

一个褶皱和逆冲断层带中的断层和裂缝系统 ——来自玻利维亚的一个实例

Juan - Mauricio Florez - Nino 等著

郑建清 译
陈钦保 校

【摘要】此文介绍了对 Subandean 冲断带低孔隙度砂岩中露头裂缝系统模拟研究。我们分析了这些砂岩中断层和节理系统的演化,测定了它们沿构造倾向的密度,并确定了影响它们变化的主要因素。

我们指出作为渐进性剪切的结果,断层和节理以不同规模和级别出现。首次形成的是一套正交节理组,一部分平行于层面方位,另一部分垂直于层面方位。沿着这些节理的剪切作用使它们变成小断层并形成新的与层面产状斜交的裂缝组。这些小断层的相互连接促进了具有显著走滑位移的较大断层的形成。沿着层理面的剪切作用所产生的陡斜节理会引起共轭正断层的形成。在这个冲断带,次一级的走滑断层和正断层是挤压变形作用的产物。

这项研究证明了各种构造间隔和地层结构之间的等级对应关系。我们沿着 Abra del Condor 背斜的后翼测量了节理间距和露头上的断层间距,再将构造断裂细分为四个大组:节理组、小断层组、中等断层组和断层带。节理、小断层和中等断层的间距呈对数正态分布,而断层带间距呈正态分布。这些分布的平均值与围岩层段的厚度大致相同。因此,节理和断层的间距和大小与地层层序的厚度间是第一级关系。

【关键词】断层 节理 油藏描述 挤压 裂缝

1 露头资料在油藏描述中的作用

对低孔隙度岩石中储藏质量的精确预测要求对地下断层和裂缝所造成的各向异性和非均一性有一个良好的认识。这方面,关键的问题是,在褶皱沉积岩石中断层和裂缝是如何分布的,以及影响它们分布的因素是什么? 这些问题的重要答案仍是模拟和裂缝性储藏描述中的主要任务之一。

这里,我们介绍的是关于一个褶皱和冲断带中胶结和低孔隙度的泥盆纪砂岩中的断层和裂缝系统的露头研究。这些位于 Tarija 盆地附近,沿 Subandean 冲断带,靠近阿根廷 - 玻利维亚边界 (Blangy, 2002) 的砂岩层形成重要的气藏。这一地区已处在区域东 - 西挤压构造背景下大约为 60m. y. (Horton et al., 2001),在方位和区域应力状态的特征上没有明显的变化。这些露头位于东 Cordillera 和 Subandean 地区 (图 1) 的过渡带,为分析挤压构造环境中裂缝系统的演变提供了一个良好的机会。

我们使用由 Pollard and Aydin (1988) and Aydin

(2000) 提出的裂缝术语。术语“节理”可定义为一种具有两个以彼此远离位移为主的破裂面的构造。“断层”是一种断裂,其两侧以平行于断裂面的位移为主。“裂缝”是包括开裂和/或剪切两种方式的构造。此术语通常包括节理和小断层,并且在不能精确地确定其种类时通常会使用它。“节理带”是两个或多个节理成为一狭窄条带分布的地方。术语“裂缝带”用于含盖混合种类断裂带。

我们对术语“破裂带”的用法沿袭了 Caine 等人 (1996) 阐明的概念模式。根据他们的模式,一个断层的构造要素基本上有两种:断层核,由滑动面和破碎性岩石物质组成 (Kim 等人, 2004),它接纳了大部分的位移 (Caine 等人, 1996); 破裂带,为一个碎屑岩石的较宽的部分和分布式变形,基本上是由沿断层平移的起始和传播产生的 (Cowie and Scholz, 1992; McGrath and Davidson, 1995)。我们使用“断层带”来定义遍及一条以上断层,且接纳大于 10m (32.81 ft) 的大偏移的变形带。

露头研究为裂缝性储层的地质模型提供了重要

的质量和数量信息。从油藏描述的角度看,有两种基本方法来解决这个问题:裂缝网络的随机模拟和根据机械原理的确定性模拟。对这当中的每一种方法来说,露头描述都为模拟提供了参数限制,因为①它们展示的是在储层规模上裂缝密度的空间变化,并能被转移到使用二级参数如平均、标准偏差,以及裂缝群的分布函数的地下模拟上;②它们指明了特定岩石类型和变形种类产生的裂缝的不同机理;③它们填补了岩心、测井和地震资料之间的规模缺口。

此文介绍了与具有相似的地层和变形种类的褶皱和裂缝性储层有关的数据和概念。然而,这里所讨论的一些概念和裂缝机理可以推广到其它具有与此类似的地层结构和不同构造类型的储层上。

2 地质背景

研究区域位于玻利维亚安第斯山南部, Tarija 东部约 30km (18.8mi), 靠近 Subandean 带和 Cordillera 东部(图1)之间的边界,且可通过 Tarija - Villamontes 公路到达。我们在 Abra del Condor 和 Piedra Larga 背斜、Piedra Larga 冲断层上盘和靠近 Canaletas 冲断层实施野外作业。Piedra Larga 和 Canaletas 冲断层在图2中分别被标为1和2。有利地区之下的志留纪 Kirusillas 页岩为一个主要滑脱面(Psk 在图2中),但次级的滑脱面出现在象泥盆纪 Icla 和 Los Monos 组(Labaume 等人, 2001)的其它泥质单元中。东 Cordillera 和 Subandean 带都形成弧后冲断带的一部分。这是个东倾的新第三纪冲断系统,涉及 Subandean 带的古生代到第四纪沉积岩并向东在 Cordillera 的东部与前寒武纪基岩相结合。根据 Schmitz (1994) 和 Okaya 等人(1997)的分析,在 Subandean 带沉积盖层中观测到的构造消减与 Altiplano 和东 Cordillera 之下的陆壳构造加厚有关。

重要的地层层段包含从志留纪到泥盆纪的碎屑岩、浅海相层序。从底到顶,层序由以下单元组成:①Kirusillas 页岩(图2的 Psk)黑色、易裂、塑性的厚层页岩组;②Tarabuce 页岩(Pdt),为中灰页岩和薄片状砂岩的互层厚组合;③Santa Rosa 组(Pdsr),在中部含页岩层段的胶结石英砂岩;④Icla 页岩(Pdic),朝中部夹一层1m厚的片状砂岩的深灰、易裂的、含化石的页岩;⑤Huamampampa 组(Pdh),是由砂岩和绿灰粉砂质页岩成互层的沙质单元组成;⑥Los Monos 页岩(Pdlm),底部附近由夹带砂岩的

绿灰粉砂质页岩组成,中部附近为深灰易裂页岩组成。在此位置实测 Huamampampa 和 Santa Rosa 组的厚度分别为 367m 和 297m (1294.1ft 和 974.4ft)。Icla 页岩厚度估计达到 180m (590.6ft)。横剖面中所示的其它单元的厚度是从地质图和总地层柱状图中估算的。图2c 显示的是在此项研究期间实测的 Huamampampa 和 Santa Rosa 组的综合地层剖面。

3 方法

此项研究的基础是不同观测范围内的断层和裂缝野外制图,强调沿褶皱构造走向方位的裂缝密度的变化。最初的研究工作是对地层剖面进行测量以便对先前的地质图做精细的修改。野外详细工作是沿 Abra del Condor 背斜的后翼作断层图(图3),和沿 Abra del Condor 和 Canaletas 露头扫描线的裂缝密度资料和裂缝特征的收集。细节工作还包括裂缝描述,和它们在其它位置,特别是沿 Piedra Larga 背斜的成因关系。这些位置也标在图2和图3中。

我们沿平行于褶皱构造的走向方位的扫描线收集裂缝数据。一条扫描线是具有确定方位的剖面线,沿此线的资料是已系统记录过的(Priest and Hudson, 1981; LaPointe and Hudson, 1985)。对于此项研究,资料涉及裂缝类型、方位、偏移、定位、填充物和相邻的裂缝间成因关系的确定。其它特征象裂缝高度和长度也局部地记录过。有关节理间距和小断层的资料来自一条约 400m (1312.33ft)长、沿 Abra del Condor 背斜后翼的扫描线(图3中的 SL-1)。处于中间位置的断层间距资料来自同一扫描线和另一些在更远的北部测量的扫描线(图3中的 SL-2)。断层带间距是根据以野外为基础的 1:10,000(图3)地质图测量的,这些地质图补充了一些图片解释。

4 断层和裂缝

断层和裂缝出现在不同的比例尺图件和地层中,其只要类型依赖于所观测图件的比例尺和岩性。图1b是一个比例尺为 1:2,500,000 的地质图,显示了在这个比例的图上的主要构造特征是近平行于冲断层,其走向垂直于区域最大压应力。图2a是与它们有关的冲断层和褶皱的主要特征,地质图比例尺约为 1:100,000。他们的方位决定构造方向。相反,在图3中,主要的构造不连续性是断层带,用一

