

水力旋流器对海底天然气水合物混合浆体分离提纯

陈浩,吕斌*,付来强,吴文科

(西南石油大学机电工程学院,四川成都610500)

摘要:针对我国水合物海底分离部分的技术空缺,对国内外现有的海底分离技术进行分析总结,并结合海底深水浅层天然气水合物固态流化绿色开采技术,设计了一种适合于天然气水合物海底预分离的工艺,并利用水力旋流器对水合物浆体进行分离。建立水力旋流器的力学模型,基于雷诺应力模型研究了一种适合固-固-液三相流的流场模拟分析方法,并通过数值模拟得到了旋流器内部流场的相应参数,证实水力旋流器对海底水合物分离的可行性与可靠性。通过改变混合浆体中颗粒粒径、进给速度、进给混合浆体中泥砂体积分数以及水力旋流器的锥角,分析水力旋流器分离效率的影响规律,得到了在颗粒粒径为10~90 μm的工况下,最优的分离效率的粒径为50~70 μm;进给速度为7 m/s左右,泥砂体积分数为25%左右。

关键词:天然气水合物;海底分离工艺;多相流;水力旋流器;数值模拟

中图分类号:TQ028.4

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2017)01-0155-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2017.01.037

Separation and purification of natural gas hydrate slurry mixture by hydrocyclone

CHEN Hao, LV Bin*, FU Lai-qiang, WU Wen-ke

(School of Mechatronic engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: In view of the technical gap of the seabed separating part of the hydrate in China, the subsea separation technologies at home and abroad are analyzed. By combining with solid-fluidized-bed green mining technology for deep-water subsea shallow gas hydrate, a pre-separation process suitable for natural gas hydrate in the seabed is designed. Hydrocyclone is also used to separate the hydrate slurry. A mechanical model of the hydrocyclone is established. A flow field simulation method suitable for the solid-solid-liquid three-phase flow is studied based on the Reynolds stress model. The corresponding parameters of the flow field in the hydrocyclone are obtained by numerical simulation. The feasibility and reliability of gas hydrate separation by hydrocyclone is also confirmed. By changing the particle size, feed rate, the volume fraction of silt in the mixed slurry and the cone angle of the hydrocyclone, the effect of the hydrocyclone separation efficiency is analyzed. The optimum separation efficiency can be achieved when the particle size is 50-70 μm, the feed rate is about 7 m/s and the volume fraction of sand is about 25%.

Key words: nature gas hydrate; seabed separation process; multiphase flow; hydrocyclone; CFD

海洋天然气水合物藏储量巨大,海底水合物藏的开发利用将是实现我国能源可持续发展、保障国家能源安全的重要战略领域。而海底水合物藏的开发必然离不开水下生产系统。这是一种将全部或者部分开采设备放置于海底,低成本开发海洋能源的先进方法。而海底预分离系统则是水下生产系统中极为重要的一环。在非成岩天然气水合物的开发过程中采用海底预分离技术,不仅能够降低举升动力消耗^[1],还可以有效地节省海上生产平台的空间,降低运行成本^[2]。

总结研究国内外现有的海底分离技术,发现没

有针对天然气水合物海底分离的相关研究。因此本文中研究总结国内外现有的海底分离技术,研究设计了一种天然气水合物的海底分离工艺,并利用CFD数值模拟软件对其进行了相应的数值模拟,以确保其可靠性与可行性,用来填补我国在海底天然气水合物分离部分的空白,为后续深入细致的研究提供一定的参考。

1 基于固态流化开采的天然气水合物海底分离工艺的设计

深水浅层天然气水合物固态流化绿色开采概念

收稿日期:2016-06-27;修回日期:2016-11-05

基金项目:中国工程院自然科学基金资助项目(2013-04-ZQC-002);国家级重点实验室开放基金资助项目(PLN1418)

作者简介:陈浩(1963-),男,教授,研究方向为现代设计理论和机械程设备, ch91668@163.com;吕斌(1990-),硕士生,研究方向为海底天然气水合物混合浆体多相流分离提纯,通讯联系人, 420183118@qq.com。

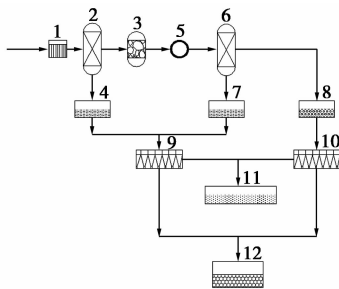
核心为:将深水浅层弱胶结的天然气水合物藏当作一种海底矿藏资源,利用其在海底温度和压力下的稳定性,采用固态开采方法,即采用采掘设备以固态形式开发天然气水合物矿体^[3]。

