

文章编号:0253-9985(2012)02-0200-08

用钻井地层异常压力参数标定逆断层的方法 ——以准噶尔盆地南部逆冲褶皱带为例

杨庚^{1,2},李伟^{1,2},白振华^{3,4},王晓波^{1,2},李本亮^{1,2}

(1. 中国石油勘探开发研究院,北京 100083; 2. 提高石油采收率国家重点实验室,北京 100083;

3. 中国石油大学盆地与油藏研究中心,北京 102249;

4. 中国石油大学石油天然气成藏机理教育部重点实验室,北京 102249)

摘要:准噶尔盆地南部逆冲褶皱带地表条件复杂,复杂的构造变形导致地震成像差,地震资料解释难度大。在解释横穿玛纳斯背斜构造二维或三维地震资料中,首先依据地表地质标定浅部已出露的地层和断层,利用常规钻井玛纳1井和玛纳002井的垂直地震测深(VSP)资料和声波测井资料进行地震-地质层位标定,再根据地震剖面反射特征标定出深部可能的断层。利用地层倾角测井资料,可识别出探井钻遇的一部分断层点。由于横穿玛纳斯背斜二维地震剖面上、中浅层地震反射杂乱,尤其逆冲断层沿古近系安集海河组泥岩、页岩滑脱,导致地层倾角测井无法识别构造增厚的安集海河地层中发育的逆冲断层断点。地震剖面上地震反射异常和玛纳1井、玛纳002井的断层断点井深对比表明,逆冲断层发育与钻井压力变化有关,因此利用钻井监测的地层异常压力以及地层压力系数变化的特点标定出一系列断点井深,并得到钻井地层压力图及邻井断点资料的相互佐证。这两口井的模块式地层动态测试器(MDT)实测地层数据均表明,在紫泥泉子组地层存在两套压力系统,分割两套压力系统的仍然为逆冲断层。最终,地震剖面的构造解释结果表明霍玛吐逆冲断裂是由一系列叠瓦扇断层组成。

关键词:超压;构造建模;地层压力;压力梯度;逆冲断层;断层标定;地震剖面解释;准噶尔盆地南部

中图分类号:TE142

文献标识码:A

Calibration of thrust faults with abnormal formation pressure data tested during drilling

—an example from the Southern fold-thrust belt in Junggar Basin

Yang Geng^{1,2}, Li Wei^{1,2}, Bai Zhenhua^{3,4}, Wang Xiaobo^{1,2} and Li Benliang^{1,2}

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China;

2. State Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery, Beijing 100083, China;

3. Basin and Reservoir Research Center, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

4. Key Laboratory of Hydrocarbon Accumulation of Ministry of Education, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: The complex surface geology and intensive tectonic activities causes the poor seismic imaging in the southern fold-thrust belt, Junggar Basin, challenging structural interpretation. During the seismic interpretation of the Manas structure, we first projected the outcropped strata and faults onto the seismic lines with topographic data, then defined seismic horizons with the vertical seismic profile (VSP) and acoustic logging data of well Mana-1 and Mana-002, and finally fixed possible deep faults according to the seismic reflectance signatures. Some faults encountered during drilling can be identified by using dipmeter data. However, as chaotic seismic reflections exist in the middle-shallow layers on seismic reflection and thrust faults slipped along the shale and mudstone in the Paleogene Anjihai Formation, it is hard to identify the thrust faults in this structurally thickened formation by using dipmeter data. Correlation of seismic reflectance anomaly with fault depth in well Mana-1 and

收稿日期:2011-04-24;修订日期:2012-03-15。

第一作者简介:杨庚(1965—),男,博士、高级工程师,构造地质学。

Mana-002 indicates that there is certain relationship between the thrust faults and the abnormal formation pressures tested during drilling. A series of the thrust fault points of the wells are identified by monitoring abnormal formation pressure and the pressure gradient during drilling, and they are verified by both the pressure data of wells and the fault points identified in the adjacent wells. The well formation pressure data tested with the Modular Dynamic Test(MDT) shows that two pressure systems exist in the Ziniquanzi Formation and are separate by a thrust fault. The final seismic structural interpretation demonstrates that the Horgos-Manas-Tugulu thrust belt is composed of a series of imbricate fans.

Key words: overpressure, structural modeling, formation pressure, pressure gradient, thrust, fault calibration, seismic profile interpretation, southern Junggar Basin

逆冲构造带的油气勘探难点主要是构造问题,构造变形的形态、变形量和变形机制是构造研究的主要内容,也是圈闭评价工作的基础。由于地震资料采集受复杂地表地质和地形地貌条件限制,以及地层速度结构影响,导致地震波传播路径在横向和纵向上变化较大,用来确定地下构造的地震剖面无法直观地反映出深、浅层构造的真实形态,地震资料显示的深浅层构造呈空白或杂乱反射。虽然钻井标定是地震与地质结合的桥梁,解释人员无法对无反射的浅层构造形态加以约束,从而对深层构造的解释就存在多解性问题。因此,需要研究者利用地表地质约束、综合应用地震剖面和钻井资料来解释地下构造^[1],深部断层位置的确定就显得尤为重要。

准噶尔盆地南缘地区构造变形复杂,地层倾角比较陡,地震速度结构多变,逆冲断层断点位置难以准确确定,而准确的标定断层是构造解释的基础与关键。淮南逆冲带第二排背斜构造——

玛纳斯背斜为近东西向褶皱,背斜长约 50 km,宽 2~4 km,地表为低山,地形总体上是南高北低,海拔为 600.0~1 270.0 m,多是锯齿状地形及单面山,冲沟发育,地形起伏较大。地质露头表现为一线性展布背斜,地层产状南翼相对较缓(43°~56°)、北翼较陡(55°~78°),北翼及轴部被第四纪地层覆盖。地表出露最老地层为安集海河组中下部泥岩,可观察到一条沿东西向展布、倾向向南的逆断层(图 1)。

