

文章编号:1000-0550(1999)增-0846-08

天然气水合物地质前景^①

雷怀彦 王先彬 郑艳红 张中宁 周晓峰

(气体地球化学国家重点实验室,中国科学院兰州地质研究所 兰州 73000)

摘要 天然气水合物广泛存在于极地地区,通常与冻土带的近海和深海以及陆架和岛屿边缘密切相关。天然气水合物具有三个方面的研究意义:作为化石燃料具有很大的资源潜力;作为临界状态物质,具有水下地质灾害的潜在危害;作为有机碳库,对全球气候变化产生重要影响。气体水合物赋存于地表浅层2 000米深度。由于气体水合物的不稳定性特征,温度和压力微小变化都将会造成水合物分解,发生地质灾害,如海底滑塌、滑坡,此类灾害在世界各地曾发生过多,伴随灾害过程向大气排放大量甲烷,对全球气候变化产生一定影响。

关键词 天然气水合物 化石燃料 地质特征 资源前景

第一作者简介 雷怀彦 男 1960年出生 研究员(博士) 油气地质学、沉积学

中图分类号 P618.1 **文献标识码** A

1 引言

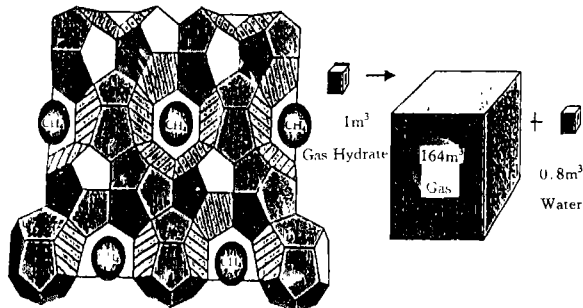
近年来,人们对天然气水合物的研究开发产生了浓厚兴趣,认为天然气水合物经分解可释放出大量甲烷气体(温室气)^[1],将可能产生温室效应,影响全球气候变化。有人^[2]强调,气体水合物作为具有潜力的甲烷和烃类化石燃料资源,从中可提取或浓缩出甲烷气体,气水合物对全球气候和未来经济有着重要影响。

1.1 定义

气体水合物,也称为气体笼形物(gas clathrate),自然界下呈固态,水分子构成刚性立方笼型格子,每个格子中含有一个天然气分子(主要是甲烷)。实质上气水合物是一种水包气的笼形物,其中的水结晶成等轴晶系,而不象普通冰那样的六方晶系。自然界现见有I型和II型两种立方结构,其中I型结构(图1)最为常见。I型结构中,笼架以体心堆集排列,笼架之大可包容甲烷、乙烷以及其他分子直径与之相似的气体分子(如二氧化碳、硫化氢等)。在II型结构中,笼架以菱形堆集排列,笼架较大,不仅能包容甲烷和乙烷一类气体分子,还能包容象丙烷、异丁烷这样的大气体分子^[3]。

甲烷在甲烷水合物中的最大赋存量取决于笼形

物的几何形态。在一个完全饱和的I型甲烷水合物中,大约每六个水分子中就存在一个甲烷分子。从理论上讲,若考虑水合物膨胀系数,在标准温-压条件下,1 m³ 甲烷水合物可含有164 m³ 甲烷(图1);因



甲烷水合物立方笼型格子I型结构 1m³气水合物可产生164m³的气体 and 0.8m³水

图1 天然气水合物结构

Fig. 1 Gas hydrate structure

此,在地表1 500 m的储层中,每单位体积气体水合物中可存在的甲烷量超过相同空间中可存在的游离量^[4]。

1.2 控制因素

在自然界气体水合物是受温度、压力、组分等条件所控制,如图2所示。在甲烷水合物的温-压域,水合物-气体相界线位置不仅取决于气体混合物的组成,还取决于水中的离子杂质。由于往往不知道沉

① 国家自然科学基金资助项目(编号:49973024)

收稿日期:1999-04-06

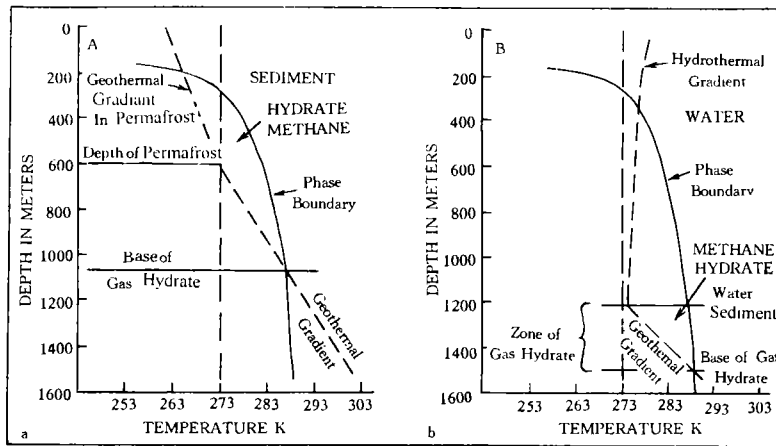


图2 纯水-游离甲烷-甲烷水合物的相界图

Fig. 2 Phase diagram showing hydrate stability depths in (a) permafrost and (b) ocean environment

