

剪切和摩擦滑动大模型的视电阻率 变化幅度和各向异性

陈 峰¹ 廖春庭² 安金珍¹

¹ 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

² 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

摘 要 用石英砂、河砂和水泥模压制成 $1\text{m} \times 1\text{m} \times 0.3\text{m}$ 的均匀和非均匀介质模型, 对模型进行剪切和摩擦滑动实验, 观测模型不同位置 and 不同方位的视电阻率变化幅度和各向异性特征. 均匀介质模型实验结果为: 电阻率变化与测线的位置有关, 距裂隙近的测线, 电阻率变化幅度大, 从百分之几到百分之几十; 距裂隙远的测线, 电阻率变化幅度小, 从百分之几到不变. 对于非均匀介质模型, 电阻率变化幅度要小一些, 最大也只有百分之几. 电阻率变化除与测线的位置有关外, 还与测线的方位有关, 同一测点不同方位的测线, 电阻率变化幅度不同, 有的差别很大. 剪切与摩擦滑动两种加载方式的电阻率变化幅度数量级相同. 裂隙穿过部位及其附近测点的电阻率变化各向异性主轴方位解与剪切和摩擦滑动的实际裂隙方位吻合较好.

关键词 岩石电阻率 地电阻率 视电阻率各向异性 剪切 摩擦滑动

文章编号 0001-5733(2003)05-0667-09 中图分类号 P319 收稿日期 2002-04-22, 2003-04-22 收修定稿

AMPLITUDE AND ANISOTROPY OF APPARENT RESISTIVITY CHANGE IN BIG MODELS DURING SHEAR AND FRICTIONAL SLIPPING

CHEN FENG¹ LIAO CHUNTING² AN JINZHEN¹

¹ School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

² Geomechanics Institutes of Territories Resources Ministry, Beijing 100081, China

Abstract Models of uniform and non-uniform media of $1\text{m} \times 1\text{m} \times 0.3\text{m}$ size are made with quartz sand and river sand blended with cement under mould pressure. The amplitudes and anisotropic features of apparent resistivity changing are measured at different positions and in different orientations on measured plane of the models during shear and frictional slipping. The results of experiments for the models of uniform media show that the resistivity change is related to the position of measurement array that consists of four electrodes. The amplitudes of the resistivity change are large ranging from several percent to tens percent for the arrays near cracks of shear and frictional slipping, and are small from several percent to zero for the arrays far from cracks. For the models of non-uniform media, the amplitudes of the resistivity change are smaller than that of the models of uniform media, which are only several percent at most. The resistivity change is related to the orientations of arrays besides the positions of arrays. The amplitudes of the resistivity change are different in four orientations at the same measuring point. Some differences of amplitudes are very large. The amplitudes of the resistivity change have the same order of magnitudes for the two loading manners of shear and frictional slipping. For the measuring points located in the zone which are close to cracks or penetrated by cracks, the directions of the four anisotropic main axes of the apparent resistivity change coincide very well with the real orientations of

基金项目 国家自然科学基金项目(49972095)和地震科学联合基金项目(102098).

作者简介 陈 峰, 男, 1945 年生, 北京大学地球物理系毕业, 从事地电前兆及其机理的实验研究工作. E-mail: ajz@pku.edu.cn

cracks produced by shear and frictional slipping.

Key words Electrical resistivity of rock, Geoelectric resistivity, Anisotropy of apparent resistivity, Shear, Frictional slipping.

1 引言

剪切和摩擦滑动是地壳介质受力和运动的主要方式之一,岩石力学对此做过大量实验研究,但有关岩石和模型的电阻率变化的剪切和摩擦滑动实验,却做得非常少. 美国 Brace 等^[1]在完整岩样破裂后继续实验,测定了岩样摩擦滑动时的电阻率变化,结果发现一旦断层形成,电阻率随应力的变化就很小. 王其允等^[2]进行了水饱和岩样的剪切和摩擦滑动电阻率变化实验,发现岩样在摩擦滑动时,电阻率有明显的变化. 国内学者在这方面做过一些很好的工作^[3,4],但很多有关方面没有开展. 作者在水饱和岩石小标本上做过一些直剪电阻率变化实验,发现其视电阻率变化形态没有压缩实验的平稳阶段,其上升幅度不超过 20%. 破裂时有前兆,幅度为百分之几. 剪切实验的破裂裂隙较单一,一个电阻率变化各向异性测点的 4 条测线,4 种组合的 4 个视电阻率变化各向异性主轴解趋向一致,且与实际破裂方向吻合,能直观地显示电阻率变化各向异性主轴解与岩样主破裂间的相互关系. 但小标本剪切实验存在一些缺陷,其一是不便于做摩擦滑动实验,其二是不便于观察不同位置测点的电阻率变化形态和各向异性特征,因此在小标本实验的基础上,本文开展了剪切和摩擦滑动大模型视电阻率变化的实验研究工作.