1 淮南逆冲构造带地层界线和逆冲断层位置标定

1.1 地表地质标定地层界线和断层

由于地形切割,淮南地区地表发育有非常清楚的地质露头,对此新疆油田在 20 世纪 50 年代进行石油地质填图工作,20 世纪 60 年代地矿部门

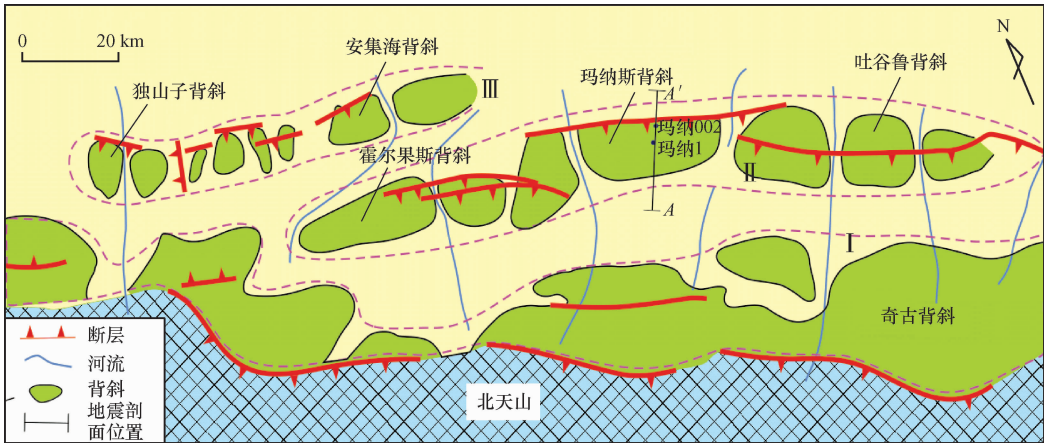


图 1 天山北缘淮南逆冲褶皱带地质简图

Fig. 1 Simplified geological map of the southern Junggar fold-thrust belt, northern Tianshan

进行的1:20万区域地质填图,以及邓启东等^[2]对霍玛吐地区的1:5万局部构造填图,包括霍玛吐背斜。2005年我们对霍玛吐背斜地质剖面进行的地层和断层倾角测量工作。在地震剖面上,将地面地层层位的顶底位置、出露断点位置及地层产状等要素标注于高程线对应的共反射点(CDP)处,在偏移或深度剖面上绘出地质露头剖面,然后利用露头剖面上的地质界线对地震剖面上的反射层的对应情况进行标定。应用该方法标定的结果准确可靠,能比较直观地展示地面与地下构造和层位的对应关系。淮南地区霍尔果斯·玛纳斯和吐谷鲁背斜主体部位,可应用地表地质路线剖面 and 1:5万地质图进行标定。该区的地表地质剖面的精度相对较高,可以可靠的控制主要断层和地层的分布与产状,并可清楚地标定该地层对应的地震层位(图2)。

1.2 地震剖面特征标定地层界线和断层

淮南地区地下地震地质层位主要是通过区域大剖面来引层,背斜主体部位的地震地质层位则

利用区内的深探井(如安5、安6、霍10、玛002井)垂直地震测深(VSP)测井资料及声波测井资料来进行标定。并结合浅层地质露头剖面上的地质界线在地震剖面上的投影对地震剖面上的反射层进行标定。一般情况下,在地震剖面上标定断层发育部位,依靠断裂反射特征。淮南地区地震剖面上的断裂反射特征有的清楚,有的不清楚。

在地震剖面上识别断层主要通过:①反射波组切断-终止或者断面上地震反射属性突然变化;②褶皱翼部或者膝折带(kink bands)的终止;③由于断层导致反射层的速度和密度变化而引起比较明显断面的反射特征。反射波组切断①和断面反射特征③可直接反映断层位置,但在逆冲挤压构造带中,很难判别逆冲断层的这两者特征。因此认识膝折带或者轴面的终止方式是解释构造的重要依据^[3]。

