

天然气水合物的形成条件及成因分析

蒋向明

(中国煤炭地质总局水文地质局,河北 邯郸 056004)

摘要:从天然气水合物的晶体结构模型出发,说明了其组成成分及结构特征。通过对温度—压力平衡条件的差异性分析,揭示了天然气水合物形成的基本条件,对其赋存类型及成因进行了分类,对我国及全球天然气水合物分布情况进行了说明,并以青海木里煤田为例,对天然气水合物的形成条件和成因进行了详细的论述,认为:变质作用及煤化作用使煤田内丰富的煤炭资源不断产生煤层气,当煤层气沿断层破碎带及裂隙运移至含水岩层或含水裂隙时,在温度和压力的作用下遇水形成天然气水合物。强调在开发利用天然气水合物时,必须考虑水资源的保护和综合利用。

关键词:天然气水合物;分布特征;形成条件;存在类型;成因分析;木里煤田

中图分类号: P618.130.1

文献标识码: A

Forming Conditions and Genetic Analysis of Natural Gas Hydrate

Jiang Xiangming

(Hydrogeological Exploration Bureau, CNACG, Handan, Hebei 056004)

Abstract: Start from crystal structure model of the natural gas hydrate, illustrated its composition and structural features. Through temperature—pressure equilibrium condition discrepancy analysis, revealed basic terms of natural gas hydrate formation and classified its hosting pattern and genesis. The paper illustrated national and global distribution of natural gas hydrate, to take the Muri coalfield in the Qinghai Province as an example, discussed its forming condition and cause of formation in detail. Considered that the metamorphism and coalification make the abundant coal resource producing coal bed gas constantly, when the gas migrating along the shattered fault zones and fractures into water-filled strata or fractures, natural gas hydrate will be formed under the temperature and pressure. It is emphasized that, during the exploitation and utilization of natural gas hydrate, the protection and comprehensive utilization of water resource have to take into account.

Keywords: natural gas hydrate; distribution feature; formation condition; hosting pattern; genetic analysis; Muri coalfield

天然气水合物是以 CH_4 为主, 含少量 CO_2 、 H_2S 的气态烃类物质充填或被束缚在笼状水分子结构中形成的冰晶化合物。在一个烃类气体分子的周围包围着多个水分子, 水分子通过氢键紧密缔合成三维网状, 将烃类气体分子纳入网状, 体中形成水合甲烷, 其晶体结构模型如图 1。这些水合甲烷象淡灰色的冰球, 可以象酒精块或蜡烛一样燃烧, 故称为“可燃冰”, 其密度为 $0.905\sim 0.91\text{g}/\text{cm}^3$, 化学式为 $\text{CH}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, 只要把结构中的“水”去掉, 就是一种理想的燃料。

从能源的角度看, 天然气水合物可视为高度压缩的天然气。理论上讲, 1m^3 的天然气水合物在标准大气压下 (0.101MPa) 可以释放出 164m^3 的天然气和 0.8m^3 的水, 其能量密度是煤和黑色页岩的 10 倍左

右, 且燃烧几乎不产生有害污染物, 是一种新型的清洁环保能源, 是公认的地球上尚未开发的、巨大的能源宝库。

世界天然气水合物储量约为 $2 \times 10^{16}\text{m}^3$, 相当于地球上所有开采石油、天然气和煤的总量的 2 倍, 约为剩余天然气储量 ($156 \times 10^{12}\text{m}^3$) 的 128 倍。海底

