亚干变质核杂岩的运动学涡度与剪切作用类型*

郑亚东

(北京大学地质学系 北京 100871)

摘 要 运用极摩尔圆法、张量分析法和应力取向分析法对内蒙亚干变质核杂岩的剪切作用类型进行了定量分析。相关韧性剪切带的运动学涡度值为 0.53—0.87, 表明相关的剪切作用为减薄型一般剪切。其间的差异,表明主期以简单剪切为主, 递进变形过程中, 纯剪切组分增加, 这很可能与因晚期脆性断层引起的位移分解作用有关。同向伸展褶劈理的取向与剪切带边界的夹角既不等于两流脊间的夹角,也不等于其值之半,但可据以确定主应力方向,从而确定两流脊间的夹角和对应的运动学涡度。

关键词 极摩尔圆 变形张量 应力取向

1 概述

在韧性剪切带的研究中,采用简单剪切模式,主要是便于计算。伸展构造研究中, McKenzie (1978)和 Wernicke (1981; 1985) 分别采用纯剪切和简单剪切模式。然而,纯剪切和简单剪切所需的特殊边界条件,自然界一般均难以满足。正如 Reston (1990)根据下地壳的地震反射剖面特征所指出的,下地壳伸展过程中的剪切既非纯剪,亦非简单剪切。天然剪切带的大多数很可能是介于两者之间的一般剪切(De Paor, 1983)的产物。本文根据中蒙边界区亚干变质核杂岩(Zheng et al., 1991; Zheng et al., 1994; 郑亚东等, 1995)中的应变标志, 运用极摩尔圆、张量分析法和应力取向分析法对剪切作用类型进行了定量分析,结果表明相关剪切作用从简单剪切为主演变为纯剪为主的减薄型一般剪切。

岩石的变形是岩石中物质流动的产物,而流动形式本身可通过以下之一或一对参数予以确定: (1)运动学涡度(W_k); (2)泰勒磨定标参数(ζ); (3)双曲线流动渐近线(flow asymptotes)或流动脊(flow apophyses)间的夹角(α); (4)主应力轴与剪切带边界法线间的夹角(ξ); (5)流线的椭圆度(a/b); (6)碎斑与基质的粘性比($\eta_{包体}/\eta_{基质}$); (7)各向异性参数(δ)结合总体应力取向(ξ) (Weijermars 1998)。一般韧性剪切带与双曲线流动有关,其运动学涡度 $W_k = 0—1$, 泰勒磨定标参数 $\zeta = 1—0$,双曲线流动渐近线或流动脊间的夹角 $\alpha = 0°—90°$,主应力轴取向 $\xi = 0°—90°$,流线的椭圆度 $a/b = 1—\infty$。纯剪切与简单剪切

* 国家自然科学基金资助项目。
郑亚东,男,1936 年 1 月生,教授,构造地质学专业。
1998—12—03 收稿,1999—05—06 改回,王桂凤编辑。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http

可视为其中的端元组分。

2 运动学涡度的极摩尔圆分析法

对于双曲线流动形式, 运动学涡度 W_k 可简单定义为两流动渐近线夹角的余弦(Bobyarchick, 1986):

$$W_k = \cos\alpha \quad (1)$$

纯剪切为共轴变形, 变形面内两流动渐近线间的夹角 α 为 90°, 运动学涡度为 0。简单剪切为非共轴变形, 变形面内仅有一流动渐近线, 可视为两渐近线合二为一, 其间的夹角为 0°, 运动学涡度为 1。一般剪切为上述两者的组合, 变形面内两渐近线间的夹角介于 0°—90°之间。

应变极摩尔圆可对共轴变形和非共轴变形进行分析, 求取变形面内两流动渐近线间的夹角 α 和对应的运动学涡度(Simpson et al., 1993; Zhang et al., 1997)。极摩尔圆可依据下列 4 种方法之一来建立(张进江, 1995; 1997; Zhang et al. 1997):

(1) 根据平行剪切带剪切方向的长度比和初始垂直剪切边界的标志体的长度比与角剪切;

(2) 根据有限应变椭圆的轴比 R_s 及最大应变主轴与剪切带边界的夹角 θ;

(3) 根据平行剪切方向的长度比和最大应变方向的长度比及其与剪切带的夹角;

