

实 用 煤 岩 学

赵师庆 著

地 质 出 版 社

实 用 煤 岩 学

赵 师 庆 著

地 质 出 版 社

内 容 提 要

本书以实用煤岩学领域的国内外新成果为基础,系统地叙述了煤岩学在地质及加工工艺领域内的实际应用;介绍了煤炭、石油和天然气的生因及演化上的内在联系;总结了作者在煤的还原性质和煤成烃以及煤质评价等方面的研究成果及其实用价值。全书内容展现了现代煤岩学的研究状况、科学意义和经济效益。本书可供煤田、石油和天然气地质学专业以及煤化工专业的工程技术人员和大专院校师生参考使用。

实 用 煤 岩 学

赵师庆 著

责任编辑:牟相欣

地质出版社出版发行
(北京和平里)

地质出版社印刷厂印刷
(北京海淀区学院路29号)
新华书店总店科技发行所经销



开本: 787×1092¹/₁₆。印张: 13.25 插页: 4 页 字数: 311000

1991年7月北京第一版·1991年7月北京第一次印刷

印数: 1—1500 册 国内定价: 9.20 元

ISBN 7-116-00837-3/P·719

前 言

《实用煤岩学》是以该领域的国内外新的研究成果（特别是作者的科研成果）为基础编写而成的。其主要内容包括：煤及沉积岩中分散有机物质的形成和演化，决定煤性质的基本因素，煤岩学在地质领域中的应用，煤岩学在加工领域中的应用等。

编写本书是作者多年的宿愿。目的是：（1）力图阐明实用煤岩学新学科的生命力；（2）反映实用煤岩学的现状和发展；（3）展现实用煤岩学这一边缘学科的性质，以沟通与不同学科间的联系、交流与合作；（4）推动实用煤岩学向更深层次发展，以解决更多的重要科学问题。

在本书的编写过程中，一直得到诸多同行专家的鼓励和帮助；地质矿产部南方煤炭测试中心高级工程师董名山教授对本书的编写提出了许多指导性意见；历届研究生为本书的部分内容付出了辛勤劳动。在此一并致以深切的谢意。

目 录

绪论	1
第一章 煤及沉积岩中分散有机质的形成与演化	3
第一节 有机质的形成和类型	3
一、有机质的产生及聚积	3
二、有机质的基本类型	3
第二节 有机质的成岩前作用	5
一、泥炭化阶段——形成泥炭	5
二、腐泥化阶段——形成腐泥	11
三、沥青化阶段——形成干酪根	12
第三节 有机质的成岩作用	14
一、泥炭成岩阶段——形成腐殖褐煤	14
二、腐泥成岩阶段——形成腐泥褐煤	19
三、干酪根成岩阶段——形成生物甲烷干气	19
第四节 有机质的变质作用	20
一、腐殖煤变质阶段——形成腐殖烟煤和无烟煤	20
二、腐泥煤变质阶段——形成腐泥烟煤和无烟煤	31
三、干酪根变质阶段——形成石油和天然气	31
第五节 煤炭与石油在成因及演化上的共性和对比	34
第二章 决定煤性质的基本成因因素	38
第一节 煤和分散有机质的显微组成	38
一、煤的显微组分及研究进展	38
二、分散有机质的显微组分及其分类	45
第二节 煤和分散有机质的演化程度	52
一、表征有机质演化程度的各种参数	52
二、有机物质演化程度的测定	55
第三节 腐殖煤的还原性质	68
一、还原性质的存在及表现	69
二、还原性质是影响我国腐殖煤性质的第三成因因素	76
三、还原性质受控于含煤建造煤层的古沉积环境	79
四、不同还原类型煤性质的差异	80
五、沉煤环境—成煤类型—煤质特征概略成因模型	83
六、还原性质成因机理的探讨	83
七、研究还原性质的重要意义	90
第三章 煤岩学在地质领域中的应用	91
第一节 煤层对比的研究	91
一、宏观煤岩标志	91

二、微观煤岩标志	94
三、高岭石泥岩夹矸的标志	97
第二节 成煤环境的研究	99
一、煤岩物质成分与成煤环境的关系	99
二、成煤环境/模式对煤质的控制	106
第三节 地质发展史的研究	112
一、古构造及其发展的研究	112
二、古地热及热历史的研究	122
第四节 源岩生烃潜力的研究	135
一、烃源岩的母质成分及其生烃性能的研究	135
二、烃源岩热演化成烃模式的研究	141
三、煤型源岩生烃潜力的评价	147
第四章 煤岩学在加工工艺领域中的应用	171
第一节 煤的炼焦性的研究	171
一、煤岩配煤预测焦炭强度的方法	171
二、煤岩研究配煤的实用性	179
三、煤及镜质组粘结性与结焦性的初步评价	182
第二节 煤液化性的研究	186
一、影响煤液化性的内生因素及其与转化率的关系	186
二、预测液化性能的煤岩学方法	192
三、液化残渣的煤岩学研究	193
四、煤及镜质组液化性能的初步评价	195
第三节 煤燃烧性的研究	200
主要参考文献	202

绪 论

煤岩学是以岩石学观点用光学手段研究固体可燃矿物的一门学科。几十年来, 归属煤田地质学范畴的这一新学科, 无论从基础、方法还是应用研究方面都获得众所公认的进展, 特别是进入本世纪70年代, 在应用研究领域始终沿着两大实用方向——在地质学和加工工艺学领域中的实际应用——稳步前进。