1.3 钻井倾角测井资料标定断层

在对地震剖面进行构造解释研究中,应用钻

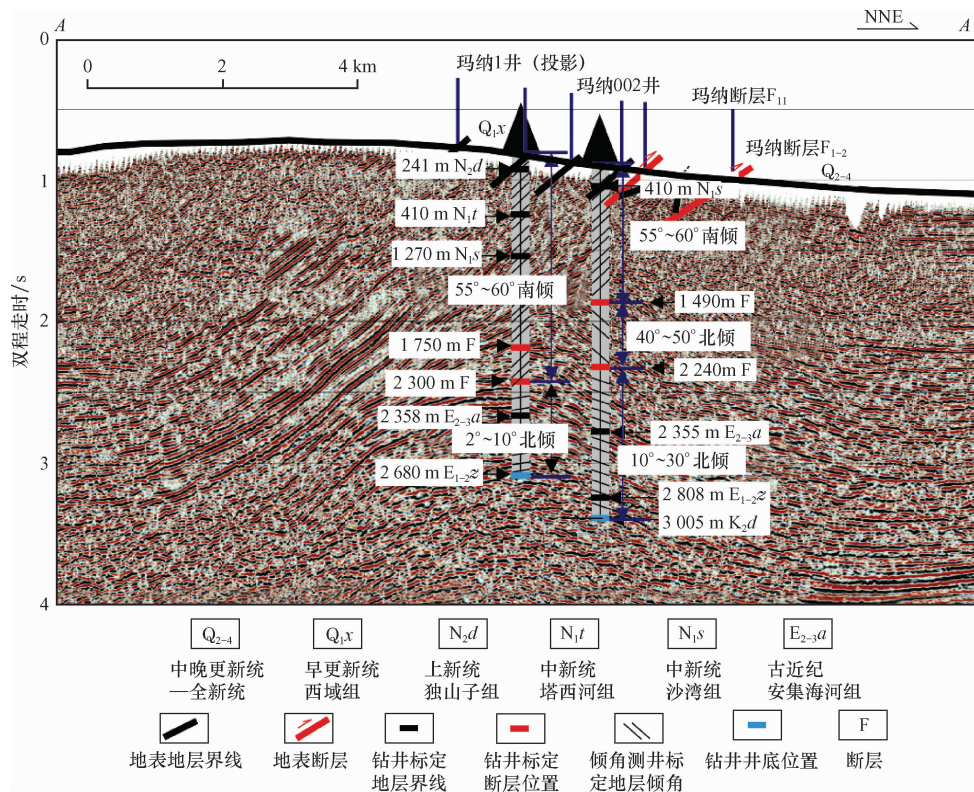


图2 天山北缘淮南逆冲褶皱带A—A'地震剖面地表地质和钻井及倾角测井的地层、断层标定(剖面位置见图1)

Fig. 2 Calibration of horizons and faults on the seismic profile A—A' according to the surface geology and dip-log data in the southern Junggar fold-thrust belt, northern Tianshan(see Fig. 1 for A—A' location)

井倾角测井资料的精细标定可以更加准确地限定地下地层的构造形态,不仅可以准确标定不同深度上的地层倾角及其变化,还可以利用倾角测井资料识别断点,确定断层面在不同深度的产状,通过不同位置的探井所反映出来的断点产状的空间变化可清楚地表现出断面的空间分布特征,根据深部地层产状与断层产状,就可以落实钻井位置附近的构造地质模型。测井资料的地质应用方面,地层倾角测井正越来越受到广泛重视。

玛纳1井钻揭的地层自上而下依次为新近系独山子组(N_2d)、塔西河组(N_1t)、沙湾组(N_1s)、古近系安集海河组($E_{2-3}a$)、紫泥泉子组($E_{1-2}z$) (未穿)。根据地层倾角处理结果,以泥岩层倾角和倾向绿模式确定地层构造倾角及倾向,独山子组、塔西河组、沙湾组、安集海河组一部地层倾角为 $52^\circ \sim 60^\circ$,倾向为南偏西方向(井段88~2 300 m),安集海河组—紫泥泉子组地层倾角为 $2^\circ \sim 10^\circ$,倾向为南偏西方向(井段2 300~2 680 m)。倾角变化拐点在井深2 300 m处附近,以下地层为安集海河组至紫泥泉子组,其地层倾角逐渐减小,倾

向均为南偏西,表明该井深存在一条逆冲断层(图2)。常规测井曲线1 750~1 988 m为地层重复段,结合地震剖面可知玛纳1井钻遇断层在安集海河组地层中,断点深度约为1 750 m,故推断断层断距约238 m,兰模式指示断层为南倾向,断层为逆断层。

玛纳002井完钻井深为3 005 m。根据地层倾角处理结果,沙湾组—安集海河组安地层河倾角为 $55^\circ \sim 66^\circ$ (井深91~1 490 m),南倾方向;安集海河组—紫泥泉子组,地层倾角为 $40^\circ \sim 50^\circ$ (井深1 490~2 240 m),北倾方向;紫泥泉子组及白垩系东沟组地层倾角为 $10^\circ \sim 30^\circ$ (井深2 240~3 005 m),北倾方向。安集海河组至紫泥泉子组地层倾向由南倾方向在井深1 490 m突变为北倾方向,倾向变化拐点约为1 490 m处。玛纳002井钻遇断层的断点深度约为1 490 m,倾向由南倾方向突变为北倾方向,与地震剖面解释基本吻合(图2),为逆断层。地层倾角由 $40^\circ \sim 50^\circ$ 变化为 $10^\circ \sim 30^\circ$ 的较大拐点约为2 240 m处,也与地震剖面解释基本吻合(图3),为另一条逆冲断层。

