

文章编号: 1000-0747(2017)06-0961-06 DOI: 10.11698/PED.2017.06.14

天然气水合物开采井防砂充填层砾石尺寸设计方法

李彦龙^{1,2}, 胡高伟^{1,2}, 刘昌岭^{1,2}, 吴能友^{1,2}, 陈强^{1,2}, 刘乐乐^{1,2}, 李承峰^{1,2}

(1. 青岛海洋地质研究所 国土资源部天然气水合物重点实验室, 山东青岛 266071; 2. 青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东青岛 266071)

基金项目: 国家自然科学基金(41606078); 国家重点研发计划深海专项(2017YFC0307600); 青岛海洋科学与技术国家实验室开放基金(QNLM2016ORP0203, QNLM2016ORP0207)

摘要: 针对水合物储集层流体抽取法开采过程中面临的出砂问题, 提出了针对黏土质粉砂型水合物储集层的“防粗疏细”式防砂充填层砾石尺寸设计方法, 并以中国南海神狐海域 X 站位为例进行了具体分析。以 X 站位为例, 分析了水合物储集层地层砂基本特性, 对地层砂粗、细组分进行划分, 并分别计算了疏通细组分和阻挡粗组分所需的防砂充填层砾石尺寸范围, 通过求解两者的交集来确定最佳砾石尺寸。研究表明, X 站位水合物储集层为分选性、均匀性极差且黏土含量较高的粉砂质储集层, 上、下部储集层防砂充填层最佳砾石尺寸设计结果分别为 143~215 μm 和 240~360 μm。在现场施工无法严格满足分层防砂要求的情况下, 为了兼顾上、下部储集层, 在满足充填强度的前提下, 推荐 X 站位防砂充填层砾石尺寸为 215~360 μm。图 3 表 2 参 22

关键词: 天然气水合物; 试采; 出砂管理; 防砂充填砾石; 中国南海; 神狐海域

中图分类号: TE358.1

文献标识码: A

Gravel sizing method for sand control packing in hydrate production test wells

LI Yanlong^{1,2}, HU Gaowei^{1,2}, LIU Changling^{1,2}, WU Nengyou^{1,2}, CHEN Qiang^{1,2}, LIU Lele^{1,2}, LI Chengfeng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Gas Hydrate, Ministry of Land and Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China; 2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China)

Abstract: To deal with sand production problems during the process of producing natural gas from hydrate-bearing sediments (HBS) using reservoir-fluid extraction method, a new gravel sizing method for sand control packing named “Hold coarse while eliminate fine particle (HC & EF method)” was developed for the clayey hydrate-bearing formations. Site X, in Shenhu area, South China Sea was taken as an example to describe detailed gravel sizing procedure. On the basis of analyzing basic particle size distribution (PSD) characteristics of HBS at Site X, the formation sand was divided into two components, which are coarse component and fine component. The gravel sizes for retaining coarse component and eliminate fine component were calculated, respectively. Finally, intersection of these two gravel sizes was taken as the proper gravel size for Site X. The research results show that the formation at Site X is clayey sand with poor sorting and uniformity, proper gravel size for upper segment packing is 143–215 μm, while that for lower segment packing is 240–360 μm. In consideration of the difficulty of layered sand control operation on offshore platform, proper gravel packing size for Site X is recommended as 215–360 μm.

Key words: gas hydrate; production test; sand management; sand control gravel; South China Sea; Shenhu area

引用: 李彦龙, 胡高伟, 刘昌岭, 等. 天然气水合物开采井防砂充填层砾石尺寸设计方法[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(6): 961-966.

LI Yanlong, HU Gaowei, LIU Changling, et al. Gravel sizing method for sand control packing in hydrate production test wells[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(6): 961-966.

