惯量投影椭球在构造变形分析中的意义初探

李志勇^{1,2)},曾佐勋^{1,2)},罗文强³⁾

1)中国地质大学地球科学学院,武汉,430074;2)华中构造力学研究中心,武汉,430074;
 3)中国地质大学数学与物理学院,武汉,430074

内容提要:本文讨论了一种新的数学工具,即惯量投影椭球(和椭圆),在具有任意形状构造变形体的变形描述 与应变分析中的意义。论证了在均匀的递进变形过程中,构造标志体惯量投影椭球的变形与其自身的变形保持一 致,两者遵循同样的均匀变形方程。在进行构造变形描述和分析时,构造标志体形状与其惯量投影椭球是等效的。 惯量投影椭球具有有限应变椭球相同的性质,可以用来描述任意形状构造标志体的变形,并可以替代具有任意形状 构造标志体进行变形分析。先前适用于椭圆形标志体变形分析的方法均可应用于具有任意形状的构造标志体。这 将为我们对具有任意形状的构造标志体变形的描述和分析提供方便和有用的数学工具。

关键词:惯量投影椭球;椭圆;任意形状;构造地质;变形

应变分析已经成为计算构造变形的重要方法。 应变测量是理解地壳从微观到宏观整个变形过程和 变形结果的有用工具。已有的应变分析方法都是基 于变形标志体的形态特征。Ramsay (1967) 最早提 出了基于椭圆标志体的应变分析方法——Rf/f法。 随后,大量的图形分析和数学分析方法被提出 (Dunnet, 1969; Elliott, 1970; Dunnet and Siddans, 1971; Matthews et al., 1974; Borradaile, 1976; Shimamoto and Ikeda, 1976; Lisle, 1977a, b, 1985, 1994; Peach and Lisle, 1979; Fry, 1979; Yu and Zheng, 1984; Erslev, 1988, 1990; Borradaile, 1987; McNaught, 1994; Ailleres, 1994, 1995; Mulchrone and Meere, 2001; Mulchrone et al., 2003, 2004) 其中,Robin (1977)的应变分析方法可以用于非椭 圆形状标志体的应变分析。Mulchrone 等(2004) 讨论了基于边界或区域的椭圆拟合方法将标志体拟 合成椭圆是否可以应用于应变测量,以便于将先前 大量的数学分析方法应用于任意形状的标志体。

本文通过进一步研究,提出了一种新的可以用 于构造变形定量分析的数学工具。讨论了惯量投影 椭球(和椭圆)对描述具有任意形状构造变形体的 变形特征的意义。论证了在均匀的递进变形过程 中,惯量投影椭球的变形与有限应变椭球保持一致。 基于惯量矩的物理定义,惯量投影椭球本质上描述 了任意形状体介质在空间中的相对分布特性。在均 匀变形过程中,惯量投影椭圆的变形也遵循同样的 均匀变形方程。

因此,惯量投影椭圆可以用来描述任意形状二 维构造标志体的变形,并可以替代具有任意形状构 造标志体进行变形分析。先前适用于椭圆形标志体 变形分析的方法均可应用于具有任意形状的构造标 志体。此外,在进行构造变形描述和分析时,构造标 志体形状与其惯量投影椭圆是等效的。这将为我们 对具有任意形状的构造标志体变形的描述和分析提 供方便和有用的数学工具。

1 惯量投影椭球的定义和计算

1.1 惯量投影椭球的定义

对于中心位于笛卡尔坐标系中心的均匀刚体, 令过其中心的任一旋转轴为 L, L 在三个坐标轴上 的方向余弦分别定义为α,β,γ。

则该刚体的惯量矩定义(周衍柏,1979)为:

$$I_{xx} = \iint_{G} (y^{2} + z^{2}) \, \mathrm{d}x \, \mathrm{d}y \, \mathrm{d}z \tag{1}$$

$$I_{yy} = \iint_{G} (z^{2} + x^{2}) \, \mathrm{d}x \mathrm{d}y \mathrm{d}z \tag{2}$$

收稿日期:2007-05-23;改回日期:2007-12-31;责任编辑:章雨旭。

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号 49972068)、湖北省构造地质学精品课程建设项目的成果。

