

文章编号: 1001-6112(2007)06-0628-05

利用岩石磁组构恢复 沉积盆地古构造应力场方法的探讨

曾联波, 漆家福

(中国石油大学 石油天然气成藏机理教育部重点实验室, 北京 102249)

摘要: 由于缺少应力标志, 沉积盆地覆盖区的古构造应力场定量恢复一直是个难题。为了探讨岩石磁化率各向异性在恢复沉积盆地古构造应力场的最大主应力方向方面的可行性, 首先对岩石缓慢加压变形前后的磁化率各向异性的变化进行了实验研究, 受力以后岩石的磁化率各向异性参数 H , P , q 值都相应增大, 最大和最小磁化率主轴产状也有明显的变化, 反映了浅层次的构造变形过程可对岩石磁组构产生明显的影响。然后, 在塔里木盆地北部, 将用最小磁化率主轴所求得的最大主压应力方位与用构造变形分析所求得的最大主压应力方向进行了对比分析, 二者结果基本一致。说明在构造变形较强的沉积覆盖区(σ_1), 用岩石的最小磁化率主轴方向来确定沉积盆地古构造应力场的最大主压应力方位是可行的。最后, 还对该方法的适应范围和构造应力场的分期等相关问题进行了讨论。

关键词: 磁组构; 最小磁化率主轴; 最大主压应力方向; 古构造应力场; 沉积盆地; 塔里木盆地

中图分类号: TE121.1

文献标识码: A

DISCUSSION ON THE APPLICATION OF THE ROCK MAGNETIC FABRIC METHOD IN RESUMING PALEOTECTONIC STRESS FIELD IN SEDIMENTARY BASIN

Zeng Lianbo, Qi Jiafu

(Key Laboratory for Hydrocarbon Accumulation Mechanism of the Chinese Ministry
of Education, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: The quantitative resumption of the paleotectonic stress field in the sedimentary basin has long been a difficult problem due to the shortage of the stress symbols. In order to probe the feasibility of using rock magnetic anisotropy to resume the direction of the maximum principle stress of the paleotectonic stress field in sedimentary basin, an experiment has been made at first to investigate the change of the magnetic anisotropy before and after the rock is slowly pressurized and deformed. After the rock is pressurized, the magnetic anisotropy parameters of H , P and q increase accordingly, the maximum and the minimum principal axes of the magnetic susceptibility also change significantly, indicating that the tectonic deformation process in the shallow formation may exert obvious influences on the rock magnetic anisotropy. A comparison analysis between the direction of the maximum principal compression stress determined by the minimum principal axis of magnetic susceptibility and that determined by the tectonic deformation analysis were then carried out in the northern Tarim Basin. The results show that the two is roughly consistent, suggesting that, in the area with strongly deformed structures, it is feasible to use the direction of the minimum principle axis of magnetic susceptibility in determining the direction of the maximum principal compression stress of the magnetic susceptibility of the paleotectonic stress field in the sedimentary basins. At last, some related issues such as the applicable scope of this method and the stage division of the tectonic stress field have been discussed.

Key words: magnetic fabric; minimum principal axis of magnetic susceptibility; direction of maximum principal compression stress; paleotectonic stress field; sedimentary basin; the Tarim Basin

收稿日期: 2006-09-23; 修订日期: 2007-11-08。

作者简介: 曾联波(1967—), 男(汉族), 湖南沅江人, 博士, 教授, 主要从事油气构造地质学的教学和科研工作。

基金项目: 石油科技中青年创新基金项目(CX2000-39)和国家重点基础研究发展规划项目(G19990433)。

构造应力场是沉积盆地成盆、成烃和成藏的主要动力,对盆地及其内部构造和油气矿产资源的形成演化起重要的控制作用^[1~3]。由于缺少应力标志,覆盖盆地古构造应力场的恢复一直是盆地构造研究中的难点。自 Graham^[4]在研究阿巴拉契亚山变形沉积岩时提出磁化率量值椭球主轴与应变椭球主轴相互平行以来,许多学者^[5~16]将该原理应用于构造变形研究中,用最小磁化率方向来推断构造应力场的最大主压应力(σ_1)方位。该方法是否适应于沉积盆地的古构造应力场恢复,不同学者有不同的看法,值得进一步探讨。

