

从各向异性壳质组的发现 论壳质组在煤化过程中的光性演变

肖贤明

(中国科学院地球化学研究所, 广州分部)

毛鹤龄

(中国矿业学院北京研究生部)

提要 通过对我国几个典型煤田 300 多块煤光片的详细煤岩研究, 发现煤中存在一种高反射具强烈各向异性的有机显微组分, 有些保存了完好的壳质组外形和结构, 可称之为各向异性壳质组, 它广泛分布于长焰煤以上各煤级煤中, 它的发现进一步说明了壳质组的煤化历程是复杂的。有些在煤化过程中几乎全部裂解为烃类而消失, 绝大多数光性与共生镜质组同化, 还有一小部分转变成了各向异性壳质组。

关键词 壳质组 各向异性壳质组 煤级 煤化历程

第一作者简介 肖贤明 男 29岁 博士后 有机岩石学及有机地球化学

在煤化作用过程中, 煤有机显微组分变化最大, 规律性较难掌握的是壳质组。由于油气勘探与煤碳工业的需要, 近年来加强了对壳质组的研究, 认识了其在煤化过程中的一般演变规律。在泥炭与褐煤阶段, 生物地化因素占主导地位, 有稳定组之称的壳质组无论在光性上, 还是在化学性质上变化都不大。随温度压力渐居主导地位, 经第一次煤化跃变 ($R_m^0 \approx 0.50\%$), 壳质组的光性发生突变 (Slach, 1982) 其荧光颜色由绿、黄绿或亮黄白色转变为黄褐色, 甚至暗褐色, 相应荧光强度迅速降低。 λ_{max} 出现红移, Q 值增大, 伴随这些变化的是煤中有液态烃类产出, 渗出沥青质就是这种液态烃类留下的重质部分 (Teichmuller, 1973)。壳质组经第二次煤化跃变 ($R_m^0 \approx 1.30\%$) 后绝大多数观察不到荧光特征, 结束了排出液态烃的历史。其光学性质变得与共生镜质组越来越相近, 以致在反射光下难以分辨。这即所谓壳质组消失, 显微组分同化规律。

随着对煤变质研究的深入, 近年在国内外许多煤田中发现了一种高反射, 具强烈各向异性的有机显微组分。虽然对其形成的地质原因众说纷云, 但都不能否定其与壳质组密切相关的事实 (肖贤明等, 1988; Goodarzi, 1985, Jones, 1977)。笔者对我国几个典型煤田的 300 多块煤光片进行了详细煤岩研究, 发现这种具强烈各向异性的物质在中国各时代煤中有广泛分布。有些保存了完整的形态和完好的结构, 显然由壳质组直接转变而来, 可称之为各向异性壳质组。它的发现使我们对壳质组在煤化过程中的光性演变规律有了进一步的认识。

一、样品地质背景

样品主要取自豫西煤田与贵州盘县煤田,此外还收集了其它几个煤田煤样。从时代上,包括了石炭系至晚第三系的主要成煤期;在沉积环境方面,既有海陆交替相又有陆相含煤岩系;在煤变质类型上既有深成变质又有热变质;在煤级上包括褐煤至变无烟煤的所有煤种,样品详情见表1。

表1 研究样品地质特征一览表

Table 1 The geological characters of the investigating coals.

采样地点	煤 层	时 代	煤 种	含煤岩系沉积环境	煤变质作用类型
豫西煤田	山西组 P_1 煤	P_1^2	气煤至变无烟煤	海陆交替相	在深成变质的基础上普遍 达加了区域热变质作用
	下石盒子组 P_3 煤	P_1^1			
	太原组 C_3 煤	C_3			
贵州盘县	龙潭组 3号煤 12号煤	P_1^2	气煤至无烟煤	海陆交替相	同上
四川中梁山	龙潭组 K_1 煤	P_1^2	焦 煤	海陆交替相	深成变质作用
山西朔县	太原组 Y_{12} 煤	C_3	气 煤	海陆交替相	深成变质作用
江苏徐州	太原组 17号煤	C_3	气 煤	海陆交替相	深成变质作用
湖南涟邵	龙潭组 测水组	P_1^2 C_1	肥煤至无烟煤	海陆交替相	深成变质;达加了区域 热变质作用
大 同		J_{1-2}	长焰煤	陆 相	深成变质作用
抚 顺		E	长焰煤	陆 相	深成变质作用
舒 兰		E	褐 煤	陆 相	深成变质作用
百 色	白岗组	N	褐 煤	陆 相	深成变质作用
茂 名	那读组	N	褐 煤	陆 相	深成变质作用