作者简介:李志勇,男,1979年生。博士研究生。主要从事计算构造学与构造数值模拟研究。通讯地址:430074,武汉洪山区中国地质大学地球科学学院;Email:lizhygeo@126.com。

$$I_{zz} = \iint_{G} (x^{2} + y^{2}) \, \mathrm{d}x \mathrm{d}y \mathrm{d}z \tag{3}$$

$$I_{yz} = \iint_{G} yz dx dy dz \tag{4}$$

$$I_{zx} = \iint_{G} zx dx dy dz$$
(5)

$$I_{xy} = \iint_{C} xy dx dy dz \tag{6}$$

其中 I_{xx} 、 I_{yy} 和 I_{zz} 为刚体相对坐标轴的惯量矩, 即惯性力矩; I_{yz} 、 I_{xx} 和 I_{xy} 为刚体相对坐标轴的惯量 积。则刚体相对旋转轴 L 的转动惯量定义为(周衍 柏,1979):

$$I = I_{xx}\alpha^{2} + I_{yy}\beta^{2} + I_{zz}\gamma^{2} - 2I_{yz}\beta\gamma - 2I_{zx}\gamma\alpha - 2I_{xy}\alpha\beta$$
(7)

定义位于旋转轴L上的向量r:

$$r = \frac{1}{\sqrt{I}} \tag{8}$$

则向量r在三个坐标轴上的投影分别为:

$$x = r\alpha \tag{9}$$

- $y = r\beta \tag{10}$
- $z = r\gamma \tag{11}$
- 方程(7) 可改写为:

$$r^{2}I = I_{xx}x^{2} + I_{yy}y^{2} + I_{zz}z^{2} - 2I_{yz}yz + 2I_{zx}zx - 2I_{xy}xy = 1$$
 (12)

向量 r 的端点在三维空间中的轨迹构成一个二次曲面,该二次曲面的中心位于笛卡尔坐标系原点

(图1)。

该曲面为一封闭曲面。因此是一个椭球面,即 定义为惯量投影椭球。对于该惯量投影椭球,其通 过坐标原点的任一截面为一个二维椭圆。对于刚体 在二维平面上的切片,其对应的惯量投影椭圆为:

$$I_{xx}x^{2} + I_{yy}y^{2} - 2I_{xy}xy = 1$$
 (13)

基于惯量矩的物理定义,惯量投影椭球本质上 描述了介质在空间中的相对分布特性。惯量投影椭 球在空间中的介质分布与理论力学性质和其对应的 刚体是等效的。即,具有任意形状的标志体介质在 三维空间中的相对分布特征和力学运动特征可以用 惯量投影椭球体来描述和取代。

1.2 惯量投影椭球的计算

惯量投影椭球可以写成如下的矩阵形式,即惯 量矩阵:

$$\begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix}$$
(14)

矩阵(14)为对称矩阵。求解该矩阵的特征值 和特征向量,其特征值即为惯量投影椭球的三个主 半轴长,特征向量为该惯量投影椭球的三个主轴方 位。

通常情况下,实际的构造变形分析位于二维平 面上。在二维截面上,方程(13)的椭圆参数可以通



)

(b) the definition of inertia moments projection ellipsoid

过下式计算:

$$a = \sqrt{\frac{2[I_{xx} + I_{yy} + \sqrt{(I_{xx} - I_{yy})^{2} + 4I_{xy}^{2}]}{A}}{(15)}}$$
$$b = \sqrt{\frac{2[I_{xx} + I_{yy} - \sqrt{(I_{xx} - I_{yy})^{2} + 4I_{xy}^{2}]}{A}}{A}}$$

(16)

*a*和*b*分别为椭圆长短半轴,*A*为该截面面积。 椭圆长短轴比为:

$$R_{s} = \sqrt{\frac{I_{xx} + I_{yy} + \Delta}{I_{xx} + I_{yy} - \Delta}}$$
(17)

椭圆长轴方位为:

$$\theta = \arctan \frac{1}{2 I_{xy}} \left[(I_{xx} - I_{yy}) - \Delta \right]$$
(18)

其中,
$$\Delta = \sqrt{(I_{xx} - I_{yy})^2 + 4I_{xy}^2}$$
 (19)

