

膝褶、膝褶带、共轭膝褶带

——一种可能的新型油气构造样式

张波¹ 李生福^{1,2} 张进江¹ 郑亚东¹ 张仲培³

1. 北京大学地球与空间科学学院 2. 中国石油青海油田公司采油二厂 3. 中国石化勘探开发研究院

张波等. 膝褶、膝褶带、共轭膝褶带——一种可能的新型油气构造样式. 天然气工业, 2010, 30(2): 32-39.

摘要 受控于最大有效力矩准则的共轭膝褶带, 是各向异性岩石中较为常见的构造变形样式, 依据大量国内外学者的研究资料及勘探实践成果, 结合膝褶带几何学、形成机制以及地球物理资料解释成果等综合分析认为, 大型膝褶带和共轭膝褶带可能被误解释为“两断夹一隆”的构造形态, 原先一些构造样式被解释为高角度逆冲断层的地方更可能是膝褶的枢纽带。研究结果认为, 膝褶带具备形成油气构造圈闭的物质条件, 可形成有利油气聚集区; 膝褶带和共轭膝褶带作为非主造山期构造在油气勘探和构造解释上应引起石油地质学家和地球物理学家的重视; 结合野外地质构造观测, 利用地球物理资料准确识别和区分膝褶带构造与断裂构造是寻找油气构造圈闭的新思路和新方法。

关键词 膝褶 膝褶带 共轭膝褶带 褶皱 最大有效力矩 含油气构造 构造圈闭 油气聚集区

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2010.02.007

各种规模的膝褶带是自然界极为普遍的现象, 是层状介质或纤维状介质在外力挤压过程中潜在的破裂模式^[1], 是调节岩石变形的重要构造样式^[2]。

自1897年Clough提出膝褶构造样式概念以来, 膝褶和膝褶带的几何学、运动学、形成机理的研究, 备受物理材料学和构造地质学家关注。在地质学领域, 地质学家已经由早期对矿物晶体内显微膝褶带的观测发展到对地震资料中膝褶带的精细识别^[3-4], 从对膝褶带几何学定性描述和试验模拟^[5-6]到对其形成机制的

理论探讨^[2,5]; 使得膝褶带理论研究内涵更加丰富, 现实意义更为明朗^[2,7]。

膝褶带是层状地质体中较为常见的构造现象, 尤其是各向异性的片岩和部分沉积岩(图1)。目前, 对沉积岩中膝褶带研究主要集中于理论层面, 例如几何学特征和力学性质的探讨^[8-9]。

有关膝褶带的形成机制, 一直是理论界探讨和争论的焦点^[2,10-12]。我国学者郑亚东等^[2,7]在对共轭膝褶带的夹角进行定量分析之后, 获得110°的夹角, 并

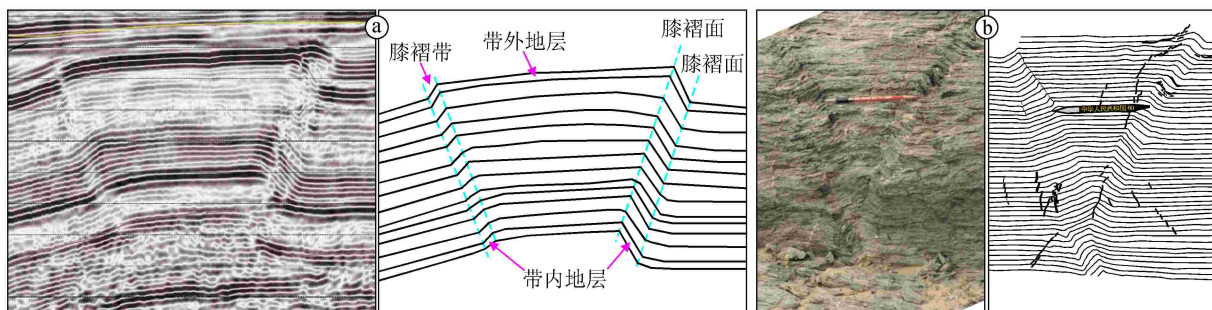


图1 自然界中、大尺度的膝褶构造图

(a) 二维地震剖面上识别出的膝褶, 塔里木盆地巴楚隆起带内; (b) 片岩内发育的膝褶构造, 内蒙古大青山构造带

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(批准号:40802050), 中国博士后科学基金(编号:20070420065)。

作者简介: 张波, 1978年生, 讲师; 主要从事构造地质学和构造物理学教学和研究工作。地址: (100871) 北京市海淀区北京大学地球与空间科学学院。电话: (010) 62758325。E-mail: geozhangbd@pku.edu.cn

提出岩石变形的最大有效力矩准则,解决了 Mohr-Coulomb 准则对自然界广泛存在的大变形不能给予合理解释的难题,该准则控制膝褶带的取向,因而可解释拆离褶皱的形成^[2,11]。基于野外观测和地球物理资料分析,郑亚东等提出柴达木盆地油泉子构造为共轭膝折带构造样式,而非断裂构造;并认为其可能形成膝褶带相关的裂缝型油气藏^[11-12],最大有效力矩准则在柴达木盆地油气地质勘察实践中得到了进一步证实和应用;新近研究报道了塔里木盆地巴楚隆起区的二维地震剖面上也识别出大量膝褶带构造^[4]。近期 Camerlo and Benson^[3]对墨西哥湾深水盆地西北部 Perdido 褶皱带内的地震资料重新处理和解释发现:控制该褶皱带的主构造样式不是“背冲断裂”组合或断层相关褶皱,而是“膝褶型褶皱和共轭膝褶带”,并指出了地震资料解释中造成膝褶带误解为断层的技术原因和理论认识因素,如高角度背冲断裂解释方案存在的理论缺陷。国内丁道桂等^[13]在对川东褶皱带高陡背斜研究之后也认为区域性大尺度膝褶构造控制川东地区天然气藏的形成与分布。