(4) 根据任意两方向的长度比及其间的夹角。

内蒙亚干变质核杂岩中, 平行剪切带的白云大理岩发育一组肿缩构造及香肠构造(图 1)。根据面积平衡原理, 设其最大厚度为原厚度, 求得长度比为 1.51。另见一初始与剪切



图 1 亚干变质核杂岩中平行剪切带发育一组肿缩构造及香肠构造(线应变= 1.51)

Fig. 1 A set of neck-and-swell and boudinage structures parallel to the shear boundary in the Yagan MCC

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http



图 2　亚干变质核杂岩中垂直剪切带的经剪切的长英质脉体(角剪切= 64°; 线应变= 1.60)

Fig. 2　A deformed felsic dike initially normal to the shear boundary in the Yagan MCC

带边界垂直的长英质脉, 经剪切拉薄并转向(图 2), 不仅表明了剪切指向, 而且提供了岩石应变的有用信息。岩脉的偏斜给出的平均角剪切为 64°。根据面积平衡原理并设岩脉最大厚度为原厚度, 求得的长度比为 1.60。用上述方法(1)编制的应变极摩尔圆(图 3)给出双曲线流动渐近线或流动脊间的夹角 α 为 30°, 对应的运动学涡度为 0.87, 预测的有限应变 X 轴与剪切带边界夹角为 13°。

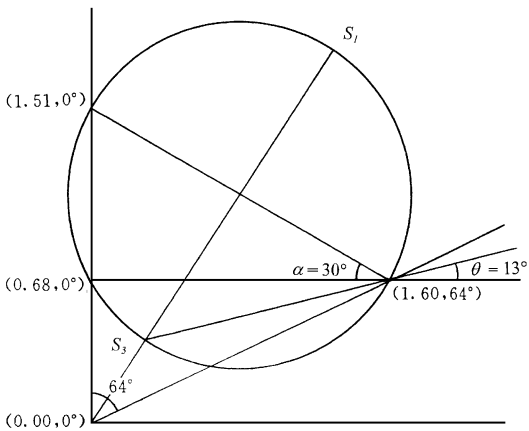


图 3　据图 1 和图 2 编制的应变极摩尔圆(α= 30°; W_k= 0.87; 预测 θ= 13°)

Fig. 3　The polar Mohr diagram derived from the data of Figs. 1 and 2

3　运动学涡度的张量分析法

变形面内两流动渐近线的夹角还可根据剪切带内的有限应变通过变形矩阵(Weijermars, 1998)求取。设三维直角坐标系 XY 轴于剪切面内, X 轴平行剪切方向, Z 轴垂直剪切面, Weijermars (1998)给出的平面变形张量为:

$$\begin{bmatrix} F_{11} & 0 & F_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & F_{33} \end{bmatrix} \qquad (2)$$

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http

其中, 变形张量元素 F_{11}和 F_{33}分别代表沿 X 和 Z 方向的长度比, F_{13}为变形的横向组分或有效剪应变。相应的剪切带边界法线变形后的取向和流线渐近线夹角分别为:

$$\beta = \mathrm{arctg}(F_{11}^{-1} F_{13}^{-1}) \quad (3)$$

式中, β为剪切带边界法线变形后的取向与剪切带边界间的夹角。

$$\alpha = \mathrm{arctg}\,[(F_{11}^2 - 1)\,\mathrm{tg}\beta] \quad (4)$$

式中, α为两流动渐近线的夹角。

内蒙亚干变质核杂岩中, 根据原平行与垂直剪切带的上述应变标志获得 F_{11}= 1.51, F_{13}= 1.45, F_{33}= 0.66, 给出的 β 和 α分别为 25°和 30°。相应的运动学涡度为 0.87, 与极摩尔圆法的结果一致。据该值预测的有限应变 X 轴与剪切带边界夹角为

$$\mathrm{tg}2\theta = (2F_{11}F_{31} - 2F_{13}F_{33}) / (F_{11}^2 + F_{13}^2 - F_{31}^2 - F_{33}^2)$$
$$= (-2F_{13}F_{33}) / (F_{11}^2 + F_{13}^2 - F_{33}^2)$$
$$\theta = -13°$$

