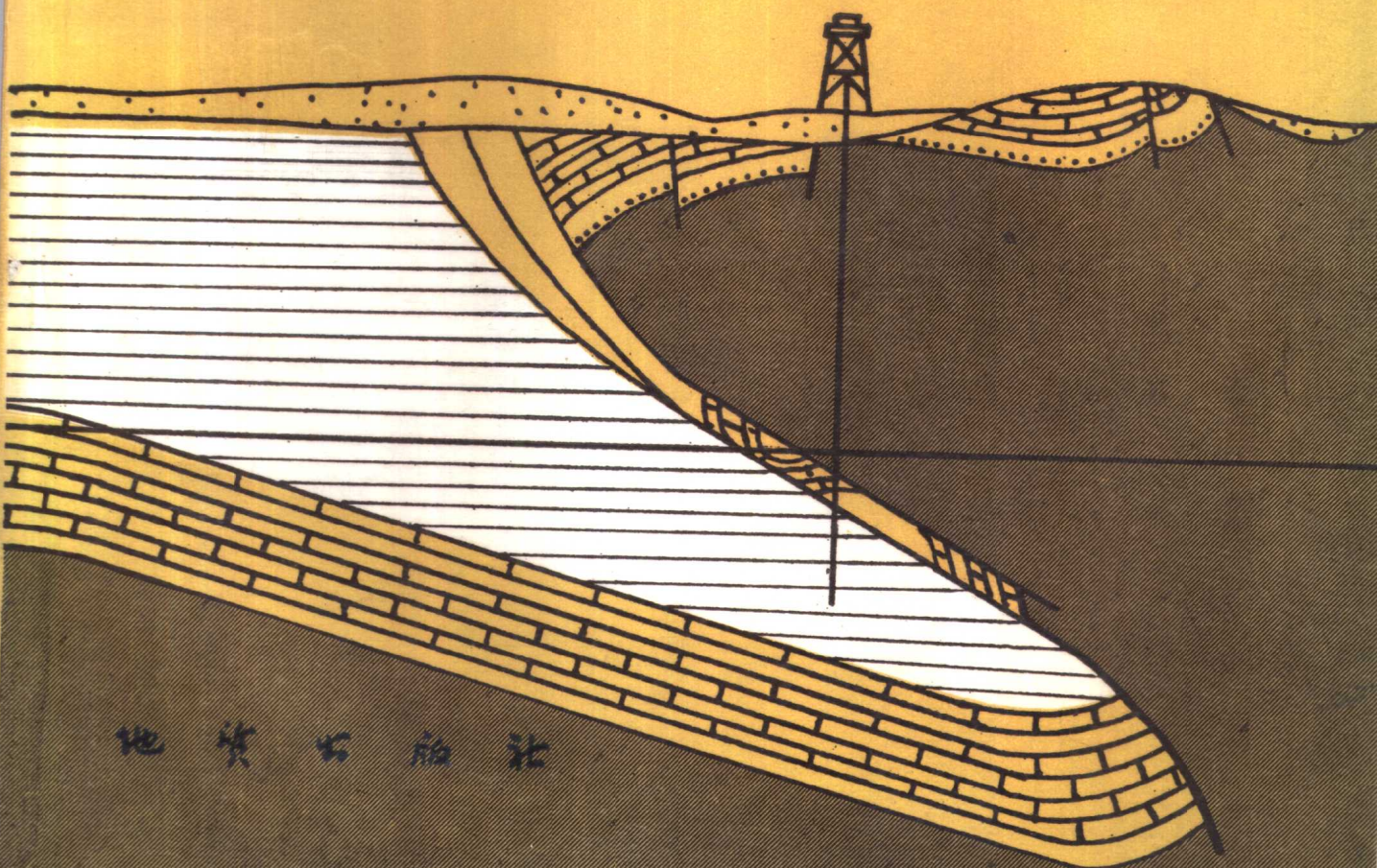


美国煤层甲烷资源

C·T·赖特迈尔

G·E·埃迪 编

J·N·基尔



地质出版社

P618.114
L-784

美国煤层甲烷资源

C·T·赖特迈尔

G·E·埃 迪 编

J·N·基 尔

马学昌 王休中 译

尹善春 李 钰

李 濂 清 校

705788

地 质 出 版 社

内 容 简 介

书中将美国的煤田分成13个区,每个区专门由不同作者详细论述了煤田的地质概况、煤炭资源及其质量、煤层甲烷的成分及资源量和利用前景。文字简明扼要,附有必要的图表。可供煤田地质工作者、煤成气地质工作者及大专院校师生参考。

Coalbed Methane Resources of the United States

Edited by

C.T.Rightmire G.E.Eddy J.N.Kirr

Published by

The American Association of Petroleum Geologists

Tulsa, Oklahoma 74101, U. S. A.

1984

美国煤层甲烷资源

C.T.赖特迈尔

G.E.埃迪 编

J.N.基尔

马学昌 王休中 译

尹善春 李钰

李 濂 清 校

*

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: 23 字数: 553000

1990年12月北京第一版·1990年12月北京第一次印刷

印数: 1—505册 国内定价: 13.15元

ISBN 7-116-00741-5/P·630

前 言

自从人类开始进入地下采煤以来，就知道了煤层中有甲烷存在。最早对煤层甲烷的研究是以减少对矿工的危害并改进矿井的安全为目的。于是，早期的努力就投入在煤层可被开采的地区，那里的煤层厚度大，埋深浅，而且煤质好到足以保证开发的要求。

美国矿业局、匹兹堡采矿和安全研究中心早期进行的研究集中在瓦斯的储留、瓦斯的释放、瓦斯在煤层中的流动、矿井通风以及开采前和开采期间的脱气等机制方面。这些研究的重点在于浅的（2500ft以浅）、在现有技术条件下可经济开采的煤层。

继70年代初期的石油天然气危机之后，一些人认识到这种对采煤工作有危害的气体可以作为一种潜在的资源。美国能源部（DOE）制定了一项“非常规天然气回采计划”，以提供泥盆纪页岩、致密的含气砂岩和煤层储集层中的天然资源的评价和潜在的产量。作为这种努力的一部分，制定了“煤层甲烷回采计划”（MRCP）来确定这种资源的规模 and 分布，证明其生产可行性并使私人工业对其生产和利用发生兴趣。

