

LNG 沉浸式气化器的数值模拟<sup>\*</sup>

毕明树 窦兴华

大连理工大学化工学院

毕明树等. LNG 沉浸式气化器的数值模拟. 天然气工业, 2009, 29(1): 109-110.

**摘 要** 液化天然气调峰系统中常用沉浸式气化器。与普通换热器相比, LNG 沉浸式气化器有很多特殊性。为实现 LNG 沉浸式气化器的合理设计, 必须掌握其内的两相流动流场及其传热特性, 而 LNG 沉浸式气化器内流体流动和换热方面的数值模拟尚未见报道。在分析、组合其他模型的基础上, 建立了 LNG 气化器内流动与传热过程的物理和数值模型, 用标准湍流模型描述流体的湍流流动, 用混合物模型处理多相流动, 用离散相模型描述射流气体与水浴的相间耦合计算, 用 UDF 函数添加源项方法描述液体气化过程, 对 LNG 沉浸式气化器进行了三维数值模拟。获得了管程 LNG 气化过程中气、液相分布和流动情况, 讨论了换热管倾斜角、射流气体雷诺数、射流喷嘴与换热管相对位置对气化过程的影响。结果表明, 换热管向上倾斜  $2^\circ$  以上可避免产生气阻现象; 喷嘴射流雷诺数在 50 000 左右、喷嘴与换热管同位布置换热效率最高。

**关键词** 液化天然气 气化 两相流动 数值模拟

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2009.01.031

## 0 引言

液化天然气调峰系统中常用的是沉浸式气化器。它通常由换热管、水浴、沉浸式燃烧器、燃烧室和鼓风机等组成<sup>[1]</sup>。燃烧器在水浴水面上燃烧, 热烟气通过下排气管由喷雾器排入水浴的水中, 使水加热并产生高度湍动。换热管内的 LNG 与管外高度湍动的水充分换热, 从而使 LNG 加热、气化。

与普通换热器相比, LNG 沉浸式气化器有很多特殊性, 例如燃烧尾气与水之间的喷射混合换热、燃烧气对水的搅动、换热管的结构与布置、管内 LNG 边气化边流动、容易形成气阻等, 为使其合理设计必须寻求新的方法<sup>[1-3]</sup>。因此, 首先应掌握气化器内流体流动与换热特性, 而这方面的研究工作基本上是一些小型气化试验结果<sup>[4-6]</sup>, 有关 LNG 沉浸式气化器内流体流动和换热方面的数值模拟尚未见报道。笔者拟通过数值模拟方法, 获得流体的流动和传热过程的速度场、温度场、压力场的分布, 描述管程流体气、液相分布和流动情况, 探讨影响气化效率的主要因素, 为 LNG 沉浸式气化器的精确设计提供基础。

## 1 计算方法

LNG 沉浸式气化器工作时, 燃烧室内燃烧后的

气体从方体容器底部射流小孔进入水中, 容器中的水浴被气体加热, 湍动的水浴再通过容器中排列的换热管加热管内的流体。液化天然气从下部管内流入, 在管内被加热气化, 气化后的气体从上部流出。数学模型除了考虑质量守恒、动量守恒和能量守恒方程外, 采用标准  $k-\epsilon$  模型描述湍流流动, 选用混合物模型计算气液两相流动, 选用离散相模型描述气化器壳程高温气体喷射入水浴过程。控制方程的离散格式采用二阶迎风格式, 采用 SIMPLE 算法处理压力—速度耦合问题。管程流体区域按结构化四面体网格划分, 壳程流体按 Tet/Hybrid 非结构化四面体网格划分, 总网格数约 200 000。

LNG 的组成见表 1, 流体物性参数见表 2, 气化器中的换热管采用 0Cr18Ni9 不锈钢, 气化器和射流气体喷嘴参数计算值见表 3。

管程液化天然气入口选用速度入口边界条件; 射流气体喷射入口选用离散相模型中射流入口条件; 气化器壳程顶部出口和管程天然气出口均设为压力出口边界条件。

## 2 计算结果

LNG 流量  $q=1\ 000\ \text{kg/h}$  时换热管倾斜角  $\beta=0^\circ$ 、

<sup>\*</sup> 本文受到辽宁省高校重点实验室基金(编号: 20060129)的资助。

**作者简介:** 毕明树, 1962 年生, 教授, 博士生导师, 博士; 主要从事化工过程机械和安全技术及工程方面的研究工作。地址: (116024) 辽宁省大连市。电话: (0411) 84708711。E-mail: bimsh@dlut.edu.cn

表1 LNG组成表

组分	甲烷	乙烷	正丁烷	异丁烷	正戊烷	氮	总计
摩尔分数	0.993 1	0.002 8	0.000 4	0.000 5	0.000 2	0.001	1.000 0

表2 流体物性表

流体	温度 (K)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	黏度 (Pa·s)	定压比热容 [J/(kg·K)]	导热率 [W/(m·K)]
射流气体	1 415	1.194 65	0.000 013 5	1 364.4	0.110 255
水	298	998.2	0.001 003	4 182.0	0.6
液化天然气	112	426.09	0.05	3 408.0	0.209 2
天然气蒸气	112	1.826 1	0.000 025	2 036.6	0.006 78

注:天然气气化潜热为 509.86 kJ/kg

表3 气化和射流气体喷嘴参数计算值表

参数	数值	参数	数值
LNG 压力(MPa)	0.85	换热管数	3
换热管长度(m)	3	换热管折流数	4
换热管径(m)	0.05	管间距(m)	0.5
喷嘴宽度(m)	0.02	喷射速度(m/s)	12.75
喷嘴分布	每排设 39 个喷嘴,沿 $x=0.1\sim 3.9$ m 均匀分布,共 3 排,合计 117 个		