上述理论和实践成果为进一步探索膝褶带构造在油气勘探开发实践中的应用提供了基础和依据。然而,这一重要的构造样式往往在油气勘探实践中被忽视和遗忘,究其原因,可能归因于人们对该构造样式的认知程度、地震资料处理技术和手段以及其在地震剖面中识别难度。所以笔者立足于从膝褶的野外观测、几何学、运动学及其形成机制、地球物理勘探研究新成果诸方面讨论含油气盆地膝褶构造变形的识别依据及油气成藏的可能性;试图从构造地质理论层面为石油地质学家和地球物理学家提供揭示“两断夹一隆”或“背冲断裂”样式的新方案——“共轭膝褶带”构造样式。

1 膝褶、膝褶带几何学特征

脆性断裂或破裂属于岩石的不连续变形,而广义上膝褶为一种特殊的褶皱类型^[12],属岩石连续变形范畴,是变形挤压方向与岩石层面(或面理)近平行时发育的变形样式^[14];而在本文中,膝褶(kink)、膝形褶皱(kink fold)和膝褶带(kink-band)这些术语是最广的含义,膝褶发育尖锐的或平缓弯曲的枢纽;膝形褶皱是指某一种膝褶化作用机理形成的单斜几何形态褶皱,Suppe 曾使用“角度或弯曲褶皱(angular or curved folds)”来称这类构造^[15];膝褶带为一个狭窄条带,由一组近平行的界面围限,带内先期发育的面理或层理发生偏转进入新的方向,带内具有一致的层厚(图 2-A);属连续变形范畴^[2,16];其几何学特征是由平直两翼构成的不对称膝状褶皱,平缓翼长、陡倾翼短,具有尖棱狭窄的转折端(图 2-a, b);膝褶带的层间滑动局限在膝褶带的陡翼内(图 2-c);故而,单个膝褶带具有尖棱狭窄的转折端(图 2-c),而共轭膝褶带间的背斜具有平直的箱形转折端(图 1-b、2-b)。与弯滑褶皱的差异在于,弯滑褶皱的两翼发育层间滑动,通常形成圆滑的转折端(图 2-d)。

剖面上,膝褶带沿长度方向逐渐呈锥形消亡于一点(图 2-a),或者通过变窄进入某个狭窄的剪切带;膝褶带几何样式必然引起面理或层理的相对位移;膝褶带通常以共轭对样式产出,引起共轭膝褶带和共轭褶皱(图 1、图 2-b);膝褶带相互穿插决定了膝褶褶皱枢纽或膝褶轴的方向(图 2-b)。

许多野外观测报道膝褶带常呈单斜^[2,15,17]或呈共轭对产出^[2,6,15,18],且两者间的夹角一般为 110° ,膝褶带边界与长翼间的夹角大约为 55° (图 2-b),然而,并非所有的膝褶带体系都可以利用二维几何和运动学给

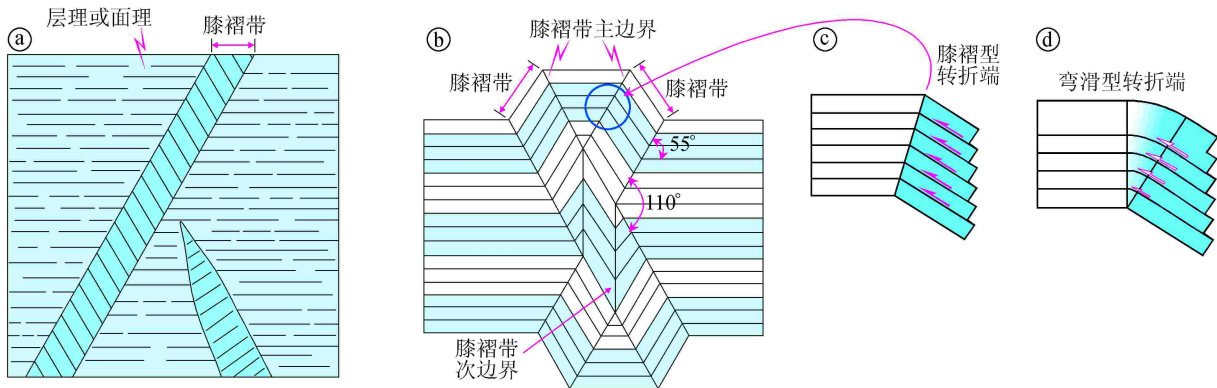


图 2 理想膝褶带几何特征示意图

(a)面理或层理穿透两个相互平行的膝褶面发生角度的改变,并导致膝褶带两侧面理发生了相对错位,膝褶带呈锥形灭亡于一点^[17]; (b)共轭膝褶带交叉; (c)膝褶型转折端形成的褶皱; (d)弯滑型转折端形成的褶皱

予准确的描述,Kirschner and Teixell^[19]认为强烈弯曲的膝褶带几何为非平面应变的产物,这种非平面应变源于局部应力的调解,并给出了膝褶带三维空间几何模型。该模型将膝褶带几何和运动学与体应变间建立了关联(图 3),类似于脆性断裂作用^[20-22]、脆韧性断裂作用^[23]和韧性剪切作用^[24]。

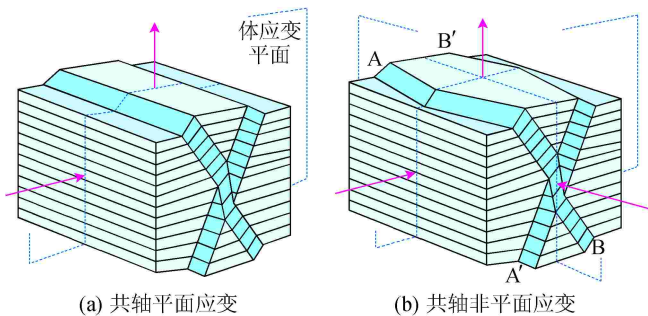


图 3 不同流变态中膝褶带体应变形式图

(a)在主应力与主增量应变轴对称情况下,在共轴平面应变变形过程中,共轭挤压膝褶带的发育;(b)共轴非平面应变变形中共轭膝褶带发育

膝褶带和共轭膝褶带几何学特征表明:膝褶带枢纽处容易形成构造高点,共轭膝褶带之间的“V”形褶皱也具备构造高位特征(图 2、3),这是形成与背斜高位有关油气藏的重要条件;三维空间膝褶带或共轭膝褶带纵向和横向贯穿多套地层单元,且共轭膝褶带也存在互相交叉,使流体在地层间、地层与膝褶带之间发生运移和聚集成为可能,保证了完整的压力体系;膝褶带存在一定的宽度暗示其具备富集流体的空间条件。膝褶带内地层倾角发生旋转,统一呈现高角度(图 2、3),而膝褶带外地层未发生旋转,普遍低角度。因此,