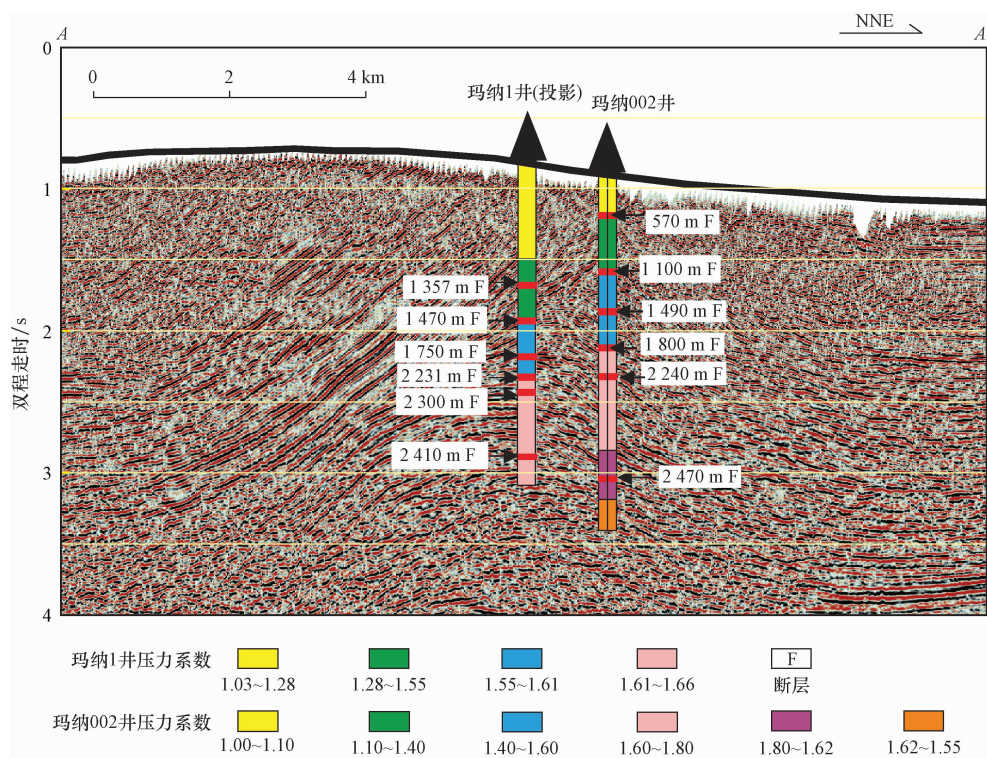


图3 天山北缘淮南逆冲褶皱带A—A'地震剖面钻井地层压力标定断层

Fig. 3 Fault recognition and calibration on the seismic profile A-A' by formation pressure data in the southern Junggar fold-thrust belt, northern Tianshan

1.4 地层压力梯度标定断层

地层压力录井采用修正钻压指数方法(dc指数法),dc指数根据钻时、钻压、转盘转速、钻井液密度、井眼直径等参数计算得到,并通过回归计算地层压力梯度,数据准确可靠,能较好地反映地层的可钻性及地层压力梯度在纵向上的变化^[4]。淮南地区玛纳斯气田的钻井位于玛纳斯背斜,地应力较强。通过对dc指数图的分析,确定出钻井在纵向上的正常压实趋势线方程,进而用反算式计算出地层压力和地层压力梯度。

玛纳1井的地层压力监测图资料^①分析表明,本井压力梯度分为4段:①井段88~1 221 m;本井段为独山子组-沙湾组,dc指数为0.60~1.13,压力梯度为1.03~1.28;②井段1 221~1 470 m;属于安集海河组的上部,dc指数为0.58~1.02,压力梯度为1.28~1.55;③井段1 470~2 231 m;属于安集海河组的中部,dc指数为0.57~1.04,压力梯度为1.55~1.61;④井段2 231~2 680 m;属于安集海河组的下部和紫泥泉子组的上部,dc指数为0.63~1.14,压力梯度为1.61~1.66。该井钻井过程中,最为明显的是钻至井深2 231 m时,1#泵冲由61冲/min上升为68冲/min,2#泵冲由61冲/min上升为68冲/min,泵压由19.7 MPa下降为18.8 MPa,排量由2 662 L/min上升为2 994 L/min。在井深1 470 m附近,井眼曲率达到该井的最大值($1^{\circ}/\text{m}$),井斜角最大(5.36°)。全井最大井斜变化井段在1 350~1 470 m,这些异常也间接证明了存在逆冲断层及应力异常。结合三维地震剖面 and 该井的VSP资料,我们推测玛纳1井断层点深度1 470 m和2 231 m。根据该井地层压力图^②,钻压、钻速、转盘转速突然变化点位于井深1 330~1 360 m,2 390~2 420 m两处,把该井分为3个钻压、钻速、转盘连续段。导致钻压、钻速、转盘转速突然变化,我们认为是断层造成的,这些变化的点即为断点位置,其井深大约为1 357和2 410 m。较为明显的是该井钻至井深1 357.43 m遇卡,出现明显钻井工程异常,钻具活动范围:1 356~1 358 m,开泵的泵冲由20冲/min上升到72冲/min,泵压由12.5 MPa上升到18.92 MPa。而且

按照地表出露霍玛吐逆冲断层的倾角向下延伸,可准确地推测出玛纳1井所钻遇玛纳斯断层 F_{1-1} 井深在1 357 m附近,说明该处的应力异常是由霍玛吐逆冲断层所控制。所以由钻井异常压力梯度,确定出逆冲断层发育深度分别为1 357,1 470,2 231和2 410 m,分别对应与玛纳斯断层 F_{1-1} , F_{1-2} , F_{1-3} 和玛纳斯断层 F_{2-2} 。其中与地层压力梯度相匹配的逆冲断层发育深度为1 470和2 231 m(图3)。

从地层压力监测情况看,玛纳002井地层压力梯度变化可分为6段^①,①井段92~570 m为沙湾组底部及安集海河组上部地层,dc计算地层压力系数为1.10;②井段570~1 100 m为安集海河组中上部地层,地层压力系数由1.10逐渐升至1.40;③井段1 100~1 800 m为安集海河组中部地层,压力系数从1.40逐渐增大至1.60左右;④井段1 800~2 370 m为安集海河组下部和紫泥泉子组上部地层,地层压力系数为1.80,是全井最高异常压力带;⑤井段2 370~2 720 m为紫泥泉子组地层,dc监测压力系数1.62左右;⑥井段2 720~3 005 m为紫泥泉子组下部和东沟组地层,地层压力系数降低至1.55左右。

由于受霍玛吐逆冲断层的影响,玛纳002井缺失独山子组及塔西河组,且安集海河组地层较邻井厚度明显增厚,视厚度达1 916 m。川玛1井钻遇安集海河组视厚度为682 m,玛纳1井钻遇安集海河组视厚度为1 089 m。从玛纳002井安集海河组地层纵向上看,在井段1 046~1 146 m第一次出现杂色段后,在井段1 146~1 776 m又出现灰绿段,继而又出现褐色段(井段1 776~2 368 m),从地层颜色变化看存在地层重复现象。按照地表出露霍玛吐逆冲断层的倾角向下延伸,可准确地推测出玛纳002井所钻遇玛纳斯断层 F_{1-1} 和 F_{1-2} 井深分别在570,1 100 m附近。570 m井深的断层断点,可对应于第一段地层压力梯度的底部(图4),说明霍玛吐逆冲断层可控制该井地层压力分布。通过与玛纳1井、玛纳001井对比发现:玛纳002井安集海河组灰绿段452~570 m及上部杂色段570~1 146 m与玛纳001井灰绿段1 112~1 531 m及上部杂色段1 531~1 614 m岩性及钻时对比性较好,但由地表断层露

① 新疆石油管理局测井公司. 准噶尔盆地南缘地区玛河气田玛纳1井测井解释报告,2006.

