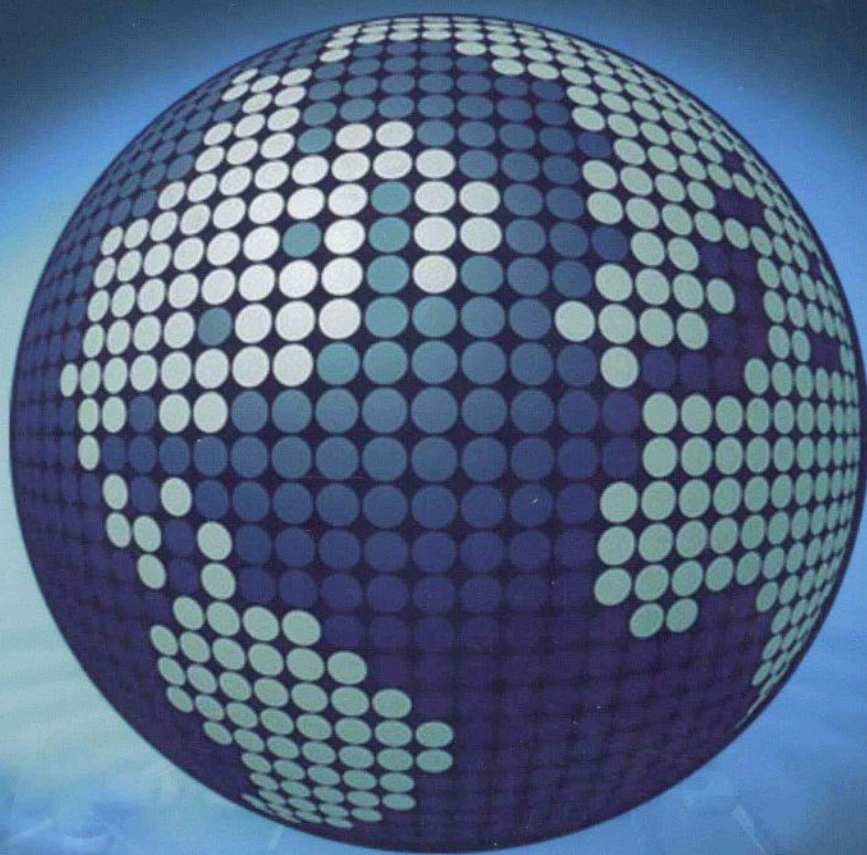


YINGYONG YOUQI DIQIU HUAXUE

应用油气地球化学

刚文哲 林壬子 编著



石油工业出版社

应用油气地球化学

刚文哲 林壬子 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书从油气勘探中常用的分析测试技术入手,从纵向的角度介绍了常用的油气地球化学测试技术以及这些技术所产生的地球化学指标体系。又根据实践应用的目的,从横向的角度,利用地球化学指标体系来评价烃源岩,进行油气源对比,研究油气的运移与聚集、油气成藏注入史等。

本书可作为石油地球化学专业研究生教材,也可作为从事应用地球化学与油气地质研究的科研人员及大中院校学生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

应用油气地球化学 / 刚文哲, 林壬子编著.
北京: 石油工业出版社, 2011.4
ISBN 978-7-5021-8315-8

I. 应…
II. ①刚…②林…
III. 石油天然气地质—地球化学
IV. P618.130.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 036698 号

出版发行: 石油工业出版社
(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)
网 址: www.petropub.com.cn
编辑部: (010) 64523538 发行部: (010) 64523620
经 销: 全国新华书店
印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2011 年 4 月第 1 版 2011 年 4 月第 1 次印刷
787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 18
字数: 412 千字 印数: 1—1500 册

定价: 65.00 元
(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)
版权所有, 翻印必究

前言

沉积学、地震地层学、有机地球化学和盆地分析是当代石油地质科学发展的主要方向。自 20 世纪 70 年代以来,这四门科学的迅速发展和相互渗透,卓有成效地推动了石油地质理论和油气勘探事业的迅猛发展。

著名的美国石油地质学家 Hunt J.M. 曾经给石油地球化学下定义:用化学原理研究石油的成因、运移、聚集和演变,以及将这些知识用于石油、天然气、沥青的勘探与开发的科学称之为石油地球化学。

在油气勘探过程中,人们经常用六要素来概括含油气评价,即:生储盖运圈保。其中,石油地球化学研究涉及的领域涵盖了生油、运移、储层、保存四个方面。综合应用多项地球化学指标体系,将能够有效地告诉我们:盆地内的生油层特征、生油层分布规律;油气源对比问题;油气运移的方向、途径、规模;油气成藏的注入时间、序次;油气藏保存的条件如何……。这些问题对于一个盆地的勘探工作而言,具有战略指导意义。所以,石油地球化学实际上是石油勘探中的一项战略研究工作。

