

http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx

# 富蕴地区阿尔泰造山带有限应变测量和应变恢复

张进江 郑亚东

北京大学地质学系, 100871

**内容提要** 本文采用褶皱等倾线法、砾石三维应变和 S-C 夹角等应变测量方法,对富蕴地区阿尔泰造山带一个 50 km 的剖面进行了系统的有限应变测算,得出其顺层缩短和剪应变剖面图。测量结果表明,该剖面褶皱压扁的顺层缩短量高达 78%,断层处的剪应变( $\gamma$ )最大可达 8 左右。三维应变分析和 Flinn 图解表明该区应变主要为平面应变,断层活动为简单剪切。利用分段积分和正态曲线恢复方法对剖面的缩短和剪切进行应变恢复,结果表明该剖面由原宽为 267.2 km 的原始剖面经缩短和剪切而形成。

**关键词** 阿尔泰造山带 应变测量 应变恢复

有限应变测量是现代构造地质研究的一种重要手段,它可以定量分析造山带的变形量、应变状态和

应变组分,更好地解释变形过程;应变恢复可在一定程度上重建造山变形前的地质状态。阿尔泰造山

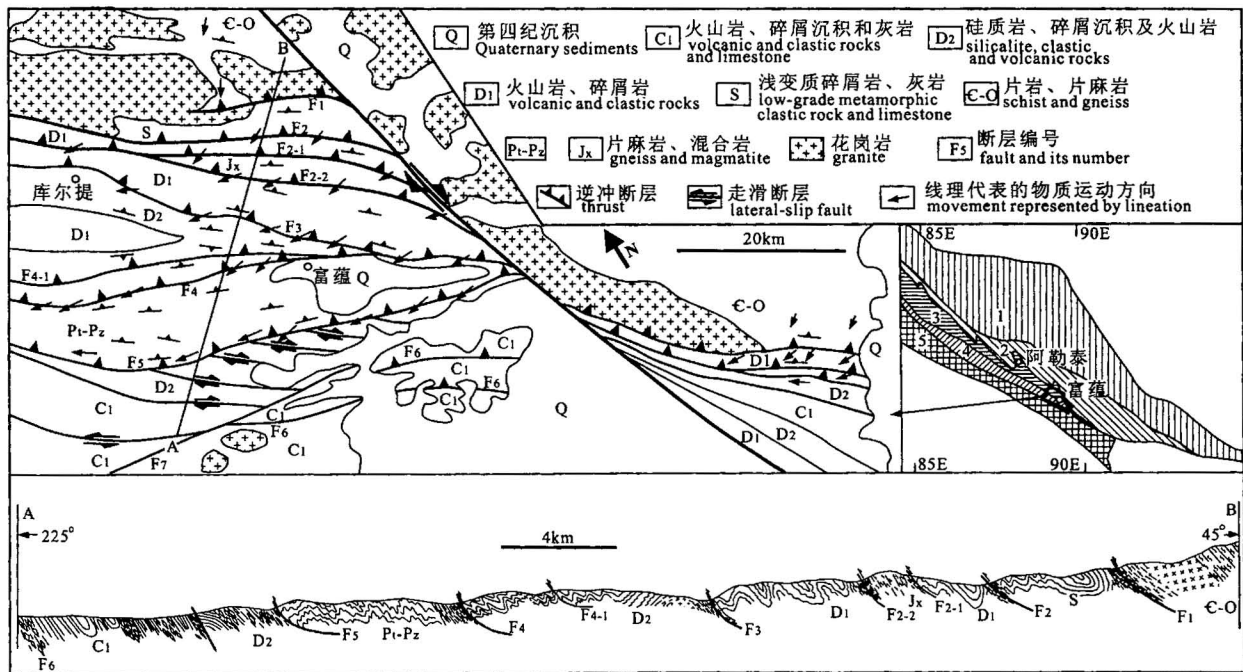


图 1 富蕴地区阿尔泰造山带构造地质图及剖面图(据张进江等,1993,修改)

