

文章编号:1673-5005(2011)05-0044-07

能量屏蔽作用的类型、形成机制及应对方法

杨庆道¹, 王伟锋¹, 尹以东², 赵玉生², 李继白², 胡建辉²

(1. 中国石油大学 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266555; 2. 中石化 西南石油局云南物探公司, 云南 昆明 650233)

摘要:对不同地区地震波传播条件进行分析,认为能量屏蔽作用的产生机制有3种:一是强反射界面引起反射型能量屏蔽;二是强黏滞层剧烈吸收损耗引起的耗散型能量屏蔽;三是粗糙面上或非均质介质中的地震波散射引起的散射型能量屏蔽。有时强能量耗散带与强反射界面伴生,产生双重能量屏蔽作用。根据3类能量屏蔽作用机制,提出克服或减少能量屏蔽作用的7种方法:①优化测线部署避开强能量耗散带和散射带;②从激发、接收方面增加透过能量;③优化观测方式避开屏蔽段;④采用高密度地震勘探增加有效接收道;⑤用处理手段消除由强反射界面衍生的多次波、折射波,以及屏蔽带衍生的其他干扰;⑥用转换横波勘探以增大强反射界面的最大透射能量窗;⑦黄土塬区适当结合弯线勘探以减少黄土层的强吸收屏蔽和黄土层底界的强反射屏蔽。

关键词:能量屏蔽;形成机制;地震波;反射;透射;耗散;散射

中图分类号:P 31 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1673-5005.2011.05.008

Types of energy shielding effect, formation mechanism and countermeasures

YANG Qing-dao¹, WANG Wei-feng¹, YIN Yi-dong², ZHAO Yu-sheng², LI Ji-bai², HU Jian-hui²

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266555, China;

2. Yunnan Geophysical Company of Southwest Petroleum Bureau, SINOPEC, Kunming 650233, China)

Abstract: By analyzing the seismic wave transmission conditions for different areas, three types of formation mechanism of energy shielding effect were proposed. Besides the energy shielding effect caused from strong reflection interface which is named as reflecting shielding, there are two mechanisms which greatly reduce the transmission energy and greatly degrade the seismic data quality. One is named as dissipation shielding where there are one or more strong viscous dissipation layers absorbing most of seismic energy rapidly. The other is named as dispersion shielding where there are one or more strong scattering belts scattering most of seismic energy to different directions. In some cases there are intense reflection interfaces as well as dissipation layers or dispersion belts which give rise to dual shielding effect. On the basis of the mechanism of the energy shielding effect, the following countermeasures were proposed to deal with the energy shielding effect: ① optimizing the line deployment to avoid the energy shielding belt as far as possible, ② increasing the transmission energy from shooting and receiving, ③ selecting reasonable ways of observation on the basis of forward modeling of shielding interfaces or belts, ④ introducing the high density seismic survey with small group intervals to increase the effective channels of receiving, ⑤ eliminating noises such as multiples, ground roll waves derived from strong interfaces or other dispersion belts by means of seismic processing, ⑥ increasing the maximum transmission windows of strong reflection interfaces by means of converted-wave seismic exploration prospecting, ⑦ introducing crooking lines seismic survey to reduce the dissipation or reflection shielding in Loess areas.

Key words: energy shielding; formation mechanism; seismic wave; reflection; transmission; dissipation; dispersion

地震勘探要求弹性波在层状介质界面上发生稳定的反射和透射,这需要一定的介质条件。地

收稿日期:2011-08-28

基金项目:国土资源部“全国油气资源战略选区调查与评价”项目(XQ-2007-01)