在地震剖面上膝折带内普遍以低反射带出现,而带外呈高反射,同时这个低反射带具有一定的宽度,从一般视觉角度观察,膝褶带两侧的地层似乎发生了一定的位移,在地震剖面上往往会被误解为脆性断裂。

2 膝褶带形成机理及其潜在的油气构造意义

膝褶带生长机理备受学者关注^[25]。Rondeel^[26]很早就提出膝褶带的扩张增厚是通过膝褶带枢纽面旋转方式来迁移的,这样的方式将引起膝褶带内部岩层产状与外部岩层产状间夹角 φ 随膝褶带扩展而逐渐增大(图 4-a)。Honea and Johnson^[27]进行弹性多层膝褶作用的数值模拟,试验结果表明,膝褶带的宽度与弯曲刚度、剪切强度、岩层局部初始倾斜等因素有关,但 Honea and Johnson^[27]的理论仅仅适用于滑动面平行挤压轴的情况。随后,Weiss^[28]提出膝褶带宽度扩张生长的两个模式(图 4-a,图 4-b),但他强调当 φ 角值小于 60° 时,“生长模式 1”比“生长模式 2”更为重要,当连续生长的膝褶带内部的岩层旋转角度 φ 大约为 60° 时,生长模式 2 占主要地位^[8]。其他的试验结果也暗示,在褶皱作用的早期,膝褶带增宽方式类似于“生长模式 1”^[19]。

目前,较被认可的两个认识是:一种观点强调,膝褶翼绕固定的枢纽旋转(图 5-c,图 5 中灰色条带代表机械性质各向同性的能干层,其内部没有剪切;红色条带是非能干层,可以发生内部剪切);而另一种观点则认为枢纽的侧向迁移引起的扩展形成膝褶带^[8](图 5-a)。在实际地质研究中,一些学者假设为前者^[10,18,29],