2 惯量投影椭球对变形的描述意义

本文通过对二维矩形体和任意形状标志体在均 匀变形过程中的惯量投影椭圆的计算,讨论惯量投 影椭球(或椭圆)对任意形状标志体的变形描述意 义。

2.1 纯剪切变形矩形的惯量投影椭圆性质

对于矩形薄片在纯剪切变形过程中的惯量投影 椭圆的计算和分析如图2所示。未变形的单位矩形 薄片,通过方程(1)~(6)计算其惯量矩,得到对应 惯量投影椭圆为:

$$x^2 + y^2 = \frac{3}{4} \tag{20}$$

该惯量投影椭圆为一个形式上与单位圆一致的 标准圆。

对于纯剪切变形,任意一点的位移方程为:

$$x_{\rm d} = (1 + e_1)x = \sqrt{\lambda_1}x \tag{21}$$

$$y_{\rm d} = (1 + e_2)y = \sqrt{\lambda_2}y$$
 (22)

(x,y)为一点在变形前的坐标, (x_d,y_d) 为该点 在变形后的坐标。

在纯剪切变形过程中,单位圆变形为椭圆,即有 限应变椭圆。有限应变椭圆方程为:

$$\frac{x^2}{\lambda_1} + \frac{y^2}{\lambda_2} = 1 \tag{23}$$

通过位移方程(21)、(22)及惯量矩定义方程 (1)~(6),计算单位矩形在纯剪切变形后的惯量 投影椭圆为(图2):

$$\frac{x^{2}}{\lambda_{1}} + \frac{y^{2}}{\lambda_{2}} = \frac{3}{4(\lambda_{1}\lambda_{2})^{3/2}}$$
(24)

方程(24)给出的惯量投影椭圆的方程形式与 有限应变椭圆一致。其长短轴比与有限应变椭圆长 短轴比相同。在纯剪切变形过程中,惯量投影椭圆反 映了矩形的纯剪切变形,与有限应变椭圆具有相同 的椭圆参数。

2.2 简单剪切变形矩形的惯量投影椭圆性质

对于矩形薄片在简单剪切变形过程中的惯量投 影椭圆的计算和分析如图 3 所示。

对于简单剪切变形,任意一点的位移方程为:

$$x_{\rm d} = x + \gamma y \tag{25}$$

$$y_{\rm d} = y \tag{26}$$

γ为剪应变:

$$\gamma = \tan \Psi \tag{27}$$

(x, y) 和 (x_{d}, y_{d}) 分别为一点在变形前后的 坐标。

在简单剪切过程中,变形由有限应变椭圆给出: $x^{2} + (1 + \gamma^{2})\gamma^{2} - 2\gamma x\gamma = 1$ (28)

单位矩形经过简单剪切将变形为平行四边形。 其变形后惯量矩通过位移方程(25)、(26)及惯量矩 定义(1)~(6)计算,如图(3)。其变形后惯量投影 椭圆为:

$$x^{2} + (1 + \gamma^{2})y^{2} - 2\gamma xy = \frac{3}{4}$$
(29)

其表达式和椭圆参数与式(28)给出的应变椭 圆方程相同。惯量投影椭圆同样给出了矩形的简单 剪切变形。

2.3 均匀变形中任意形状多边形

的惯量投影椭圆性质

对于具有任意形状的变形标志体在二维截面上 为具有任意形状的多边形区域。变形分析所采用的 坐标系以及坐标系的旋转并不影响变形分析结果的 一般性。任何一般的均匀变形均可等效为纯剪切变 形和某一刚性转动的结果(Mulchrone, 2002)。因 此,我们讨论有限应变椭圆的长轴位于笛卡尔坐标 系 X 轴的纯剪切变形并不失一般性。

对于具有任意形状的多边形区域的纯剪切变形 和惯量投影椭圆的计算如图4所示。其在变形初始 时刻的惯量投影椭圆为:

 $I_{xxInit}x^{2} + I_{yyInit}y^{2} - 2I_{xyInit}xy = 1$ (30)

 I_{xxInit} 、 I_{yyInit} 和 I_{xyInit} 为多边形区域在变形初始的 惯量矩。

对于纯剪切变形,任意一点的位移方程为:

$$x_{\text{Def}} = (1 + e_1)x = \sqrt{\lambda_1}x \qquad (31)$$
$$y_{\text{Def}} = (1 + e_2)y = \sqrt{\lambda_2}y \qquad (32)$$