1953年在荷兰成立了“国际煤岩学委员会 (ICCP)”, 随后相继建立了“煤岩学在炼焦 (加工) 工业中的应用”和“煤岩学在油气地质中的应用”两个分会, 并开展着卓有成效的工作。

在煤加工利用领域, 试图用煤岩指标和方法研究煤的炼焦性及配煤问题早在30年代就引起了煤岩工作者的注意, 苏联首次提出并发展了一层煤本身就是各种性质不同的组分自然配煤的概念。1957年 И.И. Аммосов 最先提出了著名的煤岩配煤理论, 1961年 N. Schapiro 对此理论给予了补充和完善, 从而建立了煤岩参数配煤和焦炭质量预测的一套较为完整的计算方法。50—60年代, 在研究煤加工过程热变化基础上, 丰富了成焦机理的内容, 同时提出了粘结性煤在加热过程中必须经过中间相的理论, 这对固体燃料加工有重要意义。70年代, 美国、澳大利亚、日本、苏联等国家相继提出了适合于本国情况的研究炼焦性和预测焦炭质量的煤岩学方法, 并在炼焦工业生产上得到了实际应用。近20年来, 焦炭显微结构和焦炭岩相学研究有所发展, 目前它已成为研究质量、控制加工条件以及了解高炉焦炭动态的重要手段。与此同时, 煤和显微组分在燃烧、炭化、气化和液化等重要加工利用领域中的研究工作也取得了进展。多年来的实践证明, 煤岩学在焦化工业中的应用最为成熟和成功, 其重要标志是, 在日本的一些焦化厂已建立了一整套用煤岩参数配煤的炼焦工艺自动化流程, 代替了炼焦配煤传统的化学方法。这些成果标志着“工艺煤岩学”这个分支在实践中已经或正在形成, 并构成了实用煤岩学的重要基础和支柱。

在煤炭及烃类地质学领域, 试图利用煤岩指标和方法研究烃源岩的母质成分和热演化程度, 从而评价其生烃潜能的问题也很早就引起煤岩工作者的关注。19世纪 M. A. Roger 首先建立了“有机变质作用”的概念。20世纪30年代初, White 注意到石油演化与煤变质之间的相关性, 并提出了著名的“定碳比”理论, 对固态煤和液态油之间进行了成功的对比。煤炭与油气在形成和演化上的相似性, 以及煤的煤化阶段与油气热成熟阶段间的可比性, 已成为应用煤岩学和煤镜质组反射率指标来预测烃源岩的生烃能力和含油气远景的理论基础, 这也是煤岩学得以成功地应用于油气勘探之所在。60—70年代的工作, 不仅表明煤岩学能有效地研究或解决诸如沉积环境、古构造和受热演化史等重要的地质问题, 而且还证明了煤岩学与有机地球化学相结合是现代油气评价的最佳手段, 并取得了卓有成效的结果。近20年来, 由于荧光显微镜和光度术引用到煤岩学中, 使得这一实用领域的研究内容更加丰富, 取得的重要成果有: 煤和分散有机质 (干酪根) 显微组分的新发现及其与生烃能力的关系; 低煤阶高氢煤及其镜质组的异常产烃性能; 煤成气与煤成油之新见等等。这方面的丰硕成果孕育着“有机岩石学 (用煤岩学方法研究油页岩和烃源岩等沉积岩中分

散有机物)”新学科的诞生。1984年正式成立了“国际有机岩石学学会 (TSOP)”,且每年召开一次学术会议。有机岩石学构成了实用煤岩学的另一个分支。

实用煤岩学在上述两个领域取得的迅速进展和日臻成熟,充分体现了当代学科间相互渗透、结合和促进的科学发展的总趋势和总特点。

第一章 煤及沉积岩中分散有机质的形成与演化

第一节 有机质的形成和类型

一、有机质的产生及聚积

地质体中的有机质是地壳中具有碳键的含碳化合物的总称,不包括不具碳键的碳酸盐、 CO_2 、 CO 一类的无机化合物和金刚石、石墨等含碳物质。沉积有机质来源于有生命的有机物及其代谢产物。

碳元素及其化合物在地壳上是循环变化的,光合作用是沉积有机物最基本的生物化学过程。阳光通过有机物的合成作用产物——植物和动物,进入生物地球化学循环(图1-1)。碳化合物是以 CO_2 和 CH_4 为起点,借助光合作用形成了生物(藻类、细菌、真菌及高等植物和动物)。这些生物体死亡以后,其组分,如碳水化合物、蛋白质、类脂物和木质素等按照沉积介质的不同(氧化还原性质),在微生物作用下遭到不同程度的分解,分解产物(CO_2 、 H_2O 、 CH_4)的一部分被另外一些生物当作能源而再循环,完全没有或部分遭到分解而保存下来的有机碎屑就进入了沉积物中,这部分就是沉积有机质的主要来源,虽然它只占原始有机物质数量的一小部分。有机物质聚积进入沉积物,取决于保存和富集、降解和稀释的“平衡”作用;沉积有机物质聚积的最关键因素是厌氧环境的发展。