1°、1.5°、2°、3°情况下管内流体的截面含气率如图 1 所示。可以看出,在水平管情况下  $x=2\sim 7$  m 这段区域内,大量气相产生沉积,阻碍了流动的发展。在气相沉积区域,新流入的液化天然气流体从底部很狭窄的流通截面流过,流速增大,使其流经换热管的停留时间无法满足换热气化过程。因此,在后边的区域内截面含气率骤然降低,流过气化器的液化天然气无法达到气化要求便从出口流出了。在倾斜角  $\beta=1^\circ$  的情况下,气相大量沉积现象有了明显的好转,但在末段  $x=9$  m 处还是出现了少量的气相沉积,以至近出口处含气率降低,影响了气化效果。在倾角  $\beta=1.5^\circ$  的情况下,基本没有了气相沉积现象,近出口处含气率略有波动,但已经能够满足出口气体的要求。在倾角  $\beta=2^\circ$  和  $\beta=3^\circ$  的情况下,流体在管内顺利流动,与管外热水浴对流传热,受热后温度升高、气化,最后以过热气体状态流出。

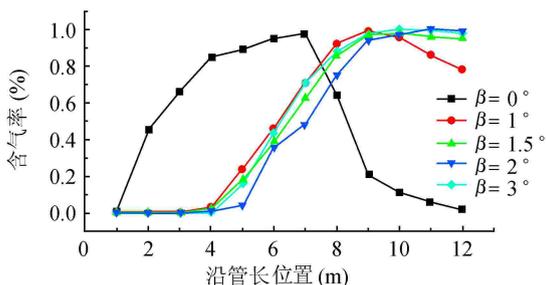
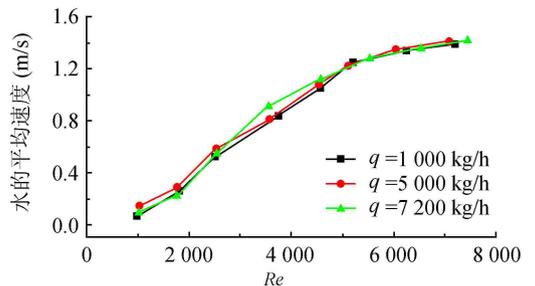


图1 含气率沿管长的分布图

水的平均速度随喷射气体  $Re$  的变化情况如图 2 所示。随着射流气体  $Re$  的增大,气体对壳程水浴的扰动加强,水的平均速度增大。在  $Re$  为  $1\times 10^4\sim 5\times 10^4$  的范围内,水的速度增大幅度较大;当  $Re$  达到  $5\times 10^4$  后,变化趋势开始趋于平稳。在不同质量流量情况下,得到的结论基本一致,水的平均速度大小随着射流气体  $Re$  的增大而增大,而与通入射流气体的量无关。

图2 水的平均速度随喷射气体  $Re$  的变化图

喷嘴与换热管的排列方式有同位和错位两种。在相同喷射气体  $Re(Re=5\times 10^4)$  下,不同质量流量情况在同位排列和错位排列时的传热系数如图 3 所示。可见,在其他条件相同的情况下,喷嘴与换热管的同位排列更有利于传热的进行。

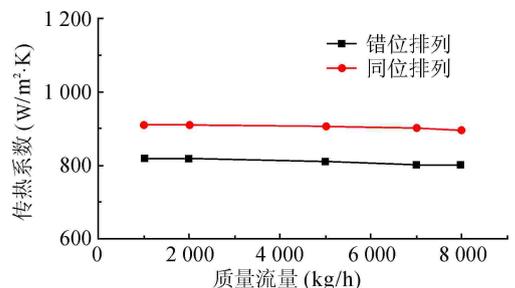


图3 两种排列方式下传热系数的比较图

### 3 结 论

对 LNG 沉浸式气化器流动传热过程进行数值模拟,描述了流体在气化器中的流动和传热情况,得到了以下结论:

1) 气化器中换热管水平放置时,存在气化后的气体沉积现象,严重影响气化器正常工作。换热管倾斜角即可解决这一问题。

2) 喷射气体的雷诺数对壳程流体的流动影响较大,壳程水浴的平均速度随着喷射气体雷诺数的增大而增大,而基本不受质量流量变化的影响。

3) 对比喷嘴和换热管的同位排列和错位排列两种方式,在其他条件相同的情况下,喷嘴与换热管的同位排列更有利于传热的进行。

#### 参 考 文 献

[1] 顾安忠,鲁雪生,汪荣顺,等.液化天然气技术[M].北京:

机械工业出版社,2003.

[2] 杜光能.LNG 终端接收站工艺及设备[J].天然气工业,1999,19(5):82-86.

[3] 廖志敏,杜晓春,陈刚,等.LNG 的研究和应用[J].天然气与石油,2005,23(3):28-31.

[4] 严铭卿.LPG 气化器气化模型及热负荷计算[J].煤气与热力,2000,20(1):51-53.

[5] 张存泉,徐烈.液化天然气(LNG)槽车自增压空温式气化器的设计计算[J].天然气工业,2002,22(3):86-88.

[6] 李多金.LNG 汽车燃料气化器设计与实验研究[J].低温与超导,2007,35(6):533-535.

[7] PRITHIVIRAJ M, ANDREWS M J. Three-dimensional numerical simulation of shell and tube heat exchangers[J].Numerical Heat Transfer,1998(33):799-828.

[8] 黄兴华.管壳式换热器壳程流动的三维数值模拟[J].化工学报,2000,51(3):297-302.

(修改回稿日期 2008-11-26 编辑 赵 勤)