

文章编号: 1000-8241(2018)07-0822-09

# FLNG 填料塔内气体分布器适应性试验

唐建峰<sup>1,2</sup> 金新明<sup>1</sup> 周军逸<sup>1</sup> 杨文刚<sup>3</sup> 崔健<sup>1</sup> 张豪杰<sup>1</sup>1. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院; 2. 山东省油气储运安全省级重点实验室;  
3. 中海石油气电集团技术研发中心

**摘要:** 填料塔作为现代化工工艺生产中不可或缺的处理设备,其性能在一定程度上受到气体分布器的影响,均布效果优良的气体分布器可一定程度提高填料塔的吸收效果。双切向环流式气体分布器因其压降低、液沫夹带量小、气体分布效果较好等特性而被广泛应用于填料塔内。以双切向环流式气体分布器为研究对象,分别选取静止状态和 16 s 周期下横摇、纵摇、艏摇 8° 及横荡、纵荡、垂荡 150 mm 的工况进行实验研究,对海上晃动条件下 FLNG 填料塔内气体分布器适应性开展研究。结果表明:在 6 个自由度晃动中,除横荡工况下气体分布不均匀,其系数较静止时增加 3.03%,其余晃动工况对气体均布有一定的促进效果,故气体分布器在 FLNG 填料塔内的设计可与陆上保持一致。(图 14,表 9,参 19)

**关键词:** FLNG; 填料塔; 双切向环流式气体分布器; 海上工况; 晃动

中图分类号: TE821

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2018.07.016

## Compatibility test of gas distributor in the FLNG packed tower

TANG Jianfeng<sup>1,2</sup>, JIN Xinming<sup>1</sup>, ZHOU Junyi<sup>1</sup>, YANG Wengang<sup>3</sup>, CUI Jian<sup>1</sup>, ZHANG Haojie<sup>1</sup>

1. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (East China); 2. Shandong Key Laboratory of Oil and Gas Storage and Transportation Security; 3. Technology R &amp; D Center of CNOOC Gas &amp; Power Group

**Abstract:** The packed tower is the indispensable processing equipment in modern chemical technique and production, and its performance is partly influenced by the gas distributor. The gas distributor with great uniform distribution effect can, in a way, enhance the absorption effect of packed tower. The twin-tangential annular flow gas distributor is widely applied in packed towers owing to its advantages of small pressure drop, little liquid entrainment and better gas distribution. In this paper, the twin-tangential annular flow gas distributor was taken as the study object to conduct the experimental study on the adaptability of gas distributor in the FLNG packed tower in the sea conditions of sloshing, including quiescent condition, rolling, pitching and yawing by 8 degrees and swaying, surging and heaving by 150 mm in the cycle of 16 s. It is shown that 6 freedom-degree sloshes except the swaying promote the uniform gas distribution. In the working condition of swaying, the gas distribution is not uniform and its coefficient is 3.03% higher than that of quiescent condition. Therefore, the design of gas distributor in the FLNG packed tower can be consistent with that on the land. (14 Figures, 9 Tables, 19 References)

**Key words:** FLNG, packed tower, twin-tangential annular flow gas distributor, sea condition, sloshing

新型远洋天然气开采设备浮式液化天然气船 FLNG 具有投资成本低、建设周期短、可重复使用的优点,能够有效解决深海天然气资源的开采问题<sup>[1-7]</sup>。为满足填料塔内良好的气体分布,已经研发出多种类型、不同功能的气体分布器<sup>[8-11]</sup>,包括切向号角式、多孔直管式、直管挡板式、单切向环流式、双切向环流式、双列叶片式及轴径向式。其中双切向环流式气体分布器压

降小、气体分布效果好、液沫夹带量小,综合性能优良,应用广泛。

受海洋复杂多变环境的影响,FLNG 船不可避免地会产生各种晃动<sup>[12-15]</sup>。为探索晃动对气体分布器性能的影响规律,针对双切向环流式气体分布器进行晃动条件下的实验研究,旨在为海上 FLNG 船的设计提供理论支持。

# 1 分布器晃动实验

为准确模拟海上晃动工况,搭建双切向环流式气体分布器晃动实验平台(图1),其主要由晃动平台、双切向环流式气体分布器塔段、风机、流量计、压力表及风速检测装置组成。实验选取介质为空气。实验流程如下:开启风机,调节入塔流量至气体分布器额定流量 6 000 m<sup>3</sup>/h,使分布器内流场趋于稳定;利用晃动平台实现 6 个自由度海上晃动工况模拟,采用数字风速计测量分布器出口风速。