二、各向异性壳质组的岩石学特征

在煤化作用过程中,镜质组(特别是均质镜质体)有由各向同性向各向异性发展的趋势。到焦煤阶段,在反射光下就可明显观察到其各向异性,即所谓的基础各向异性。这是煤化作用过程中上覆地层强大静压力作用的结果。到目前为止,对煤中各向异性物质尚无严格定量概念。为明确起见,有必要指出笔者所指各向异性壳质组是指那些在反射单偏光下多色性明显,在反射正交偏光下具强烈各向异性,由壳质组转变来,并保存其原始形态特征的有机显微组分。其定形特征是在反射正交偏光下插入石膏试板,体现红、黄、兰三种干涉色,其各向异性比其生镜质组大得多(表2)。按形态、产状及内部结构,笔者将各向异性壳质组归属为六类:各向异性藻类体,各向异性角质体,各向异性孢子体,各向异性树脂体,各

向异性渗出沥青质体及各向异性壳质组碎屑体。

表 2 各向异性壳质组反射率测试结果

Table 2 The measuring reflectance results of anisotropic exinite.

产 地	境 质 组		各向异性壳质组		
	$R_{\max}^{\circ} \%$	$\Delta R \%$	类 型	$R_{\max}^{\circ} \%$	$\Delta R \%$
豫西煤田平顶山八矿	1.23	0.20	各向异性孢子体	3.49	1.48
			各向异性树脂体	3.98	2.41
豫西煤田朝川矿区	1.30	0.20	各向异性孢子体	3.41	1.91
			各向异性树脂体	4.01	2.79
			各向异性藻类体	3.60	2.90
豫西煤田新登矿区	2.32	0.68	各向异性孢子体	4.02	2.47
			各向异性树脂体	4.25	2.01
豫西煤田新密矿区	2.51	0.60	各向异性孢子体	3.85	2.49
			各向异性角质体	3.08	1.36
豫西煤田焦作矿区	4.60	2.26	各向异性孢子体	5.20	3.40
豫西煤田济源克井矿	6.80	3.81	各向异性孢子体	7.80	6.75
四川中梁山	1.64	0.26	各向异性孢子体	3.08	2.63
大 同	0.64		各向异性孢子体	3.02	1.47
山西平朔	1.09		各向异性孢子体	3.12	2.02
湖南金竹山	3.21		各向异性孢子体	4.91	2.67
贵州盘县	1.36	0.31	各向异性树脂体	3.87	2.14

(1) R_{\max}° : 最大反射率 (2) ΔR : 双反射率 (3) 测点数 1—10 不等

1. 各向异性藻类体 在反射正交偏光下, 各向异性藻类体形态完整, 具强烈各向异性, 呈放射状结构 (图版 I, 1)。在各时代煤中偶尔发现, 出现的最早煤级是气煤 (平朔)。

2. 各向异性孢子体 各向异性孢子体是煤中分布最广, 数量最多, 形态保存最好的各向异性壳质组。按大小有各向异性大孢子体与各向异性小孢子体之分; 按壁厚有厚壁孢子体与薄壁孢子体之分。在反射正交偏光下各向异性孢子体最大特征是平行孢壁的纹层与垂直孢壁的消光影所构成的网格状结构 (图版 I, 2), 纹层可密集到 2—3 层 / μm 。消光影的粗细、间距不等, 有时将孢壁分割成不同等色区, 经挤压彼此镶嵌在一起, 即所谓的镶嵌结构孢子体 (图版 I, 3)。在各向异性孢子体横切面上, 其内部结构更加清楚, 纹层为同心层状, 消光影为十字消光旋转物台, 黑十字不分解而作扇形运动。有些各向异性孢子体内部出

