

基于声波测井的冻土区孔隙型水合物储层水合物饱和度估算方法

肖昆¹⁾, 邹长春²⁾, 卢振权³⁾, 李红星¹⁾, 秦臻¹⁾, 葛坤朋¹⁾

1) 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 南昌, 330013;

2) 中国地质大学(北京) 地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室, 北京, 100083;

3) 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京, 100029

内容提要:水合物饱和度参数的准确计算对于水合物资源量的评价至关重要。本文提出利用超声波测井资料与等效介质模型相结合的方法, 可有效评价祁连山冻土区孔隙型水合物储层水合物饱和度变化特征, 并在典型孔隙型水合物钻孔 DKXX-13 进行了应用。基于等效介质理论的弹性波速度模型正演模拟的纵波速度相比基于双相介质理论的弹性波速度模型更加吻合实际测井纵波速度, 可用于分析孔隙型水合物储层的纵波速度特征; 通过正演模拟的纵波速度与实际测井纵波速度的对比, 识别出 X30.0~X30.2m、X30.3~X30.4m、X31.1~X31.6m、X31.7~X31.9m、X32.0~X32.2m 井段存在水合物, 水合物赋存井段地层的水合物饱和度变化范围为 13.0%~85.0%, 平均值为 61.9%, 与标准阿尔奇公式估算结果和现场岩芯测试结果基本一致。研究结果可为祁连山冻土区水合物地层测井评价与地震勘探提供理论依据和技术支撑。

关键词:祁连山冻土区; 孔隙型水合物; 超声波成像测井; 等效介质理论; 水合物饱和度

水合物是由水分子和天然气(通常以甲烷为主)构成的笼型结构固态晶体, 主要赋存于海底和极地永冻土中(Sloan, 1998)。在陆地, 水合物赋存于地下 200~2000m 的永冻土地区; 在大洋, 水合物赋存于 300~3000m 的深水盆地、陆架坡折带等水合物稳定域内(Shi Dou et al., 1992; Wang Xiujuan et al., 2010)。水合物作为一种储量巨大、洁净的新型替代能源而受到普遍关注, 目前世界上已经在 100 多个地区间接或直接发现了水合物赋存区(Zhao Xingmin et al., 2011; Lu Zhenquan et al., 2013a)。中国于 2008 年 11 月在祁连山冻土区钻获水合物样品(Zhu Youhai et al., 2010a; Lu Zhenquan et al., 2011; Han Jianguang et al., 2016), 这是中国冻土区首次钻获并检测出水合物实物样品, 也是世界上第一次在中纬度高原冻土区发现水合物(Zhu Youhai et al., 2011)。

祁连山冻土区发现的水合物具有冻土层薄、埋深较浅、气体组分复杂、横向分布连续性较差等显著特点, 不同于国外极地冻土区发现的水合物, 应为一种新类型水合物(Zhu Youhai et al., 2010a)。因此, 我国陆域冻土区水合物勘探有其自身特殊性, 相比国外极地冻土区水合物勘探更为困难。近年来, 中国地质调查局在青海省天峻县木里煤田组织实施了水合物专项调查研究, 开展了综合地球物理勘查工作, 以期建立切合中国实际的陆域冻土区水合物地球物理探测技术、资源综合评价技术及各种找矿标志, 为中国冻土区水合物资源的勘探开发提供切实可行的技术支撑。由于中国陆域冻土区水合物调查研究起步较晚, 迄今为止相关的地球物理勘查方法还很少用于冻土区水合物勘探中, 在水合物储层物性参数研究、地球物理响应特征研究及水合物饱和度估算研究等方面, 相关的研究成果较少。中国

注: 本文为国家自然科学基金项目(编号 41804116, 41674080, 41964003, 41804097, 41764006)、江西省自然科学基金项目(编号 20192BAB202010, 20171BAB203031)联合资助的成果。

收稿日期: 2019-12-19; 改回日期: 2020-02-21; 网络发表日期: 2020-02-24; 责任编辑: 周健。

作者简介: 肖昆, 男, 1987 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩石物理学、非常规油气藏测井理论与方法等方面的教学与研究工作。Email: xiaokun0626@163.com。

引用本文:肖昆, 邹长春, 卢振权, 李红星, 秦臻, 葛坤朋. 2020. 基于声波测井的冻土区孔隙型水合物储层水合物饱和度估算方法. 地质学报, 94(5): 1664~1674, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020141.
Xiao Kun, Zou Changchun, Lu Zhenquan, Li Hongxing, Qin Zhen, Ge Kungpeng. 2020. The acoustic log method of estimating gas hydrate saturation in gas hydrate reservoirs. Acta Geologica Sinica, 94(5): 1664~1674.

冻土区水合物的相关研究还处于水合物资源勘查的起步阶段,滞后于国外水合物勘探。

水合物资源量的评价结果与水合物资源价值、环境影响和潜在危害等科学问题的认识直接相关,因此开展水合物资源量评价研究在水合物资源勘探开发中举足轻重(Archer, 2007; Maslin et al., 2010)。地球物理测井是在原位状态下获取水合物储层参数最直接的手段,同时也是计算水合物资源量最真实的方法(Dickens et al., 1997)。由于水合物饱和度参数的准确计算对于水合物资源量的确定至关重要,而地球物理测井是开展水合物饱和度评价的重要工具,其中声波测井对水合物储层响应明显,声波测井参数已被广泛用于水合物饱和度研究工作中。目前,国内外学者针对海域水合物储层已做了大量有意义的研究工作,提出了多种理论模型和实验模型,主要基于相关孔隙介质理论来建立不同的正演模拟速度模型,大致主要分为三种理论,即等效介质理论、自适应理论和接触介质理论。根据上述孔隙介质理论提出了基于等效介质理论、双相介质理论和三相介质理论的弹性波速度模型(Lee et al., 1996; Ecker et al., 1998; Tinivella, 1999; Helgerud et al., 1999; Ecker et al., 2000; Lee et al., 2008)。上述建立的弹性波速度模型结合声波测井资料已应用于多个海域地区的水合物饱和度估算工作,取得了显著效果(Song Haibin et al., 2001; Wang Xiujuan et al., 2005; Lin Lin et al., 2014)。祁连山冻土区水合物的成藏地质条件相比国外冻土区水合物更加复杂,导致水合物储集层物性特征也更加复杂,如未选取合适的孔隙介质速度模型来反演水合物饱和度将会产生较大误差。为了给祁连山冻土区水合物储层测井识别与水合物饱和度的求取提供技术支持,同时也为该地区水合物资源量的评价提供参考,针对研究区孔隙型水合物储层,采用合理的速度模型开展声波速度与水合物饱和度变化特征研究显得尤为重要。

本文首先利用超声波成像测井图像和钻井岩芯资料分析了研究区孔隙型水合物的储层特征;然后根据研究区孔隙型水合物的实际赋存地质条件,通过对水合物储层进行声波测井方法的建模,利用基于等效介质理论的弹性波速度模型正演模拟了水合物储层的声波速度特征,识别了水合物赋存井段;最后利用正演模拟得到的声波速度反演估算了水合物储层的水合物饱和度变化特征。

1 区域地质背景

1.1 大地构造及地层特征

祁连山地处青藏高原北部,大地构造单元分为北祁连构造带、中祁连陆块和南祁连构造带等三大构造单元(图1)。自震旦纪以来,祁连山先后经历大陆裂谷阶段(震旦纪—中寒武世)、洋底扩张及沟弧体系阶段(晚寒武世—中奥陶世)、造山阶段(中奥陶世之后经历了俯冲造山、碰撞造山和陆内造山等作用)等演化阶段,形成现今的地质构造格局(Feng Yiming, 1997)。