这项工作的一部分是对众多的沉积盆地作煤层甲烷资源的分析。TRW 公司的地质学家们在1979—1982年之间对13个盆地作了分析，试图确定煤层甲烷的规模、分布、潜在的生产最有利地区。在许多实例中，这种分析包括对拥有深部煤炭资源（埋深大于6000ft）的各个盆地的最初估算，在众多的煤层中取样以测定其瓦斯含量，将地质的、水文的和资源的资料加以汇编，以确定有远景的煤层甲烷高产量地区。

MRCP已达到了它的主要目的之一，使石油和天然气工业对煤层甲烷的潜力发生了兴趣。在沃里尔、圣胡安和皮森斯3个盆地，现在正在进行煤层中天然气的商业性生产。在13个盆地的报告中，对一些盆地中的煤层甲烷资源作了评价，对商业性开发提供了很大的推动力。

为使这种资源受到更大的重视和使这些报告得以更广泛地传播，天然气研究所（GRI）对印刷和分发数量有限的复制本提供了支持。由于这些报告供不应求，便产生了将其汇编成册的念头，为感兴趣的地质学家们提供讨论美国本土煤层甲烷资源的背景资料。本书对各个盆地的分析报告进行了压缩，其重点放在煤炭资源和煤层甲烷资源上。摘编这些报告和绘制图表以供出版的工作得到了GRI的支持，而主要费用则由TRW公司负担。在可能的情况下，由原始报告的作者自行压缩，否则由TRW公司的地质学家进行压缩。

我们对TRW、GRI和AAPG在这一工作中不断给予的支持和帮助，特别是C.M. Fuller、J.I. McComas和C.A. Starr对最终成果的出版给予的支持表示感谢。

我们希望本书将能提供这种在美国正被利用的资源的背景材料，并对它的开发继续起推动作用。

编者：C.T. Rightmire, C.E. Eddy, J.N. Kirr

弗吉尼亚州麦克莱恩

1983年11月

附：原始的MRCP报告目录（译文略）

目 录

前言

煤层甲烷资源.....	(1)
北阿巴拉契亚煤盆地的地质概况、煤炭资源及煤层中潜在甲烷的回采.....	(17)
中阿巴拉契亚盆地的地质概况、煤炭资源和煤层中潜在甲烷的回采.....	(43)
沃里尔盆地的地质概况、煤炭资源和煤层甲烷资源.....	(71)
伊利诺斯盆地的宾夕法尼亚系地质、煤和煤层甲烷资源.....	(102)
阿科马盆地的地质概况、煤和煤层甲烷资源.....	(130)
拉顿梅萨含煤区的地质概况、煤和煤层甲烷资源.....	(158)
圣胡安盆地的晚白垩世地质、煤和煤层中甲烷回采的潜力.....	(179)
皮森斯盆地的地质概况、煤矿床和煤层甲烷回采的潜力.....	(214)
尤因塔盆地的地质概况、煤矿床和煤层中甲烷回采的潜力.....	(247)
大格林河含煤区的地质概况、煤和煤层甲烷资源.....	(265)
怀俄明州温德河盆地的地质概况、煤和煤层甲烷资源.....	(288)
保德河盆地的地质概况、煤矿床和煤层中甲烷回采的潜力.....	(326)
华盛顿州西部含煤区的地质概况、煤和煤层甲烷资源.....	(343)
有关开发煤层甲烷的结论.....	(362)

煤层甲烷资源

C.T.Rightmire

引 言

煤层中存在有甲烷，数百年来被视为是对采煤工作的危害。只是在最近，才被认为是一种潜在的能源。

作为非常规天然气研究的一部分，美国能源部和天然气研究所完成的煤层甲烷资源的早期估算表明，煤层甲烷资源（原地瓦斯）高达 $800 \times 10^{12} \text{ft}^3$ （表1）。如果这种资源只有一半可回收，它就等于20年的天然气供应量（按目前年消费 $20 \times 10^{12} \text{ft}^3$ 计算）。除煤层甲烷回采计划（MRCP）的盆地分析之外，这些初步估算是根据美国本土煤炭资源的粗略统计以及更为粗略的煤中原地瓦斯的近似值（ ft^3/t ）而得出的。由于煤炭资源的估算主要是依据可采煤层或潜在的可采煤层，因而就没有付出多大精力去收集3000ft以深的煤层或含煤地层的资料。可是当把煤作为源岩或潜在的储集层时，为建立煤层甲烷资源数据库就必须考虑所有的煤层。

表 1 美国原地煤层甲烷估算总量对比表

研 究 者	原地资源总量 (10^{12}ft^3)	可采资源 (10^{12}ft^3)
Kuuskraa 和 Meyer (1980)	550	40—60
全国石油委员会 (NPC) (1980)	398	45*
Sharer 和 Rasmussen (GRI) (1980)	500	10—60
Rosenberg 和 Sharer (GRI) (1979)	72—860	16—487
国家非常规天然气资源调查工作组联邦能源管理委员会 (1978)	300—850	未报道
Deul 和 Kim (1978)	318—766	未报道
MRCP 盆地分析 (13个盆地)	72—400	未估算

* 假定价格为9美元/ 10^3ft^3 ，利润率为10%（1979年美元价格）。

据潜在天然气委员会资料（1981）修改。

美国本土已知含煤面积约为360000mile²（图1）。当煤靠近露头或埋藏较浅时（埋深在潜水面500ft以上），其保存所产生的甲烷的能力大为降低。而当煤埋藏较深时，煤中保存的瓦斯量是深度（即静水压力）、煤级和有关地区的水文地质环境的函数。煤化过程中产生的甲烷气体的数量主要取决于煤的热成熟度（煤级）和当时煤的数量。这些观点将在本文中作较详细的讨论。

本书将提供美国本土13个主要含煤盆地的煤层甲烷资源的一般背景资料，和内容经压缩的有关煤层甲烷潜在资源的报告。这些报告最初是由“TRW 煤层甲烷计划”的地质学家为美国能源部的“煤层甲烷回采计划”（MRCP）而汇编的，并在 GRI 的“煤层甲烷计