现细粒镶嵌结构,可能是残存的内壁(由纤维素组成)转变而来。

各向异性孢子体的 R_{\max}° , ΔR 变化较大,并随煤级的增高而增大(表2)。

各向异性孢子体最早出现于长焰煤阶段(大同侏罗系焯煤),在气煤中已相当常见,在济源克井无烟煤中也有发现。

3. 各向异性角质体 在所有各向异性壳质组中,各向异性角质体的各向异性最弱(表2)。一般呈条带状,有些还保存了内缘锯齿,有时能发现与其有成因联系的渗出沥青质体转变成的细粒镶嵌结构(图版 I, 4);有时角质体排出的液态烃类未能远移,沿其边缘形成各向异性镶边结构。

各向异性角质体分布并不广泛,笔者仅在四川中梁山与豫西王庄煤矿煤样中见到,但数量较多,有时在煤光片中可富集到3.5%(王庄二₁煤)。各向异性角质体最早出现于焦煤阶段。

4. 各向异性树脂体 各向异性树脂体基本上继承了树脂体的原形,一般呈圆形或椭圆形。由于树脂体热活性大,形成的各向异性树脂体各向异性最强(表2),大多数呈镶嵌结构,还有些显示了流动特征(图版 I, 5)。

各向异性树脂体绝对数量一般较少,但分布广泛,几乎所有气煤以上煤级的煤中都有。

5. 各向异性渗出沥青质体 斜交层理的渗出沥青质体从亮褐煤阶段出现后,到焦煤阶段就转变成了细粒镶嵌结构(图版 I, 6),到无烟煤中还能看到。

6. 各向异性壳质组碎屑体 各向异性壳质组碎屑体是指个体小($<20\mu\text{m}$),无结构,碎屑状的各向异性物质(图版 I, 3, 7)。它们均沿层理分布,呈分散状态,在煤中分布广泛,有时是各向异性壳质组的主要类型。

应当指出,除各向异性壳质组外,煤中还存在很多形态不定的各向异性物质。它们虽不能归为各向异性壳质组,然而作为一种煤化作用产物直接或间接与壳质组有关。这些形态不定的各向异性物质有些可能由沥青质体转变而来,而大多数是壳质组在煤化作用过程中的派生产物转变而来。在肥煤及其以上煤级煤中,常见某些粗粒体(图版 I, 7),团块镜质体周围(图版 I, 8)出现各向异性镶边,以及沿丝质体胞腔及裂隙形成的各向异性环边。这些各向异性物质均具有从中心向边缘各向异性由强变弱的特征,构成各向异性扩散晕。粗粒体、丝质体这些惰性组分在变质温度下不可能软化。笔者认为这类各向异性物质的成因是在煤化作用过程中,壳质组形成的液态烃类,经运移、扩散、渗透到这些组分中,增强其活性,逐步转变而成,其机理类似于碳化时的共碳化作用。

三、壳质组的光性演变规律

通过详细煤岩鉴定和定量统计(表3),笔者发现各向异性壳质组的分布具有如下特征:

1. 褐煤中不存在,最早出现于长焰煤阶段,但数量很少,偶尔可见。到气煤阶段已常见,经第二次煤化跃变各向异性壳质组的数量迅速增加,到焦煤阶段达最大值,随煤级进一步增加又有减少的趋势。

2. 不同煤田,不同时代的煤中各向异性壳质组丰度可相差很大(0.0—1.8%)。其分布主要受含煤岩系的沉积环境影响,在近海强还原条件下形成的煤,各向异性壳质组丰度大,

而陆相含煤岩中一般很少。

3. 各向异性壳质组主要产于贫粘土矿物、贫惰性组分的暗煤中, 而在镜煤与丝炭中很少, 在亮煤中丰度变化大, 取决于其煤岩组成。在显微镜下, 可见各向异性壳质组均按一定层位平行层理分布, 富集程度极不均匀, 在某些层位上根本就没有, 而在某些分层可富集到 80%, 这显然受原始成煤物质的控制。

表 3 各煤田煤中各向异性壳质组的分布

Table 3 The distribution of anisotropic exinite.

