祁连山冻土区天然气水合物岩性和分布特征

王平康, 祝有海, 卢振权, 郭星旺, 黄　霞
WANG Ping-kang, ZHU You-hai, LU Zhen-quan, GUO Xing-wang, HUANG Xia

中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037
Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, *China*

摘要: 2008~2009 年实施的"祁连山冻土区天然气水合物科学钻探工程", 已完成 DK-1、DK-2、DK-3 和 DK-4 孔的钻探任务。施工期间多次钻获天然气水合物实物样品, 证实祁连山冻土区存在天然气水合物。祁连山冻土区天然气水合物主要以裂隙型和孔隙型 2 种状态产出。基于天然气水合物存在的 10 个方面的特征, 认为天然气水合物赋存层位主要为中侏罗统江仓组, 产于冻土层之下, 主要储集于 133.0~396.0m 区间, 储集层岩性多以粉砂岩、油页岩、泥岩和细砂岩为主, 含少量中砂岩。钻孔中天然气水合物纵向分布不具有连续性, 钻孔间横向分布规律不明显。岩石质量指标(RQD)统计结果显示, RQD 低值区与天然气水合物储集层段具有较好的一致性, 表明裂缝系统对于该区天然气水合物的分布具有重要的控制作用。

关键词: 天然气水合物; 冻土区; 祁连山; 分布特征; 裂缝系统
中图分类号: P618.13　　**文献标志码**: A　　**文章编号**: 1671-2552(2011)12-1839-12

Wang P K, Zhu Y H, Lu Z Q, Guo X W, Huang X. Gas hydrate in the Qilian Mountain permafrost and its distribution characteristics. *Geological Bulletin of China,* 2011, 30(12):1839-1850

Abstract: The Scientific Drilling Project of Gas Hydrate in Qilian Mountain permafrost, which covered the Juhugeng ore district of the Muli coalfield within Tianjun County, Qinghai Province, was implemented during 2008-2009. Four scientific drilling holes, i.e., DK-1, DK-2, DK-3 and DK-4 had been completed. The gas hydrate samples recovered from drillings have confirmed the existence of gas hydrate in Qilian Mountain permafrost. The drilling results show that "fracture-filling" and "pore-filling" are the main gas hydrate types existent in the permafrost. Based on a study of ten aspects of gas hydrate characteristics, the authors consider that gas hydrates mainly occur in Middle Jurassic Jiangcang Formation and hosted under the permafrost zone in the 133.0~396.0m interval. The reservoir rocks of gas hydrate are composed of siltstone, oil shale, mudstone, fine sandstone and a small amount of medium-grained sandstone. Vertical distribution of gas hydrate does not show continuity in individual holes, and lateral distribution is not apparent. Statistics of Rock Quality Designation Index (RQD)for cores show that the RQD lower value zone together with the gas hydrate reservoir segment has fairly good consistency. It is thus concluded that the fracture system plays an important role in the control of the distribution of gas hydrate in this area.

Key words: gas hydrate; permafrost; Qilian Mountain; distribution characteristics; fracture system

天然气水合物是由分子质量较低的气体（如甲烷、乙烷、丙烷、二氧化碳、氮气等）在一定温压条件下与水形成的一种内含笼形结构的固态类冰状物质。自然界中, 它所包含的气体分子以甲烷为主, 故又称为甲烷水合物。天然气水合物具有巨大的储气能力, 单位体积的天然气水合物在常温常压下可以释放出 150~180 单位体积的天然气[1]。天然气水合物作为一种"非传统"能源, 主要赋存于极区的永冻层、

收稿日期: 2011-08-31; 修订日期: 2011-09-22
资助项目: 国家自然科学基金项目《祁连山冻土区天然气水合物成藏体系中"裂隙型"铁硫化物成因及其指示意义》(批准号: 41102021)、中央级公益性科研院所基本科研业务费项目《祁连山冻土区天然气水合物体系中铁硫化物特征及其意义》(编号: K1005)和中国地质调查局地质调查项目《青藏高原冻土带天然气水合物调查评价》(编号: 1212010818055)
作者简介: 王平康(1982-), 男, 硕士, 研究实习员, 从事沉积学与天然气水合物研究。E-mail: wangpk@cags.ac.cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

陆缘深水海域地层和一些深水湖泊底部沉积物中。一般认为全球天然气水合物中所含的天然气资源量远远超过全球已探明的天然气储量[2]。天然气水合物因能量密度高、分布广、规模大、埋藏浅,被视为21世纪的一种潜在能源。自20世纪60年代前苏联发现世界上第一个天然气水合物矿藏(Messoyakha气田)以来,美国、日本、德国、加拿大、印度、韩国、中国等均已投入巨资进行天然气水合物的调查与开发技术的研发[3-4]。据统计,全球已有220多个天然气水合物矿藏被发现[3]。2002年,加拿大马更些冻土区天然气水合物的成功试开采,给新能源利用带来了曙光。

多年冻土区年平均地温低,可为天然气水合物形成提供适宜的温压条件和良好的圈闭作用。国外研究表明,冻土区天然气水合物主要分布于俄罗斯、美国、加拿大等国的高纬度环北冰洋冻土区[5-8]。中国祁连山冻土区地处青藏高原北缘,以山地多年冻土为主,连续冻土区的年平均地表温度为1.5~-2.4℃,冻土层厚度为50~139m[9]。祝有海等[10]通过分析祁连山木里地区钻孔的气体组分、年平均地表温度、冻土层厚度、地温梯度等数据,认为祁连山木里地区具备形成天然气水合物的温压条件。2008~2009年,在中国地质调查局组织下,中国地质科学院矿产资源研究所、勘探技术研究所和青海煤炭地质105勘探队等单位,在祁连山木里地区实施了"祁连山冻土区天然气水合物科学钻探工程",已完成DK-1、DK-2、DK-3和DK-4孔的钻探任务。施工期间多次钻获天然气水合物实物样品,证实祁连山冻土区存在天然气水合物,使得中国成为第一个在中纬度高山冻土区发现天然气水合物的国家。

与极地多年冻土区相比,祁连山冻土区冻土层较薄,且地处青藏高原北部,长期处于古欧亚大陆的边缘活动带,受构造作用影响明显,加之受储集岩性和成藏气源的影响,该区天然气水合物的产出和分布具有一定的特殊性。本文以岩心观测资料为基础,对DK-1、DK-2、DK-3和DK-4孔天然气水合物的产出状态、赋存层位和储集岩性特征进行总结,探讨裂缝系统对天然气水合物分布的控制作用,为进一步认识该区天然气水合物的分布规律提供依据。

1 区域地质背景

祁连山地处青藏高原北部,主要位于青海、甘肃两省区的毗邻地带,是华北板块西南部的加里东褶皱带,夹于阿拉善、柴达木2个地块之间。其大地构造单元一般划分为北祁连构造带、中祁连陆块和南祁连构造带三大构造单元,3个单元之间及其两侧依次被北祁连北缘、中祁连北缘、中祁连南缘、土尔根达坂山-宗务农山-青海湖南缘4条断裂所分割(图1-A)。震旦纪以来,祁连山先后经历了大陆裂谷阶段(震旦纪—中寒武世)、洋底扩张及沟弧盆体系阶段(晚寒武世—中奥陶世)、造山阶段(中奥陶世之后分别经历了俯冲造山、碰撞造山和陆内造山作用)等演化阶段,形成了现今的地质构造格局[13]。