当石油天然气勘探行业刚刚迈入工业化门槛时,便发生了一场关于石油有机成因和无机成因的剧烈争论,石油地球化学实际上从此孕育、诞生。主张石油无机成因的学者根据射电天文学在宇宙空间发现星体甲烷气圈的存在,提出了烃类的宇宙成因理论。1934 年, Treibs 在原油中发现了卟啉化合物,论证了它们与动物的血液以及植物的叶绿素之间的亲缘关系,而在自然界的无机化合物中未曾发现卟啉化合物的存在。从而,有力地证明了石油的有机成因学说。

20 世纪 40 年代,美国投入巨资确定了第 2 号和第 43 号研究方案开展石油成因研究。Trask P. D. 率先提出了用于标识沉积岩中有机质丰度的指标——有机碳和有机氮。乌兹霍姆研究所的 Zobell. C. E. 系统地展开了关于在油气成烃演化过程中细菌的代谢和催化作用的实验。麻省理工学院的学者们则热衷于研究有机质演化过程中放射性物质的催化作用。从此开始了一系列关于石油成因的模拟试验。

20 世纪 50 年代,一批优秀的苏联学者在研究生油层分布规律时,发现沉积环境对于生油岩分布存在明显的制约作用。瓦萨耶维奇、古柳耶娃、乌斯宾斯卡娅等人,建立了一整套关于地球化学相的理论和试验研究方法,提出了 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、 K^{+} 、 S^{2-} 等一系列地球化学指标。当时的全苏石油研究所和彼得格勒石油研究所是全球著名的石油地质研究中心。他们建立了一系列岩石化学、水化学、沥青化学的试验研究方法。最具代表性的专家是莫斯科大学的魏别尔教授,他系统地研究了石油天然气与分散沥青的亲缘关系,并且将分散沥青这类极其复杂的混合物分离为游离沥青、结合沥青以及中性沥青、极性沥青,研究了氯仿沥青“A”的演化规律,并由此奠定了跟踪剖析的思路。

20 世纪 60 年代,苏联学者索柯洛夫编著了《油气运移》一书,比较系统地阐述了油气运移的地质—地球化学特征。他提出的有关油气扩散运移的“烟囱效应”掀起了化探直接找油

的新高潮。土壤盐法、荧光法、沥青法、放射性法、细菌法、地植物法、氧化—还原电位法找油应运而生。

与此同时，美国学者则把目光关注于研究烃类的生物性质。1963年 Breger I.A. 编著了《Organic Geochemistry》，全书15章，包括了对腐殖质的地球化学及干酪根、煤、碳水化合物、糖、蛋白质、氨基酸、类脂质等的地球化学研究。“有机质地球化学”一词堂然问世。他们从另一角度来观察自然界有机质的地球化学特征及其变化。其中，关于煤的地球化学和干酪根地球化学研究结论迄今仍然显现其在化石燃料科学试验研究中的重要价值。

20世纪70年代，近代科学分析技术的迅猛发展促使有机地球化学进一步裂分而产生许多分支学科：诸如油气有机地球化学、煤有机地球化学、现代沉积有机地球化学、环境有机地球化学等。石油地球化学取得了重大突破是 Tissot B.P. 和 Welte D.H. 的干酪根学说和 Eglinton G. 的生物标志化合物理论，形成的两个热点持续发展到了20世纪末。有机地球化学的迅猛发展得益于分析测试方法和实验技术上的革命性变化，特别是分析测试方法由破坏性分析转变为非破坏性分析，大量取样分析到微量测定，大范围综合测试到高精度、高分辨率、高灵敏度测定。另外，计算机技术的广泛应用，使得现在的有机地球化学可以获得精确的数据和海量的地球化学信息，便于发现新的现象，催生了有机地球化学新理论和石油地球科学新理论。关于岩石热解分析技术、轻烃分析技术、多环芳香烃分析技术以及稳定同位素分析技术和包裹体分析技术都是在这一历史阶段应运而生并且取得了长足的进展。

回溯上述五项技术的发展历程不难看出，它们得益于油气勘探事业的需求和发展，得益于分析测试技术的改进和发展。正是因为这五项技术在勘探实践中得到了越来越充分的应用，并且经历各种不同的客观地质体的比较、推敲和磨炼，它们的指标体系和应用价值才日臻成熟。因此，我们将此书命名为《应用油气地球化学》。

油气地球化学和应用油气地球化学是石油地球化学两个重要组成部分。油气地球化学侧重于运用有机化学的原理研究石油的成因、运移、聚集和演变规律的理论。应用油气地球化学则侧重于讲授各种分析方法和分析技术在油气勘探中的应用。前者重理论，后者重实践，二者是统一的，不能截然分开。应用油气地球化学是指根据有机地球化学原理，采用各种分析方法和分析手段，来研究油气的生成、运移、聚集和变化规律，指导油气勘探。

