第 50 卷 第 1 期 西 安 交 通 大 学 学 报 Vol. 50 No. 1
2016 年 1 月 JOURNAL OF XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY Jan. 2016

DOI：10.7652/xjtuxb201601011

液化天然气浸没燃烧式气化器数值模拟方法研究

粘权鑫，郭少龙，方文振，陶文铨
（西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室，710049，西安）

摘要： 为了考察在一定设计尺寸下液化天然气（LNG）浸没燃烧式气化系统的天然气出口温度能否达到生产要求，建立了对整个浸没燃烧式气化器（包含燃烧室、下气管和 LNG 换热器 3 部分）中一系列流动和传热的数值计算模型。在燃烧室中，采用灰气体加权和模型（WSGGM）计算烟气的吸收系数，利用 DO 模型求解辐射传递方程，并在考虑对流和辐射的混合传热作用下计算出火焰罩的壁面温度以及烟气、二次空气出口的平均温度；在 LNG 换热器中，对流体物性剧烈变化的管程进行分段处理并采用两相流体模型来模拟壳程中气液两相的流动和传热过程，在分别获得管壳两侧的平均传热系数后用以计算总的换热系数。所获得的管程和壳程对流换热系数和关联式与已有的文献值符合良好。壳程入口气体温度在 500～700 ℃的范围内变动时，壳程出口气体温度与壳程水浴平均温度略微升高，同时壳程水浴湍动能降低，换热系数稍有减小。模拟获得的天然气出口温度可维持在 15 ℃左右，能满足生产需要。

关键词： 浸没燃烧式气化器；数值模拟；辐射；两相流动；LNG 换热器
中图分类号： TK124 **文献标志码：** A **文章编号：** 0253-987X(2016)01-0067-05

Numerical Simulation on Liquefied Natural Gas Submerged Combustion Vaporizer

NIAN Quanxin, GUO Shaolong, FANG Wenzhen, TAO Wenquan
(Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering of MOE, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To predict the natural gas outlet temperature of a liquefied natural gas (LNG) submerged combustion vaporizer (SCV), this paper establishes a complete model for the numerical computation of the fluid flow and heat transfer in the whole SCV system, including the combustion chamber, down comer and LNG heat exchanger. For the combustion chamber, weighted-sum gray gas model (WSGGM) is used to calculate the gas absorption coefficient and DO model is used to solve RTE. The flow and heat transfer behavior is then obtained considering radiation and convection. For the LNG heat exchanger, a segmentation treatment is used for the coiled tube because of the drastically changing fluid properties. The two-phase fluid model is used to deal with the gas-liquid two-phase flow and heat transfer process for the shell-side and the total heat transfer coefficient is then calculated. The tube-side and shell-side heat transfer coefficients are well consistent with the results of previous studies. When the shell-side inlet gas temperature varies within the range of 500-700 ℃, the outlet gas temperature and the average water bath temperature slightly increase and the turbulent kinetic energy and heat transfer coefficient slightly

收稿日期： 2015-05-04。 **作者简介：** 粘权鑫（1991—），女，硕士生；陶文铨（通信作者），男，教授，博士生导师，中国科学院院士。 **基金项目：** 国家自然科学基金资助项目（2013CB228304）。
网络出版时间： 2015-10-13 **网络出版地址：** http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20151013.1133.004.html

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

decrease. Under the practical operation conditions, the LNG outlet temperature maintains at 15 ℃ or so, which can meet the production requirement.

Keywords: submerged combustion vaporizer; numerical simulation; radiation; two-phase flow; LNG heat exchanger

浸没燃烧式气化器(SCV)由于其高效且安全可靠,被广泛应用于液化天然气(LNG)的调峰系统中。LNG浸没燃烧式气化器是一种将低温液化天然气加热气化的装置,它的加热源来自于燃料在水下的浸没燃烧过程。图1为浸没燃烧式气化器系统的示意图。燃料(一般为天然气)在燃烧室中燃烧后掺混一定量的空气(称为二次空气)进行降温并通过下气管等结构,最终分配到分配管上的几千个小孔,以气柱、气泡的形式携带能量进入到换热器壳程水浴中,使之加热并气化换热器管束中的液化天然气。燃料提供的热量与液化天然气气化需要的热量基本相等,保证了水浴温度在运行过程中基本保持不变。高速气柱对水浴的扰动,一方面增强了LNG换热器壳程水浴侧的换热系数,另一方面打破了水浴靠近换热管束的低温层,使之在运行过程中不结冰,保证传热过程顺利进行。浸没燃烧式气化器的热效率高达95%。