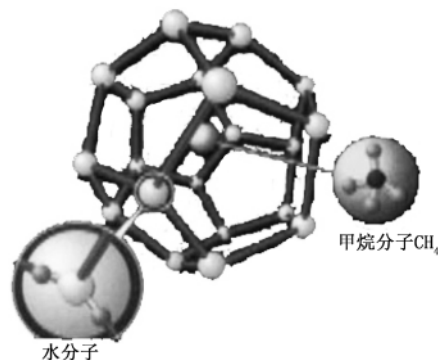


图 1 天然气水合物晶体结构模型

Figure 1 Crystal structure model of natural gas hydrate

作者简介: 蒋向明(1964—), 男, 教授级高级工程师, 1986年毕业于湘潭矿业学院, 中国矿业大学工程硕士。

责任编辑: 樊小舟

的天然气水合物至少够人类使用 1 000a^[1]。因此,天然气水合物将成为 21 世纪石油、天然气的理想替代资源和最有希望的战略资源。

1 天然气水合物的分布特征

就全球范围而言,天然气水合物主要分布在二类地区:一类地区是水深为 300~4 000m 的海洋海底以下 0~1 500m 的松散沉积岩中,以及 100~250m 以下极地陆架海砂砾中;另一类地区是高纬度大陆地区永久冻土带。世界上 90% 以上的天然气水合物分布于板块聚合边缘大陆坡、离散边缘大陆坡、水下高地等大陆边缘海底的砂砾中,包括沟盆体系、陆坡体系、边缘海盆陆缘,尤其是与泥火山、热水活动、盐(泥)底辟及大型断裂构造有关的深海盆地中,分布面积达 4 000km²,约占地球海洋总面积的 1/4。

在我国,天然气水合物主要分布于南海北部陆坡、南沙海槽、东海陆坡等海域,常以块状透镜状或浸染状分布于砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩和坡积岩中,含量从百分之几到 95%。这些沉积物主要是新生代的产物,从始新统、渐新统、中新统,尤其是上新统均见有天然气水合物的产出。陆域的天然气水合物主要分布于青藏高原永久冻土带,面积可达 88×10⁴km²。

青海煤炭地质局等单位在青海木里煤田已钻获天然气水合物实物样品,该天然气水合物主要分布于煤系地层江仓组砂岩中,埋深 132~358.30m,测井解释矿层厚度为 0.70~2.50m,平均为 1.45m,估算储量约为 1.824×10⁹m³^[2]。

2 天然气水合物形成的温度—压力平衡条件的差异性分析

天然气水合物的形成与分布主要受烃类气体来源和一定的温压条件控制,天然气水合物的形成除低温高压条件外,还必须有充足的天然气来源和含水介质。形成天然气水合物的基本条件包括:①低温,一般温度低于 10℃;②高压,一般压力大于 10MPa;③天然气来源和含水介质;④有利的储集空间。其形成模式主要有:低温冰冻模式、沉积模式和各种渗滤模式等。

天然气水合物形成的基本条件中,低温条件比高压条件更具控制作用。图 2 是通过天然气水合物温压预测条件 CSMHJYD 绘制典型水合物温度—压力平衡图^[3],从图中可以看出:

(1) 当水合物温度和压力在临界稳定曲线上部时,水合物处于稳定状态不会分解,当位于临界稳定

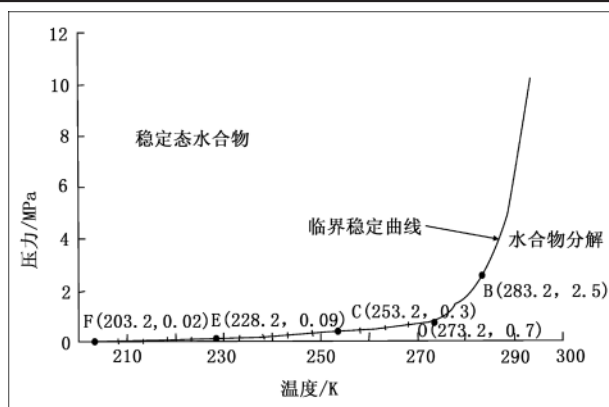


图 2 典型天然气水合物温度—压力平衡相图

Figure 2 Typical natural gas hydrate temperature—pressure equilibrium phase diagram