早古生代期间,祁连山地区为介于柴达木地块和华北地块之间的一个小型洋盆,志留纪晚期的加里东运动使古洋盆封闭并开始隆升剥蚀。石炭纪时又开始下沉形成广阔的浅海陆棚或陆表海环境。三叠纪时南祁连仍为海盆环境,沉积了一套海相砂泥岩夹灰岩建造。晚三叠纪末,受印支运动影响,使古特提斯海洋完全封闭,整个祁连山抬升成陆,成为剥蚀区。早燕山运动使得祁连山地区局部拉张,形成一系列条带状的山间断陷盆地,并沉积了一套侏罗纪的河湖沼泽相含煤碎屑岩(Fu Junhui et al., 1998);白垩纪和第三纪以细粒红色碎屑岩、黏土岩为主;第四系在盆地内分布广泛,以冰水—洪积相和冰川堆积物为主(Fu Junhui et al., 2000)。

1.2 水合物地质特征

2008~2009年,中国地质调查局组织实施了水合物科学钻探工程,在研究区共钻探8口科学钻探孔(图1),并成功钻获水合物实物样品。钻获水合物实物样品的钻孔包括DK-1、DK-2、DK-3、DK-7、DK-8,在DK-4、DK-5、DK-6钻孔中仅发现一些水合物存在的异常现象。2013~2015年,为了进一步研究祁连山冻土区水合物的形成条件、控制因素及分布规律,神华集团联合中国地质调查局和青海煤炭地质105勘探队在祁连山冻土区补充实施了部分科学钻探孔,目前已在DKXX-19、DKXX-13、DKXX-11孔成功钻获水合物实物样品,为研究区开展相关研究工作奠定了基础(Wen Huaijun et al., 2015; Lu Zhenquan et al., 2015)。

研究区水合物主要以两种方式赋存,当水合物储层岩性为砂岩或粉砂岩,且地层裂缝发育较少时,水合物则会以浸染状充填于砂岩孔隙中,肉眼难辨水合物晶体,但红外热像仪呈现低温异常,水合物分解时含水合物岩芯不断渗出水珠,并将其

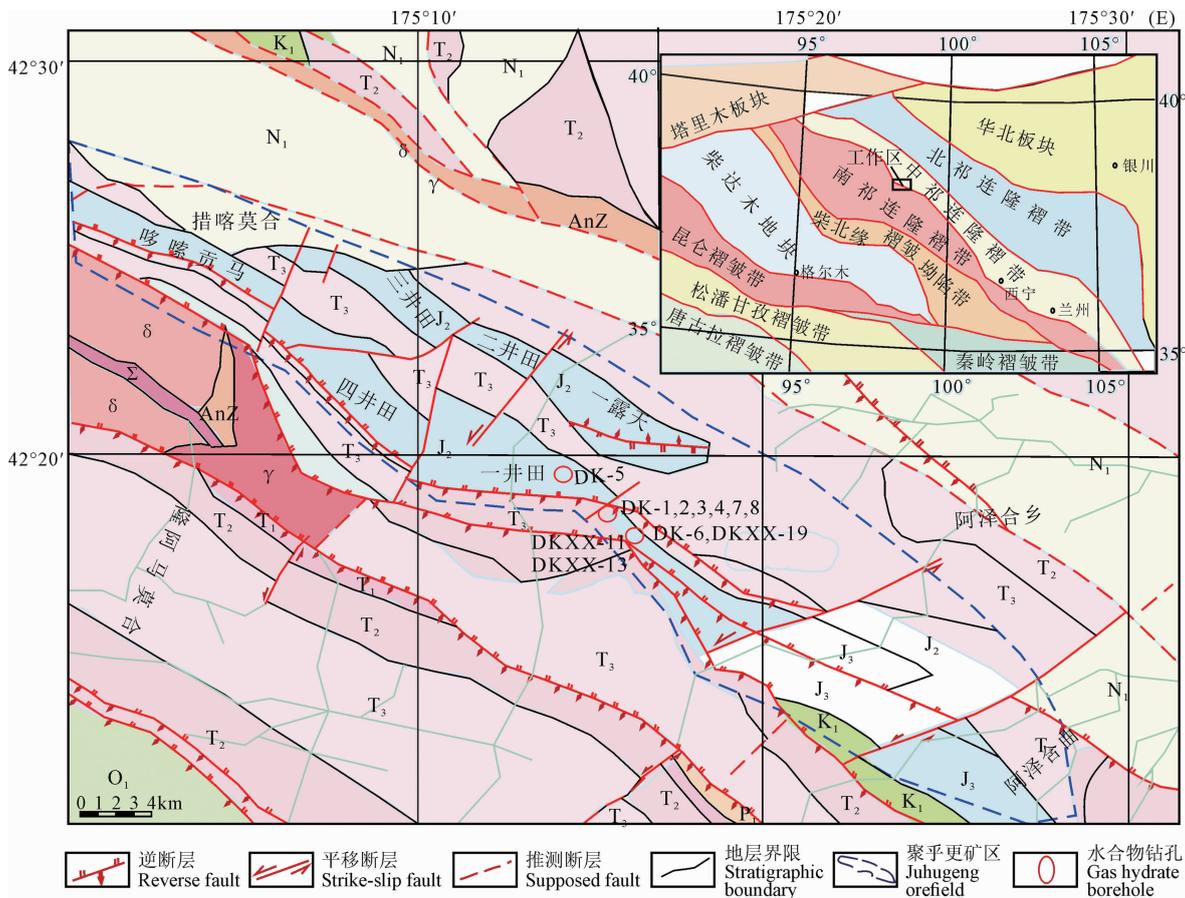


图1 祁连山水合物钻探区大地构造单元位置及科学钻探选区图(据 Wang Pingkang et al., 2014)

Fig. 1 The sketch of tectonic units and locations of drilling sites of the scientific drilling project for gas hydrate in Qilian Mountain permafrost (modified from Wang Pingkang et al., 2014)

N₁—中新统; K₁—下白垩统; J₃—上侏罗统; J₂—中侏罗统; T₃—上三叠统; T₂—中三叠统; T₁—下三叠统; P₁—下二叠统; O₁—下奥陶统; AnZ—前震旦系; γ—辉长岩; δ—闪长岩; Σ—橄榄岩

N₁—Miocene; K₁—Lower Cretaceous; J₃—Upper Jurassic; J₂—Middle Jurassic; T₃—Upper Triassic; T₂—Middle Triassic; T₁—Lower Triassic; P₁—Lower Permian; O₁—Lower Ordovician; AnZ—pre-Sinian; γ—gabbro; δ—diorite; Σ—peridotite

投入水中会冒出一连串气泡,水合物分解完后在岩芯上残留蜂窝状构造等(Wang Pingkang et al., 2013);当水合物赋存层段裂缝较发育时,水合物通常以网状、结核状或脉状赋存于粉砂岩、泥岩和油页岩的裂缝中,肉眼可观测到水合物呈乳白色晶体状(Zhu Youhai et al., 2009)。目前所钻获的水合物实物样品均产于冻土层下,埋藏深度介于133~396m,层位上属于中侏罗统江仓组(J_{2j}) (Zhu Youhai et al., 2010b; Tan Rongfu et al., 2017)。储集层岩性多以黑色、灰色油页岩(页岩)、泥岩、灰色粉砂岩、细砂岩、中砂岩为主(Lu Zhenquan et al., 2013b)。对于孔隙型水合物储层,含水合物砂岩地层孔隙度小于20%,砂岩孔隙中水合物饱和度小于80% (Guo Xingwang, 2011; Lin Zhenzhou et al., 2013)。