作者简介:杨庆道(1970-),男(彝族),云南武定人,高级工程师,博士研究生,从事地震采集方法研究。

下介质有时存在3种情况,使弹性波无法有效反射和透射:一是存在强反射界面,绝大部分入射波被反射回去,透过能量大幅减少,称为反射型能量屏蔽;二是存在强能量耗散带,弹性波在此介质区间振动能量快速吸收损耗并转换为内能,称为耗散型能量屏蔽;三是存在强散射带,地震波在介质带中向不同方向发生散射、偏转,能量无法按正常路径传播,称为散射型能量屏蔽。无论强反射作用,强耗散作用或强散射作用,这些屏蔽面或屏蔽带对地震波传播具有阻隔作用,透过能量大幅减少,地震波能流密度锐减,下伏岩层成为“被屏蔽”区,剖面和炮集上表现为“能量弱”,反射信息缺失,野外地震采集往往惯性地从增加激发药量的思路去设法增强反射能量,而忽略了从激发点到接收点的地震波传播过程中增加透过能量的方法。目前国内外对能量屏蔽作用的研究局限于强反界面的能量屏蔽^[1-3],对强耗散带和强散射带引起的能量屏蔽作用的研究尚处空白。笔者在对3种能量屏蔽作用形成机制进行分析的基础上,从增加屏蔽面或屏蔽带透过能量的角度去寻求减少能量屏蔽作用的应对方法。

1 能量屏蔽作用发生的主要地质类型

能量屏蔽作用主要发生在4类地质条件区。

1.1 灰岩出露区

图1所示,该炮激发点位于砂岩区,接收排列跨越砂岩露头区和灰岩露头区^[1],激发能量强,但砂岩接收段上1.5~2.5 s之间的优质反射波在灰岩

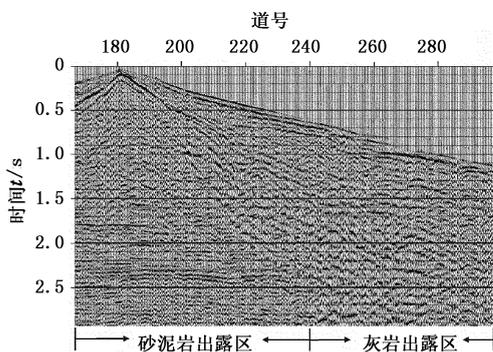


图1 砂岩与灰岩露头区接收典型炮集

Fig.1 Typical shot received in sand and limestone outcropping surface

接收段上能量锐减、频率变低。该炮灰岩和砂岩露头区反射波能量的巨大差异,源于两者地震波传播条件的差异。砂岩区低、降速层间速度差异较小,近地表为低速层、降速层和高速层3层结构,平均速度

分别为0.4、1.2和2.4 km/s。灰岩区一般为风化的低速层直接覆盖在灰岩高速层上,速度分别为0.4和5.2 km/s,呈双层结构,形成强反射界面。此外,灰岩往往与盐岩、煤层和砂泥岩互层,也形成强反射界面。

除了存在多种强反射界面外,灰岩露头区还普遍发育溶洞。溶洞中往往被空气和地下水充填,地震波在溶洞界面发生无序散射,能量无法正常传送。

1.2 煤层、膏盐层及火成岩夹层区

当浅层有煤层、膏盐层或火成岩夹层时,容易与周围岩层构成强反射界面。在通南巴地区,中生代白田坝组、须家河组砂岩中夹有两套煤层,在两组地层露头区,地震资料品质显著变差。中国中、东部新生代盆地中有时发育膏盐层和火成岩层,也与相邻岩层形成强反射界面^[2]。

1.3 黄土塬与第四系覆盖区

黄土塬区地表覆盖厚度几十米至几百米的黄土层,除地震波激发和接收条件差外,黄土层一般直接覆盖在中生代老地层上,速度差可达2.0 km/s,产生强反射界面。同时,干燥疏松的黄土层对下行波和上行波强烈吸收损耗。黄土层强烈吸收,以及其底界面的强反射作用使下伏岩层地震反射能量大幅减弱,信噪比低。

第四系覆盖区地震波传播条件与黄土塬区相似。图2是松潘地区一剖面段, T_0 为第四系底反射界面。第四系厚度中间减薄并缺失,向两端逐渐变厚至近400 m,与此相应,剖面中段1.8 s以后有较强的反射波,向两端反射能量变弱甚至消失。

