

# 煤镜质组反射率光性组构变形实验研究<sup>\*</sup>

姜 波 金法礼 周 强 王文侠

(中国矿业大学 徐州 221008)

**摘要** 不同煤级煤的高温高压实验表明,在温、压和差异应力作用下,煤镜质组反射率值和各向异性都有一定程度增加,变形越强烈,增加越明显,尤其在中煤级中、晚期阶段更是如此。在变形过程中,反射率主轴将发生有规律的偏转,变形越强烈,最小反射率主轴越接近于最大挤压应力方向。随着变形的增强,镜质组反射率椭球由单向伸长型向压缩型转化。

**关键词** 煤 镜质组 反射率 各向异性 应变 实验研究

**中国图书资料分类法分类号** P585

**作者简介** 姜波 男 39 岁 副教授 硕士 构造地质

## 1 引言

煤镜质组各向异性组构在煤田构造研究中的应用已受到人们的普遍重视,并且取得了一定的成果。王文侠<sup>[1,2]</sup>在湖南涟源煤田构造研究中首先运用煤镜质组反射率进行了构造应力场和有限应变分析。其后,在福建、安徽、江苏、广东、京西及河北等地的煤田构造研究中都取得了较好的效果<sup>[3,4]</sup>。这些研究无疑促进了对煤变形特征的认识,但对于煤的微观变形机理还知之甚少,对变形条件和影响因素等方面还远没有达到共识,主要原因是目前缺少足够的煤变形机理的实验研究。

迄今为止,有关煤的高温高压实验,国际上仅见 Bastin 等<sup>[5]</sup>一个煤样( $R_{o,max} = 4.9\%$ )共 4 个样品的实验报导,我国周建勋等选择了  $R_{o,max}$  分别为 0.67%、3.41%和 4.9%的 3 种煤级的样品进行了高温高压实验<sup>[6]</sup>。这些研究成果虽然对煤变形的微观机理有了一定的认识,但对我国广泛分布的烟煤系列尚缺少必要的实验工作。本文通过中高级煤的高温高压实验,探讨了不同温压及应力作用下煤镜质组光性组构变化特征及其影响因素。

## 2 样品及实验条件

### 2.1 实验样品

实验样品的煤级为肥煤—无烟煤,镜质组最大反射率  $R_{o,max}$  变化范围为 0.97%~4.11%共 5 个样品,分别为徐州姚桥肥煤( $R_{o,max} = 1.74\%$ )、峰峰肥煤( $R_{o,max} = 0.97\%$ )、淮北海孜矿瘦煤( $R_{o,max} = 1.74\%$ )、阳泉贫煤( $R_{o,max} = 2.36\%$ )和焦作无烟煤( $R_{o,max} = 4.11\%$ )。为了研究在不同温、压条件下,不同应力作用对煤变形的影响,每个样品均制作 4~5 个试样。

### 2.2 实验装置及实验条件

#### 2.2.1 实验装置

实验是在中南工业大学地质系高温高压岩石力学实验室进行的,实验设备可以分为加热、水冷和三轴压力模具 3 个系统。主体为活塞圆筒式固体介质三轴高温高压压力模具,该装置是在 Griggs 设计原理的基础上,由中国科学院贵阳地球化学研究所加以改进的,可以进行 1 000 °C 以下,围压 0.5~1 GPa,轴压 1~3 GPa 的高温高压三轴实验。

#### 2.2.2 实验条件

实验条件主要包括围压、温度和轴向应力等并测定煤的应变和应变速率等参数。

a. 温度 对煤化作用影响较大的主要是温

<sup>\*</sup> 煤炭科学基金资助课题

度,温度的增加使得煤化作用程度提高,随着岩石流变律和变形机制研究的逐步深入,人们注意到相同机制下升高温度与延长时间对于岩石蠕变的等效性,从而形成了温度补偿时间的概念(王绳祖,1988)。但是对于煤这种特殊的可燃岩石,显然温度的提高对其物理结构、化学成分等有重要影响。因此,应该选取适当的温度,才能保证实验的顺利进行和更接近于实际情况。根据本次实验样品的特点,将实验温度设置为  $200\sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,其中 1 号样(肥煤)  $200\sim 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,2 号样(无烟煤)  $400\sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,3 号样(肥煤)  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,4 号样(瘦煤)  $350\sim 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,5 号样(贫煤)  $350\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