② 新疆石油管理局测井公司. 准噶尔盆地南缘地区玛河气田玛纳001井测井解释报告,2007.

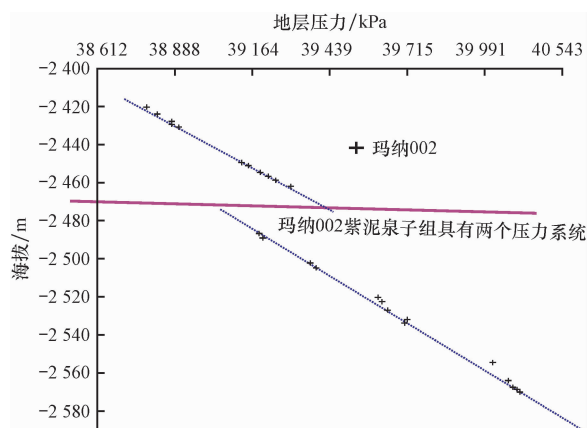
图4 玛纳002井MDT实测地层压力^②

Fig. 4 MDT-measured formation pressure in well Mana-002

头向下延伸在玛纳002井杂色段1 100 m存在一条逆冲断层 F_{1-2} ,玛纳001井杂色段1 531 m存在相同逆冲断层 F_{1-2} ,该逆冲断层发育部位对应于第二段压力梯度的底部(图4)。倾角测井数据表明玛纳002井在井深1 490 m处发育逆冲断层 F_{1-3} ,但与压力梯度无关(图3)。

1.5 钻井实测地层压力资料标定断层

根据三维地震和二维地震资料显示,玛纳斯背斜中深层存在反射波组,即膝折带的终止现象,我们推测在紫泥泉子组($E_{1-2}z$)下部存在一条反冲逆冲断层,但钻井所钻遇的紫泥泉子组及东沟组地层倾角相对一致,异常地层压力梯度比较一致,断层确定比较困难。如玛纳002井为紫泥泉子组及东沟组地层北倾,倾角大致在 $10^{\circ} \sim 30^{\circ}$ (2 240~3 005 m)。但根据2 400~2 580 m井段模块式地层动态测试器(MDT)实测地层压力数据回归分析(图4),玛纳002井在紫泥泉子组存在两个压力系统,我们认为分割压力系统即为紫泥泉子组下部存在一条逆冲断层(图5)。

而且玛纳002井和玛纳1、玛纳001的MDT测压数据绘制的压力剖面(图5)对比表明,古近系紫泥泉子组上部统一存在两个压力系统,控制上下压力系统应为同一逆冲断层。综合地震资料的构造解释,认为是该逆冲断层为玛纳斯深层向南逆冲的反冲逆冲断层—玛纳断层 F_{2-2} (见图6综合构造解释)。玛纳1井地层压力系统推测出的

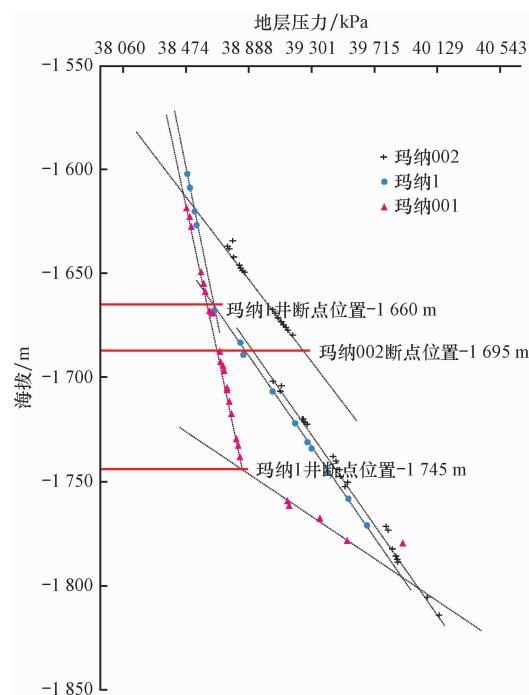
图5 玛纳1井、玛纳001井和玛纳002井MDT实测地层压力^{①,③}

Fig. 5 MDT-measured formation pressures in well Mana-1, Mana-001 and Mana-002

断点位置为海拔-1 660 m附近,因此玛纳1井该断层的断点位置应在井深2 410 m^①,井深2 460 m为油气界面深度。玛纳001井地表海拔为785 m,地层压力系统推测出的断点位置为海拔-1 745 m,因此玛纳001井该断层的断点井深为2 530 m。玛纳002井地层压力系统推测出的断点位置为海拔-1 695 m,断点井深为2 470 m。这两口井的实测地层压力图也表明断点位置分别在井深2 530和2 470 m^②。

2 玛纳斯背斜深部逆冲断层与超压

由玛纳1井钻井异常压力梯度,确定出逆冲断层发育深度分别为1 357,1 470,2 231和2 410 m,再加上倾角测井确定的断点深度为1 750和2 300 m。说明该井共钻遇了6条断层,其中实测地层压力表明2 410 m断点井深上下存在两套地层压力系统。玛纳002井的倾角测井确定的断点深度为1 490和2 240 m,由地表露头、常规测井

① 新疆石油管理局测井公司. 准噶尔盆地南缘地区玛河气田玛纳1井测井解释报告,2006.