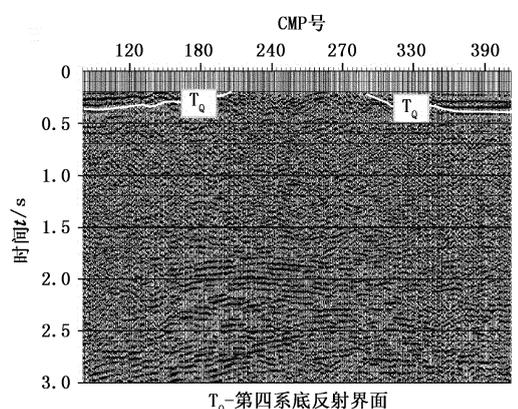


图2 松潘地区第四系沼泽区剖面品质变化

Fig.2 Quality changes on a section in Songpan Quaternary covered area

1.4 逆冲断裂带

断裂带露头区岩块破碎,激发接收条件差,而在地下,两盘岩层长距离相对运动中相互擦刮、研

磨,可以形成宽达上千米的断裂破碎带,地震波在破碎岩块上向不同方向发生散射,能量无法正常下传。图3为通南巴地区一条穿过断裂带的地震剖面段,逆冲断层把二叠系老地层直接推覆在侏罗系之上,产生近6 km宽的断裂破碎带,对地震波产生强烈散射作用,断裂带下伏层表现为空白反射。

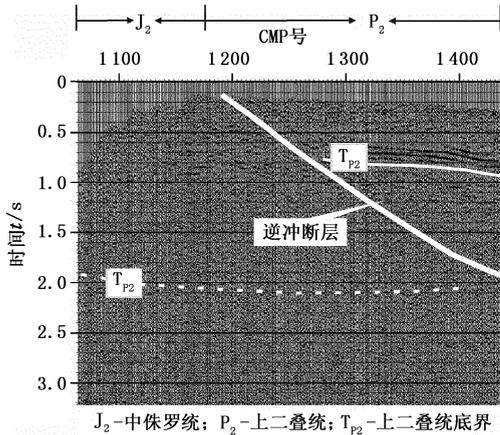


图3 逆冲断裂带的能量屏蔽作用

Fig.3 Energy shielding effect in overthrust zone

2 能量屏蔽作用形成机制

2.1 强反射界面能量屏蔽作用机制

根据能量守恒定律,反射系数 R 与透射系数 T 存在能量消长关系,即 $T=1-R$,因此,反射系数值越大,透过能量越弱,界面的能量屏蔽作用越强。此外,当入射角超过临界角后发生全反射时,成为地震波透射的盲区,发生路径屏蔽。

不同岩石的波阻抗差异大^[4-6],例如,通南巴地区灰岩 P 波波阻抗往往是砂泥岩的 3~4 倍,因此,该区灰岩与砂岩、泥岩、煤层的界面往往构成强反射界面。低速层、降速层的速度一般分别为 0.4 和 1.2 km/s,高速层速度一般大于 2.0 km/s,因此,低速层、降速层与高速层之间的界面是不同地区普遍存在的强反射界面。

反射系数和透射系数由入射角和介质的物理参数决定。为了说明地震波在不同岩层界面上的反射和透射能量变化规律,本文中分别采用波阻抗值为上小下大、上大下小两组参数,绘制纵波及转换横波反射系数曲线(图4、5,其中横波速度 v_s 取泊松比 $\sigma = 0.25$ 算得,介质密度由 Gardner 公式算得)。