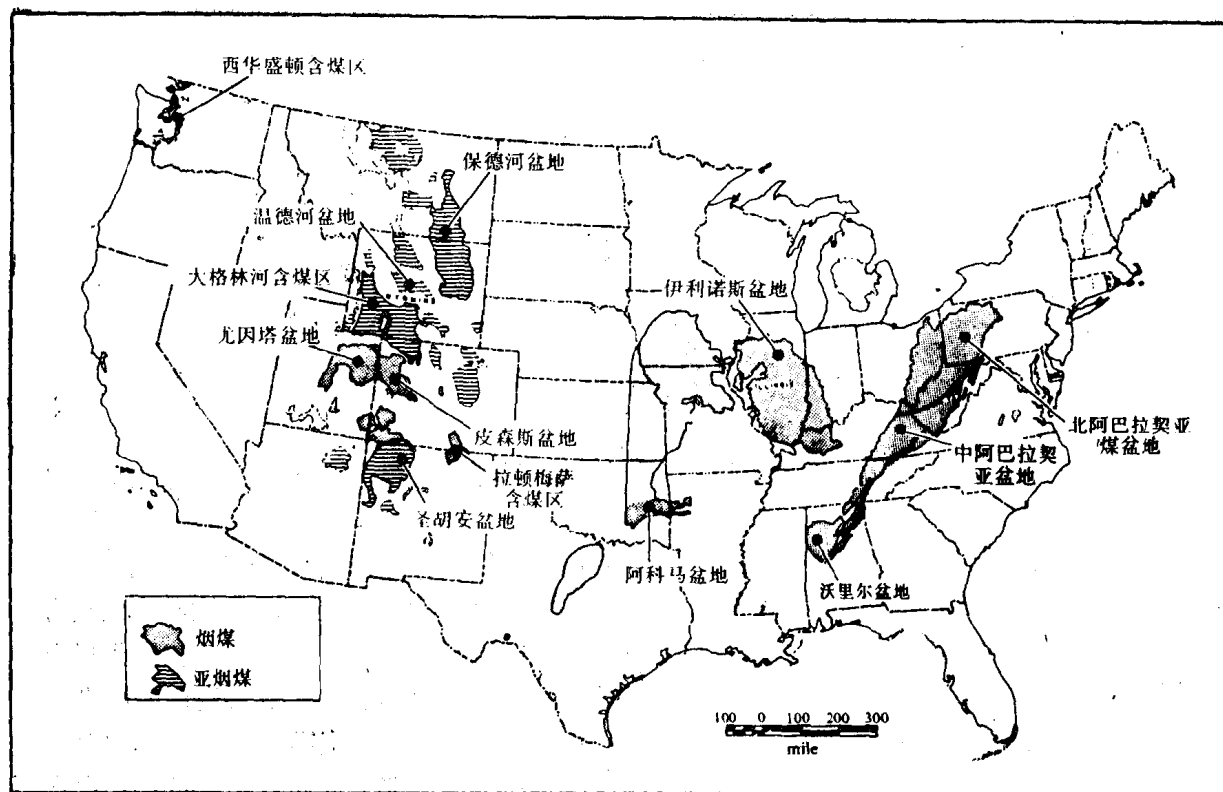


图 1 美国本土主要煤区图

表 2 MRCP 煤层甲烷盆地分析成果

(据 Rightmire 和 Byrce, 1981修改)

盆 地	日 期	含煤面积 (~mile ²)	初期目标 区 面 积 (mile ²)	现有目标 区 面 积 (mile ²)	原地瓦斯估算总量 (10 ¹² ft ³)	
					最 小	最 大
伊利诺斯	1980年3月	53000	9100	4300	5.2	21.1
圣胡安	1982年7月	19000	4900	1900	1.8	31.0
保德河	1979年10月	25000	12800	6750	5.9	39.4
阿科马	1979年11月	5300	5300	3600	1.6	3.6
大格林河	1979年11月	21200	21200	4900	0.2	30.9
西华盛顿	1980年1月	6500	400	1820	3.6	24.0
拉顿梅萨区	1980年9月	2200	1600	925	8.0	18.4
尤因塔/沃萨奇高原	1980年12月	11100	11100	620	0.2	0.8
沃里尔	1980年12月	14400	6800	2500	5.0	10.0
温德河	1981年3月	3800	3800	1500	0.5	2.2
皮森斯	1981年3月	6570	6570	3100	30.0	110.0
中阿巴拉契亚	1982年6月	22850	5500	4000	10.0	48.0
北阿巴拉契亚	1982年8月	43700	19600	4500	—	61.0
					72.0	400.4

划”的赞助下分送给对这种潜在资源的开发感兴趣的各个组织。这些经过压缩的报告的出版得到了“TRW煤层甲烷计划”和GRI的支持。

所分析的13个盆地(图1)中含煤地层面积共235420mile²。其中,在盆地分析计划开

始之前,大约108670mile²最初被认为具有高的煤层甲烷潜力。随着对这些盆地的煤和煤层甲烷资源评价的深入,高煤层甲烷潜力的面积缩小到40415mile²,并估算原地瓦斯量为72—400×10¹²ft³(表2)。鉴于煤层中甲烷的保存方式(主要是吸附),原地瓦斯通常以体积计量,表示为每克煤中含瓦斯若干cm³(cc/g),或每吨煤中含瓦斯若干ft³(ft³/t)。

本文将阐述煤炭所具有的影响煤层产生、储集和产出天然气的 ability 的那些特性。我们主要感兴趣的是煤层作为甲烷气体的源岩,又作为其储集层的独特的特性。

背 景

对煤层中甲烷的存在已经做过许多的研究工作,但这种工作大部与可采煤层有关。美国矿业局(USBM)自70年代初期就开始为矿井的安全而进行了煤层甲烷调查。这些研究工作涉及到主要是美国东北部的大量煤层中瓦斯的存在和分布;煤中瓦斯的产生、贮存和释放的机制;与所建议的和现有的开采工艺有关的煤层脱气的可能方法。大多数调查工作没有涉及到作为潜在的天然气资源的煤层甲烷、在不可采煤层中瓦斯的存在和潜在的生产可能性,以及全面开发瓦斯资源的最经济有效的技术和工序。

