

高精度煤炭三维地震勘探技术

武 喜 尊

(中国煤炭地质总局, 北京 100039)

摘 要: 介绍了中国煤炭地震勘探技术的现状及所面临的问题, 分析了煤炭三维地震勘探技术今后应努力研究和须重点关注的几个问题, 如频率的问题, 小面元高密度采集问题, 加强叠前研究工作问题, 及单点地震技术应用问题, 从而实现高精度勘探的目的, 满足煤矿生产、建设、安全等日益增长的需要。

关键词: 分辨率; 网格; 偏移; 单点地震

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2008)02-0023-05

煤炭三维地震勘探始于 1978 年, 相对二维地震而言, 三维地震数据量大, 准确可信, 有长期的保存价值; 偏移归位准确, 横向分辨率高, 有利于复杂构造和小构造的研究; 地震反射波对振幅有更大的保真度, 有利于地层岩性的研究; 资料解释的自动化及人机交互解释系统的发展, 有利于资料解释精度的提高, 因此, 它具有更优的经济技术合理性。自从 1978 年中国煤炭地质总局在伊敏煤田中部开始了我国煤田地质系统第一块三维地震勘探试验工作, 为煤炭地质系统开展三维地震勘探进行了积极的探索。1988 年又在山东省济宁煤田唐口中日合作勘探项目中, 首次进行了煤田地质系统第一个三维地震勘探生产项目, 取得了良好的效果, 为今后的煤矿采区三维地震勘探积累了经验, 打下了良好的技术基础。

十几年来, 在广大煤炭物探工作者的共同努力下, 三维地震采集、处理 and 解释技术有了大幅度提高。发展和完善了全三维地震数据处理技术, 引进和开发了叠前偏移、三维目标处理、各种复杂地区的三维地震静校正方法等技术; 丰富和发展了全三维地震解释技术, 实行剖面、平面和立体解释相结合的综合解释办法, 充分利用切片解释技术、地震属性解释技术、断层模式识别技术、三维可视化技术、相干体及方差体小构造解释技术来提高解释精度; 并且在地震解释过程中由物探、地质、设计人员共同完成, 地震资料和已知地质资料、矿井地质资料紧密结合, 提高了解释精度, 缩短了解释周期; 三维地震勘探得到了迅速的推广应用, 地震勘探的精度和分辨率大大提高, 三维地震取得的地质成果在优化矿井

设计、合理布置采区和工作面、提高资源回收率、延长矿井服务年限和保障安全生产等方面起到了重要作用, 获得了巨大的社会效益, 得到了广大煤炭企业和社会的一致认可, 成为我国煤炭生产建设安全不可或缺的重要手段。尽管如此, 在实际应用过程中还有许多问题没有完全解决, 还不能够满足煤矿生产安全及高产高效的要求, 同时煤炭生产企业对这项方法技术又提出了新的更高的要求, 需要我们继续进行深入研究。

1 高精度三维地震勘探技术关键

1.1 提高地震勘探的频率

众所周知, 根据地震勘探原理地震数据的频率决定了地震勘探的纵向和横向分辨率, 决定了地震勘探的分辨率。菲涅耳带的直径决定了偏移前的横向分辨率, 而菲涅耳带厚度决定了纵向分辨率。

菲涅耳带是反射面的一部分, 其反射的能量到达一个检波器的时间在首先反射的能量的半个波长以内。在这个区间内到达的能量其干涉是相长的。反射区 AA 被称为第一菲涅耳带 (图 1)。在此带内的 2 个反射点一般认为在地面观测时是不可分辨的。垂直入射时的菲涅耳带半径 r_f 近似为

$$r_f = [(z_0 + \lambda/4) - z_0^2]^{1/2} = (z_0\lambda/2 + \lambda^2/16)^{1/2} \approx (z_0\lambda/2)^{1/2}。$$