2 数值模拟方法

2.1 声波速度正演

为了将冻土区水合物微观分布状态与地层物性参数联系起来,可以借助基于等效介质理论的弹性波速度模型(Helgerud et al., 1999)。基于等效介质理论建立的弹性波速度模型,考虑了岩石弹性力学和统计学,兼顾了波传播介质的微观和宏观两个方面,具有相对较广的使用范围(Li Hongxing et al., 2009)。基于双相介质理论和三相介质理论的弹性波速度模型由于在正演模拟弹性波速度时需要设定的参数过多,且参数求取相对困难,在实际应用中存在一定的限制(Tinivella, 1999; Lee et al., 1996)。故针对祁连山冻土区孔隙充填型水合物储层,本文选用基于等效介质理论的弹性波速度模型

来开展相关研究工作。

根据等效介质理论,含水合物地层的纵、横波速度表达式为:

$$V_p = \sqrt{(K_{sat} + \frac{4}{3}\mu_{sat})/\rho_b} \quad (1)$$

$$V_s = \sqrt{\mu_{sat}/\rho_b} \quad (2)$$

式中, V_p 、 V_s 分别为纵、横波速度; K_{sat} 为饱和流体地层岩石的体积模量; μ_{sat} 为饱和流体地层岩石的剪切模量; ρ_b 为地层岩石的密度。

为了确定研究区水合物储层的物性参数 (V_p 、 V_s 、 ρ_b), 只需确定 K_{sat} 和 μ_{sat} , 这两个参数的计算可利用基于等效介质理论的弹性波速度模型正演模拟

$$V_p = \left\{ \left[\left(\frac{1}{C_m} + \frac{4}{3}\mu \right) + \frac{\phi_{eff} \frac{\rho_m}{k} + (1-\beta - 2\frac{\phi_{eff}}{k})(1-\beta)}{(1-\phi_{eff}-\beta)C_b + \phi_{eff}C_f} \right] \cdot \frac{1}{\rho_m \left(1 - \frac{\phi_{eff} \frac{\rho_f}{k}}{\rho_m} \right)} \right\}^{1/2} \quad (3)$$

$$V_s = \left[\frac{\mu}{\rho_m \left(1 - \frac{\phi_{eff} \frac{\rho_f}{k}}{\rho_m} \right)} \right]^{1/2} \quad (4)$$

式中, V_p 、 V_s 分别为纵、横波速度; ϕ_{eff} 为有效孔隙度; C_b 、 C_f 分别为固相、流体压缩系数; C_m 为骨架压缩系数; μ 为骨架的平均刚度或剪切模量; ρ_m 、 ρ_f 分别为地层岩石平均密度和流体密度; β 为比例系数; k 为耦合系数。

2.2 水合物饱和度反演

在利用正演模拟得到的声波速度用于反演水合物饱和度时,需要与研究区实际钻孔的声波测井测得的声波速度进行对比,表现为水合物储层的实际声波速度与正演模拟的孔隙空间饱和水时的声波速度之间的差值反映了水合物饱和度。由于祁连山冻土区水合物钻孔只进行了普通声波时差测井,只能获得水合物储层的实际纵波速度资料,因此本文开展孔隙型水合物储层水合物饱和度反演研究只将基于等效介质理论的弹性波速度模型正演模拟得到的纵波速度用于水合物饱和度反演估算中。

图 2 为孔隙型水合物储层利用纵波速度反演水合物饱和度的流程图。其具体反演水合物饱和度流程如下:先设定一个初始水合物饱和度值,再输入研究区地层岩石骨架的体积模量、剪切模量、孔隙度、密度等参数,利用式(1)正演模拟得到该水合物饱和度下的理论纵波速度;再将理论纵波速度与相对应的实际测井纵波速度作差,如果两者的差值在设定的允许误差范围内,那么该水合物饱和度就认为是水合物储层的实际水合物饱和度;反之,如果两者差值不在允许误差范围内,则修正水合物饱和度初值

得到 (Ecker et al., 1998; Helgerud et al., 1999; Xiao Kun et al., 2017)。该模型考虑了地层岩石矿物组分、孔隙度、水合物饱和度变化对地层物性参数的影响,能够用于模拟祁连山冻土区水合物储层的变化特征。

为了将基于等效介质理论的弹性波速度模型的正演模拟结果与其他方法进行比较,本文选取利用双相介质理论的弹性波速度模型对祁连山冻土区水合物储层的声波速度特征进行对比研究。本文选择 Domenico(1977)以双相介质理论为基础建立的弹性波速度模型来进行相关正演模拟工作。其速度模型关系式为:

重复上述步骤直到满足误差要求。

3 结果与讨论

3.1 DKXX-13 孔测井资料分析

对 DKXX-13 孔进行了全井段的综合常规测井工作,测井项目包括自然伽马、井径、密度、声波时差、电阻率测井等。图 3 为该钻孔一段 (X29.8~X32.2 m) 钻获水合物实物样品的常规测井曲线,该井段由于存在水合物,在电阻率和声波时差曲线上响应明显,显示为高电阻率、低声波时差的响应特征,与国外冻土区水合物的测井响应特征一致 (Collett, 2005; Collett et al., 2011)。自然伽马和密度曲线主要是对地层岩性的反映,该井段地层岩性主要为泥质砂岩。同时井径曲线也可作为识别水合物赋存层段的有效参数,井径曲线变化不大的层段,

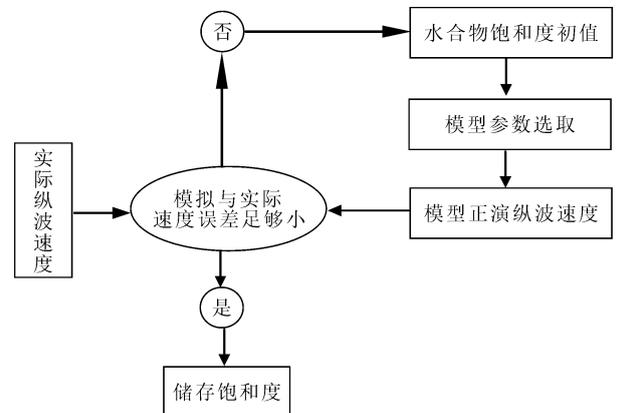


图 2 孔隙型水合物储层水合物饱和度反演流程图

Fig. 2 The flowchart for gas hydrate saturation inversion in pore-filling gas hydrate reservoir