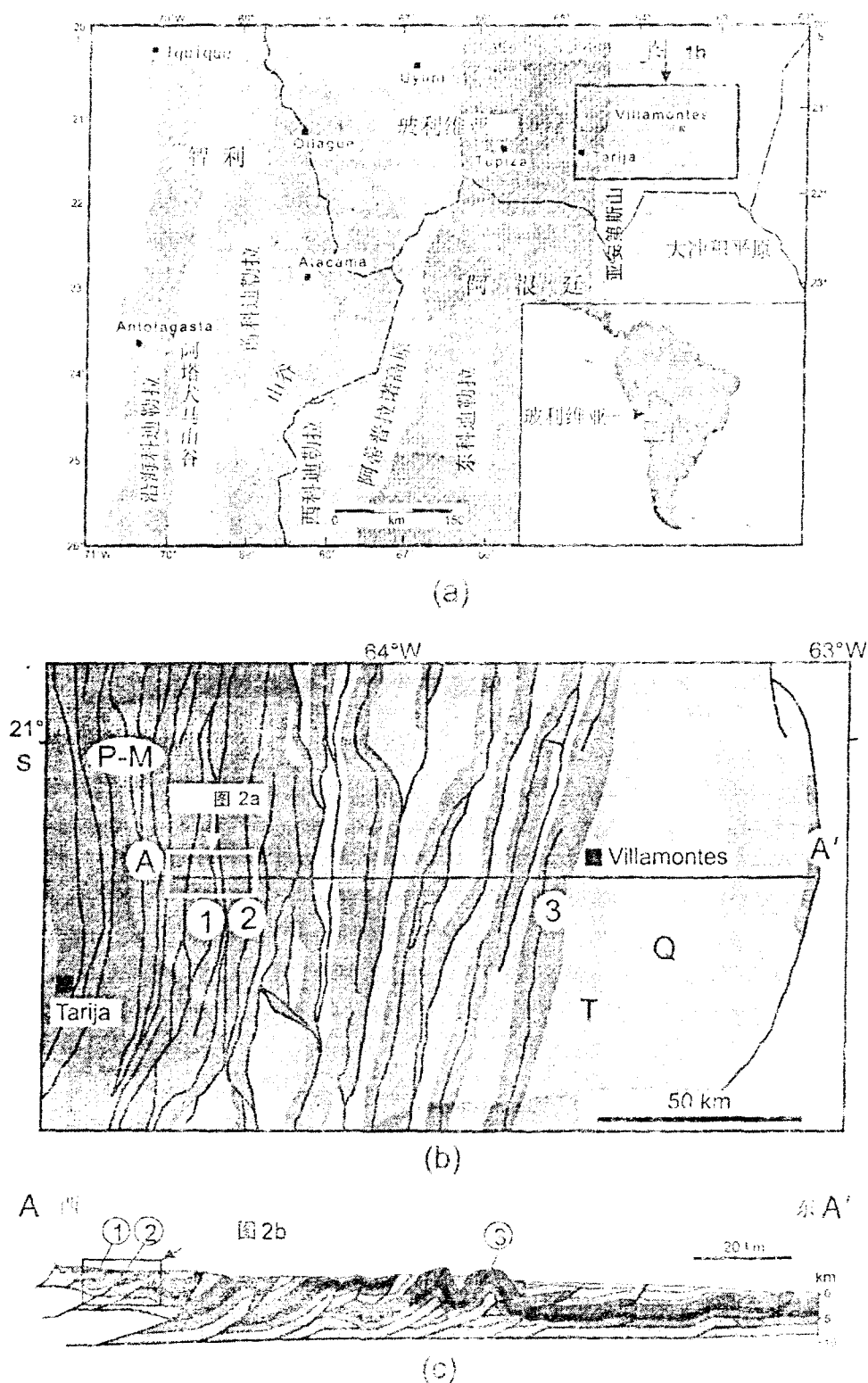


图1 地理位置图和区域地质环境

(a)玻利维亚安第斯(Reutter 等人, 1986)主要构造区域;(b)Subandean 褶皱和冲断带区域地质图;T=第三系;Q=第四系;P-M=古生界-中生界;(c)区域横截面;①、②和③分别表示 Piedra Larga, Canalejas 和前缘冲断层;(b)和(c)图是根据 Labaume 等人(2001),经 Elsevier 出版社许可重印的

条或多条粗虚线表示,垂直于构造方向。图3与一

个最初比例尺为1:10,000的地质图相对应,并显示

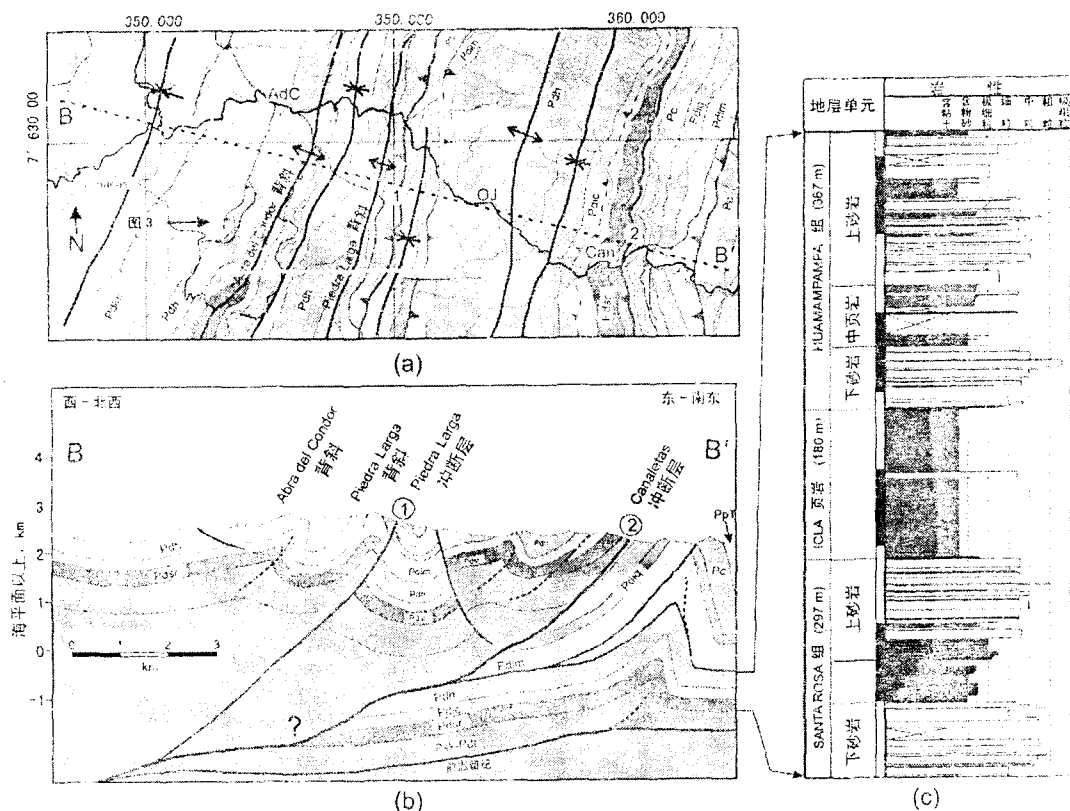


图2 研究区地质情况

(a) Abra del Condor - Canaletas 褶皱和冲断层带地质图。Adc 表示 Abra del Condor, Can 表示 Canaletas 露头; (b) 从底部到顶部地层、横剖面如下: Kimsillas - Tarabuco 页岩 (Psk - Pdt), Santa Rosa 组 (Pder), Ical 页岩 (Pdie), Huamampampa 组 (Pdh), Los Monos 组 (Pdlm), Iquire 组 (Pdiq), 石炭系 (Pc), 和二叠系 - 三叠系 (PpT); (c) 从 Santa Rosa 到 Huamampampa 组的合成地层剖面

了沿 Abra del Condor 背斜后翼所绘的断层带图。相似的断层带在象 Piedra Larga 背斜的其它构造中也很明显。最后,在露头比例尺上(1:1 至 1:1000),节理型式和小断层成为主要的特征。

4.1 裂缝类型和断裂模式

在研究区发现的主要裂缝类型是节理和以剪节理为基础的断层。我们再将断层细分为三种主要类别:①断层带;②中等断层;③小断层和/或剪节理。首先,我们讨论断层带,接着我们描述在露头比例尺的断层剖面上其它两类断层的模式和特征。最后,在最后一个剖面上,我们描述节理。