当我们在学习应用油气地球化学时，应当注意到它的学科特点，把握这些特点，这对于我们的研究工作将是有益的。

首先，应用油气地球化学是一门实验科学，各种认识、决断主要来自于各种各样的实验分析结果。因此，每一个综合研究人员都应当重视实验环节，知晓有关实验的基本原理、实验数据的精确性和可靠性。善于从实验数据中分析矛盾，去伪存真，切记不可盲目根据分析资料下结论。

其次，应用油气地球化学是一门综合性学科，它涵盖了诸多分析手段，而各种分析项目所提供的信息范畴与其能够解决的地球化学问题亦各有不同。它们可以提供数以百计的地球化学参数，但是一条可靠的地球化学结论，往往不是从某项单一的指标得出来的，而是综合利用多项技术资料得出互为印证的认识，这是应用油气地球化学研究的一个特点。因此，弄

清楚指标与指标之间的关系、各种指标的适用范围以及它对客观地质体的诊断价值是很重要的。

另一方面，值得注意的是应用油气地球化学研究工作的独立性和依赖性。独立性是要求研究人员善于根据大量的地球化学信息做出判断，提出独立见解，有可靠依据时，要坚持己见。因为我们应当确认，在任何领域的研究工作中，新方法、新指标必将带来新的认识。依赖性是指任何地球化学信息的解释要符合客观地质体。亦即，当你得出一个地球化学观点时，要注意这种认识在地质上是不是站得住、行得通？合理不合理？不考虑这个问题就可能产生两种偏向：其一，你的研究成果变成了单纯的地球化学设想，解决不了任何石油地质问题；其二，你的认识与客观地质体背道而驰。当你把地球化学—地质资料很好地结合起来分析时，所得出的结论将反馈于地质研究，使地质认识更加准确、更加深化。这就是应用油气地球化学与石油地质学相辅相成的密切关系。因此，我们在研究工作中，一定要注意把握地质学、分析化学、有机化学、地球物理学、数学与应用油气地球化学之间的相互渗透关系，才能把这项研究工作推向纵深发展。

关于这本书的编撰，我们的思路是采取纵横交织的方案。上篇是分析测试技术，从纵向的角度来介绍五项常用的油气地球化学测试技术以及这些技术所产生的地球化学指标体系。通过学习分析原理，掌握分析方法、学会谱图解释。下篇介绍应用研究，从横向的角度来讨论油气勘探中的几个重要的油气地球化学问题。其中包括：烃源岩评价、油气源对比、油气的运移与聚集、油气成藏注入史与成藏模式研究。通过勘探实例的综合分析，学习不同指标体系的交叉渗透和融会贯通。

确切地说，石油地质和油气勘探技术极其错综复杂，我们只能借助石油地质、石油地球物理、石油地球化学和盆地分析四大学科技术上的不断发展和认识上的交叉渗透，才可能驱使我们的认识逐步逼近客观地质体，更加有效地降低勘探成本，更加有效地提高勘探效率。

本书前言由林壬子编写；第一章由刚文哲编写；第二章和第三章由林壬子编写；第四章、第五章、第六章、第七章和第八章均由刚文哲编写。全书由刚文哲统编，林壬子审阅定稿。

在给研究生讲授应用地球化学课程中，通过不断积累、补充和完善，并融入我们多年科学研究的一些成果，成就此书。囿于学识和水平，错误和欠妥之处难免，敬请读者批评指正。

目 录

上 篇

第一章 热解技术在油气勘探中的应用	3
第一节 岩石热解分析方法及原理	3
第二节 岩石热解的地球化学参数及意义	5
第三节 热解技术在烃源岩评价中的应用	13
第二章 轻烃分析技术在油气勘探中的应用	19
第一节 轻烃成因地质概述	19
第二节 微生物作用对轻烃生成和分布的影响	22
第三节 有机质成熟作用对轻烃的生成和分布的影响	24
第四节 有机质类型对轻烃生成和分布的影响	34
第五节 轻烃的运移与聚集	39
第六节 罐装岩屑顶部空间气体 C_1-C_7 轻烃分析工作方法与资料解释	44
第七节 C_1-C_7 轻烃分析技术在油气勘探中的应用	51
第三章 多环芳香烃分析技术在油气勘探中的应用	65
第一节 芳香烃的分类、结构与命名	65
第二节 多环芳香烃的分离与制备	70
第三节 常见多环芳香烃化合物及其 GC / MS 特征	76
第四节 多环芳香烃的石油地球化学意义	79
第四章 稳定同位素地球化学在油气勘探中的应用	92
第一节 稳定同位素基本概念	92
第二节 生物圈的碳氢同位素组成	97
第三节 沉积物中有机质碳氢同位素组成	101
第四节 石油碳氢同位素地球化学	109
第五节 天然气碳氢同位素地球化学	121
第六节 碳氢同位素在油气勘探中的应用	131
第五章 流体包裹体在油气勘探中的应用	148
第一节 流体包裹体概念、分类	149