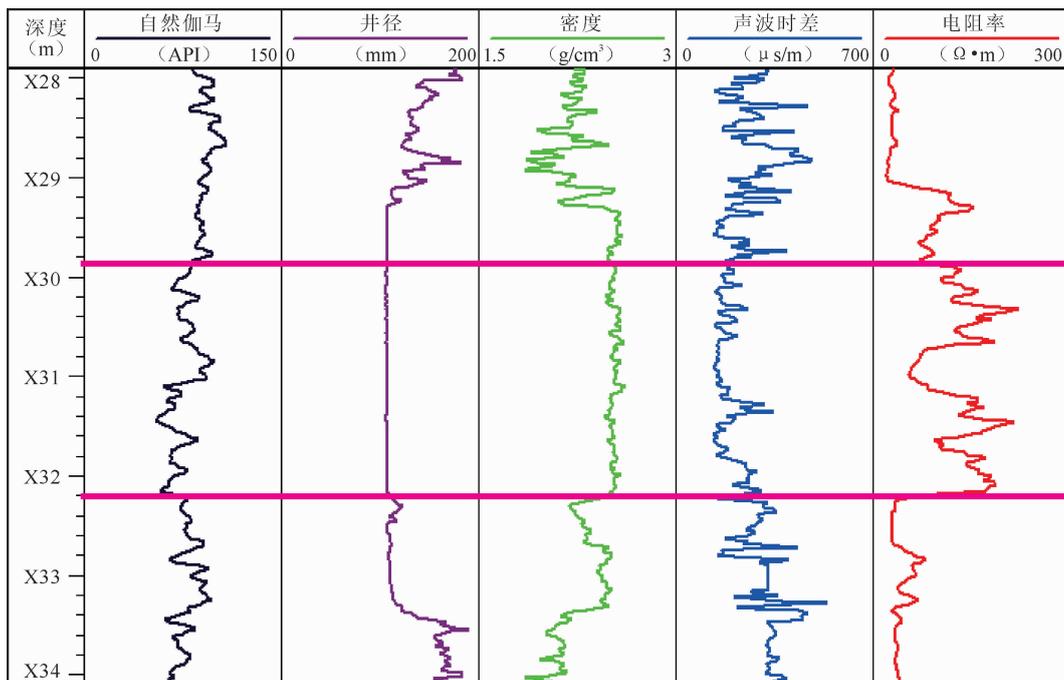


图3 祁连山冻土区 DKXX-13 孔水合物赋存井段常规测井曲线

Fig. 3 Conventional logging curve of the gas hydrate reservoir in hole DKXX-13

其他测井曲线出现异常则与井况无关。

DKXX-13 孔在钻探过程中实施了超声波成像测井作业, 获取了高质量的钻孔地层成像资料, 使得能够直观高效地对研究区水合物赋存井段地层的裂缝发育情况及产状分布进行分析研究。利用超声波成像测井图像对井壁地层裂缝的响应, 对该井段的裂缝进行拾取并以此分析裂缝产状随深度变化的特征(图 4a~c)。从图中可知: 在 X25.0~X51.0m 井段共提取 267 条裂缝, 裂缝密度平均值为 9.7 条/10m, 表明全井段地层裂缝不发育; 在水合物赋存井段(X29.8~X32.2m)共提取裂缝 32 条, 裂缝密度平均值为 13.7 条/10m, 裂缝倾角主要分布于 45°~75°, 为高角度裂缝(Zou Changchun et al., 2014; Xiao Kun et al., 2014), 反映水合物赋存井段高角度裂缝发育较少, 从而表明该井段水合物主要赋存于地层岩石孔隙中。现场钻获的该井段岩芯肉眼看不到冰状物, 但岩芯伴有强烈冒泡, 明火加热出现燃烧现象, 同时红外扫描热成像显示低温异常(图 4d), 证明了该井段水合物赋存于地层岩石孔隙中, 与超声波成像测井图像解释结果一致。

3.2 声波速度特征分析

3.2.1 地层孔隙度估算

利用基于等效介质理论的弹性波速度模型和基于双相介质理论的弹性波速度模型开展声波速度正演模拟, 上述模型中首先需要确定地层孔隙度(ϕ),

而地层孔隙度是估算水合物饱和度的一个关键参数, 因此需选取合适的测井资料估算研究区水合物钻孔的地层孔隙度。测井资料中能够用于确定地层孔隙度的包括密度、声波、中子和电阻率测井参数。对于声波测井确定孔隙度, 由于研究区水合物埋藏浅、地层岩石需进行压实校正, 压实校正系数多根据区域岩芯资料确定, 而研究区缺少岩芯分析资料, 较难确定压实校正系数, 因此不选取声波测井估算孔隙度。由于研究区中子测井资料未进行刻度, 故无法进行孔隙度估算。对于电阻率测井资料确定孔隙度, 需结合阿尔奇公式计算地层孔隙度, 公式中需确定阿尔奇常数及地层水电阻率(Archie, 1942), 而这些参数通常由经验参数确定, 使得估算的孔隙度存在一定误差。对于密度测井, 相对于电阻率和声波测井, 在水合物赋存层段所受影响较小, 基本能够反映地层孔隙度情况, 因此本文开展水合物声波测井模拟选取密度测井资料用来估算地层孔隙度。

密度测井测量的是散射伽马射线强度, 它反映地层的电子密度, 因而也反映岩石的体积密度(ρ_b)。利用密度测井计算地层孔隙度的公式(Serra, 1984):

$$\phi = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_f} \quad (5)$$

式中, ρ_{ma} 为岩石骨架密度, 根据岩石骨架的矿物组分计算得 $\rho_{ma} = 2.64 \text{ g/cm}^3$; ρ_f 为流体密度, 取为地

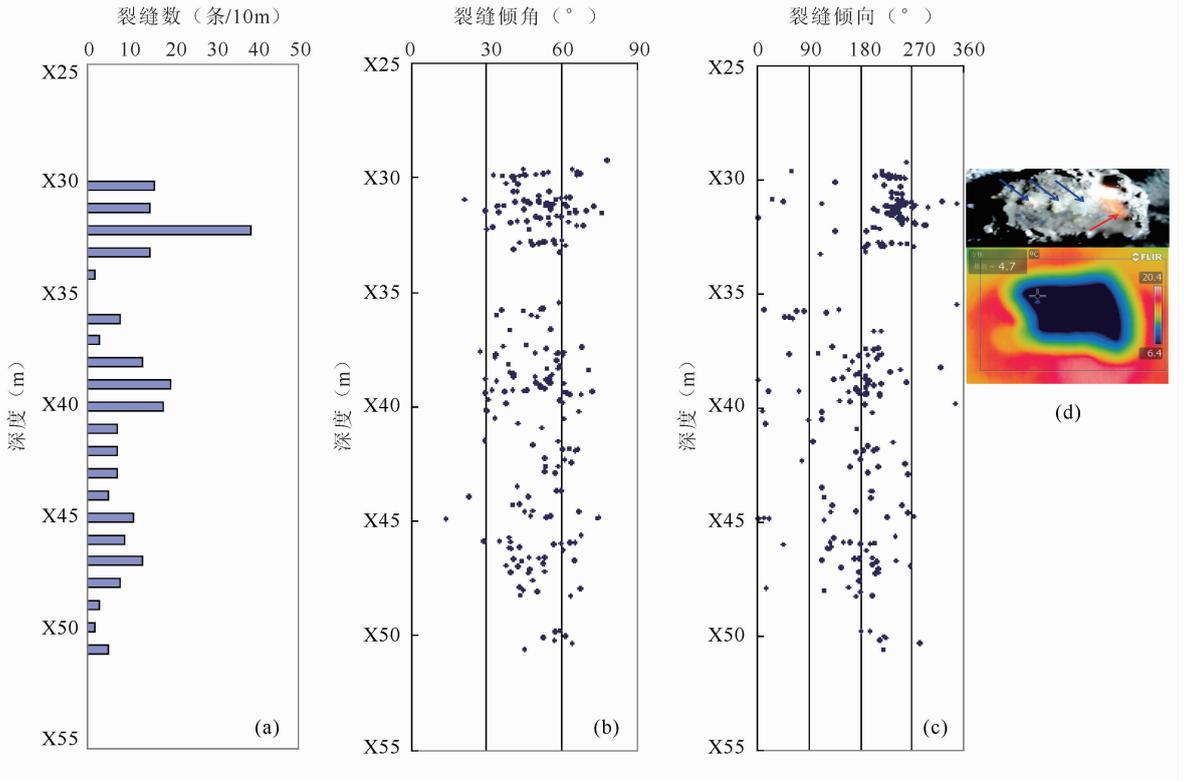


图 4 祁连山冻土区 DKXX-13 孔地层裂缝参数随深度变化规律

Fig. 4 Statistical graph of the cracks in the borehole DKXX-13 in Qilian Mountain permafrost

(a)—裂缝分布频率变化;(b)—裂缝倾角变化;(c)—裂缝倾向变化;(d)—水合物实物燃烧与红外热成像

(a)—Distribution of absolute frequency; (b)—distribution of dip angle;

(c)—distribution of dip direction; (d)—burning and core tested by infrared imaging

层水的密度 $\rho_f = 1.00\text{g/cm}^3$ 。由于本钻孔水合物赋存井段地层泥质含量较高,因此需进行泥质校正,则式(5)可改写为(Serra,1984):

$$\phi = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_f} - V_{sh} \frac{\rho_{ma} - \rho_{sh}}{\rho_{ma} - \rho_f} \quad (6)$$

$$V_{sh} = \frac{2^{G_{CUR} \times SH} - 1}{2^{G_{CUR}} - 1} \quad (7)$$

$$SH = \frac{GR - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \quad (8)$$