有机碎屑埋入沉积物后,先转化为腐殖酸、腐殖质,而后在时间、热能和压力作用下,这些古老沉积物中的干酪根和其它可溶有机质转变成烃类。已形成的富烃源岩可以经过抬升遭受风化形成甲烷,进而氧化形成 CO_2 进入再循环;也可以继续下沉向高级烃类和变质岩转化。

现在,陆生植物与海洋浮游植物生成大致等量的有机碳。海洋有机物原始产率为 $1.5-7.0 \times 10^{10} \text{t}/\text{C}_{\text{org}}/\text{a}$,陆地有机物原始产率为 $1.4-7.8 \times 10^{10} \text{t}/\text{C}_{\text{org}}/\text{a}$ (Huc, 1980)。

生物地球化学循环(图1-1)包括各种碳源及储集层,它们是整个碳循环的主要贡献者。在地表或地表附近,大约只有数量巨大的碳的1%(估计为 $2 \times 10^{22} \text{g}$)在生物圈中快速循环。“地表碳”的大部分是由无机的碳酸盐、不溶有机质(干酪根)和数量较小的矿物燃料组成(Hunt, 1979)。沉积有机质组成的变化是原始有机物质的类型时间及温度的函数。较老的沉积物只含有原始生物的残余物,沉积物的时代越老,其有机质的化学组成就越趋于一致(Brooks和Shaw, 1972)。

二、有机质的基本类型

沉积体中的有机化合物与无机化合物不同,有机化合物主要由C、H、O、N、S等元素组成。由于碳原子之间可相互以1—3个共价键联接,并可与其它元素原子相结合,还有分子量相同、原子数相等而结构和化学性质不同的同分异构现象存在,所以,有机化合物的数量远比无机化合物多。

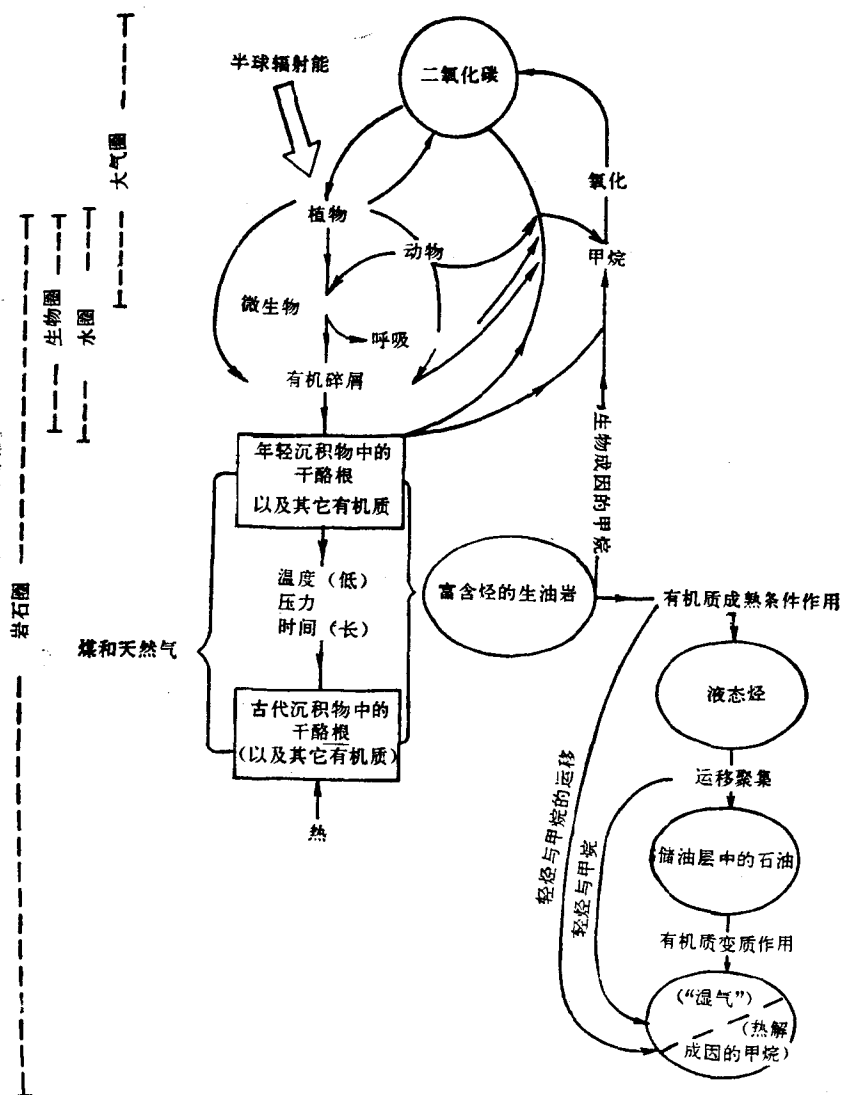


图 1-1 生物地球化学循环
(据Brooks, 1981)

按照有机质在沉积岩中的形成和存在方式，可把沉积有机质区分为分散的和集中的两大类（图1-2）。前者包括可溶有机质和不可溶有机质（干酪根）；后者则可分为固体的煤和各种沥青以及液体石油等可燃有机矿产。