由于固态流化开采方式实行的是固态开采,所形成的水合物混合相态复杂,包括天然气、水、水合物颗粒、泥砂以及水合物与泥砂的胶结体等多种成分。现有的分离技术难以实现水合物与泥砂颗粒在海底的彻底分离。因此,需要一种高效、环保和安全的分离技术,实现对海底水合物的分离。

1.1 海底水合物分离工艺的设计

针对现有技术存在的不足与空缺,本文中提出一种适合天然气水合物固态流化开采过程中实现水合物海底高效分离的分离工艺,以克服现有技术中存在的缺陷,主要是利用分级分离的原理。所设计的海底水合物分离工艺采用的步骤为:①将海底采掘机开采后泵送而来的水合物原浆输送至海底筛分装置进行筛分处理;②将筛分处理后得到的粗固体颗粒输送至海底破碎装置进行破碎处理;③将破碎后的水合物混合浆体再次进行筛分处理,分选出较粗的固体颗粒混合物,根据实际情况可能需要多级多次的对较大颗粒进行破碎、筛分;④对筛分处理后的粗、细固体颗粒混合物分别进行分离处理,得到含杂质较少的水合物混合物;⑤对分离得到的泥砂进行海底回填,杂质较少的水合物混合物输送至海面设施进行下一步处理。

图 1 为所设计的海底水合物分离工艺的简易流程图。



1—海底水合物混合浆体;2,6—筛分处理设备;3—大颗粒混合浆体中继仓;4,7—小颗粒混合浆体中继仓;5—研磨破碎装置;8—水合物混合浆体中继仓;9,10—分离设备;11—泥砂回填装置;12—水合物中继仓

图 1 海底天然气水合物分离工艺流程简图

1.2 海底天然气水合物分离设备的选取

由于采掘设备所开采出的海底天然气水合物混合物为多相态共存的,相对来说比较复杂。国内外

对于深海海底天然气水合物的水下分离研究尚未开展。对固态流化开采工艺在全球范围内还没有应用研究,针对固态流化开采中面临的复杂多相天然气水合物混合浆体的分离领域的研究更是完全空白。

所以本文中参考国内外多相分离设备的研究介绍和考虑海底天然气水合物相关性质,综合对比后,最终选定水力旋流器作为海底天然气水合物的分离设备,而水力旋流器是一种应用非常广泛的非均匀混合物分离设备^[4]。

1.3 水力旋流器结构参数的确定

根据文献[5]中相关的计算公式和海底天然气水合物混合物相关性质,可计算出满足分离要求的水力旋流器结构参数。依据中海油广州研究总院对深水浅层海底水合物的探测,估算出了海底天然气水合物的粒径分布为,0.02 ~ 3.19 μm 的含量为 9.24%; 3.91 ~ 62.50 μm 的含量为 45.70%; 62.50 ~ 2 000.00 μm 的含量为 42.06%。所以本文中基于所设计的分离工艺,分析固体粒径为 10 ~ 90 μm 的细颗粒的混合浆体在水力旋流器中的分离效率,查看分析影响分离效率的因素有哪些,为完善分离工艺和设计后续更为合适的分离设备提供一定的参考。

根据分级粒度计算水力旋流器基本直径 D ,其基本计算公式为^[5]:

$$D = 2.0 \times 10^{-5} [d_m^2 (\delta - \rho_m) \Delta P_m^{0.5} / \rho_m \mu_m] \quad (1)$$

式中, δ 为进料口多相流中固体颗粒的密度, t/m^3 ; ΔP_m 为进料口到底流口之间沿着径向的压力降, MPa; d_m 为进料口多相流中的固体颗粒粒径, μm ; μ_m 为旋流器进料口多相流黏度, $Pa \cdot s$; ρ_m 为进料口多相流密度, t/m^3 。

假设给定海底天然气水合物混合浆体的密度为 1 017 kg/m^3 ; 进料口到底流口之间沿径向的压力降为 0.23 MPa; 天然气水合物混合浆体多相流的黏度 0.003 $Pa \cdot s$; 海底泥砂的密度为 2 600 kg/m^3 ; 海底天然气水合物混合浆体中海水、天然气水合物和泥砂的体积分数分别为 70%、10% 和 20%。根据公式 (1), 并通过查阅水力旋流器相关制造、安装定位、分级粒度以及强度等资料, 综合各项因素, 确定水力旋流器的直径为 250 mm。