图 2 单位矩形的纯剪切变形及惯量椭圆计算

Fig. 2 Schematic illustration of the pure shear deformation of a square

(a)变形前的单位圆和变形后的有限应变椭圆;(b)单位正方形变形为矩形;(c)变形前单位矩形的惯量矩和变形后矩形的惯量矩;(d)变形前单位正方形的惯量投影椭圆及变形后矩形的惯量投影椭圆;(e)单位矩形在变形前后的惯量投影椭圆方程

(a) shows one unit circle in initial state and one finite strain ellipse after pure shear deformation; (b) shows one square in initial state and the deformed rectangle in the same deformation; (c) shows the inertia moments of the square in initial state and the inertia moments of deformed rectangle in the same deformation; (d) shows the IMP ellipse of the square in initial state and the IMP ellipse of deformed rectangle in the same deformation; (e) shows the equations of IMP ellipse both in initial state and after the same deformation

(*x*,*y*)和(*x*_{Def},*y*_{Def})分布为一点变形前后的坐标,初始时刻区域在变形后为区域*G*'。

通过式(1)~(6)计算变形后多边形区域的惯 量矩为:

$$I_{xxDef} = \lambda_1^{1/2} \lambda_2^{3/2} I_{xxInit}$$
(33)

$$I_{yyDef} = \lambda_1^{3/2} \lambda_2^{1/2} I_{yyInit}$$
(34)

$$I_{\rm ryDef} = \lambda_1 \, \lambda_2 \, I_{\rm ryInit} \tag{35}$$

其变形后惯量投影椭圆为:

$$\frac{I_{xxInit}}{\lambda_1}x^2 + \frac{I_{yyInit}}{\lambda_2}y^2 - 2\frac{I_{xyInit}}{\sqrt{\lambda_1\lambda_2}}xy = \frac{1}{\sqrt{(\lambda_1\lambda_2)^3}}$$
(36)

方程(36)仍然为一椭圆。如果改变式(31)、 (32)为如下形式:



图 3 单位矩形简单剪切变形及惯量椭圆计算

Fig. 3 Schematic illustration of the simple shear deformation of a square

(a)变形前的单位圆和变形后的有限应变椭圆;(b)变形前矩形变形后平行四边形;(c)变形前矩形和变形后平行四 边形的惯量矩;(d)变形前矩形的惯量投影椭圆和变形后平行四边形的惯量投影椭圆;(e)矩形变形前后惯量投影椭 圆方程

(a) shows one unit circle in initial state and a finite strain ellipse after simple shear deformation; (b) shows a square in initial state and the deformed parallelogram in the same deformation; (c) shows the inertia moments of the square in initial state and the inertia moments of deformed parallelogram in the same deformation; (d) shows the IMP ellipse of the square in initial state and the IMP ellipse of deformed parallelogram in the same deformation; (e) shows the equations of IMP ellipse both in initial state and after the same deformation

$$x = \frac{x'}{\sqrt{\lambda_1}} \tag{37}$$

$$y = \frac{y'}{\sqrt{\lambda_2}} \tag{38}$$

$$\frac{I_{xxInit}}{\lambda_1} x^{\prime 2} + \frac{I_{yyInit}}{\lambda_2} y^{\prime 2} - 2 \frac{I_{xyInit}}{\sqrt{\lambda_1 \lambda_2}} x^{\prime} y^{\prime} = 1 \qquad (39)$$

与式(36) 左边形式相同。将均匀变形方程直接 带入初始惯量投影椭圆方程,得到的椭圆方程与通 过计算变形后的多边形区域得到的惯量投影椭圆形

直接带入方程(30)可以得到:



图 4 任意形状多边形的纯剪切变形

Fig. 4 Schematic illustration of the pure shear deformation of polygon with arbitrary shape

(a)为变形前的单位圆和纯剪切变形后的有限应变椭圆;(b)纯剪切变形前后的任意形状多边形;(c)纯剪切变形前后 多边形的惯量矩;(d)多边形纯剪切变形前后的惯量投影椭圆;(e)变形前后惯量投影椭圆方程