积物孔隙中气体和水的组成,对于一般天然存在的气体水合物在稳定状态下,先假定纯甲烷和纯水为一个体系,然后再估计它的深度和温度范围。

相界资料(图2)表明在两极大陆地区(地表温度低于 0°C)存在甲烷水合物的深度上限约为150 m;在深海沉积物中,气体水合物出现在底层、水温度接近 0°C 、水深超过约300 m处。其甲烷水合物存在于沉积物中的深度下限取决于温度梯度,其最大深度下限为固体表面之下约2 000 m。因此,气体水合物仅赋存于地壳浅层。

在图2中气体水合物有一个不十分明显的特征,对形成气体水合物来说,甲烷气体的量是必须的。只有当笼形物中有90%的晶格充满气体,才能够形成气体水合物。即每1体积的水在标准温-压条件下应含有150体积的甲烷^[2]。然而,甲烷在海水中的溶解度非常低,在标准温-压条件下每1体积的水仅含有约0.045体积甲烷^[5]。因此,形成气体水合物所需的甲烷量大大超过海水中甲烷溶解量。

1.3 分布位置

由于气体水合物需要满足温-压条件和气体体积两个条件,故它们仅分布于极地和深海。在极地区,气体水合物通常在滨岸的大陆沉积物及近海的大陆沉积物中与永冻层相伴出现。在深海区,气体水合物存在于大陆外缘的斜坡和海隆沉积物中。图3为全球范围内已知和推测赋存的气体水合物地区。已在阿拉斯加州西普拉德霍湾油田的陆上14处深海区采集到气体水合物的样品,它们成为天然状态气水合物存在的无可辩驳的例证^[6]。在秘鲁、危地马

拉、墨西哥、美国、日本等9处海沟和海岭深海钻探发现有气体水合物。

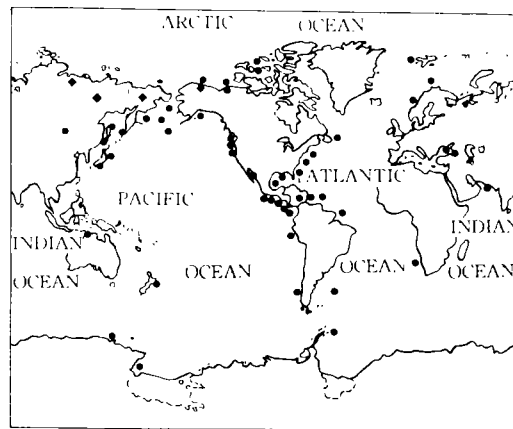


图3 世界上已知和推测赋存气体水合物的地区位置图
Fig. 3 Map showing worldwide locations of known and inferred gas hydrates in oceanic sediments

2 地球物理

通过海洋地震反射剖面中显著的海底模拟反射层(简称BSR)推测,大部分深海中赋存气体水合物(图4)。这一反射层的深度与相图(图2)所预测气体水合物稳定带底面的深度一致。BSR的标志是高声速(上部的水合物-胶结沉积)与低声速(下部的水合物未胶结沉积)之间的界面。气体水合物带底面的地震反射特征通常为反射极性反转,如美国布莱克外海岭的BSR为 -0.2 ± 0.04 ^[7]。

2.1 地温梯度

Sipley等人^[7]采取将气体水合物BSR处的底层

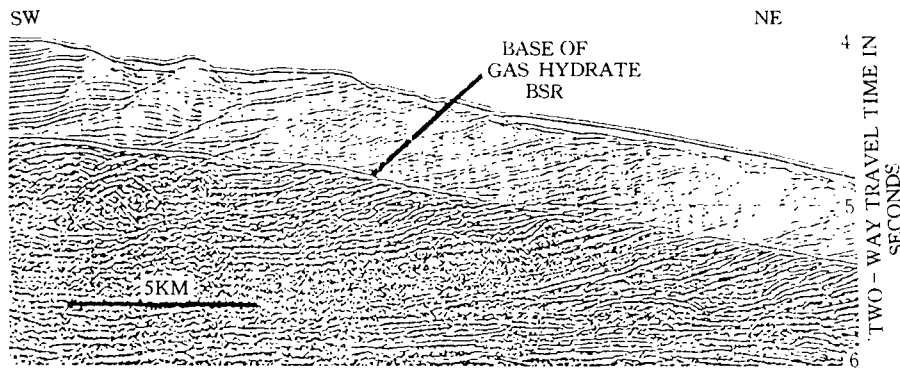


图4 布莱克外海岭多道地震反射剖面

Fig. 4 Multichannel reflection profile from the crest and eastern flank of the Blake Outer Ridge