2 方法和资料处理

模型由模压制成,尺寸为 1m × 1m × 0.3m. 均匀模型:为 3 份石英砂混合 1 份水泥;不均匀模型:一半模型为 3 份石英砂混合 1 份水泥,另一半模型为 3 份河砂混合 1 份水泥. 模型强度约 10MPa/cm²,相对密度 1.7g/cm³. 为模拟地球分层结构,模型有分层结构,看到明显的层理面,电极布置在垂直层理面的平面上,以增强实验效果. 电极用铅圆柱体制成,直径为 5~10mm,长约 10mm. 电极埋设在模型的电极孔中,周围用石墨粉充填,然后将模型 6 个面涂上有弹性的绝缘胶. 每块模型上布设 68 个电极(见图 1),共组合成 7 个视电阻率变化各向异性测点

(见表 1),其中 5 个小极距测点观测 5 个不同位置的电阻率变化,2 个大极距测点观测较大范围和不同深度的电阻率变化. 采用对称四电极法,在每个视电阻率变化各向异性测点组合布设互呈 45° 的测线 4 条,另在模型上组合布设 3 条电剖面测线,这样在一块模型上共组合布设视电阻率测线 35 条. 采用两边约束中间对称直剪加载方式. 视电阻率采用由稳流源、超高阻抗数字电压表和 IBM 微机组成的自动测量系统进行测量. 为了减小电极极化效应,用方波供电,供电频率为 10Hz. 标本不加压时,电阻率多次测量的误差小于 2%. 实验过程中,可以在每次电阻率测量的间隙,显示各测点 4 条测线电阻率变化与应力的关系图,以便随时了解和调整实验的进程. 电阻率变化各向异性的计算方法见文献[5].

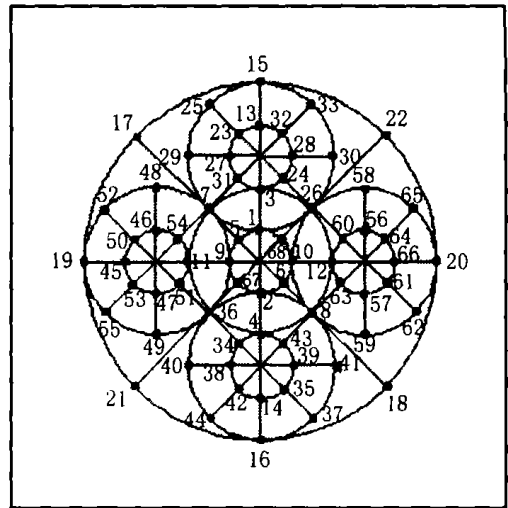


图 1 标本布极图

Fig. 1 Arrangement of electrodes

表 1 测线和测量功能组合

Table 1 The arrays and measuring function combinations of the model

测线 编号	各向异性 1 号测点				各向异性 2 号测点				
	电极编号				电极编号				
	A	B	M	N	测线 编号	A	B	M	N
1	3	4	1	2	5	1	15	3	13
2	7	8	5	6	6	25	26	23	24
3	11	12	9	10	7	29	30	27	28
4	36	26	67	68	8	7	33	31	32

续表

各向异性3号测点					各向异性6号测点				
测线 编号	电极编号				测线 编号	电极编号			
	A	B	M	N		A	B	M	N
9	2	16	4	14	21	15	16	3	4
10	36	37	34	35	22	17	18	7	8
11	40	41	38	39	23	19	20	11	12
12	44	8	42	43	24	21	22	36	26
各向异性4号测点					各向异性7号测点				
测线 编号	电极编号				测线 编号	电极编号			
	A	B	M	N		A	B	M	N
13	48	49	46	47	25	15	16	1	2
14	52	36	50	51	26	17	18	5	6
15	9	19	45	11	27	19	20	9	10
16	55	7	53	54	28	21	22	67	68
各向异性5号测点									
测线 编号	电极编号								
	A	B	M	N					
17	58	59	56	57					
18	26	62	60	61					
19	10	20	12	66					
20	8	65	63	64					

实验结果除对各向异性测点进行各向异性计算,求出第1测线方向与未来裂隙面走向的夹角 α_1 和视各向异性系数 α^* 值外,还做了3种图形.第1种图形是每个视电阻率变化各向异性测点的4条测线,4种组合的极角 α_1 与极距 $(\alpha^*)^2$ 的极坐标图.绘图方法是,从第1个点开始向第2个点连线,逐点依次连下去,图中最后一个点为临破裂前的一个测点(电阻率测值偏离太大,求不出各向异性解的情况除外).第2种图形是测线视电阻率与破裂应力关系图.第3种图形是常用的剖面图.因受篇幅限制,后两者文中未列出.

定义破裂应力 $f = (i / p) \%$,其中 i 为与视电阻率测量时间相对应的瞬时应力值, p 是卸压前的应力值;视电阻率随破裂应力的变化幅度 $s = [(s - s_0) / s_0] \%$,其中 s 为视电阻率瞬时测值, s_0 为加压前的视电阻率测值.

