

非等轴颗粒付林图解

徐兴旺 马天林 孙立倩 尚 玲

(中国地质科学院地质力学研究所)

摘要 非等轴颗粒付林图解由直线 $a=1$ $b=1$ $a=b$ 和曲线 $a^2b=1$ $ab^2=1$ 分割成 10 个微区,并对应于不同的 e_x, e_y, e 组合和应变类型。这些直线和曲线分别对应于特殊的 e_x, e_y, e 组合和岩石应变类型。岩石的应变类型有 18 种。函数 a, b 的表征方程有 4 种类型,并分别表征直线 $a = \frac{1}{k_1}$ 和 $b = \frac{1}{k_2}$ 所分割的 4 个区间。 a, b 表征方程的确定取决于岩石总的变形行为。此图解可用于非等轴颗粒标志体应变测量和应变类型的确定和图示,文章给出了应用实例

关键词 非等轴颗粒 付林图解

0 引言

付林图解是用付林参数 K 表示不同类型应变的图解,因其直观明了而被广泛应用,但该图解只适用等轴标志体变形的应变图示,只适用于 $e_x > e_y > e_z$ 的应变类型。但是,碎屑岩碎屑颗粒原始形状并非都是等轴的,岩石变形并非都是 $e_x > e_y > e_z$,因此,原付林图解具有明显的局限性。Ramsay (1965), Lisle (1979), Siddans (1990), Hutton (1979) 和 Holst (1982) 等许多构造地质学家也都注意到原始形状对碎屑颗粒变形及应变测量结果的影响。新疆觉罗塔格韧性挤压带大量圆杆状变形砾石的产出,说明自然界存在 $e_x < e_y < 0$ 的收缩应变。因此,有必要讨论非等轴颗粒的付林图解及对应的岩石应变类型

1 非等轴颗粒付林图解的应变组合分区及应变类型

这里对非等轴颗粒及其变形行为作如下假设:

① 未变形颗粒的原始形状为非等轴的椭球体,平均轴比为 $K_1 K_2 K_3$ ($K_1 > 1, K_2 > 1$),对于轴直径为 X_0, Y_0, Z_0 的颗粒,有 $X_0 : Y_0 : Z_0 = K_1 K_2 : K_2 : 1$

② e_x, e_y, e 分别为原始椭球体长轴 (X_0)、中间轴 (Y_0) 和短轴 (Z_0) 所对应的应变变量;

③ 变形前后颗粒的体积不变;

④ 取 $a = \frac{1+e_x}{1+e_y}, b = \frac{1+e_y}{1+e}$, 并以其为图解的纵横坐标轴

根据体积不变的假设有 $(1 + \epsilon_x)(1 + \epsilon_y)(1 + \epsilon_z) = 1$

$$\therefore a = \frac{1 + \epsilon_x}{1 + \epsilon_y}, b = \frac{1 + \epsilon_y}{1 + \epsilon_z}, (a > 0, b > 0)$$

$$1 + \epsilon_x = a(1 + \epsilon_y) = ab(1 + \epsilon_z) \quad 1 + \epsilon_y = b(1 + \epsilon_z)$$

$$\therefore (1 + \epsilon_z)^3 ab^2 = 1$$

$$\therefore 1 + \epsilon_x = \sqrt[3]{\frac{1}{ab^2}}, \quad 1 + \epsilon_y = \sqrt[3]{\frac{b}{a}}, \quad 1 + \epsilon_z = \sqrt[3]{\frac{1}{a^2b}}$$

$$\text{即 } \epsilon_x = \sqrt[3]{\frac{1}{a^2b}} - 1 \tag{1}$$

$$\epsilon_y = \sqrt[3]{\frac{b}{a}} - 1 \tag{2}$$

$$\epsilon_z = \sqrt[3]{\frac{1}{ab^2}} - 1 \tag{3}$$

可见, $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ 均为 a, b 的函数, 其值随 a, b 值的变化而变化。对于某一确定的 a, b 值, 就有对应的 $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ 值, 从而可根据 a, b 值的分区特征来讨论 $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ 的组合特征及分区。