曲线下部时,为非稳定状态,水合物就会分解,而在某一压力条件下,当温度高于临界稳定曲线上相应的临界点温度值时,水合物就会分解。

(2) 温度和压力平衡具有明显的过程差异性

当 $T \leq -45^\circ\text{C}$ (228.2K), 临界分解压力仅为 0.09MPa, 低于大气压, 说明当水合物处于温度低于 -45°C 时, 在常压下也不会分解。

当 $-45^\circ\text{C} \leq T \leq 0^\circ\text{C}$ (273.2K) 时, 临界分解压力由 0.09MPa 增加到 0.7MPa, 即每降低一度需要增加 0.013 6MPa 的压力, 就能使水合物不分解。

当 $0^\circ\text{C} \leq T \leq 10^\circ\text{C}$ (283.2K) 时, 临界分解压力由 0.7MPa 增加到 2.5MPa, 即每降低一度需要增加 0.18MPa 的压力, 才能保持水合物不分解, 该区间的压力增加量是 $[-45^\circ\text{C} \sim 0^\circ\text{C}]$ 时区间压力增加量的 13 倍。

当 $T \geq 10^\circ\text{C}$, 每度需要增大压力 $P \geq 0.9\text{MPa}$, 才能保持水合物不分解。如果温度升高到一定值时 (293.2K 即 20°C) 时, 压力增大到 10MPa, 水合物也会分解。

以上温度和压力平衡的过程差异性表明, 在低温条件下 $[-45^\circ\text{C} \sim -20^\circ\text{C}]$ 时, 天然气水合物稳定性好, 对压力条件要求低, 但在非低温条件下 $0^\circ\text{C} \sim 15^\circ\text{C}$ (273.2K~288.2K), 天然气水合物很不稳定, 而且对压力条件要求高。

3 天然气水合物的存在类型及成因分析

R. D. Malone 等对天然气水合物进行了多年的研究, 指出天然气水合物存在有 4 种类型^[4]: 第一种是良好分散水合物, 均匀分布在岩石的孔隙或裂隙中; 第二种是结核状水合物, 其直径为 5cm, 水合物气体为从深处迁移的热成因气体; 第三种是层状水合物, 分散于沉积物的各薄层中, 主要分布在近海区域和永久冰冻土中; 第四种是块状水合物, 厚度为

3~4m,水合物的含量为95%,沉积物含量为5%,主要形成于断裂带等有较大的储存空间的环境中(图3)。

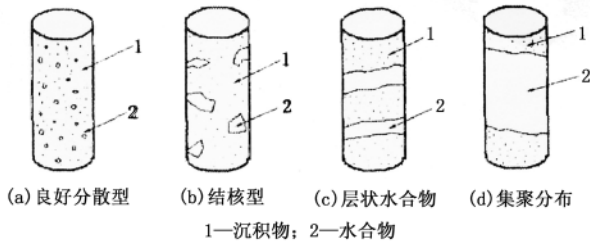


图3 天然气水合物的存在类型

Figure 3 Natural gas hydrate hosting patterns

根据形成环境的温度和压力条件,将天然气水合物的成因机制分为以低温条件为主控因素的低温成因型和以高压条件为主控因素的高压成因型(图4^[1])。

低温成因型:形成天然气水合物时温度起主要控制作用,形成的条件是温度低而相对压力较小。如青藏高原冻土带浅部的天然气水合物和100~250m以下极地陆架海的天然气水合物。

高压成因型:随埋深增大,压力增高而温度也因温度梯度相应增高,高压对形成天然气水合物的形成起主导因素。如水深为300~4000m的海洋天然气水合物基本上是在高压条件下形成的。

掌握了天然气水合物的形成条件,对开发利用时是采用热激发法还是降压法、化学剂法具有一定指导意义。

根据天然气的来源,将天然气水合物成因机制分为原生气源型和再生气源型。

原生气源型是指已存在的天然气田、煤层气田、深处迁移的热成因气体等因温度或裂隙压力或天然气浓度的变化而转变为天然气水合物,在此过程中无外来物质的加入,天然气水合物可与常规的天然气(油田)、煤层气(煤田)相伴而生。