预测相关剪切带内有限应变长轴 X 的取向相对剪切带边界逆钟向取 13°, 与上述极摩尔圆法预测值相等。

4 运动学涡度的应力取向分析法

对于双曲线流, 稳定或涡度与应变速率之比恒定时, 主应力轴 σ_1 与剪切带边界法线间的夹角 ξ 与变形面内两流动渐近线间的夹角 α间存在以下关系(Weijermars, 1991; 1998):

$$\xi = 45° - (\alpha/2)$$

或

$$\alpha = 2(45° - \xi) \quad (5)$$

减薄型纯剪切时, α= 90°, ξ= 0°; 简单剪切时, α= 0°, ξ= 45°。故一般剪切时的 ξ 介于 0°—45°之间。

作者最近根据韧性剪切带中伸展褶劈理共轭夹角的定量分析, 获得共轭角为 109°28′, 钝角面对主应力轴 σ_1(郑亚东, 待刊)。故可据剪切带中常见的同向伸展褶劈理或 C 产状, 取上述值之半(约 55°)确定主应力方向。

亚干变质核杂岩中, 19 处露头点(图 4) 测得同向伸展褶劈理与剪切带边界间的夹角为 13°—25°, 平均夹角 19°。据上述理论值得知主应力与剪切带边界法线夹角 ξ 为 19°。根据关系式(5) 获得 α 为 58°, 对应 W_k 为 0.53。

相关主应力轴的取向还可根据糜棱岩中石英条带的斜向面理和云母鱼与糜棱面理所构成的Ⅱ型 SC 组构来确定。一般认为, 石英条带的斜向面理平行于最后一期最大增量伸长, 相应的主应力轴 σ_1 应与之垂直(Simpson et al., 1993)。故可据石英条带的斜向面理或云母鱼的产状推断主应力方向。亚干变质核杂岩中的石英斜向面理(图 5) 和云母鱼(图 6) 与糜棱面理间的统计夹角为 29°和 25°。相应的主应力轴 σ_1 与剪切带边界法线夹角 ξ 为 29°和 25°。根据关系式(5) 获得的 α 为 32°和 40°, 对应的运动学涡度为 0.85 和 0.77。据石英斜向面理所获得的涡度大于上述据伸展褶劈理测得的。主应力取向法只与运动学涡度有关, 无法对有限应变主轴的取向进行独立的预测。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http

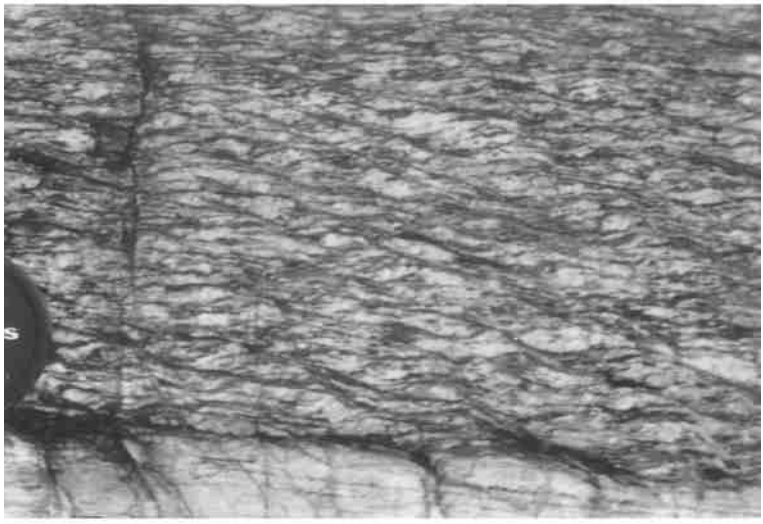


图 4　亚干变质核杂岩中的伸展褶劈理(ecc 或 C′)及 SC 组构 (C′C 夹角 = 19°; SC 平均夹角= 12°)