3 结果和分析

3.1 剪切实验

均匀介质 Big5 模型剪切实验视电阻率随破裂

应力变化的幅度值见表2.可见,电阻率变化幅度从百分之几到百分之几十,最大变化幅度为60.8%,25~35测线的变化幅度最大达到126.6%.

除与位置有关外,还与方向有关,同一个测点不同方向的测线上,不同,有的差别还很大.图2是Big5模型剪切破裂的照片.由图2可见,裂隙并没有从模型中间贯通,上部裂隙偏左,下部裂隙居中.由此可见,电阻率变化最显著的特点是,距离裂隙近的测点(1~3号测点)大;距离裂隙远的测点(4,5号测点)小.1~3号测点,最大达60.8%,最小也有4.1%;而4号测点,最大只有3.7%;5号测点,最大仅1.5%,几乎不变.其他几块剪切实验模型也有类似结果(见表3和图3).图3是非均匀介质 Big8 模型的剪切破裂照片,剪切力垂直模型石英砂和河砂胶接的层理面.裂隙贯通模型中偏左,1~4号测点离裂隙近,5号测点距裂隙远.图上有一标号是9,这是因为照像时,Big5模型剪切标号为5,摩擦滑动标号为6,所以后面的模型标号在模型号后加1.



图2 Big5模型剪切破裂照片

Fig.2 Photo of shear fracture of model Big5



图3 Big8模型剪切破裂照片

Fig.3 Photo of shear fracture of model Big8

多数剪切实验的裂隙比较单一(Big5模型除

表 2 Big5 模型剪切实验视电阻率随破裂应力的变化幅度(%)

Table 2 The amplitude values of apparent resistivity change versus fracture stress of model Big5 during shear(%)

各向异性 1 号测点					各向异性 4 号测点						
测线 编号		破裂应力				测线 编号		破裂应力			
		57.1 %	71.4 %	85.7 %	100 %			57.1 %	71.4 %	85.7 %	100 %
1	s	- 56.7	- 56.4	- 55.5	- 55.3	13	s	- 3.4	- 3.0	- 2.1	- 3.0
2		45.3	46.1	49.4	47.4	14		0.3	- 0.3	- 0.5	0.1
3		42.4	43.5	45.7	44.0	15		2.3	3.0	3.7	3.1
4		41.7	41.9	44.7	42.5	16		0.7	1.0	1.2	0.7
各向异性 2 号测点					各向异性 5 号测点						
测线 编号		破裂应力				测线 编号		破裂应力			
		57.1 %	71.4 %	85.7 %	100 %			57.1 %	71.4 %	85.7 %	100 %
5	s	- 51.9	- 52.3	- 54.9	- 55.2	17	s	1.5	0.7	0.2	0.7
6		60.8	51.4	56.0	56.9	18		0.8	0.3	0.3	- 0.3
7		10.7	09.7	11.0	10.7	19		- 0.3	0.2	- 0.2	0.3
8		23.0	23.6	25.4	25.1	20		- 0.2	0.2	0.9	0.2
各向异性 3 号测点					各向异性 6 号测点						
测线 编号		破裂应力				测线 编号		破裂应力			
		57.1 %	71.4 %	85.7 %	100 %			57.1 %	71.4 %	85.7 %	100 %
9	s	6.1	4.1	5.4	5.0	21	s	30.1	30.3	34.9	35.8
10		34.3	34.4	35.4	33.0	22		37.6	36.1	37.6	36.6
11		36.3	36.3	39.1	35.3	23		50.5	49.5	52.0	52.9
12		33.8	33.8	36.3	32.9	24		52.1	52.6	56.0	53.9

注:负号表示幅度减小.

表 3 Big8 模型剪切实验视电阻率随破裂应力变化幅度(%)

Table 3 The amplitude values of apparent resistivity change versus fracture stress of model Big8 during shear (%)

各向异性 1 号测点					各向异性 4 号测点				
测线 编号		破裂应力			测线 编号		破裂应力		
		33.3 %	66.7 %	100 %			33.3 %	66.7 %	100 %
1	s	0.1	- 0.1	2.9	13	s	1.1	0.1	3.3
2		0.1	- 0.6	0.9	14		- 0.8	- 1.5	1.3
3		0.4	0.1	- 10.1	15		- 0.6	- 0.5	- 7.7
4		0.8	1.1	2.7	16		- 0.4	- 0.4	1.2
各向异性 2 号测点					各向异性 5 号测点				
测线 编号		破裂应力			测线 编号		破裂应力		
		33.3 %	66.7 %	100 %			33.3 %	66.7 %	100 %
5	s	1.1	- 0.1	7.2	17	s	- 0.3	0.6	0.3
6		- 0.9	- 1.3	- 3.5	18		0.2	0.3	- 0.1
7		- 0.7	- 0.7	- 4.0	19		- 0.2	- 0.6	1.1
8		- 0.7	0.7	5.2	20		- 0.1	0.2	0.6
各向异性 3 号测点					各向异性 6 号测点				
测线 编号		破裂应力			测线 编号		破裂应力		
		33.3 %	66.7 %	100 %			33.3 %	66.7 %	100 %
9	s	1.4	0.5	2.2	21	s	- 0.3	1.6	9.0
10		- 0.6	- 0.5	- 2.5	22		- 0.2	0.5	14.7
11		- 0.4	- 0.5	- 0.1	23		- 0.6	- 0.6	29.3
12		- 0.2	- 0.3	6.1	24		- 0.2	0.0	16.0

注:负号表示幅度减小.

