

实践中发展的最大有效力矩准则

郑亚东¹, 张进江¹, 王 涛²

(1. 教育部造山带与地壳演化重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;

2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘 要: 最大有效力矩准则发表以来, 不断得到新的野外观察和实验结果的验证, 正在得到国内外同行的支持。岩石的变形行为取决于自身力学性质、构造层次(包括温度、压力、流体压力等因素)和应变速率。浅构造层次中平面菱网状构造和剖面共轭膝褶带, 钝角面对缩短方向, 受最大有效力矩准则控制, 是对慢应变速率的构造响应。证明应变速率对变形行为的控制程度不亚于构造层次。韧、脆性构造的共存意味着构造演化过程为快、慢应变速率的交替。

关键词: 最大有效力矩准则; 应变速率; 膝褶带; 菱网状构造

中图分类号: P578.2, P588.3

文献标识码: A

0 引言

2004 年, 历经 20 年的实践和四十多位专家的评审, 《最大有效力矩准则》(以下简称《准则》)终于在构造地质学领域的国际权威性杂志《构造地质学学报》(JSG)上发表了^[1]。该杂志副主编 D Fisher 在决定发表的通知函中写道:“评审者都认为文稿中提出的思想创新, 可能引起本刊读者的极大兴趣。”M Markley 的评议是:“该文稿作出 2 个有意义的原始贡献: ①提出最大有效力矩的概念, 分析强面理化岩石伸展褶劈理的取向; ②推测韧性低角度正断层起源于伸展褶劈理的可能成因。这对野外研究很重要, 因为迄今的地质学家还不能对伸展褶劈理进行运动学或力学解释”。另一位评审者 B Tikoff 写道:“我相信作者可能发现韧性剪切带形成的关键。通过力矩分析计算剪切条带的取向, 就我所知, 这在构造地质学文献中是新的研究途径。”

《准则》的问世立即引起国内外同行的关注, 2005 年入编新版《地球科学大辞典》^[2]。发表 5 年来, SCI 累计正面引证 12 次。这一引证率虽不算高, 但不久便入编国内外《构造地质学》^[3,4]。进入教科书, 势必将在世界范围内得到持续的传播。中国地质学会构造地质学与地球动力学专业委员会撰写的《构造地质学的成就与前景》一文对《准则》作如下评价:“美国西部科迪勒拉造山带确立以大规模低角度正断层为重要构造成分的变质核杂岩伸展构造模式(Davis 和 Coney, 1979; Wernicke, 1981)是 20 世纪 80 年代构造研究的重大进展, 并

收稿日期: 2009-05-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(Grant No. 90714006; 40872133)资助。

作者简介: 郑亚东(1936-), 男, 北京大学教授, 构造地质学专业。E-mail: ydzheng@pku.edu.cn

引领了整个 80 年代至 90 年代初的构造研究……。然而，低角度正断层的力学成因成为构造地质学家关注的焦点……。郑亚东等 (Zheng et al, 2004) 在膝褶带和伸展褶劈理研究的基础上，提出岩石变形的最大有效力矩准则，证明最大力矩出现在最大主压应力轴两侧 55° 方向。根据低角度正断层与糜棱岩的密切关系，论证通过应变集中和应变软化，韧性剪切带可扩展为大规模的伸展拆离断层。最大有效力矩准则的提出，是我国地质学家对力学和地质学基础理论的一大贡献。^{〔5〕}

《准则》是荣获第九次“李四光地质科学奖”的主要成果，是在学习地质力学的基础上和李四光先生倡导的科学创新精神的鼓舞下做出的。本文旨在总结实践《准则》的体会，缅怀李四光先生 120 年诞辰。

1 新证据

2005 年起，研究者开始将《最大有效力矩准则》应用于地质科研实践中。Neves 等^{〔6〕}用最大有效力矩准则解释泛非新元古代构造带中的两组剪切带：“根据共轭伸展褶劈理的分析 (Zheng et al, 2004)，推测缩短方向平分其间的钝角，即北西—南东向。”郭召杰等^{〔7〕}发表论文指出，新疆红柳河蛇绿岩中存在早晚两期伸展构造，“在韧性和脆脆性变形过程中符合最大有效力矩准则，而脆性变形过程中符合库伦准则”。Marshak 等^{〔8〕}在分析巴西东部的 Chapada Acaua 剪切带时，引证：“缩短褶劈理和伸展褶劈理可共轭出现，同向伸展褶劈理更为常见 (Zheng et al. 2004)”。杨天南等^{〔9〕}在论证中天山的应变分解时，引证：“共轭的两组剪切条带劈理夹角为 $\sim 110^{\circ}$ ，与最大有效力矩准则的预测一致 (Zheng et al, 2004)”。King 等^{〔10〕}在分析新西兰直河剪切带时，引证：“褶劈理的实验研究表明，共轭组的形成以最大主压应力轴为其间的 $\sim 110^{\circ}$ 的等分线 (Zheng et al, 2004)”。Fowler 和 Osman^{〔11〕}论证埃及分隔中央与东南沙漠的低角度韧性正断层时，运用了最大有效力矩准则。