祁连山木里含煤盆地位于青海省北部高寒地区,青海湖以北、祁连山南麓的狭长区域内,海拔4100~4300m,年平均气温-5.1℃。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,相当一部分地区多年冻土层厚度大于100m[14]。盆地在地质上为北祁连深大断裂体系在燕山期再度复活形成的一个裂堑式断陷盆地,大地构造位置位于中祁连与南祁连2个构造单元间的坳陷区内(图1-A)。由于构造作用和盆地演化,该盆地自下而上发育4套烃源岩系:石炭系暗色泥(灰)岩、下二叠统草地沟组暗色灰岩、上三叠统尕勒得寺组暗色泥岩、侏罗系暗色泥页岩[15],并普遍缺失上白垩统和古近系(图2)。侏罗系含煤岩系是木里煤田主要的勘探开采层位,煤田主体包括聚乎更矿区、弧山矿区、江仓矿区、热水矿区等,呈NWW—SEE向斜列展布。

"祁连山冻土区天然气水合物科学钻探工程"研究区地处青海省天峻县木里镇境内,位于木里煤田聚乎更矿区。矿区总体上为一复式背斜构造,由1个大背斜和2个小向斜组成,其中北向斜分布有三井田、二井田和一露天3个井田,南向斜由四井田、一井田、三露天和二露天组成。天然气水合物钻探区位于南向斜的三露天井田内,出露地层主要包括第四系、中侏罗统和上三叠统(图1-B)。其基底为上三叠统,广泛出露于矿区南北部和背斜轴部,岩性以黑色粉砂岩、泥岩及薄煤层为主,与上覆侏罗系呈平行不整合接触。中侏罗统包括木里组(J_2m)和江仓组(J_2j),大致对应于区域上的窑街组和享堂组[17],下部的木里组又可细分为上下2个岩性段,下段(J_2m^1)为辫状河冲积平原环境,沉积了一套中—粗粒碎屑岩,偶夹薄层炭质泥岩或薄煤层,底部底砾岩发育;上段(J_2m^2)为主含煤层段,为湖泊—沼泽环境的深灰色粉砂岩、细粒砂岩及灰色细—中粒砂岩、粗粒砂岩,夹

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

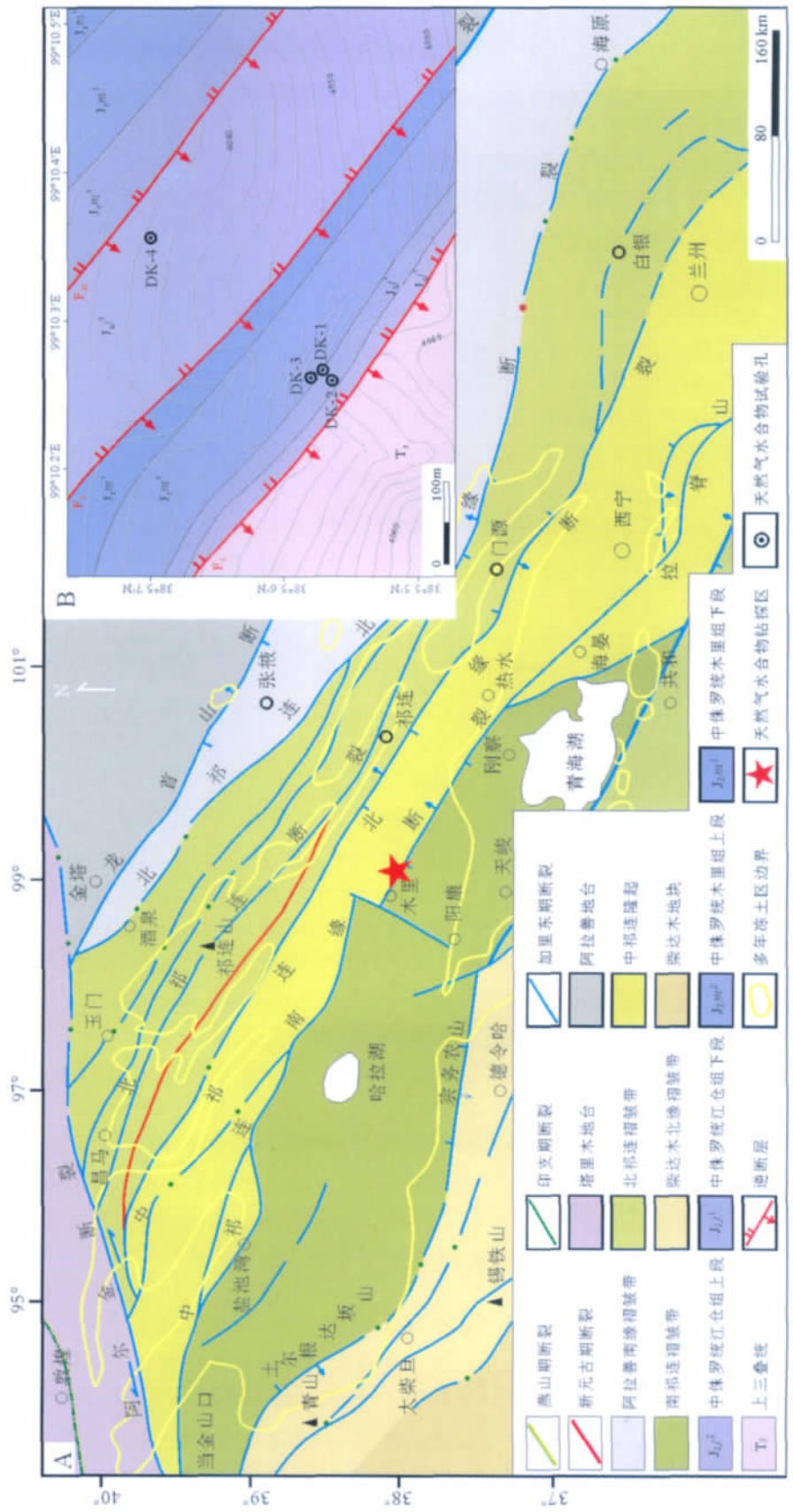


图 1　祁连山冻土区断裂系统、构造分区(A)[11](冻土区范围据参考文献[9])和天然气水合物钻探区地质图(B)[12]

Fig. 1　Fault system and tectonic division of Qilian Mountain permafrost (A), and locations of gas hydrate test boreholes (B)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2层主煤层下$_1$和下$_2$煤层。江仓组按岩性也可细分为上、下2段，其中下段(J_2j^1)为三角洲—湖泊环境的灰色细粒砂岩、中粒砂岩和深灰色泥岩、粉砂岩，含煤2~6层；上段(J_2j^2)为纸片状页岩(含油页岩)段，为一套浅湖—半深湖环境的细碎屑泥岩、粉砂岩，夹灰色粉砂岩及透镜状菱铁矿层。第四系在钻探区内广泛分布，为冲积、洪积成因的腐殖土、砂、砾石，坡积的角砾，冰积的泥砂、冰层、漂砾等。