再生气源型是指特定的环境条件下,海洋里大量的生物和微生物死亡后留下的遗体不断沉积到海底,很快分解成有机气体甲烷,这些有机气体,在压力的作用下便充填到海底结构疏松的沉积岩孔隙中,在低温和压力的作用下形成天然气水合物。

4 陆域天然气水合物形成条件及成因分析

陆域的天然气水合物主要分布于青藏高原永久冻土带,面积可达 $88 \times 10^4 \text{ km}^2$,2008年底—2009年初,中科院矿产资源研究所、勘探技术研究所和青海煤炭地质局在木里煤田聚乎更矿区钻获天然气水合物实物样品,使我国成为第一个在中低纬度高冻地区发现天然气水合物的国家。下面以青海省木里煤田为例对天然气水合物形成条件及成因进行分析。

木里煤田位于青藏高原北部高寒地区,海拔标高为4100~4300m,年平均气温 -5.1°C ,煤田范围内多年冻土层广泛发育,冻土层呈岛状分布,平均厚度80m,大部分地区冻土层大于100m,煤田总面积7600 km^2 ,煤炭资源丰富,主要含煤地层为中、下侏罗统江苍组,地层厚度达650m,含煤层17~19层,煤层总厚达86m,其中可采煤层6~13层,资源总量达145.84亿 $\text{t}^{[5]}$ 。

木里煤田煤质类型从长焰煤到无烟煤,煤的变质作用以深成变质为主,有利于烃类气体生成。实测

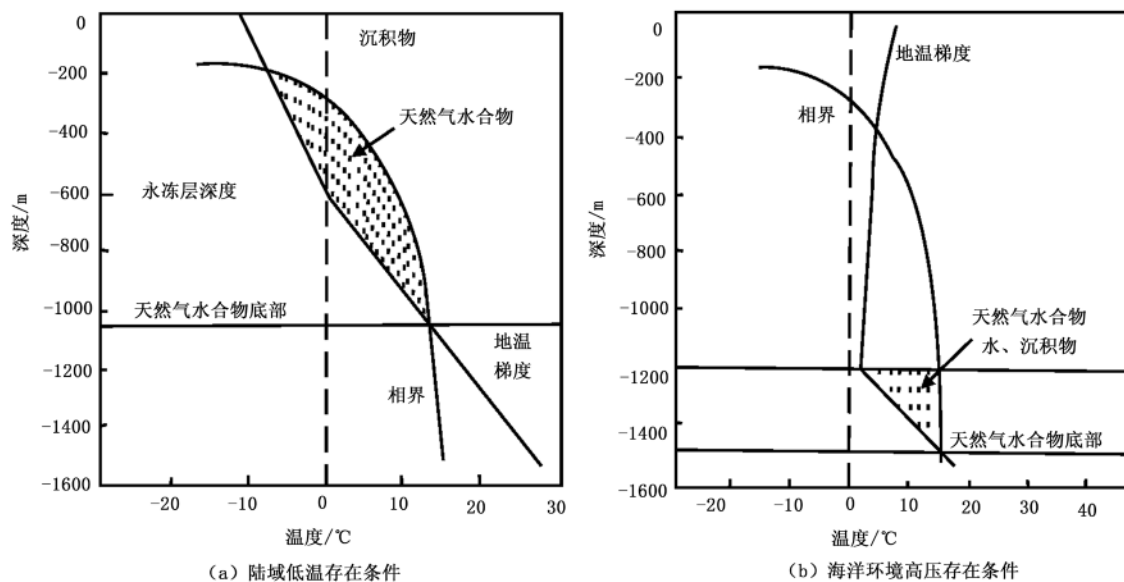


图4 天然气水合物存在条件

Figure 4 Natural gas hydrate hosting conditions

结果表明,木里煤田内多数矿区煤层气含量较低,平均含量不足 $3\text{m}^3/\text{t}$ 。通过对煤田内施工 5 个钻孔资料分析,认为天然气水合物主要充填于断层裂隙和江仓组砂岩孔隙中,其释放的天然气总量可达 $(2.71\sim 2.99)\times 10^{11}\text{m}^3$,是煤层气地质资源量的 30 倍^[1]。