0 引言

中国南海海域蕴藏大量的天然气水合物(简称水合物)资源^[1-2], 2017年由 中国地质调查局主持在中国南海神狐海域开展中国首次水合物试开采。从 2017年 5月 10日成功产气点火至 5月 18日国土资源部宣布试

采成功, 累计产出超过 $12 \times 10^4 \text{ m}^3$ 天然气, 测试甲烷含量高达 99.5%, 在此期间平均日产超过 $1.6 \times 10^4 \text{ m}^3$, 使中国成为全球首个实现在海域粉砂质储集层水合物开采中获得连续稳定产气的国家^[3]; 至 7月 9日顺利关井, 总产气量达 $30.9 \times 10^4 \text{ m}^3$, 综合平均日产超过 5 000 m^3 ^[4]。获得的大量测试数据为下一步研究工作奠定了

坚实基础。由于水合物储集层通常属于未固结、弱固结或裂隙发育地层,水合物分解产出过程中储集层出砂现象不可避免^[5-6]。特别是中国南海水合物储集层为未固结超细粉砂储集层,出砂问题成为制约水合物资源有效开发的关键因素^[7-8],合理有效的防砂方案设计是保证水合物成功开采的关键之一。

中国南海北部神狐海域水合物储集层具有埋藏浅、胶结差、泥质含量高等特点^[9],属于未固结超细粉砂储集层,充填型防砂工艺(包括常规管内/管外砾石充填防砂和陶粒/石英砂预充填防砂筛管防砂等)是此类储集层最有效的防砂工艺之一^[10-11]。防砂充填层既是挡砂屏障又是地层流体的入井通道,较大的砾石尺寸有利于尽可能降低防砂附加表皮,释放水合物储集层产能,但同时可能导致地层砂大量产出,造成砂埋、地层亏空加剧等工程风险;较小的砾石尺寸虽然挡砂效果好,但极易发生细质或泥质颗粒堵塞,对水合物井的产能产生严重影响。因此,防砂充填层砾石尺寸的设计应该从防止挡砂层堵塞和适度阻挡地层砂两方面考虑。

目前,针对常规油气井的充填型防砂砾石尺寸设计主要有以下两种基本思路:①完全挡砂,要求井口产出液中固相含量小于0.3%;②适度防砂,要求井口产出液中固相含量小于0.5%^[12]。然而,对于黏土质粉砂型水合物储集层而言,仅泥质含量就高达30%以上,而泥质、细颗粒是造成防砂充填层堵塞的主要堵塞物^[13-14],因此设计防砂充填层砾石尺寸时必须首先保证这部分堵塞物能够顺利排出挡砂层。由于堵塞物含量较大,产出液中的固相含量势必远超过针对常规油气井规定的固相含量上限。因此,以上两种设计思路均不适用于黏土质粉砂型水合物储集层。

本文提出针对黏土质粉砂型水合物储集层的防砂充填层砾石尺寸设计方法,以中国南海神狐海域X站位为例说明该设计方法的具体实现步骤,并针对X站位提出防砂充填层砾石尺寸设计建议。

1 防砂充填层砾石尺寸设计方法

考虑水合物储集层特性,水合物生产井防砂充填层砾石尺寸设计的目标是:既保证地层堵塞物顺利排出,又防止地层大颗粒大面积产出。为此,本文提出“防粗疏细”的砾石尺寸设计思路,即:使地层砂细组分完全通过防砂充填层从而防止堵塞,同时保证地层砂粗组分被挡在防砂充填层外围,从而既疏通近井地层、保证产能,又防止地层大量出砂造成垮塌。

“防粗疏细”式防砂充填层砾石尺寸设计的具体

步骤是:①获取原始地层砂粒径分布特征参数,分析地层砂均匀性和分选性,初步设定充填层砾石尺寸设计要求;②利用原始地层砂粒径分布曲线,经过一定的数学转化,将地层砂划分为细组分和粗组分两种组分,并找到细组分与粗组分的分界点粒径值,粗组分、细组分分界点粒径值即为细组分最大粒径值,根据该粒径值确定使防砂充填层不发生细组分堵塞的最小砾石尺寸;③从原始地层砂粒径分布曲线中去除细组分,重新绘制粗组分粒径分布曲线,并分析地层砂粗组分的粒径分布特性;④基于完全挡砂思路的防砂充填层挡砂精度设计模型,计算完全阻挡粗组分所需的砾石尺寸范围;⑤求解疏通细组分所需的防砂充填层砾石尺寸范围与阻挡粗组分所需的防砂充填层砾石尺寸范围的交集,确定对应层位的最佳砾石尺寸。

