

沥青反射率作为烃源岩成熟度指标的意义

肖贤明 刘德汉 傅家谟

(中科院地球化学所有机地球化学国家重点实验室)

提要 本文应用有机岩石学方法详细研究了烃源岩中沥青的地质特征, 根据来源将其划分为三种成因类型: 原地沥青、异地沥青及再循环沥青。结合热模拟实验结果, 研究了各种地质因素对沥青反射率的影响。在此基础上, 探讨了沥青反射率作为成熟度指标的意义。

关键词 沥青 烃源岩 成熟度

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

前 言

产于烃源岩中的沥青, 以其量少、分布广、变化大的光性及复杂的成因别具一格。近年来对其成因、光性及化学结构作了大量研究, 但对其地质应用研究不够, 一个最基本的问题是沥青反射率能否作为可靠的成熟度指标。对于早古生代海相碳酸盐岩生油岩, 既无镜质组、又无壳质组(一般均含有一定数量沥青)、成熟度又高的这类生油岩成熟度的评价传统光学方法难以应用(肖贤明等, 1991)。因此, 客观评价沥青反射率作为成熟度指标的意义乃油气勘探当务之急。本文在详细研究我国早古生代烃源岩沥青地质特征及有机岩石学特征的基础上, 探讨了各种地质因素对沥青反射率的影响, 并结合人工热模拟实验结果, 建立起了沥青反射率划分烃源岩成熟度的标准。

一、烃源岩中沥青的成因分类

对地质体中沥青的分类远未统一, 综合起来, 目前主要有三种观点: 一种是传统的成因派, 代表作者有 Rogers (1974), Jacob (1989) 及 Alpern (1978), 其中以 Rogers 的分类影响最大, 大部分分类术语沿用至今, 他将沥青划分为四种成因类型, 即储层沥青, 石墨沥青, 地沥青及油母沥青。

另一种以金奎励 (1991) 为代表, 在分类中主要考虑沥青形成与油气生成的关系, 将沥青划分为两大类, 前油沥青与后油沥青, 前者形成于成熟前, 是干酪根降解为原油的过渡产物; 后油沥青为原油热裂解产物。

第三种观点主要依据沥青产出的地质特点, 如刘德汉等 (1989) 将沥青切分为原生-同层沥青, 后生-储层沥青, 岩浆热变沥青和表生-浅层氧化沥青四大类。

这些分类主要是针对储集岩中沥青的成因特点而所提出的。笔者认为, 对于烃源岩中沥青的分类更应注重沥青的成因, 具体来讲, 分类中应突出反映沥青的两个基本成因特点: 其

一, 沥青是富氢显微组分转变来的次生有机质, 许多地质作用(如分馏、热解、风氧化与水洗)均可形成沥青; 其二, 沥青与液态烃有关, 其形成均发生过一定距离的运移。

另外, 分类还应考虑应用。生油岩中沥青主要用来研究其成熟度, 研究油气形成的地质时期, 推断油气运移历史。

据此, 本文初步提出将我国烃源岩中沥青划分为二类六型(表1), 现将主要观点说明如下:

第一, 在沉积岩分散有机质的分类位置上, 沥青属于一个显微组分, 它代表了在成熟过程中形成的次生有机质。根据沥青的来源可将其划分为三种显微组分: 原地沥青、异地沥青及再循环沥青。原地沥青由本层烃源岩形成, 一般其运移限于本层烃源岩内; 而异地沥青发生过大规模运移, 来源于其它烃源岩; 再循环沥青是沉积过程中由流水等地质营力随同沉积物搬运来的沥青。不同来源的沥青不仅光性不同, 而且其地质意义有别, 因此是沥青成因分类的主要依据。

第二, 沥青的形成方式是分类的进一步依据。

研究表明, 许多地质作用均能形成沥青, 如原油在运移过程中的分馏作用与脱气作用; 生物降解、热裂解; 原油经水洗与氧化作用等。这些沥青具有不同的地质特征, 与油气演化的关系亦不同, 是沥青进一步划分亚组分的依据。据此, 将原地沥青划分为前油沥青、后油沥青及表生沥青三种亚组分。而异地沥青的划分则主要考虑浸入地层的相对成熟度, 如进入较低成熟度的烃源岩则称早期沥青, 反之则称晚期沥青。