大家知道, 对于同一变形机制下形成的变形岩石, 应变值可以不同, 但都有相同的应变性质。在同一类型的应变组合, $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ 都有相对稳定的性质。在非等轴颗粒付林图解中, 影响 $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ 组合的分割性方程有直线 $a = b, a = 1, b = 1$ 及曲线 $ab^2 = 1, a^2b = 1$, 它们将图解分割成为 10 个微区 (不包括无应变点) (图 1)。这些作为分割线的直线和曲线分别对应于一种特殊的 $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ 组合, 10 个微区 $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ 组合特征也不相同。

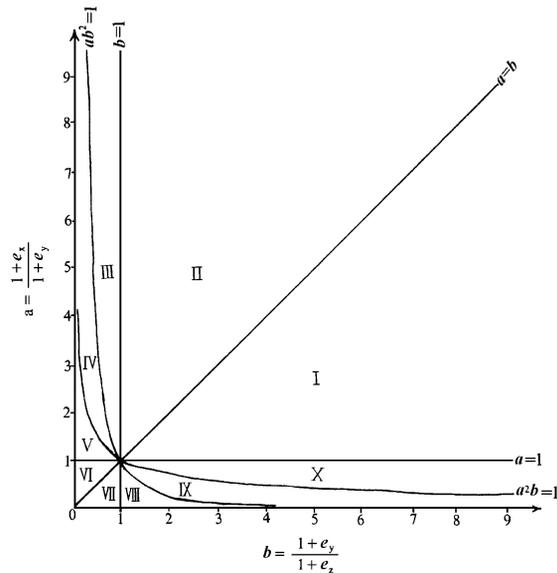


图 1 非等轴颗粒付林图解应变组合分区图
Fig. 1 Microdomain map of strain combination in the Flinn diagram of anisometric grains

它们都有可能对应于变形椭球体的长轴 (X)、中间轴 (Y) 和短轴 (Z)。而函数 a, b 表

对于等轴颗粒压扁应变, 平面应变和收缩应变分别代表 2 个应变轴的应变为拉伸应变的应变类型, 一个应变轴的应变量为零的应变类型, 和 2 个应变轴的应变为收缩应变的应变类型, 它们是岩石最基本的 3 种应变类型。按此概念, 非等轴颗粒付林图解有 18 种应变组合 (不包括无应变点), 分别对应于 18 种应变类型 (表 1 2)。

2 非等轴颗粒付林图解坐标函数的表征方程

因 $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ 分别为原始椭球体长轴 (X_0)、中间轴 (Y_0) 和短轴 (Z_0) 变形后所获得的应变变量, 则有:

$$a = \frac{1 + \epsilon_x}{1 + \epsilon_y} = \frac{Y_0}{X_0} \cdot \frac{X'}{Y'} = \frac{1}{K_1} \cdot \frac{X'}{Y'}$$

$$b = \frac{1 + \epsilon_y}{1 + \epsilon_z} = \frac{Z_0}{Y_0} \cdot \frac{Y'}{Z'} = \frac{1}{K_2} \cdot \frac{Y'}{Z'}$$

这里 X', Y', Z' 为变形后 X_0, Y_0, Z_0 所对

征方程的确定取决于 e_x, e_y, e_z 的组合特征,有 A B C D 4 种类型,并对应于直线 $a = \frac{1}{K_1}$ 与 $b = \frac{1}{K_2}$ 所分割的图解的 4 个微区 A B C D (图 2)。直线 $a = \frac{1}{K_1}$ 与 $b = \frac{1}{K_2}$ 分别代表变形颗粒的 $X = Y$ 和 $Y = Z$ 两种特殊变形结果,分别代表变形颗粒形状为等径的“雪茄状”体和“饼状”体

A 区间 a, b 值的取值范围为 $a > \frac{1}{K_1}, b > \frac{1}{K_2}$, 表征方程为 $a = \frac{1}{K_1} \frac{X}{Y}, b = \frac{1}{K_2} \frac{Y}{Z}$ 颗粒的变形特征是变形前的长轴、中间轴、短轴,变形后仍为长轴、中间轴和短轴。这在地质上有两种变形机制可造就这种结果。一种是在递进变形过程中,颗粒在旋转的基础上拉伸,旋转的结果是使最大扁平面 (X_0, Y_0) 平行于主应变面 (λ_1, λ_2), 长轴 (X_0) 平行于拉伸方向并有最大的拉伸应变,而短轴 (Z_0) 平行于最小应变轴并有较大的收缩应变。这种机制是碎屑岩中碎屑颗粒的主要变形机制。另一种情况是变形颗粒有限应变量的加入不足以改变颗粒长短轴的序次,变形结果使非等轴的颗粒变为近等轴颗粒。