Fig. 4　The ecc or C′ and SC fabric in the Yagan MCC

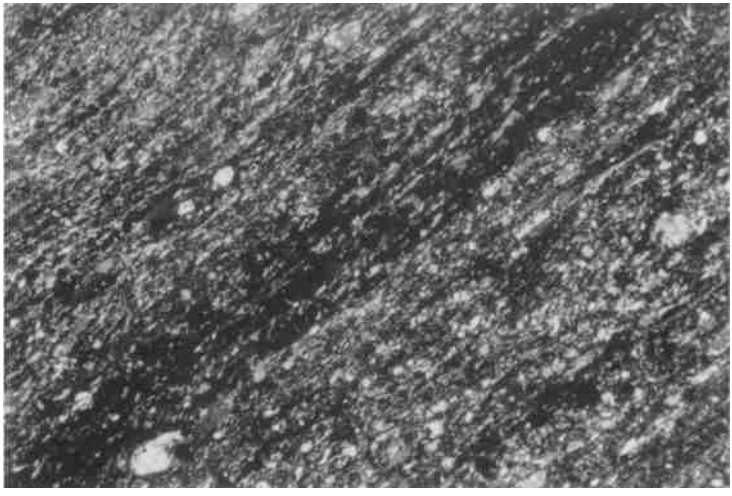


图 5　亚干变质核杂岩中石英条带的斜向面理

Fig. 5　Oblique foliation in quartz ribbons in the Yagan MCC

5　验证

根据上述涡度极摩尔圆分析法和涡度张量分析法求得的运动学涡度是否符合实际, 可通过所预测的有限应变 X 轴取向是否与独立的实际测定的 X 轴取向一致加以检验。亚干变质核杂岩中实测 $S \wedge C$ 夹角为 9°—16°,取平均值为 12°(图 4), 与张量分析法和极摩尔圆法结果极为相近。表明所测运动学涡度值与实际运动学涡度基本一致, 据剪切带发育

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http

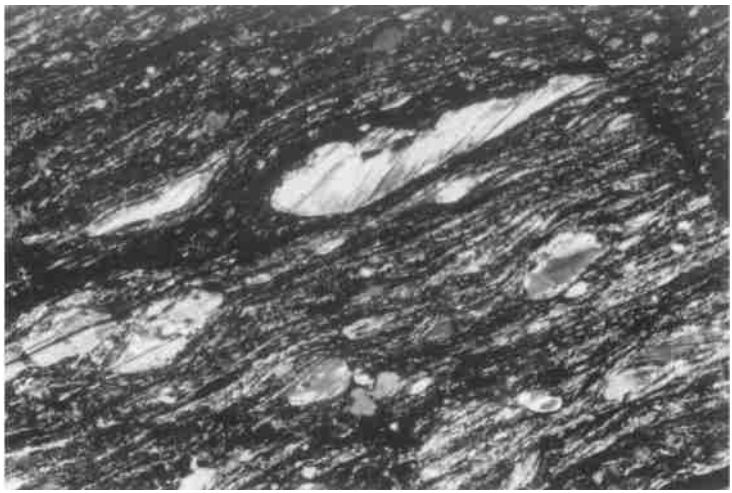


图 6 亚干变质核杂岩中的云母鱼

Fig. 6 A school of mica-fish in the Yagan MCC

晚期出现的伸展褶劈理取向确定的运动学涡度比剪切带形成期的涡度小, 但可用以确定晚期相关的运动学涡度。

6 讨论与结论

6.1 同向伸展褶劈理与运动学涡度的关系

Bobyachick (1986) 假定缩短性流脊可能与同向伸展褶劈理取向一致。如果这一假定正确, 则同向伸展褶劈理与剪切带边界的夹角可用以确定运动学涡度值。然而, 业已证明 (郑亚东, 待刊), 同向伸展褶劈理的取向与同期主应力取向有关, 与剪切带边界的夹角 γ 为

$$\begin{aligned}\gamma &= 90^\circ - 55^\circ - \xi \\ &= 35^\circ - \xi\end{aligned} \tag{6}$$

与两流脊线夹角 (公式(5)) 不等, 故同向伸展褶劈理不代表缩短流脊的取向。

Simpson 等(1993) 认为同向伸展褶劈理在应变值较低情况下大致等于两流脊间夹角之半(即 $\alpha = 45^\circ - \xi$), 然后随应变而递进旋转并入流面。这似乎近于实际, 但该值毕竟与公式(6) 不等。故同向伸展褶劈理也不等于两流脊间夹角之半。

6.2 为何据同向伸展褶劈理取向所获的运动学涡度值较小(0.53)

一般认为, 同向伸展褶劈理切割糜棱面理, 形成于剪切作用晚期。由于沿伸展褶劈理的滑动常演变为不连续面, 这一位移分解作用(Tikoff et al., 1994) 势必增大相关剪切作用中的纯剪切组分, 因之据以获得的运动学涡度值较小。

不难看出, 运动学涡度可根据剪切带内的构造、有限应变和增量应变求出。亚干变质核杂岩相关韧性剪切带的运动学涡度值为 0.53—0.87, 表明相关剪切作用类型为减薄型