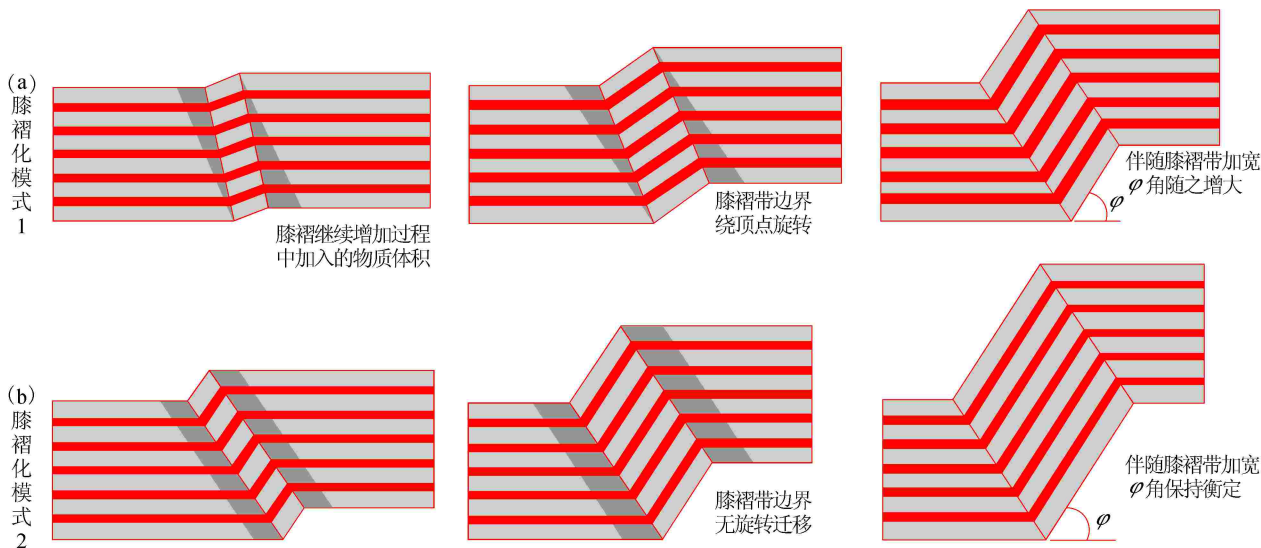


图 4 膝褶带增宽模式图

(a)膝褶带宽度增加模式:随着膝褶带的扩张, φ 角增大;(b)膝褶带宽度增加模式:当膝褶带扩张时, φ 角始终保持恒定

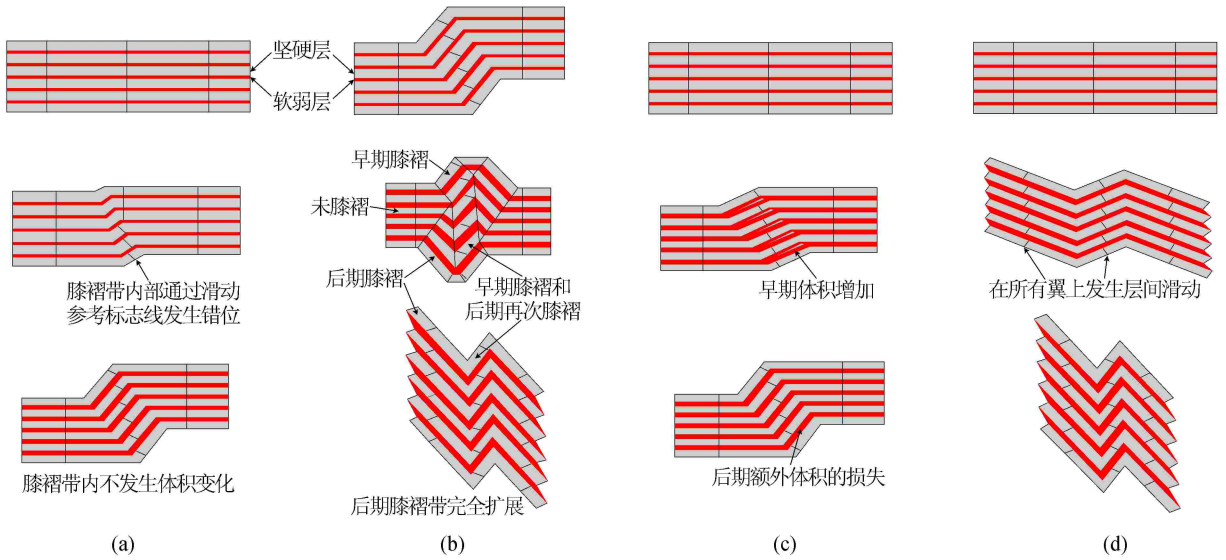


图5 理想状态下的膝褶和“V”形褶皱的4种生长机理图。

(a)活动枢纽膝褶生长和膝褶带形成过程;(b)活动枢纽“V”形褶皱作用通过活动枢纽膝褶带的交叉和扩展产生;(c)固定枢纽膝褶化:固定的膝褶带边界之间区域的地层旋转;(d)固定枢纽“V”形褶皱作用:岩层相对于固定的枢纽发生旋转产生层弯曲和紧闭褶皱

而新近的野外观测和多层介质试验结果暗示活动枢纽膝褶化作用的解释似乎更为合理^[8]。

枢纽迁移模式(hinge-migration model)认为:膝褶带初始态为透镜状,沿纵向迁移,随应变递增,膝褶带侧面通过侧向迁移而促使膝褶带加宽(图5-a)。在生长全过程,膝褶带平分内、外岩层(或面理)(即 $\alpha = \beta$),体积和面理(或岩层)空间守恒;这个模型暗示膝褶面改变了其内部物质的位置。在固定枢纽模式中,在无限小应变中,膝褶面的物质位置和 α 是确定的,随着应变的逐渐加强,两膝褶面之间的岩层面理发生旋转,这样 β 和 γ 就存在一个相反的关系;在旋转的过程中,体积和面理空间发生改变(图5-c)。这两个模型在自然界都有各自的实例,但也存在一些膝褶带不符合这两个模型,例如澳大利亚东南部Myster海湾膝褶带^[6]。

Verbeek^[30]提出判别膝褶带生长类型的最通用方案,即使用膝褶内外角大小关系进行识别;在理想活动枢纽膝褶生长模型中,内外膝褶角大小相等(图6-a);

另一种情况,如果膝褶带内总体积增大(图6-b),在固定枢纽褶皱生长模型中,内外角度关系表现为: $\beta > \alpha$ (图6-b)。

为了验证Verbeek提出的这种关系,Stewart and Alvarez^[8]对意大利Umbriamarche Apennines褶皱区内膝褶带进行了大量细致的测量和统计,发现在活动枢纽机制控制下的膝褶化过程中,和角很少有相等的情况,进一步的分析显示: β 和 α 角度关系主要受控于膝褶带内或膝褶带外岩体顺层面的微弱滑动,当层间滑动发生在膝褶带内部时,产生 $\beta < \alpha$ 的关系(图6-c);当层滑发生在膝褶带外侧时,就会有 $\beta > \alpha$ (图6-b);他们强调微量的层滑都可能对 β 和 α 角的差异产生很大的影响,且微弱的变形对 β 和 α 角产生明显改变,而与膝褶作用无关^[8]。

从膝褶带不同的生长模式我们不难总结(图5、6),膝褶化过程中,膝褶内和膝褶外岩层的弯曲与层间滑动是主要的变形方式,这种变形方式将在膝褶带内

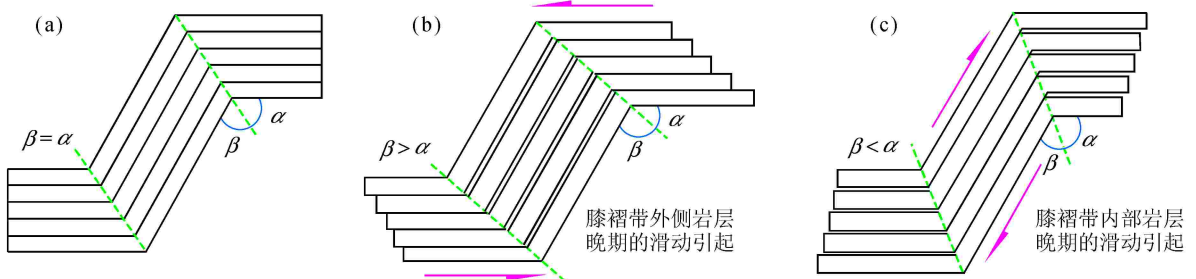


图6 膝褶带内外岩层顺层滑动对膝褶带内、外角关系的影响效果图

或膝褶带外形成丰富的张性破裂(微裂缝)(图 5-c,图 6-b、c);在低孔隙度、低渗透率岩层中,陡倾膝褶带或共轭膝褶带的发育将大大增强总储集渗透能力。膝褶带的形成从几何上要求前后体积守恒: $\beta > 90^\circ$ 时,岩层长度缩短,厚度增大; $\beta < 90^\circ$ 时,岩层长度拉长,厚度减薄。然而,许多天然和实验形成的膝褶带,带内常出现矿脉充填的各种张裂空间^[11-12],包括层间剥离脉、雁行张性脉、鞍状脉和三角形矿脉^[31],表明带内岩层缺乏足够的可塑性,岩层长度和厚度不能满足变形所要求的变化。如果岩层长度保持不变,带内的体积变化(扩容)与 α 和 β 之间关系为: $\Delta = \sin\beta/\sin\alpha - 1$ ^[31-32]。因此,膝褶带形成早期为: $\beta > \alpha$,膝褶带表现为扩容作用(图 6-b),带内面理或层间厚度(b_1)大于带外面理或层间厚度(b_2),膝褶带内岩层趋于增厚; $\beta = 90^\circ$ 时,膝褶带厚度达到最大;如果岩层的厚度不变,带内体积便增大,变形后带内空间体积的增大所导致的真空或低压趋于将周边的高压流体(热液或油气流体)吸入,形成膝褶带内顺层剥离而充填矿脉或岩脉^[18,31-32]。当内夹角 β 增至 90° 以后($\beta < \alpha$)带内流体压力增大,岩层长度趋于加长、厚度趋于减薄,形成与层理近垂直的张裂隙(图 6-c);流体趋于流入这些低压空间和挤入膝褶带旁侧形成鞍状矿脉或油气聚集。因此膝褶带有利于流体的运移和聚集。