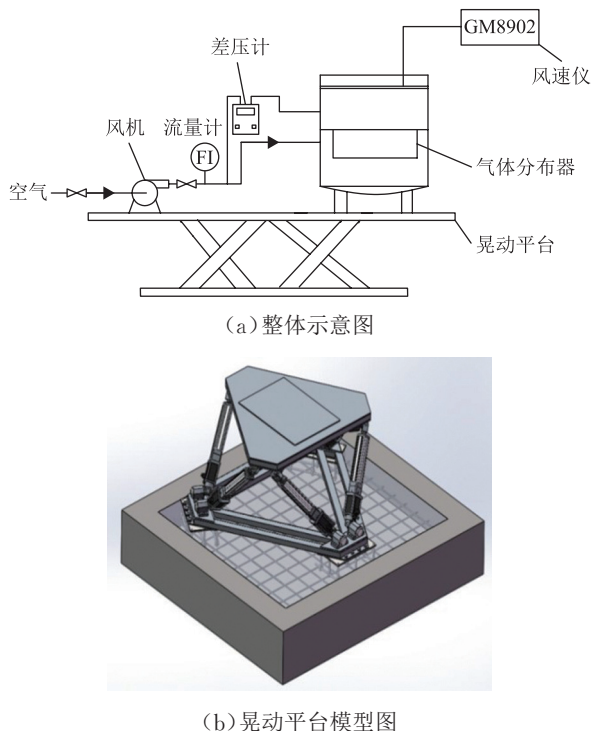


图1 双切向环流式气体分布器晃动实验平台示意图

将双切向环流式气体分布器实验装置的 6 种单—自由度晃动形式(图2)定义为<sup>[16-17]</sup>:①横摇,即分布器以  $x$  轴为转动轴,在一定角度内做摇摆运动;②纵摇,

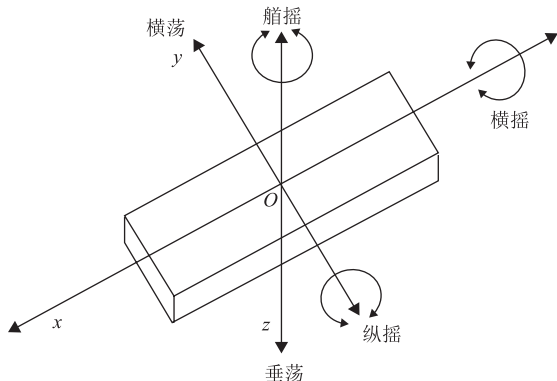


图2 双切向环流式气体分布器晃动形式示意图

即分布器以  $y$  轴为转动轴,在一定角度内做摇摆运动;③船摇,即分布器以  $z$  轴为转动轴,在一定角度内做摇摆运动;④横荡运动为分布器沿  $y$  轴方向的直线运动;⑤纵荡运动为分布器沿  $x$  轴方向的直线运动;⑥垂荡运动为分布器沿  $z$  轴方向的直线运动。在实验中,横摇、纵摇、船摇最大角度为 8°,横荡、纵荡、垂荡最大运动幅度为 150 mm。

# 2 结果分析

## 2.1 评价指标

气体的均布性是评价分布器性能最重要的指标。采用分布不均匀系数  $M_f$  衡量气体分布器性能<sup>[18-19]</sup>,对出口各测点进行整体性评价,是目前对分布器均布性能较为常用的评价方法,  $M_f$  越大代表分布器的分布性能越差,其计算公式为:

$$M_f = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{u_i - u}{u} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中:  $n$  为测量平面内的测点个数;  $u_i$  为  $i$  点轴向风速, m/s;  $u$  为平均轴向风速, m/s。

## 2.2 分布器性能

### 2.2.1 静止工况

设置气体分布器的入口流量分别为 3 000 m<sup>3</sup>/h、4 000 m<sup>3</sup>/h、5 000 m<sup>3</sup>/h、6 000 m<sup>3</sup>/h、7 000 m<sup>3</sup>/h,为更好地体现其分布特性及在不同区域的气体分布效果,选取 3 条测量线 A、B、C 进行不同进气量下出口风速分析,每条测量线包含 9 个测点(图3,其中测量点 0 为各条测量线的交点,位于分布器出口中心处)。