煤 化 作 用

植物物质逐步地经过泥炭、褐煤、亚烟煤、烟煤转变成无烟煤的过程,称之为“煤化作用”。它描述了与无机岩石物质的成岩作用和变质作用的转变相似的、生物物质的转变过程。

当有机物质经过表3所示的煤级次序转变成煤时,可见到物理和化学两方面的变化。这些变化与在海相含干酪根源岩中所见到的成熟度增加的情况类似,并可以同样方式用来评价一个含煤地区的煤层甲烷潜力。那些通常作为有机物质成熟度指标的变化是发热量、水分含量或保持水分的能力、挥发分百分率、镜质组反射率和固定碳含量。指示成熟度的一些化学变化对一些煤级比对其它煤级更合适(见图2)。例如,煤层水分(无灰)和发热量(干燥无灰)对泥炭至中挥发分烟煤范围最有意义。所有上述性质均随通常由埋深增加而引起的温度的增高而变化。这些变化可以计量和预测。

由植物残体在微生物作用下而形成泥炭的过程称之为“生物化学煤化作用”。这种作用发生在还原环境中,在那里厌氧细菌消耗了有机物中的氧,留下富氢物质。泥炭形成过程中,碳含量由45%增加至50%〔干燥无灰基(daf)〕至55%—60%(daf),水分含量超过75%,并存在自由纤维素(即不与木质素完全混合)。

随着覆盖层厚度的增加,由压实作用引起的早期孔隙度降低和质点排列成行,是明显的物理变化。

成岩变化发生在褐煤—亚烟煤的分界线上,这个分界线的形成温度约为50℃,并取决于时间—温度关系。亚烟煤级以上的变化相当于变质作用阶段的变化。

煤化作用的主要产物是甲烷(CH₄)、二氧化碳(CO₂)、氮(N₂)和水(H₂O)。煤化作用过程中,甲烷的产生有两种机制:生物成因和热成因。早期阶段,在温度低于50℃时,生物成因的甲烷是由微生物分解有机质而成。这种气体通常称为“沼气”,在其产地

级 别		反射率 R_m 油	挥发分	碳 含 量	层内水分	发 热 量 Btu/lb kcal/kg	不同级别参数的适用性		
德 国	美 国	微 镜 煤 %							
泥 炭	泥 炭	-0.2	-68						
			-64	—约60	—约75				
软 褐 煤	褐 煤	-0.3	-60			7200 (4000)			
			-56		—约35				
暗 褐 煤	亚烟煤	-0.4	-52			9900 (5500)			
	C		-48	—约71	—约25				
亮 褐 煤	B	-0.5	-44			12800 (7000)			
	A	-0.6	-40	—约77	—约8—10				
长 焰 煤	中 发 烟 煤	-0.7	-36			15500 (8650)			
气 焰 煤	低 发 烟 煤	-0.8	-32						
	A	-1.0	-28	—约87					
肥 煤	挥 分 煤	-1.2	-24						
		-1.4	-20						
锻 造 煤	低 发 烟 煤	-1.6	-16						
		-1.8	-12						
瘦 煤	半 无 烟 煤	-2.0	-8	—约91		15500 (8650)			
无 烟 煤	无 烟 煤	-3.0	-4						
		-4.0							
超无烟煤	超无烟煤								

图 2 按德国和美国分类的煤化阶段
(据Stach等, 1982)

表 3 煤的分类 (据 ASTM 分级)

类	组	固 定 碳 范围, % (干燥无矿物基)		挥 发 分 范围, % (干燥无矿物基)		发 热 量 范围, Btu/lb (含水无矿物基)		结块特性
		等 于 或大于	小 于	大 于	等 于 或小于	等 于 或大于	小 于	
I 无烟煤	1 超无烟煤	98	—	—	2	—	—	不结块
	2 无烟煤	92	98	2	8	—	—	
	3 半无烟煤	86	92	8	14	—	—	
II 烟 煤	1 低挥发分烟煤	78	86	14	22	—	—	
	2 中挥发分烟煤	69	78	22	31	—	—	
	3 高挥发分烟煤 A	—	69	31	—	14000	—	一般结块
	4 高挥发分烟煤 B	—	—	—	—	13000	14000	
	5 高挥发分烟煤 C	—	—	—	—	11500	13000	
III 亚烟煤	1 亚烟煤 A	—	—	—	—	10500	11500	结 块
	2 亚烟煤 B	—	—	—	—	9500	10500	
	3 亚烟煤 C	—	—	—	—	8300	9500	不结块
IV 褐 煤	1 褐煤 A	—	—	—	—	6300	8300	
	2 褐煤 B	—	—	—	—	—	6300	

据 ASTM 标准说明书 D388。

下沉和掩埋足够迅速的情况下，该气体随即被圈闭在浅部气藏中。美国地质调查所和其它单位的研究表明了区分由这两种机制生成的气体的可能性。在由生物活动而导致的还原环境的还原性很强，足以除去其中溶解的氧和硫酸盐的情况下，将形成生物成因的甲烷。

图3是一幅示意图，表示通过生物成因和热成因机制，由腐殖的和腐泥的有机质产生的甲烷的相对数量。生物成因的甲烷在200℃以下生成的甲烷量中可占10%。

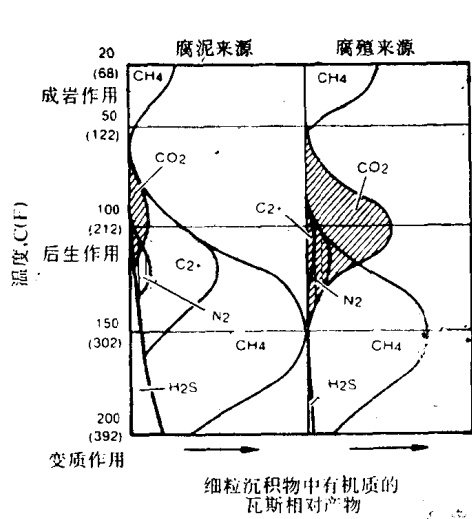


图3 气体的产生与深度的关系
C₂₊代表气相中重于CH₄的烃类；N₂最初呈NH₃产出。
引自《石油地球化学和地质学》
(J. M. Hunt, 1979)