可溶有机质（EOM），即可溶于有机溶剂的那部分分散的有机物质，它是具游离性、还原性的沥青，与石油的性质比较接近。可溶有机质通常仅占沉积岩中有机物质的2—15%。

不可溶有机质，通常称之为干酪根（Kerogen），指存在于沉积岩和沉积物中不溶于含水碱、酸性溶剂，也不溶于普通有机溶剂的分散有机物质。干酪根是由杂原子键和脂肪族键联结的缩状核所形成的大分子有机物质，是岩石中分布最普遍、数量最多的一类有机物质；是地壳上沉积有机质的最主要形式，它比煤和石油的数量丰富1000倍（Hunt, 1972）；

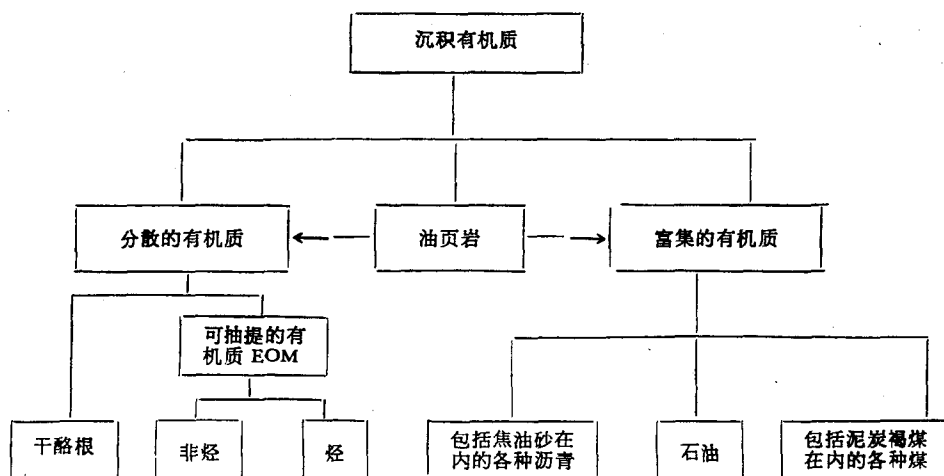


图 1-2 沉积有机质的分类
(据Brooks, 1980)

在古代沉积岩中一般占分散有机质的80—90%，而在现代沉积岩中约占95%以上。

第二节 有机质的成岩前作用

自然界的成煤植物（低等和高等），主要由四大类有机化合物组成，即碳水化合物（糖类）、本质素、蛋白质和脂类化合物。低等植物主要由蛋白质和脂肪组成，高等植物主要由纤维素和碳水化合物组成。除了这四大类化合物外，色素、丹宁（鞣质）等也是组成植物的一种化合物。

目前研究认为，不论高等或是低等植物，也不论是高等植物中的上述哪一种有机成分都可参与泥炭进而形成煤；部分植物对石油的形成也有贡献。

一、泥炭化阶段——形成泥炭

高等植物转化为泥炭的全过程称作泥炭化阶段。这一过程是在沼泽中有微生物的参与下发生的一个非常复杂的化学变化作用。所以泥炭化作用实质上是一个生物化学作用。

对现代泥炭沼泽的研究表明，泥炭的最上层（表层）或称“泥炭形成层”空气畅通，温度较高，有大量有机质存在，适宜于微生物的繁殖活动，因而这里含有大量的需氧性细菌、放线菌和真菌，而厌氧细菌的数量则比较少。植物有机组成的各个部分的氧化分解和水解作用基本上是在泥炭沼泽的表层进行的。向下随着深度的增加逐步为水所覆盖。这里需氧性细菌、真菌等减少，厌氧细菌增多。由于厌氧细菌消耗了有机物质中的氧，造成了缺氧条件，因而到了底层逐渐为“还原层”所代替。处在表层和底层之间的过渡层称之为“中间层”。

泥炭表层为一氧化环境，是植物经历氧化分解转变成各种较为简单的有机化合物和形成部分腐殖酸并向泥炭过渡的主要场所。因此这一氧化分解的过程也称作腐殖化作用，它的实质是一个缓慢进展的氧化作用，得到的一般是贫氢的产物。与它相伴生的还有丝炭化作用和残殖化作用。泥炭层深部的还原层则处在还原环境中，在泥炭形成层中形成的和保留下来的各种简单、性质活泼的有机化合物在这里的缺氧条件下和有矿物离子的参与下，

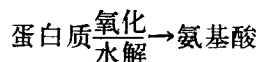
进行复杂的合成作用转变为腐殖酸及其他新合成的化合物，进而组成泥炭。这个过程也可称作合成化作用，它的实质是一个缓慢进展的还原作用，得到的一般是富氢的产物。从胶体化学观点看，这个过程也是个凝胶化作用的过程。对植物而言，鉴于这一期间既经受生物化学作用，又同时发生胶体化学变化，因此有人把这一阶段概称作“生物化学凝胶化作用”。泥炭的中间层则处在氧化-还原的过渡环境中。这里既有表层也有底层中发生的各种作用，其所进行的作用及所得的产物将具有不同程度的中间性质。

在泥炭化作用期间出现的这两种作用不能截然分开，它们没有一个固定的界线，并可相互转化。所以，泥炭化阶段是各种变化作用相互影响、相互制约、相互递变的一个非常复杂的生物化学变化过程。