Fig. 1 The structural geological map and section of Altay Orogen in Fuyun region (after Zhang et al., 1993)

1—北阿尔泰带;2—南阿尔泰带;3—琼库尔—阿巴官带;4—额尔齐斯带;5—布尔津—二台带

1—North Altay belt; 2—South Altay belt; 3—Qongkur—Abogo belt; 4—Ertix belt; 5—Burgin—Ertai belt

注:本文为国家自然科学基金项目(编号 40172074)、全国优秀博士学位论文作者专项资金项目(编号 200022)和国家“973”项目(编号 2001CB409804)资助成果。

收稿日期:2002-01-23;改回日期:2002-07-19;责任编辑:任希飞。

作者简介:张进江,男,1964年生。现为北京大学地质学系副教授,主要从事构造地质学、构造演化研究。通讯地址:100871,北京大学地质学系;Email:zhjj@pku.edu.cn。

带为天山—兴蒙山链的重要组成部分,主要为海西期大陆碰撞的变形产物(Qu et al., 1994; 曲国胜等, 1992; 庄育勋, 1994; 叶庆同等, 1998; 张进红等, 1999; 董永观, 1999; 王京彬等, 2000)。研究区位于阿尔泰造山带东段富蕴附近(图 1), 构造形态为一叠瓦状逆冲推覆体系, 逆冲断层的运动学表现为逆冲和水平左旋剪切的共同作用(张进江等, 1993), 水平运动分量沿造山带自 SE 向 NW 增大; 横向上水平分量自造山带腹地(NE)向前陆(SW)增大, 形成腹地逆冲、前陆走滑的运动方式(图 1)。本文采用多种方法对研究区的应变进行系统剖面测量, 以对造山带的应变量和应变状态进行较系统了解, 并通过应变恢复解释造山变形过程。

### 1 有限应变测量

根据研究区构造特征, 选用以下方法对岩石的线应变和剪切应变进行测量: ① 褶皱等倾线缩短量测量; ② 砾石三维应变测量缩短量测定; ③ S-C 夹角法测量剪切带的剪应变。

#### 1.1 褶皱等倾线缩短量

研究区阿尔泰造山带内所有岩层都经历了强烈的褶皱作用, 其发育与出露情况良好, 所以在研究区 F<sub>5</sub> 以北的地区基本采用褶皱等倾线法求取岩层缩短量。

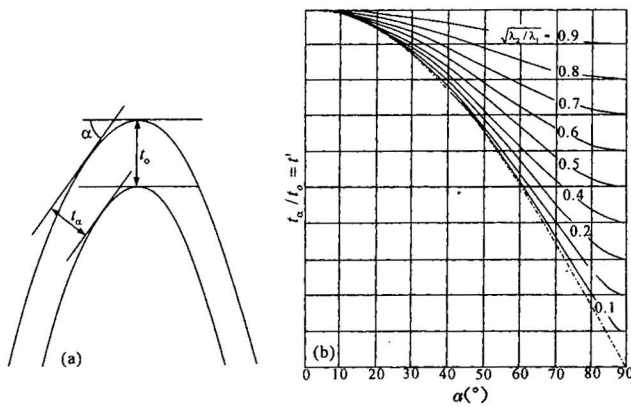


图 2 褶皱等倾线应变测量

Fig. 2 Strain measurement using dip-isogon method

#### 1.1.1 方法及测算

由 Ramsay (1967) 提出, 适于同心褶皱后持续压扁形成的各类褶皱。测算步骤如下:

- (1) 采样, 拍摄垂直于褶皱枢纽的照片或磨制垂直于枢纽的标本光面。
- (2) 用透明纸描出褶皱层的形态, 如无层间差

异即各层褶皱形态相同, 则只描一层即可, 如有差异则需将各层依次描出。

(3) 作枢纽处等倾线并量出其厚度( $t_0$ , 图 2a), 再作与枢纽等倾线呈  $\alpha$  角的等倾线, 量出其厚度( $t_a$ , 图 2a)。