木里煤田地质构造背景复杂,受折连褶皱带的区域构造控制,主要发育 NWW 向的逆冲断裂和一系列的紧密的向斜构造,具有南北分带、东西分区的特点,赋煤规律主要受区域构造控制,区内的侏罗系含煤岩系多分布于逆冲断裂之间的向斜构造中,近山边缘地带和煤田东、西区段(如聚乎更、弧山矿区)构造变形严重,中间区段构造变形较轻,煤系埋藏较浅且保存完整(图 5^[6])。

聚乎更煤矿区位于木里煤田的西北端,矿区内以紧密褶皱为主,逆冲断层发育(图 6^[7])。并发育陡立、倒转不对称的向斜构造,构成了煤层气上移通道(图 7),由此可知,木里煤田区形成天然气水合物的条件可归纳如下。

①较低的温度。年平均温度为 -5.1°C (500m 以浅地热梯度增温很小)。

②较高的压力条件。根据天然气水合物温度—

压力平衡相图可知,在温度 -5.1°C (278.1K)时,只需要大于 0.6MPa (6.0 标准大气压)的压力就具备了形成天然气水合物的条件,已发现的天然气水合物埋藏深度为 132~358.3m,按正常的地层压力计算, P 大于 2.0MPa ,因此,煤田内永久冻土层(80m)下都具备形成条件。

③烃类气体源。煤田内赋存丰富的煤炭资源,资源总量达 145.84 亿 t,在地质历史演化过程中,煤化作用和变质作用过程中产生大量的以甲烷为主的煤层气,为形成天然气水合物的气源。

④含水介质条件。据煤田内各矿区勘查资料^[8],在多年冻土层水下分布有第四系冰川堆积与坡积固相含水层、古近系和新近系红色砂砾岩孔隙含水层,侏罗系砂岩裂隙承压含水层,这些含水层为形成天然气水合物提供了含水介质条件。

⑤储集空间。区内构造发育,断层破碎带及裂隙形成良好的运气通道和储集空间,煤层上覆砂岩含水层中的裂隙和孔隙(砂岩平均孔隙度 15%)构成主要的储集空间。

另外,顶部的 80~100m 的永久冻土层是良好的封闭盖层,抑制了煤层气的继续上移而逸出地表。

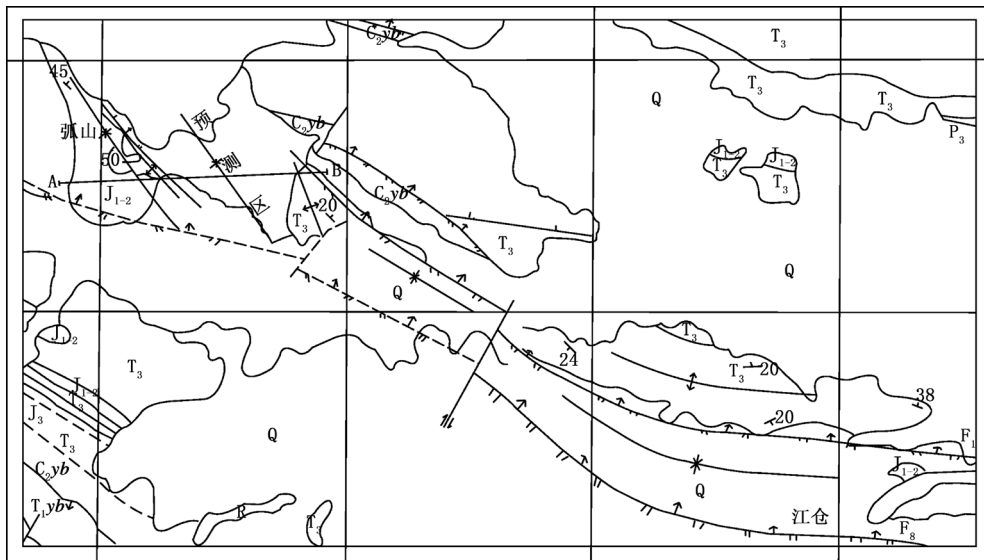


图 5 木里煤田弧山、江仓矿区构造纲要图

Figure 5 Structural outline map of Gushan, Jiangcang mine areas in Muri coalfield