下面介绍植物的各有机组分在泥炭化阶段变化的一般情况：

(一) 蛋白质的变化

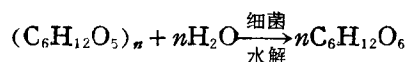
在腐殖化作用过程中，可水解为氨基酸：



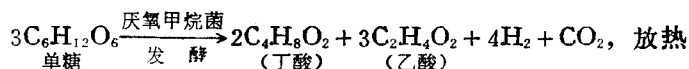
如果在微生物（需氧性细菌中的无芽孢杆菌具有强烈分解蛋白质的能力）作用下，氧化作用也可充分进行，蛋白质最后分解为水、CO₂、氨及硫、磷的氧化物等逸散掉而无法参与泥炭的形成。

(二) 纤维素和木质素的变化

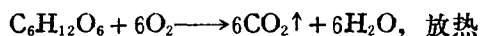
1. 纤维素的变化：在腐殖化作用过程中，需氧性细菌通过纤维素酶的催化作用，可把纤维素水解成单糖类：



当转变为还原环境时，单糖在还原菌参与下发酵可以生成脂肪酸（丁酸和乙酸）：



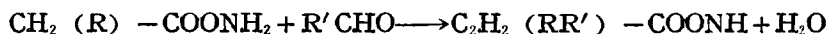
如果进一步氧化分解，单糖最终转变为CO₂和水逸散：



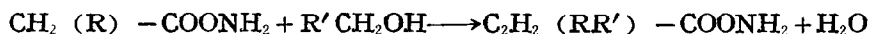
过去认为，纤维素不能参与泥炭和煤的形成，现在已知，蛋白质分解出的氨基酸，可与纤维素或果胶质分解出的糖类，在主要为还原环境条件下进行合成化作用，形成腐殖物质（主要是腐殖酸）。

转变成腐殖物质的途径有二种：

(1) 氨基酸与糖中的醛基起作用形成亚氨基化合物（腐殖物质的缩合产物）：



(2) 氨基酸与糖中的羟基起作用可生成氨基酸型化合物（腐殖物质缩合物）：



主要为腐殖酸的腐殖物质构成了泥炭的主要成分。ТИМОВ (1953, 1956) 很强调中间产物的合成作用，认为易分解的不稳定组分可以合成为比较稳定的物质，从而参与成煤作用。他进一步指出，在低矿物、低滋养贫营养的高位沼泽中，腐殖酸与氨基酸和糖类可合成为沥青质。在低位沼泽中，由于腐殖酸与其中的钙盐结合成为腐殖酸钙，而不能进一

步合成为新生的沥青质。相反, E. Stach (1975) 认为, 低位沼泽中的大量盐类矿物质极易与腐殖酸发生化学合成作用生成腐殖酸盐和沥青物质, 导致低位沼泽呈中性或碱性介质形成粘结性较强的镜质组和煤。

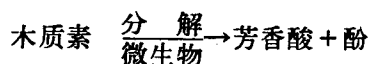
E. Welte (1952) 认为, 从纤维素形成腐殖酸, 酸性环境是特别适宜的。纤维素参与成煤的最有力的证据是在褐煤的木质部中出现了纤维素 (含量约为10—20%或更多)。

腐殖酸是高分子羟基芳香羧酸所组成的复杂混合物, 含有C、H、O、N、S等元素, 有芳香核并具稠环芳香结构, 含有羟基、羧基、甲氧基、羰基等官能团, 分子量可大可小, 呈褐色、黑色, 可溶于碱性溶液, 含氧量高, 具酸性。腐殖酸也是一种无定形的高分子胶体, 有吸水膨胀的性质。腐殖酸被认为是形成软褐煤中腐殖组和烟煤中镜质组显微组分的前身物质, 也可能是形成丝质组显微组分的前身物质, 但它们在变化过程中的化学反应不同。

沥青质是一种含O、N、S的复杂有机化合物, 可溶于一般的有机溶剂。它既是合成化作用的产物, 也可由类脂化合物如树脂、蜡质或孢粉质转化而来。有人认为, 烟煤之所以具有粘结性, 与沥青质的含量有关。

在有水参与下的高压釜中进行的模拟实验表明, 由纤维素产生的腐殖酸可达到20%, 而由木质素产生的腐殖酸只有百分之几。值得注意的是, 当纤维素在压力下受热时形成了沥青。同样, 在压力和水参与下, 对落羽杉属 (*Taxodium*) 木质部进行的煤化实验表明, 镜质组完全是通过纤维素和木质素的化学反应形成的, 纤维素的转变约在200℃, 木质素约在300℃ (Davis和Spackman, 1964)。

2. 木质素的变化: 木质素抵抗微生物的破坏能力比纤维素强, 但在腐殖化作用中仍然会受到破坏。在氧的存在下, 木质素首先遭真菌分解被破坏, 然后被需氧细菌 (通过酵素腐蚀) 再分解形成芳香酸和酚类化合物:



芳香酸, 如苯甲酸, 是组成腐殖酸的一种带羧基的有机化合物; 酚类, 如苯酚, 是组成腐殖酸的一类带羟基的芳香化合物。后者加热脱水可形成腐殖物质的稠环化合物, 两者共同组成泥炭。