② 新疆石油管理局测井公司. 准噶尔盆地南缘地区玛河气田玛纳002井测井解释报告,2007.

③ 新疆石油管理局测井公司. 准噶尔盆地南缘地区玛河气田玛纳001井测井解释报告,2007.

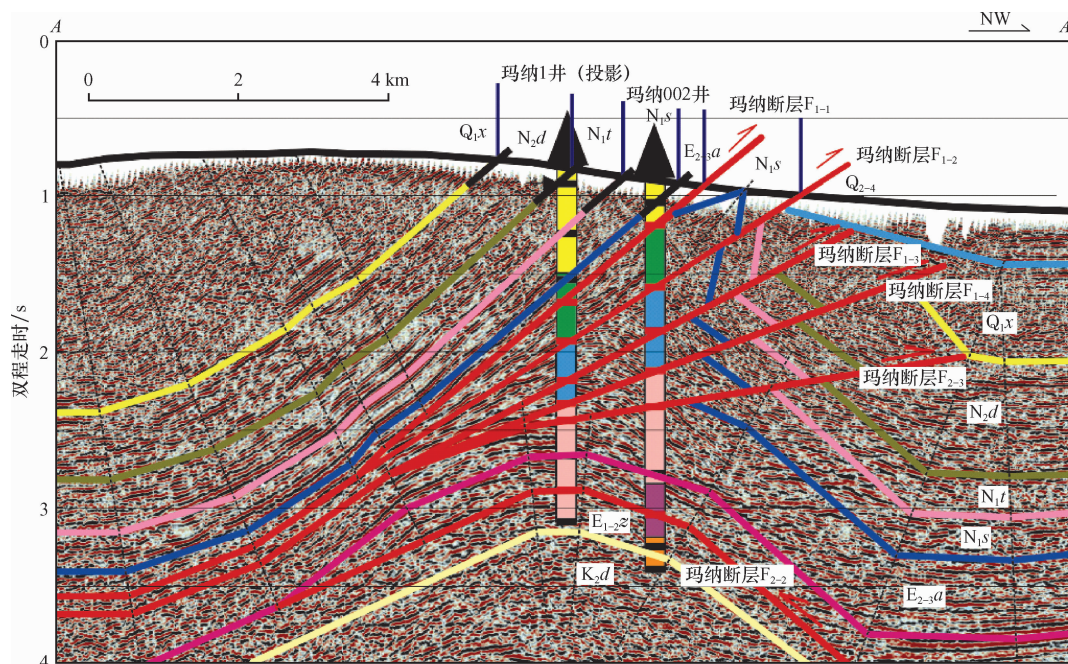


图6 天山北缘淮南逆冲褶皱带A—A'地震剖面构造解释(剖面位置见图1)

Fig. 6 Structural interpretation on seismic profile A-A' in the southern Junggar fold-thrust belt, northern Tianshan (see Fig. 1 for A-A' location)

和钻井异常压力梯度,可共同确定出逆冲断层发育深度分别为570,1 100,1 490,1 800和2 410 m。根据玛纳002井MDT测压数据表明在2 470 m断点井深上下存在两套地层压力系统绘制的压力剖面,地层倾角测井资料在该井深上下也有显示,地层倾角从25°减少到10°。根据断层相关褶皱理论,结合这些资料分析,我们有理由认为,玛纳002井的井深2 470 m断点和玛纳1井的井深2 410 m断点是同一断层。

综合以上地层和断层标定多种方法,在对A—A'地震剖面解释中,玛纳1井和玛纳002井标定出多个逆冲断层断点,据此我们标定出横穿玛纳斯背斜的地震剖面上钻井投影确定的所有断层点(图3),最终的解释结果可见图6,而且这个解释的构造剖面是可平衡。在此,我们不讨论构造缩短量或者缩短率。在地震层位标定中,发现钻井标定地层和断层点的层位特征也是很明显的。已有的钻探结果证实古近纪安集海河组为准南地区的异常高压层,玛纳斯逆冲断层 F_{1-1} 是主断层, F_{1-2} 是 F_{1-1} 次级逆冲断层,这两条断层形成时代最晚,切穿第四纪地层。主断层 F_{1-1} 对油气保存不利,次级逆冲断层 F_{1-2} , F_{1-3} , F_{1-4} , F_{1-5} 发育在异常高压层——安集海河组地层中,但异常高压层——安集海河组很好保存了下伏断层运移来的

油气。次级逆冲断层 F_{1-2} (玛纳002井钻遇井深1 490 m)、 F_{1-4} (玛纳002井钻遇井深1 800 m)之间地层压力系数达到1.60左右,由于地层压力过高、地应力太强,井壁跨塌严重,导致井底套管挤压变形,只能用1.80~1.87 g/cm³的钻井液钻进,而且钻进过程中挂卡事故较多。说明挤压逆冲断层切穿泥岩可导致地层出现更高的压力系统,地层超压更为明显。反冲断层 F_{2-2} 发育在超压层紫泥泉组地层之下,导致紫泥泉组地层出现两个压力系统,地层产状从断层上盘30°转变下盘10°左右,并成为油气运移通道断层。

3 讨论和结论

在玛纳斯背斜构造二维或三维地震资料解释中,由于地震资料尤其是中浅层地震反射杂乱,无法很好地标定地层或断层。为此在构造建模研究中,多数研究者利用浅部地表地质在地震剖面上标定地层界线或断层,再加上常规钻井的测井资料和地质分层对断层和地层标定,都可很好地限定地下地质层位和断层发育位置。有时还利用地层倾角测井资料,也可识别出部分断层点,但对断层的标定仍然存在一定的局限性。尤其是淮南地区逆冲断层的发育是沿古近系安集海河组泥岩、