4.1.1 断层带

断层带的特征是宽破裂带和沿两个或多个组合断层的地层标志层的偏移现象。象图 3 和图 4a 所示,这些断层带沿其它原为坚硬砂岩的突出地层以低起伏带出现。每个断层由几条具有不同偏移的互连断层组成,形成岩石破裂严重的宽阔带或一个破裂带。这些低起伏破裂带将相对完整的岩石分隔成较宽的区域或断块。与这些断层带有关的破裂带宽度随累积偏移而增大,后者一

般范围从 10m 到约 200m(32.8ft 到约 656.2ft)。我们绘制了沿 Abro del Condor 背斜后翼的这些断层带中的一部分,此处这些断层中的大多数与背斜轴成高角度相交(图 3)。遗憾的是,虽然轴向断层带也会出现,但背斜脊的剥蚀和露头局限妨碍了人们的研究。

4.1.2 露头断层(中等断层和小断层)

裂缝间距,即裂缝密度在断层带之间的断块上,沿层面走向方位发生很大的变化。我们实施了图 3 中 SL-1 和 SL-2 两条扫描测线的调查,以便在这些相对完整的区域记录裂缝密度的变化和小断层的出现。图 4b 展示了沿其中一条扫描线测量的裂缝密度。沿着这些断块,具有较高裂缝密度,即较小裂缝间距的断层带与偏移范围从 10m(32.8ft)到几厘米的断层有关。

沿先前存在的或早期节理的剪切作用是断层在这些低孔隙度砂岩中开始和发育的最普遍的机理。在它的初期阶段,剪切作用只能从剪切裂缝的分叉和末端节理的存在来推断,或从不对称的雁行开放式裂缝的存在来推断。有些剪节理在裂缝表面有擦痕。剪切的推进状态可直接从地层标志层的错动来确定。

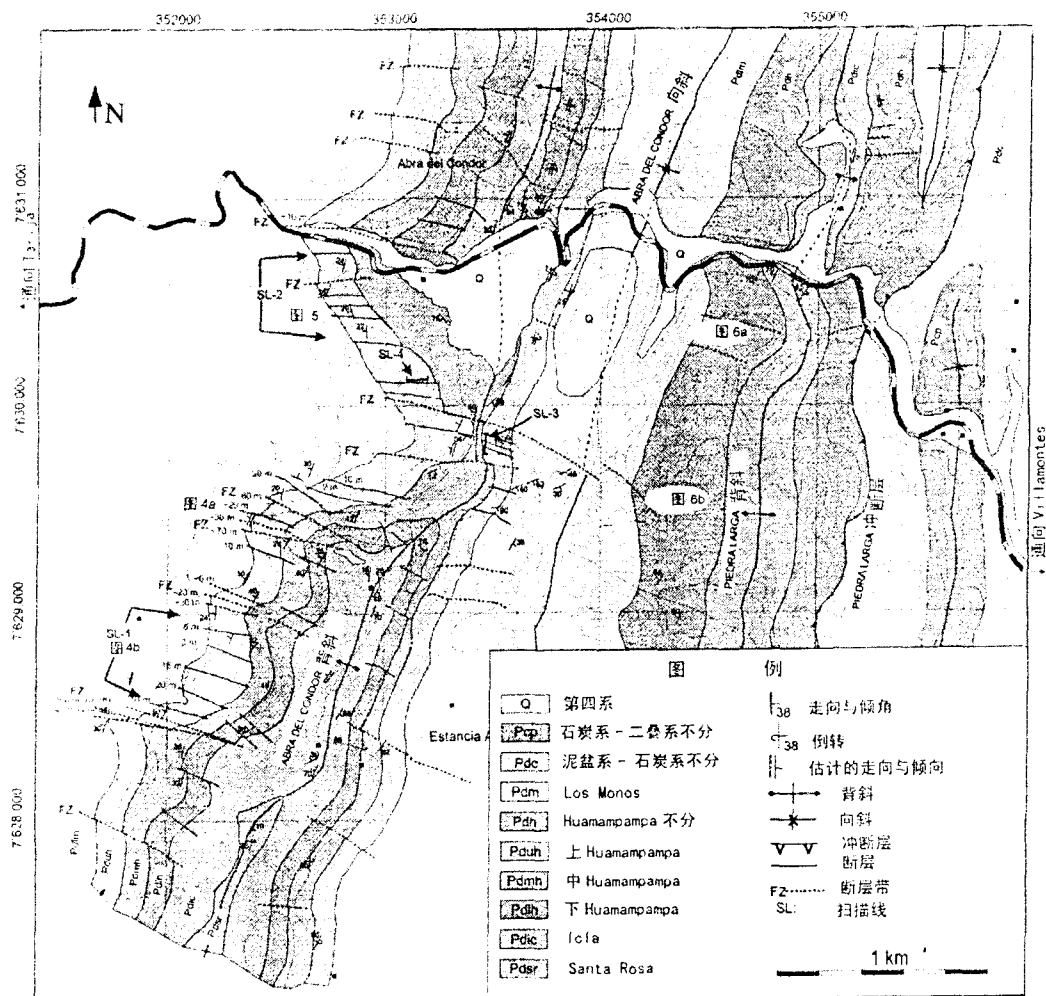
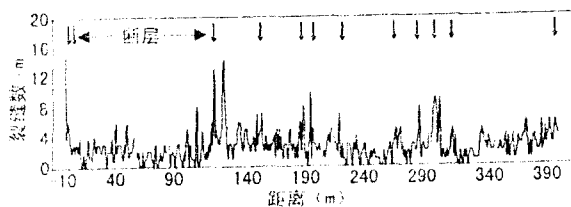


图3 沿 Abra del Condor 背斜后翼的断层带和中等断层分布的详细地质图

图中同时显示了走向相同的扫描线(SL-1 到 SL-3)的位置,及图4-6 的构造位置



(a)



(b)

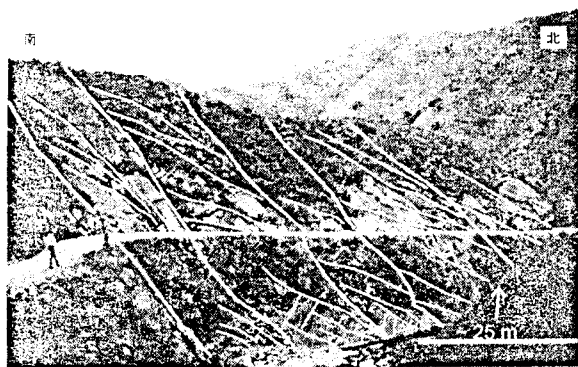
图4 (a)在 Abra del Condor 背斜后翼的断层带。左侧断层带累积横向偏移约为 60m (197ft)。这个断层带包括至

少四个主断层段和许多小断层。向右显示的是具有约 20m (66ft) 的垂直偏移的较窄断层带;(b) 裂缝频率(密度) 朝远离大断层带(图3 中扫描线1) 方向发生走向平行变化。拾取的地方为靠近小断层和中等断层的地区

由于变形程度的增加,中等断层和小断层的式样从正交和轴向节理组(来自先前存在的正交节理组)向斜交不对称特征变化。剪节理的正交节理组和小断层在相对低应变地区占优势,象 Abra del Condor(图5a) 的后翼,而斜节理组在变形程度高的地区占优势,如靠近 Canaletas(图5b) 的 Santa Rosa 露头。沿同样构造也观测到这种断层式样的差别。例如,沿 Piedra Larga 背斜后翼,靠近 Tarija - Villamontes 公路(图6a) 以斜交模式为主,而在更远的北部(图6b),正交模式占优势。在斜交模式出现的地方,具有大偏移的断层的倾向是一致的(交叉断层),而斜交裂缝是紧靠较大断层一方的节理或小断层,表明两个节理组之间的成因关系。



(a)



(b)

图5 Abra del Condor 和 Canaletas 露头之间的中等断层和小断层式样对比

(a) 沿 Abra del Condor 背斜后翼宽间隔的、倾向平行的中等断层;(b) Canaletas 露头上的断层和裂缝式样,显示间距密集,倾向平行的中等断层(较大断层),其具有紧靠较大断层的、很发育的小型斜断层组。小断层有它们自身的紧靠着它们的分叉节理组

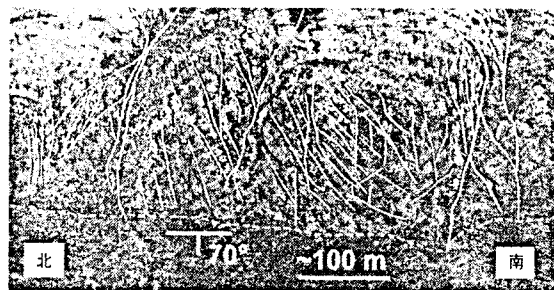
正断层沿近垂直节理的剪切是断层发展发育的另一种机理。这些小正断层紧靠层面。如图7所示,它们以共轭节理组出现,无任何横切关系。通常,在这些共轭节理组的交点,小断层紧靠较大断层一方。在某些情况下,大断层由相连的断层段组成,而且共轭断层从其中一断层段的顶端开始。被两个共轭正断层包围的区域的裂缝密度一般大于相邻岩体的裂缝密度。