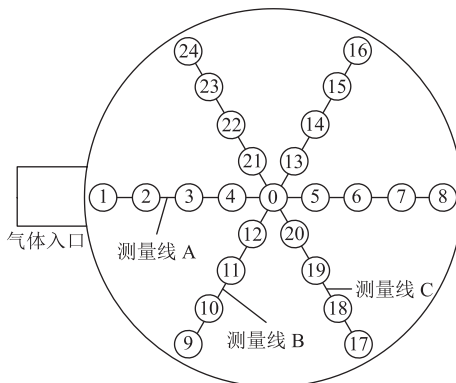
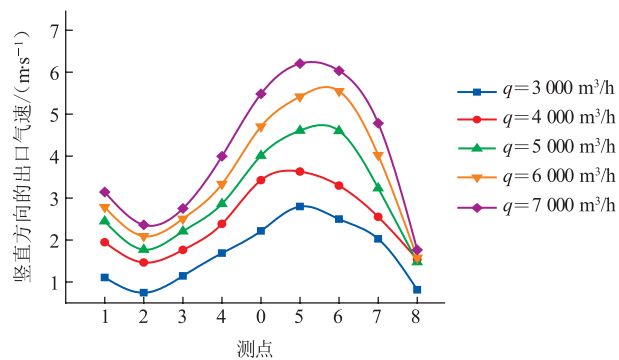


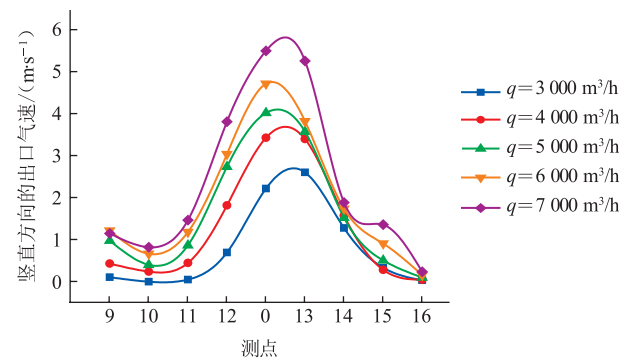
图3 气体分布器中测量线 A、B、C 分布示意图

根据双切向环流式气体分布器静止工况的实验结果,得到不同进气量下 3 条测量线上风速分布曲线(图4,其中  $q$  为气体分布器入口流量;  $v$  为气体分布器

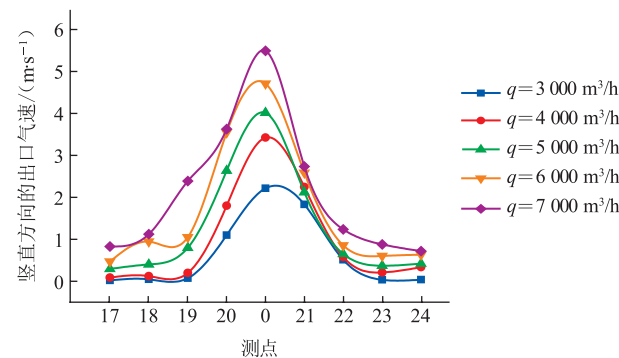
出口气速在竖直方向的分量)。根据不同气量下的气速分布曲线,可得到分布器内天然气的流动规律:气体入塔后距入口较远侧气速偏大,离入口较近处气速偏小;以气速最大处为中心,沿各方向气速呈现降低趋势。这是由于气体入塔后有水平方向的速度分量 $v_1$ ,受 $v_1$ 影响,气体在被导流板倒流向下至塔底后不会折而向上,而是沿塔底流向对面塔壁, $v_1$ 在流动过程中因摩擦而损耗。当 $v_1=0$ 时,气体向上运动,导致离入口较远侧气速偏大;最大气速中心周围易产生回流,导致局部气速过小。



(a) 测量线 A



(b) 测量线 B



(c) 测量线 C

图4 静止工况不同进气量下3条测量线气速分布图

2.2.2 晃动工况

根据双切向环流式气体分布器的晃动形式,将

出口划为4个区域(图5),通过计算各区域气速平均值和出口分布不均匀系数,得出晃动对气体分布器性能的影响。为方便研究,在16s晃动周期内,定义横摇、纵摇、艏摇4s时刻为晃动 $8^\circ$ ,横摇、纵摇、艏摇12s时刻为晃动 $-8^\circ$ ;同理,定义横荡、纵荡、垂荡4s时刻为晃动150mm,横荡、纵荡、垂荡12s时刻为晃动 $-150$ mm。考虑到分布器结构的不完全对称性及晃动影响最大化,选取横摇 $8^\circ$ 、纵摇 $\pm 8^\circ$ 、艏摇 $8^\circ$ 、横荡150mm、纵荡 $\pm 150$ mm、垂荡 $\pm 150$ mm进行研究。