Stubley^[6]的理论研究结果也支持膝褶带内张裂隙的出现,他认为最大主压应力 σ_1 与膝褶带外部岩层间的夹角大小可能对已有膝褶带的改造起主要控制作

用,指出 σ_1 位于已有膝褶带面与其外部岩层交角的锐角方向,并且剪切应力沿膝褶带总旋转的反方向(图 7-a);试验研究也表明新的、或已存在膝褶带的侧向扩展支持这种应力场条件^[33]。另一种情况是, σ_1 的方向位于已有膝褶带与外部岩层交角的钝角方向(图 7-b),膝褶带外部地层发生层间滑动,并进入膝褶带内部可能是膝褶带加宽的一个重要因素,同时也诱使阶梯状膝褶带面或膝褶带面的错位、张性破裂的出现(图 7-b2,图 7-b4)。理论和野外观测一致表明,张裂隙是膝褶带内变形或膝褶生长过程中的伴生产物^[11]。

郑亚东等曾利用断层阀模式对柴达木盆地油泉子构造的膝褶带进行油气评价指出^[11]:断层阀模式合理地说明断层活动、流体压力和矿物沉淀之间的密切关系及其周期性的活动规律;膝褶带虽与断层带不同,但其成长过程引起的扩容和伴生的张裂隙,同样会导致膝褶带内流体压力的骤然下降,并吸入带外流体;这种扩容和泵吸作用可能有利于油气运移和聚集成藏,同时,由于膝褶带边界保持岩层的连续性和连通性,无大型贯穿性断层,因而,比断层带更有利于流体的运移与聚集;地面出露的膝褶带中见有残余油迹,表明沿膝褶带确实发生过油气运移和聚集的过程,他们的研究推测,油泉子构造高点不仅有利于形成与背斜高点有关的一般性油气藏,而且有利于形成膝褶带裂隙油气藏^[11]。值得提及的是膝褶构造并不排除流体的垂向运移,尤其是在构造变形叠加活跃的区域,应力场体系的改变,可能造成膝褶的重新改造,如带内脆性破裂或断裂的发育(图 7-b)。