如果氧化作用继续进行, 细菌可把芳香环破坏掉而形成脂肪族化合物, 再深入氧化最终将变成水和CO₂而逸散。

G. Fischer (1952) 认为, 木质素转变成腐殖酸的必要条件是需氧环境。E. Welte (1952) 指出, 在一个弱酸介质中, 只通过微生物活动就可以由木质素转变为腐殖酸, 即使在中性和碱性环境中, 通过纯化学缩合反应 (凝聚) 也能形成。只是正常地水解则很难分解木质素。当有少量氨存在时, 真菌和细菌分解木质素的速度加快。模拟实验表明, 木质素在高温、高压, 有碱性溶液的参与下, 也可转变成芳香酸和酚类化合物。

无论是木质素还是纤维素, 形成腐殖酸的数量和性质主要取决于原始物质、沼泽氧化还原电位和pH值。

(1) 凝胶化作用——腐殖组组分定型 前已述及, 植物物质经过分解合成作用形成腐殖酸和沥青质的过程, 从胶体化学观点看, 实际上也是一个凝胶化作用。植物的纤维素和木质素在物理化学上均属凝胶体, 经分解合成形成的腐殖酸和沥青质也是胶体物质。

所谓凝胶化作用是指在弱氧化和还原环境的厌氧细菌参与下,植物木质纤维素组织经分解、合成作用逐渐转变为腐殖物质的同时,细胞壁经吸水膨胀作用逐渐转变成凝胶和溶胶的整个作用过程。由于这个过程兼有生物化学作用和胶体化学作用,所以泥炭化阶段的凝胶化作用也可称作生物化学凝胶化作用。

凝胶化作用程度的不同,会产生一系列形态和细胞结构保存程度不同的凝胶化显微组分(腐殖组)保存在泥炭和软褐煤中。

细胞壁没有或微弱膨胀,细胞腔明显且排列规则的植物组织称木质结构体。其受到的凝胶化作用程度极微。随着凝胶化作用的加深,细胞壁较强或强烈膨胀,细胞腔明显缩小或残留很少很小的空隙,甚至全部闭塞,将会形成腐木质体,包括木质结构腐木质体和充分分解腐木质体。细胞壁充分膨胀,细胞腔中充满了溶胶或分泌物物质,其细胞结构只能通过色调深浅的不同加以辨认,称为团块腐殖体,它来源于充填细胞的木质素和纤维素,包括树皮鞣质体和假树皮鞣质体。细胞壁强烈膨胀,以至细胞结构完全消失,将会形成均匀的凝胶化物质,即凝胶体,包括均匀凝胶体和多孔凝胶体。若凝胶化植物组织腐殖碎屑在介质中分解成无定形溶胶状态(细小分散胶粒),其中落入有孢粉、树脂、角质和植物组织碎片以及矿物颗粒。因介质变化(电介质的加入,酸碱度变化,温度变化和氧化还原电位变化),这些溶胶可发生凝聚作用,结果会形成含有其他组织碎片的均匀或不均匀状不定形态的凝胶体。若呈溶胶状态的凝胶化组织集中或分散地以疏松程度不同的细小碎屑形式凝聚沉淀下来,则会形成碎屑腐殖体,包括细屑体和密屑体。

完整的细胞壁木质素和纤维素,先经腐殖化作用,后经生物化学凝胶化作用形成的一系列腐殖组的显微组分是在泥炭化阶段定型的;是组成泥炭—软褐煤中尚未固结成岩的凝胶化“岩石”成分。这些成分在进入成岩化阶段后,再经受地球化学凝胶化作用(Stach, 1975)就会进而形成组成硬褐煤—烟煤中的真正的岩石成分——镜质组显微组分。现今煤中的凝胶化组分确系木质素和纤维素组织沿着这样的途径演变而成。所以,泥炭化阶段定型的凝胶化组分(腐殖组)应看作是煤中凝胶化组分(镜质组)的前身。

(2) 丝炭化作用——惰性组组分定型 纤维素和木质素植物组织在腐殖化作用形成单糖化合物的过程中,由于沼泽表面比较干燥,氧气充分供应,在微生物作用下失去被氧化的原子团而脱氢、脱水和相对地增碳,从而形成丝炭化物质;或者由于“森林火”或“霉烂”引起的早期碳化而形成相对高碳、低氢、高芳构化、高反射率丝炭化物质的作用过程,称为丝炭化作用。

原始的未经变化的细胞壁组织,经丝炭化作用形成了惰性组显微组分。一般由完整细胞壁组织形成的丝质体可分为火焚丝质体和降解丝质体(Degradofusinite)两种,前者系由“森林火”引起先期碳化而形成。例如美国一些草本和木本泥炭沼泽发生过火灾,烧焦的碳化组织外观很象丝炭;西德中部的褐煤层中厚层丝炭与薄层天然焦相伴生。电子自选共振研究表明,某些丝炭在沉积前曾受过400—600℃高温作用。火焚丝质体细胞结构清晰,细胞壁很薄,反射率和突起高。降解丝质体则是由木质纤维素组织在堆积前或堆积后的泥炭形成层中受到脱水和缓慢氧化而形成的,其特点是细胞结构保存较差,反射率较低,与半丝质体相近,并往往分布在暗煤中,宏观难以识别;降解丝质体也可由木质部受到真菌的腐化分解作用而形成。象美国泥炭沼泽中落羽杉的木质部常被真菌酶作用变成似碳质(细胞结构模糊)保存下来;沼泽中的丝柏树在真菌作用下形成一种棕腐质物质而成