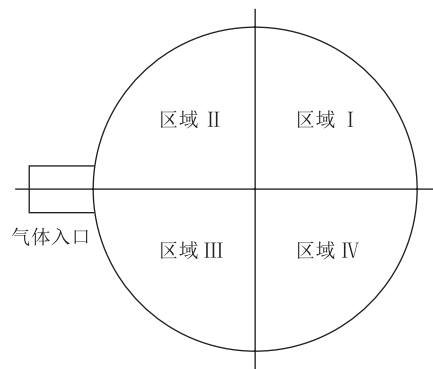


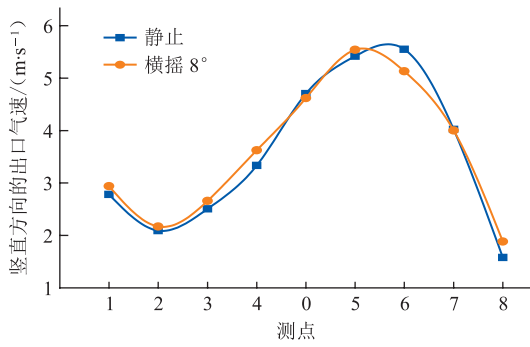
图5 双切向环流式气体分布器出口区域划分示意图

2.2.2.1 横摇

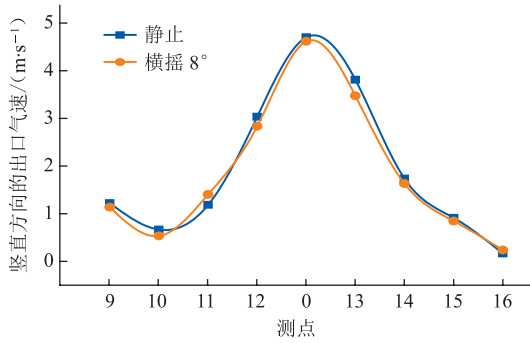
根据双切向环流式气体分布器实验结果,当气量为 $6000\text{ m}^3/\text{h}$ (与额定流量相等)时,将横摇 $8^\circ$ 与静止工况下4个区域各测点气速平均值进行对比,并根据式(1)计算得到出口气体分布不均匀系数(表1、图6)。可见,当双切向环流式气体分布器横摇 $8^\circ$ 时,分布器出口气速分布与静止时刻规律相同,区域IV平均气速较静止时增大11.71%,各区域受晃动影响规律不明显,与气体流动性大、惯性小有关;气体分布不均匀系数较静止时降低0.52%,对气体均布效果有一定促进作用,这是由于横摇使内部气流产生紊动,降低了分布不均匀性。因此,横摇对气体分布器的影响可以忽略。

表1 横摇 $8^\circ$ 与静止时分布器出口不同区域气速平均值及整体分布不均匀系数

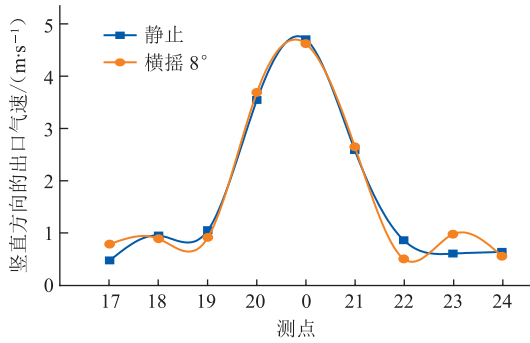
| 出口区域   | 气速平均值/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) |       | 分布不均匀系数      |       |
|--------|--|-------|--------------|-------|
|        | 横摇 $8^\circ$                           | 静止    | 横摇 $8^\circ$ | 静止    |
| 区域 I   | 2.441                                  | 2.644 | 0.756        | 0.760 |
| 区域 II  | 1.635                                  | 1.580 | 0.756        | 0.760 |
| 区域 III | 1.892                                  | 1.921 | 0.756        | 0.760 |
| 区域 IV  | 2.394                                  | 2.143 | 0.756        | 0.760 |