2 天然气水合物科学钻探试验孔的岩性特征

2008~2009年度，项目组先后在祁连山冻土区木里煤田聚乎更矿区三露天井区南侧逆冲推覆断裂带附近实施了“天然气水合物科学钻探工程”，已完成DK-1、DK-2、DK-3和DK-4孔的钻探任务，地理位置见图1-B，钻遇地层自上而下有第四系、中侏罗统江仓组和木里组。4个孔钻获的岩性主要包括第四纪沉积物和中侏罗统煤、油页岩、泥岩(含炭质泥岩)、粉砂岩、中砂岩和粗砂岩(表1)。其中DK-1孔以粉砂岩、泥岩(含炭质泥岩)和细砂岩为主，含煤9层(单层厚0.40~3.65m)；DK-2孔以油页岩、泥岩、粉砂岩和细砂岩为主，含煤18层(单层厚0.12~11.10m)；DK-3孔以泥岩、粉砂岩和油页岩为主，含煤21层(单层厚0.15~8.90m)；DK-4孔以粉砂岩、细砂岩、泥岩和粗砂岩为主，含煤13层(单层厚0.20~9.60m)。根据岩心编录资料绘制出4个钻孔的岩性柱状图(图3)。

4个钻孔同处于聚乎更矿区南向斜翼部，由于不同级次的逆冲断层发育，岩性在某些层位增厚或减薄，岩性层位划分和横向对比较难。但木里组上段为一套湖泊—沼泽相沉积，江仓组下段为一套三角洲—湖泊相沉积，因而可以根据岩相的变化对钻孔地层进行组的划分(图3)。

3 天然气水合物分布特征

3.1 天然气水合物产出状态和特征

根据现场观测，天然气水合物在岩心中的产出状态有2种。一是以薄层状、片状、团块状赋存于粉砂岩、泥岩和油页岩的裂隙面中，单层仅仅数毫米厚，肉眼能观测到的均是这类水合物，属“裂隙型天然气水合物”(图版Ⅰ-1、2)；一是以浸染状赋存于细粉砂岩、中砂岩的孔隙中，这类水合物肉眼难以观测到，但可通过岩心中不断冒出的气泡、水珠和红外热像仪(FLIE T200型)测温出现分散状低温异常等特征来间接地推测这类水合物，属“孔隙型天然气水合物”(图版Ⅰ-3、4)。

肉眼所观测到的裂隙型天然气水合物样品多呈白色、乳白色，有时因泥浆污染呈土黄色，点火直接燃烧，且持续时间较长(1min以上)，烧尽后不留任何痕迹。天然气水合物是在高压低温条件下形成的，当岩心被取出后，温度升高，压力降低，就会促使天然气水合物分解。此分解是一个吸热过程，以甲烷水合物($CH_4\cdot nH_2O\rightarrow CH_4+nH_2O$)分解为例，当温度$T>273K$时，分解所需热量值为54.2±0.3kJ/mole[3,18]，会使其分布区和围岩温度明显降低。利用红外热像仪对含天然气水合物的岩心进行测温显示出明显的低温异常，含裂隙型天然气水合物时多呈线状、条带状低温，而含孔隙型天然气水合物时则呈现分散状低温，温差多在4℃左右。天然气水合物分解时会生成水和烃类气体，将含天然气水合物的岩心擦干后，表面会不断有水珠渗出；利用瓦斯解析仪对含天然气水合物的岩心(长约10cm，直径约10.8cm)进行气体解析，24h内共解析出超过150mL的气体；将此类岩心置于水中时，剧烈冒泡，且伴有嗤嗤声。当含天然气水合物的岩心放置一段时间后，表面显现蜂窝状构造，为气体释放后所残留下的空腔。天然气水合物分解会发生一系列的化学反应(表2)。方解石和黄铁矿是2种主要的自生矿物，伴随裂隙型天然气水合物的分解，裂隙空间逐渐变大，为自生矿物的形成和生长提供了一定的空间，使得矿物晶形普遍较完好。钻探所获岩心显示，在含天然气水合物层段这2种矿物主要以裂隙充填为主，且晶形较完好。激光拉曼光谱仪可检测出天然气水合物所含水(或冰)的结构峰和烃类气体的特征峰。现场采获的天然气水合物样品经液氮保存后，经青岛海洋地质研究所inVia型激光拉曼光谱仪检测，显示出典型的天然气水合物拉曼光谱曲线，从分子结构方面证实所获样品确为天然气水合物。天然气水合物的物理性质与冰略有相似，可使储集岩电阻率和声波速率增大，国外研究也表明，地球物理测井中电阻率和声波速度增大能对天然气水合物层起到一定的指示作用。4个钻孔的测井结果分析也表明，电阻率和声波速度增大的区段与天然气水合物赋存层具有一定的对应关系。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　祁连山冻土区天然气水合物科学钻探试验孔岩性组成

Table 1　Lithologic combination of gas hydrate scientific drilling test boreholes in Qilian Mountain permafrost

孔号	孔深/m	岩性厚度百分比/%							
		第四纪沉积物	煤	油页岩	泥岩	粉砂岩	细砂岩	中砂岩	粗砂岩	细砾岩
DK-1	182.25	2.63	7.87	5.43	15.18	48.42	14.93	0.82	4.72	—
DK-2	645.22	1.12	7.72	33.10	21.30	12.65	10.37	8.78	4.67	0.29
DK-3	765.01	0.71	5.81	13.01	37.63	19.76	8.67	6.27	5.32	2.82
DK-4	466.65	3.53	6.88	0.34	14.15	46.86	14.50	2.55	11.19	—

综合以上现场观测、室内测试分析和地球物理测井结果,归纳出天然气水合物存在的 10 个方面的特征,并对相关现象进行了解释(表 2)。

3.2　天然气水合物赋存层位

依据天然气水合物存在的 10 个方面的特征,分别标定出 4 个钻孔天然气水合物赋存的层位(图 3、表 3)。DK-1 孔共钻获 3 层天然气水合物,分别位于 133.5~135.5m、142.9~147.7m 和 165.3~165.5m 井段,在 169.0~170.5m 井段发现高电阻率、高波速标志和高压气体异常,推测也可能有天然气水合物,但因岩心破碎和塌孔事故未能获取实物样品。DK-2 孔共钻获 3 层天然气水合物,分别位于 144.4~152.0m、152.3~156.6m、235.0~291.3m 井段,377.3~387.5m 井段岩心表面强烈冒泡并出现热红外低温,推测是天然气水合物分解吸热导致局部低温。DK-3 孔共钻获 2 层天然气水合物,分别位于 133.0~156.0m 和 225.1~240.0m 井段,367.7~396.0m 井段岩心表面强烈冒泡,擦干岩心后,表面有水珠渗出并局部出现热红外低温,推测可能存在天然气水合物。DK-4 孔虽未钻获到天然气水合物样品,但在 115.0~150.0m 井段除岩心表面冒泡强烈外,钻孔还存在强烈气涌,井口点火能持续燃烧数分钟;在 162.0~163.0 井段,岩心局部还具有热红外低温异常,据此推断该孔可能也存在天然气水合物,强烈气

表 2　祁连山冻土区天然气水合物的特征和现象解释

Table 2　Characteristics and interpretation of gas hydrate in Qilian Mountain permafrost