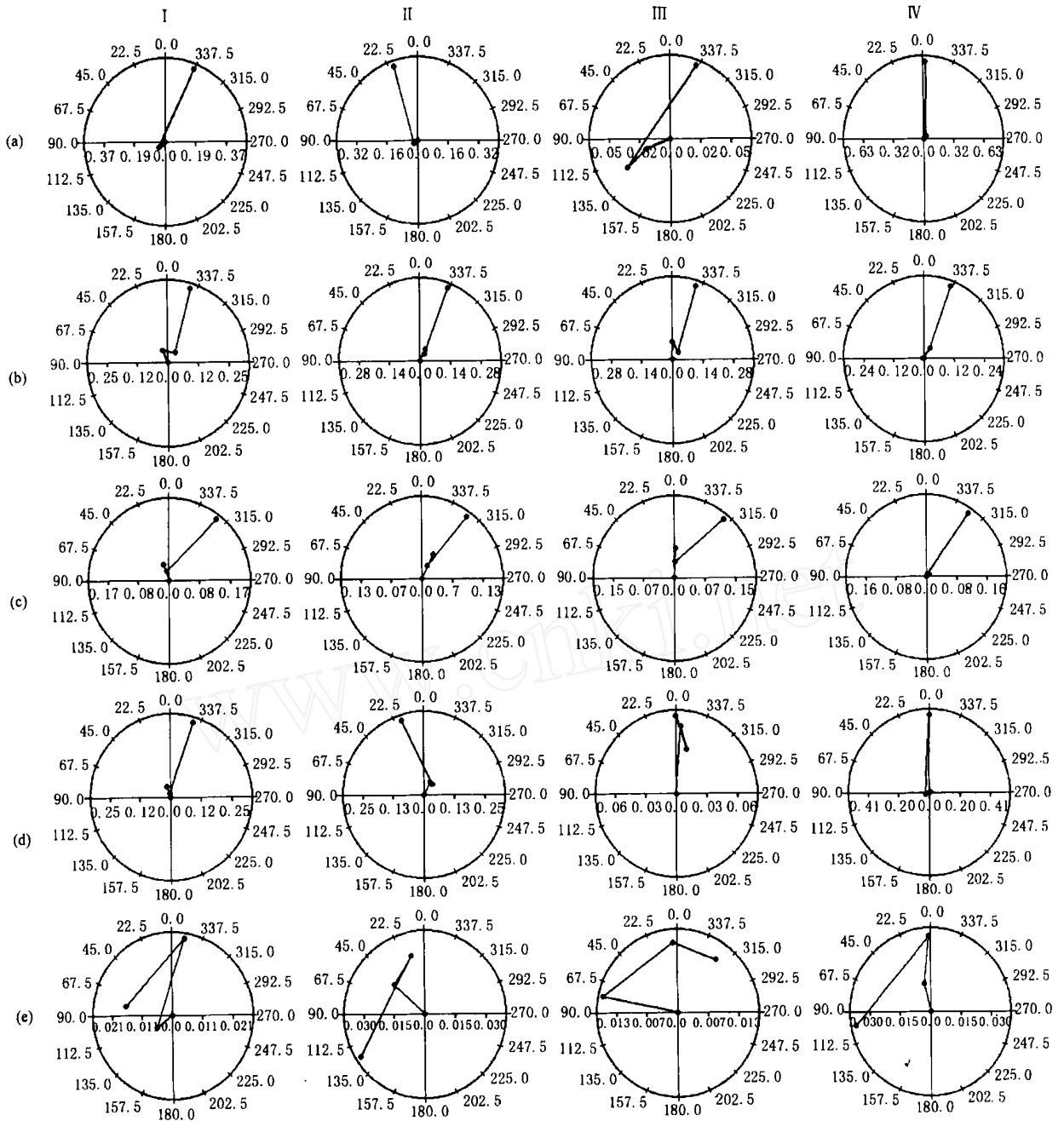


图4 Big8模型剪切实验视电阻率各向异性测点的4条测线,4种组合的 ρ_1 与 $(\theta)^2$ 图

测线组合:1,4,3; 测线组合:1,2,3; 测线组合:1,2,4; 测线组合:2,3,4.