水的温度和深度资料与气体水合物相图(图2)中的资料结合起来估算深海沉积物中的地温梯度和热流值。这一方法已应用于中美洲、布莱克外海岭和日本近海南海海槽的地震资料分析中,估算得到的地温梯度值和热流值与用常规方法测定井底温度和地表热流所获得的结果相吻合。例如,将该方法用于秘鲁近海,由BSR估算出那里两个地区的地温梯度分别为 $43^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 和 $49.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ^[6];这些结果与用直接测量法获得的结果^[8]接近。

2.2 定量评价

用多道地震反射资料来分析气体水合物稳定带的若干特征。如Miller等人(1991)BSR的定量分析重新处理地震记录和合成地震波图,估算秘鲁近海某地层内的气体水合物量和下覆的游离气带厚度。结果表明,BSR在测向上是不连续的,在BSR高振幅处,水合物带下部孔隙的10%被气体水合物充填,游离气带的厚度为5.5~17 m,而在BSR低振幅处,游离气带的厚度远远小于5.5 m,甚至缺失。在气体水合物BSR地震研究中,Hyndman^[9]采用振幅偏移(AVO)分析法、高分辨率速度分析和垂直响应法,研究了加拿大温哥华岛近海的BSR,其结果表明,该BSR之上为一10~30 m厚的高速层,其中约30%的孔隙中充填有气体水合物;BSR层之下无游离气。

2.3 海底模拟反射层(BSR)特征

BSR层是否存在游离气,是一个有争议而至今尚悬未决的问题。目前对气体水合物的形成及BSR的发育提出了两种模式。

第一种模式,假设甲烷是由气体水合物稳定带内的有机质经微生物作用生成^[10]。气体水合物的形

成与沉积作用为同期发生。随着甲烷水合物带厚度的增加和加深,该带最终沉降到了气体水合物不稳定带中。该模式的结论是,气体水合物应出现在整个气体水合物稳定带中,而在BSR之下则可能存在或不存在游离气。

第二种模式认为,由于甲烷随着孔隙流体由下而上进入气体水合物稳定带的再移动,从而形成气体水合物^[9],这个模式中,甲烷大都是在稳定带以下的深部经微生物作用生成的,而不是在足以形成热成因甲烷的深部所生成的。该模式的结论是,气体水合物应聚集在BSR附近的稳定带底部,而无法预测BSR之下存在着的游离气。

这两种模式本来可以对事先从地震剖面指出的BSR层中通过大洋钻探计划(ODP)的第141航次(智利近海)和第146航次(温哥华岛近海)进行取样验证。但考虑到安全因素,没有进行大洋钻探取样。

2.4 电测井特征

除了地震资料外,电缆测井获得的地球物理资料也可和其它方面的资料结合起来进行勘察和评价气体水合物层段。气体水合物的测井研究包括井径、伽马射线、自然电位、电阻率、声波和中子孔隙度测井等方法^[11]。图5是阿拉斯加北坡地区艾琳(N. W. Eileen State)2号井一个含气体水合物钻井层段的一组电缆测井和一条泥浆气测井曲线图。根据北坡地区445口井中的测井资料综合研究证实,电阻率测井和声速测井特性曲线最为有用。其中鉴定出了50口井中含有六个气水合物层段,并绘制了相应剖面图^[12]。将艾琳2号井的测井曲线与深海钻探计划(DSDP)的危地马拉近海570号钻孔所获得的测井曲线进行了比较,发现两者具有相似的特征,且明显

地确定了气体水合物带的分布^[13]。电缆测井资料与地震资料相结合将会成为定量评价全球广泛分布的气体水合物资源的依据。

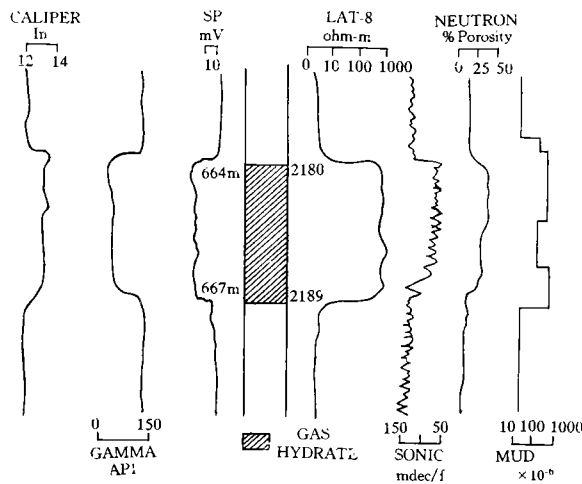


图5 阿拉斯加北坡艾琳2井某含气体水合物层段对比 (据文献[17])

Fig. 5 Comparison of wire line logs and total mud gas log for gas hydrates containing interval