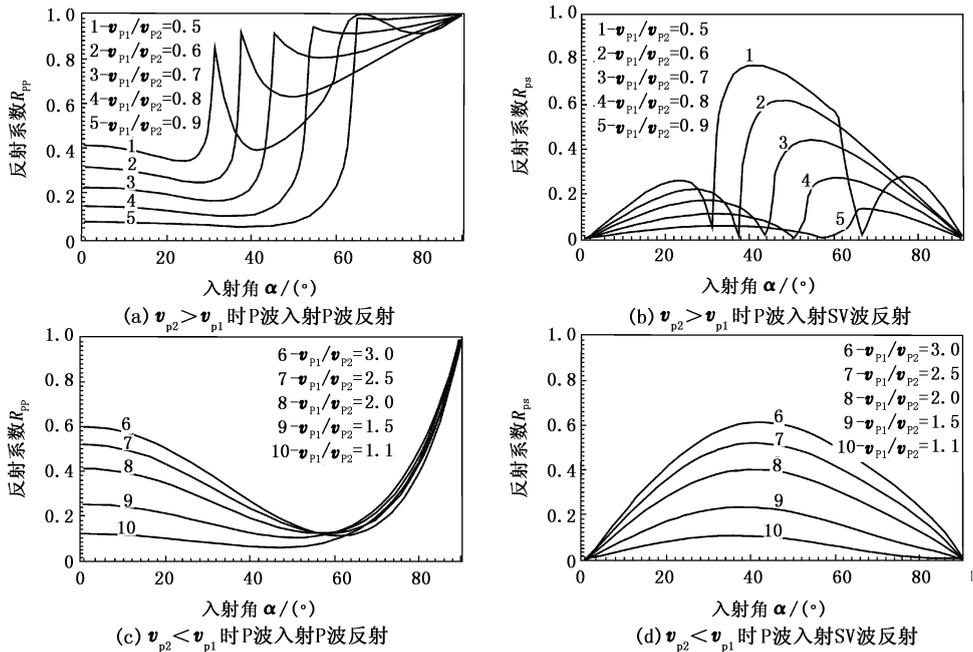


图4 几种不同阻抗差界面的反射系数曲线

Fig.4 Several reflection coefficient curves with different impedance interfaces

同一介质横波速度与纵波速度差异较大。两者运动学、动力学特征存在巨大差别,产生能量屏蔽作用的机制也不同。当 $v_{p2} > v_{p1}$ 时,反射 P 波具有临界角 $i = \arcsin(v_{p1}/v_{p2})$ 。当 $\alpha > i$ 时, P 波透射角等于

90° ,并发生全反射(图4(a)),但因 $v_{s2} < v_{p2}$, SV 波透射角小于 90° ,未发生全反射,SV 波仍能有效下传(图4(b))。在一个反射界面上,对应于临界角的波能够透过的最大圆面称为能量透过窗。反射系数

越大,入射临界角越小,能量透过窗越小,透射能量越少。在 $v_{p2} < v_{p1}$ 时, P 波没有临界角(图 4(c)、(d)),但与 $v_{p2} > v_{p1}$ 时相似,阻抗差越大,反射系数越大,能量屏蔽作用越强。图 5 采用与图 4(a)、(b) 相同的曲线参数,在 P 波入射角 $\alpha > i$ 后, P 波发生全反

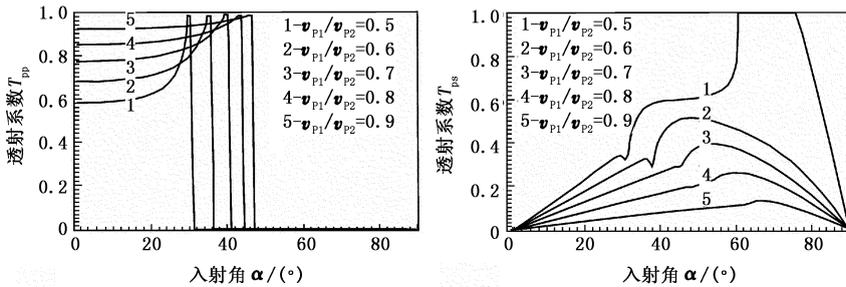


图 5 几种不同阻抗差界面获得的 P 波及 SV 波透射系数曲线

Fig. 5 P and SV wave transmission coefficient curves with different impedance interfaces

地震波每次穿透一个界面都发生反射和透射,每个界面上由于反射导致透过能量减少,称为透过损失^[7]。一个强反射界面的能量屏蔽作用大小是地震波往返两次透过该界面时的透过能量损失。当存在多个强反射界面时,对下伏层的能量屏蔽作用更大。如图 6 所示,为了便于分析,设地震波垂直入射到 n 个水平层状介质,这在界面深度大于偏移距时近似成立。 n 层界面的反射系数分别为 R_1, R_2, \dots, R_n 。地震波往返两次通过同一界面 R_i 时,振幅透过损失为