式中, V_{sh} 为泥质的体积含量, SH 为泥质含量指数, ρ_{sh} 为泥质的密度, GR 、 GR_{min} 、 GR_{max} 分别为目的层、纯砂岩层和纯泥岩层的自然伽马测井值, G_{CUR} 为 Hilchie 指数,对北美第三纪地层取 3.7,老地层取 2 (Hilchie,1978)。

利用式(6)计算 DKXX-13 孔 X28.0~X34.0m 井段的地层孔隙度,计算结果见图 5a。从图 5a 中可以看出: X29.3~X30.0m 和 X30.7~X31.1m 井段地层泥质含量较高,计算得到的孔隙度为 0%,指示上述井段地层岩性为泥岩; X28.0~X29.3m 和 X33.4~X34.0m 井段由于受井眼扩径影响,致使计

算得到的孔隙度结果偏大; X29.8~X32.2m 井段地层孔隙度基本在 1.0%~8.0%之间变化,平均值为 4.0%,说明 DKXX-13 孔水合物赋存井段地层孔隙度较低,水合物储层岩性较致密。

3.2.2 水合物储层纵波速度特征

根据自然伽马测井资料可知, DKXX-13 孔 X28.0~X34.0m 井段地层泥质含量较高,且部分井段地层岩性为泥岩,因此利用相关速度模型开展声波速度正演模拟时只针对泥质砂岩地层。利用基于等效介质理论的弹性波速度模型正演模拟了 DKXX-13 孔 X28.0~X34.0m 井段地层饱和水情况下的纵波速度(图 6a),同时与利用基于双相介质的弹性波速度模型的正演模拟结果进行了对比(图 6b),上述两种速度模型中部分参数取值见表 1、表 2。当 $S_h = 0$ 时,两种速度模型正演模拟得到的纵波速度所反映的为饱和水地层的情况,从图 6a 中可知:在不含水合物井段(X28.0~X29.8m 和 X32.2~X34.0m),基于等效介质理论的弹性波速度模型正演模拟的饱和水纵波速度曲线与实际测井

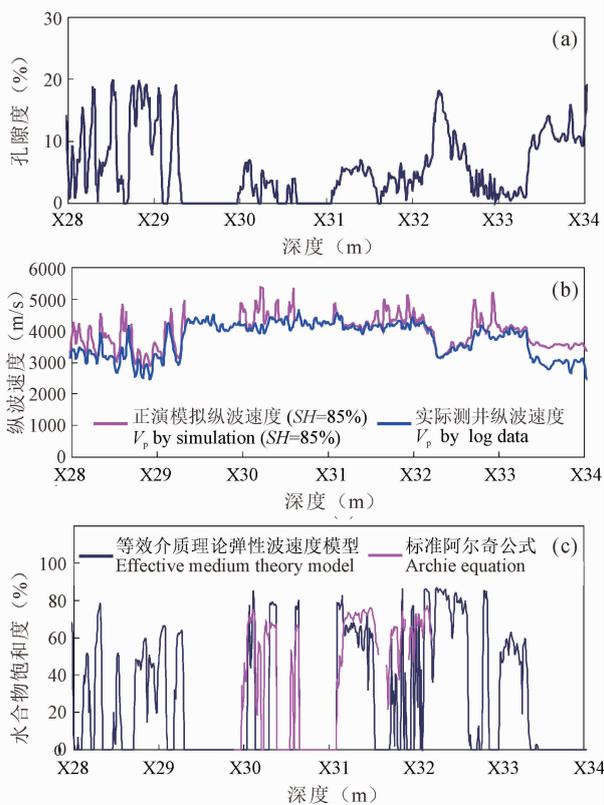


图5 祁连山冻土区 DKXX-13 孔 X28.0~X34.0m 井段地层纵波速度正演模拟与水合物饱和度估算

Fig. 5 Forward simulation P-wave velocity and gas hydrate saturation inversion values for depths of X28.0~X34.0 m of hole DKXX-13

(a)一密度测井计算孔隙度结果;(b)一基于等效介质理论的弹性波速度模型;(c)一水合物饱和度估算
 (a)—Calculated formation porosity by density log; (b)—the velocity model based on effective medium theory; (c)—gas hydrate saturation inversion values

纵波速度曲线趋势基本一致,且在 X33.5~X34.0m 井段两曲线重合,可知该速度模型及参数的设置是合理的,能够用于分析研究区孔隙型水合物储层纵波速度特征。

从图 6b 中可知:基于双相介质理论的弹性波速度模型正演模拟的饱和水纵波速度曲线相比基于等效介质理论的弹性波速度模型正演模拟结果偏小,在不含水合物井段基本与实际测井纵波速度曲线趋势一致,但两条曲线在不含水合物井段未出现曲线重合,未能反映实际地层饱和水的情况,与实际测井纵波速度曲线存在一定偏差。因此,本文选取基于等效介质理论的弹性波速度模型用来分析研究区孔隙型水合物储层的纵波速度和水合物饱和度特征。

实际测井的纵波速度与饱和水纵波速度之间的差值反映了水合物或游离气饱和度值,可用来定性

表 1 等效介质理论弹性波速度模型部分参数取值 (据 Helgerud et al., 1999)

Table 1 Values of the parameters of the effective medium theory model (after Helgerud et al., 1999)

组分	体积模量(GPa)	剪切模量(GPa)	密度(g/cm ³)
黏土	20.9	6.85	2.58
方解石	76.8	32	2.71
石英	36.6	45	2.65
水合物	7.9	3.3	0.90
水	2.5	0	1.00

表 2 双相介质理论弹性波速度模型部分参数取值 Table 2 Values of the parameters of the two-phase medium theory model

参数	取值	取值参考
C_s	$2.7 \times 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$	Zimmerman et al., 1986
C_h	$1.79 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$	Sloan, 1998
C_w	$4.79 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$	Tinivella, 1999
C_g	$4.24 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$	Weast, 1992

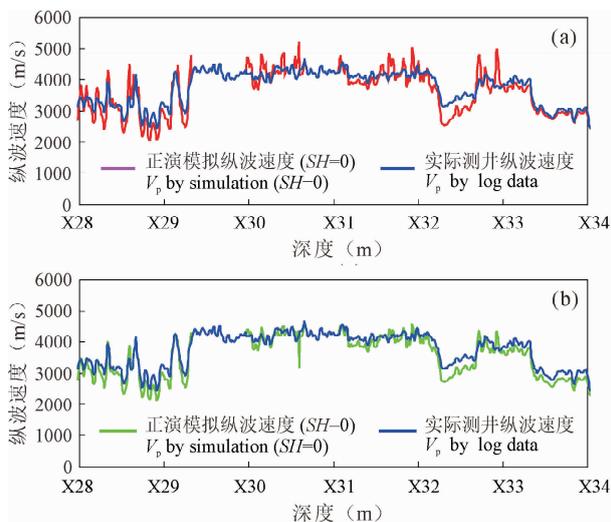


图 6 祁连山冻土区 DKXX-13 孔 X28.0~X34.0m 井段纵波速度正演模拟

Fig. 6 P-wave velocity by forward simulation in depths of X28.0~X34.0 m of hole DKXX-13

(a)一基于等效介质理论的弹性波速度模型;
 (b)一基于双相介质理论的弹性波速度模型
 (a)—The velocity model based on effective medium theory;
 (b)—the velocity model based on two-phase medium theory