Kurz 和 Northrup^{〔12〕}系统测定了位于美国俄勒冈和爱达荷州的虎溪杂岩糜棱岩中的“SC’型剪切条带”。所测的 8 个标本中有 4 个发育共轭伸展褶劈理，两高应变岩样的共轭角为 102° 和 110° ，两低应变岩样的共轭角为 98° 和 108° ，全部位于《准则》预测的有利区间内 (见图 1)，证明糜棱岩中的 C’和共轭 C’的取向为最大有效力矩方向。

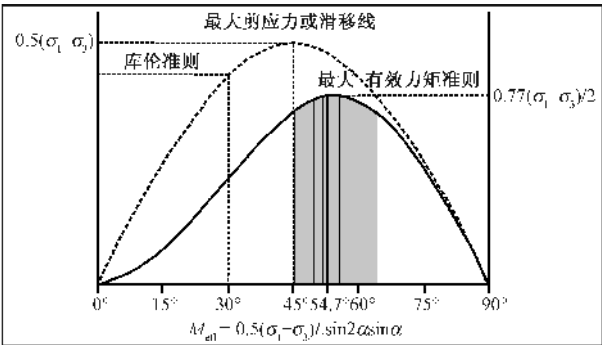


图 1 最大有效力矩准则

(阴影区囊括全部天然和实验共轭变形带的半夹角)

Fig.1 The maximum effective moment criterion (MEMC)

M_{eff} —有效力矩； $\sigma_1 - \sigma_3$ —差应力，其大小等于屈服强度；

L —单位长度； α —给定平面与 σ_1 轴间夹角

Vernooij 等^[13]在温度 800 ℃、围压 1.2 GPa 和应变速率为 $1.1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 条件下，对石英单晶进行平行光轴的压缩实验。采用 EBSD 技术，对变形缩短 26% 的石英晶体内部的变形进行系统测试，揭示共轭变形带间面对缩短一方的夹角为 $109^\circ \sim 110^\circ$ （见图 2a）。为最大有效力矩准则提供了最有说服力的实验例证，证明了：① 共轭变形带的夹角一开始就是 $109^\circ \sim 110^\circ$ ；② 高温、低应变速率下石英晶体沿最大有效力矩方向形成韧性剪切带。

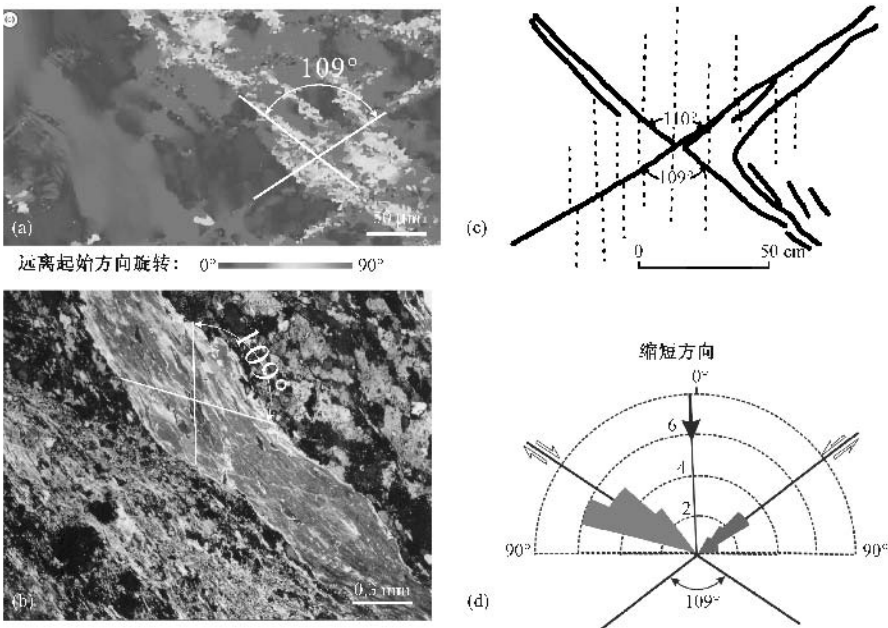


图 2 不同尺度的共轭剪切带

Fig.2 Conjugate shear zones on different scales

- (a) 单晶石英沿光轴压缩实验形成的微观共轭剪切带^[13]；(b) 云母鱼中的共轭伸展褶皱劈理；
(c) 英格兰波尔比钾盐矿支撑柱中的共轭屈服带^[14]；(d) 加拿大地盾中的共轭韧性剪切带^[15]

