

青藏高原多年冻土区天然气水合物成藏条件

李伟华^{1,2} 陈永峤^{1,2}

1.长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室 湖北 荆州 434023

2.长江大学地球化学系 湖北 荆州 434023

摘要:

天然气水合物是一种绿色能源,具有广阔的开发利用前景。青藏高原多年冻土大面积分布,中新世盆地数量众多,盆地内烃源岩发育,为天然气水合物的形成提供了良好的条件。主要从物质条件、环境条件、热力学条件、地质条件等方面来探讨青藏高原多年冻土区天然气水合物的成藏条件。分析认为青藏高原地层中丰富的有机质及其较高的成熟度是成藏的物质条件,低温、高压、冻土厚度大、地温梯度小等是保证其成藏的环境和热力学条件,大量的运移通道、较好的圈闭是其成藏的有利地质条件。预测了青藏高原多年冻土区天然气水合物有利的找矿前景区。

关键词:

天然气水合物;青藏高原;多年冻土区;成藏条件

文献标识码:A

文章编号:1006-5539(2011)02-0050-04

0 引言

19世纪60年代苏联在西伯利亚 Messoyakha 气田的冻土层中发现天然气水合物^[1],至今全球冻土区内共发现水合物产地9处^[2],储量可观。我国也于2009年在青海木里地区的多年冻土层钻获天然气水合物实物样品,但还未发现具规模的水合物矿藏。经调查,地球上27%的陆地和90%的海域均具备天然气水合物形成条件^[3]。

青藏高原多年冻土面积约 $150 \times 10^4 \text{ km}^2$,占世界的7%,约占我国的70%^[4],分布广泛且厚度较大,为天然气水合物的形成提供了条件。前人对青藏高原多年冻土区天然气水合物的成藏做过一些研究,但很少涉及沉积有机质、产甲烷菌、圈闭等方面的因素对成藏的影响,因此拟从地质背景、气源分析、温压及冻土条件、运移通道及圈闭等方面综合探讨青藏高原多年冻

土区天然气水合物成藏条件。

1 地质背景

地质因素是天然气水合物成藏的基础,影响着天然气水合物的形成与分布。现从沉积环境与地层、地质构造及第四纪冰川等方面介绍青藏高原的地质背景。

1.1 沉积环境与地层

早古生代,青藏地区为热带近岸的浅海碳酸盐岩沉积,以浮游生物为主,水动力条件十分流畅;晚古生代,脊椎动物繁盛,以海洋、浅海或海陆过渡沉积环境为主,海相地层广泛发育,上二叠统为海陆交互的含煤沉积,发育大套烃源岩和储集层。

中生代,青藏地区经历了海—陆交替的演化过程,沉积环境从陆相到浅海至深海盆地均有发育^[5],中上侏罗统分布广泛,为海相灰岩和砂岩,发育两大套

收稿日期:

2010-10-21

基金项目:

长江大学博士科研启动基金(0208)

作者简介:

李伟华(1984-),男,河南虞城人,在读硕士研究生,主要从事储层沉积学、天然气水合物等研究。

生储油岩系及巨厚的石膏盖层;到中生代晚期至新生代,青藏地区开始整体抬升,逐渐结束了海相沉积历史,发育了晚白垩世至第三纪的陆相沉积,碎屑岩含煤地层及碳酸盐岩。

早第三纪,青藏地区属热带至亚热带湿润气候,陆相沉积以冲积扇为主,多与辫状河、扇三角洲和湖泊组合出现,沉积有杂色砾岩、砂岩及泥岩,只有南部边缘为海洋沉积环境;到了第三纪末,一些地方出现了变冷变干的趋势,温带树种和草本植物占优势。第四纪进入冰川期,除各种成因类型的堆积外,在东北部尚有近代中基性火山岩分布。