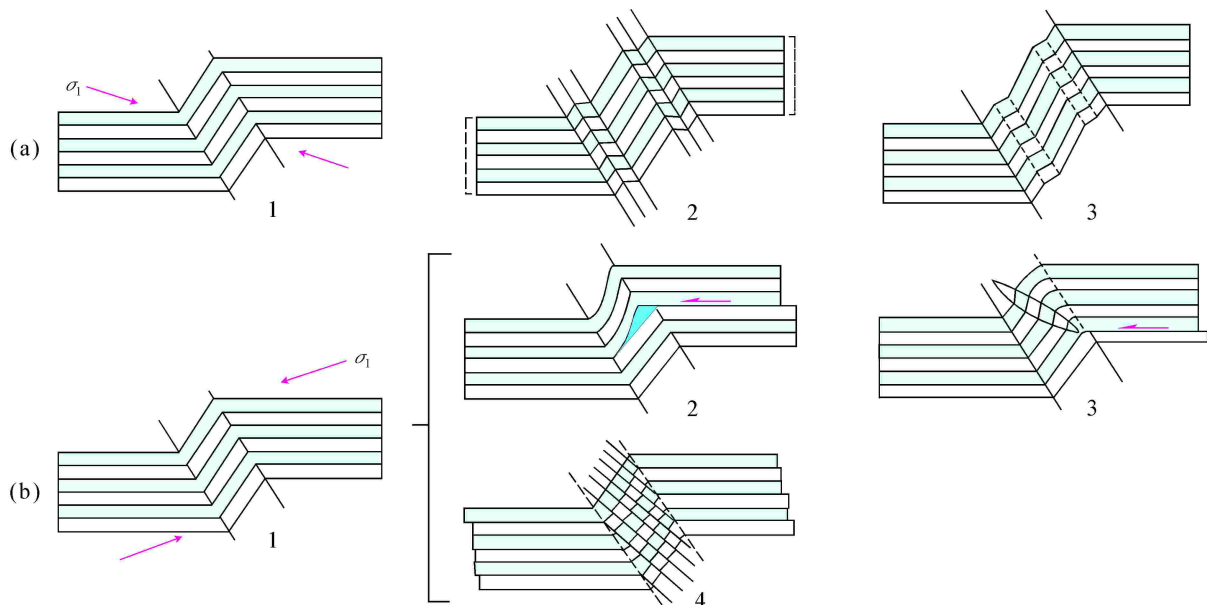


图 7 最大主压应力方向的不同对先存膝褶带改造的影响图

(a)最大主压应力方向位于膝褶带面与外部面理锐夹角方向时;(b)最大主压应力方向位于膝褶带面与外部面理钝夹角方向

3 基于地震信息的膝褶带识别

John Suppe 等^[34]在论述断层相关褶皱理论时曾预言膝褶带迁移是褶皱生长方式之一,控制生长地层

的发育;这一预测在随后的理论论证和地震资料解释中得到进一步证实^[34-35],他们给出了稳定倾角膝褶带轴面迁移的 5 种运动学模式和生长地层样式(图 8)。

在图8中,膝褶带不同迁移模式对其右翼褶皱中

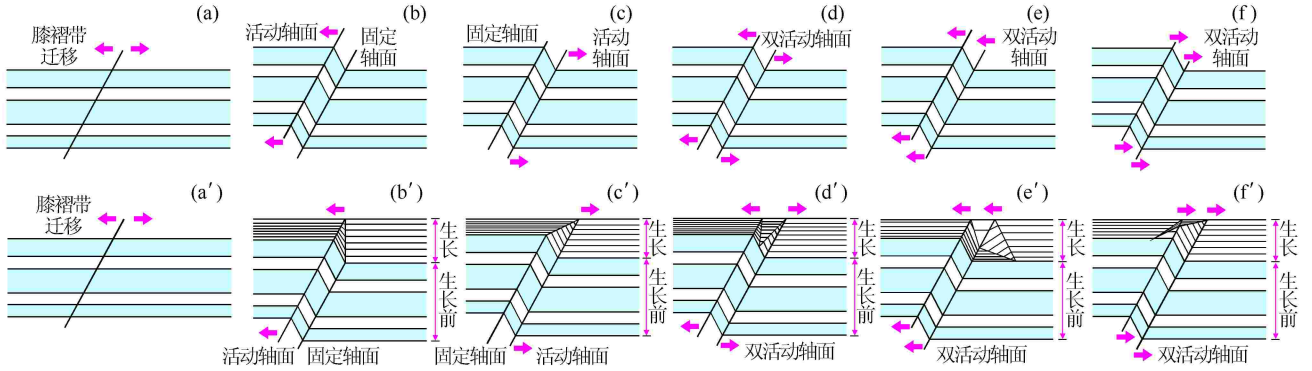


图 8 稳定倾角膝褶带迁移的运动学模式及变形过程中生长地层图

(a,b,c,d,e,f)为膝褶带迁移的 5 种运动学模式,膝褶带轴面相对运动(生长地层前的变形);(a',b',c',d',e',f')为 5 种膝褶带迁移变形过程中的生长地层

的生长地层的控制,生长地层很好地记录了膝褶轴面迁移变形过程的运动学特征。值得注意的是膝褶带宽度在生长地层前的岩层中是保持稳定(图 8),随着生长地层的发育,膝褶带向上逐渐变窄,在现今的沉积表面消减为零宽度,上述 5 种模式在自然界都可以观测到,可作为识别膝褶带的一个重要标志;新近笔者对塔里木盆地巴楚隆起区内二维地震剖面的解释中识别出的膝褶带构造样式及其生长三角,且生长三角类似于图 8-c 的理想模型。如图 9 所示,塔里木盆地巴楚隆起区横穿隆起西南西坡某地震剖面中的膝褶带和共轭膝折带,地震剖面所反应的生成地层,向上变狭窄的膝褶带;膝褶带内呈现低反射特征,剖面中显示的生成地层向上趋于狭窄(左侧膝褶带),而深部宽度稳定。

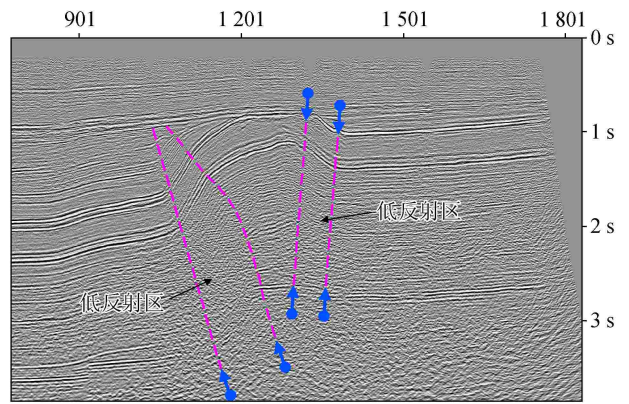


图 9 塔里木盆地巴楚隆起区膝褶带和共轭膝折带图

随着地震资料处理技术的不断提高,新近有学者尝试应用膝褶构造样式解释基底滑脱层发育的挤压构造区内的构造变形。解释,认为该带主要构造样式为膝褶带型拆离褶皱(图 10)(kink-style detachment fold),这与前人提出的断层转弯褶皱和叠瓦逆冲褶皱^[33]以及“两断夹一隆”构造样式的解释方案均然不同^[36]。

图 10-a:膝褶型拆离褶皱包括 2 个共轭膝褶带及其中间所夹持的背斜,共轭膝褶带向深部汇合;背斜

随着地震资料处理技术的不断提高,新近有学者尝试应用膝褶构造样式解释基底滑脱层发育的挤压构造区内的构造变形。

如 Camerlo and Benson^[3]对北美最大的背斜油气藏——墨西哥湾深水区 Perdido 褶皱带地震资料重新

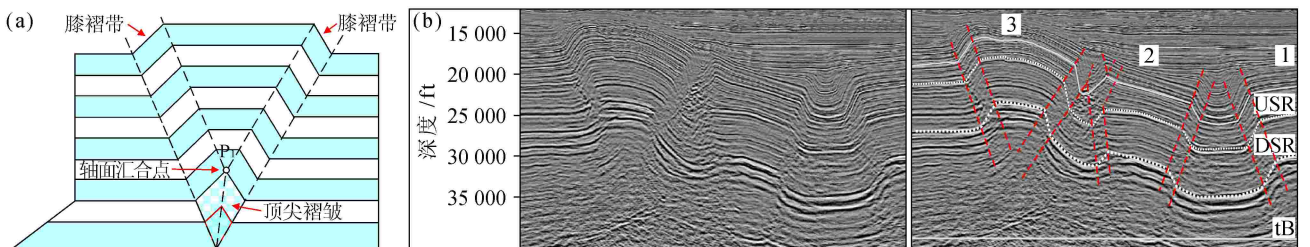


图 10 典型膝褶带型拆离褶皱几何模型(a)及膝褶构造样式的地震信息响应(b)图^[3]

顶呈三角形,且地层面平整,这个平整的地层宽度向下逐渐变小成一点,与轴面汇合点(P_1)重合;在汇合点之下出现顶尖褶皱。图 10-b;亚水平的地层为高反射区,在地震剖面上呈三角形;膝折带以低反射为特征。

Camerlo and Benson^[3]初步总结指出如何利用地震信息识别和区分膝褶构造和断裂构造,结合笔者新近对塔里木盆地巴楚隆起区内的二维地震资料分析和野外构造观测,认为膝折带一般呈低反射带,且条带状、低信噪比、低反射条带存在一定宽度,条带与其外部岩层呈高角度关系,带内反射面角度陡立,这些低反

射带常共轭出现(图 9、11);发育膝折带构造的下部一般存在一个区域性滑脱层,如膏岩层。

根据最大有效力矩准则^[2],对称共轭膝褶带间的理论共轭夹角为 $110^\circ \pm 20^\circ$,针对 Camerlo and Benson 解释的共轭膝褶带,笔者估测其钝交角平均值为 115° (图 11-b),而塔里木盆地巴楚隆起区内共轭膝折带的钝夹角统计平均值为 124° (具体数据和过程分析另撰文),与理论值相差无几,遵循最大有效力矩准则;与理论值的误差可能源于地震剖面横纵比例以及测量过程中人为因素所致。