迄今，钝角典型情况下为 109° 或 110° ，面对缩短方向的共轭剪切带出现在不同规模 and 不同岩石与材料中（见图 2）。从中获得一个新启示：《准则》原限定的各向异性材料，实践证明，适用于一切材料，包括各向异性和各向同性材料。

2 浅层次岩石的韧性变形

Sibson^[16]根据长英质岩石断层岩的类型，将构造层次分为上地壳脆性域和中下地壳韧性域的理念是现代构造地质学的最重要基础理论之一。然而这一理念容易导致误解的是，上地壳没有韧性变形，下地壳没有脆性变形。其实不然。

2.1 钾盐矿柱中的屈服带

Watterson^[14]报导的英格兰克莱福兰波尔比钾盐矿地下约 1000 m 深处页状钾盐岩支撑柱中的共轭屈服带，堪称为最大有效力矩准则提供了最有说服力的人工加天然的实验实例。这里 2 条长约 2 m 的近平面状屈服带相互切割，并将柱面留下的垂向采矿铲抓痕正断式错开，构成共轭系，上下共轭角分别为 110° 和 109° （见图 2c）。鉴于罗盘的测角精度为 1° ，上述夹角与最大有效力矩准则所预测的角度完全一致。这些屈服带显然是采矿过程中形成的，假定

采矿历史为几十年, 估计应变速率为 10^{-8} s^{-1} 量级。由于支撑柱周边采空, 在上覆约 1000 m 岩石负荷作用下, 其应力状态为 σ_1 取向直立, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, 取向水平。如果上覆岩石的平均密度为 2.5, $\sigma_1 = \rho gh = 250 \text{ kg/cm}^2$ 。该例位于近地表的低温、低压环境中长英质岩石的脆性变形域内, 慢应变速率下钾盐表现为韧性变形。

2.2 第四纪疏松沉积物中的膝褶带

日本的东南侧, 菲律宾板块以 4 cm/a 的速率向下俯冲, 形成南海道增生楔。增生楔前缘近水平的第四纪松散泥质沉积物中发育 2 组陡倾的变形带。一组倾向南东, 一组倾向北西。两组变形带中的层理和片状矿物均近直立产出, 指示变形带两侧的逆冲剪切作用, 构成共轭变形带^[17]。共轭变形带水平方向一侧的平均夹角为 113°, 与有效力矩准则的预测值几乎完全一致。该例表明, 对于第四纪松散泥质沉积物, 4 cm/a 的板块汇聚速率下表现为韧性行为。

2.3 油气盆地中的大型膝褶带

近来国内外油气盆地揭示出一些大型膝褶带, 表明表层沉积岩石韧性行为。“两断夹一隆”是中国油气勘探中总结的西部储油构造的基本特征之一, 其中的“两断”一般解释为高角度逆冲断层。问题是陡倾高角逆冲断层, 几何上违背体积守恒定律^[18], 力学上与库伦准则和岩石力学实验不相容^[19], 构造模拟不支持用正断层的反转说明高角逆断层形成的解释。郑亚东等在柴达木盆地的野外实地考察^[20], 特别是近期墨西哥湾深水区长叠前深度偏移处理后的地震反射剖面, 证明那些原解释为高角度逆断层的弱反射带或低信噪比带实际上为大型膝褶带, 带内岩层连续, 不存在大规模的贯通性断层 (见图 3)。