天然气水合物存在的特征	现象解释
白色、乳白色晶体,偶见土黄色	为一种固态类冰状物质,常呈白、乳白色,有时因泥浆污染呈土黄色
点火直接燃烧	遇火即能燃烧,俗称“可燃冰”
红外测温呈现低温异常	天然气水合物分解是一个吸热过程,会使分布区与围岩温度明显偏低
岩心擦干后表面不断有水珠渗出	天然气水合物是由水分子和气体分子在低温高压条件下形成的,当岩心被取出后,由于温度升高、压力降低,天然气水合物开始分解,岩心表面不断渗出的水珠是天然气水合物分解后的产物之一
岩心可解析出大量气体	单位体积的天然气水合物在常温常压下,可以释放出 150~180 单位体积的天然气
岩心置于水中会剧烈冒泡	天然气水合物分解后会释放出大量气体,置于水中则产生大量气泡
岩心见蜂窝状构造	天然气水合物分解过程中所形成的一种逸气构造
见晶型完好的方解石和黄铁矿	天然气水合物分解过程中会发生以下反应: $CH_4 \cdot nH_2O \rightarrow CH_4 + nH_2O$　$CH_4 + 2O_2 \rightarrow 2H_2O + CO_2$ $CH_4 + CO_2 + SO_4^{2-} \rightarrow 2HCO_3^- + H_2S$ $CaAl_2Si_2O_8 + 2CO_2 + H_2O \rightarrow Ca^{2+} + 2HCO_3^- + Al_2O_3 + 2SiO_2$ $Ca^{2+} + 2HCO_3^- \rightarrow CaCO_3$(方解石)$+ H_2O + CO_2$ $2Fe^{3+} + 2H_2S \rightarrow Fe^{2+} + FeS_2$(黄铁矿)$+ 4H^+$
具水合物拉曼光谱曲线	天然气水合物是由水分子和烃类气体分子组成的,用激光拉曼光谱仪可检测其所含水(或冰)的结构峰和烃类气体的特征峰
测井具高电阻率和高波速	天然气水合物物理性质与冰相似,会使储集岩电阻率和声波速率增大

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

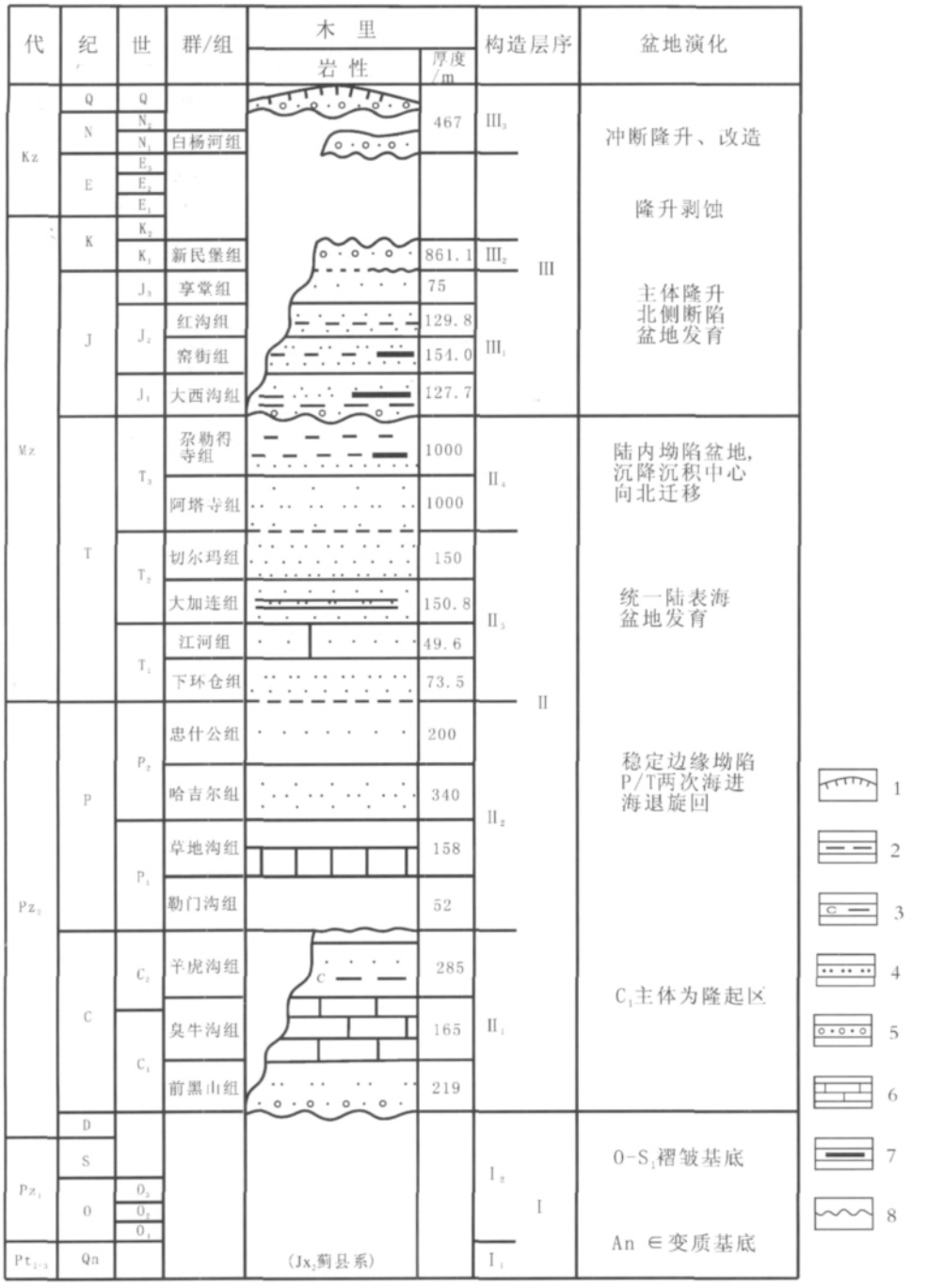


图 2 木里含煤盆地构造层序与盆地演化[16]

Fig. 2 Tectonic sequence and basin evolution of Muli coal-bearing basin

1—第四纪沉积物;2—泥岩;3—炭质泥岩;4—砂岩;5—含砾砂岩;6—灰岩;7—含煤层;8—不整合面

Ⅰ—前寒武纪变质基底与奥陶系—志留系褶皱基底构成的复合基底;Ⅱ—稳定边缘坳陷或统一陆表海盆地环境沉积产物;Ⅲ—残留盆地沉积

涌可能是天然气水合物分解释放出大量气体所致。

从天然气水合物在 4 个钻孔中的赋存层位来看,天然气水合物纵向分布不具有连续性,横向分布规律不明显,仅有 DK-2 和 DK-3 孔天然气水合物赋存层位相近,但含天然气水合物层的厚度不一。根据各孔中天然气水合物首次出现和异常结束的深度