水力旋流器的锥角 θ 通常指其锥体部分的夹角,就同一规格的旋流器而言,锥角的不同也影响其分离效率^[7]。而本文中主要目的之一就是研究 3 种常见的锥角对海底天然气水合物混合浆体分离效率的影响,所以选择的锥角为 10°、15°和 20°。

依据文献[5]中所提及的相关经验公式,可确定长方形的进料口的长和宽分别是 50 mm 和 40 mm,溢流口的直径为 70 mm,底流口直径为 30 mm,溢流管的插入深度为 168 mm,筒体高度为 285 mm。

2 数值模拟

2.1 力学模型建立

采用 Solidworks2013 对水力旋流器进行有限元建模,并利用 ICEM CFD 对模型进行了网格划分^[8],划分网格时采用了结构化网格^[7],如图 2 和图 3 所示。本文中 3 种尺寸的网格总数均在 470 000 个左右。由于水合物混合浆体在水力旋流器内部的运动相对比较复杂,所以在进口、出口和尺寸较小的部位进行相应的细化处理,以便更为真实地反映出多相流的运动情况。

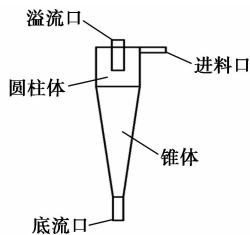


图2 水力旋流器基本结构



图3 水力旋流器网格划分

2.2 天然气水合物浆体介质参数设定

采用有限元数值模拟的方法研究水合物浆体在水力旋流器内部流动情形,根据海底天然气水合物的基本特性与多相流理论,将海底水合物浆体的介质模型简化为混合物中只有海水、天然气水合物和泥砂三相的存在^[6],因此混合浆体的流动属于固-固-液三相流,其中海底泥砂和天然气水合物为固体颗粒,海水为液体。表 1 为模拟计算过程中混合相介质参数。

表 1 海底天然气水合物混合相介质参数

介质	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)
海水	1025	0.0017
海底泥砂	2600	1.72×10^{-5}
天然气水合物	650	1.30×10^{-5}

2.3 边界条件

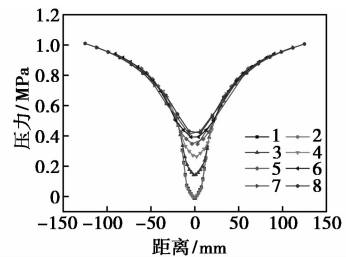
水力旋流器内部的多相流流场是相当复杂多变的,数值模拟应用雷诺应力模型,边界条件采用速度进口 (velocity-inlet),溢流口和底流口均采用自由出口 (outflow) 的边界条件;计算方法采用 SIMPLEC 的压力速度耦合方式;壁面采用无滑移边界条件进行处理。

3 数值结果分析

3.1 水力旋流器内部流场规律分析与验证

3.1.1 静压力分布规律

图 4 为水力旋流器中内部流场的静压力分布图,其中 z 表示轴向截面,横坐标表示旋流器径向截面距离。从图 4 中可以看到,水力旋流器内的静压力从壁面沿着径向到轴心逐渐在减小。越靠近底流口,压力就越低,这样的分布规律基本上符合组合涡流场的压力分布规律。

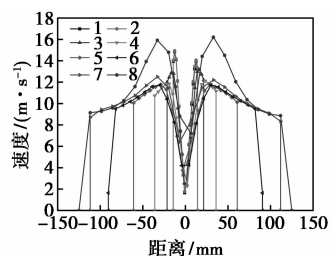


1— $z=5$; 2— $z=10$; 3— $z=80$; 4— $z=200$;
5— $z=400$; 6— $z=600$; 7— $z=800$; 8— $z=900$

图4 静压力分布图

3.1.2 切向速度分布规律

如图 5 所示,切向速度从壁面开始随着半径的减小而开始逐渐缓慢增大,在快靠近中心轴线的某一径向位置时会达到切向速度的最大值,然后就突然急剧降低,呈现出“M”形驼峰分布,符合一般旋流器的准自由涡规律,同时满足水力旋流器内部切向速度基本分布规律。



1— $z=5$; 2— $z=10$; 3— $z=80$; 4— $z=200$;
5— $z=400$; 6— $z=600$; 7— $z=800$; 8— $z=900$

图5 切向速度分布图

3.1.3 密度分布规律

图 6 为水力旋流器中内部流场的密度分布图。混合浆体在水力旋流器内部中因离心力与阻力的共同作用下,泥砂靠近水力旋流器的壁面从底流口流出,水合物集中于水力旋流器的轴心位从溢流口流出,而绝大部分海水则是分布于泥砂和水合物之间。故水合物混合浆体在水力旋流器中的密度分布规律是沿着径向由壁面到轴心逐渐减小。