B C D 区间,颗粒的变形特征与 A 区的第一种情况相似,所不同的是 a, b 值表征方程不同,主要收缩轴或拉伸轴不同。在 B 区间,最大压扁收缩的是原中间轴 (Y_0),而不是原最小轴 (Z_0);在 C 区间,收缩压扁轴是原最长轴 (X_0);在 D 区间,原中间轴 (Y_0) 方向拉伸应变最大。它们代表一种特殊的构造环境。在颗粒椭球体不易旋转情况下的变形可产生这种应变组合,例如,花岗岩中基性岩的捕虏体,在韧性变形过程中,可沿平行剪切带的方向拉伸,并形成条带状岩石 (Simpson, 1983)。

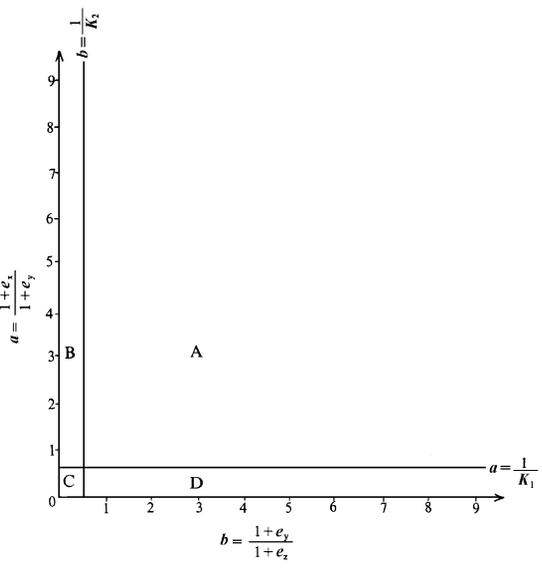


图 2 付林图解坐标函数 a, b 表征方程分区图

Fig. 2 Microdomain map of expressing equation in the Flinn diagram of anisometric grains

$$A(a = \frac{1}{K_1} \frac{X}{Y}, b = \frac{1}{K_2} \frac{Y}{Z}); \quad B(a = \frac{1}{K_1} \frac{X}{Z}, b = \frac{1}{K_2} \frac{Z}{Y});$$

$$C(a = \frac{1}{K_1} \frac{Z}{Y}, b = \frac{1}{K_2} \frac{Y}{X}); \quad D(a = \frac{1}{K_1} \frac{Y}{X}, b = \frac{1}{K_2} \frac{X}{Z})$$

它们代表一种特殊的构造环境。在颗粒椭球体不易旋转情况下的变形可产生这种应变组合,例如,花岗岩中基性岩的捕虏体,在韧性变形过程中,可沿平行剪切带的方向拉伸,并形成条带状岩石 (Simpson, 1983)。

表 1 重要的点线方程及对应的应变组合和应变类型

Table 1 The important equation strain, combinations and strain types

点、线方程	a, b 值	e_x, e_y, e_z 组合特征	应变类型	
$a = b = 1$		$e_x = e_y = e_z = 0$	无应变点	
$a = b$	$a = b > 1$	$e_y = 0$	$e_x > 0, e_z > 0$	$e_x > e_y > e_z$ 的平面应变
	$a = b < 1$		$e_z > 0, e_x < 0$	$e_z > e_y > e_x$ 的平面应变
$ab^2 = 1$	$a > 1 > b$	$e_z = 0$	$e_x > 0, e_y < 0$	$e_x > e_z > e_y$ 的平面应变
	$b > 1 > a$		$e_y > 0, e_x < 0$	$e_y > e_z > e_x$ 的平面应变
$a^2b = 1$	$a > 1 > b$	$e_x = 0$	$e_z > 0, e_y < 0$	$e_z > e_x > e_y$ 的平面应变
	$b > 1 > a$		$e_y > 0, e_z < 0$	$e_y > e_x > e_z$ 的平面应变
$a = 1$		$e_x = e_y > 0, e_z < 0$	$e_x = e_y$ 的压扁应变	
$b = 1$		$e_x > 0, e_y = e_z < 0$	$e_y = e_z$ 的收缩应变	