页岩滑脱,地层增厚较大。以上方法和地层倾角测井均无法识别安集海河组泥页岩中发育的断点。而且安集海河组泥岩地层比其他地层存在更高的异常高压,压力系数达1.57~1.8(图3),成为钻井工程难点和事故易发点,准确地预测断点位置也是避免钻井事故之必须。

通过单井倾角测井资料(主要是地层倾角倾向和倾角的变化),结合常规测井资料,由玛纳1井资料单独确定的逆冲断层有两个断点,井深分别为1750,2300 m;由玛纳002井资料单独确定的逆冲断层有两个断点,井深分别为1490,2240 m。这些逆冲断层的断点与地表露头确定的断层倾角存在较大差异,说明逆冲断层为隐伏断层。通过地表露头确定的断层 F_{1-1} 和 F_{1-2} 向下延伸可与玛纳1井分别为1357,1470 m的断点井深相匹配,玛纳002井分别为570,1100 m的断点井深相匹配。通过玛纳1井和玛纳002井邻井比对,可以发现霍玛吐逆冲断层 F_{1-1} 发育在玛纳002井的正常压力段底部,可与地表露头确定的断层相匹配,但逆冲断层 F_{1-1} 与玛纳1井的正常压力段底部并不一致,仍需进一步研究。霍玛吐逆冲断层 F_{1-2} 均发育在玛纳002井和玛纳1井的压力过渡带底部,也与地表露头确定的断层相匹配,逆冲断层 F_{1-2} 与玛纳1井投影无关。这两条断层均可通过地表断层倾角,或者钻井两点连线和钻井地表的三点连线比较准确地确定断层发育空间位置,并可与地层压力梯度变化建立起相应的对应关系。

现在问题的关键是无法由单井倾角资料确定这些断层的倾角,或者通过这两口井的两点连线来确定,中浅层的地震反射又比较杂乱,导致地层倾角变化是否是同一条断层仍存在疑问?前已叙述,在玛纳斯背斜发育的逆冲断层控制了异常地层压力系数分布,如逆冲断层 F_{1-1} 和 F_{1-2} 控制了地层压力,为此我们认为玛纳002井1490 m井深的断点与玛纳1井1750 m井深的断点为同一断层 F_{1-3} ;玛纳002井1800 m井深的断点与玛纳1井2231 m井深的断点为同一断层 F_{1-4} 。虽然两井的压力系数不一致(图5),但该断层均位于异常高压带的底部。玛纳002井2240 m井深的断点与玛纳1井2300 m井深的断点为同一断层 F_{1-5} 。该断层导致上下盘地层倾角发生突变,虽然该断层不位于异常高压带的底部。压力系数均大于1.6,相差不大。这样,通过玛纳1井和玛纳002井

两口井邻井资料比对,新确定了安集海河组异常高压泥岩地层中发育有3条逆冲断层: F_{1-3} , F_{1-4} 和 F_{1-5} 。断层剖面组合表明,在深部这些分支逆冲断层 F_{1-1} , F_{1-2} , F_{1-3} , F_{1-4} 和 F_{1-5} 合并上为一条逆冲断层——霍玛吐逆冲断裂。霍玛吐逆冲断裂就由5条倾向相同而倾角不同的逆冲断层组成的叠瓦扇。

已有的钻井资料表明,当钻井钻遇逆冲断层的断点,钻井力学参数也会发生突变现象,地层压力检测图也说明了这一点。最为明显的是不同的压力系统是由断层控制,如玛纳反冲逆冲断层 F_{2-2} (图6)。为此我们认为安集海河组异常高压地层存在的地层压力系数变化突变点可以作为逆冲断层发育点。

呼图壁背斜钻探的呼2井沙湾组实测压力系数为1.13~1.31,其下的紫泥泉子组仅为0.95~0.96,声波测井计算的压力系数在安集海河组的最高值也仅1.3,根据岩心声发射实验结果安集海河组最大水平主应力梯度大于上覆地层压力梯度,后者又大于最小水平主应力梯度,与水力破裂实验确定的地应力结果相同^[5]。这说明在该组地层内,最大主应力的作用已经超过了上覆负荷,是形成超压的主要原因。构造作用挤压强烈是准噶尔盆地南缘的重要特点,为异常高压形成的主要因素,作为应力聚集的表现形式为发育逆冲断层^[6],因此异常地层压力分带也是受断层控制的。淮南地区逆冲构造活动十分强烈,尤其新生代强烈的近南北向水平挤压应力除可通过断裂活动等形式释放外,一部分还可能转化为流体压力。南缘异常超压形成时间主要为上新世—更新世,与淮南逆冲褶皱带的形成同期,基本与新近纪圈闭聚集油气同时,异常压力有利于孔隙的保存。

中西部许多逆冲构造带与淮南逆冲褶皱冲断带具有相似的地质条件,如库车褶皱冲断带许多逆冲断层就发育在膏岩、膏泥(页)岩中,这些地层同样为异常高压层,利用异常地层压力系数同样可识别出许多逆冲断层,这将有助于该地区和其它相似地区的油气预测和勘探以及钻井工程设计。

参 考 文 献

- [1] 何登发,杨庚,管树巍,等.前陆盆地构造建模的原理与基本方法[J].石油勘探与开发,2005,32(3):7-13.
He Dengfa, Yang Geng, Guan Shuwei, et al. Principles and methodology of structural modeling in foreland basins[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(3): 7-13.