$$D_i = (1 - R_i)(1 - R_i') = 1 - R_i^2. \quad (1)$$

设入射波振幅为 A_0 ,地震波在 n 层介质中传播回地表,则从第 n 层反射回来的振幅为

$$A_n = (1 - R_1^2)(1 - R_2^2) \cdots (1 - R_{n-1}^2) R_n A_0. \quad (2)$$

往返穿过 n 个反射面的透过损失因子 D_r 为

$$D_r = (1 - R_1^2)(1 - R_2^2) \cdots (1 - R_{n-1}^2) R_n. \quad (3)$$

因此,当存在多个强反射界面时,透过能量更少。

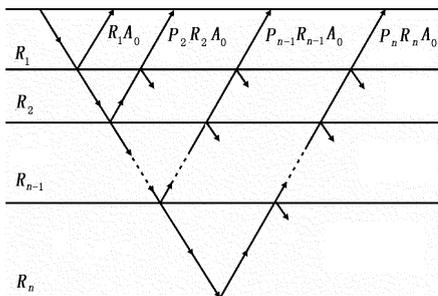


图 6 多层介质的反射波透射示意图

Fig. 6 Sketch map of reflected waves transmitting in multilayers

2.2 耗散带的能量屏蔽作用机制

实际介质是非完全弹性的,介质内不同单元间

射而无透射波, SV 波透射能量反而逐渐增大到最大值。由上述分析可知,由于存在强反射界面,当 P 波发生强能量屏蔽作用无法获得下伏岩层反射信息时,采用转换横波勘探可避免或减弱能量屏蔽效应。

存在内摩擦力,正如阻尼的存在会导致振动能量向其他能量转化,内摩擦力的存在导致机械能不可逆地向其他能量转换而损耗。当地下存在一个强黏滞层或塑性层,地震波在此间大部分能量被快速吸收损耗,耗散带之下地震波能流密度急剧减小。可以用介质的能量衰减系数 β 表示波在耗散带中的能量损耗。地震波振幅随穿过耗散带距离的增大而呈指数衰减^[8],即

$$A = A_0 \exp(-\beta r). \quad (4)$$

式中, A_0 为地震波穿越耗散带前初始振幅; A 为地震波穿过厚度为 r 的耗散带后的振幅; β 为耗散带的距离吸收系数。

因此,地震波穿越耗散带引起振幅吸收损失因子是

$$D_\beta = \frac{A}{A_0} = \exp(-\beta r). \quad (5)$$

距离吸收系数 β 及黏滞层厚度 r 越大,耗散因子 D_β 越小,正常透过能量越弱,耗散带的能量屏蔽作用越强。地震勘探中常见的耗散带有:①欠压实的未固结岩层,主要有第四系、部分欠压实垮塌堆积带、沼泽区等,这些介质阻尼系数大;②低降速带,地震能量在低降速层中的衰减是巨大的,尤其对高频信号的选择性吸收;③黄土塬及其他干燥松散的表层土,振动能量不能在质点间充分传送。

2.3 散射带的能量屏蔽作用机制

散射由界面的粗糙性和介质的不均匀性引起。从物理学角度来说,如果界面凹凸不平,但凹凸部分的尺度相对于波长很小的入射波,界面将发生波的反射,若相对于波长较大的入射波则发

生散射。介质内物质结构、成分不均匀引起传播路径随机偏转和改向,或存在粗糙面引起反射聚焦和发散,都会引起地震波向不同方向无序散射,不能按正常路径透射往返,对下伏层产生路径屏蔽。在地下一定区段,存在把地震波向不同方向散射的介质区间,称为散射带。如图7所示,由震源激发的入射波在散射体上发生一次、二次或多次散射^[9],由于在散射带内多次散射改向,射线传播路径与正常一次反射波传播路径完全不同,失去了一次反射波的可叠加性。与强黏滞耗散带不同,地震波在耗散带内被大量吸收,而在散射带内主要通过向不同方向多次无序散射而与散射带系统外发生能量交换。

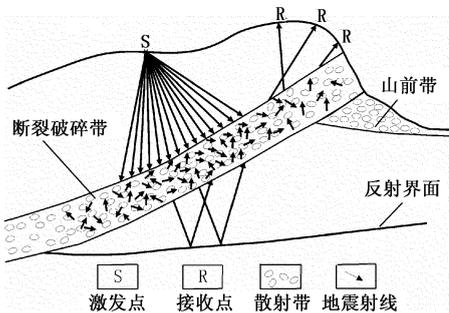


图7 断裂破碎带的能量屏蔽作用示意图

Fig.7 Sketch map of energy shielding effect through fractured zone

野外地震采集中常见的散射带有:①断裂破碎带。压缩环境下断层两盘相向运动引起岩石刮擦破碎,可形成宽达上千米的断裂带,破碎带内为许多大小不等、排序杂乱的粗糙岩块。②砾石夹层。地史上差异升降构造事件中形成的厚层砾石冲积层,或冰川作用引起的冰碛岩。③山前带。不同粒径岩石混杂堆积,分选差。④粗糙面。主要为角度不整合面,产生凹凸不平的剥蚀面。⑤溶洞。灰岩露头区低速层中往往发育溶洞,洞内为地下水和空气,溶洞表面为不规则的强散射界面。⑥沙丘。