该方法的一个最重要的前提条件就是假设最大主压应力方位与最小磁化率主轴的倾向平行。由于影响岩石磁组构或磁化率各向异性的因素较多,因此,上述前提条件在某些情况下是不成立的,尤其若存在多期磁组构的叠加或初始磁组构的影响时,其结果可能会出现很大的偏差。本文通过实验以及与构造解析方法所确定的最大主压应力方向对比研究,对沉积盆地利用岩石磁组构确定主应力方向的可靠性进行了分析。

1 实验分析

产生岩石磁化率各向异性的因素主要有形状各向异性和磁晶各向异性两方面,与岩石的沉积以及沉积以后所受到的温度、压力条件等多种地质因素有关。因此,岩石磁组构分析广泛应用于沉积古水流、岩浆岩构造、变质岩的韧性变形和矿床的研究中^[4~16]。那么,岩石的磁化率各向异性究竟是否与受力有关?这是利用岩石磁组构确定主应力方向的最基本的前提条件,为此,对塔里木盆地北部地区的库车河地表露头剖面的白垩系岩样在受

力前后的岩石磁组构进行了系统的对比分析。

在试验前首先对岩样进行了磁组构测试,然后在常温下对这些样品在岩石力学实验仪上缓慢施加压力,直到岩石即将破裂时卸载,以便模拟在地质历史时期中浅层次的构造变形过程。磁组构的测试工作在中国地质大学岩石圈构造和深部过程及探测技术教育部重点实验室完成。表 1 给出了塔里木盆地北部地区库车河剖面部分岩样在受力以后的磁组构参数,其中编号为 A2 的 5 块样品为垂直层面受力,编号为 A3 的 5 块样品为平行走向受力,以反映岩石的不同受力方式。然后对这些加力变形以后的岩样进行磁组构分析,并对比变形前后岩石磁化率各向异性参数的变化,从而探讨在浅层次的构造变形环境下岩石破裂前发生的塑性变形对磁化率各向异性的影响。根据这些岩石人为受力前后的主要磁化率各向异性参数变化对比研究^[11],其平均百分率各向异性参数 H 值 [$H = 3(K_1 - K_3)/(K_1 + K_2 + K_3) \times 100\%$] (K 表示磁化率)由 5.593% 变为 5.656%,平均磁化率各向异性度 P 值 ($P = K_1/K_3$) 由 1.057 变为 1.058,平均磁化率各向异性参数 q 值 [$q = (K_1 - K_2)/[(K_1 + K_2)/2 - K_3]$] 由 1.315 变为 1.320,而且其最大和最小磁化率主轴产状也有明显的变化。

虽然这种实验和对比分析还只是初步的,但其结果基本表明了构造挤压作用或挤压应力确实能对岩石的磁组构参数产生明显的影响。通常认为,岩石磁化率各向异性是由韧性变形引起的,引起磁化率各向异性变化的变形需要较高的温压条件。但在强烈的构造挤压作用下,岩石发生的塑性变形,也能引起岩石磁化率各向异性的变化,尤其是在漫长的地质历史时期在极其缓慢的构造变形过

表 1 塔里木盆地北部库车河剖面岩样受力以后的磁组构参数

Table. 1 Magnetic fabric parameters of the rock samples being pressurized in the section of Kuqa River, the northern Tarim Basin

样品号	K_1	K_2	K_3	K	P	E	T	F	L	D_1	I_1	D_2	I_2	D_3	I_3
A2-5	3.593	3.440	3.382	3.471	1.063	0.974	-0.436	1.018	1.045	261.3	3.2	171.3	1.2	60.5	86.5
A2-4	3.540	3.390	3.365	3.431	1.052	0.965	-0.705	1.008	1.045	-84.2	0.6	5.9	12.4	182.6	77.5
A2-3	3.496	3.347	3.295	3.379	1.062	0.973	-0.472	1.016	1.045	265.3	2.6	-4.5	1.3	112.7	86.9
A2-2	3.531	3.371	3.329	3.410	1.061	0.968	-0.566	1.013	1.048	-86.6	3.0	3.7	7.2	160.4	82.1
A2-1	3.346	3.200	3.148	3.231	1.063	0.972	-0.467	1.017	1.046	48.1	0.7	-41.8	1.1	171.5	88.6
A3-5	3.339	3.219	3.174	3.244	1.052	0.978	-0.447	1.014	1.037	107.5	24.5	-1.6	35.7	223.8	44.1
A3-4	6.937	6.608	6.549	6.698	1.059	0.961	-0.691	1.009	1.050	110.6	13.3	16.6	16.2	238.1	68.7
A3-3	3.564	3.394	3.360	3.440	1.061	0.962	-0.655	1.010	1.050	114.2	12.9	-80.7	76.5	203.4	-3.3
A3-2	3.521	3.367	3.350	3.413	1.051	0.961	-0.798	1.005	1.046	116.7	19.6	3.6	47.5	221.6	35.7
A3-1	3.381	3.243	3.199	3.274	1.057	0.972	-0.504	1.014	1.043	103.7	19.7	3.9	25.4	227.2	56.8