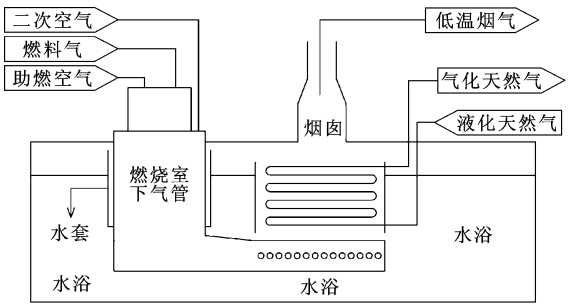


图1 浸没燃烧式气化器系统示意图

国内天然气接收站使用的LNG浸没燃烧式气化器主要从日本、德国和韩国进口,国内的制造仍在研发阶段。目前,对LNG浸没燃烧式换热器的研究大多是对结构上的改造与改进设计[1-2],而缺乏对整个LNG浸没燃烧式气化器系统(包含燃烧室、下气管、LNG换热器3部分)中一系列的流动(湍流、多相流)和传热(辐射、对流)过程的数值模拟研究,在已有的文献中也只是对LNG换热器部分进行了一些简单的研究。文献[3]研究了LNG换热器中蛇形盘管倾斜角度对管内亚临界LNG的气化情况的影响。文献[4]在文献[3]的基础上,重点研究了壳程喷射气体雷诺数和换热管的排布情况对壳程传热情况的影响。但是,上述的数值研究均存在模型与实际差距较大、过于简化的问题,文献中采用单流体DPM模型而忽略气体体积的影响不符合实际。文献[5]与本文的计算源数据完全相同,但使用"气化"的概念在FLUENT中模拟超临界流体的流动传热过程存在不妥之处,且直接将壳程中气液两相流简化为液体单相流的流动进行模拟而忽略气相的存在是不合理的,另外将壳程的3D模型简化为2D模型,也存在流量不符、部件相对位置改变等缺陷。

对于燃烧室和下气管部分的流动和传热过程,由于其温度很高,辐射传热将起到主导作用,因而如何模拟出燃烧室中对流和辐射两种传热形式都存在时烟气的出口温度是个值得研究的问题。

实验研究整个浸没燃烧式气化器的流动和换热性能,费用巨大而难以实现。在浸没燃烧式气化器正式投入使用前,考核气化后的天然气能否达到生产需要(大于4 ℃)至关重要,因而这有赖于数值模拟的计算结果。本文对SCV系统建立了燃烧室、下气管、LNG换热器中一系列的流动和传热过程的数值计算模型,并考核了实际工况下LNG的出口温度是否能达到生产需要。首先,计算在考虑辐射、对流混合传热的作用下,燃烧室和下气管气体的出口温度,并将下气管气体出口条件作为LNG换热器壳程气体入口条件。然后,对核心部分LNG换热器进行模拟:①先对换热器管程的超临界LNG的流动与换热进行分段数值模拟,获得管程的平均对流换热系数;②再对换热器壳程的多相流流动和传热过程进行稳态下两相流体模型计算,获得稳态时壳程水浴的对流换热系数;③对管程和壳程进行耦合计算,计算出LNG在一定的入口温度下的出口温度,最后获得LNG的出口温度。