产地	煤种	各向异性壳质组						其它形式的 各向异性体
		A	B	C	D	E	F	
豫西煤田	气煤	×	+	×	+	×	+	×
	肥煤	×	++	×	+	×	++	+
	焦煤	+	+++	×	+	×	+++	+++
	瘦煤	×	+++	×	+	+	+++	+++
	贫煤	×	+++	×	+	+	+++	+++
	无烟煤	+	+++	+	+	+	++	+++
贵州盘县	肥煤	×	++	×	+	+	+++	+++
	焦煤	×	++	×	×	++	+++	++
	贫煤	×	++	×	+	+	+++	++
	无烟煤	×	+++	×	×	++	++	+++
四川中梁山	焦煤	×	+	+++	+	×	×	++
山西朔县	气煤	+	+	×	×	×	+	×
江苏徐州	气煤	×	+	×	×	×	+	×
湖南涟邵	肥煤	×	-	×	-	×	+	×
	焦煤	×	++	×	-	+	×	+
	无烟煤	×	+	×	+	×	++	+++
大同	长焰煤	×	+	×	×	×	×	×
抚顺	长焰煤	×	×	×	×	×	×	×
舒兰、百色、茂名	褐煤	×	×	×	×	×	×	×

(1) A. 各向异性藻类体; B. 各向异性孢子体; C. 各向异性角质体

D. 各向异性树脂体; E. 各向异性渗出沥青质体; F. 各向异性壳质组碎屑体

(2) + 有发现; ++ 较多; +++ 多; × 没有发现

为排除上述因素对煤中各向异性壳质组丰度的影响, 笔者选取豫西煤田山西组二₁ 煤的

贫惰性组分暗煤作显微组分定量统计。结果绘在图 1 中。虽然是煤光片定量结果，资料的代表性受到一定限制，但它初步反映了两个重要事实：(1) 煤中的壳质组在气煤阶段后迅速减少，到焦煤阶段 ($R_{\max}^0 \approx 1.50\%$) 几乎看不到反射率比镜质组低的壳质组；(2) 与壳质组含量变化规律相反，煤中各向异性壳质组的含量以及全部各向异性物质的含量在气煤阶段后迅速增加，到焦煤中最多。豫西煤田山西组二₁ 煤贫惰性组分暗煤在气煤以下煤级，壳质组丰度一般可超过 20%，而在焦煤及以上煤阶煤中全部各向异性物质的数量一般不到 10%。我们有理由假定，当这些较高变质煤还处于低煤化阶段时，也应有相近似的壳质组含量。可以认为高煤级煤中全部各向异性物质的含量反映了该煤化阶段残存壳质组的数量，比低变质煤（气煤以下）中壳质组少得多的原因是多方面的：

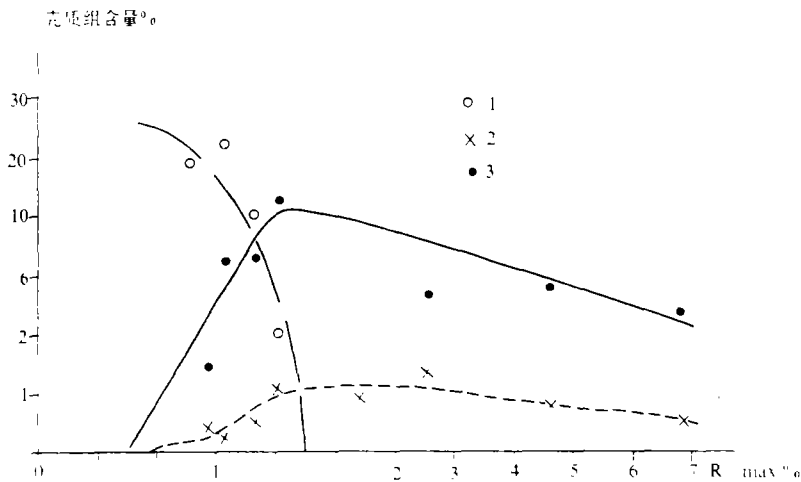


图 1 贫惰性组分暗煤中各类壳质组含量与煤级的关系

Fig. 1 The relationship between the contents of exinite and coal ranks in dull coal with few inertinite.

