



中国煤矿第一爆对华北克拉通岩石圈结构研究的启示

赵金仁, 张先康, 王夫运, 张成科, 张建狮, 刘保峰, 潘素珍

中国地震局地球物理勘探中心, 郑州 450002

E-mail: zhaojinren@126.com

2008-05-21 收稿, 2008-09-26 接受

国家自然科学基金“华北克拉通破坏”重大研究计划(批准号: 90814012)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2004CB428400)资助项目

摘要 利用贺兰山中中国煤矿历史上最大的一次矿山大爆破, 以爆破点为起点向南东方向穿过银川盆地和鄂尔多斯块体布置了一条超长地震观测剖面, 在中国大陆地震探测研究中获得了观测距离超过 1300 km 来自上地幔上部反映不同深度的地震波信息. 上地幔顶部折射波 P_n 明显的特点是可以有效的对比追踪至 500 km 以远, 其稳定的动力学与运动学特征预示着鄂尔多斯地块的上地幔顶部是一个构造变化不大、比较弱的正梯度层结构; 如果认为 P_{m1} 和 P_{m2} 两波组是来自上地幔的波组, 则在上地幔结构中有着发育的构造层面, 其平均速度分别为 7.70~7.80 和 8.10~8.20 km/s. 根据 P_{m1} 和 P_{m2} 波组的走时特征推测其反映的界面 $M1$ 与 $M2$ 之间可能存在着一定厚度的速度逆转层, 它们所反映的深度范围约为 110~120 和 200~220 km, 这些现象基本上反映了该地区上地幔岩石圈的结构特征. 由此得到的信息可对华北克拉通岩石圈构造探测研究、认识地球内部上地幔不同圈层的形状、结构与相互作用关系提供有意义的借鉴.

关键词

矿山大爆破

超长地震剖面观测

上地幔波组

岩石圈结构

2007年12月20日, 神华宁煤集团在位于银川西北部贺兰山中的煤矿采矿区进行了一次峒室矿山大爆破. 在 750 ms 之内采用毫秒微差技术引爆总药量 5500 t, 这是宁夏历史上最大的一次爆破, 也是中国煤矿历史上最大的一次矿山爆破. 对于从事地震科研的人员而言, 这是一个难得的机会. 早在 20 世纪 80~90 年代中国地震局系统在美国的广西、江西、湖南、湖北以及西北地区利用矿山爆破进行了地壳上地幔结构研究, 取得了一系列成果^[1-6], 这些爆破的炸药当量大多在几十吨、数百吨. 1978 年 12 月在江西永平铜矿进行的一次规模较大的爆破其药量是 985.7 吨, 利用这些爆破布置的地震仪器其观测距离一般都在 500 km 以内, 记录观测到的地震波信息大多局限在地壳内和上地幔顶部. 前苏联和美国在 20 世纪 70 年代利用核爆破或矿山爆破进行了地壳上地幔结构研究, 其爆破规模一般较大, 其观测距离最远的达到 3000 km, 记录观测到了来自上地幔的深部信息, 在有关地区取得了反映上地幔岩石圈结构的一系列

重要参数^[7-9]. 在我国利用主动地震源探测方法研究地壳结构工作做的比较多, 而直接得到上地幔岩石圈结构的地震波信息较少, 仅利用天然地震、大地电磁及其他地球物理方法对岩石圈结构进行了一些研究^[10-15]. 近年来, 中国科学家也在倡导一种研究思路: 地球物理学的宗旨是在深化认识地球本体的基点上, 要为资源勘查、灾害预防和环境变迁做出贡献, 要达此目的则必须深入到地球内部探索其奥秘一层、圈结构, 物质组成及耦合和深层动力过程^[16]. 要探测研究地球深层动力过程则必须穿过地壳、解剖岩石圈、直接观测记录到反映上地幔结构信息的地震资料. 中国煤矿第一爆如此超大能量的激发、理想的主动震源位置, 可以有效利用的观测条件与环境, 对于研究鄂尔多斯块体上地幔岩石圈结构机遇难求. 于是中国地震局地球物理勘探中心(物探中心)在中国地震局和宁夏回族自治区地震局的支持和协助下, 以大震应急的工作方式, 在 3 天之内迅速抽调了 133 台流动地震观测仪, 以爆破点为起点向南东方向布置了一条超

引用格式: 赵金仁, 张先康, 王夫运, 等. 中国煤矿第一爆对华北克拉通岩石圈结构研究的启示. 科学通报, 2009, 54(7): 924~930

Zhao J R, Zhang X K, Wang F Y, et al. North China sub-craton lithospheric structure elucidated through coal mine blasting. Chinese Sci Bull, 2009, 54(4): 669~676, doi: 10.1007/s11434-008-0492-1