1 物理模型

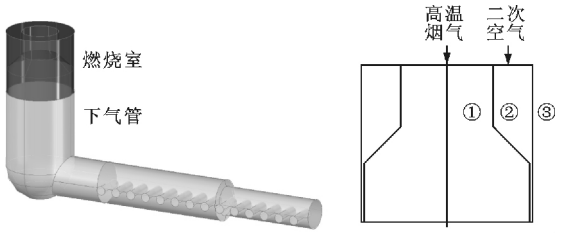
1.1 燃烧室与下气管

如图2所示,燃烧室与下气管在实际系统中互相连接,模拟中将燃烧室段的出口条件作为下气管段的入口条件加以利用。

1.2 LNG换热器管程

图3为LNG换热器管程物理模型。模拟换热器管程的目的是获得管内对流换热系数。由于LNG

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a)燃烧室与下气管整体　　(b)燃烧室简化模型

①：烟气流域；②二次空气流域；③：水套内壁

图 2　燃烧室与下气管物理模型

各物性随温度变化，在模拟中沿着管程流动过程中物性会发生较剧烈的变化，一个整体的管内平均换热系数并不能很好地反映出管内换热情况，因此对管程采取了图 3 中的分段策略，将管程分为 41 段，每段中的物性当成是不变的，在模拟收敛后，分别计算获得 41 段的平均对流换热系数，在之后的耦合计算中加以利用。

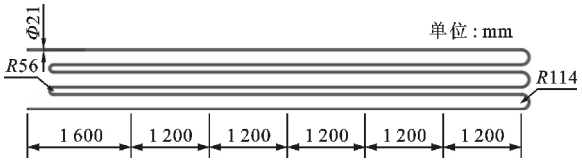
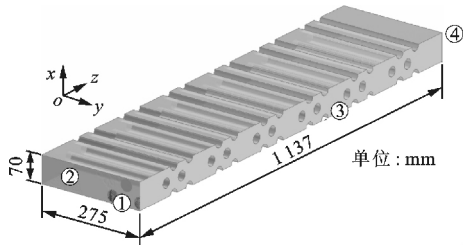


图 3　LNG 换热器管程物理模型

1.3　LNG 换热器壳程

考虑到换热器壳程的周期性、对称性的特点，最终得到的换热器壳程模型如图 4 所示。



①：气体入口；②：水入口；③：换热管束；④：气体、水出口

图 4　换热器壳程物理模型

2　换热器管内流体物性

管内流体为液化天然气，主要成分为甲烷，根据文献[6]，管内的液化天然气简化为甲烷纯物质，其准确性可以得到保证。甲烷的临界压力与临界温度分别为 4.59 MPa 和 −82.6 ℃，故在本研究中的管内工作压力为 8.88 MPa、进出口温度分别为 −158 ℃ 和 4 ℃ 的设计工况下，大部分管内流体处于超临界状态。本研究中，超临界甲烷流体的物性由 NIST 公司出品的 REFPROP 物性软件获得，如图 5 所示。超临界流体物性的特点是比定压热容存在极值点，对应的温度称为假拟临界温度。从获得的数据可知，此工况下假拟临界温度在 215 K 左右。超临界流体的主要物性在假拟临界温度附近会发生剧烈变化，因此其换热特性较常规流体复杂[6]。

在 Origin Pro 8.5 中，将获得的物性拟合为多项式，在 FLUENT 中加以利用。

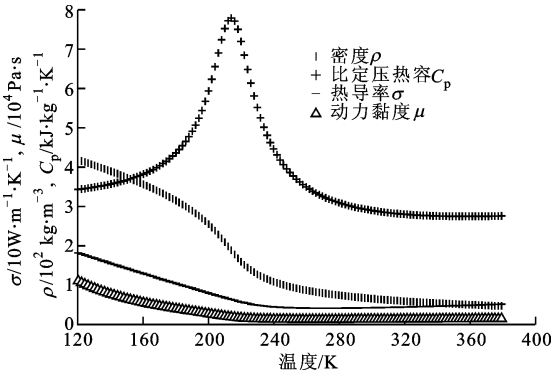


图 5　8.88 MPa 压力下的甲烷物性

3　数值方法

燃烧室、下气管、换热器管程和换热器壳程的模型，均采用 ICEM CFD 进行非结构化六面体网格的划分。

3.1　燃烧室与下气管数值方法

模拟使用 ANSYS FLUENT 14.5 软件。燃烧室与下气管的辐射模拟中，均根据实际组分定义混合物，采用灰气体加权和模型（WSGGM）计算烟气混合物的吸收系数，采用 DO 模型求解辐射传输方程。烟气入口温度采用燃料燃烧的理论烟气温度，由 Aspen Plus 中的 RGibbs 反应器模拟得到；下气管入口气体条件采用燃烧室出口烟气与空气混合得到，混合过程由 Aspen Plus 中的 Mixer 模拟得到。对于水套内壁，采用辐射和对流的混合边界条件，其中对流条件中的对流换热系数，通过对水套结构（模型中未画出）单独模拟获得。