4.1.3 节理型式

主要节理式样既有正交节理组(图8a)也有斜节理组(图8b)。正交节理组垂直于层面(图8c),斜节理组与走向滑动剪切有关。相反,与共轭正断层和具剪切斜向的断层有关的斜节理组,相对于层面是倾斜的(图8d)。

在低应变区域,保存着最早形成的体系特征,主要裂缝是两个正交节理组,一组平行于褶皱轴,另一组垂直于褶皱轴。平行于层面走向或背斜轴的节理

组构成走向节理组,而与此组正交的节理与倾向平行的节理组相符合,地质文献上(如,Rawnsley et al., 1992; Rives et al., 1992; Bai et al., 2002)称为交叉节理组。图8a是在 Abra del Condor 的 Huamampampa 砂岩中的走向和交叉节理组示意图。在 Piedra Larga 和 Canaletas 冲断层(图9)之间靠近开



(a)



(b)

图6 沿 Piedra Larga 背斜后翼(位置见图3)的小断层和剪节理的式样变化

(a) 在背斜与 Tarija - Villamontes 公路交界附近观测到的小断层的倾斜式样;(b) 在(a)中露头以南约1km(0.63mi)处观测的剪节理和小断层的正交式样,垂直于和平行于层面方位

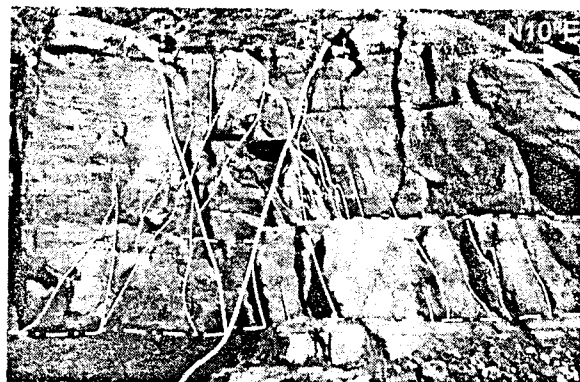


图7 在 Canaletas 露头(注意锤子所示比例)观测到的小规模共轭正断层

图上受地层限制的斜节理组被视为层间滑动产生的分叉节理。注意中心部分的小断层和它们的分叉节理之间的等级关系:斜节理组紧靠较小的小断层(F2),较小的小断层紧靠较大的断层(F1)。这个等级关系说明来自分层剪切和渐进变形的共轭断层模式的演化

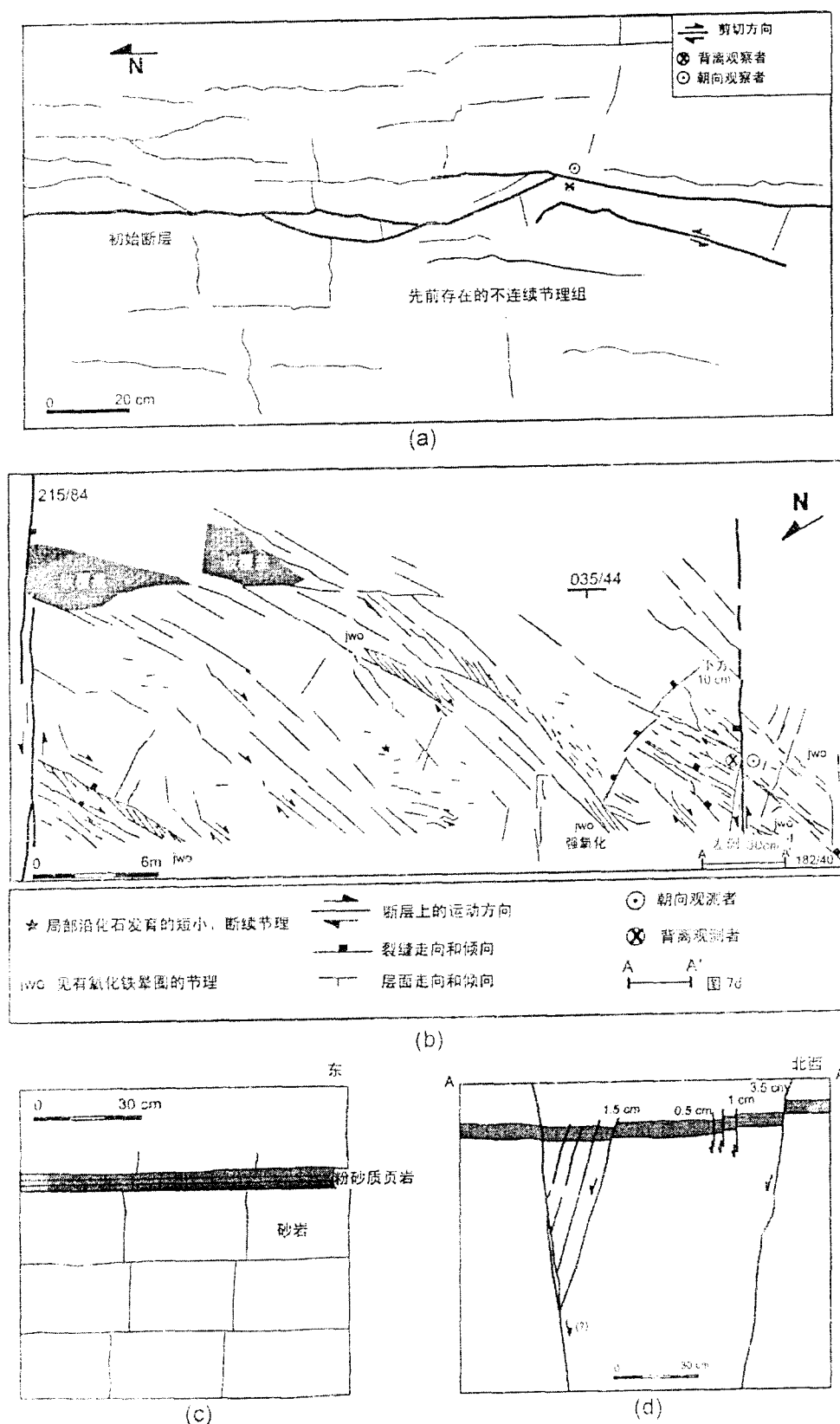


图8 节理式样的变化

(a)在 Abra del Condor 的 Huamamparupa 组中的正交节理组;(b) Canaletas 露头上由沿先前存在、倾向相同的裂缝剪切作用而产生的倾斜分叉节理组和裂缝;(c)正交节理组的陡剖面图显示节理组紧靠薄泥岩层;以及(d)穿越(b)中受剪切的裂缝(小断层)之一的陡剖面图,说明倾斜分叉节理和小正断层的发展

阔背斜的脊部的露头处观测到相似的正交节理组。在图 8a 中,走向节理组占优势,而图 9 中交叉节理组更普遍。两个节理组之间的紧邻关系是相互的,这两个节理组被认为是同期的。此外,如图 9 所示,是与断层有关的分叉裂缝的横切关系,表明这些正交节理是最老的裂缝。

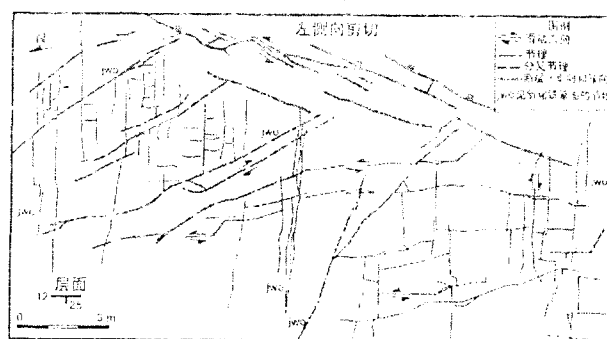
较晚形成的节理组的共同特点是与层面方位斜交(图 8b)或与垂直于层面(图 8d)的方向斜交或与二者都斜交。这些紧邻大裂缝的斜节理组平行于先前存在的有剪切迹象如擦痕线和偏移的正交节理组。象在前一节中所解释的,这些裂缝是从先前正交节理组的剪切得来的剪节理或小断层。与它们有关的斜裂缝是分叉或末端节理组及裂缝。与早期平移断层有关的节理组垂直于层面,而与正断层有关的分叉节理组与层面的垂线间形成一斜角($40^{\circ} \sim 20^{\circ}$)。与剪切斜向断层有关的分叉节理与层面产状和层面的垂向呈斜角。所有这些节理组出现在相同的地层层段且包含不同世代的分叉节理和裂缝,造成一个具有复杂式样的裂缝致密网络(图 10)。