**b. 围压** 如果按煤赋存的实际围压进行实验,在高应变速率的情况下,将迅速产生破裂,改变其物理性质,达不到实验目的,因此,岩石高温高压实验通常采用高围压条件。有鉴于此,结合煤层赋存较浅及实验设备的能力等因素,我们在实验中设置的围压条件为  $250\sim 600\text{ MPa}$ 。

**c. 差异应力** 据研究,煤田构造的差异应力一般为数十到  $150\text{ MPa}$  左右<sup>[7,8]</sup>,但在这样的应力作用下,岩石的变形是缓慢的,应变速率仅为  $10^{-13}/\text{s}\sim 10^{-4}/\text{s}$ ,这样的应变速率在模拟实验中是无法实现的。因此,实验中采用较大的差异应力,变化范围为  $500\sim 900\text{ MPa}$ 。

**d. 应变** 太大的应变将会导致样品的破裂、破碎,会偏离实际情况太远,但太小的应变不足以使煤产生足够的变形,地质实际中某些变形特征则显示不出来。本次实验的应变选择为  $5\%\sim 33\%$ ,大部分样品的应变范围为  $10\%\sim 20\%$ 。

**e. 应变速率** 应变速率越低越接近于实际情况,但应变速率太低,不仅设备性能难以达到要求,而且在人力物力上也是很大的浪费。本次实验的应变速率为  $1.06\times 10^{-4}/\text{s}\sim 4.12\times 10^{-6}/\text{s}$ ,大部分实验样品的应变速率在  $1.11\times 10^{-5}/\text{s}$  以下。每个样品的实验时间为  $5\sim 12\text{ h}$ 。

### 3 反射率测定

实验中采用的方法是将煤层层理平行于轴向压力,因此反射率测定的 3 个切面分别选择为垂直于轴向压力(A1)、平行于层面(A2)和垂直于层理平行于轴向压力(A3)的 3 个互相垂直的切面(图 1)。

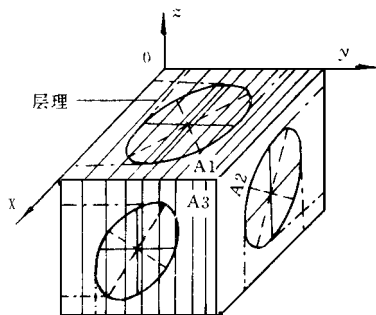


图 1 煤样切面及镜质组反射率椭圆示意图

反射率测定是在中国矿业大学资环学院 MPV2 显微光度计下测定的油浸反射率。每个切面上测量  $5\sim 8$  个点,每个测点上每间隔  $10^{\circ}$  测量一个反射率值,这样旋转物台  $360^{\circ}$  可测 36 个反射率值。从而可以得到不同切面上反射率值在不同方向上的变化情况。

## 4 有限应变椭球拟合

受构造变形的煤镜质组不同方向的反射率通常构成一个三轴不等的椭球体,可以将其类比于岩石有限应变椭球体,采用有限应变分析理论作有限应变椭球拟合,进行煤田构造的应力—应变分析。

### 4.1 应变椭圆拟合

在理想的情况下,每个测点所测得的 36 个数据应该在该切面上组成一个椭圆,但由于测量的误差或样品本身条件的限制,往往会出现不规则的形态。为了获得较为精确的椭圆曲线和各特征参数,对每个测点的 36 个数据要进行平面椭圆拟合。拟合的方法是运用循环座标法和 0.618 法根据自编计算机程序进行的。

拟合结果,每个切面上不同测点的反射率值变化一般小于  $20\%$ ,长轴方位的变化在  $15\%$  左右,说明同一切面反射率椭圆的几何形态是比较接近的,然后将同一切面上所有测点拟合的反射率值及长轴方位运用算术平均法求得切面上的应变椭圆特征值(表 1)。

表 1 中的长轴和短轴值分别为在各不同的切面(A1、A2、A3)上视最大和视最小反射率,长轴侧俯角则为视最大反射率在不同的切面上分别与  $x$ 、 $y$  和  $z$  轴正向的夹角,轴比为视最大反射率与视最小反射率的比值。