第二节	流体包裹体研究方法	151
第三节	流体包裹体在油气勘探中的应用	158

下 篇

第六章	烃源岩评价	181
第一节	烃源岩类型评价	181
第二节	烃源岩有机质丰度评价	183
第三节	烃源岩有机质类型评价	187
第四节	烃源岩有机质成熟度评价	198
第五节	烃源岩有机质热演化史研究	204
第六节	烃源岩生烃潜力评价及生烃量计算	208
第七章	油气源对比	211
第一节	油源对比	212
第二节	气源对比	220
第八章	油气运聚地球化学	242
第一节	影响油气运聚的地球化学作用	242
第二节	地质色层效应和运移分馏对地球化学指标的影响	245
第三节	油气运聚的其他地球化学研究方法	260
参考文献		262

上 篇

第一章 热解技术在油气勘探中的应用

热解技术是指利用生油岩评价仪 Rock-Eval 对烃源岩和储层进行评价的技术。这种仪器不仅能快速提供烃源岩的有机质丰度、类型、成熟度等评价参数,提供烃源岩评价依据,还能用于储层分析,评价储层含油气显示情况等。它最早是由法国石油研究院 Espitalie 等于 1977 年设计研制的石油生油岩快速评价仪,为法国石油研究院的专利产品。这种仪器具有如下特点:

- (1) 样品用量少;
- (2) 操作简便;
- (3) 分析速度快;
- (4) 分析成本低;
- (5) 可在一口井中密集采样分析,对剖面进行初步生油评价或筛选样品进一步分析;
- (6) 可用于现场分析(地化录井)。

由于具有上述特点,这项热解技术得到了广泛应用。

第一节 岩石热解分析及原理

一、Rock-Eval 热解仪的基本结构

Rock-Eval 热解仪主要由自动进样器、热解舱、温度程序器和检测系统组成(图 1-1)。

- (1) 自动进样器;
- (2) 热解舱——程序升温的炉子;
- (3) 温度程序器;
- (4) 检测器——FID(S_1 、 S_2) 火焰离子检测器;TCD(S_3) 热导检测器(含 S_2 热裂解的 CO_2)。

二、Rock-Eval 热解仪的基本原理

第一步:启动程序升温的热解炉子(1),使样品(2)在 N_2 条件下加热至 $500^\circ C$,最高可达 $600^\circ C$ 。

第二步:炉子上方有一个热解分流器(3),把热解气体分为两个相等的部分,一部分引向氢焰检测器(4),测定岩石中烃类和干酪根热解产生的烃;另一部分引向分子筛柱(5),吸收 CO_2 ,程序升温结束后,分子筛柱被加热释放出 CO_2 ,脱出气体进入色谱柱(6),经分离