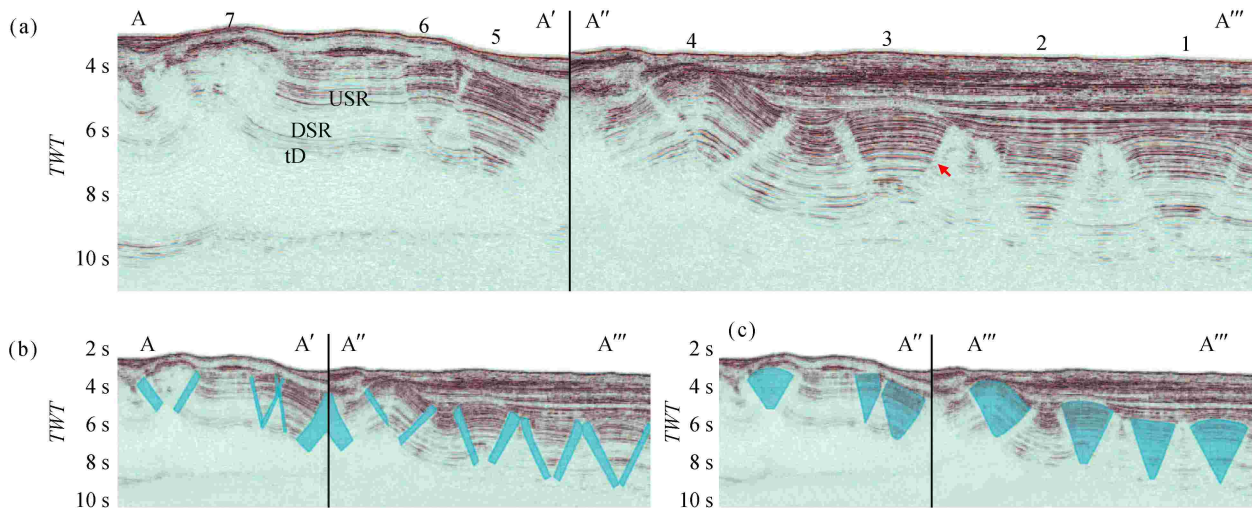


图 11 横穿 Perdido 褶皱带的地震剖面^[3]图

(a)未做解释的三维叠后时间偏移图;(b)褶皱中包含的高角度低反射带;(c)三角形高反射区;USR 为上地震反射面;DSR 为深地震反射面;tD 为韧性滑脱层顶;垂向放大约 1.5 : 1;TWT 为双传播时间

4 讨论与总结

在许多油气构造解释和分析中,一个常见的油气构造样式是逆冲相关的背斜圈闭,具体结构是“背冲断层”或“Y”形逆冲断层及其夹持的背斜形成“断隆构造”,即所谓的“两断夹一隆”构造样式;其中“两断”一般解释为高角度逆冲断层,这一解释缺乏理论支持,即根据地震资料解释的“陡倾逆冲断层”与断裂理论和岩石力学实验结果不相容^[2-3],构造地质学中广泛采用摩尔—库伦准则解释脆性断裂的形成,即脆性断裂面或破裂面与主压应力(δ)间的理论夹角为 30° ,共轭断裂面或破裂面间的夹角为 60° ;而自然界和实验模拟一致显示连续变形(韧性变形)不遵循摩尔—库伦准则,大量的野外地质构造观测表明共轭韧性变形带面对缩短(或挤压)方向的夹角总是钝角,Zheng 等统计自然界和试验观测数据^[2],表明共轭韧性变形带间缩短方向的夹角为 $95^\circ \sim 130^\circ$,最大有效力矩准则的理论预测角为 109.4° ^[2]。由此推断以往被解释为“两断夹一隆”

的构造样式实为连续变形,而非脆性构造,且 Zheng 等利用最大有效力矩准则对共轭膝褶带的理论预测可以合理解释这一构造现象^[2,11]。

新理论的实践以及新近地球物理资料解释已表明:最大有效力矩准则不但可以准确解释这类构造现象,更重要的启示是“两断夹一隆”的解释方案值得商榷,实际的构造样式更可能是大型共轭膝褶带,原先解释为高角度逆冲断层的地方可能是膝褶带的枢纽带。

膝褶带的几何学与运动学特征、形成机制等因素都决定其具备形成油气构造圈闭的有利条件,可以形成有利的油气富集区:①膝褶带枢纽处容易形成构造高点,膝褶带内发生陡倾变形且垂向增厚的岩层,即其本身发育一定宽度,无论是膝褶带自身还是共轭膝褶带之间的膝褶型褶皱的平直地层引起的大型楔体效应都具备形成有效构造圈闭的可能。②膝褶带自深部向浅部“纵向贯透”多套地层,膝褶带边界处横向保持与两侧岩层连续性和连通性,无大型贯穿性断层,因而比断层带更有利于流体的纵向和横向运移与聚集。③膝

褶型褶皱两侧为陡倾的膝褶带,而非断层,这就为构造内部提供了油气运移和储集的驱动机制;如果褶皱的长度受控于大型所谓“背冲断层”,发生统一的流体压力系统被分隔的可能性就会增大,最终由于开采储层压力的消耗而影响采收率;相反,膝褶型褶皱陡倾侧翼可能提供强大的统一压力体系支持,进而大大增加储层产能和开采。④膝褶形成过程(或再次膝褶化)和膝褶带几何形态都决定了这种构造样式具备良好封闭能力,膝褶作用不可能破坏圈闭,因为在膝褶化过程中弯滑是主要的变形方式,软弱单元被认为发生了剪切变形而非延伸产生开启破裂(这种开启破裂对圈闭的封闭能力有伤害)。⑤膝褶带内由于岩层扭折而发育各种扩容空间,表明膝褶带为裂隙和张性空隙的密集带;扩容作用的存在,其断层阀的泵吸作用不断抽吸带外两侧储层和烃源岩中的油气,有利于油气运移和聚集成藏。