上式简化为

$$r_f = \frac{(t_0 v_{rms} v_{int} / f_{dom})^{1/2}}{2},$$

式中, f_{dom} 是所考虑的优势频率, λ 是优势频率波长, v_{ms} 是均方根速度, v_{int} 是目的层上一层的速度。从上式可看出, 频率越高菲涅耳带越小, 分辨率越高, 频率越低, 菲涅耳带越大, 分辨率越小。菲涅耳带的纵向厚度

$$z_f = \lambda/4 = v_{\text{int}} / (4f_{\text{dom}})。$$

其双程时间厚度

$$t_f = (2\lambda/4)/v_{\text{int}} = \lambda/2v_{\text{int}}。$$

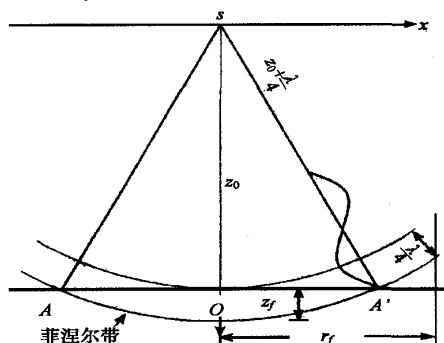


图1 在 (x, x) 空间的菲涅耳带 AA' 示意(引自 Yilmaz, 1987)

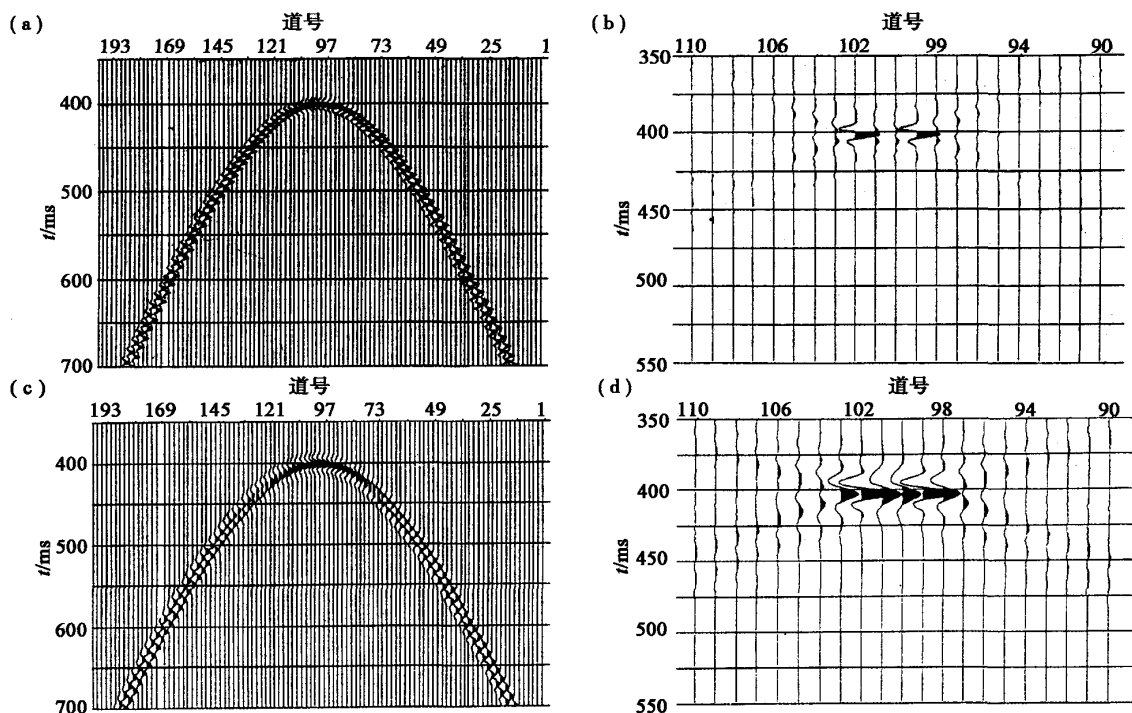
在偏移前如果 2 个绕射的距离小与第一菲涅耳带直径, 它们就不能分辨开。在偏移后, 横向分辨率依赖于目的层反射波的最高频率。如图 2 所示, 2 个绕射的距离若小于最高频率的一个空间波长, 它