(a)测量线 A

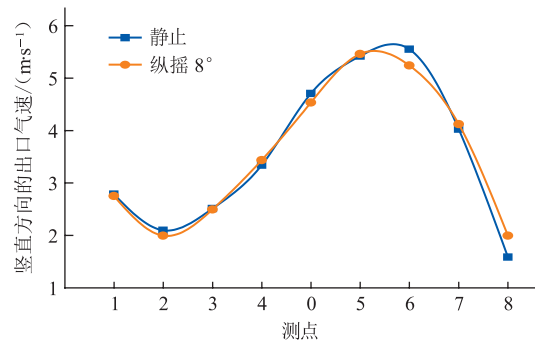


(b)测量线 B

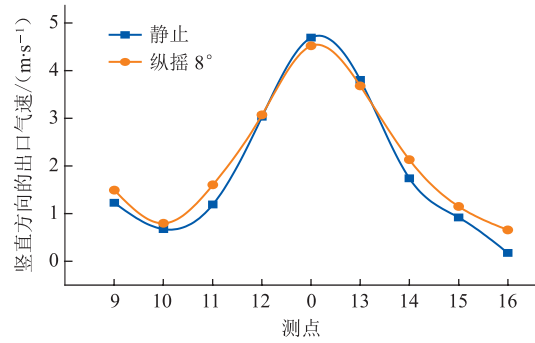


(c)测量线 C

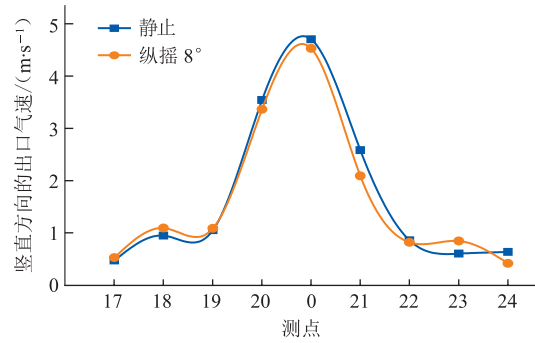
图 6 气量为 6 000 m<sup>3</sup>/h 时静止与横摇 8° 工况下 3 条测量线气速对比图



(a)测量线 A



(b)测量线 B



(c)测量线 C

图 7 气量为 6 000 m<sup>3</sup>/h 时静止与纵摇 8° 工况下 3 条测量线气速对比图

2.2.2.2 纵摇

根据双切向环流式气体分布器实验结果,当气量为 6 000 m<sup>3</sup>/h 时,将纵摇 8° 与静止工况下 4 个区域各测点气速平均值进行对比,并根据式(1)计算得到出口气体分布不均匀系数(表 2、图 7)。

表 2 纵摇 8° 与静止时分布器出口不同区域气速平均值及整体分布不均匀系数

| 出口区域   | 气速平均值/(m·s <sup>-1</sup> ) |       | 分布不均匀系数 |       |
|--------|----------------------------|-------|---------|-------|
|        | 纵摇 8°                      | 静止    | 纵摇 8°   | 静止    |
| 区域 I   | 2.818                      | 2.644 | 0.745   | 0.760 |
| 区域 II  | 1.481                      | 1.580 | 0.745   | 0.760 |
| 区域 III | 1.975                      | 1.921 | 0.745   | 0.760 |
| 区域 IV  | 2.105                      | 2.143 | 0.745   | 0.760 |

根据双切向环流式气体分布器实验结果,当气量为 6 000 m<sup>3</sup>/h 时,将纵摇 -8° 与静止工况下 4 个区域各测点气速平均值进行对比,并根据式(1)计算得到出口气体分布不均匀系数(表 3、图 8)。

表 3 纵摇 -8° 与静止时分布器出口不同区域气速平均值及整体分布不均匀系数

| 出口区域   | 气速平均值/(m·s <sup>-1</sup> ) |       | 分布不均匀系数 |       |
|--------|----------------------------|-------|---------|-------|
|        | 纵摇 -8°                     | 静止    | 纵摇 -8°  | 静止    |
| 区域 I   | 2.891                      | 2.644 | 0.755   | 0.760 |
| 区域 II  | 1.551                      | 1.580 | 0.755   | 0.760 |
| 区域 III | 1.968                      | 1.921 | 0.755   | 0.760 |
| 区域 IV  | 2.097                      | 2.143 | 0.755   | 0.760 |