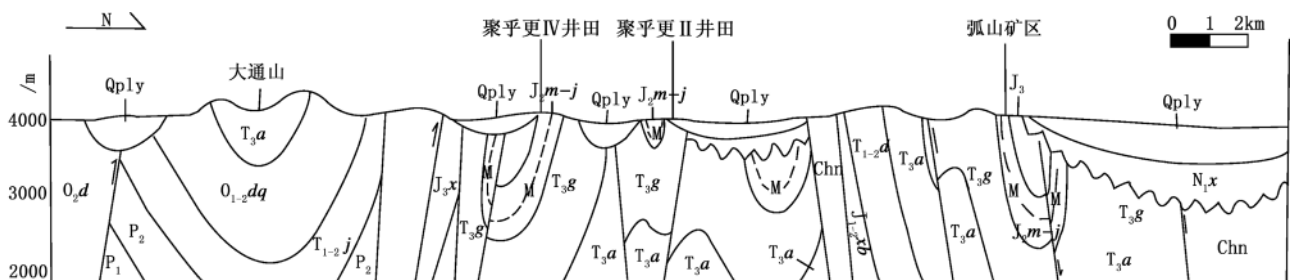


图 6 木里煤田西段聚乎更—弧山矿区构造剖面图

Figure 6 Structural sections of Juhugeng-Gushan mine area, western Muri coalfield

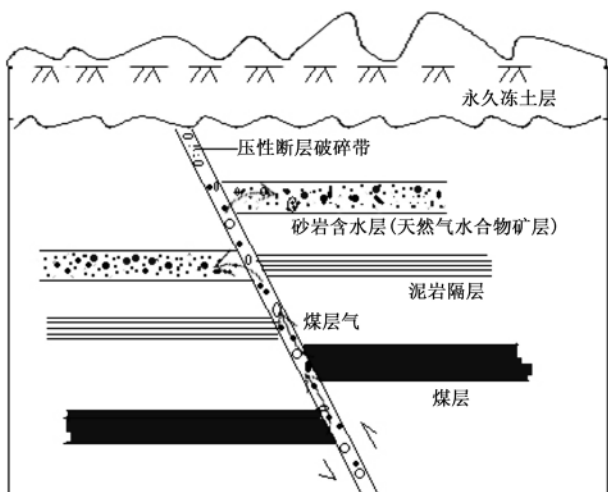


图7 青海木里煤田天然气水合物形成机理示意图

Figure 7 A schematic diagram of natural gas hydrate formation mechanism

由此可知,青海木里煤田天然气水合物形成的机理是:在漫长的地质历史中,变质作用及煤化作用使煤田内丰富的煤炭资源不断产生煤层气,当煤层气沿断层破碎带及裂隙运移至含水岩层或含水裂隙时,在温度和压力的作用下遇水形成天然气水合物。从理论上讲,天然气水合物是压缩了的冰冻化的煤层气,这样就不难理解木里煤田天然气水合物释放的天然气含量是煤层气地质储量的30倍。

值得注意的是,陆域天然气水合物的形成条件,除了低温、高压、天然气资源等这三个条件外,形成天然气水合物所需的水源也是必不可少的,如果没有足够的水源,虽具有低温高压条件,天然气仍然还是气态烃类。从理论上分析,形成 1m^3 的天然气水合物需要 164m^3 天然气和 0.8m^3 的水。木里煤田天然气水合物总量为 $1.653\times 10^9\text{m}^3$,那么形成该储量的天然气水合物所需水量应为 $1.653\times 10^9\times 0.8\text{m}^3=1.3224\times 10^9\text{m}^3$,由此可知,形成天然气水合物,不仅需要有低温高压和烃类气源条件,也必须有含水层条件(海底沉积物含水量较高)。因此,对青藏高原地区的天然气水合物的开发和利用,必须考虑水资源的保护和综合利用。