该设计方法还需要考虑分层防砂、泥质含量等因素的影响,其设计结果也需要与现有工业砾石尺寸进行匹配,才能满足施工要求。

2 原始地层砂特性分析

生产层位地层砂粒径分布规律是防砂充填层砾石尺寸设计的基础。中国南海神狐海域水合物储集层具有埋藏浅、渗透率低、胶结程度差、泥质含量高等基本特性。图1为神狐海域X站位储集层粒径分布范围,可见中值粒径在6.0~15.9 μm。储集层泥质含量在25%~36%,其中蒙脱石相对含量约为38%,伊利石相对含量约为32%,属黏土质粉砂^[15]。根据实际工程地质资料,X站位地层砂粒径随着深度的增大而逐渐增大。图1中粒径分布范围的左边界代表X站位下部储集层的典型地层砂粒径分布曲线,右边界代表X站位上部储集层的典型地层砂粒径分布曲线,X站位储集层整体粒径分布曲线介于两者之间。

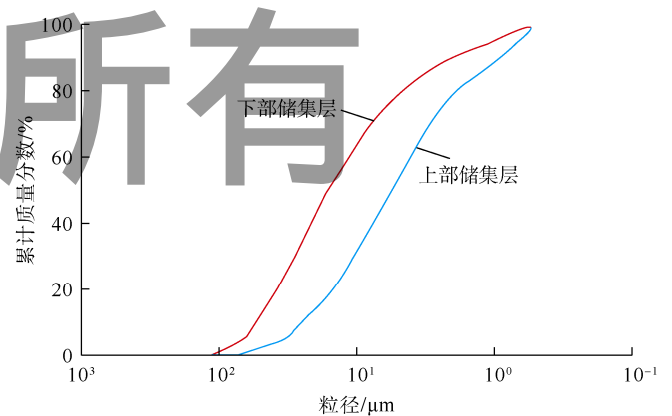


图1 X站位水合物储集层地层砂粒径分布范围

防砂充填层砾石尺寸设计除了需要考虑地层砂中值粒径的影响，还需要考虑地层砂分选系数、均匀系数等参数的影响^[16]。典型的地层砂分选系数计算公式有沉积学公式（见（1）式）、Berg公式（见（2）式）等^[17]。

$$F = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6.6} \quad (1)$$

其中 $\phi_{84} = -\log_2 d_{84}$ $\phi_{16} = -\log_2 d_{16}$
 $\phi_{95} = -\log_2 d_{95}$ $\phi_5 = -\log_2 d_5$

$$F = \frac{\phi_{90} - \phi_{10}}{2} \quad (2)$$

其中 $\phi_{90} = -\log_2 d_{90}$ $\phi_{10} = -\log_2 d_{10}$
 基于（1）式、（2）式的地层砂分选性评价标准为： $F < 0.5$ ，分选性良好； $0.5 < F < 1.0$ ，分选性中等； $1.0 < F < 2.0$ ，分选性差； $F > 2.0$ ，分选性极差^[17]。基于沉积学公式和 Berg 公式计算的 X 站位地层砂分选系数分别为 1.85~2.30 和 2.35~2.95。总体而言，Berg 公式的计算结果略大于沉积学公式的计算结果，但综合考虑两者的计算结果可以认为，X 站位地层砂分选性极差。地层砂分选性越差，防砂充填层挡砂越困难，所需的防砂充填层有效挡砂介质粒径范围越宽，防砂效果和抗堵塞效果都会变差。

地层砂均匀系数的计算公式^[18]为：

$$C = \frac{d_{40}}{d_{90}} \quad (3)$$

基于（3）式的地层砂均匀性评价标准为： $C < 5$ ，均匀； $5 < C < 8$ ，不均匀； $C > 8$ ，极不均匀。X 站位地层砂均匀系数计算结果为 8.4~12.3，为极不均匀砂^[18]。

因此，X 站位水合物储集层地层砂为分选性极差、不均匀性极强且泥质含量很高的黏土质粉砂。这给防砂充填层砾石尺寸的设计带来了巨大挑战。

3 地层砂粗、细组分特性分析

3.1 地层砂粗、细组分划分

Markestad 等^[19]研究地层砂向井筒的侵入过程时发现，一个地层砂样总能分成粗、细两个组分。对于中国南海神狐海域的未固结黏土质粉砂储集层，当水合物完全分解后，可以认为地层砂细组分和黏土矿物主要以游离状态存留于粗组分所形成的孔隙中。在井底生产压差条件下，水合物分解产生的气、水将携带细组分向防砂充填层流动并侵入防砂充填层。为了兼顾产能和储集层整体稳定性，一方面要疏通细组分，降低近井地带污染程度，促进水合物分解，提高流体抽取法开采井的产能；另一方面必须防止粗组分的产出，从而维持地层的基本构架，防止地层大面积亏空。地层砂粗组分、细组分划分的基本方法如下。