1. 有些活性极大的壳质组，如荧光质体，某些树脂体，萜烯体，在煤化作用中几乎全部热解为烃类而消失；
2. 有些壳质组的光性与镜质组逐步同化，使之在反射光下难以分辨；
3. 壳质组富含脂肪及烃类，在煤化过程中排出大量的烃类，保存下来的各向异性壳质组体积比共生镜质组小得多。

众所周知，煤中壳质组性质可相差很大，甚至同一类壳质组亦可能存在明显区别，这归因于成煤环境的变化及成煤植物种属的不同。笔者在豫西煤田平顶山矿区气肥煤中发现低反射率具荧光的孢子体与高反射具强烈各向异性的各向异性孢子体共生于同一视域中，在平朔气煤中存在两类角质体，一类具黄褐色荧光，反射率较高 ($R_m^0 = 0.20\%$)，另一类具极强的黄白色荧光，反射率极低 ($R_m^0 = 0.08\%$)，表面布满油污，有些还出现黄白色、血红色内反射。基于这些事实，笔者认为壳质组按其热活性可划分为三种类型（图 2），它们在光学性质上的差别主要表现在荧光强度与反射率上。反射率越低，荧光越强，热活性越大，反之亦然。壳质组热活性的差别必然控制其演化方式与变质产物。笔者将这些观点表示在图 2 中，

它较为直观的反映了壳质组在煤化过程中的演变规律，较客观地解释了研究的结果。

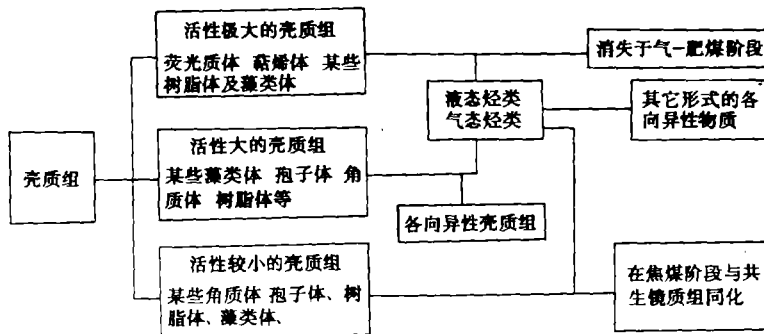


图 2 煤中壳质组的光性演变示意图

Fig. 2 The sketch of the optical evolution of exinite during coalification.

应当指出，将藻类体、孢子体、角质体及树脂体进行二分，到目前为止无严格的区分标志与参数，图 2 所反映的仅是存在的规律。

结 语

几点认识：

1. 煤中各向异性壳质组是煤化作用达到一定煤化阶段的必然产物，不仅出现在热变煤中，而且在深成变质煤中也有广泛分布。其分布主要与煤级、成煤环境有关。
2. 各向异性壳质组的发现说明壳质组在煤化作用过程中的演变是丰富多彩的，不能一概而论。有些几乎完全裂解为烃类而消失，有些转变成了各向异性壳质组，而大部分的光性与共生镜质组越来越相似，以致在光学显微镜下难以分辨。
3. 在煤化作用过程中，显微组分组之间的化学性质差别越来越小。然而其光学性质仍然存在明显的差别。在反射正交偏光下，惰性组分永远是各向同性的，镜质组在焦煤阶段后就具有一定程度的各向异性，各向异性壳质组以其强烈的各向异性而别于其它显微组分。

笔者曾建议用术语对各向异性壳质组及其派生来的各向异性物质命名。作为煤中一种广泛分布的次生显微组分，它在显微组分类中应当有其合理位置。

收稿日期：1988 年 2 月 3 日

参 考 文 献

- (1) 肖贤明、任德贻，1988，《中国矿业学院学报》，第2期，77—83页。
- (2) J.布鲁克斯主编，高品文译，1987，有机质成熟作用研究与矿物燃料勘探，石油工业出版社，175—187页。
- (3) Goodarzi F., 1985. Optically anisotropic fragments in a Western Canadian subbituminous coal. (Fuel), 1985, No.9.