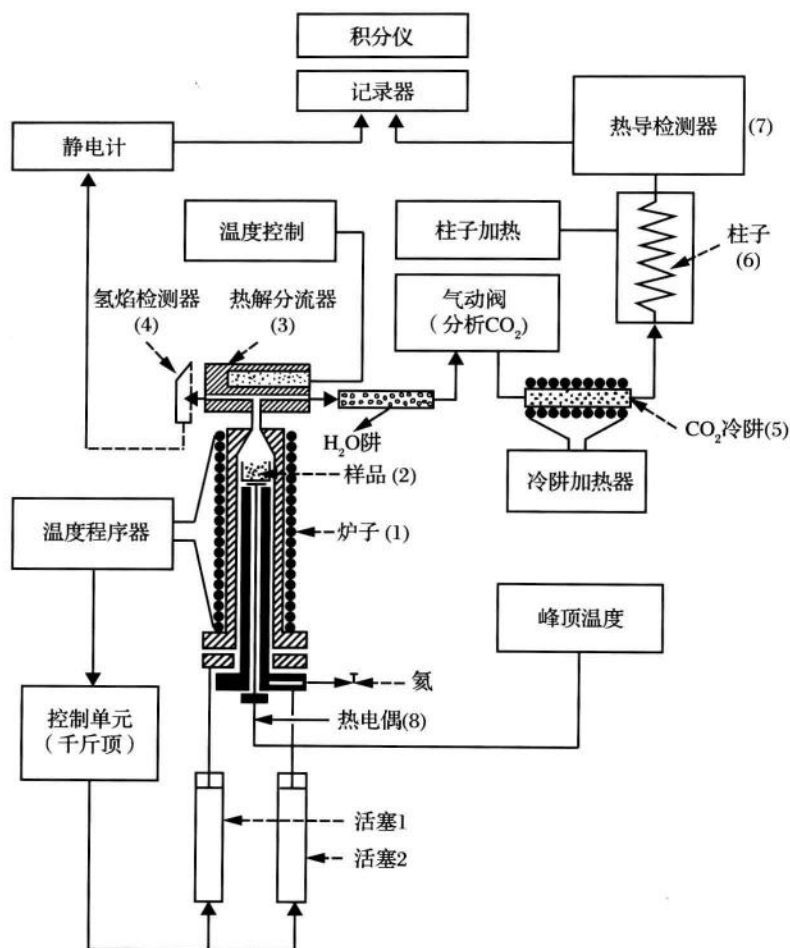


图 1-1 岩石热解仪 (Rock-Eval) 结构示意图

后进入热导检测器检测 (7)。

第三步：炉内有一个热电偶即钨丝探测器 (8)，在样品舟下面可以测定碳氢化合物热解最大量时的温度。

三、样品分析方法

100mg 左右岩石样品在热解炉内加热到 300℃ 时保持 3 分钟，再以 25℃ /min 升温速率加热到 600℃，然后对热解产物进行检测。

(1) 在 300℃ 之前，岩石中的残留烃类释放出，获得 S_1 峰 [mg/g (HC/rock)];

(2) 300~600℃ 之间，干酪根、胶质、沥青质裂解获得了烃和氧。 S_2 为烃峰，mg/g (HC/rock); S_3 为 CO_2 峰，指含氧化合物在 300~390℃ 降解，mg/g (CO_2 /rock) (图 1-2);

(3) 最高热解峰温 T_{max} (S_2 峰的最高热解峰温)。

一般情况下，对岩石热解温度有以下选择要求：

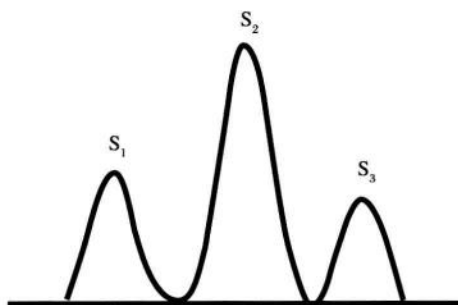


图 1-2 岩石热解谱图示意图

热蒸发的温度小于 300°C (获得 S_1), 裂解温度 $300\sim 600^{\circ}\text{C}$ (获得 S_2 、 S_3)。为了避免碳酸盐分解造成干扰 CO_2 含量大小的记录, S_3 峰的温度应小于 400°C 。

第二节 岩石热解的地球化学参数及意义

岩石经过热解以后可获得直接参数和间接参数。直接参数如下:

S_1 自由烃峰 (Free hydrocarbons);

S_2 热解烃峰 (Present potentation of the souce rock);

S_3 有机二氧化碳峰 (Oxygen containing compounds);

T_{max} 最高热解峰温 $^{\circ}\text{C}$ 。

间接参数如下:

氢指数 HI (Hydrogen Index);

氧指数 OI (Oxygen Index);

产率指数 PI (Production Index);

降解潜率 D 。

一、 S_1 峰

沉积物中的有机质一般划分为可溶有机质 (溶于常规有机溶剂) 和干酪根 (不溶于常规有机溶剂) 两部分。可溶有机质的可溶性直接与有机分子的大小有关。一般而言, 可溶有机质含有的自由烃类其碳数为 $\text{C}_1\text{—C}_{40}$, 而重烃和含 NSO(氮硫氧) 化合物多结合于胶质和沥青质中。

(一) 沥青组成与岩石热解峰的关系

岩石可抽提有机质与热解峰关系如图 1-3 所示。从图中可以看出, S_0 峰为 $\text{C}_1\text{—C}_7$ 气态烃峰, 易于逸散, S_1 峰主要是由 $\text{C}_7\text{—C}_{33}$ 烃类化合物热解形成, 相对碳数较低, 而 S_2 峰主要相对碳数较高的重烃化合物热解而成, 其中胶质、沥青质等杂原子化合物热解对 S_2 峰贡献较小。