第三, 形成的沥青在古地温进一步作用下, 其光性、化学结构将发生有规律的改变, 光学特征是沥青热演化程度的标志, 可作为沥青进一步描述的依据。

表1 烃源岩中沥青的地质分类

Table 1 The geological classification of bitumen in source rocks

显微组分	显微组分(按来源)	显微组分亚种(按形成作用方式)	光性特征划分
沥青	原地沥青	前油沥青	各向同性沥青: 低变各向同性 沥青中变各向同性沥青高变各 向同性沥青
		后油沥青	
		表生沥青	
异地沥青	早期沥青	各向异性沥青: 中间相小球体 镶嵌结构片状体	
	晚期沥青		
	再循环沥青	再循环沥青	

二、烃源岩中沥青的地质特征

1. 原地沥青

原地沥青由本层烃源岩形成的烃类转变而来, 它是烃源岩中最主要的沥青存在形式, 尤其是自生自储的碳酸盐岩生油岩及排烃效率较差的泥质生油岩占有更加重要的地位, 具有十

分典型的地质特征。通常前油沥青总是分布在烃源岩细微裂隙、显微孔隙中,平行或斜交层理;而后油沥青主要产于碳酸盐岩生油岩中,在泥质生油岩中一般少见,主要以孤立的晶洞沥青形式出现;表生沥青出现在成熟烃源岩露头或风化面附近。

2. 异在沥青

我国南方古生代很多贫有机质的灰白色碳酸盐岩中含有大量沥青,显然这种沥青并非由本层烃源岩中有机质转变而来,而是从其它母源运移而来。其基本地质特征是充填在裂隙中,连续或断续分布。在很多情况下,难以区分异地沥青与原地沥青,尤其是成熟度较高时。如下几点标志可供参考:

第一,有多套生油层共生的沉积盆地,尤其是被不整合面分割时,应注意可能存在异地沥青,否则异地沥青一般不多见。

第二,异地沥青多见于碳酸盐岩生油岩中,而在泥质生油岩中很少见。

第三,在成熟度较低时,异地沥青与原地沥青本质的区别是前者与其所处烃源岩成熟度不吻合。一般异地沥青反射率所反映的成熟度比其所处烃源岩成熟度要低。

3. 再循环沥青

塔里木盆地寒武系—奥陶系泥质生油岩中含有大量高反射、各向同性(R_r 高达 4.0%以上)碎屑状有机质,其光性类似于惰屑体,沿层理方向分布,而在石炭系—二叠系成熟生油岩中不难发现大量高反射(R_{max} 可大于 4.0%)具强烈各向异性的有机碎屑(共生的原地沥青反射率一般不到 1.80%),非常类似于碳沥青。笔者认为,这类有机质属于一种新的显微组分——再循环沥青。其成因机理类似于再循环镜质组,它具有如下几点地质特征:

其一,再循环沥青主要产于泥质生油岩,而在碳酸盐岩中较少,其产状与显微裂隙、显微孔隙无关,而是沿层理方向分布,显示出原始沉积特征。

其二,一般其反射率要比其所处烃源岩成熟度要高。

其三,由于在搬运过程中的风氧化作用,有些低成熟再循环沥青可见氧化环等特征。

三、影响沥青反射率的地质因素

众所周知,影响任何有机质反射率的地质因素包括两个方面:原始富氢程度及热演化历史。如前所述,沥青均由富氢显微组分形成的“液态烃”经一系列地质作用转变而来,可以认为,沥青均具有大致相同的原始元素组成及化学结构特征。因此,影响沥青反射率的主要地质因素是其成因及热演化特征。

(一) 沥青的成因类型

沥青的成因类型是影响沥青反射率的重要因素之一,尤其在成熟度不高的烃源岩中。一般在低成熟生油岩发现的沥青均为前油沥青,其反射率低(一般在 0.10—0.30%左右),与成熟度相关性不好,到高成熟阶段后,前油沥青可产出大量油气,反射率迅速增加,很快超过镜质组。笔者曾应用热模拟实验研究过塔里木盆地富含前油沥青某石炭系生油岩,发现前油沥青的热转变产物在很高演化阶段后均具各向同性,而且运移沥青的光性特征完全不同,后者一般具各向异性(肖贤明等,1988)。