表 1 实验样品各切面应变椭圆参数 %

样品 编号	实验条件		应变速率 /s <sup>-1</sup>	应变 /%	椭 圆 参 数											
	温度 /℃	围压 /MPa			切面 A <sup>1</sup>				切面 A <sup>2</sup>				切面 A <sup>3</sup>			
					长轴	侧俯角	短轴	轴比	长轴	侧俯角	短轴	轴比	长轴	侧俯角	短轴	轴比
1-0					1.35	18 °	1.15	1.14	1.25	1 °	1.17	1.07	1.37	29 °	1.14	1.20
1-1	200	250	1.11×10 <sup>-5</sup>	11.33	1.13	351 °	1.12	1.01	0.93	17 °	0.88	1.06	1.04	69 °	0.97	1.20
1-2	250	350	1.25×10 <sup>-5</sup>	19.54	1.17	21 °	1.07	1.09	1.39	2 °	1.36	1.02	1.24	16 °	1.06	1.17
1-3	300	400	1.11×10 <sup>-5</sup>	10.60	1.26	2 °	1.25	1.01	1.19	21 °	1.17	1.02	1.41	30 °	1.15	1.22
1-4	350	500	9.53×10 <sup>-6</sup>	14.85	1.25	350 °	1.12	1.12	1.15	3 °	1.11	1.04	1.14	15 °	1.09	1.05
1-5	450	600	1.71×10 <sup>-5</sup>	20.02	0.88	345 °	0.82	1.07	1.49	10 °	1.35	1.10	1.11	16 °	0.92	1.11
2-0					3.94	106 °	2.57	1.53	3.83	5 °	2.59	1.48	4.03	0 °	4.00	1.01
2-1	400	450	1.73×10 <sup>-5</sup>	29.06	3.73	344 °	3.65	1.02	4.04	21 °	2.40	1.68	3.79	32 °	2.39	1.58
2-2	500	550	1.45×10 <sup>-5</sup>	23.43	3.56	0 °	3.53	1.01	3.46	16 °	2.55	1.36	3.73	27 °	2.49	1.50
2-3	650	600	4.12×10 <sup>-6</sup>	13.35	3.66	29 °	2.35	1.56	4.01	16 °	3.35	1.20	3.79	4 °	3.40	1.11
2-4	700	650	5.71×10 <sup>-6</sup>	13.69	3.64	28 °	2.51	1.45	3.51	4 °	2.39	1.47	3.64	6 °	3.41	1.07
2-6	550	300	8.62×10 <sup>-6</sup>	21.33	6.89	1 °	6.60	1.04	4.39	10 °	3.27	1.34	5.97	17 °	4.57	1.31
3-0					0.67	350 °	0.60	1.12	0.55	8 °	0.52	1.06	0.73	17 °	0.65	1.14
3-4	300	350	9.26×10 <sup>-6</sup>	12.20	0.74	25 °	0.68	1.09	0.72	10 °	0.68	1.06	0.70	2 °	0.65	1.08
4-0					1.52	355 °	1.36	1.12	1.50	10 °	1.45	1.03	1.49	29 °	1.32	1.13
4-1	350	400	6.00×10 <sup>-6</sup>	9.00	1.67	13 °	1.53	1.09	1.26	3 °	1.22	1.03	1.32	36 °	1.20	1.10
4-2	400	450	1.28×10 <sup>-5</sup>	18.08	1.83	31 °	1.20	1.53	1.43	3 °	1.28	1.12	1.44	25 °	1.30	1.11
4-3	500	500	1.08×10 <sup>-5</sup>	14.53	1.56	4 °	1.50	1.04	1.37	2 °	1.30	1.05	1.28	27 °	1.11	1.15
4-4	500	500	4.60×10 <sup>-6</sup>	5.80	1.57	19 °	1.48	1.06	0.94	15 °	0.89	1.06	0.81	13 °	0.53	1.52
4-5	550	600	6.63×10 <sup>-6</sup>	15.67	1.60	25 °	1.47	1.09	1.34	20 °	1.23	1.09	1.51	29 °	1.31	1.15
5-0					2.29	0 °	2.00	1.15	2.00	2 °	1.20	1.07	2.30	13 °	1.78	1.29
5-3	350	550	5.83×10 <sup>-6</sup>	9.04	2.38	18 °	1.99	1.20	2.46	35 °	2.06	1.19	2.48	5 °	1.84	1.34
5-4	400	400	1.52×10 <sup>-5</sup>	25.60	2.76	30 °	2.33	1.18	2.62	25 °	2.00	1.31	2.57	6 °	2.02	1.27
5-6	500	450	2.01×10 <sup>-5</sup>	33.20	2.31	6 °	2.18	1.06	1.74	4 °	1.69	1.03	2.67	3 °	2.08	1.28