4.2 裂缝统计法

我们对沿着 Abra del Condor 背斜后翼的裂缝强度变化作了定量描述。节理和小断层的资料是以图 4 中扫描线为基础的。中等断层的资料来自图 3 中



(a)



(b)

图 9 靠近 Piedra Larga 冲断层(图 2a 中的 OJ)下盘中的背斜核部露头平面图

注意主要节理组垂直于走向方位,次级节理组与它正交,且较晚的分叉裂缝源自于正断层



(a)



(b)

图 10 在 Canaletas 露头 Santa Rosa 砂岩的层面上观测到的复杂裂缝式样

裂缝密度从每米几条裂缝到每米 50 余条;在高裂缝密度的地方,岩石主要是角砾岩;此露头位于图 5b 中露头的底部附近

标记的两条走向平行的扫描线。断层带的绘制与间距资料是以野外观测和照片解释为基础的。为量化高裂缝频率,我们也完成了一条靠近交叉平移断层之一的、沿 Abra del Condor 背斜前翼的、长 80m (262ft) 的扫描线(图 3 中的 SL-3)。

在图 11a-b 中所示的裂缝间距资料表明不同

裂缝类型的对数正态分布函数优势,和裂缝间距与地层间的头等相关关系。我们发现在这个区域,交叉节理、小断层、和中等断层的间距存在对数正态分布函数,象那些在图 11e 和 f 中的分位数-分位数曲线(如,Fillben, 2004)推断出的一样。断层带间距的分布函数较接近正态分布。这些分布的平均间

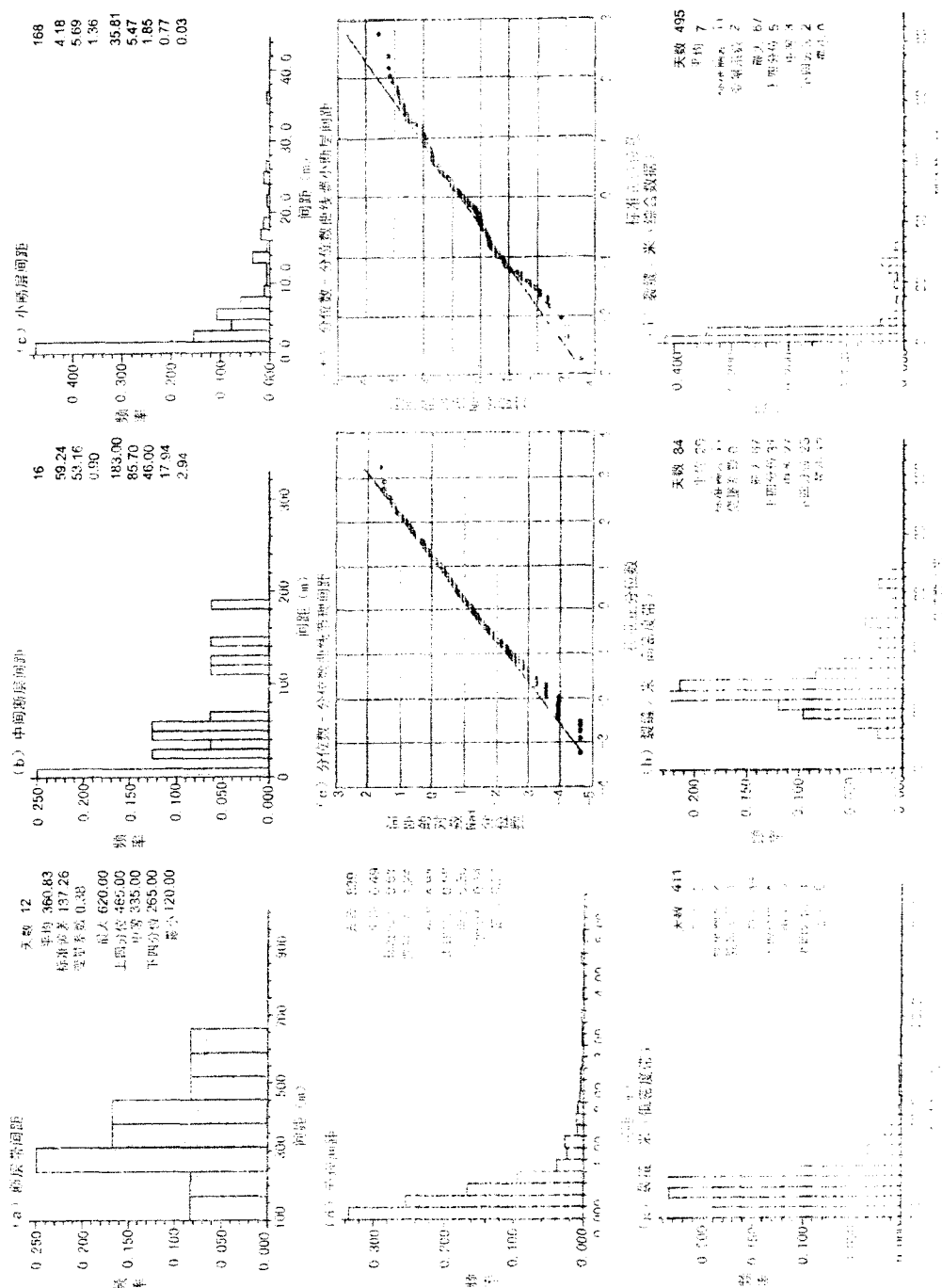


图 11 裂缝统计

(a)断层带(b)中等断层(c)小断层和(d)节理组的裂缝间距柱状图。图(e)(f)显示节理和小断层间距分位数-分位数(Q-Q)曲线图。这些曲线图表明节理间距和小断层间距有对数正态分布函数特征。图(g-i)中分别显示低裂缝密度带(图3中的SL-1)、高裂缝密度带(图3中的SL-3)和二者结合带的裂缝密度的柱状图