3 地球化学

3.1 甲烷的来源

在上述讨论气体水合物形成的两种模式中,认为甲烷是有机微生物成因来源,其依据是对已发现的美国东南部近海、加里福尼亚北部近海、秘鲁近海、黑海、墨西哥湾的一些地点的气体水合物,及已知含气体水合物沉积段的样品进行的有机地球化学分析。结果表明,烃类气体的分子组成和甲烷的同位素组分与预测的微生物成因天然气结果相似。所有这些调查的结果均表明,甲烷是烃类气混合物的主要成分,占99%以上,其同位素组分($\delta^{13}C$)通常较之PDB标准要轻-60‰;其分子和同位素的分布范围具有微生物成因气的特征^[14]。

图6是布莱克外海岭气体水合物研究实例^[15],沉积剖面的甲烷为微生物成因来源,其甲烷(产品)的碳同位素组成与二氧化碳的碳同位素组成之间存在着一定的曲线关系;由图可见,甲烷的同位素组成随深度增加由最上部沉积物中约-94‰增加到最下部沉积物-66‰,说明它的 ^{12}C 值是随深度加大而呈系统地且非线性地减少。二氧化碳的碳同位素组成也随沉积物加深而增大,即从大约-25‰增至约-4‰,说明它的 ^{12}C 值呈减小趋势与甲烷碳同位素

组分的趋势曲线基本平行。甲烷和二氧化碳在碳同位素值分布上相同且曲线相互平行的特征,符合有机质来源的二氧化碳经微生物还原而形成甲烷的概念^[16]。这一结果证实了气体水合物中的甲烷为微生物成因。还有其他一些地区,如危地马拉近海 DSDP 钻探和秘鲁近海 ODP 钻探中,也都采集到了气体水合物样品,其甲烷和(或)二氧化碳的碳同位素组成曲线也呈现相似的变化趋势。

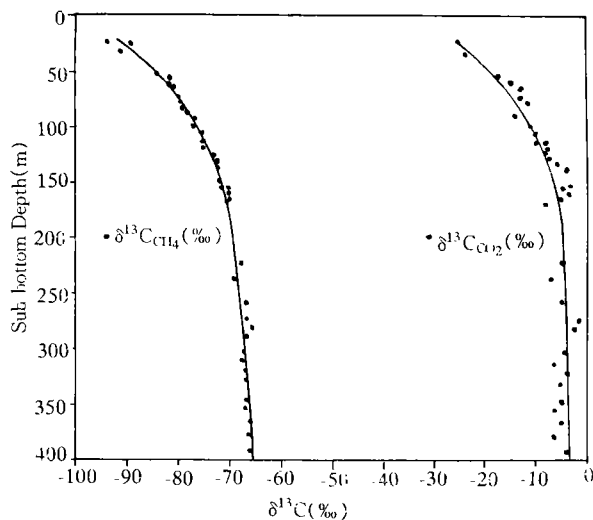


图6 布莱克外海岭533钻孔的甲烷(左线)

和二氧化碳(右线)同位素组分-深度分布

Fig. 6 Distribution with depth of carbon isotopic compositions of methane and carbon dioxide from Borehole 533, DSDP leg 76, Blake Outer Ridge (Modified from Galimov^[15])

3.2 微生物成因甲烷与热成因甲烷比较

Pfaum 等对墨西哥湾气体水合物中甲烷的分析表明甲烷为生物成因和热成因(表1)。

花园滩和绿峡谷水合物样品中甲烷含量达99%以上,其碳同位素组分小于-60‰。其中,绿峡谷有一个样品出现异常,甲烷含量为62%~78%,甲烷碳同位素组分为-43.2‰~-56.5‰。气体水合物与里海的泥火山中的烃类气相关,甲烷含量达59%~96%,碳同位素组分为-44.8‰~-57.3‰。这些特征表明甲烷是热成因的。

危地马拉近海第84航次发现的气体水合物,其气体分子组成和甲烷同位素特征表明,其物源既有微生物成因的,也有热成因的。深部沉积物中气体水合物离解甲烷含量小于99%,反映了微生物成因特征。尽管许多样品甲烷碳同位素小于-66‰,可能为

微生物来源。在实验室对这一块状气体水合物样作详细的研究,其甲烷碳同位素组分 -36.1% ~ -43.6% 。通常认为甲烷属热成因。

表1 天然气水合物和含水合物的沉积物中甲烷的碳同位素组分和含量

Tabal 1 Carbon isotopic compositions and concentrations of methane in nature gas hydrates and hydrate-containing sediments