注: K_1, K_2, K_3 分别为最大、中间和最小磁化率值 ($10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$); K 为总磁化率值, 无量纲; P 为各向异性度, 无量纲; E 为扁率, 无量纲; T 为形状因子, 无量纲; F 为磁面理, 无量纲; L 为磁线理, 无量纲; D_1, I_1 为最大磁化率方向的偏角和倾角 ($^\circ$); D_2, I_2 为中间磁化率方向的偏角和倾角 ($^\circ$); D_3, I_3 为最小磁化率方向的偏角和倾角 ($^\circ$)。

程中,岩石发生的蠕变作用,同样能引起磁性矿物的调整并产生磁化率各向异性。从微观结构看,岩石的塑性变形主要是由于粒内和粒间的滑移造成的,岩石的塑性变形也可以理解为岩石在固态下的流动^[11,16]。岩石的这种塑性变形作用,可以使岩石内的磁性矿物产生定向排列,从而使岩石产生磁化率各向异性,这就使得用岩石磁化率各向异性来恢复沉积盆地古构造应力场的最大主应力方向成为可能。

2 可行性分析

已有的研究表明,许多变形岩石,特别是单阶段变形岩石的磁化率椭球通常与其应变椭球相对应^[4,7,8,11],因而可以利用岩石的磁化率各向异性来确定最大主应力方位。但该方法在沉积盆地应用的可行性及其精度,目前尚缺少研究。为了分析和检验岩石磁组构法确定古构造应力场最大主压应力方向的可靠程度,在塔里木盆地北部地区的地表露头区,利用其良好的地面地质构造条件,在各层位岩石磁化率各向异性参数分析的基础上,将用岩石磁组构方法确定的主应力方向与利用共轭剪节理和褶皱断裂构造进行的构造变形解析所确定的最大主压应力方向进行了对比研究。

表 2 为塔里木盆地北部克拉苏河古近系库姆格列木群砂岩样品的磁组构参数。在岩石磁组构测试数据的基础上,计算的岩石磁化率各向异性参数 q 值平均为 1.315,远远高于沉积磁组构 0.7 的上限值;其百分率各向异性参数 H 值平均为

5.593%;磁化率各向异性度 P 值平均为 1.057; f (最小磁化率方向与层面法线之间的夹角^[7])平均为 23.95°,也高于沉积磁组构 15°的上限值。这说明该区强烈的构造挤压作用引起的岩石塑性变形改变了其沉积的磁组构。由于取样地区在地质历史时期没有经历过高温和浅变质作用,因而可以基本上认为影响其磁化率各向异性的主要因素是构造变形阶段的岩石塑性变形作用,其磁化率各向异性是反映岩石应变的良好指示器。

在塔里木盆地北部库车河剖面运用多种方法获得的最大主压应力(σ_1)方位对比分析表明,最小磁化率主轴所反映的最大主压应力方位和用构造变形分析所求得的最大主压应力方向基本吻合(表 3),反映用磁化率各向异性方法分析古构造应力场获得的结果是基本可信的,该方法完全可以作为覆盖盆地没有古应力标志的地区恢复古应力场的新方法与新手段,具有可行性,岩石的最小磁化率主轴方向与最大主压应力(σ_1)方位一致。