(4) 计算  $t' = t_a/t_0$ , 以  $t'$  为纵坐标, 等倾线与枢纽等倾线夹角  $\alpha$  为横坐标, 建立图 2b 所示的  $t' - \lambda_2/\lambda_1$  表 ( $\lambda_1, \lambda_2$  分别为应变椭圆的长、短轴的平方长度比), 将各不同  $\alpha$  及其  $t'$  投于图中, 通过拟合曲线求出应变椭圆轴比  $\varphi = \sqrt{\lambda_2/\lambda_1}$  (图 2b), 或根据公式  $t' = (\lambda_2/\lambda_1)\sin^2\alpha + \cos^2\alpha$  直接计算  $\varphi$ 。

(5) 该方法计算的是构造压实后的透入性应变, 所以不考虑体应变, 同时该应变为平面应变(见下文), 二维上应无面积变化, 所以有  $1 = \sqrt{\lambda_1 \cdot \lambda_2}$ , 再将  $\varphi = \sqrt{\lambda_2/\lambda_1}$  代入, 得  $\varphi = \lambda_2$ , 所以岩层的透入性压扁量  $e' = 1 - \sqrt{\lambda_2} = 1 - \sqrt{\varphi}$ 。

(6) 上述压扁量为岩层经同心褶皱作用后的透入性压扁量, 所以岩层总缩短量应该加上同心褶皱的缩短量  $e'' = 0.36$ , 即总缩短量  $e = e' + e'' = 1 - \sqrt{\varphi} + 0.36$ 。

表 1 褶皱等倾线缩短量曲线控制点测量结果  
Table 1 Shortening magnitudes calculated by dip-isogon method

点号	差异层面积比	各层透入性压扁量 $e'_i$	总压扁量 $e'$	同心褶皱缩短量 $e''$	总缩短量 $e$
1			0.45	0.36	0.81
2			0.61	0.36	0.97
3	1/3	0.32	0.39	0.36	0.75
4	2/3	0.43			
	3/5	0.45	0.54	0.36	0.90
5	2/5	0.68	0.43	0.36	0.79
6	1/4	0.27	0.50	0.36	0.86
	3/4	0.58			
7			0.14	0.36	0.50
8			0.52	0.36	0.88
9			0.16	0.36	0.52
10	1/4	0.29	0.59	0.36	0.95
	3/4	0.68			
11			0.48	0.36	0.84
12			0.60	0.36	0.96
13			0.32	0.36	0.68
14			0.58	0.36	0.94

