

不同类型含天然气水合物沉积物的声学特性

张怀文¹,程远方¹,朱海涛²,史吉辉¹,韩修廷¹

1. 中国石油大学(华东)石油工程学院,青岛 266580

2. 青海油田采油五厂,海西 816499

摘要 针对中国南海海底浅层含天然气水合物沉积物泥质粉砂岩和粉砂岩,采用超声波探测和模拟实验,研究了不同水合物饱和度与围压条件下两类沉积物的声波响应特征及差异。结果表明,围压变化条件下,两类沉积物的声波速度随围压升高而增大,围压升高至饱和点后两类沉积物的声波速度不再变化,两者的围压饱和点相差7~10 MPa;水合物饱和度变化条件下,两类沉积物的声波速度随水合物饱和度增加而增大,增速呈“慢-快-慢”趋势,其中水合物饱和度20%~40%为声波速度较快增长区间,增幅达22%以上;水合物饱和度相同、围压相同时泥质粉砂岩的声波速度均大于粉砂岩,水合物饱和度与围压变化时对两类沉积物的声波速度影响较大,且对泥质粉砂岩的声波速度影响程度大于粉砂岩。

关键词 天然气水合物;泥质粉砂岩;粉砂岩;声学特性

天然气水合物(简称水合物)是除煤、石油、天然气等常规能源外的重要新能源,储量巨大,约为 $2 \times 10^{16} \text{ m}^3$,其有机碳含量是目前已经探明的煤、石油、天然气总含碳量的2倍^[1-2]。水合物已被世界公认为重要的后续能源^[3-4],对缓解人类面临的能源枯竭危机具有举足轻重的作用,开发利用水合物资源势在必行。研究含水合物沉积物的声学特性,是探究沉积物中水合物的分布规律,揭示水合物对沉积物的影响作用,获取含水合物沉积物的物理性质的重要课题^[5-8],可为地层中水合物藏的勘探开发提供基础理论。Priest等^[9]利用声波测试地层中水合物的分布及含量,分析了水合物饱和度对

地层声波速度及衰减幅度的影响。Winters等^[10]利用超声波技术测量水合物与冰在不同沉积物中形成时的波速,分析了沉积物孔隙中的填充物类型对波速的影响,以及沉积物颗粒大小对声波速度的影响。胡高伟等^[11]采用超声和时域反射联合探测技术实时测量沉积物中水合物生成、分解过程中声速等参数的变化情况,分析水合物在固结沉积物和松散沉积物中的微观分布及声学响应特征。近年来,中国对南海深水海域油气勘探发现^[12-13],南海海底浅层蕴藏着丰富的水合物资源,水合物主要分布在泥质粉砂岩和粉砂岩沉积物中。目前,关于南海海底泥质粉砂岩和粉砂岩沉积物声学特

收稿日期:2017-09-25;修回日期:2018-01-09

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2015CB251201);国家重点研发计划项目(2016YFC0304005);中央高校基本科研业务费专项(16CX06033A)

作者简介:张怀文,博士研究生,研究方向为天然气水合物钻采中的岩石力学,电子信箱:upcz@sina.cn;程远方(通信作者),教授,研究方向为油气工程岩石力学,电子信箱:yfcheng@126.com

引用格式:张怀文,程远方,朱海涛,等. 不同类型含天然气水合物沉积物的声学特性[J]. 科技导报, 2018, 36(5): 92-97; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.05.011

性研究尚未见报道。本文利用超声波探测技术和模拟实验手段,研究不同水合物饱和度和围压条件下,南海泥质粉砂岩和粉砂岩两类含水合物沉积物的声波响应特征及差异。

1 设备与方法

1.1 实验设备

实验采用中国石油大学(华东)岩石力学实验室自主研发设计的水合物低温三轴与声波测试一体化实验系统,如图1所示。实验系统的声波探头设计在水合物高压三轴仪的压力室内,可实现边压边测,并将一体化设备置于低温冷库中,既可实现水合物的原位生成,又能保证实验过程中水合物的稳定。由于难以探测含水合物沉积物的横波速度^[11],本实验自行设计研制声波探头,可实现在低温高压条件下进行水合物试样的纵、横波速的测量。超声测试采用扬州东方超声科技有限公司研发的HF-F型智能综合超声测试仪。