5 结论与认识

①天然气水合物是以 CH_4 为主,含少量 CO_2 、 H_2S 的气态烃类物质充填或被束缚在笼状水分子结构中形成的冰晶化合物,是一种新型的清洁环保能源,是公认的地球上尚未开发的巨大的能源宝库。世界天然气水合物储量约为 $2\times 10^{16}\text{m}^3$,相当于地球上所有开采石油、天然气和煤的总量的2倍。海底的天然气水合物将至少够人类使用1000a。

②天然气水合物主要分布在二类地区:一类地区是水深为300~4000m的海洋海底以下0~1500m

的松散沉积岩中,及100~250m以下极地陆架海砂砾中;尤其是与泥火山、热水活动、盐(泥)底辟及大型断裂构造有关的深海盆地中。另一类地区是高纬度大陆地区永久冻土带。在我国,天然气水合物主要分布于南海北部陆坡、南沙海槽、东海陆坡等海域和青藏高原永久冻土带。

③根据天然气水合物形成环境的温度和压力条件,天然气水合物成因机制分为:以低温条件为主控因素的低温成因型和以高压条件为主控因素的高压成因型。根据天然气的来源,将天然气水合物成因机制分为原生气源型和再生气源型。

④在青藏高原形成天然气水合物,不仅需要低温、高压和烃类气源条件,而且必须有足够的水源,如果没有足够的水源(海底沉积物含水量较高),虽具有低温、高压条件,其天然气仍然还是气态烃类,由此而知,天然气水合物的分布规律主要受地质构造和含水介质条件的控制,对青藏高原地区的天然气水合物的勘探和研究,应该首先研究区域构造和水文地质条件,今后的开发利用,也必须考虑水资源的保护和综合利用。

⑤青海木里煤田天然气水合物形成的机理是:在漫长的地质历史中,变质作用及煤化作用使煤田内丰富的煤炭资源不断产生煤层气,当煤层气沿断层破碎带及裂隙运移至含水砂岩层或含水裂隙时,在温度和压力的作用下遇水形成天然气水合物。从理论上讲,天然气水合物是压缩了的冰冻化的晶状煤层气。

参考文献:

- [1] 江怀友,乔卫杰,等.世界天然气水合物能源的勘探发现现状与展望[J].中外能源,2008,13(6):19-25.
- [2] 徐水师,王佟,刘天绩,等.青海省木里煤田天然气水合物资源量估算[J].中国煤炭地质,2009,21(9):1-2.
- [3] 郭威,孙友宏,等.天然气水合物孔底冷冻取样技术[J].探矿工程,2009,36(279):147-153.
- [4] 李小森.天然气水合物能源的勘探与开发[J].现代化工,2008,28(6):1-15.
- [5] 曹代勇,刘天绩,等.青海省木里地区天然气水合物形成条件分析[J].中国煤炭地质,2009,21(9):3-6.
- [6] 马代兵.青海省木里煤田弧山矿区东部找煤预测[J].中国煤炭地质,2007,19(6):1-2.
- [7] 孙军飞,孙红波,等.青海省木里煤田构造分带性及赋煤规律[J].中国煤炭地质,2009,21(8):9-11.
- [8] 潘语录,田贵发,等.测井方法在青海省木里煤田冻土研究中的应用[J].中国煤炭地质,2009,20(12):7-9.
- [9] 卢振权.天然气水合物开发利用前景浅析[J].地球学报,1999,20:599-605.
- [10] 邵仲妮.天然气水合物资源分布及勘探开发进展[J].当代石油石化,2007,15(5):24-26.