表 2 不同微区的应变组合及应变类型

Table 2 Strain combinations and strain types of different microdomain

微区	e_x, e_y, e_z 组合特征	应变类型
I	$e_x > e_y > 0, e_z < 0$	$e_x > e_y$ 的压扁应变
II	$e_x > 0, e_z < e_y < 0$	$e_y > e_z$ 的收缩应变
III	$e_x > 0, e_y < e_z < 0$	$e_z > e_y$ 的强收缩应变
IV	$e_x > 0, e_z > 0, e_y < 0$	$e_y < 0$ 的压扁应变
V	$e_z > 0, e_y < e_x < 0$	$e_x > e_y$ 的收缩应变
VI	$e_z > 0, e_x < e_y < 0$	$e_y > e_x$ 的收缩应变
VII	$e_x < 0, e_z > e_y > 0$	$e_z > e_y$ 的压扁应变
VIII	$e_x < 0, e_y > e_z > 0$	$e_y > e_z$ 的压扁应变
IX	$e_x < 0, e_y > 0, e_z < 0$	$e_y > 0$ 的收缩应变
X	$e_y > e_x > 0, e_z < 0$	$e_y > e_x$ 的压扁应变

当 $X_0 : Y_0 : Z_0 = 1 : 1 : 1$, 即为等轴球体时, $a = \frac{1+e_1}{1+e_2} = \frac{X'}{Y'}$, $b = \frac{1+e_2}{1+e_3} = \frac{Y'}{Z'}$, a, b 的表征方程取决于 e_x, e_y, e_z 的定义, 若它们分别对应于变形后的长轴 (X)、中间轴 (Y) 和短轴 (Z), 则 $a = \frac{X}{Y}$, $b = \frac{Y}{Z}$, $a > 1, b > 1$, 并回到原付林图解

3 非等轴颗粒的付林图解

综合上述两个方面的理论推导, 非等轴颗粒的付林图解为一些重要的直线和曲线所分割, 直线 $a = b$, $a = 1$, $b = 1$, 曲线 $ab^2 = 1$, $a^2b = 1$ 将付林图解分割为应变组合特征不同的 10 个微区。这些直线和曲线也对应于一种特殊的应变组合, 共有 18 种应变类型, 进而考虑直线 $a = \frac{1}{K_1}$ 与 $b = \frac{1}{K_2}$ 的影响, 得到的付林图解如图 3 所示

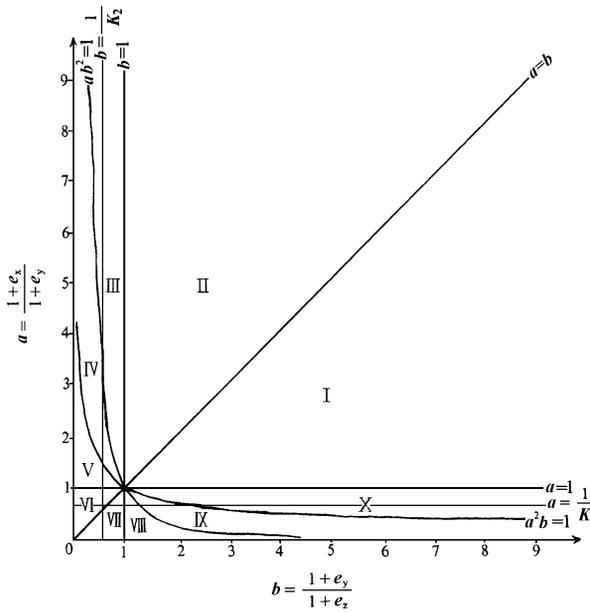


图 3 非等轴颗粒的付林图解

Fig. 3 The Flinn diagram of anisometric grains

此图解较全面地反映了非等轴颗粒及其岩石的应变类型。在应用时, 需要先确定非等轴颗粒的原始轴比及 a, b 的表征方程。颗粒的原始轴化, 可以通过弱变形带中同类岩石颗粒的统计求得, 或参考前人所提供的一些经验模型。 a, b 表征方程的确定, 取决于岩石总的变形机制和变形行为。对于大量碎屑岩中的碎屑颗粒, 在韧性变形过程中将发生偏转, 最大扁平面趋于平行主应变面, 颗粒长轴平行于拉伸方向并获得最大的拉伸应变变量, 即 $a = \frac{1}{K_1} \frac{X}{Y}$, $b = \frac{1}{K_2} \frac{Y}{Z}$ 。对于特殊的构造变形行为要特殊对待, 例如, 花岗岩体中基性岩捕虏体, 由于环境的限制, 在变形过程中不易发生旋转而被迫沿某一方向拉伸或收缩, 可以通过统计未变形捕虏体的长轴与变形带之间方