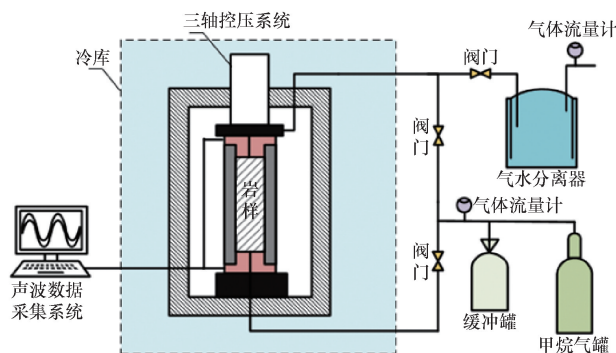
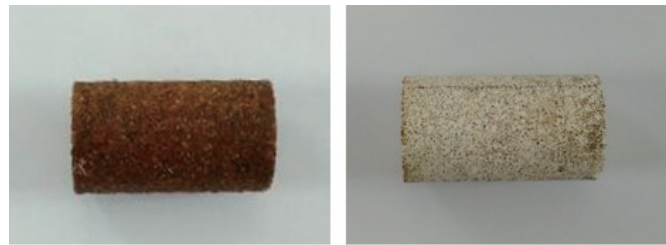


图1 水合物岩样声波测试实验系统

Fig. 1 Schematic diagram of the NGH sonic testing system

1.2 实验方法

由于南海含水合物沉积物泥质粉砂岩和粉砂岩的实际岩样不易获取,为保证制作的岩样接近于南海水合物藏情况,实验采用填砂模式进行含水合物岩样的制作^[14-15]。粉砂岩干岩样采用覆膜砂制成,泥质粉砂岩干岩样采用覆膜砂与高岭土按7:3比例混合制成,如图2所示。含水合物岩样的原位生成采用“水定量,气过量”法进行^[16],即岩样孔隙中含水量一定,在水合物生成的温压环境下,通入过量气体,使所有孔隙水生成水合物,以此达到实验要求的水合物饱和度。覆膜砂粒径为0.01~0.60 mm,高岭土为粉末状,气体采用纯度为99.9%的甲烷气。



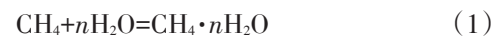
(a) 粉砂岩 (b) 泥质粉砂岩

图2 粉砂岩及泥质粉砂岩岩样

Fig. 2 Siltstone sample and muddy siltstone sample

粉砂岩岩样的制作方法^[17]:首先将覆膜砂装入模具,放入烤箱烧结成干岩样;再根据实验所需的水合物饱和度在干岩样中加入一定量的蒸馏水冰冻24 h,然后将冰冻岩样放入水合物原位生成系统中,采用两端供气的方式通入甲烷,保证气体分布均匀。根据水合物相平衡条件^[18],在水合物形成过程中调节低温冷库使温度保持在2℃,以消除结冰对水合物的影响,并维持甲烷压力4.0 MPa,围压4.5 MPa,保持24 h。当气体流量计读数不再变化时,维持水合物生成条件24 h,即认为水合物已完全生成。泥质粉砂岩岩样的制作方法,首先将覆膜砂与高岭土按7:3比例混合烧制成岩样,其余步骤与粉砂岩岩样制作方法相同。

甲烷气与水生成水合物的化学反应式为^[19]



式中, n 为反应系数, $n=5.75$ 。

采用“水定量,气过量”法制作不同水合物饱和度岩样时,按照实验设计加入不同量的蒸馏水,以控制岩样的水合物饱和度。制作特定水合物饱和度岩样所需水量的计算公式为

$$M_w = \frac{5.75M_{\text{H}_2\text{O}}}{5.75M_{\text{H}_2\text{O}} + M_{\text{CH}_4}} \rho_H \phi V S_H \quad (2)$$

式中, M_w 为制作含水合物岩样所需的水量,g; $M_{\text{H}_2\text{O}}$ 为水的分子量(18); M_{CH_4} 为甲烷气的分子量(16); ρ_H 为水合物密度,g/cm³; ϕ 为岩样孔隙度,%; V 为岩样体积,cm³; S_H 为岩样的水合物饱和度,%。