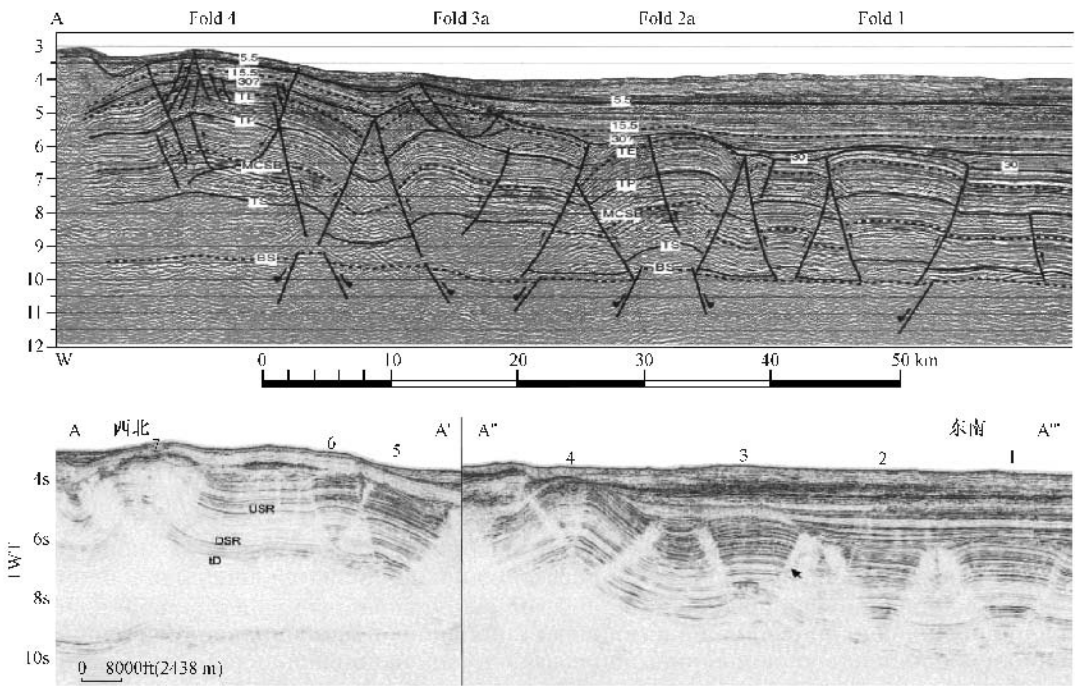


图 3 墨西哥湾深水区长叠前深度偏移处理后的地震反射剖面, 证明那些原解释为高角度逆断层的弱反射带或低信噪比带实际上为大型膝褶带, 带内岩层连续, 不存在大规模的贯通性断层 (见图 3)。

Fig.3 Old (upper) and new (lower) explanations for seismic sections in Northwestern deep-water Gulf of Mexico

Paterson 和 Weiss^[21] 对千枚岩实验研究证明，在室温、围压 5 kg 和应变速率为 $4 \times 10^{-4} \sim 8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 条件下，大约缩短量 10% 时开始出现共轭膝褶带，其夹角为 110° 左右。表明膝褶带为慢应变速率的产物，其取向受最大有效力矩准则的控制。

2.4 沉积盆地中的“糜棱片岩”

柴达木盆地西部的新近纪膏泥质粉砂岩，在油泉子构造北翼的大型膝褶带中形成一种很特殊的“片岩”。这种片岩无变质矿物，却有片岩的组构。这里，近直立的片理由粗大石膏晶片的极完全解理的优选定向组成。石膏晶片系原膏泥质粉砂岩中的泥晶石膏重结晶而成，直径可高达 20 cm，包裹无数的粉砂和细砂，堪称为粉砂质石膏片岩。片理与层理构成糜棱岩的 S/C 组构，其间的夹角约 9° ，指示左行剪切。“糜棱片岩”内常见一组发育间隔性同向伸展褶劈理或 C' ，与 C 面理的交角约 27° ，剪切指向与总体一致。偶见反向伸展褶劈理，剪切指向相反，共轭角为 110° （见图 4）。

2.5 断层泥中的糜棱组构

断层泥公认为形成于近地面的表层，属脆性变形的产物^[16]。然而，脆性变形所形成的断层泥常具有 S/C 组构并发育 C' 与共轭 C' 面理，如内蒙古赤峰簏子店拆离断层中的断层泥（见图 5）。其中， C' 与共轭 C' 面间的夹角为 118° ，表明该断层组构的形成与慢速韧性变形过程有关。

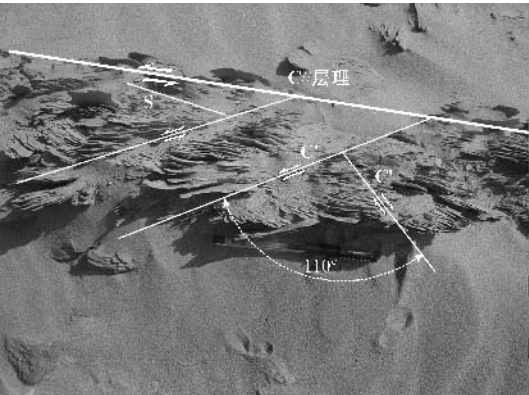


图 4 柴达木盆地油泉子构造新近系粉砂质石膏片岩

Fig.4 Silty gypsum schist on the northern flank of the Oil-Spring Dome in Qaidam Basin