们就不能分辨开, 2 个绕射的距离大于最高频率的一个空间波长, 它们才能分辨开。由于最高频率在实际工作中很难测出, 也可以用优势频率来进行测算。经验法则就是在优势频率的波长上取 2 个样点, 即横向最小可分辨的距离为 $v_{\text{int}} / (2f_{\text{dom}})$ 。三维数据的偏移能使菲涅耳带直径收缩到近似于优势波长的 1/2。而纵向分辨率就是目的层上一层的优势频率的波长的 1/4。

由以上分析可知, 地震勘探数据的频率对地震勘探分辨率(纵向、横向)起着定性作用。频率越高分辨率越高, 反之则低。同时, 频率的大小也决定着地震采集观测系统的选择、接收方式及处理时的技术运用。所以地震勘探数据的频率是一项基础性、决定性指标, 要想提高地震勘探解决地质问题的能力, 就必须首先努力提高地震勘探反射波的频率, 否则就难以实现目的。另一方面使用速度更低的波, 也可有效地提高分辨率, 所以也要在激发和利用低速波方面进行探索和研究, 这也是一种提高分辨率的有效途径和办法。

1.2 要推广实施小网格采集技术

构造的识别还需人的视觉来识别, 尽管现在三维解释手段方法很多, 技术发展也很快, 无非也是用来提高构造的可识别能力。如果一个构造体或单元



a—偏移前, 100Hz, 2 个绕射相距 30m; b—偏移前, 50Hz, 2 个绕射相距 30m; c—偏移后, 100Hz, $\lambda = 30\text{m}$; d—偏移后, 50Hz, $\lambda = 60\text{m}$

图2 不同频率克希霍夫偏移前后的地震剖面对比

没有足够的地震信息,就会无从识别或识别不清。近几年来随着多道地震仪的大力发展,实行小网格高密度采集的可能性已成为现实,有些仪器实现了实时 10 万道的接受能力,这就为实现高密度小网格采集奠定了基础。随着计算机技术的发展,计算机的存储能力和计算速度都有了极大地提高,也满足了小网格高密度地震数据的处理及解释要求。为满足煤矿生产建设安全提出的解决更小构造更多地质问题的需求,必须提高地震勘探的数据采集密度,获得更多更为丰富的地震信息,才有可能实现提高地震解决地震问题的能力。

采用小网格采集主要是想实现提高横向分辨率,在上一节已讨论过横向分辨率的问题,集中讨论了地震波频率对分辨率的影响,下面重点讨论采集网格对分辨地质体或构造的作用。通常,一个地质目标在一个方向上最少需要 2~3 道,这样在平面上就会有 4~9 道数据来显示它,如果道数太少就不可以对其进行分辨及识别。当然如果网格太小也不会增加更多的有用信息,如果面元尺寸比横向分辨率更小,不会得到更多的内容,然而,如果用更大的面元就有可能漏掉小的构造,有些地质体在横向上就会分辨不开。在设计高密度采集观测系统时要统筹考虑以下几个因素:一是目标地质体的大小尺度,二是针对倾斜层的最高无混叠频率,三是横向分辨率。既要考虑地质体的清晰可视及可检测性,又要考虑实际的成本,做到既经济,又可行。好在如今地震仪器的道数都比较多,实现高密度采集成本增加不是很大,估计网度增加一倍,生产成本增加 30% 左右。主要增加在现场施工的测量、布线、检波器埋置等及后续的处理方面。