①为了得到粗、细组分的分界点粒径，需要按照颗粒数量而不是质量分数来进行粒径分析。根据原始地层砂粒径分布曲线，按照对应的粒径及颗粒密度将质量分数换算成颗粒数量，换算公式^[18]为：

$$N = \frac{MW}{\rho \left(\frac{4}{3} \pi d^3 \right)} \quad (4)$$

②对颗粒数量 N 取常用对数，绘制 $d-\lg N$ 关系曲线。X 站位上、下部储集层地层砂典型 $d-\lg N$ 关系如图 2 所示。

③得到 $d-\lg N$ 关系曲线后可以发现，随着 d 的增大 $\lg N$ 逐渐减小且存在某个临界点，该临界点之前 $\lg N$ 随着 d 的增大迅速减小，临界点之后 $\lg N$ 随着 d 的增大变化幅度较小。本文定义该临界点所对应的粒径即为地层砂粗、细组分的分界点粒径。由图 2 可知，X 站位上、下部储集层地层砂粗、细组分分界点粒径分别为 5.3 μm 和 7.2 μm 。

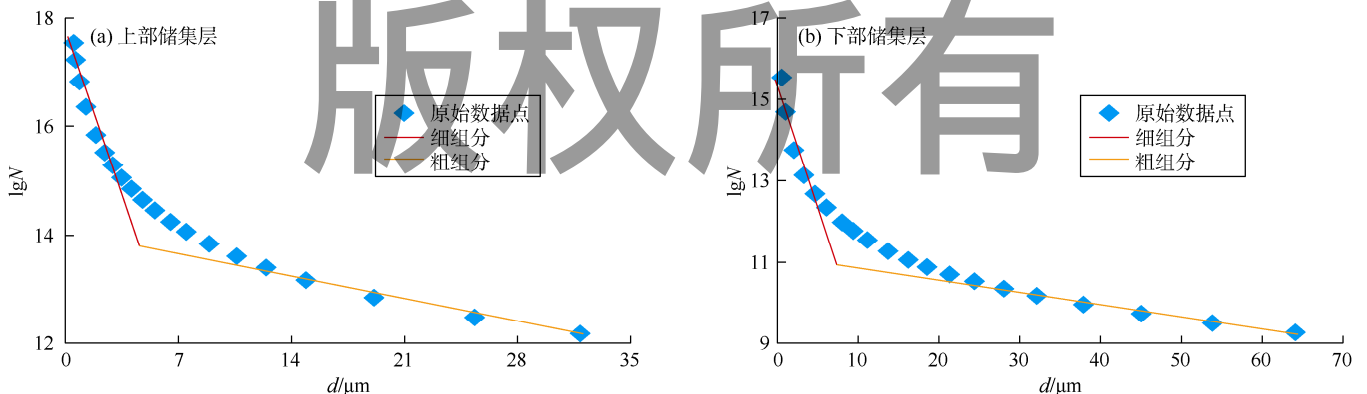


图 2 X 站位地层砂粗、细组分划分图

3.2 地层砂粗组分特性分析

在对地层砂粗、细组分进行划分后,需要重新对去除细组分的地层砂进行粒径分布规律分析,找出地层砂粗组分的特征粒径值,从而为砾石尺寸设计提供依据。

根据图 2 的地层砂粗、细组分划分结果,从图 1 的上、下部储集层地层砂粒径分布曲线中分别去除粒径小于 $5.3\ \mu\text{m}$ 和 $7.2\ \mu\text{m}$ 的细组分,然后重新绘制地层砂粗组分粒径分布曲线(见图 3)。