从表 1 试样的二维应变椭圆特征, 可见在高温高压及差异应力作用下, 样品镜质组反射率变化总体呈增加趋势。随着反射率的增高, 不同切面反射率各向异性增加虽不十分明显, 但视最大反射率轴的旋转却很强烈, 共同的特征是向着与最大挤压应力垂直的方向偏转。旋转角度大者可达 70° 以上, 这说明在应力作用下, 镜质组反射率的长短轴方位与应力作用的方向具有良好的对应关系。

4.2 反射率椭球拟合

根据 3 个互不平行的切面上的反射率椭圆, 采用有限应变分析中的三维椭球拟合技术, 可较为精确地求出各样品反射率椭球的形态特征及其主轴产状, 拟合结果如表 2 所示。

5 应变椭球参数分析

5.1 反射率值

在高温高压及应力作用下, 各种级别煤的镜质组最大反射率均有不同程度的提高, 仅 1-1 号样较

原始煤样略有减小, 这一例外可能是某种特殊原因所造成的, 也可能是受测量精度的影响所致。

1 号样品的最大反射率一般由 1.44% 增大至 1.50% 以上, 最大为 1.57%, 平均增大 7% 左右。2 号样品的最大反射率平均增大 8% 左右。只有 2-6 号样增大较多, 可达 16%, 该样品在实验过程中产生和释放气体, 对反射率可能有一定的影响。3 号样品唯一的一个试样最大反射率增加了 9%。4 号样品平均增大 14%, 而 5 号样品的最大反射率平均增大 15%。

这些数据充分表明在高温高压下, 差异应力作用确实可以使煤镜质组反射率增大, 即相应地使煤级提高。但不同煤级的样品增大的程度是不同的, 从实验结果来看, 瘦、贫煤反射率增加较显著, 而肥煤和无烟煤相应增加较小, 一般在 10% 以下。

5.2 反射率主轴的偏转

在高温高压及轴向应力作用下, 反射率主轴的产状将发生一定的变化。表 2 中 1 号样品的最大反

表 2 煤镜质组反射率椭圆拟合结果

%

样号	最大反射率		中间反射率		最小反射率		双反 射率	$x/y$	$y/z$	$x/z$	富林参 数/K
	值	产状	值	产状	值	产状					
1-0	1.44	157°∠48°	1.20	323°∠62°	0.97	304°∠35°	0.47	1.20	1.24	1.48	0.97
1-1	1.25	295°∠35°	1.18	85°∠88°	1.11	195°∠35°	0.14	1.06	1.06	1.13	1.00
1-2	1.57	345°∠24°	1.23	240°∠56°	1.14	143°∠44°	0.43	1.29	1.07	1.38	1.21
1-3	1.50	66°∠42°	1.20	90°∠90°	0.75	340°∠57°	0.75	1.25	1.60	2.00	0.78
1-4	1.55	251°∠45°	1.50	56°∠58°	1.31	160°∠62°	0.24	1.03	1.15	1.18	0.89
1-5	1.55	12°∠34°	1.38	22°∠36°	1.18	31°∠55°	0.37	1.12	1.17	1.32	0.96
2-0	4.26	124°∠69°	2.49	231°∠41°	1.59	205°∠34°	2.67	1.71	1.57	2.68	1.09
2-1	4.45	218°∠34°	1.98	317°∠75°	1.15	46°∠61°	3.30	2.25	1.72	3.87	1.31
2-2	4.79	253°∠36°	3.58	291°∠80°	2.94	38°∠56°	1.85	1.43	1.22	1.59	1.17
2-3	4.55	40°∠64°	3.29	291°∠80°	2.38	38°∠56°	2.17	1.38	1.38	1.92	1.00
2-4	4.69	315°∠50°	3.14	230°∠89°	1.66	137°∠40°	3.03	1.49	1.90	2.83	0.78
2-6	7.13	140°∠21°	4.26	283°∠77°	3.15	355°∠64°	3.98	1.67	1.35	2.55	1.24
3-0	0.77	207°∠48°	0.74	225°∠49°	0.52	355°∠64°	0.25	1.04	1.42	1.48	0.73
3-4	0.80	151°∠11°	0.74	32°∠11°	0.65	62°∠89°	0.15	1.09	1.13	1.23	0.89
4-0	1.51	151°∠43°	1.31	281°∠64°	1.20	23°∠38°	0.31	1.15	1.09	1.26	1.06
4-1	1.72	225°∠22°	1.58	102°∠83°	1.33	15°∠69°	0.39	1.09	1.19	1.29	0.92
4-2	1.91	230°∠1°	1.51	125°∠14°	0.61	49°∠76°	1.30	1.26	2.47	3.13	0.51
4-3	1.84	122°∠28°	1.65	340°∠63°	1.60	49°∠76°	0.24	1.12	1.03	1.15	1.09
4-4	1.64	17°∠40°	1.24	344°∠42°	1.01	85°∠79°	0.65	1.32	1.23	1.62	1.07
4-5	1.52	32°∠29°	1.33	295°∠84°	1.07	268°∠60°	0.45	1.15	1.24	1.43	0.93
5-0	2.40	209°∠49°	2.00	106°∠74°	1.42	19°∠44°	0.89	1.20	1.41	1.69	0.85
5-3	2.51	147°∠42°	1.84	50°∠48°	1.44	235°∠47°	1.07	1.36	1.20	1.74	1.06
5-4	2.98	327°∠39°	2.27	151°∠40°	1.52	236°∠81°	1.46	1.31	1.49	1.96	0.88
5-6	2.81	17°∠28°	2.61	274°∠83°	1.83	236°∠81°	0.98	1.08	1.43	1.54	0.76