对于 S_1 峰来说，未成熟的沉积物中 S_1 峰相对较低。

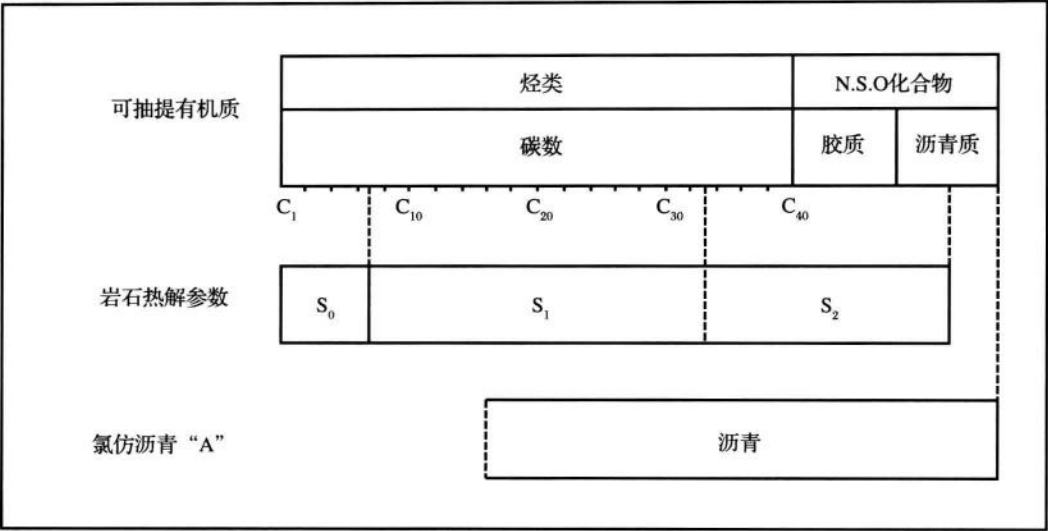


图 1-3 岩石可抽提有机质与热解峰关系图 (据 M.L.Bordenave, 1993)

(二) S_1 峰的地球化学意义

(1) S_1 峰 (包括 S_0) 作为判别烃类运移的指标;

(2) 判别污染。如果 S_1 / S_2 比值非常高 (高于地质体中的含量) 说明钻井过程中有钻井液污染。

S_0 峰是 $C_1 - C_7$ 的气态烃 (Gaseous hydrocarbons)，通常会损失掉，当分析罐装气时才能获得 S_0 峰。

二、 S_2 峰

(一) S_2 峰的烃类组成

(1) 主要来源于干酪根的初次裂解成烃;

(2) 部分来源于热蒸发作用和重烃、胶质、沥青质的初次裂解成烃。

(二) S_2 峰意义

代表了一个开放系统中，源岩在持续、完全的热演化过程中能生成油、气的总量。 S_2 值给了一个合理评价源岩目前生烃潜力的方法，即从现阶段到演化最终阶段源岩能生成油气的总量。

(三) 影响 S_2 值的因素

(1) 有机质类型的影响。有机质类型不同，其热解获得的 S_2 有很大差别。一般来说，有机质类型越好，其热解 S_2 越大，有机质类型越差，其热解 S_2 越小。据未熟有机质热解结果表明，I 型干酪根 70% ~ 80% 转化为烃类即 S_2 ，II 型干酪根 45% ~ 50% 转化为 S_2 ，而 III 型干酪根 10% ~ 25% 转化为 S_2 烃类;

(2) 有机质丰度的影响。有机质丰度高, 其热解获得 S_2 就大, 有机质丰度低, 热解获得 S_2 就小;

(3) 有机质成熟度的影响。随着有机质成熟度增大, S_2 逐渐降低;

(4) 矿物基质的影响。黏土矿物基质对 S_2 峰的影响是非常明显的, 特别是蒙皂石和伊利石影响较大, 其影响结果如图 1-4 示。

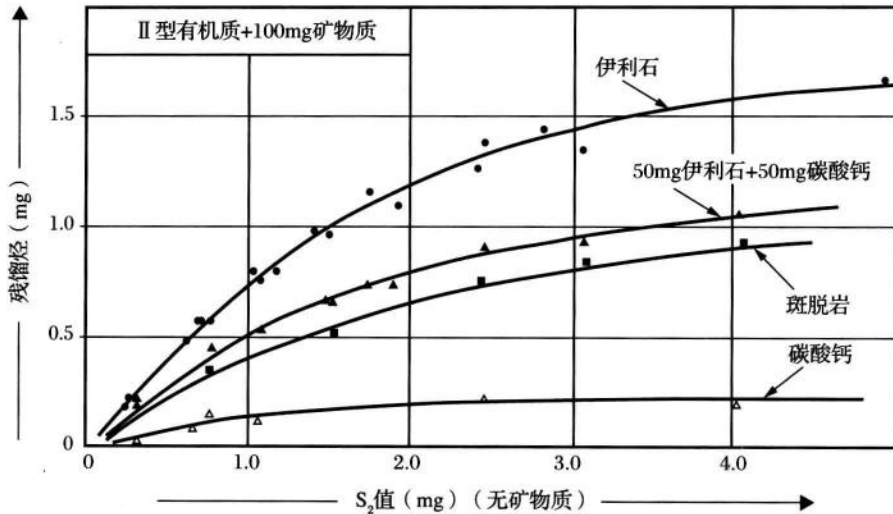


图 1-4 矿物基质对 S_2 峰影响实验图 (据 M.L.Bordenave, 1993)