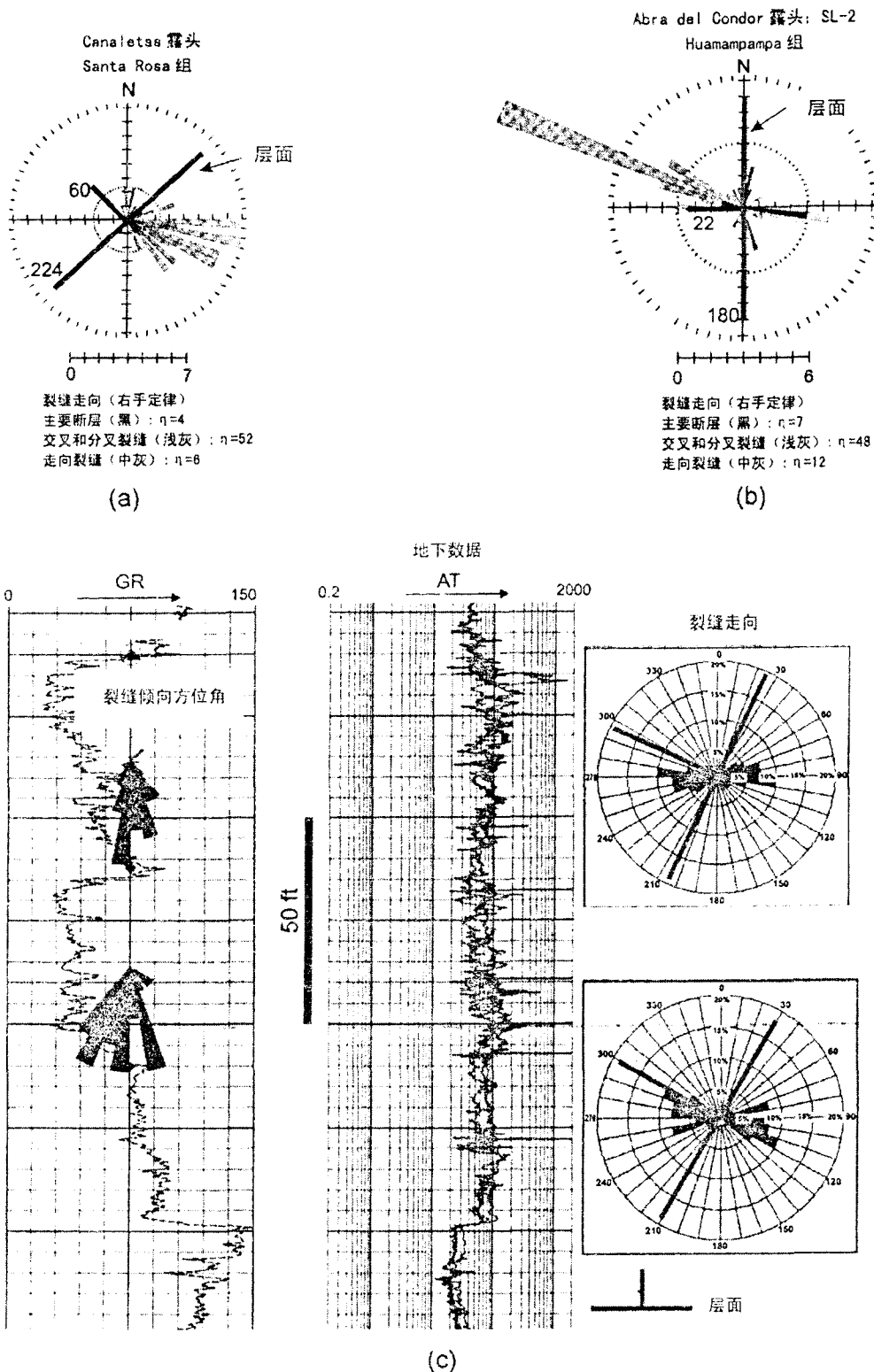


图 12 与在地下观测的裂缝对比,在 Canaletas (a) 和 Abra del Condor (b) 露头上裂缝的方向

在 Canaletas 和 Abra del Condor 两处,有丰富的斜分叉节理和裂缝并且它们相对于地层倾斜方位角小于 45° 。这些斜裂缝是沿先前存在的与倾向平行的裂缝组剪切作用的结果。在 Canaletas 以左侧剪切为主,而在 Abra del Condor 以右侧剪切为主。在地下,相对于层面的裂缝方位与那些在露头处观测到的类似。因此,对于地下资料,我们推断发生过沿与倾向平行的裂缝的左侧剪切作用,类似于在 Canaletas 观测到的情形

距正如表 1 中所示,与包含它们的地层层段的厚度之间是头等关系。图 11g 和 h 所示的是,在不同构造位置的两个地区所测的裂缝频率用以说明 Abra del Condor 背斜裂缝密度的明显变化。低密度地区位于两个断层带之间的区块(图 3 中 SL-1)。高裂缝密度带位于靠近背斜脊(图 3 中 SL-3)、前翼和接近两断层处。低裂缝密度区的资料显示平均值为 3 条裂缝/m、标准偏差为 2 的对数正态分布。而高裂缝密度区具有更对称的分布,更接近轻微歪斜的正态分布,平均值为 29 条裂缝/米,标准偏差为 11。如图 11i 所示,两组资料组的结合呈指数分布。

平均节距和露头规模断层平均间距在不同构造位置的露头之间变化很大。以上讨论的统计资料与来自位于 Piedra Larga 冲断层以西 3km 的 Abra del Condor 背斜处的资料一致,该冲断层偏移约 1km (0.63mi) (图 2)。高断层密度出现在 Canaletas 露头上,位于 Canaletas 冲断层以西 1km (0.63mi) 处,断层偏移超过 10km (6.3mi)。在 Canaletas 露头,小断层和中等断层的平均间距分别是 0.76m 和 19.3m (2.49ft 和 63.32ft)。在 Abra del Condor 背斜,小断层和中等断层的平均间距分别是 4.2m 和 59m (13.78ft 和 193.6ft),后者比前者大 3 到 4 倍。

5 讨论

严格精确的地质模拟和裂缝性油藏描述需要野外观测结果和统计资料约束模型空间非均质性、推断出的在地下起作用的变形机理、和可外推到地下的地层和裂缝层次之间的主要关系。这当中最重要的是对裂缝类型、式样的演化 and 它们的空间非均质性的理解。这里,我们用地面观测对比地下裂缝资料,为玻利维亚 Subandean 褶皱和冲断带的背斜开发了裂缝分布的概念性模型。在模型中,我们强调地层构造和剪应力对断层和裂缝的间距和位置有重要的影响。

5.1 裂缝式样的演化

我们的观测结果认为由于分级的剪切作用而产生的渐进的变形和裂缝发育模式。第一代裂缝为成正交的轴向和交叉节理,它们对称于褶皱轴和构造迁移的区域方向。同时期的轴向和交叉节理组可由因为节理饱和而形成局部应力转换而产生(Bai 等人, 2002)。这些节理可能在褶皱活动的早期阶段就已形成。应力场的局部旋转导致沿这些先前存在

的节理组剪切破裂,产生新的倾斜分叉节理和裂缝。这些断层的相互作用使他们发育,其过程类似于 Segall 和 Pollard (1983) 和 Martel (1990) 所描述的关于美国内华达的 Sierra 花岗岩内发生的情形。(也可参阅 Flodin 和 Aydin, 2004, 关于美国的盆地和山脉地区的砂岩中断层样式的发育)。对阿尔巴尼亚褶皱和冲断带的灰岩中类似的演变机制已做描述(B. graham, 2004, 个人交流)。

作为这种逐步变形的结果,节理和断层式样从正交组开始演化,期间分叉裂缝不发育,随后出现由发育的分叉裂缝所决定的斜裂缝组,分叉裂缝从一个横断层向附近横断层扩散。由剪切应力所致的逐渐变形反映在节理和小断层形式的空间变化上。低应力区域保存了老节理的正交组。随着应力增强,分叉节理的斜节理式样增加并占优势。对小断层的观察也见到类似的变化。在中等剪切应力的地区,大多数小断层源自沿正交节理的剪切作用,从而保持正交方向(图 6b)。在剪切应力明显较强的地区,斜节理剪切作用增强,斜小断层成为优势组之一(图 5b, 6a)。因此,节理和小断层式样的变化可看作是剪应力大小的标志。

5.2 与地下对比

在露头处观测到的裂缝系统和在地下发现的裂缝系统之间存在许多类似处。我们使用电阻井筒成像测井资料 and 我们的露头资料与地下资料做对比。在地下发现的裂缝方向类似在露头观测到的裂缝方向(图 12)。我们解释了由于横断层和轴向断层产生的分叉裂缝的发育而形成的倾向和走向方位上斜裂缝的丰度。主要的方位依赖于剪切的方向。例如,在这一实例中,地下资料显示裂缝的方位与沿横断层的左侧剪切相一致。有证据证明裂缝类型和机理也类似。井筒成像显示开放裂缝始于层面,与在露头上发现的分叉节理类似(图 13a)。露头观察也证明沿分叉节理和横节理的氧化铁的存在,这些节理充当古流体流动的导管(图 13b)。

5.3 概念模型

图 14a 为一个背斜(作为褶皱和冲断带的一部分)的断层和裂缝的概念模型,它概述了沿 Abra del Condor - Canaletas 冲断带所做的观测结果。模型显示存在于断层带、中等断层和小断层之间的等级关系(受剪切节理、节理和分叉节理)。概念模型也说明了地层层段的规模和构造不整合之间的关系,图 14b 中解释得更明确。断层带穿越整个 Huamampampa

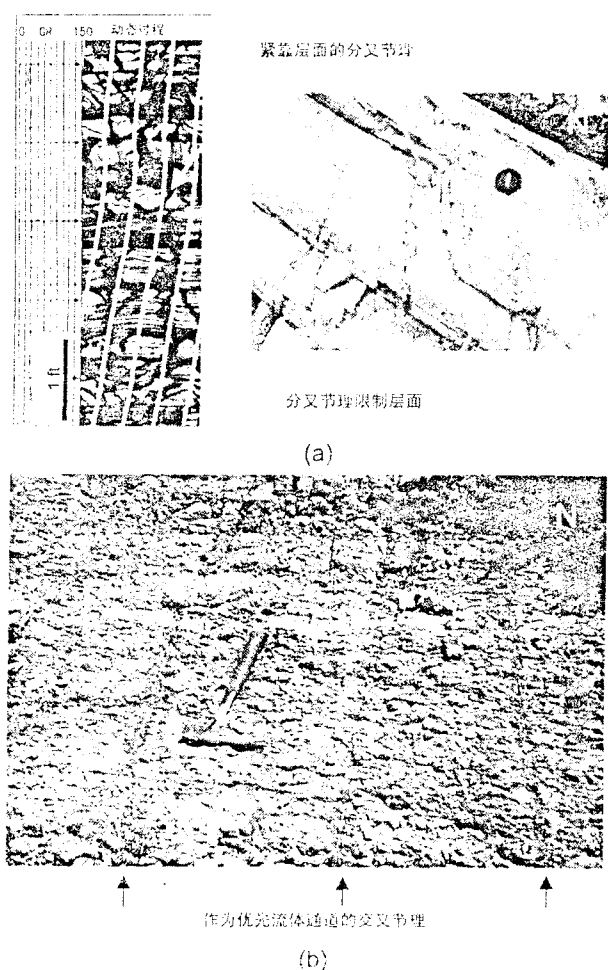


图13 (a) 地下成象与露头的对比,二者显示了节理和层面之间的相邻关系,表明它们属于与层间滑动有关的分叉节理;(b) 沿 Huamampampa 组低渗透率粉砂岩中的沿交叉节理的氧化晕圈,说明节理和裂缝是如何担当流体通道的