3.2　换热器管程数值方法

模拟使用 ANSYS FLUENT 14.5 软件，对网格进行了独立性检验，最终计算网格节点数为 925 万，网格 $y^+ \approx 35$。物性参数按照第 2 节进行设置。壁面为定热流密度的边界条件，具体数值根据燃料提供的热量与换热管根数、内径算得。换热器管程模拟收敛后，对流体物性变化剧烈的情况，采用 1.2 节中的分段方法处理，采用公式 $h_j = Q_j/(A_j \Delta T_j)$ 计算出 41 段管子的管内换热系数，其中 Q_j 为通过第

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

j 段管子的换热量，由 FLUENT 后处理直接读取，A_j 为第 j 段管子的面积，ΔT_j 为第 j 段管子的温差，即第 j 段管内流体平均温度与管壁平均温度之差。

3.3 换热器壳程数值方法

由于 ANSYS CFX 软件对多相流模拟较易收敛，故使用 ANSYS CFX 14.5 软件模拟壳程中气液两相的流动和传热过程，对网格进行了独立性检验，最终计算网格节点数为 9.1 万。本文采用标准 k-ε 湍流模型，可伸缩 scalable 壁面函数法（对网格 y^+ 值无要求）来模拟。物性采用 ANSYS CFX 14.5 预设的空气与水的默认物性参数。

由于多相流稳态模拟收敛较困难，此模拟中残差曲线只能稳定在 10^{-3} 数量级，但当监控的物理量不再变化，整个模拟的质量不守恒度低于 1%、气相的能量不守恒度低于 5%、液相的能量不守恒度最终稳定在 10% 左右时，模拟视为收敛。

3.4 管程与壳程的耦合计算

当计算出换热器管程与壳程的对流换热系数后，整个换热器的总换热系数可按下式计算

$$K = 1/\left(\frac{1}{h_t}\frac{d_o}{d_i} + \frac{d_o}{2\lambda}\ln\frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{h_s}\right) \tag{1}$$

式中：h_t 为管内对流换热系数；h_s 为平均管外对流换热系数；d_i 为换热管内径；d_o 为换热管外径；λ 为换热管束材料的导热系数。最终，在一定的液化天然气入口温度下，出口温度可由下式计算

$$K_j A_j \Delta T_j = \dot{m}[h(T_j) - h(T_{j-1})] \tag{2}$$

$$\Delta T_j = \frac{1}{2}[(T_{wj} - T_{j-1}) + (T_{wj} - T_j)] \tag{3}$$

式中：K_j 为第 j 段管子的总换热系数；A_j 为第 j 段管子的外表面积；$\dot{m}$ 为管程内液化天然气的质量流量；$h(T)$ 为液化天然气在温度 T 时的焓值；T_j 为第 j 段管子出口处的流体温度；T_{j-1} 为第 j 段管子入口处的流体温度，即第 $j-1$ 段管子出口处的流体温度；T_{wj} 为第 j 段管子的平均壁面温度。

4 结果与讨论

4.1 燃烧室与下气管

在对火焰罩结构的模拟过程中，考虑和不考虑烟气与壁面辐射换热的结果对比见表 1，可以看出，模拟是否包括辐射过程，对烟气、二次空气出口温度有较大影响，进而会影响后续的模拟。由于对火焰罩平均温度影响很大，而这一参数对实际制造时火焰罩材料的选取起到了决定性作用，故对火焰罩的模拟，必须要考虑辐射作用对传热过程的影响。

表 1 考虑和不考虑辐射的模拟结果对比

计算条件	火焰罩均温/℃	烟气进出口温差/℃	二次空气进出口温差/℃
有辐射	1 480	171	67
无辐射	971	115	16
相对变化/%	52	48	324