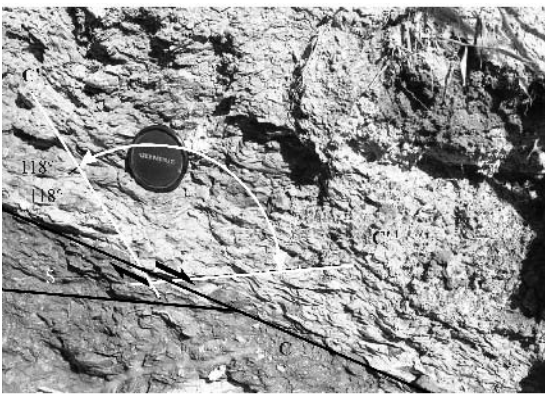


图 5 内蒙古赤峰簏子店断层泥中 S/C 组构与 C' 和共轭 C' 面理

Fig.5 S/C fabrics and conjugate extensional crenulation cleavages in fault-gouge

2.6 浅构造层次中的菱网状构造

Ramsay 和 Huber^[22] 将韧性剪切带所分割应变相对较弱的菱形岩石块体称为菱网构造，并作为前寒武基底的基本构造型式。Park^[15] 在加拿大西苏必利尔省花岗-绿岩区的构造研究为菱网状韧性剪切带提供了最佳实例（见图 2d）。这里，6 万余平方千米的广大面积内发育 15 条大型剪切带。NE—SW 向左行剪切与 NW—SE 右行剪切构成的共轭剪切带，将区域分割成菱形断块，面向南北缩短方向的平均共轭夹角为 109° ，角度波动范围与最大有效力矩准则所预测的范围一致（见图 1 阴影区）。

其实，菱形构造不限于基底构造。被视为挤出构造典型的中东亚地区，挤出地块并非沿 Tapponnier 和 Molnar^[23] 所谓的滑移线。根据塑性力学，平面变形的共轭滑移线相互垂直^[24]，而野外和实验所观测到的共轭剪切变形带（韧性剪切带、韧性剪切断层带、膝褶带、伸展褶

劈理和共轭屈服带) 的面对缩短一侧间的夹角, 总是钝角 (一般为 110° 左右)。根据 Tapponnier 等^[25] 标出的主要滑移线, 塔拉斯费尔干纳与阿尔金断层带间的角度为 $\sim 115^{\circ}$, 阿尔金与哀牢—红河断层带间的夹角为 $\sim 120^{\circ}$, 哀牢—红河与实皆断层带间为 $\sim 139^{\circ}$, 阿尔泰附近的共轭滑移线间的夹角为 119° , 西构造结西侧的共轭滑移线间的夹角为 $\sim 125^{\circ}$ 。根据 Kapp 等^[26] 提供的西藏活动断层图制作的断层走向玫瑰图 (见图 6) 表明, 这一地区的大型和中型共轭断层间的夹角大约为 115° 。甚至露头规模的构造都保持相似的角度关系, 如上述柴达木盆地新近系中的糜棱片岩 (见图 4)。

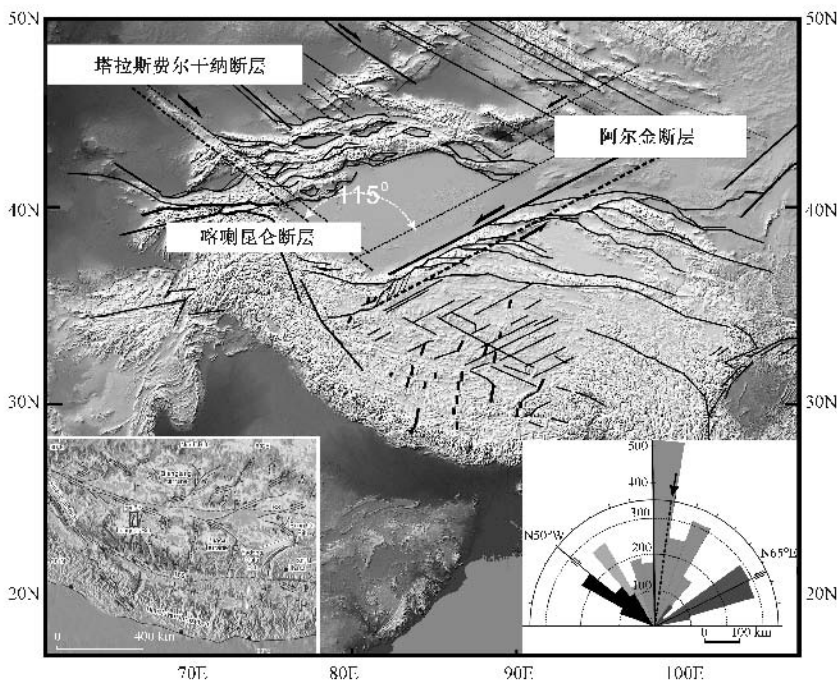


图 6 中亚与青藏区主要共轭走滑断层间的夹角

Fig.6 Angles between major strike-slip faults in mid-Asia and Qinghai-Tibet
(藏中断层走向玫瑰图 (右下图) 据左下图^[26]资料编制)