过 1300 km 的超长地震观测剖面, 观测仪器从爆破点开始布置, 最远观测距离达到了 1330 km, 这是迄今为止国内利用矿山爆破和宽角反射/折射地震探测方法研究地壳上地幔结构布置观测距离最远的一条地震测线, 记录观测到了来自地壳与上地幔反映不同深度的地震波信息。同时, 为了配合中国地震局与宁夏自治区地震局进行震源精确定位、震源参数校验以及有关研究工作, 在爆破源的四周布置了一个小型台阵。这些仪器都获得了满意的记录效果, 它的意义不在于解决地壳结构问题, 这是在该地区乃至中国大陆首次利于主动爆破源得到来自上地幔深部的地震记录。本文通过对不同观测距离反映不同深度的地震记录进行初步分析, 得到了一些认识, 有关结果可对即将开展的倍受地学界广泛关注和国家自然科学基金重点支持的华北克拉通岩石圈结构重大研究计划提供一些借鉴。

1 超长地震观测剖面的概况

此次矿山大爆破的激发源位于银川附近贺兰山北部的汝箕沟煤矿(北纬 $39^{\circ}03.4962'N$, $106^{\circ}06.7828'E$), 超长地震观测剖面的起点自爆破点开始向南东方向经由盐池、志丹、延安、运城、三门峡、南阳、桐柏、大悟、红安、罗田等地, 止于武汉北部的黄梅附近。途径宁夏、陕西、山西、河南、湖北五省区, 测线全长 1330 km (图 1)。沿测线布置了 127 台 PDS-1 型地震测深专用数字地震仪和 6 台 REFTEK 短周期数字地震仪。观测点距采取了不同的间隔, 在银川断陷盆地距炮点 140 km 范围内其点距为 20 km 左右, 其他区段为 9~12 km。该测线的北西段与物探中心 1986 年完成的郑州-银川宽角反射/折射地震探测剖面基本一致。沿剖面穿过了不同的地质构造块体^[17], 构造复杂。探测剖面的北西段大约距爆破点 20 km 以内位于贺兰