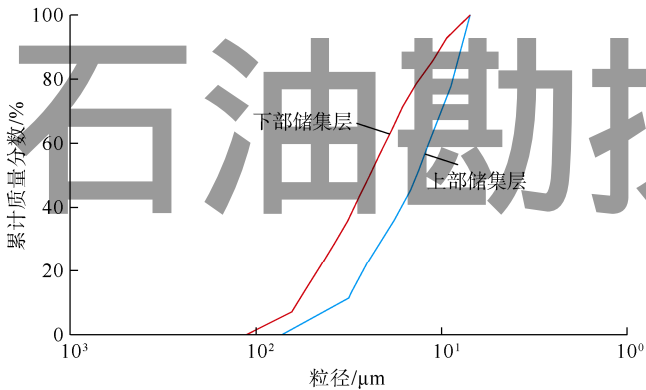


图 3 X 站位地层砂粗组分粒径分布曲线

基于图 3 计算得到 X 站位地层砂粗组分粒径分布规律特征参数:中值粒径为 $15.9\sim 24.4\ \mu\text{m}$,利用沉积学公式和 Berg 公式计算的分选系数分别为 $0.9\sim 1.2$ 和 $1.1\sim 1.5$,均匀系数为 $1.98\sim 2.98$ 。可以看出,去除细组分后,X 站位地层砂分选系数降低,表明地层砂分选性变好;均匀系数显著降低,地层砂由极不均匀砂变为均匀砂。分选性良好的均匀砂与分选性极差的极不均匀砂相比防砂难度显著降低,因此疏通地层细组分的砾石尺寸设计思路有利于延长防砂有效期和试采周期。

4 防砂充填层砾石尺寸设计

4.1 疏通细组分所需的最小砾石尺寸

Saucier 等^[20]通过驱替实验系统地研究了驱替后砾石层、地层砂中值粒径之比与砾石层渗透率的关系后发现:不考虑泥质含量影响的前提下,当砾石层、地层砂中值粒径之比大于 14 时,地层砂可自由通过砾石层。因此,水合物储集层流体产出过程中,为了尽可能防止细组分堵塞,最小砾石尺寸应为:

$$D'_{\text{fmin}} = 14d_{\text{fmax}} \quad (5)$$

对于 X 站位上部储集层:

$$D'_{\text{fmin}} = 14 \times 5.3\ \mu\text{m} = 74.2\ \mu\text{m} \quad (6)$$

对于 X 站位下部储集层:

$$D'_{\text{fmin}} = 14 \times 7.2\ \mu\text{m} = 100.8\ \mu\text{m} \quad (7)$$

除了地层砂细组分,水合物储集层中含有大量的蒙脱石等黏土矿物,这些泥质成分是影响挡砂介质堵塞程度的主要因素之一^[21]。泥质含量越高,地层产出物对挡砂介质的堵塞速度及最终堵塞程度越大。马帅等^[22]通过实验证明:随着泥质含量的增大,相同中值粒径、相同均匀系数的地层砂所需的最佳砾石尺寸增大,当泥质含量达到 21.36% 时,完全挡砂条件下的最佳砾石尺寸为不含泥质时最佳砾石尺寸的 1.54 倍。因此,本文提出砾石层挡砂精度损失率的概念,即泥质含量增大造成的防砂充填层砾石尺寸的增大程度,用 R_m 表示。

考虑泥质含量的影响,为了尽可能防止细组分及泥质堵塞,最小砾石尺寸应为:

$$D_{\text{fmin}} = R_m D'_{\text{fmin}} \quad (8)$$

因此,对于 X 站位上、下部储集层,疏通细组分所需的最小砾石尺寸分别为 $118.7\ \mu\text{m}$ 和 $161.3\ \mu\text{m}$ 。

4.2 阻挡粗组分所需的砾石尺寸范围

在满足完全疏通细组分的前提下,可以按照常规防砂充填层砾石尺寸设计方法设计完全阻挡粗组分所需的砾石尺寸。

目前常用的防砂充填层砾石尺寸设计方法包括 Karpoff 法、Tausch & Corley 法、Saucier 法等。其中,Saucier 法和 Tausch & Corley 法分别以地层砂 d_{50} 、 d_{10} 值作为防砂充填层砾石尺寸设计点,具体砾石尺寸范围分别如(9)式、(10)式所示。

$$\begin{cases} D_{\text{cmin}} = 5d_{50} \\ D_{\text{cmax}} = 6d_{50} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} D_{\text{cmin}} = 4d_{10} \\ D_{\text{cmax}} = 6d_{10} \end{cases} \quad (10)$$

Karpoff 法根据地层砂均匀系数和中值粒径确定砾石尺寸范围:

$$\begin{cases} D_{\text{cmin}} = 5d_{50}, D_{\text{cmax}} = 10d_{50} & C < 3 \\ D_{\text{cmin}} = 4d_{50}, D_{\text{cmax}} = 8d_{50} & C \geq 3 \end{cases} \quad (11)$$