值得注意的是平分该钝角是一组近南北走向的张性正断层, 由于张性断裂是快速脆性变形的产物, 如何解释这两者共存所产生的矛盾? 根据 Wright 等^[27] 的研究, 限定塔里木盆地的两主要断层——喀喇昆仑和阿尔金断层, 地质证据获得的滑动速率分别约为 30 mm/a 和 $20\sim 30\text{ mm/a}$, 而根据震间卫星雷达干涉仪 (InSAR) 测定的速率却分别为 $< 7\text{ mm/a}$ 和 $(5\pm 5)\text{ mm/a}$, 两者几乎差一个量级。这表明无震的宁静期应变速率慢, 而包括地震事件在内的长期平均应变速率则要快的多。因此, 韧性与脆性变形构造的共存可解释为该区快、慢速率变形的交替活动。

地中海安纳托利亚区是挤出构造模式的发源地^[28,29]。阿拉伯板块相对欧亚板块的汇聚导致安纳托利亚地块沿右行走滑的北安纳托利与左行走滑的东安纳托利断层带向西挤出。北安纳托利与东安纳托利断层带间以及安纳托利亚地块内部的共轭走滑断层系间汇聚一侧的夹角约为 124° 。

所有上述夹角都明显大于 90° , 这一角度通常用后续的递进压扁来解释。如果这一解释

正确, 则需证明: ①初始夹角为 90° ; ②其后的角度随应变而向 180° 趋近, 无一稳定夹角; ③从 90° 增至 110° 所需的最小缩短量为 31%。然而, ①韧性变形实验^[13,21] 证明, 在慢应变速率下, 共轭韧性变形带间的夹角一开始就是 109° 或 110° , 特别是前者, 浅构造层次下, 只要应变速率足够慢, 岩石和材料的变形行为为韧性; ②野外观察和实验表明, 其间有一相当的稳定角 110° ; ③野外观察表明, 相关岩石, 例如塔里木盆地古生—新生界均无透入性变形, 产状总体近水平, 其应变变量应远远小于 31% (全部地层直立的最小缩短量约为 36%)。

根据 Zheng 等的最大有效力矩准则^[1], 共轭韧性剪切带间的理论夹角为 109.4° , 上述 Tapponnier 等^[25] 标明的主要滑移线的共轭角, 除一例外都在 $110^\circ \pm 20^\circ$ 区间内, 表明挤出构造域中的走滑剪切断层并非塑性力学中的滑移线, 而是最大有效力矩方向。最大有效力矩准则可合理说明: ①青藏高原和中亚地区的共轭走滑断层为何以钝角 (一般为 110°) 面对缩短方向; ②挤出构造中的走滑变形带一般为走滑挤压断层, 而不是滑移线预测的简单剪切带; ③挤出板块的运动速率可大于挤入板块的运动速率, 甚至可超过一倍 (例如东地中海安纳托利亚^[28,29]); ④取向一致的变形带性质可显著不同, 一是走滑, 另一可为缩短变形带, 例如阿尔金断层东侧的祁连山褶皱带和西侧的塔拉斯费尔干纳断层北侧柯坪逆冲带。最大有效力矩准则预测, 钝角面对缩短方向的共轭韧性剪切带是变形对低应变速率的响应, 其运动学涡度 (W_k) 初始一般为 0.88, 属简单剪切为主的走滑挤压变形带。因此, 下地壳“韧性域”和上地壳“脆性域”的提法, 严格说并不准确, 对于长英质岩石, 地震应变速率下, 无论是上地壳还是下地壳, 均表现为弹 (脆) 性; 而在地质应变速率下, 无论是浅层还是深层, 均表现为塑 (韧) 性。