地区	样品类型	CH ₄ %	$\delta^{13}C_{\text{‰}}$	参考文献
布莱克外海岭近海	沉积物	>99	-88~-70	Claypool等,1973
秘鲁-智利海槽近海	气水合物	>99	-65~-59.6	Kvenvolden等1990
加州艾琳盆地近海	气水合物	>99	-69.1~-57.6	Brooks等,1991
黑海	气水合物	>99	-63.3,-61.8	Ginsburg等,1990
墨西哥湾 DSDPleg96	沉积物	>99	-73.7~-70.1	Pflaum等,1986
墨西哥湾 DSDPleg96	气水合物	>99	-71.3	Pflaum等,1986
花园坛	气水合物	>99	-70.4	Brooks等,1986
绿峡谷	气水合物	>99	-69.2,-66.5	Brooks等,1986
密西西比	气水合物	97	-48.2	Brooks等,1986
危地马拉卡四平近海	气水合物	57-96	-44.8~-55.7	Ginsburg等,1992
中美州海槽 DSDPleg84	沉积物	>99	-71.4~-39.5	Kvenvolden等1985
中美州海槽 DSDPleg84	气水合物	>99	-43.6~-36.1	Kvenvolden等1984
中美州海槽 DSDPleg84	气水合物	>99	-46.2~-40.7	Brooks等,1985

如前所述在布莱克外海岭和危地马拉近海所发现的重甲烷碳同位素值,一种可能是由于微生物在降解过程中生成重CO₂碳同位素值衍生而来,另一种可能是重同位素甲烷与较深部沉积物中有机物热成因甲烷混合的结果。重同位素甲烷和重同位素CO₂具有很好相关性,经分析推断其物源可能为微生物成因,但也不排除热成因的可能。

水合物中的甲烷主要来源深埋的有机质经微生物作用改造形成的一种中间产物,有机质存在的数量和质量决定了甲烷生成条件,也就是说,深埋的有机质经历了150℃以上的温度后,以热变质而直接产生甲烷^[16]。由于形成气水合物所需的甲烷量远远超过溶解于水中的甲烷量,因此要形成气体水合物,对有机质需求量非常大。危地马拉近海含气体水合物沉积物有机质含量分析表明,有机碳含量高为2.0%~3.5%,甲烷原地生成未发生运移。

3.3 无机地球化学

在气体水合物形成过程中,水分子形成立方晶格结构,伴随盐离子析出。对危地马拉近海气体水合物样品进行氟离子浓度测定,其含氟量为0.51%~3.2%,秘鲁海为1.8%~8.2%^[18]。尽管这些样品均受到海水不同程度的污染,但样品中含氟量远远低于海水平均含氟量(19.8%)。Hesse等人^[19]在危

地马拉近海 DSDP 第 67 航次钻探时最先注意到含气体水合物带孔隙样品中的含氟量,随深度增大而明显从 19%降至 9%,同时,孔隙水中的氧同位素组分随深度增大近于零,当深度接近沉积物表面时,数值增至+2.6%。孔隙水中氧同位素分馏作用显然发生于气体水合物的形成之时,气体水合物发生分解之后导致 $\delta^{18}O$ 的富集。在秘鲁近海 ODP 第 112 航次中收集到含气体水合物沉积物样品观测它的孔隙水中氧同位素组分有相同的趋势。

正如 DSDP 第 67 航次中所观测到的,含氟量随着含气体水合物层深度的增大而降低的趋势,亦曾在布莱克外海岭(DSDP 第 67 航次)、危地马拉近海(DSDP 第 84 航次)^[19]见到。含氟量出现这种趋势,很大程度上是由于取芯时气体水合物发生分解,仅测定了原地孔隙水与已分解的气体水合物构成的混合物的氟化物浓度。因此,现已制造出一种先进的稀释器,它可从深度不断增大的沉积物中挤出孔隙水。孔隙水的淡化是标志气体水合物是否存在的一种有用标志,尽管它不是唯一的标志。

4 甲烷量的评估

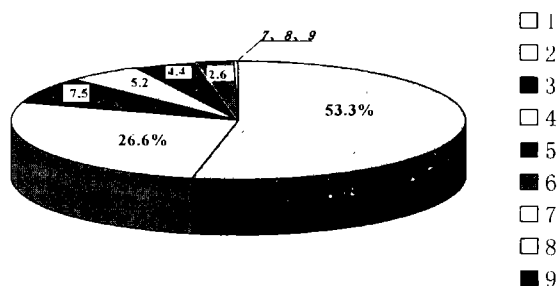
目前关于气体水合物中甲烷量的评估仅仅是推测。尽管人们都知道气体水合物在全球广泛分布(图3),但对于水合物存在和其相关知识还不完全了解,导致对甲烷量的估算范围较大。美国天然气远景委员会对过去的评估结果进行了汇总归纳,其报道的甲烷值为:在北极永冻层区域较低,为 7.5×10^5 g,深海沉积物中较高,为 4.1×10^{21} g。当时的估算认为,气体水合物中甲烷的含碳量大约为 10×10^{18} g^[20]。在标准温-压条件下 10^{19} g 甲烷含碳量的甲烷体积约等于 20×10^{15} m³或 6.6×10^5 R³甲烷气体。地球上相对于气体水合物量的有机碳量如图7所示。如果对这些储量规模的评估数据是正确的话,那么气体水合物中甲烷的含碳量是已经探明的化石燃料(煤、石油和天然气总和)中含碳量的2倍。