(a)1号测点;(b)2号测点;(c)3号测点;(d)4号测点;(e)5号测点.

Fig. 4 Diagram of ρ_1 versus $(\theta)^2$ of the four arrays and the four combinations for the anisotropic measuring points of the apparent resistivity of Big8 model during shear

外),一个电阻率变化各向异性测点的4条测线,4种组合的4个视电阻率变化各向异性主轴解趋向一致,且与实际破裂方向吻合,见图4和图3.图4是Big8模型剪切实验视电阻率各向异性1~5号测点的4条测线,4种组合的 ρ_1 与 $(\theta)^2$ 图,图中第5号测点的电阻率变化各向异性主轴方向比较乱,是因

为第5号测点离裂隙较远的缘故.

3.2 摩擦滑动实验

摩擦滑动实验是在剪切实验产生断裂面后进行的,这又分两种情况,第一种情况是两端裂隙面不在一条直线上,两端裂隙的交汇处有一小段没有被剪断(Big5),这种情况裂隙在摩擦滑动前,要先剪断才

滑动,这种摩擦滑动称为有阻力摩擦滑动. 第二种情况是通常只有一个裂隙面的普通摩擦滑动 (Big8),为区别有阻力摩擦滑动,文中称这种摩擦滑动为无阻力摩擦滑动.

表 4 是 Big5 模型有阻力摩擦滑动实验视电阻率随破裂应力变化幅度. Big5 模型有阻力摩擦滑动实验,是在 Big5 模型剪切实验形成上下裂隙不贯通的基础上,重加约束力和中间直剪力,将位于第 1 号测点上部,覆盖第 2 号测点的两端裂隙交汇处的一小段剪断,再做摩擦滑动. 图 5 是 Big5 模型有阻力摩擦滑动裂隙错动照片. 由表 4、图 5 可见,有阻力摩擦滑动的 ρ_s 也很大,离摩擦滑动裂隙近的 1~3 号测点,最大 ρ_s 达 92.3 %,一般也有百分之几到百分之几十的变化. 3 号测点离两裂隙交汇处很远,交汇处的一小段被剪断,对 3 号测点影响不大,表 4 中 3 号测点的电阻率变化,主要是摩擦滑动造成的. 离摩擦滑动裂隙远的 4,5 号测点,最大 ρ_s 也有 7.3 %. 这样的变化幅度算是比较大的. 而无阻力摩擦滑动实验的 Big8 模型, ρ_s 就没有这么大了,见

表 5 所示. 由图 1、表 1、图 3 和表 5 可见, Big8 模型 1~4 号测点离摩擦滑动裂隙近,这 4 个测点最大 ρ_s 为 7.6 %,而离摩擦滑动裂隙远的 5 号测点,最大 ρ_s 是 2.0 %.

由表 2 至表 5 可见,剪切和摩擦滑动两种加载方式的电阻率变化幅度数量级相同.



图 5 Big5 模型有阻力摩擦滑动裂隙错动照片
Fig. 5 Photo of crack dislocation of model Big5 during resistive frictional slipping

表 4 Big5 模型有阻力摩擦滑动实验视电阻率随破裂应力变化幅度(%)

Table 4 The amplitude values of apparent resistivity change versus fracture stress of model Big5 during resistive frictional slipping(%)

各向异性 1 号测点					各向异性 4 号测点						
测线 编号		破裂应力				测线 编号		破裂应力			
		70.0 %	80.0 %	90.0 %	100 %			70.0 %	80.0 %	90.0 %	100 %
1	s	35.1	72.1	83.1	92.3	13	s	- 7.1	- 2.0	- 1.6	- 0.8
2		- 37.8	- 17.1	- 6.3	14.6	14		- 2.4	- 2.2	- 1.1	- 0.6
3		- 39.5	- 24.0	- 14.3	9.6	15		- 7.3	- 7.1	- 5.2	- 4.1
4		- 40.6	- 23.3	- 13.1	11.1	16		- 3.6	- 6.8	- 6.4	- 3.4
各向异性 2 号测点					各向异性 5 号测点						
测线 编号		破裂应力				测线 编号		破裂应力			
		70.0 %	80.0 %	90.0 %	100 %			70.0 %	80.0 %	90.0 %	100 %
5	s	22.1	22.6	30.3	16.8	17	s	- 1.3	1.9	- 1.3	0.6
6		6.3	24.0	30.3	53.8	18		- 3.7	- 7.3	- 2.1	0.2
7		- 24.5	- 21.0	- 19.0	- 5.3	19		0.2	- 1.7	- 1.5	1.9
8		- 25.2	- 21.3	- 19.6	- 7.1	20		- 4.8	- 1.8	0.4	1.5
各向异性 3 号测点					各向异性 6 号测点						
测线 编号		破裂应力				测线 编号		破裂应力			
		70.0 %	80.0 %	90.0 %	100 %			70.0 %	80.0 %	90.0 %	100 %
9	s	- 16.2	5.7	17.5	38.4	21	s	- 20.1	- 21.6	- 23.6	- 4.5
10		- 31.4	- 14.9	- 6.8	25.9	22		- 23.9	- 18.4	- 12.5	15.1
11		- 29.3	- 17.6	- 7.3	15.2	23		- 28.4	- 22.4	- 15.2	13.4
12		- 33.4	- 17.3	- 8.1	16.5	24		- 32.3	- 26.8	- 19.5	4.3

注:负号表示幅度减小.