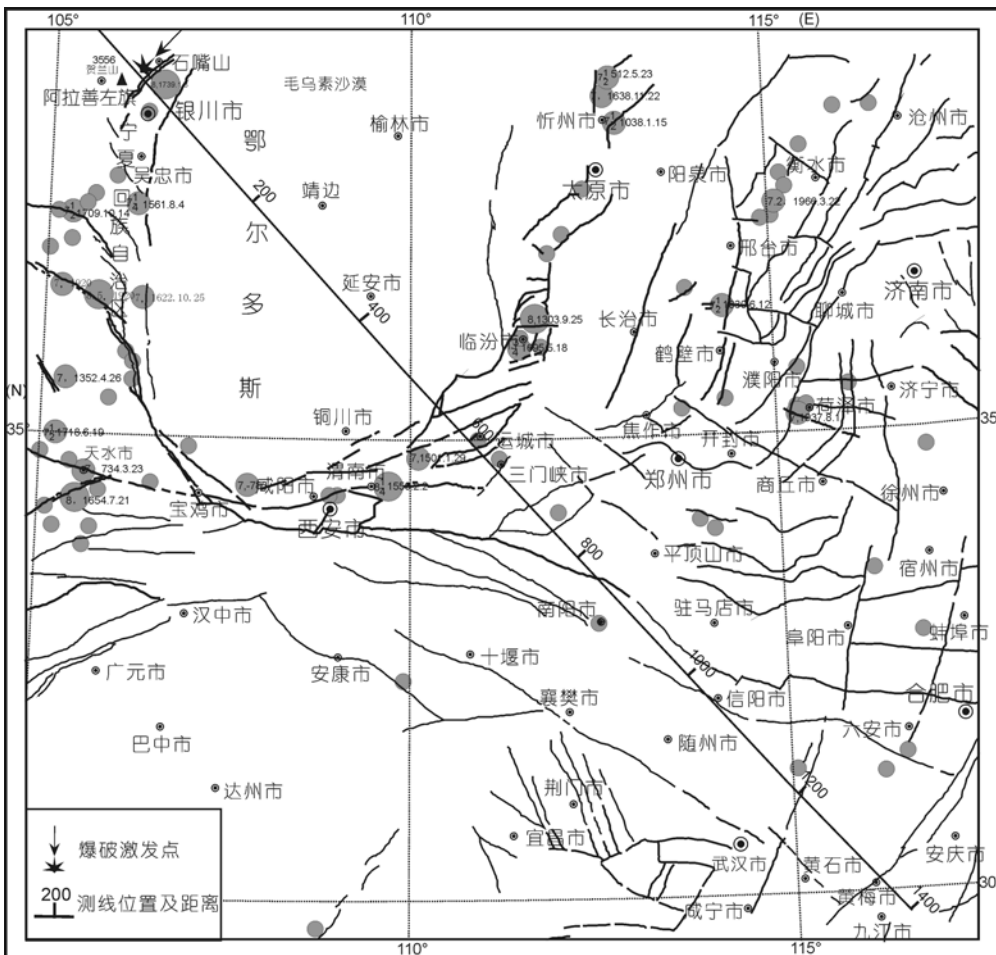


图 1 贺兰山矿山大爆破超长地震观测剖面位置图

山中, 20~70 km 区段穿过了银川断陷盆地, 70~530 km 区段位于鄂尔多斯地块, 530~640 km 穿过了汾渭断陷盆地. 大约在 700 km 左右测线经过了秦岭造山带的东部、在进入华北平原南部之后分别穿过了伏牛山、桐柏山区, 最终进入了大别山区的南缘.

2 记录观测的主要地震波组与特征

在常规的地震宽角反射/折射探测中的观测点距往往大于地震波的半波长, 对震相的对比难以实现. 对来自地下同一结构或构造的相邻记录同一性质的波进行相位对比, 仅能根据记录截面上主要波组的振幅能量、视速度、连续性、波形相似性等特征对其进行波组对比. 本次波组对比是在装配的专门地震资料数据库之后绘制的地震记录截面上进行的. 为了便于对来自不同深度、不同属性的地震波组进行分析对比, 对记录截面采取了不同的折合速度进行分段截取. 根据该地区已获得有关地壳结构参数、地壳的 P 波平均速度一般为 6.10 km/s 左右、上地幔顶部

折射波的速度一般为 8.00 km/s 左右. 因此, 将观测距离在 0~500 km 区段反映地壳上地幔顶部结构信息的记录截面用 6.00 km/s 的速度折合(图 2); 观测距离在 300~1330 km 区段反映上地幔结构信息的记录截面用 8.00 km/s 的速度折合(图 3 和 4). 显然, 反映不同深度、不同属性的地震波组选用不同的速度进行折合, 不仅有利于对同一波组运动学特征的认识, 且它们在不同的观测距离区段上的连续性和追踪趋势是非常明显的. 识别对比出的 P 波主要震相有: Pg, P2, Pm, Pn, Pm1, Pm2 等波组(图 2 和 3).

2.1 基底折射波 Pg 震相

该波组是常规地震测深中的一组主要震相, 视其为来自基底的折射波, 它的追踪距离一般在 100 km 左右. 此次观测在近炮点 120 km 范围内的贺兰山区、银川断陷盆地和鄂尔多斯地块的西部边缘虽然布置的仪器较少、点距较大, 但根据这些测点 Pg 波的到时所反映的不同地质构造块体基底结构的特征