1.2 地质构造

青藏高原地质构造极为复杂,可分为喜马拉雅构造区、雅鲁藏布江缝合线带、藏北构造区、班公错—东巧—怒江超基性岩带、羌塘—青南—三江区、可可西里—巴颜喀拉构造区和昆仑构造区等几个构造区带^[6]。各构造区断裂、破碎带等构造非常发育,如青藏铁路沿线的昆仑山活动断裂、通天河活动断裂、雁石坪活动断裂、不冻泉活动断层、二道沟盆地边界活动断层等^[7]。同时,在构造活动作用下,产生了类型丰富、数量众多的构造圈闭。

1.3 第四纪冰川

更新世末至全新世期间,青藏地区整体进入冰冻期,出现了大规模的山地冰川。晚更新世末期末次冰期最盛期,青藏高原处于严寒、干旱的冰缘环境,在这

种干冷的气候下,形成大面积巨厚冻土,进入全新世,高原海拔已上升到 4 000 m 以上,决定着整个高原仍处在冰缘环境下^[8]。第四系伴随高原强烈隆升,遭受广泛的冰川—冰缘作用,冰盖压力使下伏沉积物中天然气水合物稳定性增强,有利于规模矿藏的形成。

2 气源分析

气体供应是否充足是影响气水合物能否成藏及矿藏大小的重要因素。地层中的沉积有机质在很大程度上决定着气体的输出量,因为无论是热解成因气,还是生物成因气都是沉积有机质在不同演化阶段的产物。生物成因气产出量受产甲烷菌的影响。热解成因气成分复杂,不同气体对水合物成藏的温压条件要求不一,故气体成分也影响气水合物的成藏。

2.1 沉积有机质

羌塘盆地是青藏高原分布面积最大的中生代海相沉积盆地,充填地层总厚达万余米,烃源岩广泛分布,有机质含量和演化程度高,盆地内生烃潜力巨大,盆地内共发现油气显示 190 余处^[9]。对羌塘盆地部分地层的烃源岩的地球化学指标做了统计分析,见表 1。

从整体上看,烃源岩的有机质丰度较高、类型较好、以成熟及高成熟为主,因此,盆地内的沉积有机质能够提供天然气水合物矿藏形成所需要的大量气源。此外,青藏地区煤层发育,煤系有机质热演化形成的天然气也能够为气水合物矿藏提供大量优质的气源。

表 1 羌塘盆地上三叠统、侏罗系烃源岩综合评价表^[10](略改)

地层	灰 岩		泥 岩		有机质类型	有机质成熟度
	TOC/(%)	氯仿沥青“A”/(‰)	TOC/(%)	氯仿沥青“A”/(‰)		
肖茶卡组	0.12	0.64	2.76	0.42	Ⅰ或Ⅱ型	高成熟
布曲组	0.16	0.91	0.45	1.17	Ⅰ或Ⅱ型	成熟 - 高成熟

2.2 产甲烷菌的影响

大多数产甲烷菌的最适温度 30~40 ℃,若温度较低,则会限制产甲烷菌以及与甲烷发酵有关的微生物的活性,不利于甲烷气的大量生成。青藏高原多年冻区常年处于低温、寡营养、缺氧和地磁辐射等极端严酷的环境条件,一般情况下只有嗜冷产甲烷菌才能生存,而嗜冷产甲烷菌在自然界中分布很少,且活性不高,所以,在这种环境中所生成的浅部生物甲烷气较少,不利于气水合物的大规模成藏。

2.3 气体来源

青藏铁路沿线多年冻土区一些冻土和地下冰样中除甲烷和乙烷外,还含有一定量的丙烷和正丁烷^[11],根

据烃类气体扩散速率的不同,乙烷、丙烷、丁烷与甲烷一起大量出现一般指示着烃类气体并非简单地由原地有机质转化而成,相反由深部运移而来,特别是丁烷的出现指示了深部渗漏扩散作用^[12]。青藏高原环境条件恶劣,只有少量嗜冷产甲烷菌存在,严重影响浅部生物甲烷气的生成量。因此,青藏高原多年冻土区天然气水合物的气源应以深部热解成因气为主,并与油气藏或煤型气伴生,但也不排除生物成因气水合物藏的存在。