(下转第224页)

- portation and secondary migration of the Silurian-Cambrian in Tarim Basin[J]. Gas Technology, 2008, 28(6): 23-26.
- [10] Meng Qingyang, Pang Xiongqi, Gao Jianbo. The multi-factor recombination and processes superimposition model for hydrocarbon accumulation: application to the Silurian in the Tarim Basin[J]. Petroleum Science, 2008, 5(1): 13-19.
- [11] 肖晖, 任战利, 崔军平. 塔里木盆地孔1井志留系含气储层成藏期次研究[J]. 石油试验地质, 2008, 30(4): 357-362.
- Xiao Hui, Ren Zhanli, Cui Junping. Studies of accumulation stages of Silurian gas-bearing reservoir in well Longque 1 in the Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2008, 30(4): 357-362.
- [12] 吕修祥, 白忠凯, 赵风云. 塔里木盆地塔中隆起志留系油气成藏及分布特点[J]. 地学前缘, 2008, 15(2): 156-166.
- Ly Xiuxiang, Bai Zhongkai, Zhao Fengyun. Hydrocarbon accumulation and distributional characteristics of the Silurian reservoirs in the Tazhong uplift of the Tarim basin[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(2): 156-166.
- [13] 房晓璐, 傅恒, 刘雁婷. 塔河地区志留系柯坪塔格组沉积特征[J]. 天然气技术, 2009, 3(5): 6-9.
- Pang Xiaolu, Fu Heng, Liu Yanting. Sedimentary characteristics of Silurian Kepingtage Formation in Tahe Area[J]. Natural Gas Technology, 2009, 3(5): 6-9.
- [14] 李彬, 贺凯, 吕海涛, 等. 塔北地区二叠系火山岩岩性特征及油气勘探前景[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(6): 851-858.
- Li Bin, He Kai, Lü Haitao, et al. Lithologic characteristics and petroleum exploration potential of the Permian volcanic rocks in northern Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(5): 851-858.
- [15] 张翔, 田景春, 彭军. 塔里木盆地志留-泥盆纪岩相古地理及时空演化特征研究[J]. 沉积学报, 2008, 26(5): 762-771.
- Zhang Xiang, Tian Jingchun, Peng Jun. The Lithofacies-paleogeography and space-time evolvement of Silurian-Devonian in the Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(5): 762-771.
- [16] 郭少斌, 洪克岩. 塔里木盆地志留系-泥盆系层序地层及有利储层分布[J]. 石油学报, 2007, 28(3): 44-50.
- Guo Shaobin, Hong Keyan. Silurian-Devonian sequence stratigraphy and favorable reservoir distribution in Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007(28)3: 44-50.
- [17] 贾进华, 张宝民, 朱世海, 等. 塔里木盆地志留纪地层、沉积特征与岩相古地理[J]. 古地理学报, 2006, (8)3: 339-352.
- Jia Jinhua, Zhang Baomin, Zhu Shihai, et al. Stratigraphy, sedimentary characteristics and lithofacies palaeogeography of the Silurian in Tarim Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2006, 8(3): 339-352.
- [18] 郑冰, 承秋泉, 高仁祥. 塔里木盆地东北部奥陶-志留系沉积成岩作用[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(1): 85-92.
- Zheng Bing, Cheng Qiuquan, Gao Renxiang. Ordovician-Silurian sedimentation and diagenesis in northeastern Tarim basin[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(1): 85-92.
- [19] 李玉胜, 谢传礼, 邓兴梁, 等. 英买34、35井区志留系柯坪塔格组储层特征及其控制因素[J]. 中国地质, 2009, 26(5): 1087-1098.
- Li Yusheng, Xie Chuanli, Deng Xingliang, et al. Reservoir characteristics and controlling factors of Silurian Kepingtage Formation in YM34 and YM35 well blocks[J]. Chinese Geology, 2009, 26(5): 1087-1098.
- [20] 邢凤存, 白振瑞, 李祯, 等. 塔里木盆地早、中志留世沉积序列及其对构造-海平面变化的响应: 以柯坪露头区为例[J]. 地球科学, 2011, 36(3): 541-554.
- Xing Fengcun, Bai Zhenrui, Li Zhen, et al. Early-Middle Silurian sedimentary successions and their response to tectonism and eustatic fluctuations: a case study from the outcrops in Keping Area, Tarim Basin[J]. Earth Science, 2011, 36(3): 541-554.

(编辑 张亚雄)

(上接第207页)

- [2] 邓起东, 冯先岳, 张培震, 等. 天山活动构造[M]. 北京: 地震出版社, 2000: 1-399.
- Deng Qidong, Feng, Xian Yue, Zhang Penzheng, et al. Active tectonics of the Chinese Tianshan Mountain[M]. Beijing: Seismological Press, 2000: 1-399.
- [3] Shaw J H, Connors C, Suppe J. Seismic interpretation of contractional fault-related folds: an AAPG seismic atlas[M]. American Association of Petroleum Geologists Special Publication, 2004: 1-270.
- [4] 王薇, 张海, 任剑, 等. 地层压力的预测方法综述[J]. 内蒙古石油化工, 2005, 5(9): 46-47.
- Wang wei, Zhang Hai, Ren Jie, et al. A summary of some relative technologies of predicting formation pressure[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2005, 5(9): 46-47.
- [5] 王震亮, 孙明亮, 耿鹏, 等. 淮南地区异常地层压力发育特征及形成机理[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(1): 32-33.
- Wang Zhenliang, Sun Mingliang, Geng Peng, et al. The development features and formation mechanisms of abnormal high formation pressure in southern Junggar region[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(1): 32-33.
- [6] Orlov A, Omelchenko V, Trubenko A, et al. Incidence of tectonic stress on overpressure development in Ukrainian basin[C]. In Swennen R, Roure F, Granath J W, eds. Deformation, Fluid flow, and reservoir appraisal in foreland fold and thrust belts. AAPG Hedberg Series, 2004, (1): 245-255.

(编辑 高岩)