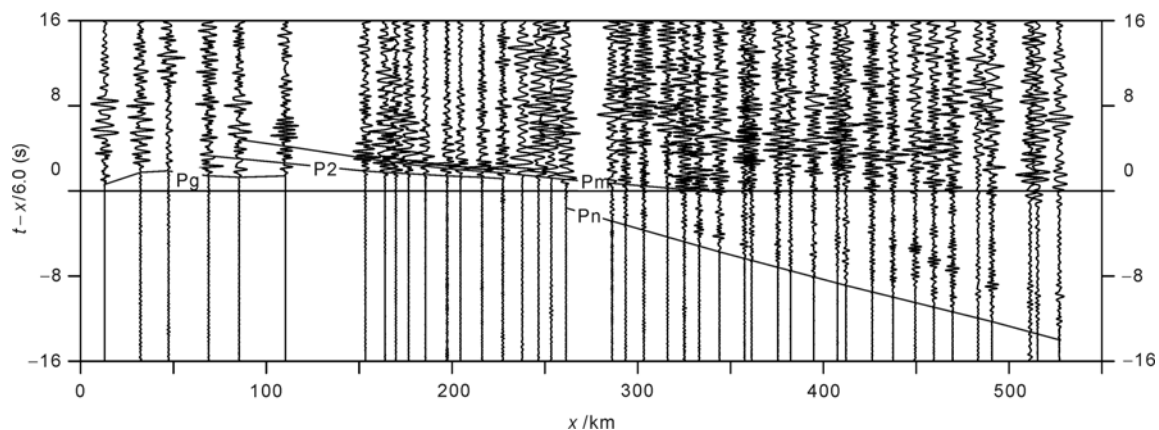


图 2 观测距离在 0~500 km 区段的记录截面

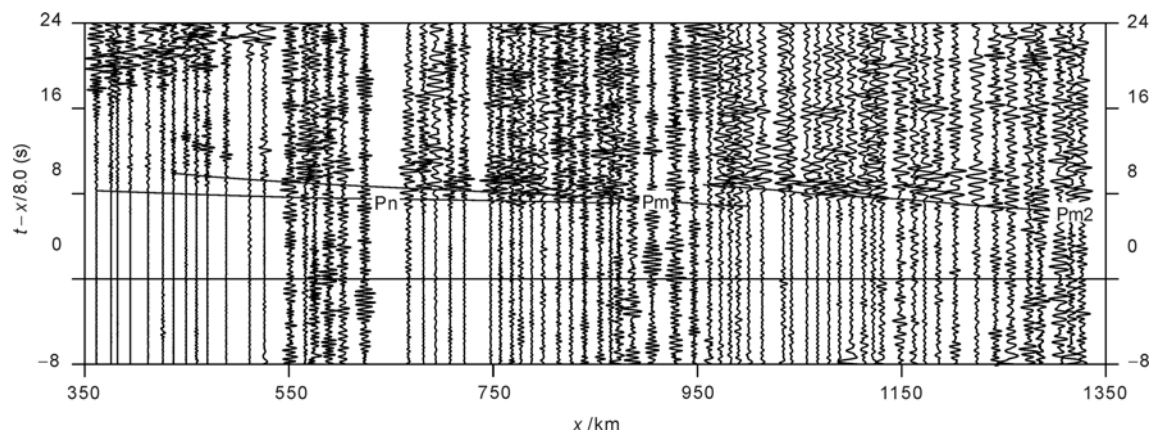


图 3 观测距离在 350~1330 km 区段的记录截面

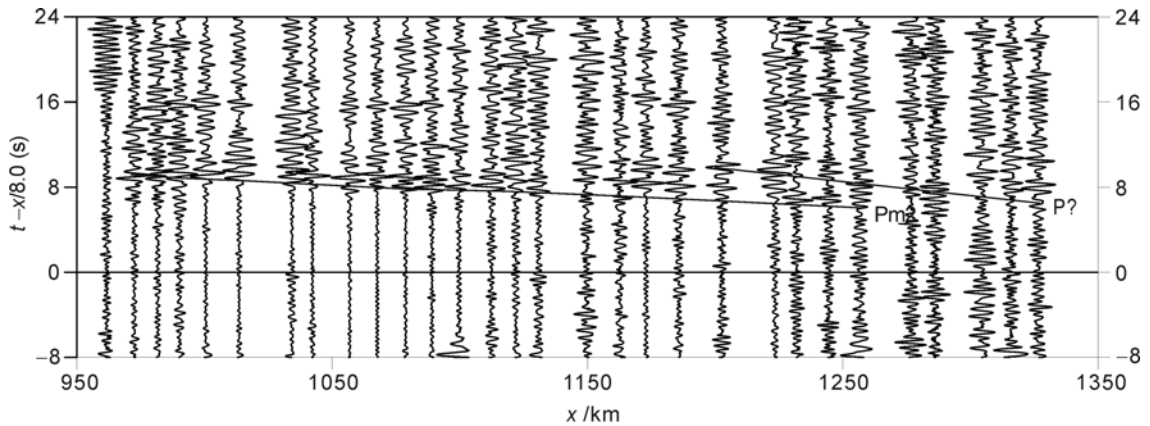


图4 观测距离在 950~1330 km 区段的记录截面

是客观的。第一个观测点位于贺兰山中，其折合到时明显的相对超前，第二、三个测点位于银川断陷盆地的沉积区，其折合到时明显滞后，观测距离在 60~110 km 区段的观测点逐渐离开银川断陷盆地进入鄂尔多斯地块的西部边缘，其折合到时趋于平缓、变化不大。尽管资料不多，但它们所反映的基底埋深变化的特征是明显的。其视速度一般为 6.00 km/s 左右。

2.2 壳内反射波 P2 震相

它是在基底折射波Pg之后出现的一组较为明显的波组，其追踪距离可以从 80 km追踪至近 200 km，该波组较为连续，可靠。如果认为它是一组反射波，它反映的地段是从银川盆地向鄂尔多斯地块下方过渡的区域，虽然单凭此炮地震记录不能确认它是地壳内的一组反射波，但根据该波组的运动学与动力学特征并结合郑州-银川剖面识别对比的波组和研究结果^[18]，可以认为它们是反映鄂尔多斯地块下方 20~24 km地壳内界面的同一组反射波，在鄂尔多斯地块内部基本上表现出走时平稳、衰减较快，呈弱反射特性^[19]，该波的平均速度为 5.90~6.00 km/s。