识别水合物储层(Lee et al., 1993; Tinivella, 1999)。利用正演模拟得到的饱和水纵波速度曲线识别地层含水合物或游离气的方法为:当地层的实际测井纵波速度比饱和水纵波速度偏高,则该地层可能含有水合物;当地层的实际测井纵波速度比饱和水纵波速度偏低,则该地层可能含有游离气。从图 6a 中可知:在 X29.8~X32.2m 井段,多处曲线(X30.0~

X30.2m、X30.3 ~ X30.4m、X31.1 ~ X31.6m、X31.7~X31.9m 和 X32.0~X32.2m) 显示实际测井纵波速度相对饱和水纵波速度增大,表明上述井段存在水合物;在 X28.0 ~ X29.3m、X32.3 ~ X32.7m 和 X32.8~X33.4m 井段,实际测井纵波速度也相对饱和水纵波速度有一定增大,但图 4 中电阻率测井曲线在上述井段并没有显示电阻率值增大,推断这些异常可能为水合物融解引起地层电阻率降低所致。

3.3 水合物饱和度估算

利用基于等效介质理论的弹性波速度模型反演水合物储层水合物饱和度时,可以首先设置相对较大的水合物饱和度,正演模拟得到相应的纵波速度曲线用以大致确定水合物饱和度的变化范围,从而为反演缩小搜索范围以减少反演工作量。从图 5b 中可知:正演模拟得到的纵波速度随 S_h 增大而逐渐增大,当 $S_h = 85\%$ 时,正演模拟得到的纵波速度曲线整体位于实际测井纵波速度曲线的上方,说明 DKXX-13 孔 X28.0~X34.0m 井段地层水合物饱和度基本介于 0~85.0% 之间。

利用基于等效介质理论的弹性波速度模型反演估算了 DKXX-13 孔 X28.0~X34.0m 井段地层水合物饱和度,其中反演输入的地层平均密度参数 ρ_m 设置为密度测井值,反演结果见图 5c。同时,为了对比分析反演结果,利用标准阿尔奇公式结合 DKXX-13 孔的电阻率测井资料估算了水合物赋存井段(X29.8~X32.2m)的水合物饱和度。从图 5c 中蓝色曲线可知:X28.0~X34.0m 井段估算的水合物饱和度较大,由于该钻孔地层岩性较致密,地层孔隙度较小,因而水合物赋存于孔隙内所占的体积百分比需较大才能够被探测出来;在水合物异常井段内(X28.0~X29.3m、X32.3~X32.7m 和 X32.8~X33.4m),水合物饱和度变化范围为 3.0%~86.0%,平均值为 52.3%;在水合物赋存井段内,X30.0~X30.2m、X30.3~X30.4m、X31.1~X31.6m、X31.7~X31.9m 和 X32.0~X32.2m 井段反演结果显示存在水合物,水合物饱和度变化范围为 13.0%~85.0%,平均值为 61.9%,反映水合物赋存井段内水合物饱和度较高。从图 5c 中粉色曲线可知:利用标准阿尔奇公式与利用基于等效介质理论的弹性波速度模型估算 X29.8~X32.2m 井段的水合物饱和度曲线的变化趋势基本一致,只是曲线幅值存在一定的差异;在水合物赋存井段内,X29.8~X30.2m、X30.3~X30.4m、X30.5~

X30.7m、X31.1~X31.6m、X31.7~X31.9m 和 X32.0~X32.2m 井段估算结果显示存在水合物,水合物饱和度变化范围为 18.0%~77.0%,平均值为 61.6%,说明利用标准阿尔奇公式估算的水合物饱和度峰值相对利用基于等效介质理论的弹性波速度模型的反演结果偏低,而水合物饱和度平均值两者基本一致。此外,现场水合物样品的测试结果显示研究区水合物饱和度的变化范围为 52.9%~61.8%,平均值为 58.8%,与利用基于等效介质理论的弹性波速度模型反演的水合物饱和度均值接近(Liu Jie et al., 2017)。一定程度上验证了利用基于等效介质理论的弹性波速度模型反演估算研究区孔隙型水合物储层水合物饱和度的可靠性。

4 结论和认识

(1) 利用超声波成像测井资料结合钻井岩芯资料可有效识别祁连山冻土区水合物在地层岩石中的赋存类型,识别出 DKXX-13 孔为典型孔隙充填型水合物储层。

(2) 利用基于等效介质理论的弹性波速度模型和基于双相介质理论的弹性波速度模型,对典型孔隙型水合物储层 DKXX-13 孔的声波速度特征进行模拟,结果表明基于等效介质理论的弹性波速度模型正演模拟的纵波速度相比基于双相介质理论的弹性波速度模型更加吻合实际测井纵波速度。

(3) 通过正演模拟的纵波速度与实际测井纵波速度的对比,识别出 X30.0~X30.2m、X30.3~X30.4m、X31.1~X31.6m、X31.7~X31.9m、X32.0~X32.2m 井段存在水合物,水合物赋存井段地层的水合物饱和度变化范围为 13.0%~85.0%,平均值为 61.9%,与标准阿尔奇公式估算结果和现场岩芯测试结果基本一致。

References

- Archer D. 2007. Methane hydrate stability and anthropogenic climate change. *Biogeosciences*, 4: 521~544.
- Archie G E. 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Journal of Petroleum Technology*, 5: 1~8.
- Collett T S. 2005. Results at Mallik highlight progress in gas hydrate energy resource research and development. *Petrophysics*, 46(3): 237~243.
- Collett T S, Lee M W, Agena W F, Miller J J, Lewis K A, Zyrianova M V, Boswell R, Inks T L. 2011. Permafrost associated natural gas hydrate occurrences on the Alaska North Slope. *Marine and Petroleum Geology*, 28: 279~294.
- Dickens G R, Paull C K, Wallace P. 1997. Direct measurement of in situ methane quantities in large gas hydrate reservoir. *Nature*, 385: 426~428.