目前我国大部分采区三维地震的 CDP 面元是 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$,在山西大部分地区已采用了 $5\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的 CDP 网格。众所周知,三维数据面元最好用正方形,这样 2 个方向上的横向分辨率就是一致的,如果是矩形 2 方向上横向分辨率就不一致。如果按 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的网度进行采集,那么横向上的采样间隔是 10 m ,而纵向一般采用 0.5 或 1.0 ms 采样,换算成长度单位,如果煤层顶板岩层速度按 $3\ 000\text{ m/s}$ 左右,煤层速度 $2\ 000\text{ m/s}$ 左右计算,那么煤层顶板反射波的纵向采样率为 1.5 m 或 3 m ,煤层底板反射波纵向采样率为 1 m 或 2 m ,大家知道地震数据的时间都是双程时间。由此可见纵、横向采样间隔在深度上相差比较多,横向上采样率明显低于纵向采样率,当纵横向分辨率一致时对地质体的显示是最直观和最保真,也最容易识别,同时由于空间

采样率较低,在偏移或 F-K 滤波处理时,容易产生空间假频,影响分频率的提高,从这两方面来讲我们也有必要进一步提高横向采样率。

如果煤层倾角 θ 按 10° 考虑,煤层速度、煤层顶板岩层速度还按上述所设,煤层反射波主频或优势频率按 50 及 100 Hz 考虑,煤层反射波最高频率按优势频率的 2 倍估算,那么按照计算可知,偏移后煤层顶板反射波横向分辨率是 30 和 15 m ,而煤层底板反射波的横向分辨率是 20 和 10 m 。对于倾斜地层还要考虑最高无混叠频率,我们把煤层底板反射波最高频率当作最高无混叠频率,那么最大允许面元边长 $[v_{\text{in}}/(4f_{\text{dom}}\sin\theta)]$ 为 28.8 和 14.4 m 。如果地震波的最高频率达到 300 或 400 Hz ,那么煤层底板反射波的横向分辨率是 6.7 和 5 m ,最高无混叠频率情况下的最大允许面元边长为 9.6 和 7.2 m ,如果煤层倾角加大或煤层反射波最高频率按优势频率的 2 倍以上考虑,那么横向分辨率和最大允许面元边长还将进一步缩小。由此可见,频率对面元边长的选则影响很大,面元尺寸的大小对分辨率有极大地影响和控制作用,如果面元尺寸太大,对高频部分就造成一种极大的浪费,对分辨率的损失是不可挽回的,后需提高高频部分能量、拓宽频谱的工作和努力就很困难或意义不大。当然网格太小也没有太大的必要,会造成不必要的浪费,但不会造成频率的降低,有保护高频的作用,有利于小构造识别。

综合上述分析,在选择 CDP 网格时要统筹考虑,抛开经济因素外,要考虑测区的地质情况,地质任务及地震地质条件,同时要考虑处理工作所带来的有效频带的拓宽这个重要环节,和期望得到的最高频率也就是期望达到的分辨率。煤炭三维地震勘探高密度采集的网格或横向采样间隔应根据目标地质体的大小,地层倾角及横向分辨率综合确定,并且要立足于煤层底板反射波来计算和选择,要立足于满足构造解释与识别来选择。

1.3 加强叠前数据的分析处理和信息提取

目前由于多次覆盖技术使用,使地震数据变成原数据量的叠加次数分之一,使地震波信噪比大大提高,对解释构造效果十分明显,正是由于多次覆盖技术的使用,使地震勘探技术取得了辉煌的地质成果,已成为石油、煤炭等勘查的重要的不可或缺的手段,这已是不争的事实。

由于近年来采区地震勘探工作量增长较快,重点集中在研究解决影响煤矿的构造上来,并且主要集中对偏移数据体的解释与分析,许多有关岩性的解释研究也大多立足于偏移数据体上。其实每一种

地震数据体都含有丰富的地质信息,如 DMO 叠加剖面,可以通过地震特征波(例如绕射波、回转波等)来识别一些特殊的构造,如小的断块、陷落柱、向斜及背斜等。在 DMO 叠加剖面上这些构造显示得要比在偏移剖面上更清楚、更直观。这些小构造如陷落柱等由于其本身尺寸较小,所以经过偏移后基本上显示出其实际的大小,在偏移剖面上显示的地震道数骤降,对识别和解释造成了难度,极易产生漏解释,影响了地震勘探的作用和效果。