19世纪初期,化学家已经进行了气水合物的实验研究,20世纪30年代,在天然气管道传输过程中发现管道被气水合物堵塞,引起了石油工业界的注意,直到1960年Claypool提出^[21],气体水合物不仅存在极地的深水海域,而且存在于极地的浅海陆架沉积物中。

4.1 气体水合物资源潜力

作为潜在资源的气体水合物有两个重要方面引

起了人们的更大兴趣:第一个方面,地球圈层小于 2 000 m 厚的浅层沉积物中的立方笼型结构的水合物中赋存着巨量的甲烷;第二个方面,气体水合物的地质分布非常广泛(图 3),甲烷水合物的能量密度比其它非常规气体,如煤层、致密砂岩、黑色页岩、深部含水层等的密度大 10 倍,比常规天然气的密度大 2~5 倍。



1. 天然气水合物(10,000×10¹⁵ g); 2. 煤、石油和天然气(5000×10¹⁵ g); 3. 土壤(1400×10¹⁵ g); 4. 水中溶解有机物(980×10¹⁵ g); 5. 陆地生物(830×10¹⁵ g); 6. 泥炭(500×10¹⁵ g); 7. 碎屑有机质(60×10¹⁵ g); 8. 大气(3.6×10¹⁵ g); 9. 海洋生物(3.6×10¹⁵ g)。

图 7 全球有机碳分布图(不含分散有机质^[20])

Fig. 7 Distribution of organic carbon in the Earth, numbers are in units of 10¹⁵ g of carbon

4.2 甲烷的开采

尽管人们在本世纪 60 年代就已知道自然界存在气体水合物,但如何从水合物中产生甲烷气体,以及在开采和开发气水合物的方法上却进步缓慢。目前主要采用三种开采方法,即热力开采、降压开采和注入阻化剂开采^[22]。

热力开采法是通过加热含气体水合物的地层,目的在于提高地层的局部温度,造成气体水合物分解。降压法是通过泵吸作用降低气体水合物沉积的压力,促使气体水合物分解;降压过程中所需热能来自于地球内部(地热流)。阻化剂注入法则采用可使气体水合物分解的甲醇一类药剂作为阻化剂,由于它改变了温-压平衡,使气体水合物在原地的温-压条件下不稳定而发生分解。

这三种方法中,采用降压与热水注入相结合的方法,对圈闭于气体水合物下的游离天然气最实用;正如上述讨论的那样,当已证实了气体水合物之下圈闭有游离气,并能够证明从水化物自身释放出甲烷所需的能量远远小于从分解的气体水合物沉积物中开采甲烷所需的热能时,气体水合物就成了有远

景的能量资源。

4.3 甲烷的生产

从气体水合物中产生甲烷,则要求水合物沉积物在地质条件方面,具备有赋存常规天然气沉积物一样的地质要素,即具备相当孔隙度和渗透率的储层、甲烷物源、形成圈闭的封闭条件等。分解气体水合物可视为甲烷的一个来源,而从下部气体水合物带运移而来的甲烷则可能是另一来源。目前还未能很好地建立起气体水合物带气体水合物作为圈闭层的机理。Miller 等人^[23]通过对布莱克外海岭的研究,提出地球物理学的证据,提出气体水合物在 BSR 之下圈闭气体(图 4),如图 8 显示了由气体水合物可能形成圈闭的例子。这些例子假定了含气体水合物层段是非渗透性的,且能圈闭游离气。气体水合物下的游离气已从深部向上运移,游离气可能和热成因的。甲烷因开采而移走,地层压力逐渐衰减,气体水合物封闭体系将开始瓦解,含气体水合物沉积物可提供更多的甲烷,因此,该圈闭就成了甲烷的主要来源。图 8 中展示两种圈闭,第一种是构造环境圈闭,如图 8a,图 8c 同处于有效的构造圈闭,即,由穹隆状或背斜状水合物层构造圈闭;第二种是地层圈闭(图 8b),含气层因在沿倾斜向上的终端出现气体水合物而被封闭的。

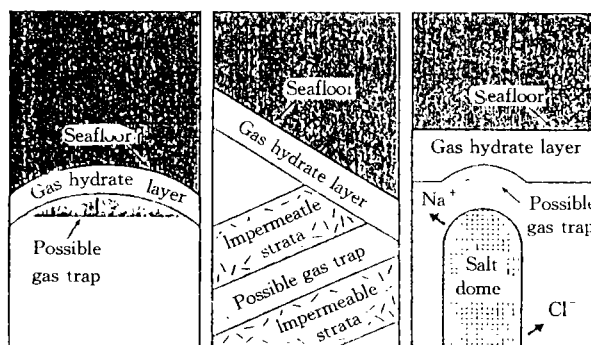


图 8 气体水合物作为甲烷气藏封盖层的地质环境示意图

Fig. 8 Schematic diagrams of geological situations in which gas hydrates serve as seals forming traps for methane^[24]