3 讨论

虽然已有的研究基本上证实了岩石磁化率各向异性在构造应力场应用中的可行性,但由于其自身的特殊性,在应用中目前仍有许多问题值得深入探讨。

3.1 关于构造磁化率各向异性

岩石磁化率各向异性分为磁性矿物的形状各向异性和磁晶各向异性^[11],与磁性矿物成分及其在空间分布排列密切相关。岩性是影响磁化率各向

表 2 塔里木盆地北部克拉苏河古近系库姆格列木群样品磁组构参数

Table 2 The magnetic fabric parameters of the samples in the Eocene Kumugeliemu Group of Kelasu Rive Area, the northern Tarim Basin

样品号	K_1	K_2	K_3	K	P	E	F	L	D_1	I_1	D_2	I_2	D_3	I_3
B5-15	4.017	3.846	3.810	3.891	1.054	0.966	1.009	1.044	126.5	16.9	212.7	-12.2	268.5	68.8
B5-14	4.134	3.966	3.921	4.007	1.054	0.970	1.011	1.042	125.6	15.6	212.4	-11.3	267.7	70.4
B5-13	4.056	3.898	3.831	3.928	1.059	0.978	1.017	1.040	129.2	11.6	217.4	-8.8	-89.1	75.2
B5-12	4.170	3.974	3.923	4.023	1.063	0.965	1.013	1.049	87.7	23.6	-11.2	19.5	223.2	58.4
B5-11	3.834	3.665	3.625	3.708	1.058	0.967	1.011	1.046	109.0	18.0	197.6	-4.5	-85.8	71.3
B5-10	3.988	3.799	3.764	3.850	1.059	0.962	1.009	1.050	123.1	20.6	26.0	18.2	257.8	61.8
B5-9	3.912	3.755	3.731	3.799	1.049	0.966	1.007	1.042	131.1	14.1	218.5	-10.2	-86.3	72.4
B5-8	3.908	3.765	3.721	3.798	1.050	0.975	1.012	1.038	134.2	15.1	220.7	-12.6	-87.5	70.0
B5-7	4.184	4.004	3.966	4.052	1.055	0.966	1.010	1.045	116.5	16.4	22.8	12.2	257.7	69.2
B5-6	4.157	3.979	3.915	4.017	1.062	0.973	1.016	1.045	118.6	20.7	14.5	32.7	235.1	49.7
B5-5	4.087	3.917	3.856	3.953	1.060	0.973	1.016	1.043	136.6	13.3	42.3	17.5	261.9	67.6
B5-4	4.001	3.831	3.778	3.870	1.059	0.971	1.014	1.044	116.9	15.3	22.7	14.8	250.6	68.3
B5-3	4.040	3.866	3.825	3.910	1.056	0.967	1.011	1.045	113.3	18.8	17.7	15.9	250.2	64.9
B5-2	4.051	3.859	3.814	3.908	1.062	0.964	1.012	1.050	89.7	21.5	182.1	6.0	-73.0	67.5
B5-1	4.057	3.878	3.834	3.923	1.058	0.967	1.011	1.046	87.8	23.0	177.3	-1.0	264.8	66.8

注:①地层产状 $60^\circ \angle 15^\circ$ 。

②表中符号意义同表 1。

表3 塔里木盆地北部库车河剖面利用多种方法获得的 σ_1 方位对比表

Table 3 Comparison of the direction of the maximum principal compression stress (σ_1) obtained by various methods in the Kuqa River profile, the northern Tarim Basin

序号	地层	构造变形解析的 σ_1 方位/(°)	共轭节理分析的 σ_1 方位/(°)	磁组构分析的 σ_1 方位/(°)	磁组构与其它分析结果的误差/(°)
1	T ₁	8	189	6.5	1.5~2.5
2	J ₁	318	310	329.0	11~19
3	K ₁	358	—	2.0	4
4	N ₁	134	312	298.0	14~16

注:在该剖面由于古近纪地层风化强烈,没有取到合适的古近系岩样。

异性的主要因素,磁化率各向异性是不同矿物排列的反映^[11,16]。在岩石中既有磁化率高但各向异性低的磁铁矿、磁黄铁矿等铁磁性矿物,也有许多磁化率低但各向异性高的黑云母、绿泥石等矿物,能够反映构造变形的主要是由同构造期生成的绿泥石、黑云母和细粒磁黄铁矿等矿物所产生的磁化率各向异性。当岩石中存在较强的非变形期铁磁性矿物时,构造期产生的反映构造变形的磁化率各向异性就会被掩盖,从而影响磁化率各向异性在构造应力场分析中的应用。对于存在较强非变形期铁磁性矿物的岩石,在应用时需要特别小心,区分这两种不同类型磁性矿物产生的磁化率各向异性是非常必要的。