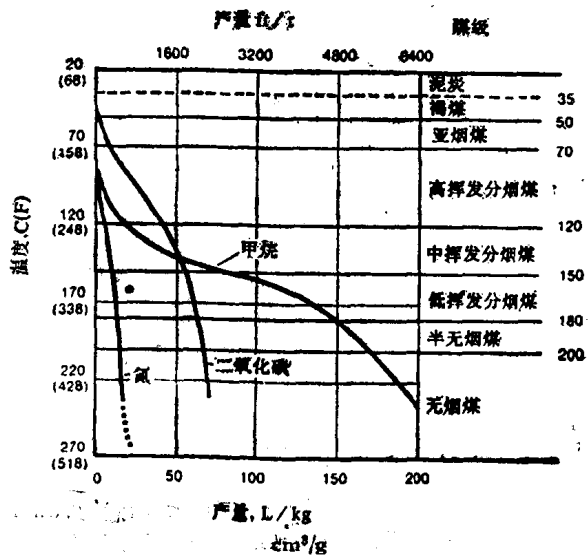


图4 煤化作用时由煤产生的各种气体的计算曲线
据《石油地球化学和地质学》
(J. M. Hunt, 1979) 修改

热成因甲烷气体的产生

当埋深增加或地温梯度增加而使温度达到50℃以上时，煤级也随之增加。煤级增加不是一种短期的现象，而是与这种物质在一定热状态下持续的时间有关。这种时间—温度关系，也常称为“时间—埋深”关系，决定着煤的成熟程度，加上其它因素，控制着所生成的甲烷的数量。在这种状态下产生的主要气体是甲烷、二氧化碳和氮（图4）。

后生作用是有机质在温度增高的影响下发生变化的过程。在温度超过50℃时生成的甲烷应归因于后生作用，即是热成因甲烷。

煤化作用期间，大量甲烷和其它气体是由有机质受热变化而产生的。有机质的化学变化导致氧/碳原子比值和氢/碳原子比值两者随变化程度的增加而减小。生成大部分煤的腐殖质，大部分是由富氧的木质素和纤维素所组成的。大致确定有机质成熟程度的常用方法是把资料绘在Van Krevelen图解上（图5），其中各分支代表不同类型的干酪根或源物质。煤被确认为Ⅲ型干酪根。当煤成熟时，它继续失去氧而沿图上Ⅲ型分支向左移动。业已发现，在温度较低时，即成熟过程的成岩作用阶段，氧的损失比氢的损失更快。对腐殖煤物质来说，由于它的化学性质，氢的损失将小于腐泥质。图6表示了成熟途径、主要生成产物、有关的镜质组反射率（VR）和热力蚀变指数（TAI）。必须指出，Ⅲ型干酪根途径的

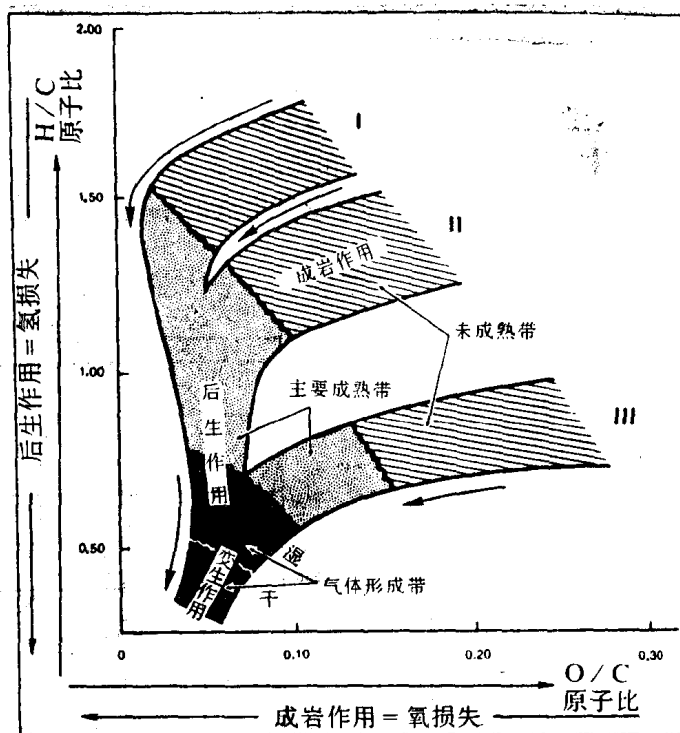


图 5 示意的Van Krevelen图解

表示沿着给定的成熟途径，氧、氢和碳的相对的化学变化。煤被确认为一种Ⅲ型干酪根

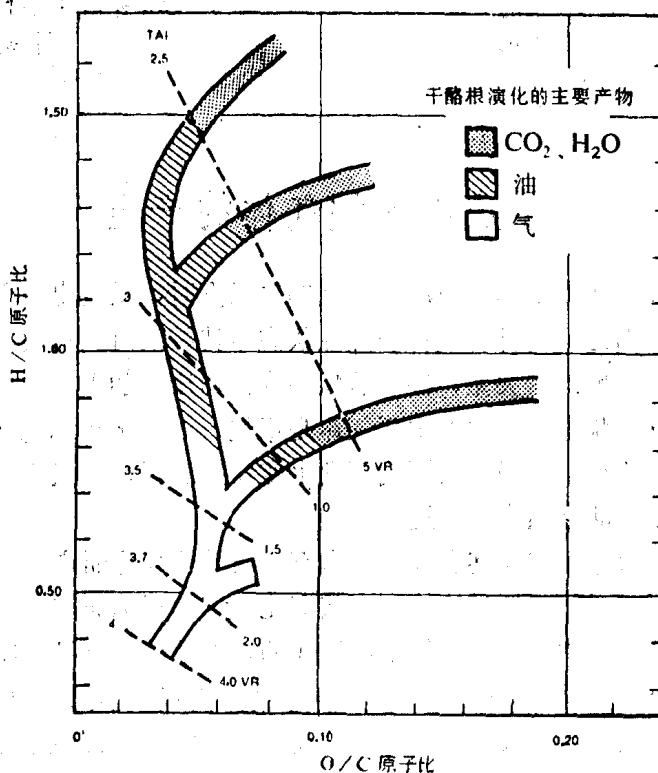


图 6 干酪根的成熟度和类型与镜质组反射率的关系

注意Ⅲ型干酪根的 $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ 和 CH_4 的窗口长于油的窗口

(据Tissot等, 1974)