2.4 气体成分

青海木里地区多年冻土中钻获的天然气水合物样品中除甲烷外,还含有较高的乙烷、丁烷等烃类气体,

部分样品还含有一定量的二氧化碳^[13]。卢振权等^[14]通过对青藏铁路沿线多年冻土区研究发现,冻土沉积物吸附气中的烃类气体和冻土地下冰包裹气中的烃类气体均含有相当数量的乙烷及丁烷。这说明在青藏高原多年冻土层的烃类气体中普遍存在乙烷及丁烷等重烃气体,这些重烃气体的存在会使天然气水合物成藏时所需的温压条件有所降低^[14],重烃气体的存在有利于水合物的形成,能够增加水合物稳定带的厚度,有利于水合物大规模赋存成藏。

3 温压及冻土条件

天然气水合物一般形成于低温高压环境,温压控制它的形成与分解,但温度对天然气水合物的影响比压力更为明显,在一定的范围内,温度和压力具互补作用。气体水合物形成并稳定存在的理想温度是0~10℃,压力为10 MPa^[15]。

3.1 温度条件

青藏高原多年冻土层年平均温度-0.5~-3℃^[15],冻土层地温梯度11~33℃/km,冻土层下融土的地温梯度为28~51℃/km^[6]。羌塘盆地大片连续多年冻土是青藏高原多年冻土的主体,年均气温-3.6℃以下^[16],羌塘盆地现今地温梯度仅为15~18℃/km^[17]。冻土层的地温梯度主要影响水合物层的顶界埋深,冻土层之下沉积层地温梯度主要影响水合物层的底界埋深,地温梯度越小,冻土层厚度越大,天然气水合物可以在更深的地质环境中形成。

3.2 压力条件

天然气水合物在一定的压力范围内可保持其稳定性。马更些三角洲冻土区深部岩芯样品的融化固结实验表明,多年冻土能够阻止土体的正常固结过程,多年冻土融化或升温使得融化带和层间融区深度范围内孔隙水压力升高^[18],孔隙水压力高于静水压力会导致气水合物稳定带的厚度增加。水合物形成的相平衡特征显示热成因和生物成因天然气水合物顶界埋深约27~560 m,底界埋深约77~2 070 m,青藏高原多年冻土带热成因天然气比生物成因天然气更有利于形成水合物^[19]。

3.3 冻土厚度

冻土厚度对天然气水合物的形成也起着重要作用,若冻土厚度较薄就无法满足气水合物成藏所需要的压力,同时对下部游离气体的封盖效果也会下降。青藏高原多年冻土层分布广泛,受气候和地形控制,实测冻土厚度为10~175 m^[6],计算厚度可达700 m^[4],发育较厚的多年冻土对天然气水合物的成藏极为有

利。

此外,水合物在初始分解时会因降温而在水合物表面形成一层脱离的冰膜,它可减缓或阻止水合物的进一步分解,使多年冻土层间气水合物处于亚稳定状态,Ershov和Yakushev将这一现象称为气水合物的自保护效应^[20]。水合物的自保护效应可使其对温压条件的要求有所降低,使气水合物可以在更浅的深度内成藏,有利于水合物的成藏。

青藏高原较低的年均气温及地温梯度有效地确保了水合物成藏所需要的温度和冻土厚度,广泛分布的巨厚冻土又保证了气水合物成藏所必须的压力,自保护效应的存在使得气水合物的成藏更加广泛。

4 运移通道及圈闭条件

无论是生物甲烷气,还是深部热解成因气,亦或是二者的混合成因气,都必须通过一定的运移通道才能够进入储集层,进而在圈闭中得以保存,或者直接进入气水合物稳定带,在温压适宜的条件下形成天然气水合物。