- Domenico S N. 1977. Elastic properties of unconsolidated porous sand reservoirs. *Geophysics*, 42(7): 1339~1368.
- Ecker C, Dvorkin J, Nur A M. 1998. Sediments with gas hydrates: internal structure from seismic AVO. *Geophysics*, 63(5): 1659~1669.
- Ecker C, Dvorkin J, Nur A M. 2000. Estimating the amount of gas hydrate and free gas from marine seismic data. *Geophysics*, 65(2): 565~573.
- Feng Yiming. 1997. Investigatory summary of the Qilian orogenic belt, China: History, presence and prospect. *Advance in Earth Sciences*, 12(4): 307~314 (in Chinese with English abstract).
- Fu Junhui, Zhou Lifa. 1998. Carboniferous-Jurassic stratigraphic provinces of the southern Qilian basin and their petro-geological features. *Northwest Geoscience*, 19(2): 47~54 (in Chinese with English abstract).
- Fu Junhui, Zhou Lifa. 2000. Triassic stratigraphic provinces of the southern Qilian basin and their petro-geological features. *Northwest Geoscience*, 21(2): 64~72 (in Chinese with English abstract).
- Guo Xingwang. 2011. Well logging response characteristics and evaluation of gas hydrate in Qilian Mountain Permafrost. Master thesis of Chinese Academy of Geological Sciences (in Chinese with English abstract).
- Han Jianguang, Yu Changqing, Zhang Xiaobo, Gu Bingluo, Wang Yun, Chen Peng. 2016. Multiwave seismic numerical simulation study on terrestrial gas hydrate in permafrost area. *Acta Geologica Sinica*, 90(9): 2502~2512 (in Chinese with English abstract).
- Helgerud M B, Dvorkin J, Nur A, Sakai A, Collett T. 1999. Elastic-wave velocity in marine sediments with gas hydrates: effective medium modeling. *Geophysical Research Letters*, 26(13): 2021~2024.
- Hilchie D W. 1978. Applied openhole log interpretation (for Geologists and Petroleum Engineers). Colorado: DW Hilchie.
- Lee M W, Hutchinson D R, Dillon W P, Miller J J, Agena W F, Swift B A. 1993. Method of estimating the amount of in-situ gas hydrates in deep marine sediments. *Marine Petroleum and Geology*, 10(5): 493~506.
- Lee M W, Hutchinson D R, Collett T S, Dillon W P. 1996. Seismic velocities for hydrate-bearing sediments using weighted equation. *Journal of Geophysical Research*, 101(B9): 20347~20358.
- Lee M W, Collett T S. 2008. Intergrated analysis of well logs and seismic data to estimate gas hydrate concentrations at Keathley Canyon, Gulf of Mexico. *Marine and Petroleum Geology*, 25(9): 924~931.
- Li Hongxing, Tao Chunhui, Zhou Jianping, Deng Juzhi, Deng Xianming, Fang Genxian. 2009. Modified effective medium modeling and seismic wave field in un-cemented marine sediments with hydrates. *Acta Physica Sinica*, 58(11): 8083~8093 (in Chinese with English abstract).
- Lin Lin, Liang Jin, Guo Yiqun, Lu Jingan, Liang Jinqiang. 2014. Estimating saturation of gas hydrate within marine sediments using sonic log data. *Well Logging Technology*, 38(2): 234~238 (in Chinese with English abstract).
- Lin Zhengzhou, Li Yang, Gao Wenli, Kong Guangsheng, Sun Shanzhe. 2013. Physical character analysis of logging data for natural gas hydrate in Qilian Mountain permafrost area. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 37(5): 834~838 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jie, Liu Jiangping, Cheng Fei, Wang Jing, Deng Xiaohu, Liu Xiaoxiao, Jin Cong. 2017. Rock physics analysis of the hydrate-bearing sediments in the permafrost region of Qinghai-Tibet plateau. *Progress in Geophysics*, 32(3): 1008~1018 (in Chinese with English abstract).
- Lu Zhenquan, Zhu Youhai, Zhang Yongqin, Wen Huaijun, Li Yonghong, Liu Changling. 2011. Gas hydrate occurrences in the Qilian Mountain permafrost, Qinghai Province, China. *Cold Regions Science and Technology*, 66(2-3): 93~104.
- Lu Zhenquan, Rao Zhu, Zhu Youhai, Liu Hui, Zhang Yongqin. 2013a. Gas geochemical features of the DK-8 gas hydrate drilling hole in the permafrost of Qilian Mountain, and their indicative significance. *Acta Geologica Sinica*, 87(8): 1167~1178 (in Chinese with English abstract).
- Lu Zhenquan, Zhu Youhai, Zhang Yongqin, Liu Hui, Wang Ting. 2013b. Gas Source conditions for gas hydrate in Qilian Mountain permafrost of Qinghai and their implications. *Mineral Deposits*, 32(5): 1035~1044 (in Chinese with English abstract).
- Lu Zhenquan, Zhai Gangyi, Wen Huaijun, Li Yonghong, Wang Weichao, Zhu Youhai. 2015. Geological constraints on gas hydrate formation and distribution in Sanlutian Permafrost of Muli, Qinghai. *Geoscience*, 29(5): 1002~1013 (in Chinese with English abstract).
- Maslin M, Owen M, Betts R, Day S, Jones T D, Ridgwell A. 2010. Gas hydrates: past and future geohazard. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London series a-mathematical physical and engineering sciences*, 368(1919): 2369~2393.
- Serra O. 1984. Fundamentals of well-log interpretation. Part 1: The acquisition of logging data. Amsterdam: Elsevier.
- Shi Dou, Sun Chengquan, Zhu Yuenian. 1992. Foreign gas hydrate research progress. Lanzhou: Lanzhou University Press (in Chinese with English abstract).
- Sloan E D. 1998. Clathrate hydrates of natural gases. New York: Marcel Dekker Inc.
- Song Haibin, Song Linxiu, Wu Nengyou, Hao Tianyao. 2001. Geophysical researches on marine gas hydrates (1): physical properties. *Progress in Geophysics*, 16(2): 118~126 (in Chinese with English abstract).
- Tan Furong, Liu Shiming, Cui Weixiong, Wan Yuqing, Yang Chuang, Zhang Guangchao, Liu Weigang, Du Fangpeng, Fan Yuhai. 2017. Origin of gas hydrate in the Juhugeng mining area of Muli coalfield. *Acta Geologica Sinica*, 91(5): 1158~1167 (in Chinese with English abstract).
- Tinivella U. 1999. A method for estimating gas hydrate and free gas concentrations in marine sediments. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 40(1): 19~30.
- Wang Pingkang, Zhu Youhai, Lu Zhenquan, Huang Xia, Pang Shouji, Zhang Shuai, Yang Kaili. 2013. Gas hydrate field identification methods in Qilian Mountain permafrost. *Mineral Deposits*, 32(5): 1045~1056 (in Chinese with English abstract).
- Wang Pingkang, Zhu Youhai, Lu Zhenquan, Huang Xia, Pang Shouji, Zhang Shuai, Jiang Shaoqing, Li Qinghai, Yang Kaili, Li Bing. 2014. Geochemistry and genesis of authigenic pyrite from gas hydrate accumulation system in the Qilian Mountain permafrost, Qinghai, northwest China. *Science China: Earth Sciences*, 44(6): 1283~1297 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiujuan, Wu Shiguo, Guo Xuan, Xu Ning. 2005. Estimation of gas hydrate saturation in the continental slope, the South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 25(3): 89~95 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiujuan, Wu Shiguo, Wang Dawei, Ma Yubo, Yao Genshun, Gong Yuehua. 2010. The role of polygonal faults in fluid migration and gas hydrate reservoir forming in Southeast Hainan Basin. *Oil Geophysical Prospecting*, 45(1): 122~128 (in Chinese with English abstract).
- Weast R C. 1992. Handbook of Chemistry and Physics. Chemical Rubber Company Press, New York, USA.
- Wen Huaijun, Lu Zhenquan, Li Yonghong, Wang Weichao, Liu Wenjin, Li Xing. 2015. New advance on gas hydrate survey and research in Sanlutian of Muli, Qinghai. *Geoscience*, 29(5): 983~994 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Kun, Zou Changchun, Xiang Biao, Yue Xuyuan, Zhou Xinpeng, Li Jianguo, Zhao Bin. 2014. Log response of ultrasonic imaging and its significance for deep mineral