2 结果与分析

2.1 不同围压下沉积物声波响应特征

围压由低升高实验条件下,对含水合物的泥质粉砂岩岩样和粉砂岩岩样进行声波测试。两类沉积物岩样各进行5组实验,每组实验的水合物饱和度分别设定

为0、20%、40%、60%、80%。两类沉积物岩样在不同围压条件下的声波测试结果如图3和图4所示,泥质粉砂岩的纵波波速为2047.79~3681.45 m/s,横波波速为1275.04~2323.69 m/s;粉砂岩的纵波波速为1685.42~3268.17 m/s,横波波速为1042.99~1985.34 m/s。

从图3可以看出,水合物饱和度20%的泥质粉砂岩在围压达到3 MPa后,纵波速度不再发生变化;水合物饱和度40%的泥质粉砂岩在围压达到3.5 MPa后,纵波速度不再发生变化;水合物饱和度60%的泥质粉砂岩在围压达到4 MPa后,纵波速度不再发生变化;水合物

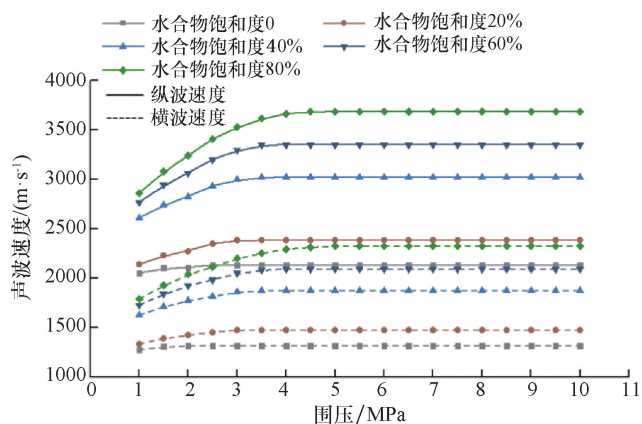


图3 不同围压下泥质粉砂岩声波测试结果

Fig. 3 Sonic testing results of siltstones with varied NGH saturations

从图3可以看出,围压1 MPa时,20%水合物饱和度的泥质粉砂岩纵横波速度分别为2138.09、1333.09 m/s,40%水合物饱和度的泥质粉砂岩纵横波速度分别为2608.67、1626.97 m/s,80%水合物饱和度的泥质粉砂岩纵横波速度分别为2856.54、1786.23m/s;围压3 MPa时,20%水合物饱和度的泥质粉砂岩纵横波速度分别为2382.33、1473.99m/s,40%水合物饱和度泥质粉砂岩的纵横波速度分别为2996.57、1859.90m/s,80%水合物饱和度的泥质粉砂岩纵横波速度分别为3526.01、2200.63 m/s。数据表明,在围压未达到围压饱和点之前,随着围压的升高,泥质粉砂岩的纵横波速度会随之增大,且高水合物饱和度岩样的声波增速大于低水合物饱和度岩样;同时,高水合物饱和度与低水合物饱和度岩样之间的声波增速差距随着围压升高而加大。从图4可以看出,粉砂岩的声波速度同样随围压升高而增大,直至达到围压饱和点,同时粉砂岩的声波速度变化趋势相对于泥质粉砂岩的波速变化较缓。

饱和度80%的泥质粉砂岩在围压达到4.5 MPa后,纵波速度不再发生变化。泥质粉砂岩的横波速度也具有同样的变化规律。测试结果表明,当围压达到一定值时,泥质粉砂岩的纵、横波波速均不再变化,这个值点称为围压饱和点;并且,随水合物饱和度的增大,泥质粉砂岩的围压饱和点也逐渐变大,其纵、横波围压饱和点相差0.5 MPa。从图4可以看出,粉砂岩同样存在围压饱和点现象,其围压饱和点变化规律与泥质粉砂岩类似,但粉砂岩的围压饱和点较高,基本都在10 MPa以上,粉砂岩的纵、横波围压饱和点相差1 MPa。