(a) shows a unit circle in initial state and one finite strain ellipse after pure shear deformation; (b) shows a arbitrary polygon in initial state and the deformed polygon in the same deformation; (c) shows the inertia moments of the arbitrary polygon in initial state and the inertia moments of deformed arbitrary polygon in the same deformation; (d) shows the IMP ellipse of the arbitrary polygon in initial state and the IMP ellipse of deformed arbitrary polygon in the same deformation; (e) shows the equations of IMP ellipse both in initial state and after the same deformation

式相同,并具有相同的椭圆参数和长轴方位。

在均匀变形过程中,惯量投影椭圆的变形也遵 循同样的均匀变形方程。对于多边形区域的递进变 形,其惯量投影椭圆的变形也遵循同一均匀递进变 形(图5)。

因此,惯量投影椭圆可以用来描述任意形状二

维构造标志体的变形,并可以替代具有任意形状构 造标志体进行变形分析。在进行构造变形描述和分 析时,构造标志体形状与其惯量投影椭圆是等效的。 先前适用于椭圆形标志体变形分析的方法均可应用 于具有任意形状的二维构造标志体。也这将为我们 对具有任意形状的构造标志体变形的描述和分析提 供方便和有用的数学工具。

形等效为某一旋转坐标系 x'oy' 中的纯剪切变形。



应变,进而进行构造过程反衡是重要的条件假设的构造标志的推想的趋势的。

如果我们假设构造标志体或构造标志体集合的 the finite 物如 of me 带我当中的包裹体,我们可以认为该 介质在变形初始时刻在空间中满定某种消机罚约分 ased 假设 是将在酌。为于岩浆岩中的矿物集合体,我们 (a) 初始单位圆和变形后应变椭圆;(b)变形前后具有任意形状的构造标志体;(c) 构造标志体在变形前后的惯量矩; 布,使得法 陶墨根基体植或病情的惯量 预影輛截;(e) 数形前后惯量投影椭圆为程物集合体的生长在空间中各个方位是等 后期均匀变形过程 中,或惯量摄影椭 动与有限 应变 ellipse 概率和备 向同他的ows 物理意义 让赤说 u of a物集合体 椭球是等效的 of deformed polygon in the same deformation; (d) shows the IMP ellipse of of deformed polygon in the same deformation; (e) shows the equations of MP ellipse for minitial state and after the same

在该假设基础上的构造标志体的惯量投影椭圆 与有限应变椭圆的关系如图6所示。因为任何一般 的均匀应变均可等效为纯剪切变形加上刚性转动 (Mulchrone, 2002),于是,可以将构造变形体的变

4 讨论

对构造变形进行描述和分析,并估算岩石的有 限应变,继而进行构造反演,是非常重要和有意义 的。然而自然界中的构造体及构造现象是多样和复杂的,构造变形体的形态和变形相当复杂。利用有效的数学工具来描述和提取我们所需的构造特征和变形数据,转化为简单的数学模型,对于我们进行构造地质定量研究是有益的。

基于惯量矩的物理定义,惯量投影椭球本质上 描述了任意形状体介质在空间中的相对分布特性。 在均匀的递进变形过程中,构造标志体惯量投影椭 球的变形与其自身的变形保持一致,两者遵循同样 的均匀变形方程。因此,构造标志体形状与其惯量 投影椭球是等效的。当然,对于具有多个构造标志 体的集合也是适用的。

尽管已经有大量的方法进行构造变形分析和应 变测量,但惯量投影椭球为我们提供了对具有任意 形状的构造变形体的变形进行定量描述和分析的数 学工具。先前适用于椭圆形标志体变形分析的方法 均可应用于具有任意形状的构造标志体。

对于构造变形分析,更重要的是如何估算岩石 变形大小和反演构造变形过程。惯量投影椭球与有 限应变椭球在数学意义上具有相同的性质。然而, 和其他的应变分析方法一样,直接利用惯量投影椭 球估算岩石有限应变大小,需要建立在构造标志体 或构造标志体集合的介质在变形初始时刻在空间中 满足某种随机均匀分布的初始假设之上。

对于自然界中某些构造标志体,我们或许可以 假定该假设的成立,来估算岩石的有限应变值。岩 石有限应变的估算值与其真实的应变之间的误差大 小,取决于对该随机均匀分布假设偏离的评估。这 些评估需要以对地质构造本身的研究作为基础。

致谢:感谢犹他大学地质与地球物理系 Ronald Bruhn 教授对本文提供了帮助和建议。

参考文献 / References

周衍柏.1979.理论力学.南京:江苏科学技术出版社.