表5 Big8模型无阻力摩擦滑动实验视电阻率随摩擦滑动应变变化幅度(%)
Table 5 The amplitude values of apparent resistivity change versus strain of frictional slipping during resistless frictional slipping for model Big8(%)

各向异性1号测点				各向异性4号测点					
测线 编号		摩擦滑动应变			测线 编号		摩擦滑动应变		
		1000 μ	1200 μ	1500 μ			1000 μ	1200 μ	1500 μ
1	s	0.3	-0.1	-0.2	13	s	-1.6	-1.6	-3.2
2		0.3	-0.3	0.9	14		-0.1	-3.1	0.1
3		1.1	0.4	-3.6	15		0.3	0.4	-2.8
4		-0.6	0.7	1.1	16		-2.2	-1.3	1.6
各向异性2号测点				各向异性5号测点					
测线 编号		摩擦滑动应变			测线 编号		摩擦滑动应变		
		1000 μ	1200 μ	1500 μ			1000 μ	1200 μ	1500 μ
5	s	-0.7	-0.2	0.2	17	s	-2.0	-1.2	-1.5
6		0.5	0.1	-2.2	18		-0.6	-0.9	-0.9
7		0.6	0.5	-2.1	19		1.0	1.8	1.4
8		-0.5	0.2	0.7	20		0.3	0.3	0.0
各向异性3号测点				各向异性6号测点					
测线 编号		摩擦滑动应变			测线 编号		摩擦滑动应变		
		1000 μ	1200 μ	1500 μ			1000 μ	1200 μ	1500 μ
9	s	0.1	0.4	1.1	21	s	-0.3	-0.6	0.3
10		0.8	-1.0	7.6	22		-1.2	-2.3	-3.6
11		0.6	-1.3	-5.7	23		-0.8	-4.4	-3.6
12		-1.4	1.1	4.0	24		-0.8	-2.4	-2.6

注:负号表示幅度减小。

图6是Big5模型有阻力摩擦滑动实验视电阻率各向异性1~5号测点的4条测线,4种组合的 ρ_1 与 $(\rho_1/\rho_2)^2$ 图。由图5和图6可见,被裂隙穿过的1~3号测点的电阻率变化各向异性主轴方位与实际摩擦滑动裂隙方位基本一致,而离摩擦滑动裂隙较远的4、5号测点,则对应不好。Big8模型无阻力摩擦滑动实验视电阻率各向异性1~5号测点的4条测线,4种组合的 ρ_1 与 $(\rho_1/\rho_2)^2$ 图与图4相似,离摩擦滑动裂隙近的1~4号测点,电阻率变化各向异性主轴方向与实际摩擦滑动裂隙方向对应较好,离摩擦滑动裂隙远的5号测点,却对应不好。

Big5和Big8模型的6、7号电阻率变化各向异性测点变化特征与1~5号测点相同。

4 讨论

4.1 在摩擦滑动过程中,电极的位置变化影响

岩石和模型在剪切和摩擦滑动过程中,电阻率变化是由于岩石和模型在剪切和摩擦滑动过程中引起的介质水网络导电通路的变化。在摩擦滑动过程中,由于电极的位置变化,使装置系数 K 发生变化,

也会引起摩擦滑动过程中的电阻率变化,当模型尺寸大,测线电极极距较大,模型摩擦滑动时电极较小的位移不会引起较大的装置系数 K 的变化。实际计算Big8模型摩擦滑动位移1500 μ ,所引起的装置系数相对变化为1.2%,没超出测量误差范围。该模型实验表明,裂隙面在摩擦滑动时,电阻率的变化主要不是电极移动造成的。在裂隙摩擦滑动位移较大时,由于电极的位置变化,使装置系数 K 发生变化,所引起的摩擦滑动过程中的电阻率变化不能忽略,但对电阻率变化各向异性测点来讲,这种变化仍然是各向异性的,它同样反映裂隙的摩擦滑动变化。在不考虑理论是否成立的前提下,仍用本文计算方法,计算由电极位移和摩擦滑动混合引起的电阻率变化各向异性主轴方向,看是否与实际裂隙方位一致。实验中,Big5模型裂隙面滑移约3cm,这与模型裂隙面刚开始滑移时的实测值计算结果一致,见图5、图6所示。说明:不论是裂隙面摩擦滑动引起的水网络导电通路的变化,或是测线电极的位移变化,所产生的电阻率变化各向异性,都能用本文方法来确定裂隙摩擦滑动的方位。实验中Big8模型剪切和无阻力摩擦滑动两种加载方式的电阻率变化幅度,