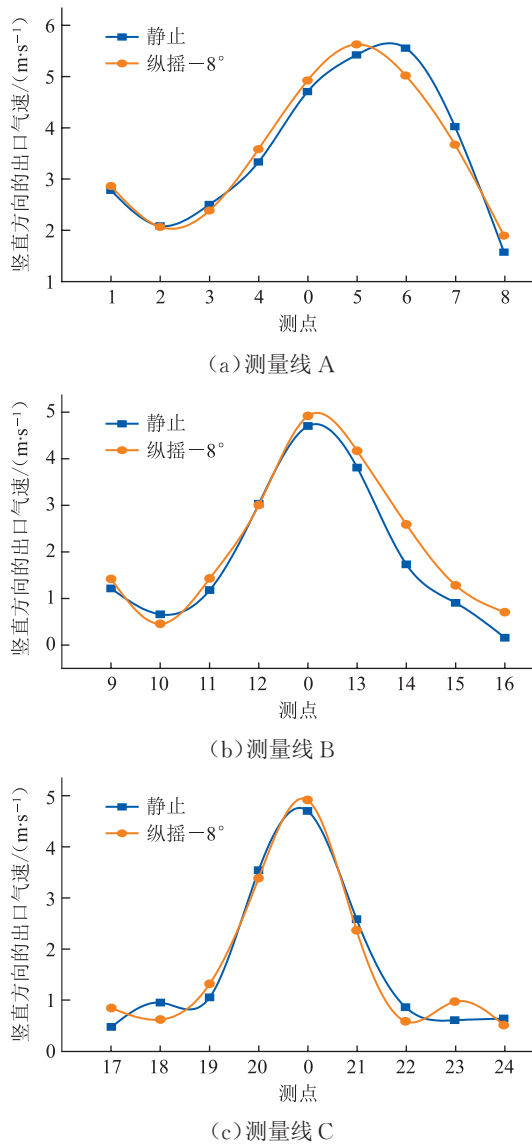


图8 气量为6000 m<sup>3</sup>/h时静止与纵摇-8°工况下3条测量线气速对比图

当双切向环流式气体分布器纵摇至最大幅度处,分布器出口气速分布与静止时的变化规律相同,区域I受纵摇影响最大,纵摇-8°时较静止增大9.34%,其余区域受纵摇影响较小,各区域受晃动影响规律不明显,这与气体流动性大、惯性小有关。气体分布不均匀系数较静止时分别降低-1.97%和-0.66%,对均布效果有一定促进作用,这是由于纵摇使内部气流产生紊动,降低了分布不均匀性。因此,纵摇对气体分布器的影响可以忽略。

2.2.2.3 船摇

根据双切向环流式气体分布器实验结果,当气量为6000 m<sup>3</sup>/h时,将船摇8°与静止工况下4个区域各测点气速平均值进行对比,并根据式(1)计算得到出口气体分布不均匀系数(表4、图9)。

表4 船摇8°与静止时分布器出口不同区域气速平均值及整体分布不均匀系数

| 出口区域  | 气速平均值/(m·s <sup>-1</sup> ) |       | 分布不均匀系数 |       |
|-------|----------------------------|-------|---------|-------|
|       | 船摇8°                       | 静止    | 船摇8°    | 静止    |
| 区域I   | 2.724                      | 2.644 | 0.759   | 0.760 |
| 区域II  | 1.594                      | 1.580 | 0.759   | 0.760 |
| 区域III | 1.898                      | 1.921 | 0.759   | 0.760 |
| 区域IV  | 2.147                      | 2.143 | 0.759   | 0.760 |

