团公司油气勘探部. 东部深层目标地震攻关研讨会论文集[C]. 北京：石油工业出版社, 1999.
- [4] 邹才能, 张颖. 油气勘探开发实用地震新技术[M]. 北京：石油工业出版社, 2002.
- [5] LAWRENCE M, GOCHIOCO. Geophysical technology for detecting underground coal mine voids-An interactive forum[J]. The Leading Edge, 2003, 22(9): 848–920.
- [6] SATINDER C, VLADIMIR A, VASUDHAVEN S. High-frequency restoration of surface seismic data[J]. The Leading Edge, 2003, 22(8): 730–738.
- [7] 张永刚. 油气地球物理技术新进展——第 75 届 SEG 年会论文摘要[C]. 北京：石油工业出版社, 2007.
- [8] 曲寿利, 王鑫. 国内外物探技术现状与展望[M], 北京：石油工业出版社, 2003.
- [9] 程建远. 中国煤矿采区地震勘探技术的回顾与展望[J]. 煤田地质与勘探, 2004, 32(增刊)：30–36.
- [10] 程建远. 三维地震资料解释性处理技术[M]. 北京：石油工业出版社, 2003.