沉积岩在沉积过程中可产生部分磁化率各向异性,称为初始磁化率各向异性,这部分磁化率各向异性基本反映了沉积过程中的水动力条件。当构造变形较弱或初始磁化率各向异性较强时,初始磁化率各向异性与构造磁化率各向异性就很难区分。近年来,许多学者通过人工模拟实验,提出了用 q , f , P 识别沉积磁化率各向异性的准则^[6,11,14,16]。在强变形岩石中,初始磁化率各向异性被完全改造,可与构造磁化率各向异性叠加在一起,需要进行分离。怎么鉴定存在磁化率各向异性的叠加?怎样识别和筛分初始磁化率各向异性与构造磁化率各向异性?如何将初始磁化率各向异性从总磁化率各向异性中剔除,然后得到构造磁化率各向异性?这将是磁化率各向异性在构造变形分析中需要解决的难题。

用岩石的磁组构来恢复盆地古构造应力场主应力方位的前提是变形岩石的磁化率量值椭球与应变椭球主轴相互平行并存在一定的关系,但是这种对应关系并不是普遍存在的,受到多种因素的制约。产生这种不一致的最主要原因可能就是上述

沉积磁化率各向异性与构造磁化率各向异性的复合或多阶段磁化率各向异性的叠加^[6,11,16],也可能与岩石中某些特殊矿物的影响有关。因此,在存在多期磁组构叠加或存在初始磁组构影响的地区,该方法所确定的主应力方向可能会出现很大的误差,不可使用。相反,在未发生磁组构叠加,而且初始磁化率各向异性被完全改造的地区,此方法是可行的。

3.2 关于磁化率各向异性应用的条件

从前面分析可知,由于影响磁化率各向异性的因素较多,因此,运用磁化率各向异性来分析构造应力场,并不是在任何条件下都可以应用,可能在一些弱构造变形地区或弱构造挤压地区就不适应,它存在许多局限性。在一定的条件下,磁化率各向异性度与有限应变大小之间存在着对数关系^[4~7],但磁化率各向异性度的大小并不能代表岩石变形的强弱^[16]。岩石变形可以是无限增加的,而磁各向异性却有一个饱和水平,当磁性矿物优选方位达到极限状态时磁各向异性就达到了饱和,这时岩石变形即使再增大,磁各向异性也不会增加^[9]。本文研究区构造变形强烈,岩石的磁化率量值椭球与应变椭球主轴基本平行,因此,用最小磁化率主轴确定的最大主压应力方位具有较好的效果。但假如一个地区的构造变形比较弱的话,用最小磁化率主轴恢复的最大主压应力方位和构造变形分析所求得的结果还一致吗?或者说,当岩石的变形达到什么程度时,构造磁化率各向异性将占主导地位?当一个地区的构造变形强度达到多少时,其岩石的磁化率量值椭球与应变椭球主轴才可能相互对应,才可以用磁化率各向异性来确定古构造应力场的最大主应力方向?除了构造变形程度外,还有没有其它地质条件的影响?影响有多大?这直接关系到该方法的应用及其结果的可信度,值得以后深入地研究。

3.3 关于应力场的分期

古构造应力场的存在是有时间范围的,研究构造应力场的分布时需要进行分期,以确定其存在的构造时期。由于研究区新生代以来的构造应力场的性质和最大主压应力方向没有变化,不同期次的构造应力场只有应力大小的差别,所以,用岩石的磁化率各向异性所确定的最大主压应力方向反映了该区的构造应力场的分布。

但是,如果一个地区存在多期构造应力场,而且不同期次的构造应力场不仅存在应力大小不同,而且其构造应力场的最大主压应力方向甚至性质

(挤压或伸展)也发生较大变化的话,那么该方法是否还可适应?如果岩石没有磁组构的叠加,而且初始磁化率各向异性被完全改造,此时岩石的最小磁化率各向异性主轴所反映的最大主压应力方向是哪一构造期应力场的?反映的是最初一期构造应力场,还是最强烈一期构造应力场?还是多期应力场综合叠加的结果?后期构造作用又是如果改造岩石的磁化率各向异性的?这是该方法在构造应力场应用中的又一难题。