西西伯利亚的梅索亚哈气田在过去二十五年中的开发史表明,可从天然气赋存的气体水合物中开采出甲烷^[25]。在阿拉斯加北坡地区艾琳 2 号野猫井的压力取芯筒中采集到气体水合物岩芯,证实了普拉德霍湾油田-库帕勒克河油田地区在气体水合物^[26]。Collett^[27]估计,该区蕴藏着约 1.1×10¹² m³ 甲

烷(或 440×10^{12} g 的甲烷碳)。该甲烷估计量是北美同一地区常规储层中甲烷估算储量 ($0.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$) 的 1.4 倍,但仅占北美常规气估算储量 ($11.7 \times 10^{12} \text{ m}^3$) 的 13%,如果美国要不断地商业性开采气体水合物中的甲烷,那么必须有更多已证实可勘探开发利用的气体水合物。不过,初期的生产地区很可能是在阿拉斯加北坡,因为那里已具备了开发天然气的工业基础。首先在北坡地区采出的甲烷极可能用于补偿老油田的地层压力,而不是作为化石燃料。尽管应把气体水合物中的甲烷看作为一种远景能源,但要大规模开采气体水合物中的甲烷,大概要到 21 世纪才能实现^[21]。

5 结 语

从已发先现气体水合物藏的地质特征来看,沟盆体系、陆坡体系,边缘海盆陆缘等环境形成的构造热动力学过程是有利于形成天然气水合物,如和西太平洋具有相似构造成矿带的阿留申海盆、日本海盆、千岛海盆、四国海盆、冲绳海槽、菲律宾海盆、玛利亚拉海槽。雷怀彦等认为^[28],中国具有广阔的海域和近海大陆架斜坡,如南海海盆等具有形成气体水合物地质条件,还有属于陆坡体系的东海大陆架斜坡、东海诸岛,从已发现的海上油气看,具有赋存天然气水合物的可能,特别是南海北部大陆坡,今后应加以重视。

从地质远景上讲,气体水合物是地壳浅层的一种重要地质特征。气体水合物要比常规石油、天然气和煤的远景储量高的多。然而,这种远景能源究竟有多少可以开发,目前尚无把握。由于从气体水合物中产生甲烷的技术问题还未解决,因此从这些物质中大规模地开采甲烷将要到 21 世纪后期。

参 考 文 献

- Leggett J. The nature of the greenhouse threat in Global Warming [A]. The Green peace Report [C]. In: edited by J. Leggett J, ed. Oxford University Press, New York, 1990. 14~43.
- MacDonald G T. Role of methane clathrates in past and future climates [J]. Clim. Change, 1990a, 16: 247~281
- Sloan Jr E D. Clathrate hydrate of natural gases [M]. Marcel Dekker, New York, 1990. 286~386
- Hunt J M. Petroleum Geochemistry and Geology [M]. W H Freeman San Francisco, Calif, 1979. 617
- Yamamoto S, Alcauskas J B, Crozier T E. Solubility. Solubility of methane in distilled water and seawater [J]. J. Chem. Eng. Data, 1976, 21: 78~80
- Kevenvolden K A. Gas hydrate—geological perspective and global change [J]. Rev. Geophys, 1993, 31: 173~187.
- Shipley T H, Houston M H, Buffler T R, Sharb F J, McMillen K J, Ladd J W, Wirzel J L. Seismic reflection evidence for the widespread occurrence of possible gas—hydrate horizons on continental slopes and rises [J]. AAPG Bull 1979, 63: 2204~2213.
- Yamano M S, Uyeda Y Aoki, Shipley T H. Estimates of heat flow derived from gas hydrates [J]. Geology, 1982, 10: 339~343.
- Hyndman R D, Davis E E. A mechanism for the formation of methane hydrate and seafloor bottom—simulating reflectors by vertical fluid expulsion [J]. J. Geophys. Res., 1992, 97: 7025~7041.
- Claypool G E, Kaplan I R. The origin and distribution of methane in marine sediments [A]. In: Kaplan I R, ed. Natural Gases in the Marine Sediments [C]. Plenum, New York, 1974. 99~139.
- Goodman M A. In situ gas hydrates; Past experience and exploitation concepts [R]. In: proceedings 1st International Gas Research Conference [C]. Government Institutes, Rockville, Md, 1980. 376~391.
- Collet T S, Kvenolden K A. Exploration for gas hydrates [J]. ГеоИ. Журн, 1990, (1): 8~14.
- Mathews M. Logging characteristics of methane hydrate [J]. Log Anal, 1986, 27(3): 26~63.
- Bernard B B, Brooks J M, Sackett W M. Natural gas seepage in the Gulf of Mexico [J]. Earth Planet. Sci. Lett, 1976, 31: 48~54.
- Galimov E M, Kvenolden K A. Concentrations and carbon isotopic compositions of CH_4 and CO_2 in gas from sediments of Blake Outer Ridge, Deep Sea Drilling Project Leg 76. In: Sheridan R E, et al, eds. Initial Reports of the Deep Sea Drilling PROJECT, VOL. 76 [J]. U. S. Government Printing Office, Washington, D C. 1983. 403~407.
- Claypool G W, Kvenolden K A. Methane and other hydrocarbon gases in sediment samples from legs 10, 11, 13, 14, 15, 18 and 19. In: Sholl D W, et al, eds. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, Vol. 19 [R]. U. S. Government Printing Office, Washington, D C. 1973. 879~884.
- Kvenolden K A, Grantz A. Gas hydrates of the Arctic Ocean region [A]. In: Grantz A, Johnson L, Sweeney J F, eds. The Geology of North America, Vol. 1 [C]. The Arctic ocean Region, Geological Society of America, Boulder, Colo. 1990. 539~549.
- Kvenolden K A, Kastner M. Gas hydrates of the peruvian outer continental margin. In: Suess E, ed. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, Vol. 112 [R]. Ocean Drilling program, College Station, Tex. 1990. 517~526.
- Hesse R, Harrison W E. Gas hydrates (clathrates) causing pore—water freshening and oxygen isotope fractionation in deep—water sedimentary sections of terrigenous continental margins [J]. Earth Planet. Sci. Lett, 1981, 55: 453~562.
- Kevenvolden K A. Methane hydrate—A major reservoir of carbon in the shallow geosphere? [J]. Chem. Geol, 1988a, 71: 41~51.
- Sloan Jr E D. Natural gas hydrate phase equilibria and kinetics; un-