在设定烟气流域中烟气混合物的吸收系数时，采用了两种方法分别进行计算：①采用 FLUENT 自带的灰气体加权和模型；②采用四川空分公司提供的烟气黑度 ε，根据公式 $\alpha = (-\ln(1-\varepsilon))/L$ 计算吸收系数，其中 L 为气体对整个包壁辐射的平均射线程长，可参考文献[7]进行计算，得到 $\alpha = 0.274$。采用 WSGGM 计算的结果与采用实测火焰黑度计算吸收系数所得的结果相差在 0.5% 以内，故可以得出结论：采用 WSGGM 计算的吸收系数与采用实际黑度计算的吸收系数基本相等。根据文献[8]，WSGGM 对常规燃烧、气化等燃烧环境下的气体参数模拟非常精准，对于含有 CO_2 和 H_2O 的混合气体来说，在 $CO_2 + H_2O$ 的摩尔分数小于 30% 的情况下都适用，且采用 WSGGM 计算的吸收系数考虑了温度对吸收系数的影响。若为非匀质气体，WSGGM 还可以考虑到工质的不均匀性，故若在燃烧室的模拟中缺少实测数据，推荐采用 WSGGM 计算气体吸收系数。

下气管模拟收敛后，出口气体条件可为壳程模拟气体入口条件所利用。

4.2 换热器管程

本文将按照 3.2 节方法计算的结果与 Gnielinski 公式[7]的计算结果进行了对比。关于 Gnielinski 公式对超临界 LNG 换热计算的有效性，文献[6]中证明了 Dittus-Boelter 公式[7]对普通圆管内的超临界 LNG 的换热计算满足工程计算要求，本文采用相同方法，即用普通圆管内超临界甲烷的数值模拟结果来比较与采用 Dittus-Boelter 公式与 Gnielinski 公式结果的差别，偏差分别为 14.11% 和 3.2%。因此，本文在结果处理中将数值模拟结果与 Gnielinski 公式计算值进行对比。两种计算方法所得结果如图 6 所示。

由图 6 可知，两种方法计算的结果变化趋势吻合相当好，图中 5 个突出点为管程分段中分出的 5 个弯管段，由于流体发生转向，扰动剧烈，因此当地换热系数较高。两种方法计算的结果，最大偏差为

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

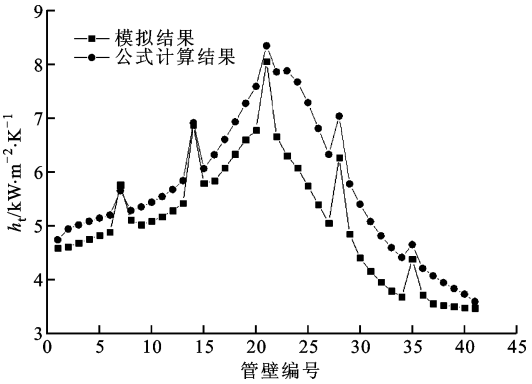


图 6　管程管内换热系数计算结果比较

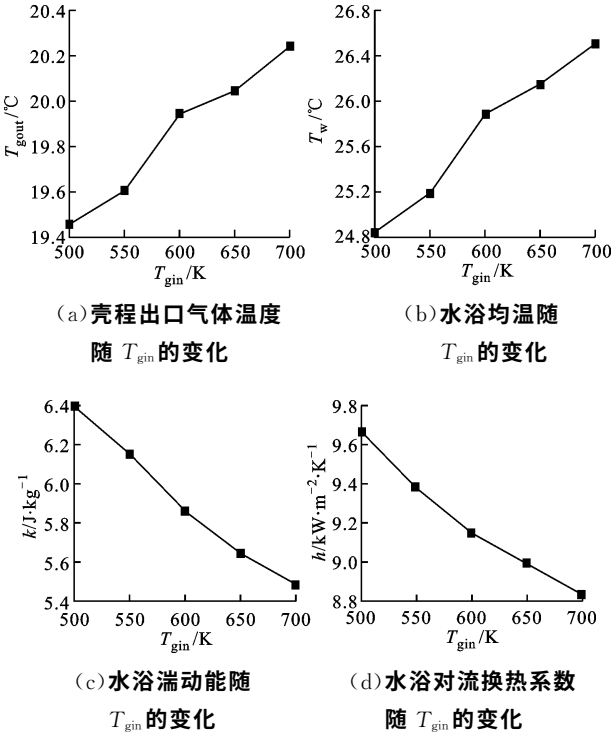
26.82%，60%的结果偏差在 10%以内，85%的结果偏差在 20%以内。对于第 3 个高峰之后误差较大的情况，通过查看这几段管内流体温度，可以看出，偏差在 20%以上的几段管内平均流体温度均在假拟临界温度 215 K 附近。由于假拟临界温度附近物性变化剧烈，Gnielinski 公式采用管内流体的平均温度作为定性温度选取物性，就会引入较大的误差，而采用公式 $h_j = Q_j/(A_j \Delta T_j)$ 计算则更为准确，故可以得到以下结论：由于 85%的模拟结果与关联式结果偏差在 20%以内，因此模拟结果较准确。