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

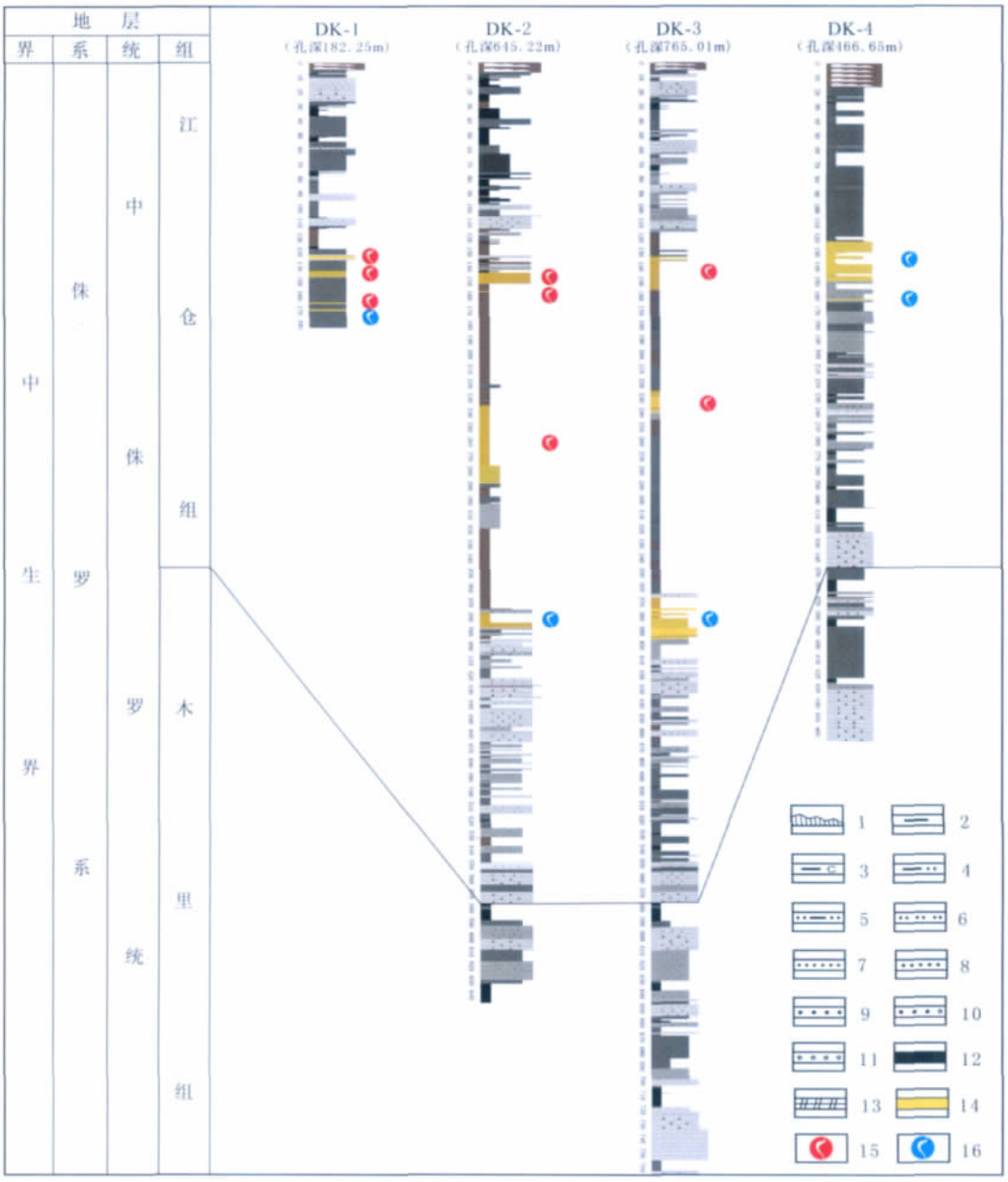


图 3　祁连山天然气水合物各孔岩性柱状图和天然气水合物赋存层位

Fig. 3　Lithologic column of gas hydrate in the boreholes and gas hydrate-bearing horizons in Qilian Mountain permafrost

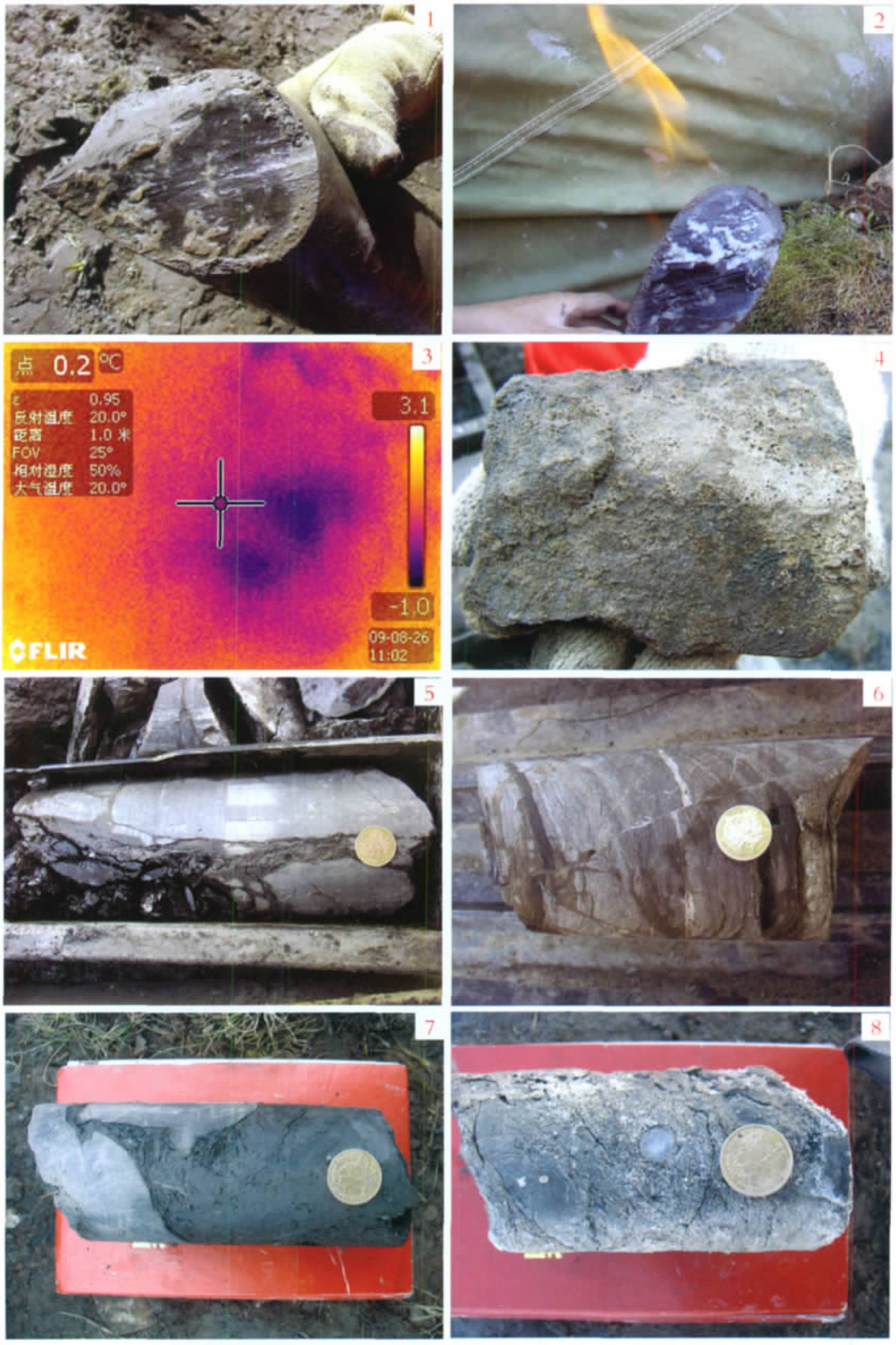
1—第四纪沉积物;2—泥岩;3—炭质泥岩;4—粉砂质泥岩;5—泥质粉砂岩;6—粉砂岩;7—细砂岩;8—中砂岩;9—粗砂岩;10—含砾粗砂岩;11—细砾岩;12—煤;13—油页岩;14—天然气水合物赋存层;15—含天然气水合物晶体;16—见天然气水合物异常