- derstanding the state of the art Rev[J]. Inst. Fr. 1990b, 45:245~266.
- 22 Holder G D, Kamath V A, Golbole S P. The potential of natural gas hydrates as an energy resource [J]. Ann. Rev. Energy, 1984, 9:427~445.
- 23 Miller J J, Lee M W, Von Huene R. An analysis of a seismic reflection from the base of a gas hydrate zone, offshore Peru [J]. AAPG Bull, 1991, 75:910~924.
- 24 Dillon W P, Grow J A, Paull C K. Unconventional gas hydrate seals may trap gas off southeast U. S [J]. Oil Gas J, 1980, 78(1): 124~130
- 25 Makogon Yu F. Hydrate of nature gas [M]. Pennwell, Tulsa, Okla, 1981. 237.
- 26 Kvenvolden K A, McMenamin M A. Hydrates of natural gas: A review of their geologic occurrence [J]. U. S. Geol. Surv. Circ. 1980, 825:11.
- 27 Collett T S. Potential of gas hydrates outlined [J]. Oil Gas J. 1992, 90(25):84~87.
- 28 雷怀彦, 王先彬等. 天然气水合物研究现状与未来挑战 [J]. 沉积学报, 1999, 17(3):493~498.

Natural Gas Hydrates—Geological Perspective

LEI Huai-yan WANG Xian-bin ZHENG Yan-hong ZHANG Zhong-ning ZHOU Xiao-feng

(State Key Laboratory of Gas Geochemistry, Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, 730000)

Abstract

Natural gas hydrates have become an exciting national and international research issue. Gas hydrates, also called gas clathrates, naturally occur in solids comprised of water molecules forming a rigid lattice of cages with most of the cages, each containing a molecule of natural gas, mainly methane.

Natural gas hydrates exists worldwide in the polar region, normally associated with onshore and offshore permafrost, and in sediment of outer continental and insular margins. The role that methane hydrates will play in contributing to the world's energy needs will depend on the availability, producibility, and cost of extracting methane from the hydrate phase. The generally accepted estimates of the total amount of methane that in gas hydrates is about twice the total methane of all fossil fuels (i. e. gas, oil, coal, etc.) combined. However, if even a small portion of the suspected gas hydrate accumulation is producible, hydrates would have a significant impact as an energy resource. The total amount of methane in gas hydrates likely exceeds 1019g methane carbon.

Three important research areas clearly emerge as common themes in all gas hydrate research plans: (1) hydrates as an energy resource, (2) hydrates as agent of global change, and (3) hydrates as a factor in seafloor stability and geohazards. Because natural gas hydrates represent a large amount of methane within 2000m of the earth's surface, they are considered to be an unconventional, unproven source of fossil fuel. Because gas hydrates are metastable, changes of pressure and temperature affect their stability. Destabilized gas hydrates beneath the seafloor lead to geologic hazards such as submarine slumps and slides, examples of those are found worldwide. Destabilized gas hydrates may also affect climate through the release of methane, a "greenhouse" gas, which may enhance global warming and be an important factor in global climate change.

I thought that in each of these aspects an imposing need arises for study that is both technically demanding and of public interest. Here we briefly review those three themes and their underlying scientific opportunities.

Key words natural gas hydrate fuel energy properties geological prospective