2.3 Moho 界面反射波 Pm 震相

在常规的地震宽角反射/折射探测中，Pm波是研究地壳结构的一组主要波组，在Moho界面的临界区域内它的明显特点是，反射特征明显，震相清晰，波组连续，振幅能量强，能够可靠的远距离对比追踪，若遇到构造有较大变化时，它的震相特征比较明显，这些特点在此次超长地震观测的记录截面上具有明显的体现。Pm波追踪区间 80~350 km，追踪距离达到了 350 km以远，距炮点 85, 110 km的两张记录反映的是银川盆地的Moho界面结构，距炮点 140 km之后的

记录反映的是鄂尔多斯地块的地壳结构，显然，它们的动力学特征与运动学特征均有明显的差别。距炮点自 154~261 km区间震相清晰可靠，波组连续，强相位突出，波形简单、速度偏高的Pm波组可以认为它反映了鄂尔多斯地块地壳结构非均匀尺度变化不明显、构造简单、相对稳定的特点，可视其界面是速度反差尖锐的一级间断面^[19-21]，该波平均速度为 6.20~6.30 km/s，莫霍面的埋深约为 41.0~45.0 km。

2.4 上地幔顶部首波 Pn 震相

该波是来自上地幔顶部的折射波(首波)，其追踪区间 150~500 km，大约距炮点 150 km左右进入初至区，可以连续、清晰可靠地远距离追踪，其振幅虽不强、但可以有效的对比追踪至 500 km以远，这是它的一个明显的特点，这在中国大陆地壳结构研究中清晰可靠的追踪如此之远的 Pn 波震相是比较典型的。该波大约在 120 km左右与 Pm 波相切，其视速度大约为 8.00 km/s。从该波在近 400 km的追踪区段内其动力学与运动学特征没有明显的起伏变化，它在上地幔顶部的传播路径基本上位于鄂尔多斯地块内部，这也从一定程度上反映出鄂尔多斯地块壳幔结构的稳定性。根据它的视速度特征推测在上地幔顶部可能是一个构造变化不大且比较弱的正梯度层结构。

2.5 上地幔深部震相

这是常规的地震探测中无法得到的地震波组，迄今为止在中国大陆实施的地震探测剖面其观测距离一般不超过 600 km，本次超长地震剖面观测的最大特点在于其观测距离超过了 1300 km，记录观测到了来自Moho界面与上地幔之间的多组地震波组，如图 3 所示将其分别标记为Pm1 和Pm2。Pm1 波组震相

大约在 400 km 隐隐约约就可以进行识别对比, 在 550~650 km 区段个别测点的噪声干扰较大使得对比困难, 在此之后其波组震相出现了明显的变化, 强波组震相比较明显, 在距炮点 660~860 km 区段内震相清晰可靠、可以连续的对比追踪, 它的特征类似于中国东部来自上地幔的 P 震相^[22]. Pm1 与 Pm 波相比其相位显得明显发育, 波组延续的时间长, 这是与 Pm 波组的明显不同, 如果认为它是一组反射波, 它所反映的是鄂尔多斯地块下方 M 界面之下的一个构造界面, 其深度大约在 110~120 km. Pm2 波组出现的距离在 960 km 之后, 一直可以连续可靠地追踪至 1330 km, 它的特征与 Pm1 波组有些类似, 但是, 总体上看 Pm2 波组的频率明显要低, 其波组的稳定性高于 Pm1 波组, 强波组特征明显, 相邻观测点的波组相位有较好的相似性, 自 970 km 可以连续、稳定的追踪至 1330 km.

从 Pm1 和 Pm2 波组的动力学特征及其走时趋势形态而言, 它们基本上具有反射波的特点, 在此可以利用 PLUCH 反演方法^[23]处理计算. 图 5 给出的是 Pm2 波组的处理结果, 可见两簇曲线基本上能够相交, 其交点所给出的数值反映了上覆介质速度和界面深度, Pm1 和 Pm2 两波组的特点基本相似. 如果认为它们是两组反射波组, 分别对其利用地震测深资料的一些常规处理方法进行处理计算, 则它们的速度和反映的界面深度大约分别为: 7.70~7.80, 8.10~8.20 km/s 和 110~120, 200~220 km. 这些结果虽然是初步的, 但其基本上反映了鄂尔多斯地块上地幔的结构特征. 对这些波组的属性还有待于今后进一步的研究认识, 也可能是来自岩石圈强梯度带的回折波. 另外, 有一种现象是不可忽视的, 在鄂尔多斯地块内部这些波组比较稳定, 没有明显的变化. 显然, 在诸多的研究中所给出的鄂尔多斯地块内部, 地壳

的表体至今未发现火山活动、岩浆侵入迹象、也未曾发生过强震、小震活动也较少, 在壳内无低速异常体分布、且其 P 波平均速度偏高, 壳内分层简单, 地壳界面没有大的起伏变化等^[19~21], 均表明鄂尔多斯地块内部在地壳的深度层次上结构是稳定的. 而连续、可靠、具有稳定运动学特征的 Pm1 和 Pm2 波组可能预示着鄂尔多斯地块内部具有稳定的上地幔结构. 另外, 从 Pm1 和 Pm2 两组震相波组走时曲线的延伸趋势而言, 存在一定的时间差, 由此推测, 在两组波所反映的界面之间可能存在一定厚度的速度逆转层.