(7) 如存在层间差异, 则对每层进行(1)~(5)测算, 得出各层的压扁量  $e'_i$  ( $i$  为层的编号), 然后根

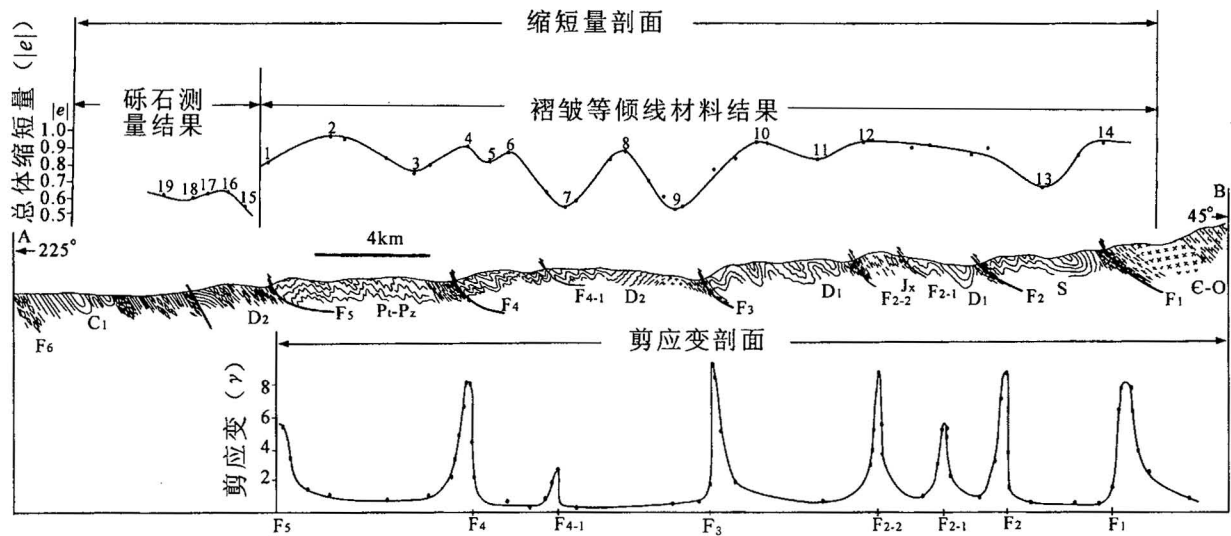


图 3 富蕴地区阿尔泰造山带 A-B 地质剖面的应变剖面图

(位置见图 1, 短缩量剖面中标有编号的点为表 1 中的控制点, 其他未编号的点未在表中列出)

Fig. 3 Strain sections along the A-B geological section of Altay Orogen in Fuyun

(See the location in Fig. 1. The dots with numbers are the controlling points listed in Table 1. The other dots aren't listed in the table)

据剖面上每层的面积比  $A_i$  求出平均压扁量  $e' = \sum_{i=1}^n (A_i \cdot e'_i)$ , 其中  $\sum_{i=1}^n A_i = 1$ 。最后计算  $e = e' + e''$ 。

(8) 以点位置为横坐标, 以短缩量为纵坐标, 投影得到短缩量曲线。

### 1.1.2 测量结果

对图 1 中 A-B 剖面  $F_5$  以北各逆冲岩席中的褶皱进行了系统测算, 共进行了 31 个点的测量, 其中 14 个控制点列于表 1, 投影所得短缩量曲线见图 3。测量点中一部分层间差异很小作为单层处理, 如硅质岩、均质片岩、片麻岩等; 一部分层间差异较大, 如发生变质分异的片岩、片麻岩以及硅质岩和泥质岩互层, 对此本文按两层处理。

### 1.2 砾石三维应变测量

研究区  $F_5$  以南为不变质或轻微变质沉积岩, 其内发育数层砾岩, 寻找砾岩层任意三个不平行截面, 测量其上长短轴比、长轴产状和截面产状, 利用三维应变恢复程序计算 (Shao et al., 1984), 即可得出轴比、长轴产状等应变椭球参数。同样不考虑体积应变, 则有  $1 = (\sqrt{\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3})^{1/3}$ , 同时考虑平面应变, 则可设  $\sqrt{\lambda_2} = 1$ , 透入性压扁量  $e' = 1 - \sqrt{\lambda_3}$ , 总体短缩量  $e = 1 - \sqrt{\lambda_3} + 0.36$ 。表 2 为 5 个测量结果, 其投影结果见图 3。

### 1.3 S-C 夹角测量剪应变

在  $F_5$  以北, 研究区岩石经受了强烈韧性剪切, 形成了发育广泛的 S-C 糜棱岩, 其内 S-C 夹角易于测量, 为本方法提供了有利条件。

在简单剪切下, S-C 糜棱岩中 S 面理代表应变椭球的 XY 面, C 面为剪切面, 两者夹角  $\varphi$  与剪应变  $\gamma$  的关系为  $\text{tg}2\varphi = -2/\gamma$  (Ramsay et al., 1983, 郑亚东等, 1985)。所以只要测量出  $\varphi$  即可计算出  $\gamma$ , 图 3 中剪应变剖面为总体测量结果。