4.1 运移通道

青藏高原构造复杂,第四系高原构造活动剧烈,地层产生大量的断层及裂缝通道,并造成不同地区的应力差异,使油气水产生重力分异,从而促使油气在新的通道中进行二次运移。烃类气体沿断层或不整合面,由下部气源高压区向上部低压区侧向运移,或者垂向与侧向联合运移。当富含烃类气体的流体上升进入水合物稳定域之时,若温压适宜,天然气水合物就聚集成藏。青藏高原多年冻土带酸解氢及烃的高值点主要出现于活动断裂带^[21],氢及烃类气体来自地下深处,而活动断裂带就是其有利的运移通道。

地层中的孔隙不仅是烃类气体运移的重要通道,由于孔隙大小与天然气水合物形成过程中需要克服的毛细管作用势能有关,所以其也直接影响水合物的成藏。若孔隙较小,水合物在饱和度大于30%后,胶结沉积物颗粒使沉积孔隙中部分流体被“封闭”,得不到气源的供给而不能进一步生成水合物;若孔隙较大,大部分水合物在孔隙流体中生成,未堵塞流体运移通道,可以保证水合物继续合成。因此连通较好的大中型孔隙不仅是烃类气体重要的运移通道,也是其成藏的重要场所。

4.2 圈闭条件

青藏高原多年冻土区上二叠统、中下三叠统、侏罗系发育大量储集层,尤其是北羌塘盆地不仅储层发育,而且成岩后构造变形较强烈,岩石中构造裂隙发育,其裂隙空间可直接为天然气水合物提供富集成藏

的空间,大大提高了岩层的储集能力^[10]。

青藏高原多年冻土区冻土厚度大,多年冻土渗透性极低,可有效地阻止其下部游离气体向上迁移和聚集,有利于其下部分散沉积物中的天然气在一定深度处聚集和迁移,在温压条件适宜的地方形成天然气水合物,多年冻土层构成了水合物形成时必要的圈闭条件^[12]。另外,在气水合物稳定带内,若水和气源充足,则储集层中的孔隙可能会完全被水合物填满,从而使岩石成为天然气再次运移的非渗透层,即气水合物单独形成圈闭,使大量的气体聚集并最终形成水合物矿藏。

此外,青藏高原因其有利的构造而具有类型丰富的圈闭,如背斜圈闭、古潜山圈闭、断层圈闭、岩性圈闭等,这些圈闭都是天然气水合物可能的成藏场所。

5 结论

青藏高原多年冻土广泛发育,特别是羌塘盆地大片连续分布,是青藏高原冻土的主体,具备天然气水合物成藏的热力学条件;羌塘等盆地沉积巨厚,机质丰富,热演化程度高,具有形成水合物成藏所需的充足天然气来源;青藏高原断层、裂缝、破碎带发育,为深部的天然气向上运移提供了良好的通道,部分裂缝和破碎带还可成为储集空间,多种圈闭发育,这就为天然气的运移、储集和气水合物的形成及保存提供了优越的条件。此外,青藏高原多年冻土层大量重烃气体的存在和水合物的自保护效应对水合物矿藏的形成更为有利。

通过分析青藏高原多年冻土区天然气水合物成藏条件,认为相当厚度的冻土大面积分布,圈闭发育,有下伏或伴生的油气藏、煤系有机质、成熟烃源岩,并且经历过构造运动,断层、裂缝、破碎带等运移通道发育的地区是有利的天然气水合找矿前景区。

参考文献:

- [1] Makogon Y F. Russia's Contributions to the Study of Gas Hydrates[J]. Annals of New York Academy of Sciences, 1994, 715(1): 119-145.
- [2] Collett T S, Dallimore S R. Permafrost-related natural gas hydrate [A]. In: Max M D ed. Natural Gas Hydrate in Oceanic and Permafrost Environments[C]. In: The Netherlands Kluwer Academic Publishers, 2000, 43-60.
- [3] 钱伯章, 朱建芳. 天然气水合物: 巨大的潜在能源[J]. 天然气与石油, 2008, 26(4): 47-52.
- [4] 周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [5] 王 剑, 谭富文, 李亚林, 等. 青藏高原重点沉积盆地油气资源潜力分析[M]. 北京: 地质出版社, 2004.
- [6] 张立新, 徐学祖, 马 巍. 青藏高原多年冻土与天然气水合物[J]. 天然气地球科学, 2001, 12(1-2): 22-26.
- [7] 吴珍汉, 胡道功, 吴中海, 等. 青藏铁路沿线的地裂缝及工程影响[J]. 现代地质, 2005, 19(2): 165-175.
- [8] 史 斗, 郑军卫. 世界天然气水合物研究开发现状和前景[J]. 地球科学进展, 1999, 14(4): 330-339.
- [9] 谭富文, 王 剑, 王小龙, 等. 西藏羌塘盆地——中国油气资源战略选区的首选目标 [J]. 沉积与特提斯地质, 2002, 22(1): 16-21.
- [10] 黄继钧, 伊海生, 林金辉. 羌塘盆地构造特征及油气远景初步分析[J]. 地质科学, 2003, 39(1): 1-10.
- [11] 卢振权, 吴必豪, 祝有海. 南海潜在天然气水合物藏的成因及形成模式初探[J]. 矿床地质, 2002, 21(3): 232-239.
- [12] Abrams M A. Significance of Hydrocarbon Seepage Relative to Petroleum Generation and Entrapment [J]. Marine and Petroleum Geology, 2005, 22(4): 457-477.
- [13] 祝有海, 张永勤, 文怀军, 等. 祁连山冻土区天然气水合物及其基本特征[J]. 地球学报, 2010, 31(1): 7-16.
- [14] 卢振权, Sultan Nabil, 金春爽, 等. 青藏高原多年冻土区天然气水合物形成条件模拟研究[J]. 地球物理学报, 2009, 52(1): 157-168.
- [15] 石 森, 白 冶. 气体水合物的基本特征、形成条件及成因初探[J]. 矿物岩石, 1999, 19(3): 100-104.
- [16] 吴青柏, 蒋观利, 蒲毅彬, 等. 青藏高原天然气水合物的形成与多年冻土的关系[J]. 地质通报, 2006, 25(1-2): 30-33.
- [17] 王岫岩, 云金表, 腾玉洪, 等. 西藏羌塘盆地动力学演化与油气前景分析[J]. 石油学报, 1999, 20(3): 38-42.
- [18] Catthro D S. Specialized Deep Core Testing of Samples From the Cross-delta Transect [C]. In: Dallimore S R, Matthews J V. The Mackenzie Delta Borehole Project. Environmental Studies Research Funds Report 1977, 135.
- [19] 陈多福, 王茂春, 夏 斌. 青藏高原冻土带天然气水合物的形成条件与分布预测 [J]. 地球物理学报, 2005, 48(1): 165-172.
- [20] Dallimore S R, Collett T S. Intrapermafrost Gas Hydrates From a Deep Core Hole in the Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada[J]. Geology, 1995, 23(6): 527-530.
- [21] 坚润堂, 李 峰, 王造成. 青藏高原冻土区活动带天然气水合物异常特征[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2009, 31(2): 13-17.
- [22] Collett T S, Bird K J, Kvenvolden K A, et al. Geological Interrelations Relative to Gas Hydrate with in the North Slope of Alaska [C]. In: US Geological Survey. Open File Report, 1988, 150: 88-389.

rate production. It is found that there is similar structure among the solutions in the three outer boundaries according to the structural similar theory. The study results provide great convenience for well test analysis software preparation and are of significance to theoretical study on oil and gas reservoir seepage law.