三、 S_3 峰

(一) S_3 峰意义

在热降解过程中, 含氧化合物迅速降解成烃类、水、CO 和 CO₂。 S_3 峰记录了有机质降解成 CO₂ 的量, 测量时, S_2 峰的温度要低于 400℃, 这是为了避免碳酸盐、菱铁矿等矿物质分解形成的 CO₂ 的干扰。

(二) 影响 S_3 峰的因素

(1) 有机质类型的影响。Ⅲ型干酪根, S_3 峰高, I 型、II 型干酪根, S_3 峰低;

(2) 有机质成熟度的影响。随着有机质成熟度增大, S_3 峰迅速降低 (O-C-、-HO 氧化掉)。

值得注意的是当总有机碳 TOC 小于 0.5% 时或当菱铁矿 (siderite) 含量高时, S_3 峰的精度很低。例如三角洲环境下的高含菱铁矿的岩石, 其 S_3 峰的代表性较差。

四、 T_{max} (℃)

(一) T_{max} 参数的意义

T_{max} 指干酪根的最大裂解温度, 即 S_2 峰的最大裂解温度。由于高成熟度干酪根中的化学键具有高活化能, 需要高能 (高温) 来裂解, 因此可用 T_{max} 来评价其成熟度。

(二) 影响 $T_{\max}$ 的因素

Landais 等 (1985) 指出, 非正常值的 $T_{\max}$ 与当地放射性铀含量高有关。此外, $T_{\max}$ 与分析测试条件有关。例如升温速率也是一个影响因素, 一般升温速率为 $25^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 升温速率增大, $T_{\max}$ 增大。图 1-5 表明了升温速率对热解峰温的影响。

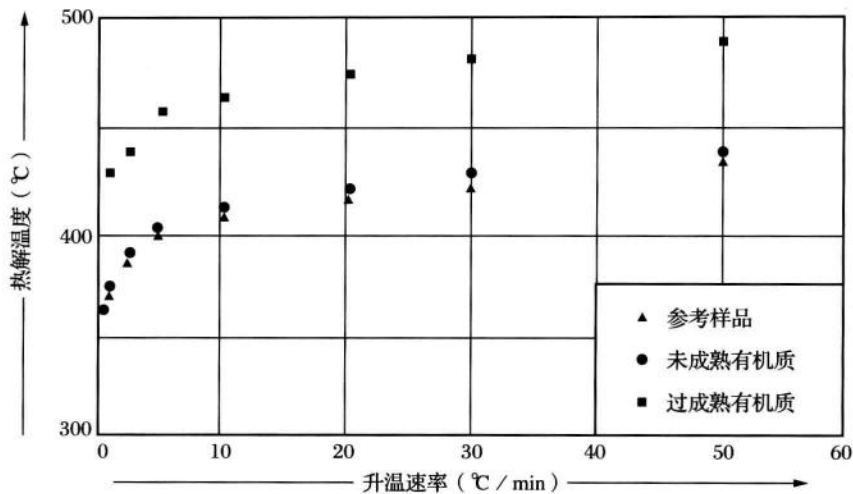


图 1-5 热解温度随着升温速率变化关系图 (据 M.L.Bordenave, 1993)