地震测线穿过鄂尔多斯地块大约在 1150 km 之后的 Pm2 波组的震相特征似乎发生了变化, 有两个明显的特点值得思考: 其一, 波组的强相位不如 1000 km 左右突出, 其二, 不知是上地幔结构引起的波组序列延长或者随着观测距离的增加来自上地幔更深的波组开始出现(图 4), 该区段所反映的位置大体上是穿过鄂尔多斯地块进入汾渭断陷盆地、华北地区南部、秦岭造山带东部不同构造单元的过渡带附近, 假如它反映了一种构造现象, 是否可以认为, 位于运城-三门峡附近以及秦岭造山带东部不同构造单元过渡带附近与稳定的鄂尔多斯地块的上地幔结构可能有着明显的差别. 这需要在今后布置更长的地震测深剖面、记录更远观测距离的地震记录进行地壳-上地幔结构研究而得到论证.

3 主要地震波组所反映的基本结构

在地壳上地幔结构的探测研究中, 地震反射波组是反映构造界面的直接信息, 波组运动学特征的变化反映了界面的构造形态. 图 6 给出的是利用 Pm, Pm1 和 Pm2 三组主要波组的到时计算得到的相应各波组单点深度界面形态, 此结果虽然是初步的, 但它基本上反映了鄂尔多斯地块内部地壳-上地幔主要构

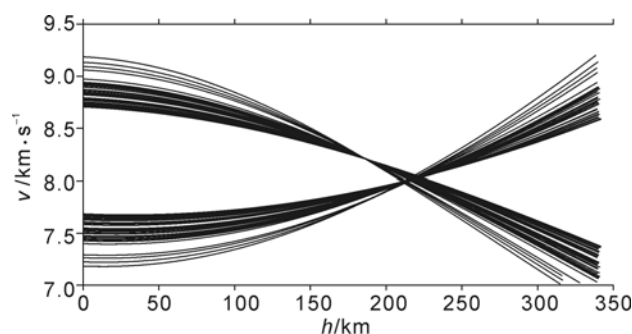


图5 Pm2 波组 PLUCH 方法计算结果图

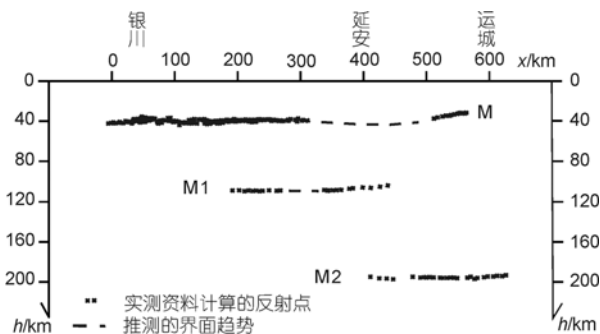


图6 研究区地壳-上地幔主要构造界面形态

造界面的形态。在对Pm波计算时,参考利用了该地区郑州-银川剖面的一些资料^[18],其结果是比较客观的。由此可见,由Pm波所得到的M界面深度为37~43 km,在鄂尔多斯地块与银川盆地的结合部M界面呈局部隆起,向东呈上倾变浅趋势。由Pm1波所反映的M1界面深度为110~120 km,向东南方向呈微上倾趋势,它的形态与其他方法的研究结果基本吻合^[24~26]。

M2界面的形态基本上与M1界面类似,其深度为200~220 km。

4 地壳-上地幔深部震相与其构造相关性的讨论

利用此次矿山大爆破得到了观测距离超过1300 km反映地壳-上地幔深部的地震观测记录,这在中国大陆的地震探测中是难得的深部资料。通过对不同观测区间反映不同构造界面的地震记录进行对比分析,可以发现,它们的波组特点非常明显,同时,在不同的区域其波组特征具有一定的差异。

(1) 地壳-上地幔地震波组发育。反映地壳结构的主要波组震相有:基底折射波Pg、壳内反射波P2和Moho界面反射波Pm。Pg波的视速度约为6.00 km/s, P2、Pm反射波的平均速度和界面深度分别为:5.90~6.00, 6.20~6.30 km/s和20.0~24.0, 43.0 km左右;反映上地幔结构的主要波组震相有:上地幔顶部折射波Pn,其视速度约为8.00 km/s。上地幔内两个界面反射波Pm1和Pm2波组,其追踪区间分别达到450~860和950~1330 km。其平均速度和界面深度大约分别为:7.70~7.80, 8.10~8.20 km/s和110~120, 200~220 km。这些波组在不同的区域显示了不同的特征。