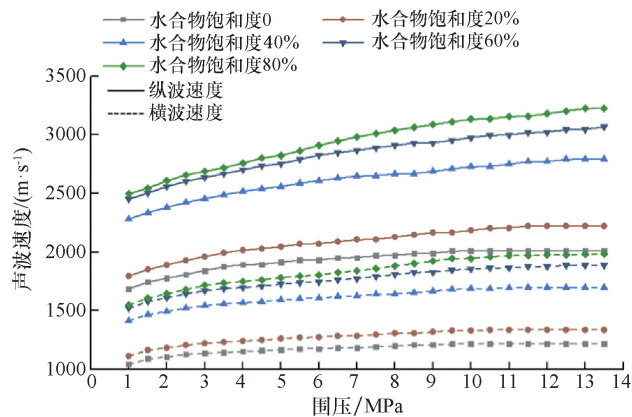


图4 不同围压下粉砂岩声波测试结果

Fig. 4 Sonic testing results of muddy siltstones with varied NGH saturations

实验观察到的现象可以解释为,在含水合物沉积物中,水合物的存在会填充沉积物颗粒之间的孔隙,也会改变沉积物颗粒之间的胶结状态^[20]。在含水合物沉积物中,水合物首先在孔隙流体中形成,当其饱和度达到一定值时,水合物开始胶结沉积物颗粒^[11]。当沉积物的水合物饱和度一定时,随着围压的增大,沉积物的孔隙度减小,使悬浮在孔隙流体中的水合物更易胶结沉积物颗粒,使沉积物的固结程度升高,水合物也更容易充满沉积物的孔隙和吼道,从而使含水合物沉积物的声波速度增大。当围压达到围压饱和点时,水合物的量不足以胶结更多沉积物颗粒,不足以充满更大的孔隙和吼道,所以沉积物的纵、横波速度不再变化。随着沉积物水合物饱和度的增大,使水合物可以更易胶结沉积物颗粒和充填孔隙,成为沉积物骨架的一部分,因此高水合物饱和度沉积物的围压饱和点更大。

2.2 不同水合物饱和度下沉积物声波响应特征

不同水合物饱和度的泥质粉砂岩和粉砂岩沉积物

岩样在特定围压下的声波测试结果如图5、图6所示。由于围压饱和点的存在,图5、图6只展示了泥质粉砂岩和粉砂岩到达围压饱和点之前的声波变化情况。从测试结果可以看出,在水合物饱和度小于20%时,两类沉积物的纵、横波速度随水合物饱和度的增大而增长较慢,特别是在水合物饱和度小于10%时,两类沉积物的纵、横波速度几乎保持不变。在水合物饱和度大于20%后,两类沉积物的纵、横波速度随水合物饱和度的增加而增大,特别是水合物饱和度由20%升至40%时,两类沉积物的纵、横波速度随水合物饱和度的增加而

快速增大,增幅达22%以上。在水合物饱和度大于60%时,两类沉积物的纵、横波的增大速度有所降低。例如围压5 MPa条件下,水合物饱和度为0的泥质粉砂岩纵波速度为2130.81 m/s,水合物饱和度为20%的泥质粉砂岩纵波速度为2382.33 m/s,增幅为11.80%;水合物饱和度为40%的泥质粉砂岩纵波速度为3019.01 m/s,比水合物饱和度为0时的波速提高了41.68%;随后,岩样纵波速度随着水合物饱和度的升高按10%增幅增加。相比于纵波变化,两类沉积物的横波增速整体比较平稳,横波变化规律与纵波相似。