参 考 文 献

- [1] WADEE M A, EDMUNDS R. Kind band propagation in layered structures[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2005, 53(9):2017-2035.
- [2] ZHENG YA DONG, WANG TAO, MA MNGBO, et al. Maximum effective moment criterion and the origin of low-angle normal faults[J]. *Journal of Structural Geology*, 2004, 26(2):271-285.
- [3] CAMERLO R H, BENSON E F. Geometric and seismic interpretation of the Perdido fold belt: northwestern deep-water gulf of Mexico[J]. *The American Association of Petroleum Geologist*, 2006, 90(3):363-386.
- [4] 张波, 张进江, 郑亚东. 塔里木盆地巴楚隆起带膝褶构造及其地球物理正演[C]//纪念李四光诞辰 120 周年暨李四光地质科学奖成立 20 周年学术研讨会. 北京: [出版者不详], 2009.
- [5] WILLIAMS P F, PRICE G P. Origin of kinkbands and shear-band cleavage in shear zones: an experimental study[J]. *Journal of Structural Geology*, 1990, 12(2):145-164.
- [6] STUBLEY M P. The geometry and kinematics of a suite of conjugate kink bands, southeastern Australia[J]. *Journal of Structural Geology*, 1990, 12(8):1019-1031.
- [7] 郑亚东, 王涛, 王新社. 新世纪构造地质学与力学的新理论: 最大有效力矩准则[J]. *自然科学进展*, 2005, 15(2):142-148.
- [8] STEWART K G, ALVAREZ W. Mobile-hinge kinking in layered rocks and models[J]. *Journal of Structural Geology*, 1991, 13(3):243-259.
- [9] SCHARER K M, BURBANK D W, CHEN J, et al. Kine-

- matic models of fluvial terraces over active detachment folds: constraints on the growth mechanism of the Kashi-Atushi fold system, Chinese Tian Shan[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2006, 118(7/8):1006-1021.
- [10] RAMSAY J G. Shear zone geometry: a review[J]. *Journal of Structural Geology*, 1980, 2:83-91.
- [11] 郑亚东, 莫午零, 张文涛, 等. 柴达木盆地油气勘探新思路[J]. *石油勘探与开发*, 2007, 34(1):13-18.
- [12] 郑亚东, 张进江, 张波. 含油气盆地的“两断夹一隆”构造与大型细致带[C]//第四届全国构造会议, 北京: [出版者不详], 2008.
- [13] 丁道桂, 郭彤楼, 翟常博, 等. 鄂西—渝东区膝褶带构造[J]. *石油实验地质*, 2005, 279(3):205-210.
- [14] ROBERT D. *Structural geology: principles, concepts, and problems*[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1995:175-187, 272-303.
- [15] MARSHAK S, MITRA G. *Basic methods of structural geology*[D]. New Jersey: Englewood Cliffs, 1988:224-286.
- [16] DEWEY J F. Nature and origin of kink bands[J]. *Tectonophysics*, 1965, 1(31):459-494.
- [17] ROUSELL D H. Kink bands in the Onaping formation, Sudbury Basin, Ontario[J]. *Tectonophysics*, 1980, 66(1/3):83-97.
- [18] ANDERSON T B. Kink-bands and related geological structures[J]. *Nature*, 1966, 210:1249-1251.
- [19] KIRSCHNER D L, TEIXELL A. Three-dimensional geometry of kink bands in slates and its relationship with finite strain[J]. *Tectonophysics*, 1996, 262(1/4):195-211.
- [20] OERTEL G. The mechanism of faulting in clay experiments[J]. *Tectonophysics*, 1965, 2(5):343-393.
- [21] RECHES Z. Faulting of rocks in three-dimensional strain fields II[J]. *Tectonophysics*, 1983, 95(1/2):133-156.
- [22] KRANTZ R W. Orthorhombic fault patterns: the odd axis model and slip vector orientations[J]. *Tectonics*, 1989, 8(3):483-495.
- [23] KIRSCHNER D L, TEYSSIER C. Orthorhombically arranged vein arrays[J]. *Journal of Structure Geology*, 1994, 16(8):1129-1138.
- [24] GAPAIS D, BALE P, CHOUKROUNE P, et al. Bulk kinematics from shear zone patterns: some field examples[J]. *Journal of Structural Geology*, 1987, 9(5/6):635-646.
- [25] WADEE M A, HUNT G W, PELETIER M A. Kink band instability in layered structures[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2004, 52(2):1071-1091.
- [26] RONDEEL H. On the formation of kink bands[J]. *Nederlandse Akademie van Wetterschapper*, 1969, 72:317-329.
- [27] HONEA E, JOHNSON A M. Development of sinusoidal and kink folds in multilayers confined by rigid boundaries

- [J]. *Tectonophysics*, 1976, 30(3/4): 197-239.
- [28] WEISS L E. Nucleation and growth of kink bands [J]. *Tectonophysics*, 1980, 65(1/2): 1-38.
- [29] LATHAM J P. A numerical investigation and geological discussion of the relationship between folding, kinking and faulting [J]. *Journal of Structural Geology*, 1985, 7(2): 237-249.
- [30] VERBEEK E R. Kink bands in the Somport slates, west-central Pyrenees, France and Spain [J]. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 1978, 89: 814-824.
- [31] RAMSAY J G, HUBER M I. The techniques of modern structural geology Volume 1: Strain Analysis [M]. New York: Academic Press, 1983.
- [32] RAMSAY J G. Folding and fracturing of rocks [M]. New York: McGraw-Hill, 1967.
- [33] PATERSON M S, WEISS L E. Experimental deformation and folding in phyllite [J]. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 1966, 77: 343-374.
- [34] SUPPE J, GEORGE T CHOU, STEPHEN C HOOK. Rates of folding and faulting determined from growth strata [R]. London: St Edmundsbury Press, 105-121.
- [35] NOVOA E, SUPPE J, SHAW J. Inclined-shear restoration of growth folds [J]. *AAPG*, 2000, 84(6): 787-804.
- [36] TRUDGILL B D, ROWAN M G, FIDUK J C, et al. The Perdido fold belt, northwestern deep Gulf of Mexico: part 1-structural geometry, evolution, and regional implications [J]. *AAPG*, 1999, 83(1): 88-113.

(收稿日期 2009-10-20 编辑 罗冬梅)