推知，天然气水合物储集层主要介于 133.0~396.0m 深度区间,属中侏罗统江仓组。对 DK-1、DK-2 和 DK-3 孔的简易测温结果显示,钻探区冻土层厚度约为 95m，表明该区钻获的天然气水合物均位于冻土层之下，冻土层内未见天然气水合物及其异常标志。

3.3　天然气水合物储集岩性特征

钻探结果显示，天然气水合物主要的储集岩性为细砂岩、粉砂岩、泥岩、油页岩及少量中砂岩。在中砂岩、细砂岩和粉砂岩段天然气水合物主要赋存于岩石孔隙和裂隙中，在泥岩和油页岩段则赋存于岩石裂隙中(表 2)。由此可见,天然气水合物

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



1、2—裂隙型天然气水合物及点火燃烧现象(DK-3 孔，产出深度 139.53m)；3—含天然气水合物的岩心经红外热像仪测温后显示出明显的分散状低温异常(DK-3 孔，产出深度 133.3m)；4—天然气水合物分散后在岩心上残留蜂窝状构造(DK-2 孔，产出深度 145.0m)；5—粉砂岩发育断层泥(DK-3 孔，深度 96.50m)；6—粉砂岩中发育断层(DK-3 孔，深度 100.50m)；7—泥岩中发育断层泥(DK-3 孔，深度 258.48m)；8—断层泥中含砾石(DK-3 孔，深度 741.37m)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 3 祁连山冻土区科学钻探试验孔天然气水合物赋存层段的特征和储集层段岩性厚度百分比

Table 3 Characteristics of gas hydrate-bearing horizons and percentage of the thicknesses of various types of rocks in the gas hydrate reservoir section from gas hydrate scientific drilling test boreholes in Qilian Mountain permafrost

孔号	水合物存在层段/m	主要储集岩性	水合物产状	储集岩性特征	水合物储集层段/m	储集层段各岩性厚度百分比/%				
						中砂岩	细砂岩	粉砂岩	泥岩	油页岩
DK-1	133.5~135.5	细砂岩	裂隙+孔隙	灰—灰白色，以石英为主，次为高岭土化长石，坚硬，局部岩心较破碎	133.5~170.5	—	5.68	94.32	—	—
	142.9~147.7	泥质粉砂岩	裂隙	灰—深灰—黑灰色，裂隙发育，半坚硬，岩心破碎						
	165.3~165.5	含泥粉砂岩	裂隙+孔隙	深灰—黑灰色，裂隙发育，半坚硬，破碎						
	169.0~170.5	粉砂岩	裂隙+孔隙	深灰色—灰色，裂隙发育，半坚硬，岩心破碎						
DK-2	144.4~152.0	中砂岩、细砂岩	裂隙+孔隙	深灰—灰褐色，以石英为主，次为长石，局部岩心破碎，泥化，且裂隙发育	144.4~387.5	4.07	1.62	0.21	16.29	77.81
	156.3~156.6	油页岩	裂隙	黑褐色，裂隙发育						
	235.0~291.3	油页岩、泥岩	裂隙	褐—灰黑色，局部裂隙发育						
	377.3~387.5	中砂岩	孔隙	灰—灰白色，以石英为主，次为长石，含大量炭屑，坚硬，局部裂隙发育，岩心破碎						
DK-3	133.0~156.0	油页岩、泥岩	裂隙	灰褐—黑褐色，裂隙非常发育，局部岩心破碎	133.0~396.0	0.53	3.75	4.70	60.86	30.17
	225.1~240.0	油页岩、泥岩	裂隙	灰—深灰色，裂隙发育，局部岩心破碎						
	367.7~396.0	细砂岩、粉砂岩	孔隙+裂隙	灰白—褐灰色，石英为主，长石次之，并含少量炭屑，局部裂隙发育，岩心较破碎						
DK-4	115.0~150.0	泥岩、粉砂岩、细砂岩	孔隙+裂隙	浅灰—灰—深灰色，以石英为主，高岭土化长石次之，含云母碎屑、炭屑、植物叶片化石及煤屑，局部含黄铁矿结核，坚硬—半坚硬，裂隙发育，岩心破碎	115.0~163.0	—	48.13	23.75	28.12	—
	162.0~163.0	粉砂岩	孔隙	灰色，夹煤线及泥岩薄层，半坚硬						

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的产出状态在很大程度上受控于岩性特征和裂缝系统。现就各孔天然气水合物储集层的岩性和地质特征详述如下。

在 DK-1 孔的 133.5~135.5m 层段中,岩性为灰白色细砂岩,矿物成分以石英为主,次为高岭土化长石,中厚层状,坚硬,局部岩心较破碎,天然气水合物以“裂隙型”和“孔隙型”产出。在 142.9~147.7m 层段中,岩性为灰色、深灰色、黑灰色粉砂岩、泥岩,中厚层状,裂隙发育,半坚硬,较破碎,天然气水合物主要以“裂隙型”产出。在 165.3~165.5m 层段中,岩性为深灰色、黑灰色粉砂岩,含一定泥质,裂隙发育,半坚硬,岩心破碎,天然气水合物以“裂隙型”和“孔隙型”产出。在 169.0~170.5m 层段中,岩性为深灰色、灰色粉砂岩,中厚层状,裂隙发育,半坚硬,岩心破碎,岩石裂隙和孔隙中见天然气水合物异常。

在 DK-2 孔的 144.4~152.0m 层段中,岩性为中砂岩与细砂岩互层产出,中砂岩呈灰褐色,以石英为主,次为长石,岩心局部破碎,裂隙发育一般,细砂岩呈浅灰褐色,成分以石英为主,次为长石,岩心较破碎,局部泥化,裂隙发育,天然气水合物以“裂隙型”和“孔隙型”产出。在 156.3~156.6m 层段中,岩性为黑褐色油页岩,岩心裂隙发育,平均每厘米宽度内可见 6~8 条裂隙,裂隙宽 0.5~1.0mm,天然气水合物以“裂隙型”产出。在 235.0~291.3m 层段中,岩性以泥岩、油页岩为主,粉砂质泥岩为油页岩夹层,油页岩呈黑褐色,局部炭质含量高,裂隙发育,充填有方解石,局部见黄铁矿(结核状、薄膜状);泥岩呈深灰色,局部粉砂质含量高,断面见云母碎屑,裂隙较为发育,并充填方解石,天然气水合物主要以“裂隙型”产出。在 377.3~387.5m 层段中,岩性主要以油页岩和中砂岩为主,油页岩呈黑褐色,局部炭质含量高,页理发育,较破碎,局部夹粉砂岩,中砂岩呈灰色、灰白色,成分以石英为主,含大量炭屑,岩心坚硬,局部裂隙发育,且岩心破碎,岩石裂隙和孔隙中见天然气水合物异常。