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http

一般剪切。其中, 主期运动学涡度值为0.87, 以简单剪切为主, 晚期为0.53, 以纯剪为主。表明晚期的纯剪切组分增大, 很可能与因晚期脆性正断层引起的位移分解作用有关。同向伸展褶劈理的取向与剪切带边界的夹角既不等于两流脊间的夹角, 也不等于其值之半, 但可据以确定主应力方向, 从而确定两流脊间的夹角和对应的运动学涡度。

致谢 感谢许鉴儒为本文绘图。

参 考 文 献

张进江, 郑亚东. 1995. 运动学涡度、极摩尔圆及其在一般剪切带定量分析中的应用. 地质力学学 报, **1**(3): 55—64.

张进江, 郑亚东. 1997. 运动学涡度和极摩尔圆的基本原理与应用. 地质科技情报, **16**(3): 33—39.

郑亚东, 王玉芳. 1995. 内蒙亚干变质核杂岩剪切作用类型的初步分析. 地学前缘, **2**(2): 245—246.

郑亚东. 共轭伸展褶劈理夹角的定量解析. 地学前缘(待刊).

Bobyarchick A R. 1986. The eigenvalues of steady state flow in Mohr space. Tectonophysics, **122**: 35—51.

De Paor D G. 1983. Orthographic analysis of geologic structures —— Ⅰ. Deformation theory. J. Struct. Geol., **5**: 323—333.

McKenzie D P. 1978. Some remarks on the development of sedimentary basins. Earth Planet Sci. Lett., **40**: 25—32.

Reston T J. 1990. Shear in the lower crust during extension: not so pure and simple. Tectonophysics, **173**: 175—183.

Simpson C, De Paor D G. 1993. Strain and kinematic analysis in general shear zones. J. Struct. Geol., **15**(1): 1—20.

Tikoff B, Teyssier C. 1994. Strain modeling of displacement- field partitioning in transpressional orogens. J. Struct. Geol., **16**(11): 1575—1588.

Wernicke B. 1981. Low- angle normal faults in the Basin and Range province—— nappe tectonics in an extending orogen. Nature, **291**: 645—648.

Wernicke B. 1985. Uniform- sense normal simple shear of the continental lithosphere. Can. J. Earth Sci., **22**(1): 108—125.

Weijermars R. 1991. The role of stress in ductile deformation. J. Struct. Geol., **13**(9): 1061—1078.

Weijermars R. 1998. Taylor- mill analogues for patterns of flow and deformation in rocks. J. Struct. Geol., **20**(1): 77—92.

Zhang J, Zheng Y. 1997. Polar Mohr constructions for strain analysis in general shear zones. J. Struct. Geol., **19**(5): 745—748.

Zheng Y, Wang S, Wang Y. 1991. An enormous thrust nappe and extensional metamorphic core complex newly discovered in Sino- Mongolian boundary area. Science in China (Series B), **34**(9): 1145—1152.

Zheng Y, Zhang Q. 1994. The Yagan metamorphic core complex and extensional detachment fault in Inner Mongolia, China. Act Geologica Sinica, **7**(2): 125—135.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http

KINEMATIC VORTICITY NUMBER AND SHEAR TYPE RELATED TO THE YAGAN METAMORPHIC CORE COMPLEX ON SINO-MONGOLIAN BORDER

Zheng Yadong

(*Department of Geology, Peking University, Beijing* 100871)

Abstract

Kinematic analyses are made in the shear zone in the Yagan metamorphic core complex using techniques of the polar Mohr construction, the deformation tensor and the orientation of the major principal stress (σ_1). The kinematic vorticity numbers related to the shear zone range from 0.53—0.87. The contemporary kinematic vorticity number is 0.87 and the late one is 0.53. The difference shows the shear zone was thinned and changed from simple shear- dominated to pure shear- dominated shear zone during its progressive deformation and implies a more pure shear component involved in the late shear stage, which probably was related to displacement- field partitioning caused by displacements on the brittle normal faults. The angle between the synthetic ecc and the shear zone is neither the angle between the two flow apophyses nor half of it. The orientation of the major principal stress(σ_1) inferred from the synthetic ecc, however, may be used to calculate the angle between the two flow apophyses and the associated kinematic vorticity number.

Key Words Polar Mohr construction, Deformation tensor, Orientation of the major principal stress

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http