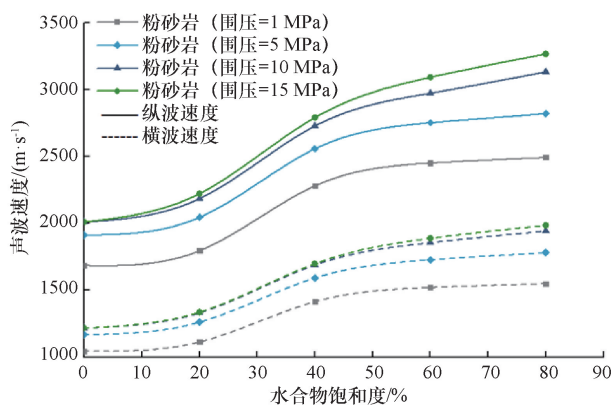


图5 粉砂岩声波测试结果

Fig. 5 Sonic testing results of siltstones under different confining pressures

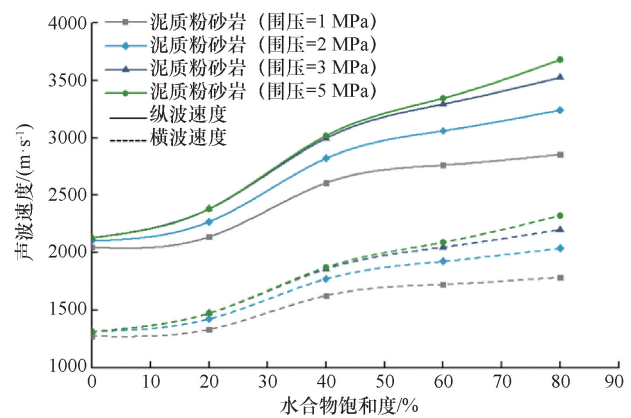


图6 泥质粉砂岩声波测试结果

Fig. 6 Sonic testing results of muddy siltstones under different confining pressures

分析泥质粉砂岩和粉砂岩的声波变化规律可知,在水合物饱和度小于20%时,特别是水合物饱和度小于10%时,水合物呈分散状态,主要在沉积物孔隙流体中生成,生成的水合物对于沉积物整体声速影响较小,而当水合物饱和度高于20%时,沉积物孔隙流体中的水合物开始聚结,沉积物中较小的孔隙及吼道会首先被充满,成为沉积物骨架的一部分,使得沉积物的纵、横波速度增大,水合物聚结充满沉积物小孔隙的整个过程也是纵、横波速度增大最快的时候。当水合物饱和度进一步增大(大于40%)时,沉积物中较小的孔隙被充填完毕,开始充填较大的孔隙,相对的充填作用开始减弱,水合物聚结成为沉积物骨架的一部分的效应减弱,从而使声速增大的速度减缓^[6,11]。

2.3 两类沉积物声波响应差异

对比两类含水合物沉积物声波测试结果发现,水合物饱和度相同、围压相同时泥质粉砂岩的纵、横波速

度均大于粉砂岩的纵、横波速度,随着水合物饱和度与围压的增加,两类沉积物的波速差距更加明显。泥质粉砂岩的围压饱和点小于粉砂岩的围压饱和点,并且两类沉积物的围压饱和点相差较大,差距在7~10 MPa之间。在泥质粉砂岩的围压达到饱和点之前,泥质粉砂岩与粉砂岩的纵波速度最小相差12.75%、最大相差33.00%,平均相差21.90%;横波速度最小相差13.47%、最大相差31.36%,平均相差21.54%。水合物饱和度与围压变化时对两类沉积物的波速影响较大,并且对泥质粉砂岩波速的影响程度大于对粉砂岩波速的影响程度,随着水合物饱和度与围压增大,泥质粉砂岩声波的增速大于粉砂岩声波的增速。

出现上述现象的主要原因是,与粉砂岩相比,泥质粉砂岩沉积物的平均颗粒粒径和孔隙较小,在泥质粉砂岩沉积物中,由于高岭土颗粒粒径较小,沉积物内小孔隙相对较多,水合物更易胶结沉积物颗粒和充满孔

隙及吼道,成为沉积物骨架的一部分,因此,在水合物饱和度相同、围压相同时,泥质粉砂岩声波速度大于粉砂岩声波速度;在水合物饱和度与围压增加时,泥质粉砂岩的波速增长大于粉砂岩的波速增长。粉砂岩沉积物的颗粒粒径较大,在围压逐渐增大的过程中,其孔隙度减小的速度慢于泥质粉砂岩,水合物充满沉积物孔隙及吼道成为沉积物骨架一部分的过程相对滞后,使得粉砂岩的围压饱和点大于泥质粉砂岩的围压饱和点,粉砂岩声波速度随围压变化的速度相对较慢。

3 结论

对中国南海两类含水合物沉积物泥质粉砂岩和粉砂岩的声波特性进行了实验研究,得到如下结论。

1) 在相同水合物饱和度条件下,两类沉积物的波速随围压升高而变大,但围压升高至围压饱和点后,两类沉积物的波速都不再变化。随着围压的升高,水合物饱和度较高的沉积物波速增速高于水合物饱和度较低的沉积物波速增速;同时,不同水合物饱和度沉积物之间的波速增速差距也会随着围压升高而加大。