国内外学者目前对散射波的特征^[8]、波场表达式和能量传播公式^[10-11]进行了初步研究,但对于不均匀介质中或粗糙面上散射引起对下伏层能量屏蔽作用的研究还未涉入。入射波在散射体表面向不同方向发生散射,透过能量大幅减少。事实上,对散射带的能量屏蔽效果无须更多去关注有多少能量在散射带内、外损失,只要在散射带内发生多次散射,即便穿过散射带后再从下伏岩层界面反射到地面检波器的地震波,都已失去了正常反射波的时距曲线特征和可叠加性。

3 不同能量屏蔽类型的叠加效应

许多情况下,能量屏蔽作用是两种屏蔽类型的叠加,产生双重能量屏蔽作用。例如,黄土塬和第四系覆盖区,表层为松散的强黏滞性能量耗散带,同时,耗散带与下伏老地层之间为一强反射界面。耗散带的强烈吸收和底界面的强烈反射对下伏层产生双重能量屏蔽,地震波透过耗散带及其底界面的能量损耗因子为

$$D = D_{\beta} D_r = (1 - R^2) \exp(-\beta r). \quad (6)$$

式中, D_r 为往返两次穿过单个耗散带底界面的透过损失因子。损耗因子越小,穿过屏蔽面和屏蔽带的能量越少,能量屏蔽作用越强。

4 减弱能量屏蔽作用的方法

强反射界面、强耗散带和强散射带的能量屏蔽作用引起屏蔽面或屏蔽带下地震波能流密度锐减,野外地震采集中可根据具体的屏蔽类型,采取针对性方法来减弱能量屏蔽作用。

(1)优化测线部署,避免在断裂带上平行断裂走向部署测线。在四川通南巴、云南楚雄等大型逆冲断裂带发育区,通过适当平移测线,或调整测线与断裂带垂直部署,缩小剖面上空白反射段长度。

(2)从激发和接收两方面采取联合措施,炮井打穿低速层界面,检波器挖深坑埋置,达到减少近地表强耗散带和强反射面能量屏蔽作用的目的。①炮井打穿低速层与高速层强反射界面和第四纪强耗散带。凌云^[12]通过双井微测井方法对近地表吸收衰减进行分析,能量与频率的衰减主要发生在0~2 m风化层中,振幅衰减达20 dB,在6~35 m间激发,200 Hz以下信息差别不大,仅差2~4 dB。因此,低速层是重要的强能量耗散带和频率衰减带,低速层底界为强反射界面。②检波器挖深坑埋置以减少风化层的吸收损耗。③在保证炮点相对均匀的同时优选炮点,避开在垮塌堆积、破碎岩块和砾石层覆盖区。④灰岩溶洞发育区采取适当变偏,或继续下钻至基岩中下药激发。⑤根据地形坡度和岩层倾角适当增加井深。岩层倾角越大,视厚度越大,打穿同一层需要的井深越大。⑥采用长药柱激发,增加炸药震源下传的方向特性。⑦加强闷井工作,提高下传能量。⑧在欠压实地层中采用组合激发。当药量增加到围岩弹性限度,再增加药量只能增加干扰波的能量,资料信噪比反而降低,此时,可采用组合激发以增强下传能量。

(3)根据岩石地球物理特征,以及强反射界面、强耗散带和强散射带分布范围及深度,通过模型正演选择合理的道距、最大炮检距以及合适的观测方法。

(4)采用小道距的高密度地震勘探以增加有效接收道。全反射临界角之内的地震波才能有效透射,当浅、中层存在强反射界面时,能量透过窗变小,采用高密度地震勘探,在增加覆盖次数的同时,也增加了能量透过窗内的有效接收道数。