表 3 和图 4 为  $F_4$  及  $F_{2-2}$  的具体测量结果, 它们

表 2 砾石三维应变测量结果

Table 2 Results of 3D strain measurement on pebbles

点号	$\lambda_1 : \lambda_2 : \lambda_3$	$\lambda_1$ 产状	短缩量
15	1.55 : 1 : 0.67	72°∠77°	0.54
16	1.90 : 1 : 0.52	70°∠75°	0.64
17	1.80 : 1 : 0.54	75°∠78°	0.63
18	1.85 : 1 : 0.57	73°∠77°	0.61
19	1.80 : 1 : 0.55	74°∠76°	0.62

表 3  $F_4$  和  $F_{2-2}$  剪应变测量结果

Table 3 Measurements of shear strain on fault  $F_4$  and  $F_{2-2}$

$F_4$						$F_{2-2}$	
点位	$\gamma$	点位	$\gamma$	点位	$\gamma$	点位	$\gamma$
1	0.97	6	2.10	11	8.04	1	2.8
2	1.15	7	2.75	12	4.49	2	5.0
3	1.67	8	3.46	13	2.06	3	8.5
4	1.75	9	5.49			4	5.4
5	2.07	10	8.02			5	2.67

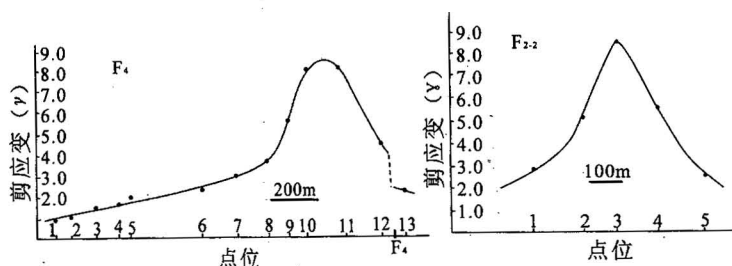


图4  $F_4$  及  $F_{2-2}$  的剪应变剖面曲线(位置见图1、3)

Fig. 4 The curves of shear strain measured on faults  $F_4$  and  $F_{2-2}$  (see Fig. 1 and 3 for the locations)

代表研究区剪切带两种不同的剪应变剖面曲线。一类是  $F_4$  为代表的不完整正态曲线,其北翼在  $\gamma \approx 4.5$  处发生一陡降而变为  $\gamma \approx 2$ ,这个位置正好是  $F_4$  后期脆性断层。所以这种不完整曲线可能代表后期脆性断层对早期韧性剪切带的破坏,本区主要断层剪切带多为这种曲线类型(图3)。另一类为基本完整的正态曲线( $F_{2-2}$ ),本区只有  $F_{2-1}$  和  $F_{2-2}$  为该曲线,它们可能只在深部活动,后期活动性不大。从测量结果可以看出本区主要断层均受到强烈剪切变形,剪应变  $\gamma$  最大值大于8,逆冲断层外的推覆席体内也经历了一定的剪应变,其  $\gamma$  一般小于1。

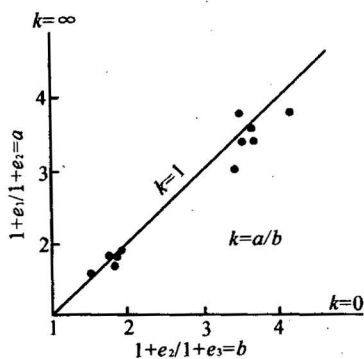


图5 Flinn 图解

Fig. 5 Flinn diagram

## 2 应变类型分析

为更好解释研究区应变状态,本文利用 Flinn (1962)图解对三维测量结果进行分析,确定其应变类型。除上文一些三维应变测量结果外,我们还在图1中 A-B 剖面以外的其他位置进行了一些三维应变测量计算,并求出了其  $a=(1+e_1)/(1+e_2)$ 、 $b=(1+e_2)/(1+e_3)$  以及  $k=a/b$  的值(表4),将其投到图5所示的 Flinn 图上。可以看出,  $k$  值在 1.1~0.76 之