2) 在相同围压条件下,两类沉积物的波速均会随着水合物饱和度增加而增大,增速呈“慢-快-慢”趋势,其中水合物饱和度 20%~40% 为沉积物波速快速增长区间,增幅达 22% 以上。随着水合物饱和度的增大,两类沉积物的围压饱和点逐渐变大,粉砂岩的围压饱和点大于泥质粉砂岩的围压饱和点,两者围压饱和点差距在 7~10 MPa。

3) 围压和水合物饱和度的变化对含水合物沉积物的声波速度影响较大,含水合物沉积物声波速度对围压和水合物饱和度的变化敏感,泥质粉砂岩波速受影响程度大于粉砂岩沉积物受影响程度。相同水合物饱和度和相同围压条件下,泥质粉砂岩的纵、横波速度均大于粉砂岩沉积物的声波速度,且随着围压和水合物饱和度的增加,两类沉积物的波速差距更加明显。

这些研究成果可为未来南海水合物地球物理勘探的信号解释提供参考依据。

参考文献(References)

- [1] Boswell R. Is gas hydrate energy within reach?[J]. *Science*, 2009, 325(5943): 957-958.
- [2] 赵生才. 气体水合物的研究现状与科学问题[J]. *科技导报*, 2001, 18(7): 11-13.
- [3] Zhao Shengcai. Present state in the research of gas hydrates and its scientific problems[J]. *Science & Technology Review*, 2001, 18(7): 11-13.
- [4] Chong Z R, Yang S H B, Babu P, et al. Review of natural gas hydrates as an energy resource: prospects and challenges[J]. *Applied Energy*, 2016, 162: 1633-1652.
- [5] Boswell R, Collett T S. Current perspectives on gas hydrate resources[J]. *Energy & Environmental Science*, 2011, 4(4): 1206-1215.
- [6] 张剑. 多孔介质中水合物饱和度与声波速度关系的实验研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- [7] Zhang Jian. Experimental study on the relationship between gas hydrate saturation and acoustic velocities in porous media[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008.
- [8] 胡高伟. 南海沉积物的水合物声学特性模拟实验研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2010.
- [9] Hu Gaowei. Experimental study on acoustic responses of gas hydrates to sediments from South China Sea[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2010.
- [10] 方跃龙, 刘昌岭, 赵仕俊, 等. 天然气水合物声学测试技术[J]. *石油仪器*, 2014, 28(6): 68-71.
- [11] Fang Yuelong, Liu Changling, Zhao Shijun, et al. Acoustic testing technique for gas hydrate[J]. *Petroleum Instruments*, 2014, 28(6): 68-71.
- [12] 赵仕俊, 徐美, 李申申. 天然气水合物物性分析测试技术[J]. *石油仪器*, 2013, 27(4): 1-5.
- [13] Zhao Shijun, Xu Mei, Li Shenshen. Gas hydrate physical property analysis and test technology[J]. *Petroleum Instruments*, 2013, 27(4): 1-5.
- [14] Priest J A, Clayton C R I. Seismic properties of methane gas hydrate-bearing sand[C]//Proceedings of 5th International Conference on Gas Hydrate. Miami: Curran Associates Inc, 2005: 440-447.
- [15] Winters W J, Waite W F, Mason D H, et al. Methane gas hydrate effect on sediment acoustic and strength properties[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2007, 56(1-3): 127-135.
- [16] 胡高伟, 业渝光, 张剑, 等. 沉积物中天然气水合物微观分布模式及其声学响应特征[J]. *天然气工业*, 2010, 30(3): 120-124.
- [17] Hu Gaowei, Ye Yuguang, Zhang Jian, et al. Micro-models of gas hydrate and their impact on the acoustic properties of the host sediments[J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 30(3): 120-124.
- [18] 梁金强, 王宏斌, 苏新, 等. 南海北部陆坡天然气水合物成藏条件及其控制因素[J]. *天然气工业*, 2014, 34(7): 128-135.
- [19] Liang Jinqiang, Wang Hongbin, Su Xin, et al. Natural gas