位上的关系,初步确定 e_x, e_y, e_z 的组合特征,结合变形前后基性岩角砾的轴比特征来确定 a, b 值的表征方程,投点求解

4 变形砾石单体和变形砾岩应变类型的确定和应变量的估算

变形砾石因分布较普遍并可直接进行 3 轴长度测量而被广泛用于应变测量 (Siddans,

1980; Lisle, 1979; Miller and Oertel, 1979; Wheeler, 1986; Kanagawa, 1990), 但因其原始形状并不都是等轴的, 这给变形砾石应变类型的确定和应变量的估算带来一定的困难, 从而限制了利用变形砾石广泛地作应变测量

如前所述, 变形砾石在韧性递进变形过程, 将在旋转的基础上发生拉伸, 旋转的结果是: 砾石最大扁平面 ($X_0 Y_0$ 面) 平行于主应变面 ($\lambda_1 \lambda_2$), 长轴 (X_0) 平行于拉伸方向并有最大拉伸应变; 而短轴 (Z_0) 平行于最小应变轴并有较大的收缩应变。砾石变形的最终结果是变形前的长轴、中间轴、短轴, 变形后仍为长轴、中间轴和短轴。变形砾石应变测量的结果投点都将位于 A 区, 坐标函数 a, b 的表征方程为 $a = \frac{1}{K_1} \frac{X}{Y}, b = \frac{1}{K_2} \frac{Y}{Z}$ 因此, 只要确定变形砾石的原始轴比参数 K_1, K_2 , 就可根据变形砾石单体测量所获得的 3 轴长度来计算 a, b 值, 进而在非等轴颗粒付林图解中投点, 确定变形砾石和变形砾岩的应变类型、及变形砾岩的平均应变类型和平均应变。

新疆觉罗塔格韧性挤压带中砾岩变形强烈, 变形砾石定向排列, 砾石长轴平行于岩石中由矿物定向排列而显现的拉伸线理, 砾石扁平面平行于岩石中的片理面。韧性挤压带外侧弱变形或无韧性变形的砾岩中砾石随机分布, 未变形砾石的平均椭球形状为 2: 1.5: 1, 砾石断面轴比平均值从 1.4 到 2.1 不等 (参考 Holst (1982), Risle (1979) 和 Siddans (1980) 的研究成果, 可以假设本地区砾石的原始平均形状轴比为 2: 1.5: 1 表 3 为黄山地区韧性挤压带中强带 P22-6 点变形砾石 3 轴测量结果及对应的 a, b 值, 图 4 为这些变形砾石的 a, b 值在非等轴颗粒付林图解中的投

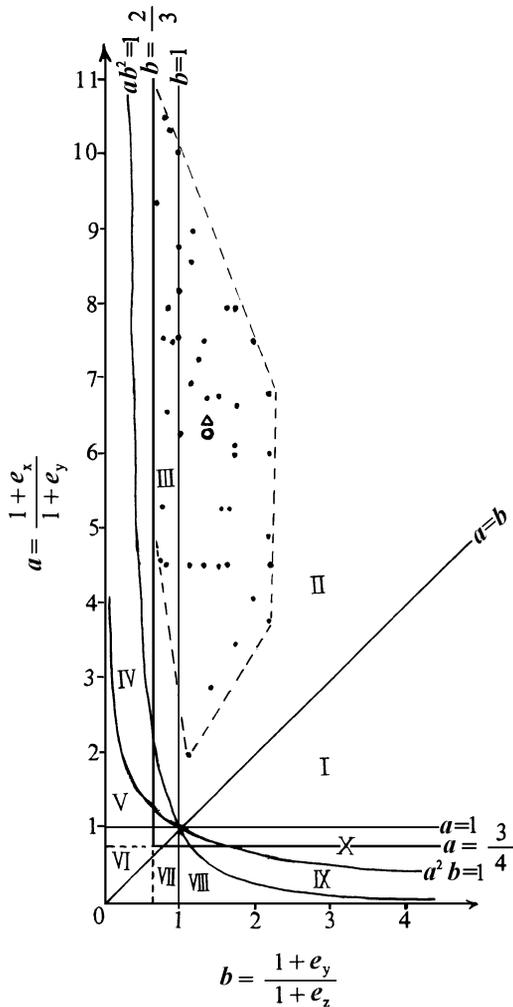


图 4 新疆黄山 P2-6 点变形砾石非等轴颗粒付林图解

Fig. 4 Plot of deformed pebbles in the Flinn diagram of anisometric grains in Huangshan area, Xinjiang