(5)在处理中采用合适的手段消除由强反射界面衍生的多次波、折射波,耗散带引起的面波,以及散射带引起的随机散射干扰。

(6)黄土塬区适当采用弯线与直线相结合的勘探方法降低黄土层的吸收屏蔽和黄土层底界面的反射屏蔽(图8)。

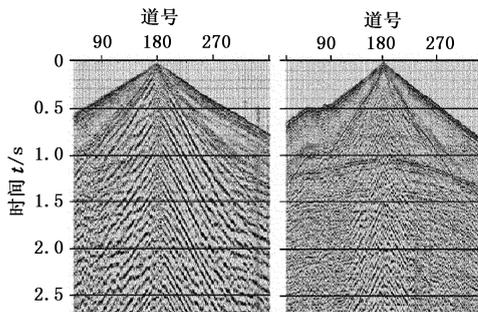


图8 黄土塬区直线(左)和弯线(右)炮集对比

Fig.8 Shots comparison between straight line and crooked line in Loess area

(7)用转换横波勘探,以增大强反射界面的最大透射能量窗,减弱强反射界面能量屏蔽作用。高速岩层屏蔽区的岩下地震成像一直是地震勘探中的难题。从图5透射系数曲线可知,转换波速度比纵波低得多,具有克服强反射界面能量屏蔽作用的优势,在火成岩强反射屏蔽^[13-14]、浅层气云的强吸收屏蔽区^[15]转换波勘探成功克服了纵波能量屏蔽效应,可在今后相似的屏蔽区进行推广。目前,国内外还没有对灰岩出露区进行转换波勘探的实例可以借鉴,但由于灰岩出露区存在多个强反射界面的能量屏蔽作用,今后可对基岩相对完整、破碎程度低的地区进行转换波勘探,有望减小由于灰岩区强反射界面的能量屏蔽作用对资料品质的影响。

5 结束语

地震波在传播过程中遇到强反射界面、强黏滞耗散层或散射带,地震波能量难以正常下传,产生能量屏蔽作用,下伏层地震波能流密度大幅减少,资料

难以获得。针对3种能量屏蔽作用机制,地震采集中根据具体情况采取针对性措施可以克服或部分减少能量屏蔽作用对资料品质的负面影响。减弱能量屏蔽作用需要减少透过损失,增加透过能量,因此需要从激发、接收和有效传播路径三位一体去寻找提高资料品质的途径。

参考文献:

- [1] 杨鹏,杨庆道,曾卿. 通南巴灰岩区能量屏蔽作用分析[J]. 石油化工安全技术,2005,21(5):26-28,54.
YANG Peng, YANG Qing-dao, ZENG Qing. Analysis on energy shielding effect in Tong-Nan-Ba region[J]. Petrochemical & Safety Technology,2005,21(5):26-28,54.
- [2] 裴正林,牟永光. 火成岩区地震波传播规律研究[J]. 石油物探,2004,43(5):433-437.
PEI Zheng-lin, MU Yong-guang. Study of seismic wave propagation regularity in igneous rock area[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2004,43(5):433-437.
- [3] 王建华,李庆忠,邱睿. 浅层强反射界面的能量屏蔽作用[J]. 石油地球物理勘探,2003,38(6):589-596,602.
WANG Jian-hua, LI Qing-zhong, QIU Rui. Energy shielding action of shallow strong reflector[J]. Oil Geophysical Prospecting,2003,38(6):589-596,602.
- [4] 张小庆,桂志先. 岩石中纵横波速度关系研究[J]. 石油天然气学报,2006,28(4):255-257.
ZHANG Xiao-qing, GUI Zhi-xian. On the relationship between P-wave and S-wave in rocks[J]. Journal of Oil and Gas Technology,2006,28(4):255-257.
- [5] 陆基孟. 地震勘探原理(上、下册)[M]. 东营:中国石油大学出版社,2006,上册:14-15,下册:164-185,344-345.
- [6] 安勇,牟永光,方朝亮. 沉积岩的速度、衰减与岩石地球物理间的关系[J]. 石油地球物理勘探,2006,41(2):188-192.
AN Yong, MU Yong-guang, FANG Chao-liang. Relationship between attenuation, velocity of sedimentary rocks and petrophysical property[J]. Oil Geophysical Prospecting,2006,41(2):188-192.
- [7] 董敏煜. 地震勘探[M]. 东营:石油大学出版社,2000:262-263.
- [8] 张守伟,孙建孟,苏俊磊,等. 砂砾岩弹性试验研究[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2010,34(5):63-68,76.
ZHANG Shou-wei, SUN Jian-meng, SU Jun-lei, et al. Experimental investigation on elasticity of glutenite [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science),2010,34(5):63-68,76.