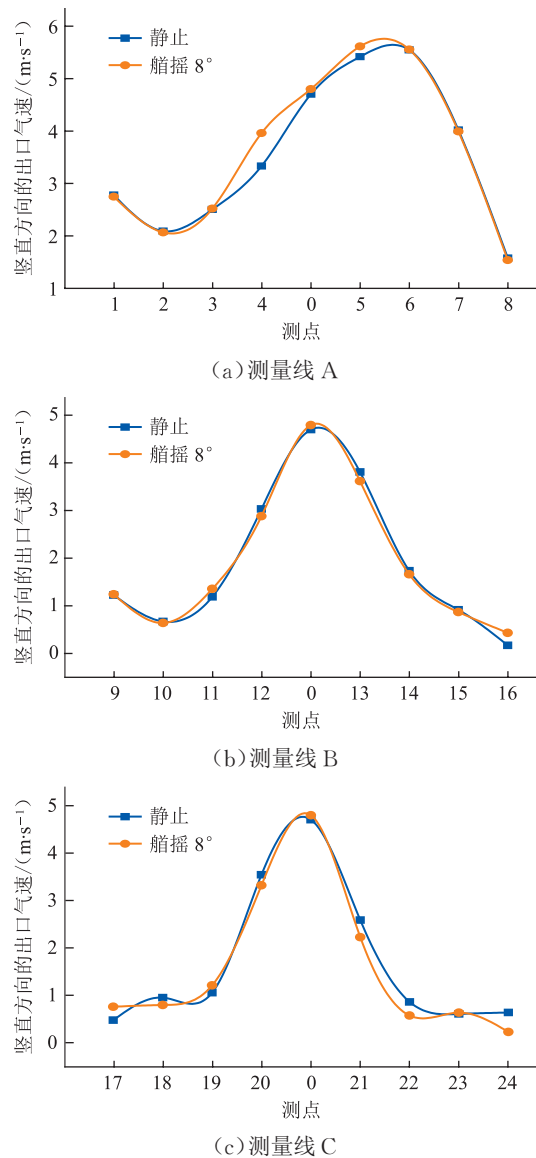


图9 气量为6000 m<sup>3</sup>/h时静止与船摇8°工况下3条测量线气速对比图

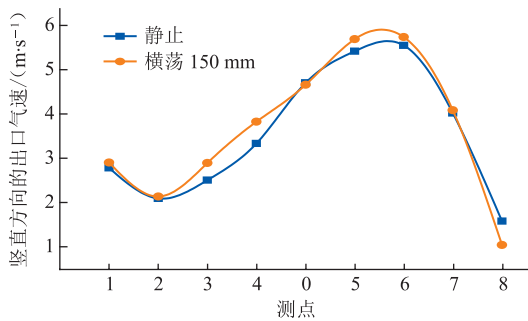
当双切向环流式气体分布器船摇8°时,分布器出口气速分布与静止时刻规律相同,各区域受晃动影响较小且规律不明显,这与气体流动性大、惯性小有关;气体分布不均匀系数较静止时降低-0.13%,对均布效果有一定促进作用,这是由于船摇使内部气流产生紊动,降低了分布不均匀性。因此,船摇对气体分布器的影响可以忽略。

2.2.2.4 横荡

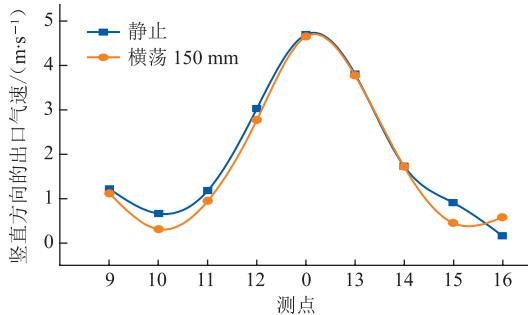
根据双切向环流式气体分布器实验结果,当气量为 6 000 m<sup>3</sup>/h 时,将横荡 150 mm 与静止工况下 4 个区域各测点气速平均值进行对比,并根据式(1)计算得到出口气体分布不均匀系数(表 5、图 10)。

表 5 横荡 150 mm 与静止时分布器出口不同区域气速平均值及整体分布不均匀系数

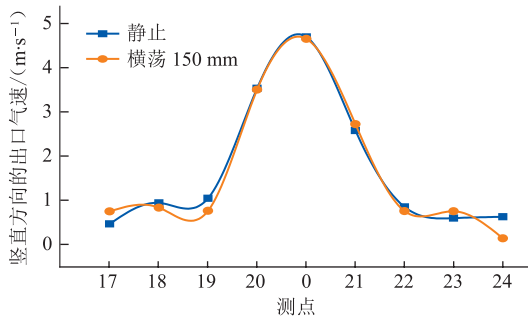
| 出口区域   | 气速平均值/(m·s <sup>-1</sup> ) |       | 分布不均匀系数   |       |
|--------|----------------------------|-------|-----------|-------|
|        | 横荡 150 mm                  | 静止    | 横荡 150 mm | 静止    |
| 区域 I   | 2.658                      | 2.644 | 0.783     | 0.760 |
| 区域 II  | 1.753                      | 1.580 | 0.783     | 0.760 |
| 区域 III | 1.864                      | 1.921 | 0.783     | 0.760 |
| 区域 IV  | 2.081                      | 2.143 | 0.783     | 0.760 |



(a) 测量线 A



(b) 测量线 B



(c) 测量线 C

图 10 气量为 6 000 m<sup>3</sup>/h 时静止与横荡 150 mm 工况下 3 条测量线气速对比图

当双切向环流式气体分布器横荡 150 mm 时,分布器出口气速分布与静止时的变化规律相同,区域 II 存在最大气速增幅 10.95%,沿横荡方向区域 I、区域

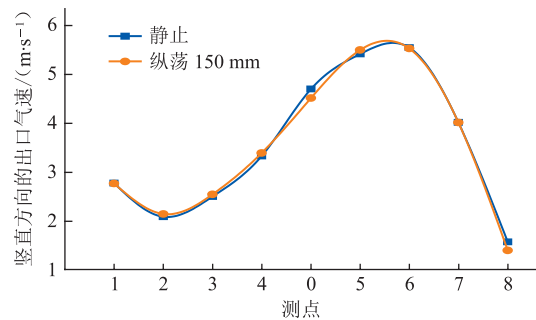
II 气速增大,其相对侧区域 III、区域 IV 气速降低,气速分布规律整体不变;气体分布不均匀系数较静止时小幅提高 3.03%。因此,横荡对气体分布器性能影响可以忽略。