(2) 在鄂尔多斯地块内部未发现火山活动、岩浆侵入迹象,也未曾发生过强震、小震活动也较少。地震测深的研究结果也认为,壳内无低速异常体分布、且其P波平均速度偏高,壳内分层简单,地壳界面没有大的起伏变化等,诸多的研究结果都揭示了鄂尔多斯地块地壳结构的稳定性^[19~21,27]。此次超长地震剖面观测获得的连续、可靠、远距离对比追踪的Pn波震相和具有强反射性质、且具有稳定运动学特征的Pm1和Pm2波组可能预示着鄂尔多斯地块内部具有稳定的深部构造基础。

(3) 上地幔顶部的折射波Pn其振幅虽不强但可

以有效地对比追踪至500 km以远,这在中国大陆地壳结构研究中是比较典型的。其稳定的动力学与运动学特征从一定程度上反映出鄂尔多斯地块壳幔结构的稳定性。同时,也预示着鄂尔多斯地块的上地幔顶部可能是一个构造简单且比较弱的正梯度层结构。

(4) 如果认为Pm1和Pm2两波组是来自上地幔的波组,则它们所反映的深度范围大约分别为110~120和200~220 km,是否可以认为这是该地区上地幔岩石圈和软流圈的深度;根据Pm1和Pm2波组震相走时曲线的延伸趋势,显然,两波组所反映的构成上地幔物性介质的速度特征是明显的。在上地幔顶部与M1界面之间基本上可以认为速度是随深度而增加的正梯度层,在M1与M2界面之间可能存在一定厚度的速度逆转层。这是在该地区首次利用主动爆破源地震探测方法得到这方面的资料,需要在今后进一步的研究得以确定。

(5) 反映鄂尔多斯地块东南侧过渡带附近的Pm2波组震相特征发生了变化,波组的强相位特征不甚明显,是上地幔结构引起了波组序列的延长或者随着观测距离的增加反映上地幔结构更深的波组开始出现,如果认为它反映了一种构造现象,有两个问题值得思考,其一,在上地幔结构中有着发育的构造层面。其二,稳定的鄂尔多斯地块与其东南部不同构造单元过渡带附近的上地幔结构可能具有一定的差异。这种差异是否与该地区地质构造上认为的新生代以来地层结构差异活动幅度较大、断裂构造活动较强^[28]有关。并且该区段位于秦岭造山带附近,就其造山带构造特征而言,在中国大陆地质构造演化历史上是一条发育历史十分长久的构造界线,沿该带曾经发生过多次陆块之间的拼合和裂解,与此同时相关的岩石圈壳块之间也都经历了复杂的裂开、闭合和平移剪切作用^[29]。重力资料研究结果也表明,该带在岩石圈深部中是具有影响烙印的碰撞造山带,其物质非均匀强烈,地表发育的各类强烈活动构造都受控于深部上地幔岩石圈动力学背景^[30]。显然,反映过渡带附近上地幔结构的地震波组发生异常变化应该是与构造有关的。这些问题需要在今后布置更长的地震探测剖面、记录更远观测距离的地震信息进行地壳-上地幔结构研究而得以论证。

(6) 此次矿山爆破远距离观测首次把反映鄂尔多斯地块岩石圈结构的地震波形显示出来,使得我们对稳定地块上地幔的层状结构、速度特征有了基本

的认识,不仅对进一步深化认识稳定的鄂尔多斯地块与其周边构造块体地球深层动力过程提供了一定的思路.同时,此项工作获得的信息可为即将开展的利用主动源地震探测方法对华北克拉通岩石圈结构

探测研究对其观测系统的设计、爆破观测参数的选择、华北地区反映岩石圈结构信息出现的区间和对研究认识地球内部上地幔不同圈层的形状、结构等提供了有意义的借鉴.