为丝炭的前身。

当植物木质纤维素组织先经受生物化学凝胶化作用，然后沼泽转为氧化环境再发生丝炭化作用，则可以形成与腐殖组中相应结构保存程度的各种丝炭化显微组分；如果后期丝炭化作用进行得不彻底，则会形成与腐殖组结构相应的一系列过渡的半丝炭化显微组分。同样，半丝质体也可由原始的、未变化的木质纤维素组织初期不彻底的氧化霉烂作用直接形成。

有人认为，由某些高等植物的细胞在代谢过程中沉淀的黑色素（如现代木贼属的生殖枝条及其在泥炭中的遗体）也可转变为丝质体和半丝质体。其细胞壁原来就是暗色的，所以称之为原生丝质体和半丝质体。

木质纤维素组织细胞若破碎成碎屑，经丝炭化作用将会形成碎屑惰性体；若细胞结构消失经丝炭化作用则可形成粗粒体。其特征是微突起，无细胞结构，有时呈团块状，常以基质形式胶结其他组分出现，也称丝炭化基质。有人认为，真菌和细菌代谢作用产生的暗色色素也可能参与了丝炭化基质的形成。植物中某些菌类体，如真菌菌类体就已显示出它的丝炭化性质，因为真菌菌类体源于几丁质和黑色素，就是黑色真菌菌丝体和真菌孢子变来的。

有些惰性组也可由稳定组显微组分的原始物质经丝炭化作用而形成。例如树脂菌类体，其细胞中充填树脂，或称作分泌菌类体。此外，氧化树脂体和氧化沥青体也属这种性质的惰性组。

自然界情况多变而复杂。目前发现，腐殖化作用不仅在泥炭形成层中甚为激烈，就是在比较深的厌氧还原环境的泥炭层中也很明显，甚至在软褐煤中仍然继续进行（因为在软褐煤保存很好的木质部中找到了木质素和纤维素）。实验表明，纤维素大约在暗褐煤和亮褐煤过渡阶段（C₁为70%）破坏得比较快。这些说明，凝胶化和丝炭化作用并不终止于泥炭化阶段。就是说在成岩化阶段形成的褐煤中也仍然可以继续继续进行。这个时期的凝胶化和丝炭化作用可分别称作地球化学凝胶化作用和地球化学丝炭化作用。通过这两种作用将分别使腐殖组组分和丝质组组分进一步转变成为烟煤中的镜质组组分和惰性组组分。形成镜质组的作用也叫做镜煤化作用（Stach, 1975）。

所以，同样地，泥炭—软褐煤阶段定形的丝质组（惰性组）显微组分，也应视作硬褐煤—烟煤中丝炭化组分（惰性组）的前身。

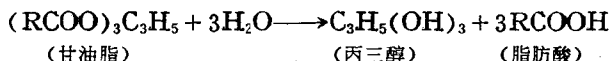
（三）丹宁和色素的变化

1. 丹宁的变化：由于木质部细胞壁浸满树脂、蜡质、丹宁或色素，增强了植物的稳定性和抗破坏性。例如，许多针叶树木，特别是浸染丹宁的红杉树木质部，不受细菌和真菌的侵袭腐解，因此它的所有微细解剖结构的细部经常保存在褐煤中。在这些树木中，甚至在褐煤阶段，纤维素也能保存。由于树皮也经常含有高稳定性的物质，如木栓质和丹宁，因此它们的残留物也时常保存得很好。许多植物死亡后，抗氧化能力强的丹宁产物形成在细胞腔中，这就是所谓的“树皮鞣质类物”。团块腐殖体就是指由充填有反射率较高的腐殖质的细胞变成的。如果这种充填物是由细胞特殊、分泌物经氧化而形成或者是由丹宁类物质所构成，这种组分就叫做树皮鞣质体，其在第三纪煤的树皮组织中，尤其是木栓组织中比较多见，其反射率比周围的腐殖组分高；如果细胞中充填的不是细胞分泌物，而是渗入的其他腐殖组溶胶，这种组分就叫做假树皮鞣质体。经后来的地球化学凝胶化作

用, 团块腐殖体就形成烟煤中的团块镜质体。丹宁参与成煤作用是显而易见的。

可见, 色素不仅参与成油作用, 由煤中保留的色素分解产物是卟啉和卟啉来看, 色素也参与了成煤作用。

1. 残殖化作用——稳定组组分定型：泥炭化阶段，如果长时间不断地有流动水、新鲜氧气的供给和充分的微生物活动，使木质素、纤维素、蛋白质等组织及其凝胶化和丝炭化作用的产物均被充分地分解破坏，最终变成 CO_2 和 H_2O 逸散掉，这时所剩下的角质、孢子、花粉、木栓、树脂等稳定富氢组分，由于其高度化学稳定性而保留并富集下来构成泥炭—软褐煤中的稳定组显微组分。这一过程称作生物化学残殖化作用。包括孢子体、木栓体、角质体、树脂体、沥青质体、藻类体和碎屑稳定体在内的稳定组（壳质组）显微组分就是在这个阶段定型的。在后来的成岩化阶段期间，地球化学残殖化作用使这些组分构成了烟煤中的稳定组显微组分。由于这些类脂化合物化学稳定性相当强，泥炭—软褐煤中已定型的稳定组分与转变为硬褐煤—烟煤中的稳定组分几乎没有什么不同。