组,而中等断层顶端止于厚的中部 Huamampampa 页岩。同样地,受剪节理组能穿过一些层面延伸但也可以停留在米级厚的页岩层中。最后,节理组受限于单个机理层中而与层面滑动有关的分叉节理组总是紧靠着被剪切的层面。

概念模型说明相对于褶皱轴来说,主要断层和裂缝或平行或垂直于构造方向。在正在进行的研究实例中,裂缝方向和褶皱形状之间的对称性反映了一种均衡、稳定的区域应力状况,可能与自白垩纪持续的东-西挤压作用有关(Horton et al., 2001)。这样的对称关系并不总是出现(如, Nelson et al., 2000)。事实上,随着由剪切应力引起的渐进变形和旋转的发展,分叉裂缝便可能延伸并形成倾斜形式,如那些在 Piedra Larga 背斜(图 6a)靠近 Tarija - Villamontes 公路观测到的或靠近 Canalets(图 5b)

Santa Rosa 露头观测到的一样。任何情况下,与褶皱斜交的形式都是应力场或变形岩的局部或区域旋转的结果(如, Fischer 和 Wilkerson, 2000)。

两种不同的机理能够解释图 14a 所示横断层的剪切方向的变化。第一种机理是与母断层的交角小于 40° 的分叉裂缝的产生和期后的剪切作用。这种机理意味着相对于局部或远处应力场的横节理的旋转(或应力场的旋转)。沿横节理的剪切产生带有斜分叉节理的横断层。

如果局部最大压应力的方向平分母横断层和分叉节理之间的夹角,那么被剪切的分叉节理将有一个与母断层相反的剪切方向,正如图 14a 左边所展示的那样。根据 Davatzes 和 Aydin (2003),母断层和分叉裂缝之间的角依赖于断层末端的荷载模式和机理性质。这种机理已经由 Flodin 和 Aydin (2004) 所证明。

第二种机理与相邻断块之间的相对位移与剪切方向有关。邻近断块位移方向的显著变化可由下伏断层的位移梯度的突然变化来引入,或起源于在下伏塑性岩石中产生的局部层面平行滑块。其实,这类似于由 Couples 等人 (1998) 假设的尺蠖移动过程。层间滑动有关的节理位置以前已经由 Cooke 和 Pollard (1997)、Dholakia 等人 (1998)、Cook 等人 (2000) 证明和模拟过。类似的过程也已由 Shamir 和 Eyal (1995)、Tindall 和 Davis (1999) 及 Roznovsky 和 Aydin (2001) 做过分析。由此机理产生的构造在图 14a 的右边做了概述。我们的观测认为两种机理在 Abra del Condor 地区都起作用。

5.4 地层层序和裂缝级别之间的关系

不同裂缝级别的平均间隔(从节理组到断层带)和包含它们的地层单元之间存在对应性:地层厚度与平均节理间距保持一级关系,而小断层的平均间隔与砂岩层组厚度是相同的数量级。中等断层和亚层序(sensu Van Wagoner et al., 1990)间及断层带和层序间存在着相似的关系(图 14b)。因为还存在其它因素,如法向应变的大小(Wu and Pollard, 1995; Gross and Engelder, 1999; Bai and Pollard, 2000)或剪应力,也会影响断层和节理间隔,这种相应关系可表达如下:

$$S = \alpha T \quad (1)$$

这里 α 是与延性或剪切应力有关的因数, T 是有关的地层组的厚度, S 是节理组或受限断层的平均间隔。关于节理组的情况而言,在地质文献中间

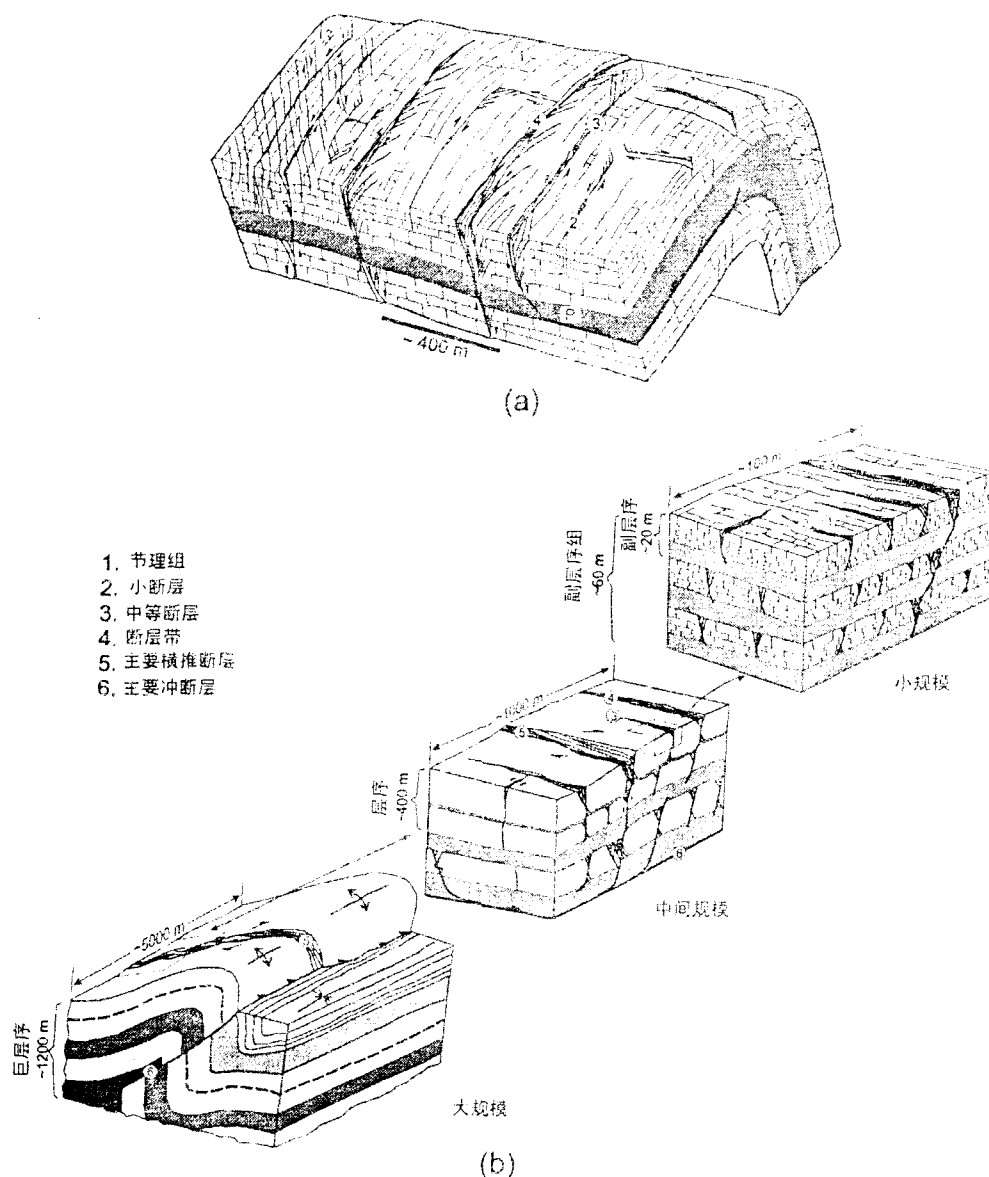


图 14 玻利维亚 Subandean 褶皱和冲断带的断层和裂缝系统的概念模型

(a) 沿一个背斜的裂缝分布。模型显示不同的裂缝级别: (1) 节理; (2) 小断层; (3) 中等断层; 和 (4) 断层带; 近平行横断层的剪切方向上变化的两个不同的机理: 向左, 变化取决于母断层、分叉裂缝和施加的压力的方位; 向右, 变化与由下伏滑块引起的滑动梯度有关系 (P), 象局部冲断层; (b) 地层结构与裂缝等级之间的关系: 每条裂缝等级的大小和空间频率受各条断层所在地层等级厚度的影响 (巨层序、层序、副层序组、副层序、层组和单层), 而节理组 (1) 和小断层 (2) 局限于单层和层组, 主要冲断层 (6) 和主要横推断层 (5) 涉及较大的地层层段