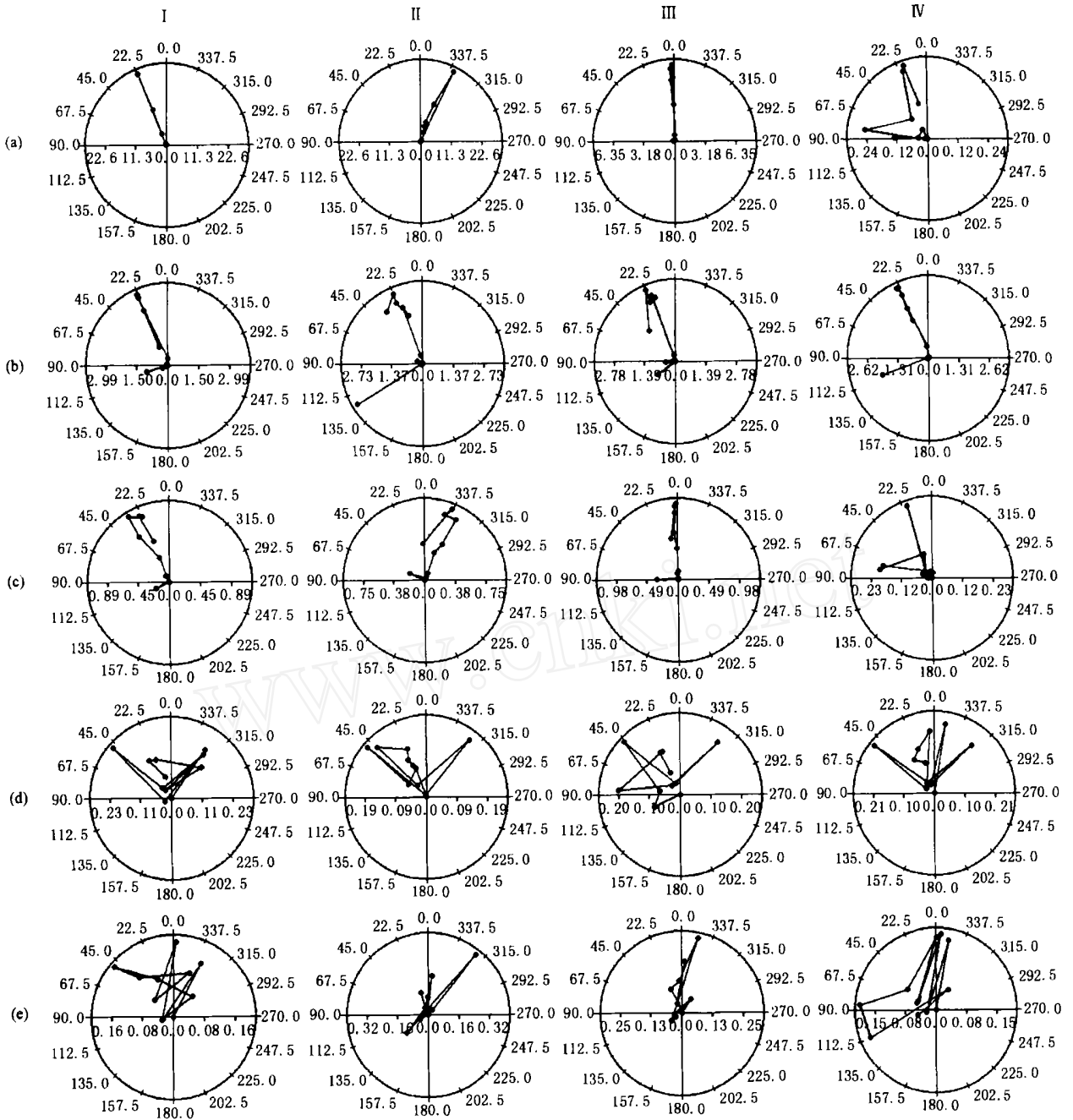


图 6 Big5 模型有阻力摩擦滑动实验视电阻率各向异性测点的 4 条测线, 4 种组合的 ρ_1 与 $(\theta)^2$ 图

Fig. 6 Diagram of ρ_1 versus $(\theta)^2$ of the four arrays and the four combinations for the anisotropic measuring points of apparent resistivity of model Big5 during resistive frictional slipping (图注同图 4)

都比 Big5 模型的小,可能与 Big8 模型材料不均匀有关,相应地使模型电阻率不均匀,也使模型力学性质不均匀,造成模型强度降低. 虽然 Big8 模型剪切和无阻力摩擦滑动的电阻率变化幅度,比 Big5 模型剪切和有阻力摩擦滑动的电阻率变化幅度小许多,但也有百分之几,超出了测量误差范围,足可以被观测到.