综上所述,如果氧化(腐殖化)作用一直进行到底,无论是什么植物成分全都会遭到破坏和分解而变成气态和液态产物逸散。这样就不可能形成泥炭。实际上氧化分解往往是不充分的。这是因为:(1)因地壳缓慢下降或潜水面缓慢上升,沼泽覆水程度的增强和植物遗体堆积厚度的不断增加,使正在分解的遗体逐渐脱离氧化环境而转入氧化-还原或还原环境,从而未充分分解的产物得以保留形成泥炭;(2)植物遗体产生的某些气体、有机酸、酸胶体和微生物新陈代谢的酸性产物,使沼泽水变酸,抑制了需氧细菌和真菌的生存和活动,因此泥炭酸度越大、细菌越少,植物及其结构的保存就越好;(3)有的植物本身就有防腐和杀菌的成分,如高位沼泽泥炭藓能分泌酚类,某些阔叶树有丹宁浸满细胞壁来保护纤维素,某些针叶树含酚并有树脂保护纤维素,这些都会使植物不致遭到完全的分解而无所保留。

生长又会改造沼泽的环境。两种因素相辅相成、相互影响又相互制约。因此沼泽的氧化、氧化-还原和还原三种环境经常变化并交替出现，结果造成植物分解、保护，再分解、再保护的多次经历过程。今天的泥炭或煤层的存在绝不能说明是一次长时间的还原环境造成的结果，只能表明是多次环境变迁的综合结果，煤成分和结构的复杂性可以做为这种设想的基础。

概括泥炭（包括部分软褐煤）的有机成分主要有：腐殖酸，包括芳香酸和酚等；沥青质，包括脂肪酸等；未分解或未完全分解的纤维素、半纤维素、果胶和木质素；变化不大的稳定组分。这些成分在显微镜下是以各种植物组织的碎片形态出现的。这些碎片的细胞结构的变化不同，保存程度也不同，多种多样的植物碎片组织正是转变成煤中各种显微组分的前身。

由植物转变成泥炭，在化学成分和性质上发生了很大变化：植物中所含的蛋白质在泥炭中已消失；木质素、纤维素等在泥炭中大大减少；产生了植物中原来没有的大量腐殖酸（含50%左右）；泥炭的碳含量增高、氮含量增加，氧含量减少。另外，泥炭含大量的糖类和腐殖酸是区别于褐煤的重要特征。这些都意味着，从植物变成泥炭的泥炭化作用阶段应被看作是腐殖酸不断形成和积累的过程，是各种植物组织不断转变成显微组分的过程，属成煤作用演化过程的第一个阶段和第一次质变。

二、腐泥化阶段——形成腐泥

低等植物转变为腐泥作用的全过程称作腐泥化阶段。它与泥炭化阶段相对应，也是在微生物参与下所发生的一个生物化学作用。

形成腐泥的原始物质主要是生活在水面上的藻类，包括绿藻、蓝绿藻等群体藻类，也有浮游的微小动物等水生低等生物。腐泥中可以含有由流水或风搬运来的高等植物残体，如孢子、花粉、角质膜和木质纤维组织碎片；也可以含有水生动物，如鱼类、两栖动物、爬行动物及昆虫等化石及其排泄物，同时也经常含有细小的粘土质和砂质颗粒。

腐泥主要是形成于停滞缺氧的水盆中，它可以是沼泽的深水部位或逐渐沼泽化的湖泊，也可以是淡水或半咸水的湖泊，还可以是半咸水的泻湖和海湾。

水体中的浮游生物和低等植物死亡后，在向水底下沉的过程中可能先受到一定程度的氧化分解作用，因为褐红色的有机物质中有被腐生真菌侵袭的形迹。微生物中有呈暗色、厚壁、似细胞状细菌的各种变种和*Phellomyces*型的细小菌丝丝状体，特别是*Anthracomycetes cannelliensis*类型的腐生真菌，当沉到水底后，由于水层和随后沉积物的覆盖而转变成还原环境。这里的氧化还原电位较低，pH值约为8，近于碱性介质条件，细菌活动微弱，主要处在厌氧细菌的作用之下。此时浮游生物的蛋白质、脂肪、碳水化合物经分解、合成作用形成一种含水量很高的絮状胶体物质——腐胶质，后再经脱水、压实即形成腐泥。与泥炭相比，它的主要特点是氢含量高、氧含量低，并富含沥青质。

正如泥炭是腐殖煤的前身一样，腐泥则是腐泥煤（或油页岩）的前身。生物化学腐泥化作用导致腐泥中的藻类组组分定型，随后再经地球化学腐泥化作用，藻类组进一步转变成腐泥煤中的藻类组显微组分。包括藻类体和分解强烈的腐泥基质体等。这些基质体可概称作沥青质体（Bituminite）。

现代的湖泊中腐泥化作用很明显。例如，巴尔喀什湖的腐泥中可见到清楚的藻类的蜂窝状结构，有些已彻底分解成无结构的腐泥基质，仅含极少数结构模糊的藻类遗体，近似