结合图 3 及(9)~(11)式可得到阻挡地层砂粗组分所需的防砂充填层砾石尺寸范围,如表 1 所示。

表 1 阻挡地层砂粗组分所需的防砂充填层砾石尺寸范围

储集层位置	砾石尺寸/ μm		
	Tausch & Corley 法	Saucier 法	Karpoff 法
上部	143~215	69~82	69~137
下部	240~360	122~146	122~244

4.3 X 站位防砂充填层最佳砾石尺寸

水合物开采井防砂充填层砾石尺寸的设计应该同时满足完全疏通细组分和阻挡粗组分的要求。因此，应该求解疏通细组分所需的防砂充填层砾石尺寸范围与阻挡粗组分所需的防砂充填层砾石尺寸范围的交集（见表2），以确定最佳砾石尺寸。若两者的交集为空集，说明该砾石尺寸设计方法不适用于黏土质粉砂型水合物储集层；反之，则两者的交集即为防砂充填层最佳砾石尺寸。

表2 X 站位防砂充填层砾石尺寸设计结果

储集层位置	砾石尺寸/ μm		
	Tausch & Corley 法	Saucier 法	Karpoff 法
上部	[143, 215]	\emptyset	[118.7, 137.0]
下部	[240, 360]	\emptyset	[161.3, 244.0]

由表2可知，Saucier法不适用于黏土质粉砂型水合物储集层，基于Karpoff法的砾石尺寸设计结果偏保守，而基于Tausch & Corley法的设计结果则相对冒险。这就需要在防砂效果和产能要求之间寻求平衡。在井筒携砂条件苛刻且沉砂口袋不足的情况下，可牺牲部分产能，选择基于Karpoff法的设计结果；在井筒携砂条件相对宽松且有液流注入管线防止砂沉的情况下，可选择基于Tausch & Corley法的设计结果。需要注意的是，无论是Tausch & Corley法还是Karpoff法，都是基于砾石层完全阻挡地层砂粗组分这一假设的设计结果。理论上讲，在井底能够形成稳定砂桥的条件下，基于Tausch & Corley法的设计结果即可以实现完全阻挡地层砂粗组分。因此，为了进一步释放水合物储集层产能，本文推荐以Tausch & Corley法的设计结果作为中国南海黏土质粉砂型水合物储集层开采井防砂充填层砾石尺寸选择的依据。则X站位上部储集层防砂充填层最佳砾石尺寸为143~215 μm （约65~90目），下部储集层防砂充填层最佳砾石尺寸为240~360 μm （约45~62目）。但是在海上平台施工过程中，分层防砂难度大，施工程序复杂，无法严格按照上述设计结果进行防砂充填层设计。因此，为了兼顾上、下部储集层，在满足充填强度的情况下，推荐X站位防砂充填层砾石尺寸为215~360 μm ，实际施工中可根据此设计值与工业砾石尺寸进行匹配。

需要特别强调的是，本文设计方法及设计结果适用于能够保证充填强度并防止颗粒蠕动亏空的管内砾石充填防砂和预充填筛管防砂作业，对于管外砾石充填防砂作业，其防砂充填层砾石尺寸应在此基础上降

低1级。

5 结论

本文提出了针对水合物储集层的“防粗疏细”式防砂充填层砾石尺寸设计方法。首先基于能够疏通地层砂细组分的要求确定防砂充填层砾石尺寸的下限，然后求解完全阻挡地层砂粗组分所需的砾石尺寸范围，两者的交集即为流体抽取法水合物开采井的防砂充填层最佳砾石尺寸。此外，还考虑了分层防砂、泥质含量等因素的影响，并将设计结果与现有工业砾石尺寸进行匹配，以满足施工要求。

采用本文方法对中国南海神狐海域X站位防砂充填层砾石尺寸进行了设计，设计结果为215~360 μm 。

由于“防粗疏细”式防砂充填层砾石尺寸设计方法要求完全排除地层砂细组分，因此砾石尺寸设计必须与恰当的井筒补液、携砂工作制度设计配合，达到气、液、固三相流动的精细控制，才能有效延长试采周期。