“重烃”产物部分是很少的，相应地由这种来源物质生成的产物的数量也很少。

煤化期间(如图4所示),在高挥发分一中挥发分烟煤的分界线上,生成的 CO_2 比 CH_4 多1倍多。过了这个点,所生成的甲烷的数量迅速增加。据Karweil (1969) 的资料,表4列出了不同煤级的各种热成因生成的气体的体积,单位为 cc/g 和 ft^3/t ,以便于比较。其它资料(Tissot和Welte, 1978)表明,表4中所示的所生成甲烷的预计体积,在相当于 R_o 约2%的煤级以上时,可能偏高了。

表 4 按煤级的大致的气体生成量

单位为 cc/g (ft^3/t)

煤 级	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	CH_4	CO_2	N_2	镜质组反射率 R_o
褐煤	50	—	4(120)		
亚烟煤	70	—	6(200)		$-0.50 \pm$ $0.60 \pm$ $0.75 \pm$ 1.20
高挥发分烟煤	120	20(640)	34(1080)	5(160)	1.63
中挥发分烟煤	150	84(2680)	11(360)	5(160)	2.10
低挥发分烟煤	180	68(2160)	8(240)	3(80)	2.40
半无烟煤	200	24(760)	4(120)	3(80)	
无烟煤		28 + (880 +)	7 + (216 +)	10 ± (320 ±)	
总计		223(7120 +)	73(2336 +)	25 ± (800 ±)	

如图3所示,生成甲烷的峰值出现在 150°C 附近,或者说是中挥发分烟煤—低挥发分烟煤的分界线上。

煤层甲烷中两种主要伴生气体是 CO_2 和 N_2 。两者都是由于有机质的分解而形成的,并在所有煤层甲烷气体中预料都应含有一定的数量。氮以 NH_3 的形式,在靠近高挥发分烟煤A阶段的末端,在约 120°C 时开始逸出。常常发现它仅仅是所产生气体的次要组分,因为它的分子体积小($3.0 \text{ \AA}$),得以比同它一起生成的气体更迅速地由系统中迁移出来。

虽然 CO_2 是早期热成因气体的一种主要组分,但它通常是所产生气体的一种较次要的和数量变化很大的组分。虽然它的分子体积大而妨碍了它呈气体迅速迁移,但它在水中的高溶解度却大大增强了它的活动性。在地表1个大气压和 20°C 的条件下,大约1个体积的 CO_2 会溶于1个体积的淡水中。在300个大气压和 100°C 时,即相当于煤层甲烷储集层处于10000深处,在同一体积的水中大约溶有30个体积的 CO_2 (标准温压)。如表4所示,在有机质的成熟期间(由褐煤至无烟煤)生成了超过 $2300 \text{ ft}^3/\text{t}$ 的 CO_2 。

硫化氢(H_2S)已被确认为是由腐殖质原始物质生成的痕量产物。因为它极易溶于水(在 20°C 和1个大气压时为 CO_2 的2.6倍),而且事实上又是天然气最后形成的一个组分(约 100°C 时开始生成),在煤层甲烷储集层中,仅仅确定出痕量的 H_2S 。

在钻孔内,或在解吸试验时,由煤层产生的气体的分析表明,除极少数例外,这些气体含甲烷皆在95%以上。较重的烃类(乙烷、丙烷等)为痕量到很少量, N_2 和 CO_2 皆不超过3%。这些气体的发热量约为 1000 Btu/标准 ft^3 。表5提供了由煤层中产生的气体的代表性分析数据。

W. 1. 13

表 5 煤层瓦斯和天然气的成分(体积百分比)和发热量

来 源	盆 地	CH ₄	C ₂₊	H ₂	惰性气体 ¹	O ₂	Btu/ 标准ft ³
波卡洪塔斯3号	中阿巴拉契亚	96.87	1.40	0.01	2.09	0.17	1059
匹兹堡	北阿巴拉契亚	90.75	0.29	—	8.84	0.20	973
基坦宁	北阿巴拉契亚	97.32	0.01	—	2.44	0.24	1039
下哈茨霍恩	阿科马	99.22	0.01	—	0.66	0.10	1058
玛丽利	沃里尔	96.05	0.01	—	3.45	0.15	1024
天然气 ²	—	94.40	4.90	—	0.40	—	1068

注：1)N₂, CO₂和Hc。

2)Moore, Miller和 Shrewsbury, 1966。

确认煤层生成的气体

甲烷的稳定同位素分析是确认所讨论的天然气是由腐殖质受热生成的一个主要方法。当与气体组分的化学性质结合时，在成熟过程中，同位素的分馏效果是十分明显的。对照湿度[C₁/(C₂+C₃)]绘出碳同位素分析(¹³C)曲线，可以很容易地区分出生物成因气体和其它气体，以及区分腐殖质和腐泥质。

生物成因甲烷的 $\delta^{13}\text{C}$ 范围一般为-55到-75‰，由母质热分解而生成的甲烷的 $\delta^{13}\text{C}$ 由-5到-3‰，这与来源物质有关。由煤层产出的甲烷比产自相同煤级或热成熟度的海相干酪根甲烷有较高的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。可以预计，煤层甲烷的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-25到-40‰，依其来源物质而异；煤层甲烷具有较高的C₁/(C₂+C₃)比值。

煤层中甲烷的保存

甲烷呈三种形态之一保存于煤中：以分子状态吸附于有机质表面上，以游离气体状态存在于孔隙或裂隙中，和（或）溶于煤层内的溶液（地下水）中。应对它们分别加以研究以确定它们对煤中气体总量的相对影响。

煤的孔隙度可分为裂隙孔隙度和基质孔隙度2种。当考虑煤中甲烷的保存潜力时，后者是最有意义的。煤层中甲烷保存的基本机制是吸附在基质孔隙结构内煤的表面上。

煤中孔隙的大小，可以分为直径>500 Å（大孔隙），20—500 Å（中孔隙），8—20 Å（微孔隙）和< Å（亚微孔隙）。根据 Mahajan(1982)的建议，1972年以前的允许利用的研究报告中可以不区分其中的微孔隙和亚微孔隙。在试图测定孔隙分布和判别吸附性质时，作了许多努力试图测定煤样的孔隙度和内表面积。所采用的技术包括测量在一定压力下能被吸附在煤表面上的一种流体的体积。应用各种吸附剂，如N₂、CO₂和甲醇，作表面积测量，其结果因所用的吸附剂而异。孔隙体积和表面积的估算取决于所用的技术和被吸附剂的性质。Mahajan (1982)指出：“用物理吸附测量方法测定微孔隙煤的内表面积的