本文认为,在一个地层分布齐全而且沉积稳定的沉积盆地内,如果从新往老,对各构造层的地层进行系统取样,分别测量其岩石的磁组构,然后再从新往老进行逐一筛分,从后期岩石测得的磁组构中分离出前一构造期的磁组构,便可得到该期构造作用产生的磁组构,从而获得不同构造期次的构造应力场分布信息。

4 结论

1)通过岩石缓慢加压变形实验前后的磁化率各向异性参数对比研究,岩石在受力以后的磁化率各向异性参数 H , P , q 值等以及最大和最小磁化率主轴产状都发生了明显的变化,反映浅层次的构造变形过程对岩石磁组构有明显的影响。

2)在塔里木盆地北部地区,通过对不同地层样品的系统分析,其岩石磁化率各向异性参数高于相应的沉积磁组构参数的上限值。根据实际地质条件,认为构造作用产生的岩石塑性变形是影响其磁化率各向异性的主要因素,因而岩石的磁化率各向异性可以作为该区岩石应变的良好指示器,岩石的最小磁化率主轴方向与构造应力场的最大主压应力方位具有较好的一致性。

3)如何区分初始磁化率各向异性与构造磁化率各向异性?在怎样的岩石变形程度,岩石的磁化率量值椭球与应变椭球主轴才可相互对应?在多期构造变形地区,岩石的最小磁化率主轴反映的是哪个构造期次的应力场?这是利用磁化率各向异性恢复构造应力场时尚需进一步探讨的问题。

参考文献:

- 侯青,赵健,回春等.惠民凹陷构造应力场与油气运聚模拟分析[J]. 油气地质与采收率,2006,13(1):66~69,113
- 李淑恩,张绍辉,岳奎等.构造应力场数值模拟分析技术及其应用[J]. 油气地质与采收率,2001,8(6):46~48
- 项希勇,张树林,程本合等.沾化凹陷东部地区构造应力场分析及其应用[J]. 油气地质与采收率,2001,8(3):9~12
- Graham J W. Significance of magnetic anisotropy in Appalachian sedimentary rocks[A]. In:Steinhart J S,Smith T J, eds. The earth beneath continents, Geophysical Monograph Series 10[C]. Washington D C: American, Geophysical Union, 1966. 627~648
- Rathore J S, Becke M. Magnetic analyses in the Gail Valley (Garinthia, Austria) for the determination of the sense of movements along this region of the periadriatic Line[J]. Tectonophysics, 1980,69:349~368
- Borradaile G J, Tartning D H. The influence of deformation mechanisms on magnetic fabric in weakly deformed rocks[J]. Tectonophysics, 1981,77(1~2):151~168
- Hrouda F. Magnetic anisotropy of rock and its application in geology and geophysics[J]. Geophysical Surveys, 1982,5(2):37~82
- 吴汉宁. 岩石的磁性组构及其在岩石变形分析中的应用[J]. 岩石学报, 1988,4(1):94~98
- Borradaile G, Sarvas P. Magnetic susceptibility fabrics in slates: structural, mineralogical and lithological influences[J]. Tectonophysics, 1990,172:215~222
- Hrouda F, Hruskova I. On the detection of weak strain parallel to the bedding by magnetic anisotropy: a mathematical model study[J]. Studia Geophysica et Geodetica, 1990, 34: 327~341
- 阎桂林. 岩石磁化率各向异性在地学中的应用[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1996
- Borradaile G J, Henry B. Tectonic application of magnetic susceptibility and its anisotropy[J]. Earth Science Review, 1997, 42:49~93
- 陈柏林,李中坚,谢艳霞. 北京怀柔崎峰茶一琉璃庙地区岩石磁组构特征及其构造意义[J]. 地球学报, 1997,18(2):134~141
- 许顺山,陈柏林. 应用岩石磁性组构研究动力变形作用[J]. 地球学报, 1998,19(1):19~24
- 孟小红,田春志,梁江平. 利用岩石磁学研究古水流和古应力场方向的方法与应用[J]. 现代地质, 1999,13(2):184~189
- 张拴宏,周显强,刘喜方. 用磁化率各向异性研究构造变形的几个问题[J]. 矿物岩石, 1999,19(4):93~97