间,说明本区应变基本为平面应变,但稍有压扁。正是如此,本文才能利用褶皱等倾线计算缩短量。另外,本区剪切带剪应变的分布为正态分布,这是简单剪切的结果。

表4 图1 A-B 剖面以外地区三维应变测量结果

Table 4 3D strain measurements on locations other than along section A-B of Fig. 1

序号	$a=(1+e_1)/(1+e_2)$	$b=(1+e_2)/(1+e_3)$	$k=a/b$
1	3.62	3.64	0.99
2	3.51	3.61	0.96
3	3.53	3.72	0.93
4	3.44	3.69	0.89
5	3.70	4.20	0.84
6	3.01	3.61	0.76

## 3 应变恢复

除应变状态与变形量分析外,应变测量还可用于变形地质体的应变恢复,研究其变形前状态和变形历史。本文采用积分法(Woodward et al., 1986),对研究区剖面  $F_5$  以北进行应变恢复。

### 3.1 长度恢复

应用分段积分法对每个逆冲席体进行应变恢复,即对其缩短量曲线进行积分求取原始长度。在图3中截取相邻两断层间的缩短量曲线段落(图6),对

其进行积分得该段总缩短量  $E = \int_A^B e dx$ ,则该段的缩短长度为  $\Delta L = L_{AB} \times E$  ( $A$ 、 $B$  为两断层的位置,  $L_{AB}$  为其间的距离),该段原长  $L_0 = L + \Delta L$  ( $L$  为该段现长,  $L_0$  为原长)。由于缩短量曲线多为非规则的,所以采用面积法代替,用求积仪求出以缩短量为单位的面积即为该段的  $E$  (图6)。还可用面积逼近法进行,即将曲线下面积分成若干小的矩形,使其高等于矩形宽度 ( $L_i$ ) 内的平均缩短量 ( $e_i$ ) (图6),再根据  $L_0$

$= \sum_{i=1}^n L_i / (1 - e_i)$ , 即可求出该段的原始长度。图 1 中  $F_5$  以北的长度恢复结果如表 5。

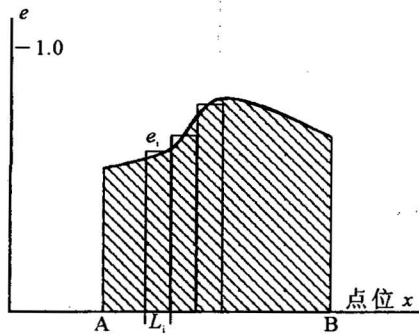


图 6 面积法及面积逼近法求缩短量  
Fig. 6 Shortening calculated with area and area-approaching methods

表 5 长度恢复结果

Table 5 The results of longitude reconstruction

段位	现长 $L$ (km)	原长 $L_0$ (km)
$F_5-F_4$	12	70.4
$F_4-F_{4-1}$	8.5	28.4
$F_{4-1}-F_3$	8	19.4
$F_3-F_{2-2}$	8	39.1
$F_{2-2}-F_{2-1}$	4	33.0
$F_{2-1}-F_2$	4	21.0
$F_2-F_1$	6	21.0
合计	50.9	232.3

### 3.2 剪应变恢复

由于研究区断层基本都经受了前期韧性和后期脆性剪切, 所以需进行分别恢复。

#### 3.2.1 韧性恢复

从图 3、4 中可以看出, 剪应变( $\gamma$ )曲线基本为被后期脆性断层破坏的正态曲线, 所以首先将曲线恢复成完整的正态曲线(图 7), 代表剪切带在深部时