(实心点为 a, b 值的投点, 空心圆为几何中心法确定的平均应变椭球体的投点, 三角为算术平均法确定的平均应变椭球体的投点)

点。从图中可以看出,投点分布呈长五边形且最大延伸方向平行于 a 轴方向,投点位于图解的 II 区和 III 区及直线 $b=1$ 附近。即砾石的应变总体表现为收缩应变,并有 $0 > e_v > e$ 的收缩应变, $0 > e_v = e$ 的收缩应变和 $0 > e_v > e_v$ 的收缩应变 3 种应变类型。

表 3 新疆黄山 P₂₂₋₆ 点 3 轴测量结果及 a b 值

Table 3 Triaxial measurement results and a , b values of deformed pebbles in P₂₂₋₆ site in Huangshan area, Xingjiang

序号	x^*	y^*	z^*	a^{**}	b^{***}	序号	x^*	y^*	z^*	a^{**}	b^{***}
1	8.5	1.4	1.2	4.55	0.78	22	6.0	0.6	0.4	7.5	1.0
2	7	0.8	0.6	6.56	0.89	23	6.0	1.0	0.8	4.5	0.83
3	8.5	0.8	0.3	7.97	1.78	24	6.0	2.5	1.5	1.8	1.11
4	7	0.7	0.5	7.5	0.93	25	7.0	1.0	0.6	4.5	1.11
5	6.5	0.6	0.4	8.13	1.0	26	6.5	0.8	0.3	6.09	1.78
6	6.5	1.7	0.4	2.87	1.43	27	8.0	1.0	0.4	6.0	1.67
7	5.0	1.0	0.3	3.75	2.22	28	9.0	1.0	0.5	6.75	1.33
8	7.0	1.2	1.0	5.25	0.8	29	14.5	1.5	0.8	7.25	1.25
9	7.5	1.2	0.5	5.25	1.6	30	6.5	0.7	0.4	6.96	1.17
10	6.0	1.0	0.4	4.5	1.67	31	7.0	0.8	0.3	6.56	1.77
11	6.0	0.6	0.5	7.5	0.8	32	6.5	1.2	0.4	4.06	2.0
12	5.0	0.4	0.4	9.38	0.67	33	5.0	0.6	0.4	6.25	1.0
13	5.3	0.5	0.2	7.95	1.67	34	7.0	0.5	0.4	10.5	0.83
14	6.0	1.3	0.5	3.46	1.73	35	6.5	1.0	0.3	4.88	2.22
15	8.0	0.7	0.4	8.57	1.17	36	12	1.0	0.6	9.0	1.11
16	8.0	1.0	0.3	6.0	2.22	37	11	0.8	0.6	10.31	0.89
17	6.0	1.0	0.3	4.5	2.22	38	8.5	0.8	0.6	7.91	0.89
18	7.0	1.0	0.4	5.25	1.67	39	15	1.5	0.5	7.5	2.0
19	8.0	0.6	0.4	10	1.0	40	9.0	1.6	0.7	6.75	1.52
20	7.0	1.0	0.5	4.5	1.33	41	7.0	0.6	0.4	8.75	1.0
21	6.0	0.6	0.3	7.5	1.33	42	9.0	1.5	0.6	4.5	1.67

: * 单位为 cm, ** $a = \frac{1}{K_1} \frac{X}{Y} = \frac{3}{4} \cdot \frac{X}{Y}$, *** $b = \frac{1}{K_2} \frac{Y}{Z} = \frac{2}{3} \cdot \frac{Y}{Z}$