- prospecting of scientific drilling borehole-2 in Nanling district, China. *Journal of Geophysics and Engineering*, 11(5): 1~11.
- Xiao Kun, Zou Changchun, Yang Yaxin, Shang Jingtao, Lu Mingjun. 2017. Study on formation velocities estimated from the pore filling gas hydrate reservoir in the Qilian Mountain permafrost. *Progress in Geophysics*, 32(6): 2697~2702 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Xingmin, Deng Jian, Li Jinping, Lu Cheng, Song Jian. 2011. Gas hydrate formation and its accumulation potential in Mohe permafrost area, China. *Acta Geologica Sinica*, 85(9): 1536~1550 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Youhai, Zhang Yongqin, Wen Huaijun, Lu Zhenquan, Jia Zhiyao, Li Yonghong, Li Qinghai, Liu Changling, Wang Pingkang, Guo Xingwang. 2009. Gas hydrates in the Qilian Mountain Permafrost, Qinghai, Northwest China. *Acta Geologica Sinica*, 83(11): 1762~1771 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Youhai, Zhang Yongqin, Wen Huaijun, Lu Zhenquan, Jia Zhiyao, Li Yonghong, Li Qinghai, Liu Changling, Wang Pingkang, Guo Xingwang. 2010a. Gas hydrates in the Qilian Mountain Permafrost, Qinghai, Northwest China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 84(1): 1~10.
- Zhu Youhai, Zhang Yongqin, Wen Huaijun, Lu Zhenquan, Wang Pingkang. 2010b. Gas hydrates in the Qilian Mountain permafrost and their basic characteristics. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(1): 7~16 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Youhai, Zhao Xingmin, Lu Zhenquan. 2011. Resource potential and reservoir distribution of natural gas hydrate in permafrost areas of China. *Natural Gas Industry*, 31(1): 13~19 (in Chinese with English abstract).
- Zimmerman R W, King M S. 1986. The effect of the extent of freezing on seismic velocities in unconsolidated permafrost. *Geophysics*, 51(6): 1285~1290.
- Zou Changchun, Xiao Kun, Zhou Xinpeng, Li Jianguo, Zhao Bin, Xiang Biao, Sun Shaowei, Wang Zhenbin, Huang Bo, Yin Daojin. 2014. Response characteristics of ultrasonic imaging logging in hole NLS-D-1 of the scientific drilling in Yudu-Ganxian Ore district and their implications for deep mineral prospecting. *Acta Geologica Sinica*, 88(4): 676~685 (in Chinese with English abstract).
- 林霖,梁劲,郭依群,陆敬安,梁金强. 2014. 利用声波速度测井估算海域天然气水合物饱和度. *测井技术*, 38(2): 234~238.
- 林振洲,李洋,高文利,孔广胜,孙尚哲. 2013. 祁连山冻土区天然气水合物层位测井物性分析. *物探与化探*, 37(5): 834~838.
- 刘杰,刘江平,程飞,王京,邓小虎,刘肖肖,金聪. 2017. 青藏高原冻土区天然气水合物地层的岩石物理分析. *地球物理学进展*, 32(3): 1008~1018.
- 卢振权,饶竹,祝有海,刘晖,张永勤. 2013a. 祁连山冻土区天然气水合物 DK-8 孔岩芯顶空气地球化学特征及其运移指示意义. *地质学报*, 87(8): 1167~1178.
- 卢振权,祝有海,张永勤,刘晖,王婷. 2013b. 青海祁连山冻土区天然气水合物的气源条件及其指示意义. *矿床地质*, 32(5): 1035~1044.
- 卢振权,翟刚毅,文怀军,李永红,王伟超,祝有海. 2015. 青海木里三露天冻土区天然气水合物形成与分布地质控制因素. *现代地质*, 29(5): 1002~1013.
- 史斗,孙成权,朱岳年. 1992. 国外天然气水合物研究进展. 兰州:兰州大学出版社.
- 宋海斌,松林修,吴能友,郝天兆. 2001. 海洋天然气水合物的地球物理研究(I): 岩石物性. *地球物理学进展*, 16(2): 118~126.
- 谭富荣,刘世明,崔伟雄,万余庆,杨创,张光超,刘伟刚,杜芳鹏,范玉海. 2017. 木里煤田聚乎更矿区天然气水合物气源探讨. *地质学报*, 91(5): 1158~1167.
- 王平康,祝有海,卢振权,黄霞,庞守吉,张帅,江少卿,李清海,杨开丽,李冰. 2014. 祁连山冻土区天然气水合物成藏体系中自生黄铁矿地球化学特征与成因探讨. *中国科学:地球科学*, 44(6): 1283~1297.
- 王平康,祝有海,卢振权,黄霞,庞守吉,张帅,杨开丽. 2013. 祁连山冻土区天然气水合物现场识别方法. *矿床地质*, 32(5): 1045~1056.
- 王秀娟,吴时国,郭璇,徐宁. 2005. 南海陆坡天然气水合物饱和度估计. *海洋地质与第四纪地质*, 25(3): 89~95.
- 王秀娟,吴时国,王大伟,马玉波,姚根顺,龚跃华. 2010. 琼东南盆地多边形断层在流体运移和天然气水合物成藏中的作用. *石油地球物理勘探*, 45(1): 122~128.
- 文怀军,卢振权,李永红,王伟超,刘文进,李星. 2015. 青海木里三露天井田天然气水合物调查研究新进展. *现代地质*, 29(5): 983~994.
- 肖昆,邹长春,杨亚新,尚景涛,陆明俊. 2017. 祁连山冻土区孔隙型水合物地层速度估算方法研究. *地球物理学进展*, 32(6): 2697~2702.
- 赵省民,邓坚,李锦平,陆程,宋健. 2011. 漠河多年冻土区天然气水合物的形成条件及成藏潜力研究. *地质学报*, 85(9): 1536~1550.
- 祝有海,张永勤,文怀军,卢振权,贾志耀,李永红,李清海,刘昌岭,王平康,郭星旺. 2009. 青海祁连山冻土区发现天然气水合物. *地质学报*, 83(11): 1762~1771.
- 祝有海,张永勤,文怀军,卢振权,王平康. 2010. 祁连山冻土区天然气水合物及其基本特征. *地球学报*, 31(1): 7~16.
- 祝有海,赵省民,卢振权. 2011. 中国冻土区天然气水合物的找矿选区及其资源潜力. *天然气工业*, 31(1): 13~19.
- 邹长春,肖昆,周新鹏,李建国,赵斌,项彪,孙少伟,汪振斌,黄波,尹道谨. 2014. 于都赣县矿集区科学钻探 NLS-D-1 孔超声波成像测井响应特征及其深部找矿意义. *地质学报*, 88(4): 676~685.

参 考 文 献

- 冯益民. 1997. 祁连造山带研究概况——历史、现状及展望. *地球科学进展*, 12(4): 307~314.
- 符俊辉,周立发. 1998. 南祁连盆地石炭—侏罗纪地层区划及石油地质特征. *西北地质科学*, 19(2): 47~54.
- 符俊辉,周立发. 2000. 南祁连盆地三叠纪地层及石油地质特征. *西北地质科学*, 21(2): 64~72.
- 郭星旺. 2011. 祁连山冻土区天然气水合物测井响应特征及评价. 中国地质科学院硕士学位论文.
- 韩建光,于常青,张晓波,谷丙洛,王赞,陈鹏. 2016. 陆域冻土区天然气水合物多波地震数值模拟研究. *地质学报*, 90(9): 2502~2512.
- 李红星,陶春辉,周建平,邓居智,邓显明,方根显. 2009. 非胶结含水合物沉积物修正等效介质速度模型及其地震波场特征研究. *物理学报*, 58(11): 8083~8093.

The acoustic log method of estimating gas hydrate saturation in gas hydrate reservoirs

XIAO Kun^{*1)}, ZOU Changchun²⁾, LU Zhenquan³⁾, LI Hongxing¹⁾, QIN Zhen¹⁾, GE Kunpeng¹⁾

1) *State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment,*

(East China University of Technology), Nanchang, Jiangxi, 330013;

2) *Key Laboratory of Geo-detection (China University of Geosciences, Beijing), Ministry of Education, Beijing, 100083;*

3) *Oil & Gas Survey, China Geological Survey, Beijing, 100029*

** Corresponding author: xiaokun0626@163.com*

Abstract

Accurate calculation of gas hydrate saturation is very important for resource evaluation. In this paper, the method of combining ultrasonic log data with the effective medium theory model has been effectively used to evaluate gas hydrate saturation characteristics of borehole formation in the Qilian Mountain permafrost. This method has been applied to the typical pore-filling gas hydrate borehole DKXX-13. The compressional wave (P-wave) velocity simulated by the effective medium theory model is more consistent with the actual log data than the velocity model based on two-phase medium theory in the pore-filling reservoir. The range of the gas hydrate saturation of the typical pore-filling reservoir in hole DKXX-13 is 13.0%~85.0%, with an average value of 61.9%, which is in accordance with the results from the standard Archie equation and the actual core test. The research results could provide important reference for gas hydrate reservoir logging evaluation and seismic exploration in the Qilian Mountain permafrost.

Key words: Qilian Mountain permafrost; pore filling gas hydrate; ultrasonic log; effective medium theory model; gas hydrate saturation