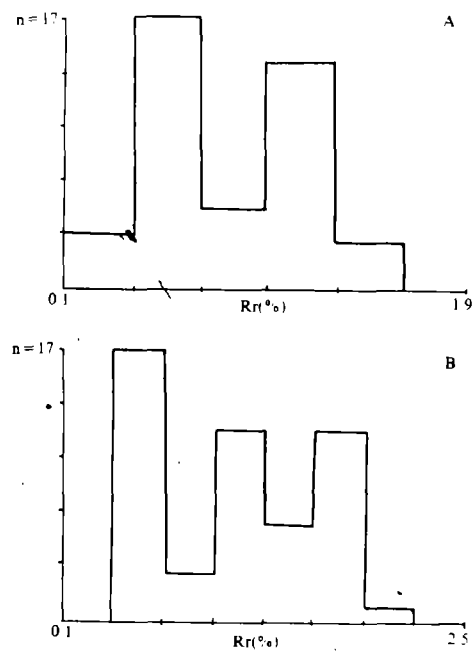
后油沥青是原油热裂解产物,主要形成于生油后期及过成熟阶段,其特点是一旦形成,其反射率迅速增加,到过成熟阶段很快超过共生镜质组,与前油沥青反射率越来越相近。

再循环沥青由于遭受了早期热成熟作用, 其热演化规律在很大程度上取决于其早期所遭受的变质程度。相近成熟度不同产地的烃源岩中发现的再循环沥青的反射率差别很大。笔者在塔里木盆地石炭系—二叠系生油岩中检出了反射率高达 4.367%、具强烈各向异性的再循环沥青, 而与其共生的原地沥青反射率仅在 0.630%。一般在低成熟生油岩中, 再循环沥青的反射率比原地沥青反射率要高, 不能作为成熟度指标。但当烃源岩所处古地温超过早期遭受古地温后, 再循环沥青明显发生第二次变质, 在这种地质条件下, 其反射率与其它成因沥青反射率相近, 亦可用作成熟度指标。

异地沥青由于浸入到不同成熟度烃源岩中, 其反射率作为成熟度指标的意义在很大程度上取决于沥青形成的区域地质背景。分二种情况讨论:

其一. 连续下沉的沉积盆地, 如我国绝大多数中生代沉积盆地。某一烃源岩形成的液态烃可沿区域裂隙浸入到上部或下部烃源岩层中。从理论上讲, 进入上部地层的液态烃所形成的沥青所反映的成熟度要比其所处烃源岩成熟度高 (这时烃源岩一般处于未成熟或低成熟阶段), 而进入下部地层的原油, 处于较高古地温场中, 原油裂解形成沥青, 促成其反射率与其所处烃源岩成熟度相吻合, 其可作为烃源岩成熟度指标。由于沉积盆地连续下沉, 沥青处于不断增加的古地温场内, 异地沥青与其所处烃源岩成熟度的差别将逐渐消失。因此, 在这类盆地中, 一般异地沥青反射率亦能反映其所处烃源岩成熟度。

2. 多套生油层被不整合面分割的沉积盆地, 如塔里木盆地与四川盆地。常见的地质现象是年青生油层形成的沥青浸入到较老生油层中, 导致不同地质时期的沥青共生在一起。如塔里木盆地塔北某井早古生代生油岩中常见三期沥青, 其实测反射率变化范围是 1.6—1.90%, 0.90—1.20%, 0.20—0.50% (图 1)。该地区存在三套生油层, 它们是寒武系—奥陶系、石炭系—二叠系及三叠系—侏罗系, 其间被区域不整合所分割。三套生油层成烃演化阶段分别达过成熟、高成熟及低成熟阶段。进一步工作发现, 石炭系—二叠系碳酸盐岩生油岩中亦含有二期沥青, 反射率分别为 0.90—1.20% 及 0.20—0.40%。结合区域油气生成历史, 笔者有理由推断, 早古生代烃源岩三期沥青分别源于上述三套生油层, 而石炭系—二叠系生油岩中的低反射沥青可能来源于其上中生