4.3　换热器壳程

调整前述模拟环节中二次空气进气量，可获得不同的换热器壳程气体入口工况：减小二次空气量，则壳程气体入口流量小、温度高；反之，则流量大、温度低。通过改变二次空气量，可以实现壳程入口气体温度 T_{gin} 在 500～700 ℃之间变化，进而影响壳程工作情况，壳程各工作参数随 T_{gin} 的变化情况如图 7 所示。由图 7a、7b 可知，壳程出口气体均温与水浴均温随壳程入口气体温度的升高呈现明显的增大趋势，但数值变化不大，说明在实际运行过程中，改变工况，LNG 换热器的运行状态基本稳定。由图 7c、7d 可知，随着壳程入口气体温度升高，即气量减小，壳程水浴湍动能降低，且由于扰动减小，换热系数也减小，与预测趋势相符。壳程水浴换热系数与文献[3]中 5 800～8 000 W/(m^2 · K)的范围基本相符，因此可以认为此模拟结果较准确。

4.4　换热器耦合计算

按照 3.4 节的计算方法，在给定的 LNG 入口温度下，可以算得在 LNG 管程入口温度－158 ℃、流量 198 t/h、燃料量 2.6 t/h、空气过量系数 1.2、壳程入口气体温度在 500～700 ℃变化时，NG 出口温度基本保持在 15 ℃左右，即换热器设计满足生产需要(大于 4 ℃)。在稳定运行时，燃料燃烧产生的热量等于 LNG 气化为 NG 达到一定出口温度所需的热量，即烟气放出来的热量全部传给水浴，水浴传热给管程 LNG。燃料放出来的热量一定，LNG 吸收的热量基本一定，因而 NG 出口温度基本在 15 ℃左右。壳程入口气体是由从燃烧室中出来的约 1 800 ℃烟气掺兑一定量的 15 ℃常温空气后形成的，其温度降至了 500～700 ℃的范围内，所以入口气体温度越低，气量越大，但气量变化时进入水浴的壳程入口气体携带的热量基本都相当于燃料放出的热量。



(a)壳程出口气体温度随 T_{gin} 的变化　(b)水浴均温随 T_{gin} 的变化

(c)水浴湍动能随 T_{gin} 的变化　(d)水浴对流换热系数随 T_{gin} 的变化

图 7　壳程各参数随入口气体温度的变化

5　结　论

本研究针对 LNG 浸没燃烧式气化器提出了一套模拟方法，通过对各环节的模拟结果的讨论，证明了本方法的正确性与可靠性，可为 LNG 浸没燃烧式气化系统的设计提供计算支持。计算表明：在研究的 SCV 系统设计尺寸参数下，在 LNG 管程入口温度－158 ℃、流量 198 t/h、燃料量 2.6 t/h、空气过量系数 1.2、壳程入口气体温度在 500～700 ℃变化时，NG 出口温度基本保持在 15 ℃左右，满足换热器设计生产需要。

参考文献：

[1]　尹星懿. 浸没燃烧式气化器原理分析及方案优化 [J]. 城市燃气，2014(2)：9-12.

(下转第 114 页)

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

gy conversion for unmanned underwater vehicles [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(4): 1958-1970.

[10] 宋洪侠, 邓启平, 姜恒甲, 等. 一种新型摆式波浪发电装置的研制 [J]. 可再生能源, 2014, 32(8): 1239-1244.
SONG Hongxia, DENG Qiping, JIANG Hengjia, et al. Research and development on a novel pendulum wave energy converter [J]. Renewable Energy Resources, 2014, 32(8): 1239-1244.