[9] 李灿苹,刘学伟,王祥春,等. 地震波的散射理论和散射特征及其应用[J]. 勘查地球物理进展,2005,28(2):81-89.
LI Can-ping, LIU Xue-wei, WANG Xiang-chun, et al. Seismic scattering theory, scattering characteristics and its applications [J]. Progress in Exploration Geophysics, 2005,28(2):81-89.

[10] ZENG Yue-hua, SU Feng, AKI K. Scattering wave energy propagation in a random isotropic scattering medium:1,theory[J]. Journal of Geophysical Research, B; Solid Earth and Planets,1991,96(2):607-619.

[11] WU R S. Multiple scattering and energy transfer of seismic waves separation of scattering effect from intrinsic

attenuation I: theoretical modeling[J]. Geophys J R Astron Soc,1985,82:57-80.

[12] 凌云. 大地吸收衰减分析[J]. 石油地球物理勘探,2001,36(1):1-8.
LING Yun. Analysis of attenuation by earth absorption [J]. Oil Geophysical Prospecting,2001,36(1):1-8.

[13] 赵邦六. 多分量地震勘探技术理论与实践[M]. 北京:石油工业出版社,2007:165-262.

[14] 周芝旭,董幼瑞. 火成岩区广角-转换波地震勘探方法研究[M]. 北京:石油工业出版社,2005:45-90.

[15] 黄中玉,孙建库,朱仕军,等. 多分量地震技术[M]. 北京:石油工业出版社,2007:101-108.

(编辑 修荣荣)

(上接第31页)

[9] 辛也,王伟峰,吴孔友,等. 准噶尔盆地西北缘乌-夏断裂带成藏组合特征[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2011,35(2):32-35.
XIN Ye, WANG Wei-feng, WU Kong-you, et al. Oil gas plays characteristics analysis of Wu-Xia fault belt, the northwest margin in Junggar Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2011,35(2):32-35.

[10] PETERS K E, MOLDOWAN J M. The biomarker gride: interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments, prentice Hall[M]. New Jersey: Englewood Cliffs, 1993:110-265.

[11] 高福红,樊馥,高红梅. 孙吴-嘉荫盆地太平林场组烃源岩生物标志化合物地球化学特征[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2010,34(4):33-36.

GAO Fu-hong, FAN Fu, GAO Hong-mei. Geochemical characteristics of biomarkers of source rocks from Taipinglingchang formation in Sunwu-Jiayin Basin[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2010,34(4):33-36.

[12] 陈世加,范小军,路俊刚,等. 沥青对储层物性及油气富集的影响[J]. 石油勘探与开发,2010,37(1):70-75.
CHEN Shi-jia, FAN Xiao-jun, LU Jun-gang, et al. Impact of bitumen on reservoir properties of and hydrocarbon accumulation [J]. Petroleum exploration and development, 2010,37(1):70-75.

[13] TISSOT B P, WELTE D H. Petroleum Formation and occurrence(second edition) [M]. Berlin:Springer Verlag,1984:699-700.

(编辑 徐会永)

(上接第36页)

[8] 何登发,况军,吴晓智,等. 准噶尔盆地莫索湾凸起构造演化动力学[J]. 中国石油勘探,2005,9(1):22-23.
HE Deng-fa, KUANG Jun, WU Xiao-zhi, et al. Dynamics for Mosuowan uplift structural development in Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2005,9(1):22-23.

[9] 何登发. 不整合面的结构与油气聚集[J]. 石油勘探与开发,2007,34(2):142-149.
HE Deng-fa. Structure of unconformity and its control on hydrocarbon accumulation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007,34(2):142-149.

(编辑 徐会永)