- (4) Jones J. M. , et al. , 1977, Optical character of thermally metamorphosed coals of Northern England, *Journal of Microscopy*, 1977, Vol.109, p.1.
- (5) Ren Deyi, et al. , Study of the anisotropinite of thermally metamorphosed coals in western Henan, in 11th international congress of Carboniferous stratigraphy and geology, Abstracts of Papers, p.261—262.
- (6) Stach E. , et al. , 1982, Stach's textbook coal petrology. 3rd revised and enlarged edition, Gebruder Borntraeger, Berlin.p.125—127; 348—356.
- (7) Teichmüller M. , 1973, Generation of petroleum-like substances in coal seams as seen under the microscope. In: *Advances in Organic Geochemistry*, 1973, p.379—408.

Optical Evolution of Exinite During Coalification Based on the Discovery of the Anisotropical Exinite

Xiao Xianming

(Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou)

Mao Heling

(Beijing Postgraduate School, China University of Mining and Technology)

Abstract

Having studied the detailed coal petrological characteristics of more than 300 polished coal blocks sampled from eleven coalfields in China, the authors have discovered a kind of organic maceral in coals with a high reflectance and strong anisotropy. Some of it conserves clearly the appearance and structure of exinite. According to the original maceral which is changed into anisotropic exinite, it can be divided into six types: anisotropic alginite, anisotropic sporinite, anisotropic cutinite, anisotropic exsudatinitite, anisotropic bituminite and anisotropic leptodetrinite, furthermore there is an amorphous anisotropic matter in coals.