- Ailleres L, Champenois M, Macaudiere J, Bertrand J M. 1995. Use of image analysis in the measurement of finite strain by the normalized Fry method: geological implications for the "Zone Houillère" (Briançonnais zone, French Alps). Mineralogical Magazine, 59: 179~187.
- Ailleres L, Champenois M. 1994. Refinements to the Fry method using image processing. Journal of Structural Geology, 16: 1327 ~1330.

- Borradaile G J. 1987. Analysis of strained sedimentary fabrics: review and test. Canadian Journal of Earth Sciences, 24: 442 ~ 455.
- Dunnet D. 1969. A technique of finite strain analysis using elliptical particles. Tectonophysics, 7: 117 ~ 136.
- Dunnet D, Siddans W B. 1971. Non random sedimentary fabrics and their modification by strain. Tectonophysics, 12: 307 ~ 325.
- Elliott D. 1970. Determination of finite strain and initial shape from deformed elliptical objects. Geological Society of America Bulletin, 81: 2221 ~ 2236.
- Erslev E A, Ge H. 1990. Least squares center-to-center and mean object ellipse fabric analysis. Journal of Structural Geology, 8: 1047 ~ 1059.
- Erslev E A. 1988. Normalized center-to-center strain analysis of packed aggregates. Journal of Structural Geology, 10: 201 ~ 209.
- Fry N. 1979. Random point distributions and strain measurement in rocks. Tectonophysics, 60: 806 ~ 807.
- Lisle R J. 1977a. Clastic grain shape and orientation in relation to cleavage from the Aberystwyth Grits, Wales. Tectonophysics, 39: 381-395.
- Lisle R J. 1977b. Estimation of the tectonic strain ratio from the mean shape of deformed elliptical markers. Geologie en Mijnbouw, 56: 140~144.
- Lisle R J. 1994. Paleostrain analysis. In: Hancock P L. ed. Continental Deformation. New York: Pergamon Press, 28 ~ 42.
- Matthews P E, Bond R A B, Van Den Berg J J. 1974. An algebraic method of strain analysis using elliptical markers. Tectonophysics, 24: 31~67.
- McNaught M. 1994. Modifying the normalized Fry method for aggregates of non – elliptical grains. Journal of Structural Geology, 16: 493 ~ 503.
- Mulchrone K F, Meere P A. 2001. A Windows program for the analysis of tectonic strain using deformed elliptical markers. Computers and Geosciences, 27: 1253 ~ 1257.
- Mulchrone K F, OSullivan F, Meere P A. 2003. Finite strain estimation using the mean radial length of elliptical objects with confidence intervals. Journal of Structural Geology, 25: 529 ~ 539.
- Mulchrone K F. 2002. A statistic for estimating strain with confidence intervals from deformed line distributions with an application to schists and gneisses of the Western Gneiss Region, west central Norway. Journal of Structural Geology, 24: 545 ~ 556.
- Mulchrone K F. 2003. Application of Delaunay triangulation to the nearest neighbour method of strain analysis. Journal of Structural Geology, 25: 689 ~ 702.
- Mulchrone K F, Choudhuryb K R. 2004. Fitting an ellipse to an arbitrary shape: implications for strain analysis. Computers and Geosciences, 26: 143 ~ 153.
- Ramsay J G. 1967. Folding and Fracturing of Rocks. New York: McGraw-Hill.
- Robin P F. 1977. Determination of geologic strain using randomly oriented strain markers of any shape. Tectonophysics, 42: T7 ~ T16.