KEYWORDS: Homogeneous reservoir; Effective wellhole radius; Variable flow rate; Similar structure; Kernel function

Analysis on Casing Failure Factors in Jilin Oilfield and Prevention Countermeasures

Sun Chao, Wang Jun, Liu Chengshuang (Jilin Oilfield Company Oil Production Technology Research Institute, Songyuan, Jilin, 138000, China) **NGO, 2011, 29 (2):43-47**

ABSTRACT: With unceasingly deepening of Jilin oil field exploration and development and growth of production time, oil well casings in some areas are seriously damaged due to the effects of such factors as long-term water injection development, well bore structure change, poor well completion and well cementation quality, poor casing material quality, corrosion, etc., which has seriously affected the effects of oil field injection and production structure adjustment and water injection development. It can be found through oil field development process that oil well casings are more and more seriously damaged as oil field water injection pressure and stratum pressure are increased. Therefore, carried out is a statistical analysis on such characteristics as distribution, time, type, shape and position of oil field casing failures, put forward are the rules and characteristic of the failures and analyzed are their main effect factors and function mechanism. Proposed are comprehensive supporting technical measures for preventing the failures according to these oil field investigation results, which has important reference value for effective solution of the oil field casing failures.

KEYWORDS: Jilin Oilfield; Casing failure; Cause analysis; Prevention; Countermeasure

Study on Fluid-carrying Model in Natural Gas Well Bore and its Application

Yang Lei, Liu Ning, Liu Hui (Yangtze Petroleum University Engineering Institute, Jingzhou, Hubei, 434023, China)
Wang Huajun (Xi'an Petroleum University Oil Engineering Institute, Xi'an, Shaanxi, 710065, China) **NGO, 2011, 29 (2):48-49**

ABSTRACT: In gas well production, liquid will accumulate in well bottom if gas well output is less than critical output of liquid carried in gas well bore, which will increase back pressure on gas reservoir, especially in low pressure well, it is easy to result in gas well production halts if liquid accumulates in well bore. Since the Twentieth century, established have been a number of models on critical liquid carried in gas well, such as frequently-used Turner model and Minli model. However, differential pressures on upper and lower surfaces of liquid in gas well bore are ignored in gas well production. Now a new model on critical liquid carried in gas well is established according to the above mentioned differential pressures and practicability of the model is test and verified in an example in order to better guide future gas field development.

KEYWORDS: Gas well; Well bore liquid loading; Fluid-carrying model

Study on Accumulation Conditions of Natural Gas Hydrate in Permafrost Regions of Qinghai-Tibet Plateau

Li Weihua, Chen Yongjiao (Key Laboratory on Oil and Gas Resources and Exploration Technology of the Ministry of Education, Yangtze University, Jingzhou, Hubei, 434023, China)
Li Weihua, Chen Yongjiao (Department of Geochemistry, Yangtze University, Jingzhou, Hubei, 434023, China) **NGO, 2011, 29 (2):50-53**

ABSTRACT: Natural gas hydrate is a kind of environment-friendly energy and has a broad development and utilization prospect. Qinghai-Tibet Plateau has a large area distribution of permafrost, numerous mesozoic and cenozoic basins and there are many developed hydrocarbon source rocks in the basins, which provides good conditions for natural gas hydrate formation. Investigated are such accumulation conditions of natural gas hydrate formation in permafrost regions of Qinghai-Tibet Plateau as physical conditions, environmental conditions, thermodynamics conditions and geological conditions and it is considered after the investigation that the organic matters rich in Qinghai-Tibet Plateau stratum and their high maturity are physical conditions of natural gas hydrate accumulation, low temperature, high pressure, large frozen thickness, small temperature gradient, etc. are environmental conditions and thermodynamics conditions for ensuring its accumulation and a lot of migration channels and good entrapment are favorable geological conditions for its accumulation.

KEYWORDS: Natural gas hydrate; Qinghai-Tibet Plateau; Permafrost region; Accumulation condition