多年来,地震工作者一直在努力通过对地震数据的分析获得更多的地质岩性信息,众所周知,由于三维地震勘探数据量非常大,包含了十分丰富的地质信息。但是由于目的层岩性变化是渐变的,引起的地震波变化也是比较微小的,地震道通过静校正、叠加、偏移等处理后,这些微小的变化往往已经很难再有显示,同时也具有多解性。特别是偏移,大家知道偏移就是划弧叠加,由于很难获取准确的速度,所以偏移往往容易抹煞这些由于岩性变化所引起的微小变化,在偏移剖面上不能够真实地反映这些变化。所以我们要充分利用各种叠前地震道集数据进行地质岩性解释,如共偏移距道集、共方位角道集等,而不是仅仅利用偏移后的剖面,我们应该重点在道集上进行地质信息的提取和解释,这样的地质成果才可靠和准确。对道集数据进行岩性解释,要有足够量的数据才好进行分析,这就需要高覆盖次数和高密度小网格的数据才行。同时对于叠前偏移等处理技术也需要高覆盖次数的数据。从投资角度、技术发展及地震勘探提供更多地质信息考虑,今后也应该加强道集数据的分析解释研究工作,使地震勘探的效益作用得到充分的利用和开发。

同时应加强叠前偏移处理技术的推广应用。如今制约地震勘探叠前处理技术运用的计算机制约因素已经不存在了,叠前处理技术的优越性已为众人所了解,它对提高偏移精度,提高成像质量有着良好的作用和效果,这已被多次实践所证明。当前至少应该大力推广使用叠前时间偏移处理技术,特别是针对一些地层倾角比较大的地区,构造复杂地区,把它纳入常规处理流程当中去,对一些复杂构造区块试用叠前深度偏移处理技术,获得了良好的效果。对于地层倾角大的地区,利用常规叠后时间偏移成像质量差,难以完成地质任务,利用叠前时间偏移处理技术,成像质量明显提高,获得了良好的地震偏移数据体,经过解释取得了非常好的地质成果。

1.4 探索单点地震勘探技术的应用

单点地震勘探是近年来提出来的一项勘探技

术,其核心就是在野外实行高密度空间采样,即点源激发、单点接收、小道距或小面元观测,对信号和噪声实行“宽进宽出”,避免采集过程中因对付噪声而使反射信息受到污染,然后利用计算机中的数字分析方法将信噪分离,在室内进行组合,最后达到压制噪声的目的,保持反射信号原始性和丰富性。

单点地震勘探技术重要的一项核心技术就是室内组合处理技术,室内组合处理可以避免检波器组合误差,理论分析和实际数据验证单点接收、室内计算组合是提高数据质量的良好手段。组合的方向特性可以压制规则干扰波,统计特性可以压制部分随机噪声。特别是低信噪比地区或复杂地区,当地下反射界面倾斜、有断层或上覆层复杂时,原始资料的简单叠加可能会破坏有效反射,从而降低资料的信噪比。室内组合比野外组合的优势在于室内组合的应用不局限于原始地震资料,并且室内组合方式较多,可以针对不同地质目标采取灵活的组合方式获得所需的不同尺度面元、不同覆盖次数的数据体,以满足对不同尺度构造解释的需要,同时能有效避免野外组合存在的一些问题。野外组合是限制数据质量的一个主要原因,组合虽然可以压制噪声,但也限制了动态范围。单检波器室内组合有 2 个主要优点:可实施适当的空间去假频滤波,校正检波器的差异、静校正问题等引起的误差。消除了高程、静校正等因素后的道集组合可以减少相邻道时差在组合时的滤波影响,由于激发接收点的密度增大,静校正的精度计算精度会提高。