在 DK-3 孔的 133.0~156.0m 层段中,上部为粉砂质泥岩与油页岩互层,下部为泥岩与油页岩互层,油页岩呈褐色、黑褐色,泥岩呈灰褐—黑褐色,含钙质细纹层,裂隙非常发育,局部岩心破碎,天然气水合物主要以“裂隙型”产出。在 225.1~240.0m 层段中,泥岩与油页岩互层产出,泥岩呈灰色,钙质含量高,发育碳酸盐细纹层,裂隙发育,局部破碎,油页岩呈浅褐色,破碎且呈碎片状,天然气水合物多以“裂隙型”产出。在 367.7~396.0m 层段中,顶部夹泥质粉砂岩及泥岩薄层,呈塑性,裂隙发育,局部见断层错动现象;上部为细砂岩,呈灰白色,局部裂隙发育,充填物为滑石,发育平行层理,局部见波状层理;中部为砂岩,呈灰色,局部夹粗砂岩,成分以石英为主,长石次之,含少量炭屑,岩心具油浸现象,裂隙发育;下部为粉砂岩,呈浅灰色、灰色,较破碎,岩石孔隙和裂隙中见天然气水合物异常。

在 DK-4 孔的 115.0~150.0m 层段中,粉砂岩、泥岩、细砂岩互层产出,粉砂岩呈深灰色,薄层状,具平行层理,层理面含云母碎屑、少量植物叶片化石及煤屑,局部含黄铁矿结核,半坚硬,岩心破碎;泥岩呈灰色、深灰色,含炭屑,具滑面,较松软;细砂岩呈浅灰色,厚层状,成分以石英为主,高岭土化长石次之,断面含云母碎屑及炭屑,局部具波状层理,裂隙发育,充填物为方解石,坚硬—半坚硬,岩石裂隙和孔隙中见天然气水合物异常。在 162.0~163.0m 层段中,岩性为粉砂岩,呈灰色,夹煤线及泥岩薄层,薄层状,具波状层理,层理面含云母碎屑,具滑面,半坚硬,天然气水合物异常主要见于岩石孔隙中。

通过对各钻孔天然气水合物储集层段中各类岩性厚度百分比的统计(表 2,图 4)可以看出,DK-1 孔储集岩段主要以粉砂岩为主(占 94.32%)及少量细砂岩;DK-2 孔以油页岩和泥岩为主(分别占 77.81%和 16.29%)及少量中砂岩、细砂岩和粉砂岩;DK-3 孔以泥岩和油页岩为主(分别占 60.86%和 30.17%)及少量粉砂岩和细砂岩;DK-4 孔以细砂岩、泥岩和粉砂岩为主(分别占 48.13%、28.12%和23.75%)。天然气水合物的形成除必须具有特定的温压条件外,还要求储集岩具有一定的储集空间和烃类气体扩散或渗透的通道。泥岩和油页岩是由颗粒很细的碎屑岩(颗粒直径小于 0.05mm)组成的致密岩石,岩石本身渗透性极差,没有任何储集和渗透能力,因此天然气水合物仅能储存于岩石发育的各类裂缝(层间缝、构造缝、成岩缝等)中,即形成裂隙型天然气水合物。粉砂岩、细砂岩和中砂岩的储集性则主要跟储集岩孔隙类型、孔隙度和渗透率有关,易于形成孔隙型天然气水合物,但当泥质(如泥质粉砂岩)含量高时,孔隙度、渗透率及饱和度会降低,进而岩石储集性降低。图 4 表明,该钻探区天然气水合物主要储集层段(133.0~396.0m)岩性总体以粉砂岩、油页岩、泥

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

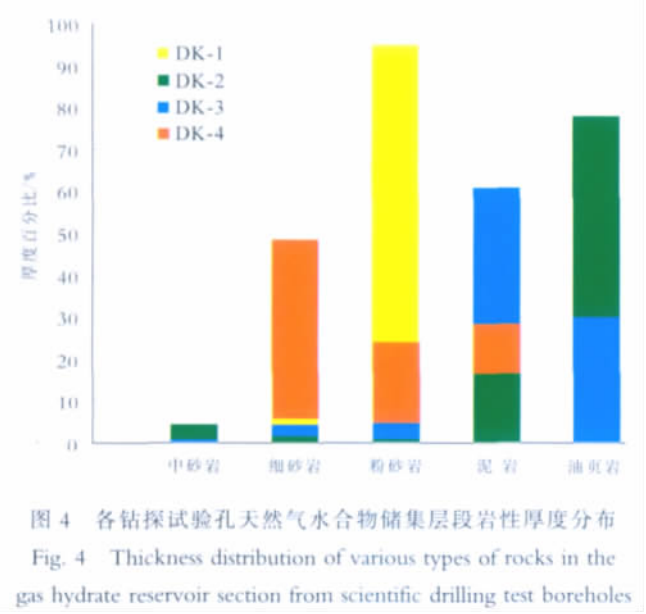


图 4　各钻探试验孔天然气水合物储集层段岩性厚度分布

Fig. 4　Thickness distribution of various types of rocks in the gas hydrate reservoir section from scientific drilling test boreholes

岩和细砂岩为主,多属致密型岩石类型,含少量中砂岩。致密的岩石类型和较为发育的裂隙,共同决定了钻探区天然气水合物的赋存类型主要以裂隙型天然气水合物为主,孔隙型天然气水合物次之。

3.4　裂缝系统对天然气水合物分布的控制

4 个天然气水合物科学试验孔均位于聚乎更复式背斜的南向斜翼部,且介于 3 条主要断裂带 F_1、F_2 和 F_{25} 间(图 1-B)。3 条断层均为北西西向的区域性逆冲断层,断裂面向南西倾斜,F_1 和 F_2 倾角 70°,F_{25} 倾角 50~60°。由于断层作用的影响,4 个钻孔局部岩心较为破碎,不同深度均见有断层发育(图版 Ⅰ-5~8)。断裂作用使岩石产生一系列不同规模的裂缝(裂隙),为深部烃类气体向上运移提供了通道,为天然气水合物的形成提供了主要的储集空间。

在工程地质中,经常利用岩石质量指标(RQD)来评价裂隙型岩石的质量,RQD 是反映岩石完整程度的一项重要指标[19]。常用的 RQD 统计方法有回次统计法和孔段统计法。回次统计法是指在取出的岩心中,计算长度大于 10cm 的柱状岩心长度与本回次进尺的百分比。孔段统计法是根据整个钻孔岩心的完整程度,结合岩心采取率,把完整程度基本类似的岩心划分在同一个孔段进行统计。研究表明,孔段统计法与回次统计法相比,前者的结果与裂隙统计法所得结果较一致[20],因此孔段统计法能在一定程度上反映岩石的裂隙发育程度。RQD 值越大,表明岩石受断层效应的影响越小,裂隙发育程度越