3 在油田构造分析与勘探中的应用

半个多世纪我国西部油气勘探实践总结出一条重要的经验是储油构造的基本特征是“两断夹一隆”, “两断”是指高角逆冲断层。实践证明, “两断加一隆”中的“两断”实为共轭膝褶带^[30]。柴达木盆地与塔里木盆地的塔中和巴楚油田构造的主要形成机制为膝褶作用。膝褶带的地貌表现为坡折带、低隆起, 有利于礁滩的形成。膝褶带内的扩容和断裂, 主动吸取带外的流体, 有利于地下水的活动、岩溶带的形成。膝褶带内的扩容和断裂, 有利于油气的聚集、运移和储存。缺乏理想的砂岩储集层时, 膝褶带提供了油气储集的有利场所。因此, 对于一般孔隙性砂岩储集层应在构造高点部位布置钻探, 而对于碳酸盐岩储集层及裂缝性储集层应在大型膝褶带部位钻探。

4 结论

最大有效力矩准则比力学中的本构关系更为概括, 因为只要满足给定材料韧性变形所要求的低应变速率, 差应力达到材料的屈服强度, 无论何种材料, 包括均质和非均质、各向同性和各向异性材料, 将沿最大力矩方向发生剪切变形。李四光先生生前将花岗岩石条平置在两端的支撑墩上, 显然是想验证常温、常压下, 花岗岩在长期自重作用下能否屈服而变形。

浅构造层次中平面菱网状构造和剖面共轭膝褶带, 钝角面对缩短方向, 受最大有效力矩准则控制, 是慢应变速率的构造响应。证明应变速率对岩石变形行为的控制程度不低于构造层次。

韧、脆性构造的共存意味着构造演化过程为快、慢应变速率的交替。

致谢：衷心感谢北京大学何国琦、韩宝福、李江海教授提供的中亚区构造信息和国家自然科学基金委提供的资助 (Grant No. 90714006; 40872133)。

参 考 文 献

- [1] Zheng Y, Wang T, Ma M, et al. Maximum effective moment criterion and the origin of low-angle normal faults [J]. J. Struct. Geol., 2004, 26: 271 (285).
- [2] 《地球科学大辞典》编委会. 地球科学大词典 [M]. 北京: 地质出版社, 2005. 1 ~ 823.
Editorial Committee of «Dictionary of Earth Sciences». Dictionary of Earth Sciences [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005. 1 ~ 823.
- [3] Twiss R J, Moores E M, Structural Geology (Second Edition) [M]. New York: W H Freeman and Company, 2005.
- [4] 曾佐勋, 樊光明. 构造地质学 (第三版) [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2006.
ZENG Zuo-xun, FAN Guang-ming. Structural Geology (Third Edition) [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2006.
- [5] 中国地质学会构造地质学与地球动力学专业委员会. 构造地质学的成就与前景 [A]. 见: 中国科学技术协会, 中国地质学会 编. 2006 ~ 2007 地质学学科发展报告 [C]. 北京: 中国科学技术出版社, 2007. 67 ~ 78.
Structural Geology and Geodynamics Professional Committee of Geological Society of China. Achievement and prospects on structural geology [A]. In: China Association for Science and Technology, Geological Society of China. 2006 ~ 2007 Report on Advances in Geological Sciences [C]. Beijing: China Science and Technology Press, 2007. 67 ~ 78.
- [6] Neves S P, da Silva J M R, Mariano G. Oblique lineations in orthogneisses and supracrustal rocks: vertical partitioning of strain in a hot crust (eastern Borboroma Province, NE Brazil) [J]. J. Structural Geology, 2005, 27 (8): 1513 ~ 1527.
- [7] Guo Z J, Shi H Y, Zhang Z C, et al. The tectonic evolution of the north Tianshan paleo-oceanic crust inferred from spreading structures and Ar-Ar dating of the Hongliuge ophiolite, NW China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22 (1): 75 ~ 102.
- [8] Marshak S, Alkmin F F, Whittington A, et al. Extensional collapse in the Neoproterozoic Aracua orogen, eastern Brazil: a setting for reactivation of a symmetric crenulation cleavage [J]. Journal of Structural Geology, 2006, 28 (1): 129 ~ 147.
- [9] Yang T N, Wang Y, Li J Y, et al. Vertical and horizontal strain partitioning of the central Tianshan (NW China): Evidence from structures and Ar40-Ar39 geochronology [J]. Journal of Structural Geology, 2007, 29 (10): 1605 ~ 1621.
- [10] King D S, Klepeis K A, Goldstien A G, et al. The initiation and evolution of the transpressional Straight River shear zone, Central Fjordland, New Zealand [J]. Journal of Structural Geology, 2008, 30 (4): 410 ~ 430.
- [11] Fowler A, Osman A F. The Sha'it-Nugrus Shear zone separating Central and South Eastern Deserts, Egypt: A post-arc collision low-angle normal ductile shear zone [J]. Journal of African Earth Sciences, 2009, 52 (1 ~ 2): 16 ~ 32.
- [12] Kurz G. A, Northrup C J. Structural analysis of mylonitic rocks in the Cougar Creek Complex, Oregon-Idaho using the porphyroclast hyperbolic distribution method, and potential use of SC'-type extensional shear bands as quantitative vorticity indicators [J]. Journal of Structural Geology, 2008. 30 (8): 1005 ~ 1012.
- [13] Vernooij M G C, Kunze K, den Brok B. Brittle shear zones in experimentally deformed quartz single crystals [J]. Journal of Structural Geology, 2006, 28 (7): 1292 ~ 1306.
- [14] Watterson J. The future of failure: stress or strain? [J] Journal of Structural Geology, 1999, 21: 139 (148).
- [15] Park R G. Shear-zone deformation and bulk strain in granite-greenstone terrain of the Western Superior Province [J]. Canada. Precambrian Research, 1981, 14: 31 ~ 47.
- [16] Sibson R H. Fault rocks and fault mechanisms [J]. Journal of the Geological Society, 1977, 133 (3): 191 ~ 213.
- [17] Ujiie K, Malman A J, Sanchez-Gomez M. Origin of deformation bands in argillaceous sediments at the toe of the Nankai accretionary prism, southwest Japan [J]. J. Struct. Geol., 2004, 26: 221 ~ 231.
- [18] Camero R H, Benson E F. Geometric and seismic interpretation of Perdido fold belt: Northwestern deep-water Gulf of Mexico [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90 (3): 363 ~ 386.