(A: 石炭系生油岩; B: 奥陶系生油岩)

图 1 塔里木盆地塔北某井生油岩中沥青反射率频率分布图

Fig.1 The frequency distribution of bitumen reflectance of source rocks in a well of North Taimu Basin (A: a Carboniferous source rock B: an Ordovician source rock)

代生油岩。沥青反射率明显分期的成因机理在于地层在后两次下降过程中，其古地温均未超过其原始古地温。

笔者曾在广西百色盆地百岗组未成熟泥岩裂隙中发现过大量运移沥青，显然是从成熟生油岩中运移而来。不过这种共生关系在地质体中并不多见。

(二) 沥青的光学结构

光学结构是影响沥青反射率的另一重要因素。在成熟过程中，由于受热条件的差异，岩石导热性能的差异以及沥青本身性质的区别及成因的不同，沥青可发育成不同光学结构。即使在同一烃源岩中光性完全不同的沥青共生在一起，亦并不少见。不同光学结构的沥青反射率可相差很大，用作成熟度指标的意义不同，标准有别。根据光学结构可将沥青划分为两大类：各向同性沥青及各向异性沥青。

沥青在低成熟阶段，在普通偏光显微镜下均显示均一状结构，呈各向同性。对于同种成因沥青，其反射率大于 0.50% 以后，与成熟度相关性较好，可用作成熟度指标。当沥青反射率大于 1.50—2.0% 后，绝大多数显示不均一状结构，转变成各向异性沥青，发育各种光学结构。研究表明，沥青由各向同性向各向异性的转变过程中，要经历一个过渡阶段——中间相，中间相在不同的条件下发展为不同光学结构。肖贤明等 (1988) 曾提出将各向异性沥青划分为五种光学结构：中间相小球体，镶嵌结构体，片状体，纤维状体及流地型，前三者最为常见。在某一烃源岩中，各向异性沥青可显示不同光学结构，一般等色区越大，其 R_{\max} 越大，各向异性越强，(表 2)，反射率的这种差别是由于光学结构不同造成，并非成熟度影响，在研究时应特别注意。

近年来，在我国早古生代碳酸盐岩生油岩中发现有不少高反射各向同性沥青 (R_r 可高达 4.0% 以上)，有趣的是在这些岩样中同时共生有各向异性沥青。虽然目前对这种高反射各向同性沥青的形成机制未完全弄清楚，但其反射率分布稳定，与孔深及成熟度具有良好相关性，完全可用作成熟度指标。烃源岩中各向同性沥青的反射率总是介于各向异性沥青 R_{\max} 与 R_{\min} 之间。

表 2 新密矿区某烃源岩中不同光学结构沥青反射率实测结果

Table 2 The measuring results of bitumen with different optical structure in a source rock of Xinmi Mine

光性结构类型	直径 (um)	R_{\max} (%)	ΔR (%)
中间相基质	<0.50	3.30	0.70
中间相小球体	5—10	3.94	2.10
	20—28	4.59	3.03
	30—70	4.82	3.54
中间相复合球体	100—200	4.91	2.89
片状体		4.98	4.02
流动型		4.72	3.84

(据肖贤明等, 1988)

本文初步认为, 高反射各向同性沥青的形成可能有两种地质背景:

1. 再循环沥青, 其沉积时反射率一般不超过 1.50%, 具各向同性。

2. 经二次变质的沥青, 遭受第一次变质后, 反射率不超过 1.50%, 具各向同性。

本文应用热模拟实验研究了二种原始反射率不同的沥青的光性演变规律, 结果形成了不同的光学结构 (表 3)。低反射沥青的转变产物具强烈各向异性, 显示粗粒镶嵌结构及片状结构。而较高反射沥青的热转变产物呈均一状结构, 具各向同性, 从某种意义上讲, 热模拟实验支持了上述观点。

四、沥青反射率作为烃源岩成熟度指标的意义

为进一步建立沥青反射率与镜质组反射率及成熟度的相关关系, 本文对两种原始反射率不同的沥青作了热模拟实验研究 (表 3), 获得了如下几点有益的认识:

表 3 沥青的热模拟实验结果

Table.3 The resules of thermal-simulating test of bitūnen

样品 温度 ℃	镜质组 Rr (%)	新疆乌尔乐沥青				四川广元沥青	
		光性与结构	$R_{max}^{\circ}(\%)$	$\Delta R(\%)$	Rr (%)	结构	Rr (%)
未加热	0.401	黑色, 各向同性	—	—	<0.05	黑灰色, 各向同性	0.218
250	0.521	黑色, 各向同性	—	—	<0.05	黑灰色, 各向同性	0.281
275	0.687	黑色, 各向同性	—	—	<0.05	灰色, 各向同性	0.372
300	0.803	黑色, 各向同性	—	—	<0.05	灰色, 各向同性	0.453
325	0.901	黑色, 各向同性	—	—	0.052	灰色, 各同同性	0.801
350	1.082	灰色, 各向同性	—	—	0.601	灰色, 各向同性	0.990
375	1.201	灰色, 各向同性	—	—	1.382	黄灰色, 各向同性	1.541
400	1.603	灰黄色, 开始显示各向异性	1.901	0.203	1.807	黄灰色, 各向同性	1.762
425	1.852	黄色, 具镶嵌结构	3.109	2.612	2.093	灰黄色, 各向同性	1.908
450	2.301	黄色, 具中粒镶嵌结构	3.987	2.980	2.907	黄色, 各向同性	2.624
475	2.582	黄色, 具粗粒镶嵌结构	3.987	2.980	2.907	黄色, 各向同性	2.624
500	2.923	黄色, 具粗粒镶嵌结构, 局部显示片状结构	5.108	4.002	3.408	黄色, 各向同性	3.232

注: 层序升温, 恒温时间 100 小时

第一, 在热模拟过程中, 沥青的光性取决于其原始变质程度。低反射沥青当 $Rr > 1.50\%$ 后, 转变成各向异性沥青, 而较高反射率的广元沥青则转变为各向同性沥青。

第二, 沥青与镜质组反射率的相关性取决于沥青的变质程度及光学结构。在低成熟阶

段, 沥青反射率低, 而且与镜质组反射率相关性不好; 在高成熟阶段后, 沥青反射率迅速增加, 很快超过镜质组, 与镜质组反射率呈近线型相关。但当沥青反射率超过 2.0% 后, 各向异性沥青反射率与镜质反射率相关性欠佳, 在很大程度上受光学结构影响。但各向同性沥青与镜质组反射率相关性仍很好。

第三, 测定方法是影响各向异性沥青反射率又一重要因素。实验结果表明, 其随机反射率 (R_r) 比其最大反射率 (R_{max}) 分布稳定, 而且与镜质组 R_r 的相关性亦好。

综合上述成果, 初步建立起应用原地沥青反射率划分烃源岩成熟度的标准 (表 4)。具体应用时还应注意两个问题:

表 4 原地沥青反射率与成烃源岩成熟度的关系

Table 4 The relationship of autobitumen reflectance with the maturation stages of source rocks

油气演化阶段		镜质组 R_r (%)	原地沥青 R_r (%)
液态烃	未成熟	< 0.50	< 0.05—0.10
	低成熟	0.50—0.75	< 0.05—0.10
	高成熟	0.75—1.0	0.10—0.90
	生油后期	1.0—1.30	0.90—1.50
气态烃	凝析油, 湿气	1.30—1.8	1.50—2.20
	干气	> 1.8	> 2.20

1. 异地沥青与再循环沥青反射率一般不能作为成熟度指标, 但在连续沉降的沉积盆地产生的异地沥青, 在很高成熟阶段生油岩中的再循环沥青, 其反射率也可作为成熟度指标。应有标准与原地沥青相同。

2. 沥青反射率只有在高成熟至湿气阶段作为成熟度指标效果较好, 成熟度过低在很大程度上受成因的影响, 成熟度过高受光学结构的影响大, 应用效果欠佳, 可作为参考指标应用。