符号注释：

C ——地层砂均匀系数，无因次； d ——地层砂粒径， m ； d_5 ， d_{10} ， d_{16} ， d_{40} ， d_{84} ， d_{90} ， d_{95} ——地层砂粒径分布曲线上累计质量分数5%、10%、16%、40%、84%、90%和95%对应的粒径， μm ； d_{50} ——地层砂中值粒径， μm ； d_{max} ——地层砂细组分的最大粒径， μm ； D_{emax} ， D_{cmin} ——阻挡粗组分所需的防砂充填层最大、最小砾石尺寸， μm ； D_{fmin} ——考虑泥质含量影响时疏通细组分所需的防砂充填层最小砾石尺寸， μm ； D'_{fmin} ——不考虑泥质含量影响前提下疏通细组分所需的防砂充填层最小砾石尺寸， μm ； F ——地层砂分选系数，无因次； M ——筛析的地层砂样总质量， kg ； N ——地层砂的颗粒数量； R_m ——泥质含量增大造成的挡砂精度损失率，本文取160%； W ——某一粒径地层砂的质量分数，%； ρ ——地层砂密度， kg/m^3 。

参考文献：

- [1] WU Nengyou, ZHANG Haiqi, YANG Shengxiong, et al. Gas hydrate system of Shenhu area, Northern South China Sea: Geochemical results[J]. Journal of Geological Research, 2011, 2011: 1-10.
- [2] ZHANG G, LIANG J, LU J, et al. Geological features, controlling factors and potential prospects of the gas hydrate occurrence in the east part of the Pearl River Mouth Basin, South China Sea[J]. Marine & Petroleum Geology, 2015, 67: 356-367.
- [3] 郭翔宇, 刘飞. 我国宣布在南海神狐海域“可燃冰”试采成功[EB/OL]. (2017-05-18)[2017-06-01]. http://china.cnr.cn/xwggf/20170518/t20170518_523762235.shtml. GUO Xiangyu, LIU Fei. China announced combustible ice test success in the Shenhu area, South China Sea[EB/OL]. (2017-05-18)[2017-