First Approach to the Significance of Inertia Moment Projection Ellipsoid for Structure Deformation Analysis

LI Zhiyong^{1, 2)}, ZENG Zuoxun^{1, 2)}, LUO Wenqiang³⁾

Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan, 430074;
 Huazhong Tectonomechanical Research Center, Wuhan, 430074;
 Department of Mathematics and Physics, Wuhan, 430074

Abstract: This paper discusses the significance of a new tool, the Inertia Moment Projection (IMP) ellipsoid (or ellipse in two dimensions), for the deformation description and strain analysis of structural objects with arbitrary shape. During the progressive uniform deformation, the deformation of the IMP ellipsoid is coincident with that of the structural object. They both follow the same deformation rule. The IMP ellipsoid is equivalent to the arbitrary shape of structural object for the description and analysis of deformation. It has the same characteristics as the finite strain ellipsoid and can substitute for the structural object for strain analysis. So, the former strain analysis methods based on elliptic structural deformation markers can be used for the general structural objects with arbitrary shape. It would be a very useful mathematic tool for the description and analysis of structural deformation.

Key words: Inertia Moment Projection Ellipsoid; Ellipse; Arbitrary shape; Structural geology; Deformation

山东新泰野外露头发现下古生界含油碳酸盐岩

吕洪波,朱晓青,杨超,黄蝶芳,张成凤,张林 中国石油大学地球科学系,山东东营,257061

到目前为止,华北东部下古生界含油岩系研究主要依靠 环渤海湾地区几个油田有限的钻孔资料(谯汉生等,2002), 尚未获得大的突破。从2006年开始,在完成中国石油化工 公司胜利油田有限公司委托的《胜利山东探区中深层天然气 原型盆地构造演化研究》专题野外工作期间,笔者等在山东 新泰市新汶镇下古生界露头区的上寒武统凤山组、下奥陶统 亮甲山组、马家沟组的碳酸盐岩中发现了至少三套稳定的碳 酸盐岩含油岩系。

上寒武统凤山组上段钙质藻礁粗晶白云岩段在黑山、寺山、封山等地均出露良好(照片1);下奥陶统亮甲山组钙质细晶白云岩(照片2)主要出露于光明水库西侧横山等地;中奥陶统马家沟组钙质细晶白云岩和深色微晶灰岩则分散出露于新汶镇南侧山麓地带,少量出露于西西周一带的新泰一垛庄大断裂带上。

野外考察发现,含油岩系容易识别,并具有层位稳定、厚 度较大、分布广泛的特点,在新泰市下古生界露头区普遍存 在。初步研究发现:

(1)含油岩层在野外容易识别。严格地顺层分布,颜色明显比上下相邻岩层为深(照片2)。用锤子敲击岩石会发出明显的芳香烃味道(不是臭灰岩或沥青味)。

(2)经荧光薄片鉴定,有机质主要分散赋存于自形白云 石晶间之方解石胶结物中(照片3),有些集中于显微裂隙 中。

(3)含油岩层本身就是烃源岩,有机质并非来自古近系

- 新近系烃源岩。证据是:荧光薄片显示有机质分散于白云 石晶间空隙的方解石胶结物中,外来烃类无法如此均匀地分 散在微小的空间中;在蒙阴盆地东北边缘古近系官庄组(相 当于济阳坳陷的孔店组)砾岩中发现奥陶系马家沟组含油岩 角砾,显然,角砾中的有机质在古近纪之前就存在了。

(4)已经经历过油气运移历史。荧光薄片显示,在岩石 的显微裂隙中对称分布着有机质残留物(有的被更新的方解 石脉所分开);在新泰 - 垛庄大断裂带内的奥陶系马家沟组 石灰岩露头(开采场)的小型断裂带上留有明显的油浸痕迹 (照片4)。

(5)岩石中残存的有机碳含量较低。经胜利油田地质研 究院测试,6个样品中有机碳含量最低的为0.02%,最高的 为0.08%。目前国内碳酸盐岩烃源岩评价标准的下限值为 0.2%(TOC),但评价对象为钻孔样品(谯汉生等,2002)。考 虑到野外露头上的岩石长期处于地表开放环境,而且以铁锤 直接敲打采集标本会产生碎裂而使油气挥发散失,加之样品 在室内放置几个月后才进行测试,测得的有机碳仅仅是最后 的残留物,而埋藏于地下相对封闭空间的相当层之有机碳含 量肯定比残存的高。

考虑到下古生界在环渤海湾地区(包括辽宁、河北、山东 等地)广泛分布,建议尽快对该地区下古生界含油岩系进行 野外调查和综合研究,这对华北东部中深层油气勘探有重要 意义。 (下转第 277 页)