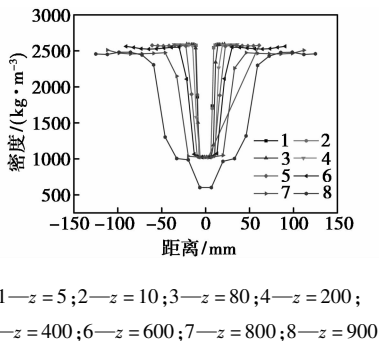


图 6 密度分布图

4 水力旋流器分离效率研究

本文中主要利用 CFD 软件进行数值模拟,分析的主要内容有水力旋流器锥角、固体颗粒粒径、进口速度以及进口泥砂含量对分离效率的影响。

4.1 海底天然气水合物分离效率计算

分离效率是衡量水力旋流器分离过程中进行完善程度的技术指标。本文中所设计的海底天然气水合物分离工艺主要是考虑先分离出混合物中的泥砂部分,然后再在此基础上考虑对水合物的分离。将采用汉考克综合效率计算公式来对海底泥砂和海底水合物的分离效率进行计算^[9]。

采用汉考克综合效率计算公式的变形公式,此公式适用于分级、脱泥、浓缩和澄清作业的效率计算:

$$E = [(\alpha - \vartheta)(\beta - \alpha) / \alpha(\beta - \vartheta)(100 - \alpha)] \times 10\,000\% \quad (2)$$

式中, α 为进口中计算物料的含量,%; β 为溢流口中计算物料的含量,%; ϑ 为底流口中计算物料的含量,%。

水力旋流器内部的海水从底流口与溢流口的排量没有明确的要求,因此在计算分离效率的过程中可以忽略海水在各个部分所占的含量。

4.2 不同固体颗粒粒径在不同锥角下的分离效率

从有限元数值模拟后处理提取相应参数,并依据公式(2)对提取的有用参数进行数学的理论计

算,可得到固体颗粒粒径为 10 ~ 90 μm 在 3 种不同锥角下的分离效率,进给速度为 8 m/s。其结果如图 7 和图 8 所示。

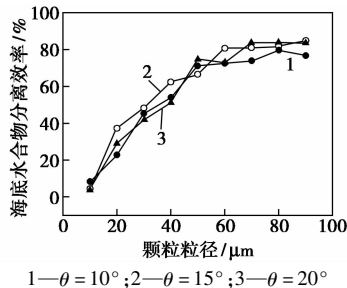


图 7 海底水合物分离效率

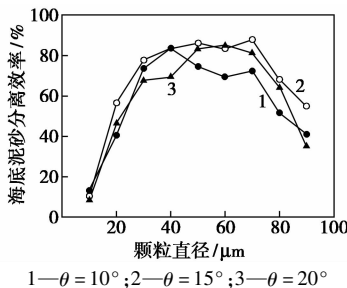


图 8 海底泥砂分离效率

从图 7 和图 8 中可以看出,海底泥砂的分离效率随颗粒粒径的增大呈现的变化规律,先增大,增大到一定数值后就趋于减小,最大值出现在 40 ~ 70 μm ;产生这种结果的原因可能是在该工况下由于泥砂颗粒粒径变大,在进给速度不变的工况下,泥砂颗粒在水力旋流器内所受的离心力、沉降力、浮力有所改变,故使得其分离效率在颗粒粒径达到一定程度时会有所降低;水合物的分离效率随颗粒粒径的增大呈现出先增大,增大到一定数值后趋于比较稳定的状态,不再有较大的变化,最大值出现在 60 ~ 90 μm ;而不同锥度的水力旋流器对泥砂和水合物分离效率的影响没有粒径的影响显著,但是锥角为 15°的水力旋流器的分离效率相比其余 2 种锥角的分离效率相对较好。由此可见对海底水合物分离效率影响较大的因素之一是固体颗粒粒径。

4.3 不同进给速度对分离效率的影响

利用 CFD 多相流理论对颗粒粒径为 60 ~ 80 μm 在不同进给速度下,对锥角为 15°的水力旋流器分离效率的影响,混合浆体中各相体积分数不变。水力旋流器相应的分离效率如图 9 和图 10 所示。

从图 9 和图 10 中可以看出,海底水合物海底泥砂的分离效率都是随着进给速度的增加而增加,然后逐步趋于比较稳定的状态,最后随着速度的进一步增大分离效率都有一定幅度的减小,这是因为进