- 06-01]. http://china.cnr.cn/xwwgf/20170518/t20170518_523762235.shtml.
- [4] 陈惠玲, 朱夏. 20年追赶60天突破: 我国海域可燃冰勘查试采“赶超记”[EB/OL]. (2017-07-17)[2017-07-26]. http://www.cgs.gov.cn/ddztt/jqthd/trqshw/zxbdshw/201707/t20170717_435792.html.
CHEN Huiling, ZHU Xia. 20 years to catch up and 60 days to break: Catching up recording of China's coastal combustible ice exploration test[EB/OL]. (2017-07-17)[2017-07-26]. http://www.cgs.gov.cn/ddztt/jqthd/trqshw/zxbdshw/201707/t20170717_435792.html.
- [5] 李彦龙, 刘昌岭, 刘乐乐. 含水合物沉积物损伤统计本构模型及其参数确定方法[J]. 石油学报, 2016, 37(10): 1273-1279.
LI Yanlong, LIU Changling, LIU Lele. Damage statistical constitutive model of hydrate-bearing sediments and the determination method of parameters[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(10): 1273-1279.
- [6] JUNG J W, JANG J, SANTAMARINA J C, et al. Gas production from hydrate-bearing sediments: The role of fine particles[J]. Energy & Fuels, 2012, 26(1): 480-487.
- [7] YOSHIHIRO T, DUNCAN M W, HAY W J, et al. Deepwater methane hydrate gravel packing completion results and challenges[R]. OTC 25330-MS, 2014.
- [8] 李彦龙, 刘乐乐, 刘昌岭, 等. 天然气水合物开采过程中的出砂与防砂问题[J]. 海洋地质前沿, 2016, 32(7): 36-43.
LI Yanlong, LIU Lele, LIU Changling, et al. Sanding prediction and sand-control technology in hydrate exploitation: A review and discussion[J]. Marine Geology Frontiers, 2016, 32(7): 36-43.
- [9] LIU Changling, MENG Qingguo, HU Gaowei, et al. Characterization of hydrate-bearing sediments recovered from the Shenhu area of the South China Sea[J]. Interpretation, 2017, 5(3): 13-23.
- [10] 邓金根, 李萍, 周建良, 等. 中国海上疏松砂岩适度出砂井防砂方式优选[J]. 石油学报, 2012, 33(4): 676-680.
DENG Jinggen, LI Ping, ZHOU Jianliang, et al. Sand control optimization applied to moderately sanding wells in offshore loose sandstone reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(4): 676-680.
- [11] 邓金根, 李萍, 王利华, 等. 渤海湾地区适度防砂技术防砂方式优选[J]. 石油钻采工艺, 2011, 33(1): 98-101.
DENG Jinggen, LI Ping, WANG Lihua, et al. The optimization of sand control method for moderate sand control technique application in Bohai Bay[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2011, 33(1): 98-101.
- [12] 王利华, 邓金根, 周建良, 等. 适度出砂开采标准金属网布优质筛管防砂参数设计实验研究[J]. 中国海上油气, 2011, 23(2): 107-110.
WANG Lihua, DENG Jinggen, ZHOU Jianliang, et al. Experimental study on premium screen mesh opening design for reasonable sand control[J]. China Offshore Oil and Gas, 2011, 23(2): 107-110.
- [13] 胡才志, 裴柏林, 李相方, 等. 砾石充填井堵塞机理实验研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2004, 28(3): 40-42.
HU Caizhi, PEI Bolin, LI Xiangfang, et al. Laboratory research on plugging mechanism in gravel packed well[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2004, 28(3): 40-42.
- [14] VALDES J, SANTAMARINA J. Particle clogging in radial flow: Microscale mechanisms[J]. SPE Journal, 2006, 11(11): 193-198.
- [15] 张伟, 梁金强, 陆敬安, 等. 中国南海北部神狐海域高饱和度天然气水合物成藏特征及机制[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(5): 670-680.
ZHANG Wei, LIANG Jinqiang, LU Jing'an, et al. Accumulation features and mechanisms of high saturation natural gas hydrate in Shenhu Area, northern South China Sea[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(5): 670-680.
- [16] 董长银, 张清华, 高凯歌, 等. 机械筛管挡砂精度优化实验及设计模型[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(6): 991-996.
DONG Changyin, ZHANG Qinghua, GAO Kaige, et al. Screen sand retaining precision optimization experiment and a new empirical design model[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(6): 991-996.
- [17] OYENEYIN B. Developments in petroleum science[M]. Amsterdam: Elsevier, 2015: 191-223.
- [18] 董长银. 油气井防砂理论与技术[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2012: 91-97.
DONG Changyin. Sand control theories and technologies in oil and gas wells[M]. Dongying: Press of China University of Petroleum, 2012: 91-97.
- [19] MARKESTAD P, CHRISTIE O, ESPEDAL A, et al. Selection of screen slot width to prevent plugging and sand production[R]. SPE 31087, 1995.
- [20] SAUCIER R J. Consideration in gravel pack design[J]. Journal of Petroleum Technology, 1974, 26(2): 205-212.
- [21] 董长银, 贾碧霞, 刘春苗, 等. 机械防砂筛管挡砂介质堵塞机制及堵塞规律试验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2011, 35(5): 82-88.
DONG Changyin, JIA Bixia, LIU Chunmiao, et al. Blocking mechanism and blocking laws experiments of sand retention media in mechanical screens[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2011, 35(5): 82-88.
- [22] 马帅, 熊友明, 于东, 等. 海上高产气田防砂挡砂精度设计研究[J]. 石油钻采工艺, 2013, 35(6): 48-51.
MA Shuai, XIONG Youming, YU Dong, et al. Research on precision design of sand control on high yield offshore gas field[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013, 35(6): 48-51.

第一作者简介: 李彦龙(1989-), 男, 甘肃定西人, 硕士, 中国地质调查局青岛海洋地质研究所研究实习员, 主要从事海域天然气水合物开采相关的力学及出砂-防砂问题研究。地址: 山东省青岛市市南区福州南路62号, 青岛海洋地质研究所, 邮政编码: 266071。E-mail: liyanlongupc@163.com

联系作者简介: 胡高伟(1982-), 男, 湖北仙桃人, 博士, 中国地质调查局青岛海洋地质研究所副研究员, 主要从事海域天然气水合物地球物理与试采工程准备相关的研究。地址: 山东省青岛市市南区福州南路62号, 青岛海洋地质研究所, 邮政编码: 266071。E-mail: hgw-623@163.com

收稿日期: 2017-06-20 修回日期: 2017-08-31

(编辑 胡菁玮)