- hydrate formation conditions and the associated controlling factors in the northern slope of the South China Sea[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(7): 128-135.
- [13] 于兴河, 王建忠, 梁金强, 等. 南海北部陆坡天然气水合物沉积成藏特征[J]. *石油学报*, 2014, 35(2): 253-264.
Yu Xinghe, Wang Jianzhong, Liang Jinqiang, et al. Depositional accumulation characteristics of gas hydrate in the northern continental slope of South China Sea[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(2): 253-264.
- [14] 李淑霞, 陈月明, 王晓红, 等. 填砂模型中天然气水合物合成及降压分解实验研究[J]. *油气田地面工程*, 2009, 28(7): 1-3.
Li Shuxia, Chen Yueming, Wang Xiaohong, et al. Experimental research on natural gas hydrates forming and depressurized decomposition in the sand-packed model[J]. *Oil-Gas Field Surface Engineering*, 2009, 28(7): 1-3.
- [15] 李明川, 樊栓狮, 赵金洲. 多孔介质中天然气水合物形成实验研究[J]. *天然气工业*, 2006, 26(5): 27-28.
Li Mingchuan, Fan Shuanshi, Zhao Jinzhou. Experimental Study on Formation of Gas Hydrate in Porous Medium[J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(5): 27-28.
- [16] 祁影霞, 杨光, 汤成伟, 等. 天然气水合物合成实验[J]. *低温工程*, 2009(4): 11-14.
Qi Yingxia, Yang Guang, Tang Chengwei, et al. Formation experiment of natural gas hydrate[J]. *Cryogenics*, 2009(4): 11-14.
- [17] 李令东, 程远方, 孙晓杰, 等. 水合物沉积物试验岩样制备及力学性质研究[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2012, 36(4): 97-101.
Li Lingdong, Cheng Yuanfang, Sun Xiaojie, et al. Experimental sample preparation and mechanical properties study of hydrate bearing sediments[J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 2012, 36(4): 97-101.
- [18] Ahmadi G, Ji C, Smith D H. Natural gas production from hydrate dissociation: an axisymmetric model[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2007, 58(1-2): 245-258.
- [19] Jr Sloan E D. *Clathrate hydrates of natural gases*[M]. New York: Marcel Dekker Inc, 1998.
- [20] Tinivella U, Accaino F. Compressional velocity structure and Poisson's ratio in marine sediments with gas hydrate and free gas by inversion of reflected and refracted seismic data (South Shetland Islands, Antarctica) [J]. *Marine Geology*, 2000, 164(1-2): 13-27.

Acoustic properties of multi-type natural gas hydrate-bearing sediments

ZHANG Huaiwen¹, CHENG Yuanfang¹, ZHU Haitao², SHI Jihui¹, HAN Xiuting¹

1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

2. Qinghai Oilfield Fifth Plant, Haixi 816499, China

Abstract In order to understand the acoustic characteristics and differences of muddy siltstone hydrate sediment (MSHS) and siltstone hydrate sediment (SHS) in the shallow seabed of South China Sea, a simulation experiment is conducted to investigate the acoustic response characteristics of these two hydrate sediments with the ultrasonic detection technology. The results show that the acoustic velocities of these two hydrate sediments will increase with the increase of effective confining pressure. However, when the effective confining pressure increases to the effective confining pressure saturation point, the acoustic velocities of these two hydrate sediments will not change anymore. Meanwhile, with the increase of hydrate saturation, the effective confining pressure saturation points of these two hydrate sediments will also increase. The effective confining pressure saturation point of MSHS is higher than that of SHS and the difference is between 7-10 MPa. Under the same effective confining pressure, the larger the hydrate saturation, the faster the acoustic velocity for both hydrate sediments, showing a "slow-fast-slow" tendency. The 20%-40% of hydrate saturation is the fast increasing range of the acoustic velocity, with an increase over 22%. The acoustic velocity of MSHS is greater than that of SHS under the same experiment condition. Furthermore, the change of hydrate saturation and effective confining pressure have a great effect on the acoustic velocity of these two hydrate sediments, and acoustic velocity has a greater influence on MSHS than on SHS.

Keywords natural gas hydrate; muddy siltstone; siltstone; acoustic property ●



(责任编辑 韩星明)