参考文献

- 1 丁楹玉,曹家敏,黄长林,等.随县-西安剖面地壳结构的初步研究.见:国家地震局科技监测司,编.中国大陆深部构造的研究与进展.北京:地质出版社,1988.38—47
- 2 胡鸿翔,陈学波,张碧秀,等.我国中原地区随县-安阳剖面地壳构造特点.见:国家地震局科技监测司,编.中国大陆深部构造的研究与进展.北京:地质出版社,1988.48—60
- 3 8301工程协作组.塔里木盆地东部边缘及青藏高原东部地壳和上地幔速度结构的初步研究结果.见:国家地震局科技监测司,编.中国大陆深部构造的研究与进展.北京:地质出版社,1988.89—96
- 4 国家地震局永平爆破联合观测小组.永平爆破与我国东南地区深部构造的初步研究.见:国家地震局科技监测司,编.中国大陆深部构造的研究与进展.北京:地质出版社,1988.140—153
- 5 李云祓,徐志成,等.棋梓桥爆破地震地震观测及其初步结果.见:国家地震局科技监测司,编.中国大陆深部构造的研究与进展.北京:地质出版社,1988.180—191
- 6 广西柳州爆破观测小组.广西柳州爆破观测和桂东地区地壳结构.见:国家地震局科技监测司,编.中国大陆深部构造的研究与进展.北京:地质出版社,1988.246—252
- 7 Mechie J, Egorkin A V, Fuchs K, et al. P-wave mantle velocity structure beneath northern Eurasia from long-range recordings along the profile Quartz. *Phys Earth Planet Inter*, 1993, 79: 269—286[doi]
- 8 Ryberg T, Fuchs K, Egorkin A V, et al. Observation of high-frequency teleseismic Pn on the long-range Quartz profile across northern Eurasia. *J Geophys Res*, 1995, 100(B9): 18151—18163[doi]
- 9 Robert B Y, Masse P. Compressional velocity distribution beneath central and eastern north America. *Bull Seismol Soc Am*, 1973, 63(3): 911—935
- 10 蔡学林,朱介寿,曹家敏,等.中国及邻区岩石圈结构样式.中国大陆地球深部结构与动力学研究——庆贺滕吉文院士从事地球物理研究50周年.北京:科学出版社,2004.563—577
- 11 庄真,傅竹武,吕梓玲,等.青藏高原及邻近地区地壳与上地幔剪切波三维速度结构.地球物理学报,1992,35(6): 694—709
- 12 陈国英,曾融生.用地震面波频散研究喜马拉雅山与西藏高原岩石圈构造的差异.地球物理学报,1985,28(Supp1): 161—173
- 13 吴建平,明跃红,叶太兰,等.体波波形反演对青藏高原上地幔速度结构的研究.地球物理学报,1998,41(增刊): 15—25
- 14 卢占武,高锐,李秋生,等.中国青藏高原深部地球物理探测与地球动力学研究(1958~2004).地球物理学报,2006,49(3): 753—770
- 15 孔祥儒,王谦身,熊绍柏.青藏高原西部综合地球物理剖面和岩石圈结构与动力学.科学通报,1999,4(12): 1257—1265
- 16 滕吉文.当代地球物理向何处去.地球物理学进展,2006,21(2): 327—339
- 17 邓超东,冉永康,杨晓平,等.中国活动构造图.北京:地震出版社,2007
- 18 国家地震局地质断面编委会.上海奉贤至内蒙古阿拉善左旗地质断面(说明书).北京:地震出版社,1992
- 19 嘉世旭,张先康.华北不同构造块体地壳结构及其对比研究.地球物理学报,2005,48(3): 611—620
- 20 李松林,张先康,张成科,等.玛沁-兰州-靖边地震测深剖面地壳速度结构的初步研究.地球物理学报,2002,45(2): 210—217
- 21 张先康,李松林,王夫运,等.青藏高原东北缘、鄂尔多斯和华北唐山震区的地壳结构差异-深地震测深的结果.地震地质,2003,25(1): 52—60
- 22 郑晔,滕吉文.中国东部随县-启东地带上地幔结构研究.地球物理学报,1994,37(4): 553—558
- 23 Michel B, Hirn A. Velocity-depth estimation from wide angle seismic reflection arrivals. *Ann Geophys*, 1980, 36(1): 107—118
- 24 汤吉,詹艳,赵国泽,等.青藏高原东北缘玛沁-兰州-靖边剖面地壳上地幔电性结构研究.地球物理学报,2005,48(5): 1205—1217
- 25 赵国泽,汤吉,詹艳,等.青藏高原东北缘地壳电性结构和地块变形关系的研究.中国科学 D 辑: 地球科学,2004,34(10): 908—918
- 26 国家地震局“鄂尔多斯周缘活动断裂系”课题组.中国活断层研究专辑: 鄂尔多斯周缘活动断裂系.北京:地震出版社,1988.295—327
- 27 刘和甫.中国沉积盆地演化与旋回动力学环境.地球科学,1996,21(4): 345—356
- 28 邓超东,尤惠川.鄂尔多斯周缘断陷盆地带的构造活动特征及其形成机制.见:国家地震局地质研究所,编.现代地壳运动研究.北京:地震出版社,1985.58—78
- 29 任纪舜,陈廷愚,牛宝贵,等.中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿.北京:科学出版社,1990.22—67
- 30 张国伟,张本仁,袁学诚,等.秦岭造山带与大陆动力学.北京:科学出版社,2001.322—375