传统理论，没有多大意义。”当提供表面积测量时，重要的是要知道煤质点的大小、被吸附物、抽气时间和温度、吸附时间和被吸附物的横截面积。

为了能够利用现有的表面积资料，希望能够提供一些有关背景材料：

- 煤具有一种孔隙—空洞型孔隙度，孔隙的大小控制着接近孔隙表面的难易程度。被吸附的体积受被吸附物的大小和孔隙大小之间关系所控制。

- 水分含量和（或）煤化程度的微小变化可以剧烈地改变对一个煤样所测定的表面积。

- 被吸附分子的横截面积的准确数据难以确定。典型的煤的孔隙—吸附分子所占据的表面积比在平坦表面上的大2—3倍。

- 表面积一般与碳含量有关（表6）。据Gan、Nandi和Walker（1972），Nandi和Walker（1971）利用 N_2 所作的研究工作表明，碳含量小于76%和大于83%的吸附性煤，一般具有小于 $1m^2/g$ 的表面积。而碳含量在上述范围之间的煤则具有大于 $10m^2/g$ 的表面积。含碳量 $>92\%$ 的无烟煤则是一个例外，其表面积为 $5—8m^2/g$ 。二氧化碳表面积对18种不同的煤来说为 $110—310m^2/g$ 。碳含量相同的煤的差别可大到 $90m^2/g$ 。

表 6 煤的表面积 (N_2 吸附)

(据Nandi和Walker, 1971)

煤 级	固 定 碳 含 量 (%)	表 面 积 (m^2/g)
	76	1
中挥发分烟煤	76—78	10
低挥发分烟煤	78—83	
	83—92	1
无烟煤	92	5—8

- Van der Sommon 等（1955）的结论也很有意义，即吸附在烟煤上的甲烷在 $25^\circ C$ 时的密度明显地高于其液体的密度（0.480）。

- 孔隙度至少部分地取决于高挥发分烟煤中显微组分的含量，其镜质组的最细孔隙的直径为 $20—200\text{ \AA}$ 。大多数的孔隙是较小的。惰性组的孔隙最多，孔隙的大小为 $50—500\text{ \AA}$ 。

煤中孔隙大小的分布将有效地控制被吸附气体释出的体积和速率。表7提供了12个煤样按煤级的孔隙大小的分布情况。这种分布情况肯定了大量的中—高煤级煤的表面积是在微孔隙中。另外的研究工作使最大孔隙体积的范围减小到半径为 $7—8\text{ \AA}$ (Debelak和Schrodt, 1979)。Toda等（1971）指出，在碳含量趋向85%时，微孔隙体积逐渐降低，然后又随碳含量的增加而增高。

表8提供了在研究煤中气体的保持、释放和运移方面令人感兴趣的气体分子的有效分子直径。所提供数据的检验表明，甲烷分子的有效直径介于 N_2 和 CO_2 的直径之间。

煤对甲烷的吸附作为压力的函数已经被一些研究者研究过，并发现它是遵循弗罗因德利希等温线的。如前面在涉及煤级—孔隙度关系时所讨论的，煤的吸附能力随煤级的增高而增加。然而，吸附等温线取决于煤颗粒的大小，因而不能代表原地条件，它们只显示在

表 7 煤中全部开敞孔隙的分布情况

(据Gan等, 1972, 修改)

煤 级	孔 隙 分 布 (%)			
	C(%daf)	<12Å	12—300Å	>300Å
无烟煤	90.8	75.0	13.1	11.9
低挥发分烟煤	89.5	73.0	0	27.0
中挥发分烟煤	88.3	61.9	0	38.1
A级高挥发分烟煤	83.8	48.5	0	52
B级高挥发分烟煤	81.2	29.9	45.1	25.0
C级高挥发分烟煤	79.9	47.0	32.5	20.5
C级高挥发分烟煤	77.2	41.8	38.6	19.8
B级高挥发分烟煤	76.5	66.7	12.4	20.9
C级高挥发分烟煤	75.5	30.2	52.6	17.2
褐 煤	71.7	19.3	3.5	77.2
褐 煤	71.2	40.9	0	59.1
褐 煤	63.3	12.3	0	87.7

表 8 有效分子直径

(据Hunt, 1979)

分 子	近似分子直径 (Å)
He	2.6
N ₂	3
H ₂ O	4.1
H ₂ S	4.1
CH ₄	4.1
CO ₂	4.7
C ₂ H ₆	5.5
C ₃ H ₈	6.5

给定压力条件下煤保持甲烷的相对能力。图 7 提供了中—高煤级煤的一组综合的吸附等温线 (Kim, 1977)。这些曲线代表了能被吸附在一定大小煤颗粒的内表面 (包括微孔隙) 上的甲烷的最大数量。图 8 提供了不同地理区域和不同煤级的几种煤的吸附等温线。对不同水分含量的波卡洪塔斯3号煤的 2 个测定结果显示了水分对煤的吸附能力的影响。

生成的气体超过煤表面所能吸附的数量时, 便在煤的孔隙 (最值得注意的是在裂隙孔隙) 中开始出现“游离”气体。这种气体很易溶于流经煤层的地下水中, 逐渐向上运移, 或者在一定的水文地质条件下, 作为圈闭的游离气体, 保存在煤层中。Eddy、Rightmire和 Byrer (1982) 根据对 300 多个煤样的气体含量测定结果, 报道了被吸附气体与游离气体的相对体积。表9中的“损失气体”一栏就是这里所讨论的游离气体。然而, 所报道的损失气体的数量受吸附测定样品的制备时间长短的影响, 它仅是煤层储集层中游离气体组分的一个计算近似值的方法。在大多数煤层甲烷储集层的温度和压力 (一般接近于静水压力) 下, 甲烷可在有限程度上溶于地下水中 (表10)。增加盐度将降低这种溶解度, 如表11所示。试算这些体积, 在1000psi和100°F时, 1桶新鲜水最多能溶解8.5ft³甲烷。虽然