隔和厚度间的线性关系已成共识 (Lachenbruch, 1961; Hobbs, 1967; Narr, 1990; Narr and Suppe, 1991; Gross et al., 1995; Bai and Pollard, 2000)。

在裂缝等级和地层层序之间的等级关联性中页岩单元的厚度似乎是一个重要的因素。对于具有特定偏移范围的断层, 其所在地层层段周围是未受这些断层断裂的泥岩层。页岩越厚, 需要穿越页岩层段而连结断层的断距越大。除此之外, 如果在断层

高度和断层长度之间存在一定的关系, 那么断层所在地层层段的厚度也会限制受限断层的长度。

与此项研究中所证明类似的节理间距的对数正态分布先前已由 Narr and Suppe (1991) 和 Rives 等人 (1992) 报道过。Narr and Suppe (1991) 也发现在节理间距的中值与地层的厚度之间的关系。Rives 等人 (1992) 指出随着张性应力的增强, 节理间距的分布函数可由指数向对数正态和正态演化, 且节理

表1 裂缝与地层级别的关系

露头	裂缝级别	平均间隔 (S)	所在地层层段	测量或估计(~) 的厚度(T)	比率 T/S
Abra del Condor	断层带	361m(1184.4ft)	层序(组)	367m	1.0
背斜的后翼	中等断层	59m(193.6ft)	副层序组	64.5m	1.1
Huamampampa	小断层	4.2m(13.78ft)	层组	10m	2.4
组	节理	0.49m(1.61ft)	层	~0.5m	1.0
Canaletas; Santa Rosa	中等断层	19.3m(63.32ft)	副层序组	82.5m	4.3
组	小断层	0.76m(2.49ft)	层组	~9m	11.8

密度区(图11h)的柱状图之间的对比来推知。运用分位数-分位数曲线图法,我们发现前者具有一个清晰的对数正态分布函数,而后者更对称,接近正态分布函数。

5.5 影响裂缝密度的因素

剪应力和地层结构在我们研究区域中是影响裂缝密度分布的最重要的因素。其它众所周知的因素有岩石特性、伸缩性、充填模式(如, Huang and Angelier, 1989; Narr and Suppe, 1991; Gross 等人, 1995; Wu and Pollard, 1995; Gross and Engelder, 1999; Bai and Pollard, 2000)。为解释剪应力对裂缝密度的影响,我们采用图4b中的断裂频率并计算50m(164ft)层段的平均裂缝频率。将每一层段内所有断层断距相加再除以50而获得剪应力。为避免相邻断层带的影响,我们排除了最初的和最后的50m层段,结果显示当剪应力增加时断裂频率增加(图15)。此外,从 Abra del Condor 和 Canaletas 露头之间断层和裂缝密度的对比中看出剪应力的影响变得明显。小断层和中等断层的平均间距在高应力区(Canaletas 露头)比在低应力区(Abra del Condor 背斜后翼)要

小3倍。

地层结构对裂缝密度的影响很可能与地层厚度对节理间距的影响类似,正如 Wu and Pollard(1995) and Bai and Pollard(2000)所解释的一样。地层的重要性以前已被其他学者探讨过(如, Lorenz et al., 1997; Fischer and Jackson, 1999)。Narr (1990)定义了裂缝间隔指数(I)为地层厚度(T)与平均裂缝间距(S)的比率。Bai and Pollard(2000)提出存在一个裂缝指数临界值($I \leq 1$),大于这个值,节理间的应力场便变成压应力,因而抑制另外节理的加密。他们称这为裂缝饱和阶段。我们的研究结果显示每个裂缝级别和它所在地层层段之间有一个类似的关系。然而,对这种关系更加深入的理解需要进行更多的实验和理论的研究。

对于节理密度的特殊情况,我们建议使用一种提升裂缝间隔指数(I)的方法,以便考虑到沉积层序的级别特性。简单的几何分析显示,虽然各单层的厚度影响到每层中节理间隔,但层组和副层序中的节理密度由这些地层层段和组成它们的各层之间的厚度比(R)所决定。对于具有相同厚度的层组,节理密度则与厚度比(R)成比例地增加。另一个要考虑的重要因素是在地层层序组中脆性和延性岩性的比例。在裂缝性储层中,这个比率一般与有效厚度与总厚度比(N)成比例。因此,可以推断,层组和副层序(I_b)的节理密度可从以下公式求得

$$I_b = RN \frac{T}{S} \quad (2)$$

此方程式基本含义是:对于具有类似厚度和岩性、但各单层厚度不同的层组,在薄单层的层组中节理密度将较高。它也说明地层层序组的节理密度随泥岩层段的比例呈线性减少。

第2个方程式的目的是提升 Narr(1990)定义的裂缝指数(I),但须慎重使用。在这个表达式中,我

(下转第83页)

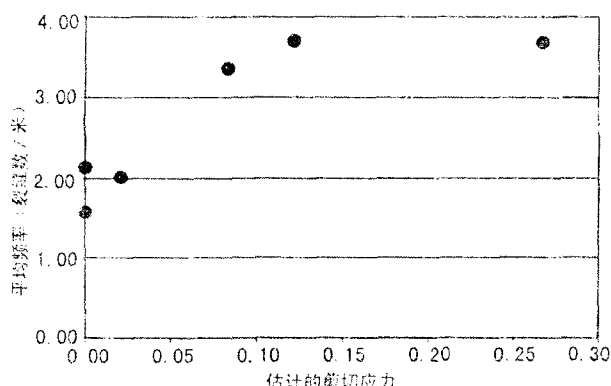


图15 平均裂缝频率(裂缝数/m)与剪切应力之间的关系

正如沿图4b中的扫描线,以50m(164ft)为间隔所计算的一样。由于受邻近断层带的影响不考虑扫描线的两端

有可能确定 $R_{w,m,n}$ 和 BVWI。根据岩心、岩屑或试井确定地层条件下的部分(或全部)这些参数是不充分的。

许多岩石物性模型参数是相互关联的,在组合模型中可以利用它们进行反复查对。

岩心分析数据对确定计算结果和测井模型参数的正确性有很大帮助。

在联合反演中,岩石物性的概率统计模型可以考虑包含核磁共振数据,得到误差分析,确定模型稳定性。

译自《第 47 届 SPWLA 测井年会论文集》- P, 2006

(上接第 51 页)

们假设在同样应力条件下岩石已破裂。应当着重指出的是在相同地质条件下脆性岩层厚度的减少会降低拉伸应力。例如,在使一个厚度为(T)且无裂缝的地层弯曲的情况下,弯曲地层的最大张应力(σ)取决于曲率的半径(ρ)以及扬氏模量(E)。根据 Fung(1994),我们将由弯曲所产生的最大张应力表达如下:

$$(\sigma = E \frac{T}{2\rho}) \quad (3)$$

从这个方程式中,我们可看出弯曲地层的最大张应力随地层的厚度呈线性减少。它会降至低于破裂极限的一个点,实际上,意味着该岩块具有延性特点。因此,方程式 2 不能广泛地应用于任何厚度的地层。它仅能用于提升各单层中节理的裂缝间距指数,用于较厚岩段的岩体。

6 结 论

总之,此项研究表明断层和裂缝以不同的规模和等级而出现,主要断层和裂缝类型取决于观测的范围和岩性。就玻利维亚的 Subandean 褶皱和冲断层带而言,我们已经证明垂直于构造方向的断层带和小断层的特性大多与储层规模上的流体和气体流动有关。

在地下观测到的裂缝的方位和式样与那些在露头发现的类似。我们将地下和露头资料的对比证明

对地质模型的露头研究和裂缝式储层特征的关联性。

在砂岩单元中的变形机制是节理的分级剪切,分叉节理的生成和发育,以及分叉节理的剪切。这个过程重复数次,形成多代的节理和被剪切的节理。随着此过程的发展,节理的式样出现从对称到不对称或倾斜的变化。对称式样表现为两个对称节理组的正交组;一组平行(北-南)另一组垂直(东-西)层面走向。不对称式样则相对于地层产状呈现为斜节理。随着与剪切应力相关的逐步变形的增强,露头规模断层的式样呈现类似的变化。

我们的研究结果证明裂缝密度沿着褶皱构造方位出现明显的变化。这个变化可解释为由被断层带、中等断层和小断层所调节的剪切应力的变化所引起的。断层带间距有一个接近正态分布函数,其平均值与包含它们的地层层序厚度相差不多。中等断层、小断层和节理组的间距都具有对数正态分布函数。这些分布函数的平均值与它们所在的地层层序的厚度间属一级关系。

因而我们断定地层结构、层序地层和剪应力是控制褶皱和冲断带中的断层和裂缝的密度和定位的两个最重要的因素,特别在沿褶皱构造的走向方位上更是如此。

译自 AAPG, 2005, Vol. 89, No. 4, pp. 471 ~ 493