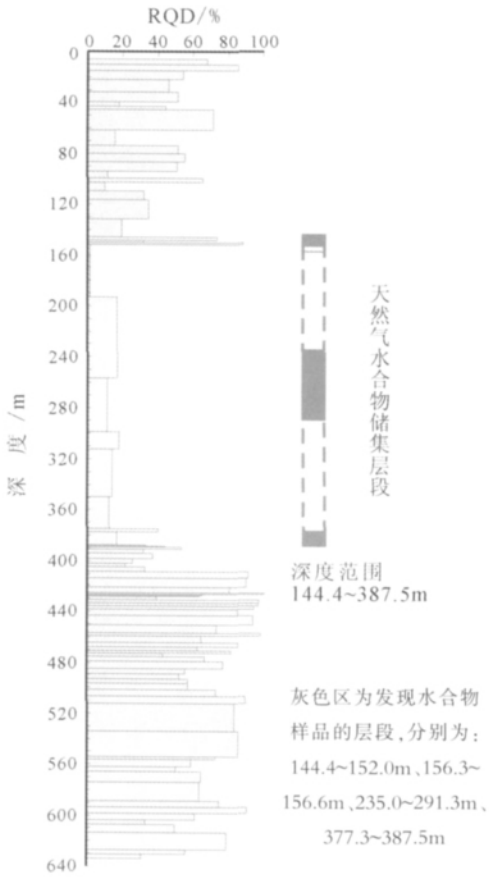


图 5　RQD 值随深度的变化及其与天然气水合物储集层段的对应关系(以 DK-2 孔为例)

Fig. 5　Variation of RQD value with depth in relation to the gas hydrate reservoir section

低,钻获的岩心越完整。相反,RQD 值越小,表明岩石受断层效应影响较大,裂隙发育程度越高,钻获的岩心则越不完整。因而,在天然气水合物科学钻探试验孔岩心编录过程中,采用孔段统计法结合岩性分层对 4 个钻孔的 RQD 进行统计,即计算每一岩性分层中长度大于 10cm 的柱状岩心长度与该分层厚度的百分比。统计结果表明,RQD 低值区间正好与天然气水合物储集层段相对应,具有较好的一致性(图 5),说明裂隙发育的层段易于储集天然气水合物。

由此可见,在具有适宜的天然气水合物形成的温压条件、充足的烃类气体来源的情况下,裂缝系统对该区天然气水合物分布具有重要的控制作用。裂缝系统不仅能为深部的烃类气体向上运移提供通道,而且还是天然气水合物形成的主要储集空间。因此,进一步加强裂缝系统的精细研究,如精细岩心裂

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

缝的识别、表征和裂缝的测井响应等,将有助于更好地认识天然气水合物的分布规律。

4 结 论

(1)"祁连山冻土区天然气水合物科学钻探工程"在木里地区成功钻获天然气水合物实物样品,证实祁连山冻土区存在天然气水合物,中国成为第一个在中纬度高山冻土区发现天然气水合物的国家。

(2)祁连山冻土区天然气水合物钻探结果显示,天然气水合物主要以裂隙型和孔隙型2种状态产出,赋存层位主要为中侏罗统江仓组,产于冻土层之下,主要储集层段为133.0~396.0m区间。钻孔中天然气水合物纵向分布不具连续性,钻孔间横向分布规律不明显,仅DK-2和DK-3孔天然气水合物赋存层位相近,但含天然气水合物层的厚度不一。

(3)天然气水合物储集层段主要以粉砂岩、油页岩、泥岩和细砂岩为主,多属致密型岩石类型,受多期构造运动和断层系统的影响,岩石裂缝较为发育,"裂隙型天然气水合物"为该区天然气水合物最主要的赋存类型。岩心RQD值统计结果显示,RQD低值区间与天然气水合物储集层段具有较好的一致性,表明裂隙发育的层段天然气水合物易于储集,裂缝系统对天然气水合物的分布具有重要的控制作用。因此,进一步加强裂缝系统的精细研究将有助于更好地认识天然气水合物的分布规律。

参考文献

[1]Collett T S, Lee M W, Agena W F, et al. Permafrost Associated Natural Gas Hydrate Occurrences on the Alaska North Slope[J]. Marine and Petroleum Geology, 2011, 28: 279-294.

[2]Collett T S, Dallimore S R. Detailed analysis of gas hydrate induced drilling and production hazards[C]//Proceedings of the Fourth International Conference on Gas Hydrates.Yokohama, Japan, 2002: 47-52.

[3]Makogon Y F, Holditch S A, Makogon T Y. Natural gas-hydrates—A potential energy source for the 21st Century[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2007, 56: 14-31.

[4]张洪涛,张海启,祝有海. 中国天然气水合物调查研究现状及其进展[J]. 中国地质,2007, 34(6):953-961.

[5]Collett T S. Permafrost-associated gas hydrate accumulations[C]//Sloan E D, Happer J, Hnatow M. International Conference on Natural Gas Hydrates. Annals of the New York Academy of Science, 1993, 715: 247-269.

[6]Collett T S, Dallimore S R. Permafrost-related natural gas hydrate[C]//Max M D. Natural Gas Hydrate in Oceanic and Permafrost Environments. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2000: 43-60.

[7]Dallimore S R, Collett T S. Regional gas hydrate occurrences, permafrost conditions, and Cenozoic geology, Mackenzie Delta area[C]//Dallimore S R, Uchida T, Collett T S,ed. Scientific Results from JAPEX/JNOC/GSC Mallik 2L-38 Gas Hydrate Research Well, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. Geological Survey of Canada, Bulletin, 1999, 544: 31-43.

[8]Dallimore S R, Collett T S. Summary and implication of the Mallik 2002 gas hydrate production research well program[M]//Dallimore S R, Collett T S. Scientific Results from the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Research Well Program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. Geological Survey of Canada, Bulletin, 2005, 585: 1-36.

[9]周幼吾,郭东信,邱国庆,等. 中国冻土[M]. 北京:科学出版社,2000.

[10]祝有海,刘亚玲,张永勤. 祁连山多年冻土区天然气水合物的形成条件[J]. 地质通报,2006,25(1/2):58-63.

[11]《中国地质图集》编委会.中国地质图集[M]. 北京:地质出版社,2002.

[12]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.

[13]冯益民. 祁连造山带研究概况——历史、现状及展望[J]. 地球科学进展,1997,12(4):307-314.

[14]潘语录,田贵发,栾安辉,等. 测井方法在青海木里煤田冻土研究中的应用[J]. 中国煤炭地质,2008,20(12):7-9.

[15]符俊辉,周立发. 南祁连盆地石炭—侏罗纪地层区划及石油地质特征[J]. 西北地质科学,1998,19(2):47-54.

[16]何登发. 中国西北地区沉积盆地动力学演化与含油气系统旋回[M]. 北京:石油工业出版社,1999.

[17]青海省地质矿产局. 青海省岩石地层[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1997.

[18]Handa Y P, Tse J S. Thermodynamic properties of empty lattices of structure I and structure II clathrate hydrates[J]. J. Phys. Chem., 1986, 90: 5917-5921.

[19]Deere D U, Miller R P. Engineering classification and index properties of rock[R]. Technical Report No. AFNL-TR-65-116, Albuquerque, NM: Air Force Weapons Laboratory, 1996.

[20]罗长保,郑文晓. 浅谈岩石质量指标(RQD)的统计方法[J]. 江西水利科技,2004,30(5):21-27.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net