黄山 P₂₂₋₆ 点变形砾石投点分布图还表明,变形砾石的应变椭球形状是多样的,那么,哪个砾石应变椭球形状能较好地反应变形砾石总体的应变椭球形状?也就是说,如何确定变形砾岩和变形带的平均应变类型和平均应变变量? Miller(1979) 和 Wheeler(1986) 认为,可以采用变形砾石的平均应变椭球形状 (the average strain ellipsoid shape) 来确定和估算变形砾岩和变形带的平均应变类型和平均应变变量。

确定岩石和变形带平均应变类型的方法有多种,算术平均法和几何中心点平均法即是其一。算术平均法是取不同砾石的 a b 值进行算术平均来确定变形砾石平均应变椭球形状的 a b 值,进而在非等轴颗粒付林图解中投点以确定应变类型,并根据前述公式 (1)、(2)、(3) 来计算岩石和变形带的应变变量;几何中心点平均法是在非等轴颗粒付林图解中,取投点区的几何中心作为平均点来确定平均应变椭球形状点,进而根据该点的 a b 值平均应变变量。黄山 P₂₂₋₆ 点

变形砾石测量处理结果表明: 两种方法所确定的 a b 值相近 (表 4), 在图解中投点均位于 II 区 (图 4), 对应的应变类型为 $0 > e_x > e_z$ 的收缩应变。即该点岩石和变形带的平均应变类型为 $0 > e_x > e_z$ 的收缩应变, 岩石的 X 方向拉伸强烈, 拉伸率为 280% 至 282%; 在 Y 方向和 Z 方向收缩强烈, 收缩率分别为 39% 至 40% 和 56% 至 57%。因此, 新建立的非等轴颗粒付林图解不仅可用来图示岩石的应变类型, 还可直接确定和估算岩石和变形带的平均应变类型和平均应变量。

表 4 两种方法估算结果对比

Table 4 Comparison of the two kind results estimated in two different ways

	坐标函数值		在图解中的 投点位置	平均 应变类型	平均变量		
	a	b			e_x	e_y	e_z
几何中心点法	6.25	1.4	II 区	$0 > e_x > e_z$ 的收缩应变	2.80	- 0.39	- 0.57
算术平均法	6.41	1.36			2.82	- 0.40	- 0.56

本文承蒙北京大学地球科学系刘瑞 教授审阅, 并得到了他的指导和帮助, 在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- Holst T B, The role of initial fabric on strain determination from deformed ellipsoidal objects. *Tectonophysics*, 82, 1982, P329- 350.
- Hutton D H W, The strain history of a dalradian slide: Using pebbles with low fluctuations in axis orientation. *Tectonophysics*, 55, 1979, P261- 273.
- Lisle R J, Strain analysis using deformed pebbles, the influence of initial pebble shape. *Tectonophysics*, 60, 1979, P263- 277.
- Ramsay J G, Structural investigations in the Barberton Mountain Land, Eastern Transvaal. *Geol. soc. S. Africa Trans.*, 66, 1965, p353- 401.
- Siddans A W B, Analysis of three dimensional homogeneous, finite strain using ellipsoidal objects. *Tectonophysics*, 64, 1980, P1- 16.
- Simpson C, Strain and shape-fabric variations associated with ductile shear zone. *Jour. of struct. Geol.* 1983 Vol. 5, No. 1, P61- 73.

THE FLINN DIAGRAM OF ANISOMETRIC GRAINS

Xu Xingwang Ma Tianlin Sun Liqian Shang Ling

(*Institute of Geomechanics, CAGS*)

Abstract The Flinn diagram of anisometric grains are divided by lines $a=1$, $b=1$, and $a=b$, and curves $a^2b=1$ and $ab^2=1$ into ten subregions, corresponding to ten different combinations of ϵ_x , ϵ_y , ϵ_z , and strain types. The lines and curves represent the special combination of ϵ_x , ϵ_y , ϵ_z , and strain types. There are altogether eighteen strain types of deformed rocks. We have four equations to express a and b that represent respectively the four quarters divided by the lines $a=\frac{1}{K_1}$ and $b=\frac{1}{K_2}$, the equations of a and b depend on the bulk deformation behaviour of rocks. An application of the new diagram to determine the strain of deformed rocks as well as their types is here given.

Key words anisometric grains, Flinn diagram

第一作者简介

徐兴旺,男,1966年生,1993年攻读博士学位。现从事区域构造、矿田构造、显微构造研究工作。通讯地址:北京市海淀区民族学院南路11号地质力学研究所。邮政编码:100081