(三) $T_{\max}$ 与有机质类型及生油窗的关系

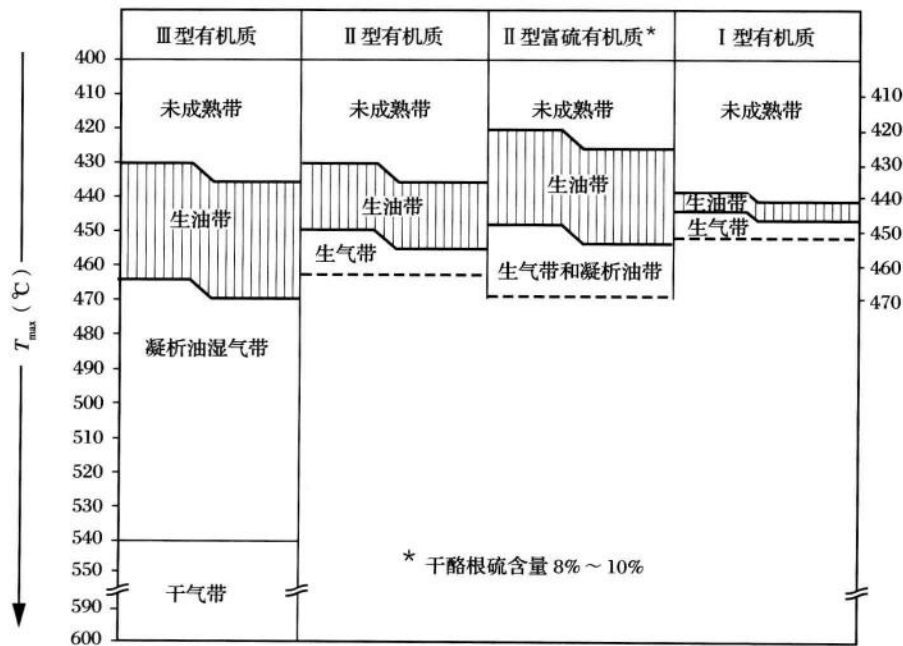


图 1-6 $T_{\max}$ 与有机质类型及生油窗关系图 (据 M.L.Bordenave, 1993)

$T_{\max}$ 与有机质类型及生油窗的关系如图 1-6 示。根据 M.L.Bordenave (1993) 研究认为, 对于 I 型干酪根, 石油生成时 R_o 为 0.7%, 此时热解 $T_{\max}$ 为 440℃, 但当 R_o 为 1.0% 时, 裂解反应突然发生, 几乎所有的干酪根都转化了。对 I 型干酪根来说, $T_{\max}$ 不是一个好的演化参数, 因为它从 R_o 为 0.7% 到 R_o 为 1.0% 时变化太快。对于 II 型干酪根, 石油生成时 R_o 为 0.6% 左右, 此时 $T_{\max}$ 为 435℃; 当 R_o 为 1.0% 时, 此时 $T_{\max}$ 为 455℃; 当达到凝析油和湿气带时, 对应的 $T_{\max}$ 为 455~470℃。对于 III 型干酪根, 烃类形成时, R_o 为 0.60% 或 0.70% 时, $T_{\max}$ 为 430℃; 当 R_o 为 1.30%, 进入凝析油带, 其 $T_{\max}$ 为 470℃; 当 R_o 大于 2.0% 时, 进入干气带, $T_{\max}$ 大于 540℃。

综上所述, 可以得出以下结论:

- (1) $T_{\max}$ 对于 II 型和 III 型干酪根 (或有机质) 是一个很好的成熟度指标;
 - (2) 在多数条件下, 油窗开始的 $T_{\max}$ 大约为 435℃, 对于 II 型富硫有机质, 其油窗的生成温度 $T_{\max}$ 为 420℃;
 - (3) 凝析油湿气带开始时, I 型干酪根对应 $T_{\max}$ 为 450℃, II 型干酪根对应 $T_{\max}$ 为 455℃, III 型干酪根对应 $T_{\max}$ 为 470℃;
 - (4) 干气带开始时, 对于 III 干酪根来说, 对应 $T_{\max}$ 为 540℃。
- (四) $T_{\max}$ 与 R_o 的关系

法国石油研究院 Espitalie 提出的不同类型有机质在不同热演化阶段 $T_{\max}$ 值与 R_o 值对应关系见表 1-1。

表 1-1 法国石油研究院提出的 $T_{\max}$ 与 R_o 关系对应范围表 (据 Espitalie, 1982)

成熟度指标	未熟	生油	凝析油	湿气	干气
R_o (%)	<0.5	0.5 ~ 1.3	1.0 ~ 1.5	1.3 ~ 2.0	>2.0
I 型 $T_{\max}$ (℃)	<440	440 ~ 450			
II 型 $T_{\max}$ (℃)	<435	435 ~ 455			
III 型 $T_{\max}$ (℃)	<430	430 ~ 465	455 ~ 475	465 ~ 540	>540

邬立言等人 (1986) 在分析了中国大量烃源岩热解资料的基础上, 提出了中国烃源岩 $T_{\max}$ 与 R_o 对应关系表 (表 1-2), 为我国烃源岩成熟度评价提供了依据。

表 1-2 我国烃源岩 $T_{\max}$ 与 R_o 关系对应范围表 (据邬立言等, 1986)

成熟度指标	未熟	生油	凝析油	湿气	干气
R_o (%)	<0.5	0.5 ~ 1.3	1.0 ~ 1.5	1.3 ~ 2.0	>2.0
I 型 $T_{\max}$ (℃)	<437	437 ~ 460	450 ~ 465	460 ~ 490	>490
II 型 $T_{\max}$ (℃)	<435	435 ~ 455	447 ~ 460	455 ~ 490	>490
III 型 $T_{\max}$ (℃)	<432	432 ~ 460	445 ~ 470	460 ~ 505	>505