结 语

沥青反射率用作成熟度指标的优点在于补偿了镜质组反射率的不足, 解决了早古生代生油岩及某些晚古生代缺少镜质组的碳酸盐岩生油岩成熟度的确定。具体应用时还应注意其作为成熟度指标的有效性。一方面取决于沥青的成因及区域地质背景, 另一方面取决于其所处烃源岩成熟度及其本身的光学结构特征。一般只有原地沥青反射率才能作为成熟度指标。但在连续沉降的中新生代盆地中, 产生的异地沥青, 处于很高成熟阶段的再循环沥青, 其反射率也可用作成熟度指标。沥青反射率在高成熟至湿气阶段与镜质组反射率呈近直线相关, 是可靠的成熟指标, 但成熟度过高或过低分别受成因及光学结构的影响大, 只能作为参考指标应用。

参 考 文 献

- (1) 肖贤明, 傅家谟, 刘德汉, 无定形体(微粒体)反射率能作为生油岩成熟度指标, 自然科学进展, 1991.
- (2) Rogers. Significance of Reservoir Bitumens to Thermal Maturation Studies, Western Canada Basin, AAPG, 1974, 58 (9), p.1806-1824.
- (3) H. Jacob, Classification, Structure, Genesis and Practical Importance of Natural Solid oil Bitumen (Migrabitumen), Interna, J.Coal Petrol., 1989, 11, p.65-79.
- (4) B.Durand, Kerogen-Insoluble Organic Matter from Sedimentary Rocks, (Edition by Durand), Technip, Paris, 1980, p.224-234.
- (5) 金奎励, 陈中凯, 我国某些天然固体沥青的岩石学研究, 第四届全国有机地球化学会议论文集, 1991, 石油工业出版社.
- (6) 刘德汉, 碳酸岩中的沥青(碳酸岩有机地球化学, 傅家谟等著), 1989, 77-92页, 科学出版社.
- (7) 肖贤明, 任德贻, 毛鹤龄, 新密矿区中间相碳沥青的发现及其地质意义, 现代地质, 1988, No.4期, 480-487页.

The Significance of Bitumen Reflectance as a Mature Parameter of Source Rocks

Xiao Xianming Liu Dehan Fu Jiamo

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

Abstract

Whether bitumen reflectance can be used as a reliable mature parameter of source rocks is an unsolved problem for a long time. In this paper, the detailed geological characteristics and optical properties of bitumen occurring in source rocks are investigated with the organic petrological methods. Combining the results of thermal simulating tests of bitumen, the authors obtain the following acknowledges:

1. Bitumen belongs to a maceral group in the classification system of dispersed organic matter in sedimentary rocks. Bitumen occurring in source rocks may be divided into three macerals according to its origin: autobitumen, allobitumen and reworked bitumen. Furthermore, autobitumen is subdivided into three submacerals: pre-oil-bitumen, post-oil-bitumen and oxidized bitumen on the basis of their forming pattern, and allobitumen into two submacerals: early allobitumen and late allobitumen according to the relative maturation of the source rocks into which the bitumen pour.

2. Autobitumen is the most abundant bitumen in all types of source rocks, and it is characterized by a secondary form, and fills into the microfissures or microholes in source rocks. The distribution of allobitumen depends on the regional geological background to great extent. It appears often in the basins in which there are more than one oil source rocks seams with different geological time. The fundamental difference between autobitumen and allobitumen is in that the reflectance of allobitumen is unfit with the maturation level of the source rock in which it occurs. Reworked bitumen usually occurs in clay source rocks,

and is characterized by original deposited occurrence and paralleling with stratification of the source rock.

3. That the significance of bitumen reflectance are used as a parameter depends upon, on one hand, its origin types and regional geological background, on the other hand, the maturation level of the source rocks and its optical structure. In most cases, the reflectance of autobitumes can be only used as a mature parameter. However, in some cases, the reflectance of the allobitumen in continuous deposition basin and the reworked bitumen in very high mature stage source rocks can be also used to determine its source rocks maturation level. The reflectance of autobitumen has a good relation with the vitrinite reflectance or mature stage within the region of high mature stage to dry gas stage (about vitrinite reflectance from 0.01 to 2.0%), and is an excellent mature parameter, but, the reflectance of bitumen can be only used as a reference mature parameter when the mature level of source rocks is too high or too low.