射率主轴原始产状为 157°∠48°;变形后变得比较平缓,倾角一般偏转了 10°以上,最大可达 24°(1-2 试样),1-5 号试样为 14°;这些试样的应变均较大。应变较小的样品,如 1-1,1-3 及 1-4 等试样相应地最大反射率轴偏转较小。这一现象说明变形的强弱是影响反射率轴偏转的重要因素。有的试样虽然相对的温压条件较高,但应变较小,仍不能引起较大的反射率轴的偏转。最小反射率轴的倾角一般是变大,变形越强烈,最小反射率轴则越接近于最大挤压应力方向。1 号样品中,最小反射率轴变化最大者可达 27°;最小反射率倾角的变化一般有随实验条件增高而增大的特征,即与变形条件是一种正相关关系。

2 号样品煤级较高,与 1 号样品变化规律类似,但最大反射率轴的偏转角度较大,最大可达 48°(2-6 试样)。另外,2-1 及 2-2 号试样的应变较大,分别为 29.06%和 23.43%,偏转角分别高达 35°和 33°。而其它应变较小的试样,偏转角度则相对较小,一般小

于 20°;2-3 号试样仅偏转了 5°;这也说明了最大反射率轴的偏转与应变强度密切相关。最小反射率轴的偏转与最大反射率轴类似,变形越强,偏转的越大,如 2-1 及 2-6 试样最小反射率轴的偏转角度可以达到近 30°;2-2 号试样的最小反射率轴的偏转也可达到 22°;其它样品一般小于 20°;有的仅 6°(2-4 试样)。3 号样品反射率轴的变化相当显著,最小反射率轴的偏转高达 69°。4 号及 5 号样品反射率主轴的变化与上述特征类似(表 2)。

以上实验结果充分说明了高温高压条件下的定向应力作用确实可以使镜质组光性组构产生有规律的变化。镜质组光率体的主轴偏转规律与野外地质实际所得出反射率主轴与应力之间的关系是较为吻合的。虽然最小反射率主轴并不是严格地平行于最大挤压应力,但在应力持续缓慢作用煤的变形不断积累的情况下,最小反射率轴则不断向最大挤压应力方向偏转,二者的夹角不断变小,而最大反射率则