4.2 非均匀介质的影响

Big8 模型的 2 号测点布设在 3 份石英砂混合 1 份水泥的半个模型上; 3 号测点布设在 3 份河砂混合 1 份水泥的另半个模型上; 1、4、5 号测点跨越两个半模型的胶接层界面. 虽然 Big8 是非均匀介质模型,但 Big8 的 2、3 号测点各自分别布设在均匀介质上,不受非均匀介质的影响. 1、4、5 号测点垂直层理

面的测线与平行层理面的测线电阻率原始测量值相差约 7%。层理面对每条测线的影响,可以等效为边界面的影响进行计算^[6]。由于在整个实验过程中,层理面不改变,层理面对每条测线的影响是个恒数,在资料处理时,采用电阻率测量值的相对值,可以消除层理面的影响。因此,对电阻率测量值的变化部分,仍可以用文献[5]的方程进行近似计算。从实验结果可以看到,1、4、5号测点的结果与2、3号测点的结果一致,非均匀介质的影响不大。

5 结 语

本实验用测量介质视电阻率的方法,观测模型在剪切和摩擦滑动过程中的视电阻率变化。从实验结果可见,距剪切和摩擦滑动裂隙近的测点,视电阻率变化幅度大,这表明视电阻率变化幅度与介质剪切和摩擦滑动的裂隙部位有关。另外,从介质在剪切和摩擦滑动过程中的视电阻率变化各向异性主轴方向与剪切和摩擦滑动的裂隙方向一致的特点,可以通过观测视电阻率变化各向异性,探测介质剪切和摩擦滑动的裂隙方位。观测视电阻率变化各向异性还能探测裂隙的部位,因为只有裂隙及其附近的测点,每个测点的4个电阻率变化各向异性主轴方向才趋向一致。视电阻率变化各向异性观测方法,从原理上避开地质体最复杂、最难确定的岩体破裂受力状态与受力方式问题,直接把岩体受力致裂电阻率变化的各向异性与岩体裂隙扩展的水网络导电通路变化相联系,突出岩体受力后在介质的薄弱部位,或受力最大部位(这些部位往往是隐伏的,不易被觉察)产生的电阻率变化各向异性。它与其他把介质的某一物理量与介质受力直接相联系来研究介质的破裂方法是不同的。电阻率方法是无损探测,它可以探测地质体一定的范围和深度,特别在探测隐伏裂隙的活动方面有显著优势。多年来,电阻

率在动态监测方面没有广泛发挥作用,最大的困难在于它容易受到刮风、下雨等自然因素的干扰。本文采用的电阻率变化各向异性计算方法,有很强的抗系统干扰的能力^[5],能消除测量中刮风、下雨等自然因素的干扰对计算结果的影响。相信对该方法的深入研究,能使该方法在地质灾害和地质工程等动态监测中发挥重要作用。

参考文献

- [1] Brace W F, Orange A S. Electrical resistivity changes in saturated rocks during fracture and frictional sliding. *J. Geophys. Res.*, 1968, **73**: 1433 ~ 1444
- [2] WANG Chiyuen, Sundaram P N, Godan R E. Electrical resistivity changes in rocks during frictional sliding and fracture. *Pure Appl. Geophys.*, 1978, **116**: 717 ~ 731
- [3] 张天中,华正兴,徐明发. 1.2 千巴围压下岩样破裂和摩擦滑动过程中电阻率变化. *地震学报*, 1985, **7**(4): 428 ~ 433
ZHANG Tianzhong, HUA Zhengxing, XU Mingfa. Electrical resistivity changes in rock samples during fracture and frictional sliding at 1.2 KB confining pressure. *Acta Seismologica Sinica*, 1985, **7**(4): 428 ~ 433
- [4] 陆阳泉,钱家栋,刘建毅. 砂岩在摩擦滑动中的电阻率变化及其在地震预报中的应用. *西北地震学报*, 1988, **10**(3): 51 ~ 56
LU Yangquan, QIAN Jiadong, LIU Jianyi. Resistivity changes in the frictional sliding experiments of sandstone samples and their application in the study of earthquake prediction. *Northwestern Seismological Journal*, 1988, **10**(3): 51 ~ 56
- [5] 陈 峰,修济刚,安金珍等. 岩石电阻率变化各向异性与微裂隙扩展方位实验研究. *地震学报*, 2000, **22**(3): 310 ~ 318
CHEN Feng, XIU Jigang, AN Jinzhen, et al. Research on dependence of resistivity changing anisotropy on microcracks extending in rock with experiment. *Acta Seismologica Sinica*, 2000, **13**(3): 331 ~ 341
- [6] 陈 峰,安金珍,廖椿庭. 原始电阻率各向异性岩石电阻率变化的方向性. *地球物理学报*, 2003, **46**(2): 271 ~ 280
CHEN Feng, AN Jinzhen, LIAO Chunting. Directional characteristics of resistivity changes in rocks of original resistivity anisotropy. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2003, **46**(2): 271 ~ 280