高密度采集技术可以在野外道组合的基础上,在处理的适当步骤中还通过室内组合进一步压制噪声。时差越大,频率特性的通频带越窄,高密度采集技术使相邻道的时差减小,从而保证了较宽的频带范围。高密度勘探炮检点不采用组合或采用小基距组合,避免了普通组合带来的低通效应,因此有利于提高剖面的分辨率;由于空间采样面元的缩小,利于寻找小断层、小幅度构造,利于复杂地质体的偏移成像;由于高密度采集采用点激发、点接收,各个方向的信号都被真实地记录下来,避免了普通采集各向组合滤波特性不同的问题,因此更有利于各向异性问题。

总之,单点地震勘探高密度采集技术有利于提高矿藏及其构造的精细刻画与描述的效果,有利于提高地震勘探的精度,完成在各种复杂地区的勘探任务,有利于提高地震资料的信噪比和分辨率,改善成像质量,减少采集脚印,有利于提高地震资料的频率成分,解决薄层的高分辨率问题,对煤田精细勘探

有一定的推广价值。

2 结束语

三维地震勘探技术的发展应用使地震勘探的精度和分辨率大大提高,取得了丰富的地质成果,解决了一些影响煤矿生产建设的矿井地质问题,为高产高效矿井的建设,提高企业经济效益起到了极大的作用。然而,从现代化矿井对地质资料的要求来看,还存在着明显的差距,还应继续加强三维地震勘探基础性工作——“四高”(高频率、高密度、高保真度及高质量)的研究,加强三维地震勘探高分辨率、叠前处理及岩性方面的攻关与研究,从而进一步提高三维地震勘探解决地质问题的准确率、精度与能力。由于三维地震勘探数据量大,包含的地质信息十分丰富,还有待于进一步深入开发,需要继续进行深入的研究,以期获得更多的有用信息。随着社会整体的科技进步,一些新的技术为推动煤炭三维地

震勘探技术的进步提供了有力的支撑,煤炭三维地震勘探技术解决地震问题的能力将得到不断提高,具有很大潜力,通过广大煤炭地震勘探工作者大胆创新,煤炭三维地震勘探技术一定能够获得更大进步,取得更大成果。

参考文献:

- [1] Cordsen A, Peirce J W. 陆上三维地震勘探的施工设计[M]. 俞寿朋译. 涿州:石油地球物理勘探局,1996.
- [2] 中国煤炭地质总局. 煤矿采区三维地震勘探经验交流会论文集[M]. 北京:中国矿大出版社,2001.
- [3] 武喜尊. 中国煤炭地震勘探技术发展[J]. 中国煤田地质, 2003(6).
- [4] 武喜尊. 中国煤矿采区地震勘探技术[J]. 物探与化探, 2004, 28(1).
- [5] 武喜尊. 三维地震勘探技术在煤矿生产建设中的应用[J]. 中国煤炭企业管理, 2004(4).

HIGH-PRECISION THREE-DIMENSIONAL SEISMIC TECHNIQUE FOR COAL EXPLORATION

WU Xi-zun

(China Headquarters of Coal Geology, Beijing 100039, China)

Abstract: This paper deals with the present situation and the problems faced by the seismic exploration technique for coal resources, with the emphasis placed on some key problems which deserve further study and much attention in future, such as frequency, high-density collection, the strengthening of before-stack studies and the application of single-point seismic technique. The aim is the realization of high-precision exploration so as to meet the ever-increasing demands of the production work, construction and safety of the coal mine.

Key words: three-dimensional seismic exploration; resolution ratio; grid; shifting; single-point seismology

作者简介: 武喜尊(1963-),男,教授级高级工程师,1984年毕业于中国矿业学院,长期从事煤田物探技术研究和技術管理工作,现任中国煤炭地质总局勘查处处长,《物探与化探》期刊编委会委员,公开发表学术论文数篇。

勘误:

本刊2007年第6期《“十五”以来我国航空物探进展与展望》一文表1中“九五”期间总工作量/测线km数“14773”应为“714773”;文后参考文献[18]中作者顺序“于长春,周坚鑫,郭志宏”应为“郭志宏,于长春,周坚鑫”,特此更正,在此向作者表示歉意!