向着与最大挤压应力相垂直的方向偏转。

### 5.3 应变分析

表 2 中 1 号样品原始样的富林参数为 0.97, 当在温压条件都不很高时, 分别变为 1.00 和 1.21, 即由平面应变转化为单向伸长的缩颈型变形, 伸长的方向与轴向压力夹角达  $66^\circ$ ; 这时并未与主压应力完全垂直。随着温压条件的增高, 轴向压力也不断增大, 促使变形由缩颈型向压扁型转化, 即由单向伸长逐渐转化为单向压缩, 镜质组光率体转化为压扁型, 并以  $K$  值小于 1 为特征。

应变类型除与温压条件及应力作用有关外, 还与变形强度有关。如 4 号样品中的 5 个试样, 既有  $K > 1$  的单向伸长型变形, 又有  $K < 1$  的压扁型变形。一般  $K > 1$  时, 试样的应变较小, 如 4-4 试样, 应变仅为 5.8%, 则  $K = 1.07$ 。4-3 试样则是一个例外, 其应变较大, 可达 14.53%, 但  $K = 1.09$ 。其它 3 个试样的  $K$  值均小于 1, 应变也都较大, 尤其是 4-2 号试样,  $K$  值最小, 为 0.51, 应变高达 18.08%。这说明随着应变的增大, 变形有由伸长型向压扁型转化的趋势。5 号试样具有类似的变形特征, 5-3 试样的应变为 9.04%,  $K = 1.06$ , 为单向伸长型, 5-4 及 5-6 试样的应变分别高达 25.60% 和 33.20%, 则  $K$  值分别为 0.88 和 0.76, 而且应变越大,  $K$  值越小。应变类型还与煤级有关, 如 2 号样品为无烟煤, 上述规律性就不很明显。伸长及压扁型与应变类型之间无特定的规律性。

上述研究结果表明, 煤镜质组光率体这种特殊

的应变标志物是可以用来进行煤田构造的应变类型、应变强度的分析和构造应力场研究的, 但进行高级煤研究时必须慎重, 其镜质组反射率光性组构特征与应力—应变的关系尚值得进一步的探讨。

实验工作得到彭恩生教授、高光明高级工程师和周建勋博士的帮助, 有限应变椭球的拟合得到宋现锋博士和朱开永副教授的帮助, 在此一并表示感谢。

### 参考文献

- 1 王文侠· 涟源坳陷煤反射率变化及其与深部断裂构造的关系· 煤田地质与勘探, 1988; (2): 20~25
- 2 王文侠· 涟源煤田无烟煤镜质组反射率异性组构与有限应变分析· 煤炭学报, 1991; 16(2): 91~102
- 3 王桂梁, 曹代勇, 姜波等· 华北南部逆冲推覆、伸展滑覆与重力滑动构造· 徐州: 中国矿业大学出版社, 1992
- 4 王桂梁, 刘登桃, 姜波等· 福建天湖山区推滑叠加型滑脱构造模式· 中国科学(B 辑), 1995; 25(1): 85~92
- 5 Bustin R M, Ross J V, Moffat I· Vitrinite anisotropy under differential stress and high confining pressure and temperature: preliminary observations· Inter· Jour· Coal Geol., 1986; 72: 734~765
- 6 周建勋等· 煤光性组构的实验变形研究· 科学通报(B 辑), 1993; 38(2): 147~150
- 7 姜波, 王桂梁等· 安徽省淮南煤田颍凤区推覆构造微观变形特征及其形成机制· 中国区域地质, 1992; (1): 60~67
- 8 姜波, 王桂梁· 论超微分析在煤田构造中的意义· 煤炭学报, 1993; (1): 78~86

(收稿日期 1997-07-16)

## EXPERIMENTAL RESEARCH ON DEFORMATION OF OPTICAL FABRIC OF COAL VITRINITE REFLECTANCE

Jiang Bo Jin Fali Zhou Qiang Wang Wenxia

(China University of Mining and Technology)

**Abstract** the experiments of coals with different ranks under high temperature and high pressure had been showed that under the action of high temperature and high pressure and differential stress, the reflectance values and anisotropies of coal vitrinites all increased in a certain degree. The more violent the coal deformed, the more they increased, especially in the middle and stages of the middle rank coals. In the deformation processes of the coals, the principal axes would rotated regularly. The minimum principal axes of vitrinite reflectances were gradually closed to the directions of the maximum compression stresses. The ellipsoids of the vitrinite reflectances were changed from the pattern of unidirectional extension to the one of unidirectional compression.

**Keywords** coal; vitrinite; reflectance; anisotropy; strain; experimental study