[11] 丁文俊, 宋保维, 毛昭勇, 等. 浅水域探测型无人水下航行器海洋动能发电装置特性研究 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(4): 73-78.
DING Wenjun, SONG Baowei, MAO Zhaoyong, et al. Research on characteristic of power generation device for detection UUV by ocean kinetic energy in shallow water [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(4): 73-78.

[12] WATERS R, STÅLBERG M, DANIELSSON O, et al. Experimental results from sea trials of an offshore wave energy system [J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(3): 034105.

[13] 丁文俊, 宋保维, 毛昭勇, 等. 浅水域探测型 UUV 波浪能发电系统设计 [J]. 机械工程学报, 2015, 51(2): 141-147.
DING Wenjun, SONG Baowei, MAO Zhaoyong, et al. Wave energy conversion system design for detection unmanned underwater vehicle in shallow water [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(2): 141-147.

[14] JOSSER C, BABARIT A, CLEMENT A H. A wave-to-wire model of the SEAREV wave energy converter [J]. Engineering for the Maritime Environment, 2007, 221(2): 81-93.

(编辑 赵炜 杜秀杰)

(上接第71页)

YIN Xingyi. The principle analysis and designation improvement of submerged combustion vaporizer [J]. Gas Technology, 2014(2): 9-12.

[2] 程云东. 浸没燃烧式气化器的设计缺陷及改进方法 [J]. 油气储运, 2014, 33(3): 292-294.
CHENG Yundong. Design defects and modification of submerged combustion vaporizer [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(3): 292-294.

[3] 窦兴华. LNG 沉浸式汽化器流动传热过程数值模拟 [D]. 大连: 大连理工大学, 2007.

[4] 于国杰. LNG 沉浸式燃烧型气化器数值模拟 [D]. 大连: 大连理工大学, 2009.

[5] 孙海峰. 浸没燃烧式 LNG 气化器的传热计算与数值仿真 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2014.

[6] 李仲珍, 郭少龙, 陶文铨. 超临界 LNG 管内流动与换热特性研究 [J]. 工程热物理学报, 2013, 34(12): 025.
LI Zhongzhen, GUO Shaolong, TAO Wenquan. Studies of supercritical convective heat transfer of LNG in tube [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(12): 025.

[7] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.

[8] 李冬. O_2/HO_2 燃烧条件下气体辐射特性参数计算及数值模拟 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.

[本刊相关文献链接]

杨辉著, 文键, 童欣, 等. 板翅式换热器锯齿型翅片参数的遗传算法优化研究. 2015, 49(12): 90-96. [doi: 10.7652/xjtuxb201512015]

王斯民, 王萌萌, 顾昕, 等. 螺旋折流板换热器结构参数多目标优化的数值模拟. 2015, 49(11): 14-19. [doi: 10.7652/xjtuxb201511003]

季家东, 葛培琪, 毕文波. 换热器内弹性管束流体组合诱导振动响应的数值分析. 2015, 49(9): 24-29. [doi: 10.7652/xjtuxb201509005]

张凡, 李兆辉, 李晓宇, 等. 不同材料翅片管换热器特性的试验研究. 2015, 49(5): 62-67. [doi: 10.7652/xjtuxb201505010]

文键, 杨辉著, 王斯民, 等. 旋梯式螺旋折流板换热器优化结构的数值模拟. 2014, 48(11): 8-14. [doi: 10.7652/xjtuxb201411002]

杨卫卫, 曹兴起, 何雅玲, 等. 一种带中间换热器的双热源高温热泵系统. 2014, 48(11): 70-74. [doi: 10.7652/xjtuxb201411012]

文键, 杨辉著, 杜冬冬, 等. 螺旋折流板换热器换热强化的数值研究. 2014, 48(9): 43-48. [doi: 10.7652/xjtuxb201409008]

韩辉, 何雅玲, 唐桂华. 硫酸蒸气在换热器表面沉积特性的数值研究. 2013, 47(11): 7-12. [doi: 10.7652/xjtuxb201311002]

王斯民, 文键. 无短路区新型螺旋折流板换热器换热性能的实验研究. 2012, 46(9): 12-15. [doi: 10.7652/xjtuxb201209003]

(编辑 荆树蓉)

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net