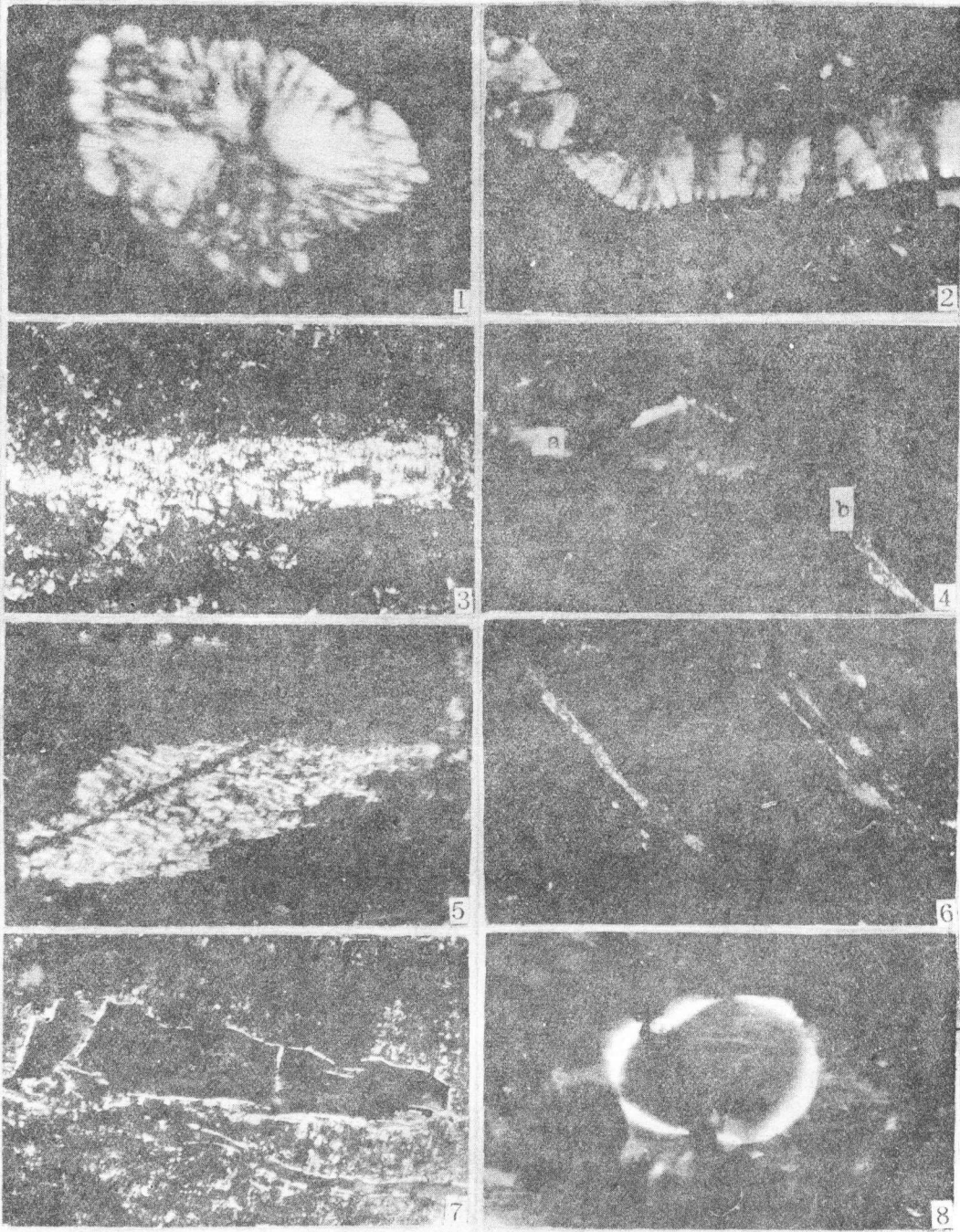
Anisotropic exinite is formed gradually by some of exinite during the coalification. It occurs first in flame coal stage, and distributes frequently in coals with rank higher than gas coal stage. The statistics show that the content of anisotropic exinite in coals investigated varies from zero to 1.8%, and that the total content of anisotropic matter in coals is less than 12.74%, commonly from 1.0 to 4.0%, which is much less than that of exinite in specimens sampled from the same coal and the similar coal petrological type, but different coal rank. Since the changing of coal-forming environments and the difference of coal-forming plants, the exinite of same type may have different characteristics. The fluorescent intensity and reflectance of exinite is the mark of its thermal activities, which will control its evolution processes and final products during the coalification. On the bases of these facts, therefore, the exinite can be grouped into three types according to their optical evolution during the coalification:

1. The exinite of extreme thermal activity, such as fluorinite, terpenite and so on, evolves completely

into hydrocarbons.

2. The exinite of large thermal activity, such as some of alginite, resinite, sporinite, cutinite and so on, change into the anisotropic exinite as they draining off the liquid hydrocarbon.

3. And the exinite with less thermal activity shares gradually the same optical properties with intergrowth vitrinite during the coalification.



(所有图版均在油浸反射正交偏光下所照)

1.各向异性藻类体, 豫西煤田二1煤, 焦煤, $\times 1500$; 2.各向异性大孢子体, 具网格状结构, 豫西煤田二1煤, $\times 700$; 3.各向异性大孢子体, 具镶嵌结构, 豫西煤田二1煤, 焦煤, $\times 175$; 4.与各向异性角质体 (a) 有成因联系的渗出沥青质体转变成的细粒镶嵌结构 (b), 豫西煤田二1煤, 无烟煤, $\times 300$; 5.各向异性树脂体, 显示流动特征, 豫西煤田二1煤, 焦煤, $\times 500$; 6.各向异性渗出沥青质体, 豫西煤田二1煤, 无烟煤, $\times 400$; 7.在粗粒体周围形成的各向异性镶边结构, 在上半视截有许多各向异性壳质组碎屑体, 豫西煤田二1煤, 贫煤, $\times 175$; 8.煤成油渗透团块镜质体形成的各向异性扩散晕, 豫西煤田二1煤, 气一肥煤, $\times 500$ 。