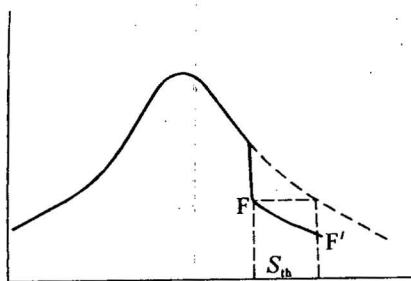


图 7 正态曲线恢复

Fig. 7 Reconstruction of normal distribution curve

的韧性剪切。采用积分法、面积法或面积逼近法求取恢复后剪应变曲线的总体剪切运动量  $S_t$ , 根据线理产状对  $S_t$  分解即可得到顺层走滑滑距  $S_p$ 、正向推覆距离  $S_{th}$  和垂向抬升幅度  $S_v$ (图 8), 其间数学关系为  $S_p = S_t \cos \alpha \cdot \cos \varphi$ ,  $S_{th} = S_t \cos \alpha \cdot \sin \varphi$ ,  $S_v = S_t \sin \alpha$ ,  $\alpha$ 、 $\varphi$  分别为线理倾角及其倾向与断层走向的夹角,  $S_{th}$  为韧性逆冲剪切造成的缩短缩短量。

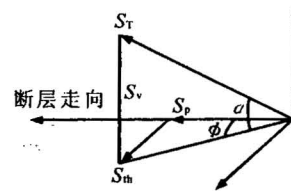


图 8 剪切运动量的分解

Fig. 8 The decomposition of the shearing movement

#### 3.2.2 脆性恢复

上述应变恢复均为塑性应变恢复, 而在绝大多数断层发育处均经历了脆性断层的破坏, 所以为求取研究区的总缩短量, 需对脆性断层位移导致的缩短进行恢复。在受脆性断层破坏的剪切带处剪应变曲线为不完整的正态曲线, 在将其恢复为完整正态曲线时, 需将被断层影响的曲线段落(如图 7 中的  $F-F'$ ) 平移一定距离( $S_{th}$ ), 该距离可以被视为脆性断层沿剖面方向的逆冲距离, 即断层造成的缩短量, 再根据  $S_t$ 、 $S_p$ 、 $S_v$  及  $S_{th}$  的空间关系可求取其他运动量。

表 6 为对研究区主要断层的剪应变恢复结果, 可见所有断层的运动量总和高达 86.7 km, 逆冲造成的缩短量近 35 km。

表 6 断层的剪应变恢复结果

Table 6 The shear strain reconstruction on the faults

断层	$\alpha$ ( $^\circ$ )	$\varphi$ ( $^\circ$ )	韧性恢复(km)				脆性恢复(km)				总和(km)			
			$S_t$	$S_p$	$S_{th}$	$S_v$	$S_t$	$S_p$	$S_{th}$	$S_v$	$S_t$	$S_p$	$S_{th}$	$S_v$
$F_1$	70	90	20.0	6.8	18.8	2.9	1.0	2.8	22.9	7.8	21.5			
$F_2$	30	40	14.49	5.1	11.4	7.2	1.8	1.2	1.0	0.9	16.2	2.1	12.4	8.9
$F_{2-1}$	30	35	4.8	3.4	2.4	2.4					4.8	3.4	2.4	2.4
$F_{2-2}$	25	32	4.0	3.4	1.9	1.7					4.0	3.4	1.9	1.7
$F_3$	20	28	9.0	7.5	4.0	3.1	4.5	3.8	2.0	1.6	13.5	11.2	6.0	4.6
$F_{4-1}$	12	20	1.1	1.0	0.4	0.2	1.2	1.1	0.4	0.3	1.3	2.1	0.8	0.5
$F_4$	10	10	6.4	2.2	1.4	1.1	2.1	1.9	0.7	0.4	8.5	4.0	2.1	1.5
$F_5$	2	10	4.0	3.0	0.4	0.1	11.5	11.4	1.0	0.4	15.5	15.4	1.4	0.5
总和											86.7	74.1	23.4	84.6