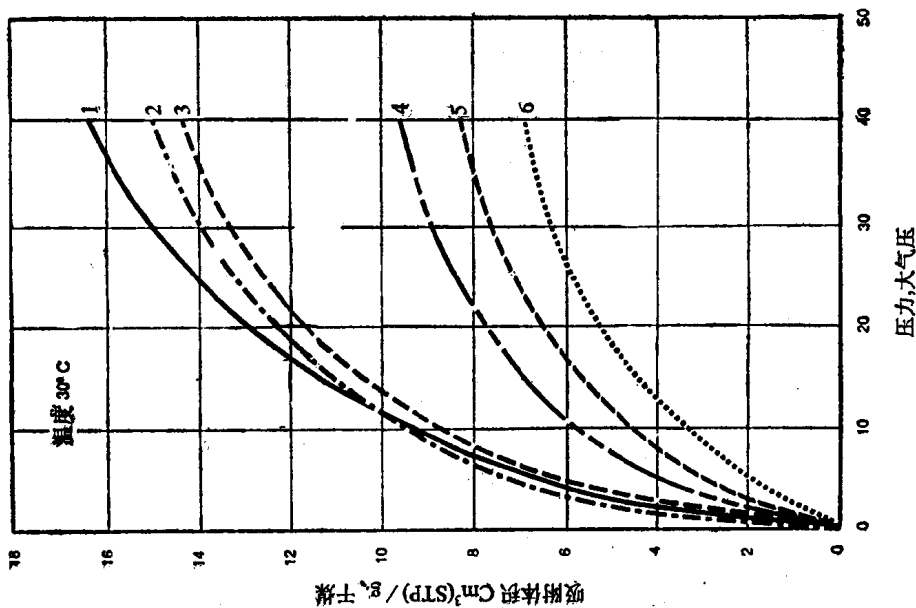


图 8 不同煤类型和水分含量的平衡吸附等温线

(Kissel等, 1973)

1. 哈茨霍恩煤层 (水分1.3%); 2. 波卡洪塔斯3号煤层 (0.7%); 3. 波卡洪塔斯3号煤层 (1.1%); 4. 匹兹堡煤层 (1.4%); 5. 盖特堡煤层 (2.2%); 6. 伊利诺斯6号煤层 (8.0%)

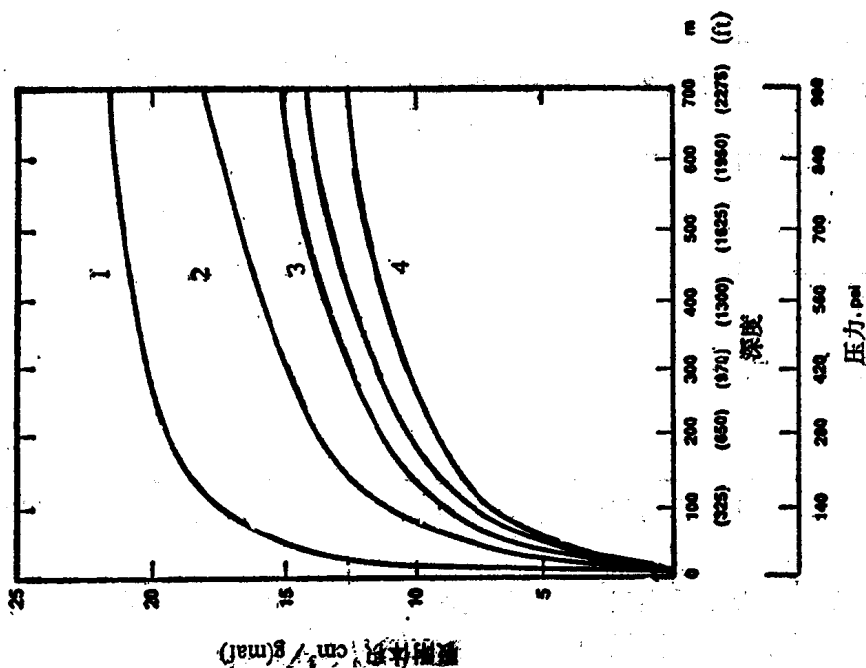


图 7 煤的吸附能力作为煤级和深度的函数

(据Kim, 1977)

1. 无烟煤; 2. 低挥发分烟煤; 3. 中挥发分烟煤; 4. 高挥发分烟煤

表 9 按煤级平均的煤层甲烷解吸数据

(Eddy等, 1982)

煤 级	损失气体 (m ³ /g)	解吸气体 (m ³ /g)	残余气体 (m ³ /g)	气体总量 (m ³ /g)	残 余 (%)	样品数
无烟煤	0.98	8.10	0.61	9.69	6.31	9
低挥发分烟煤	1.21	11.97	0.25	13.43	1.86	21
中挥发分烟煤	1.33	6.31	0.32	7.96	4.02	22
高挥发分烟煤 A	0.21	2.77	1.38	4.36	31.65	217
高挥发分烟煤 B	0.31	2.01	0.47	2.79	16.85	86
高挥发分烟煤 C	0.12	1.09	0.07	1.28	5.47	42

表 10 天然气在水中的溶解度(标准ft³/桶)

(数据引自Craft和Hawkins, 1959)

压 力 (psi)	温 度		
	100° F	160° F	220° F
15	0.2	—	—
500	5	4.2	4.0
1000	8.5	7.5	7.2
1500	11	10	10
2000	14	12	12
3000	17	15	16
4000	20	17	18
5000	23	19	21

表 11 水中天然气的溶解度对可溶固体总量(TDS)和温度的校正因素

(数据引自Craft和Hawkins, 1959)

TDS (10 ³ ppm)	温 度		
	100° F	160° F	220° F
0	1.0	1.0	1.0
10	0.94	0.95	0.96
20	0.88	0.90	0.92
30	0.82	0.85	0.88

在动态的地下水系统中;这是小的气体体积,但饱和甲烷的大量水能从潜在的气贮中带走总量巨大的气体。

煤中的裂隙孔隙度主要是采煤工业中所谓割理的裂隙。割理是垂直于煤层的一个或一组节理。通常有相互近于垂直的两组割理。

面割理是主要割理并能延伸很大的距离。次级割理(也称端割理)常常仅由一个面割理裂隙延伸到另一个面割理裂隙。因为面割理造成较长的裂隙,也通常是比较重要的裂