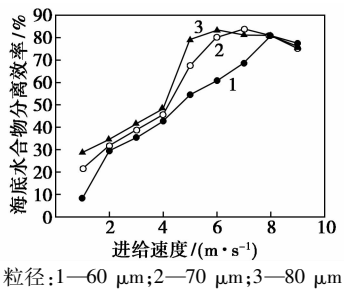


图9 海底水合物分离效率

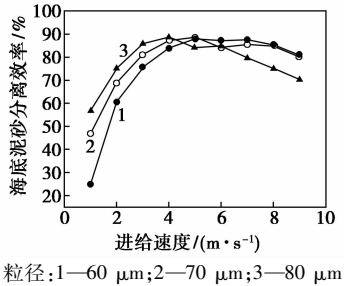


图10 海底泥砂分离效率

口速度增大,流场的雷诺数增加,流场的湍流强度增加,湍流对固体颗粒的随机影响增加,必然会降低分离效率,同时增加能耗。所以说,对于具体结构的水力旋流器而言,进给速度并不是越大越好,而是具有一个最佳值。

4.4 进口泥砂体积含量不同对分离效率的影响

由于海底浅层水合物的分布含量较少,泥砂含量相当巨大,所以泥砂含量对分离效率的影响也是一个不容忽视的因素。所以本文中分析了泥砂固体颗粒在混合浆体中体积分数不同对分离效率的影响。水力旋流器分离效率如图11和图12所示。

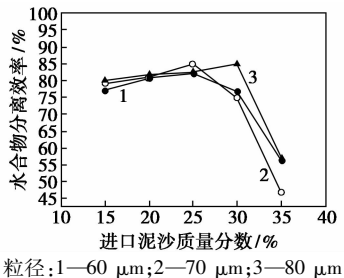


图11 海底水合物分离效率

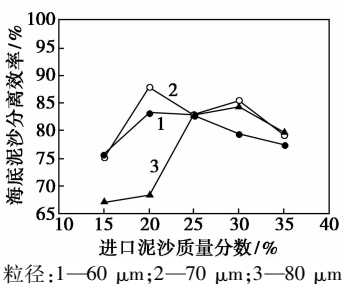


图12 海底泥砂分离效率

从图11和图12中可以看到,海底水合物的分离效率随着进口泥砂含量的增加出现的变化趋势先几乎稳定没有太大的变化,随后分离效率出现急剧下降;而海底泥砂的分离效率随着进口泥砂含量的增加出现的变化趋势先增加,增加到一定程度后开始出现减小的趋势。这是因为当工况一定时,矿浆浓度越大其矿浆密度也就越大,矿浓度的增加势必会引起矿浆密度和黏度增大,从而导致分离粒度变粗,溢流粒度也变粗,而且溢流浓度和沉砂浓度也会随着升高,导致分离效率降低。

5 总结

(1)针对海底水合物分离部分的技术空缺,设计了一种适合于天然气水合物海底预分离的工艺。

(2)选择水力旋流器作为分离设备,通过数值模拟得到了水力旋流器内部流场的静压力、切向速度和密度的参数分布规律,通过查证相关文献资料,确定其流场分布规律与水力旋流器的流场理论分析结果相一致,由此验证了该数值模拟方法的正确性与可靠性。

(3)在水力旋流器结构确定的情况下,水力旋流器的锥角对混合浆体的分离效率有一定的影响,但是却不很明显;其余参数对分离效率有一个最优值或范围值,本文中工况下,颗粒粒径为50~70 μm最佳;进给速度的最优值为7 m/s,最优的泥砂体积分数在25%左右。

参考文献

- [1] 陈家庆. 海洋油气开发中的水下生产系统[J]. 石油机械, 2007, 35(5): 54-58.
- [2] 熊磊. 海底分离技术的最新进展[J]. 石油机械, 2010, 38(10): 75-78.
- [3] 周守为, 陈伟, 李涛平. 深水浅层天然气水合物固态流化绿色开采技术[J]. 中国海上油气, 2014, 26(5): 1-7.
- [4] 徐继润, 罗栖. 水力旋流器流场理论[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [5] 庞学诗. 根据分级粒度计算旋流器基本直径[J]. 现代矿业, 2010, 7(7): 46-48.
- [6] 伍开松, 代茂林. 海底水合物混合泥浆除泥砂水力旋流器[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(7): 973-979.
- [7] 孙启才, 雷明光, 陈文梅. 水力旋流器内单相液体速度场的研究[J]. 流体工程, 1988, (6): 341-349.
- [8] 纪兵兵. ANSYS ICEM CFD 网格划分技术实例详解[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- [9] 庞学诗. 水力旋流器技术与应用[M]. 北京: 中国石化出版社, 2010: 195-204. ■