## 4 总结

综合表 5 和表 6 数据, 造山过程中, 在研究区

F<sub>5</sub>以北 50 km 的剖面上,推覆席体内部褶皱作用造成的压扁率高达 78%,并造成了 181.4 km 的缩短量,而断层作用的剪应变最大可达 8 以上,其正向推覆使剖面内的岩石单元缩短了 34.8 km,所以总体缩短量为 216.2 km,即现宽为 50 km 的剖面是由原宽 267.2 km 的岩石单元经褶皱和断层作用形成的。所以该地区经受了极大的缩短变形,为强烈的挤压构造变形区。从应变分布上可以看出,缩短量呈现由南向北增大的趋势,说明变形由腹地向前陆的变形扩展。

### 参 考 文 献

- 董永观. 1999. 新疆阿尔泰山地区金矿床矿物组合、成分特征及其控制因素分析. 地质论评, 45(6): 596~602.
- 曲国胜, 何国琦. 1992. 阿尔泰山带的构造运动. 地质学报, 66(3): 193~205.
- 王京彬, 张进红, 丁汝福, 方同辉. 2000. 中国阿尔泰山带构造—成矿系统. 地质学报(英文版), 74(3): 485~491.
- 叶庆同, 傅旭杰, 王保良. 1998. 新疆阿尔泰山南缘多金属成矿带的成矿规律. 地质学报, 72(4): 349~357.
- 庄育勋. 1994. 中国阿尔泰山带变质作用 PTSt 演化和热—构造—片麻岩穹窿形成机制. 地质学报, 68(1): 35~47.
- 张进红, 王京彬, 丁汝福. 1999. 阿尔泰山地区海相火山岩及其与成矿作用的关系. 地质论评, 45(增刊): 1116~1125.
- 张进红, 郑亚东. 1993. 阿尔泰山带的逆冲—走滑构造模式. 北京大学学报(自然科学版), 29: 745~753.
- 郑亚东, 常志忠. 1985. 岩石有限应变测量及韧性剪切带. 北京: 地质出版社.

### References

- Flinn D. 1962. On folding during three dimensional progressive deformation. Q. J. Geol. Soc. Lond., 135: 291~305.
- Qu Q, Zhang J. 1994. Oblique thrust systems in the Altay orogen, China. J. Southeast Asian Earth Sciences, 9: 277~287.
- Ramsay J G, Huber M I. 1983. The techniques of modern structural geology. Volume 1: Strain analysis. Academic Press.
- Shao J, Wang C. 1984. Determination of strain ellipsoid according to two-dimensional data on three or more intersection planes. J. Math. Geol., 16: 823~833.
- Woodward N B, Grag D R, Spears D. 1986. Including strain data in balanced cross-sections. J. Struct. Geol., 8: 313~324.
- Zhang Jinjiang, Zheng Yadong. 1993. A thrust-wrench model for the Altay orogenic belt. Acta Scientiarum Naturalium, Universitatis Pekinensis, 29: 746~753 (in Chinese).
- Zheng Yadong, Chang Zhizhong. 1985. Rock finite strain measurement and ductile shear zone. Beijing: Geological Press (in Chinese).

## Finite Strain Measurement and Strain Reconstruction of the Altay Orogen in Fuyun

ZHANG Jinjiang, ZHENG Yadong

Department of Geology, Peking University, Beijing, 100871

### Abstract

In the study a systematic finite strain measurement was made on a 50 km-wide section across the Altay orogen in the Fuyun region, with methods such as the dip-isogon of folds, three-dimensional strain of pebbles and S-C angle. Longitude and shear strain sections are constructed by these measurements. The results show that the shortening caused by the flattening of folds is up to 78% and the largest shear strain in faults is over 8. The three-dimensional strain and Flinn diagram analyses show that this area has experienced plane strain, and the faults have undergone simple shearing. Strain reconstruction for the shortening and shear deformation was accomplished with integration and reconstruction of normal distribution curves. It shows that the present 50 km-wide section was formed from a section with an original width of 266.2 km by shortening and shearing.

**Key words:** Altay orogen; strain measurement; strain reconstruction