[19] 郑亚东, 王涛, 王新社. 最大有效力矩准则的理论与实践 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2007, 43 (2): 145 ~ 156.
ZHENG Ya-dong, WANG Tao, WANG Xin-she. Theory and Practice of the Maximum Effective Moment Criterion (MEMC) [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2007, 43 (2): 145 ~ 156.

[20] 郑亚东, 莫午零, 张文涛, 等. 柴达木盆地油气勘探的新思路 [J]. 石油勘探与开发, 2007, 34 (1): 13 ~ 18.
ZHENG Ya-dong, MO Wu-ling, ZHENG Wen-tao, et al. A new idea for petroleum exploration in Qaidam Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34 (1): 13 ~ 18.

[21] Paterson M S, Weiss LE. Experimental deformation and folding in phyllite [J]. Geological Society of America Bulletin, 1966, 77: 343 (374).

[22] Ramsay J G, Huber M I. The Techniques of Modern Structural Geology Fractures. Volume 2: Folds and Fractures [M]. New York: Academic Press, 1987.

[23] Tapponnier P, Molnar P. Slip-line field theory and large-scale continental tectonics [J]. Nature, 1976, 264: 319 ~ 324.

[24] Hill R. The Mathematical Theory of Plasticity [M]. Oxford: Oxford University Press/Clarendon Press, 1950.

[25] Tapponnier P, Peltzer G., Le Dain A Y, et al., Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine [J]. Geology, 1982, 10: 611 ~ 616.

[26] Kapp P, Taylor M, Stockli D, et al. Development of active low-angle normal fault systems during orogenic collapse: insight from Tibet [J]. Geology, 2008, 36: 7 ~ 10.

[27] Wright T J, Parsons B, England P C, et al. InSAR observations of low slip rates on the major faults of west Tibet [J]. Science, 2004, 305: 236 ~ 239.

[28] McKenzie D P. Plate tectonics of the Mediterranean region [J]. Nature, 1970, 226: 239 ~ 243.

[29] McKenzie D P. Active tectonics of the Mediterranean region [J]. Geophysical Journal International, 1972, 30 (2): 109 ~ 185.

[30] McClusky S, Balassanian S, Barka A, et al. Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus [J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105 (B3), 5695 ~ 5720.

THE MAXIMUM-EFFECTIVE-MOMENT CRITERION DEVELOPING IN PRACTICE

ZHENG Ya-dong¹, ZHANG Jin-jiang¹, WANG Tao²

- (1. *The Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China* ;
2. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*)

Abstract: Since the Maximum-Effective-Moment Criterion was published, it has been obtaining evidence in nature and the laboratory and supports from geologists home and abroad. Behavior of rock during deformation depends on mechanical property itself, structure levels (including such factors as temperature, pressure, fluid) and strain rate. The lozenge features and conjugate kink zones with obtuse angles in the contractional direction at shallow levels are consistent with the criterion and suggested as deformation at low strain rates and conform that the strain rate plays a more important role than the structure level in deformation. Coexistence of brittle and ductile features implies a tectonic evolution with alternation of high and low strain rates.

Key words: Maximum-Effective-Moment Criterion ; strain rates ; kink belt ; lozenge features