2.2.2.5 纵荡

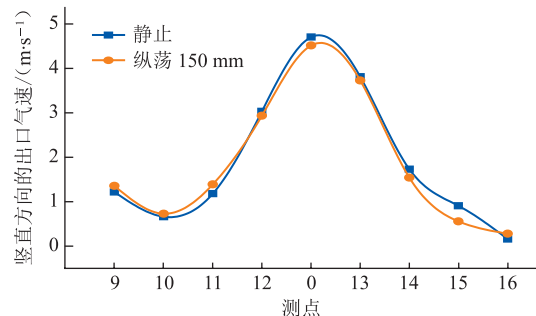
根据双切向环流式气体分布器实验结果,当气量为 6 000 m<sup>3</sup>/h 时,将纵荡 150 mm 与静止工况下 4 个区域各测点气速平均值进行对比,并根据式(1)计算得到出口气体分布不均匀系数(表 6、图 11)。

表 6 纵荡 150 mm 与静止时分布器出口不同区域气速平均值及整体分布不均匀系数

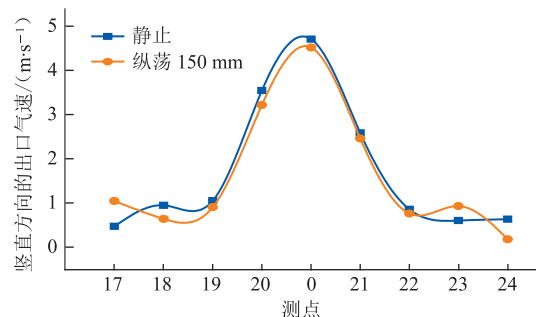
| 出口区域   | 气速平均值/(m·s <sup>-1</sup> ) |       | 分布不均匀系数   |       |
|--------|----------------------------|-------|-----------|-------|
|        | 纵荡 150 mm                  | 静止    | 纵荡 150 mm | 静止    |
| 区域 I   | 2.596                      | 2.644 | 0.758     | 0.760 |
| 区域 II  | 1.546                      | 1.580 | 0.758     | 0.760 |
| 区域 III | 1.917                      | 1.921 | 0.758     | 0.760 |
| 区域 IV  | 2.061                      | 2.143 | 0.758     | 0.760 |



(a) 测量线 A



(b) 测量线 B



(c) 测量线 C

图 11 气量为 6 000 m<sup>3</sup>/h 时静止与纵荡 150 mm 工况下 3 条测量线气速对比图

根据双切向环流式气体分布器实验结果,当气量为  $6\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$  时,将纵荡  $-150\ \text{mm}$  与静止工况下出口处 4 个区域各测点气速平均值进行对比,并根据式(1)计算得到出口气体分布不均匀系数(表 7、图 12)。

表 7 纵荡  $-150\ \text{mm}$  与静止时分布器出口不同区域气速平均值及整体分布不均匀系数

| 出口区域   | 气速平均值/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ |       | 分布不均匀系数              |       |
|--------|---------------------------------------|-------|----------------------|-------|
|        | 纵荡 $-150\ \text{mm}$                  | 静止    | 纵荡 $-150\ \text{mm}$ | 静止    |
| 区域 I   | 2.760                                 | 2.644 | 0.760                | 0.760 |
| 区域 II  | 1.635                                 | 1.580 | 0.760                | 0.760 |
| 区域 III | 1.893                                 | 1.921 | 0.760                | 0.760 |
| 区域 IV  | 2.097                                 | 2.143 | 0.760                | 0.760 |

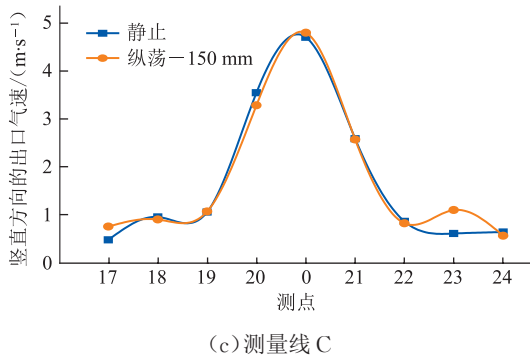
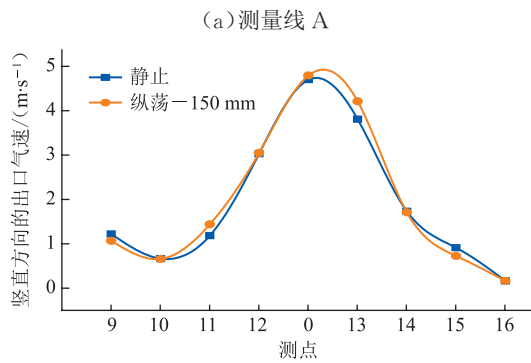
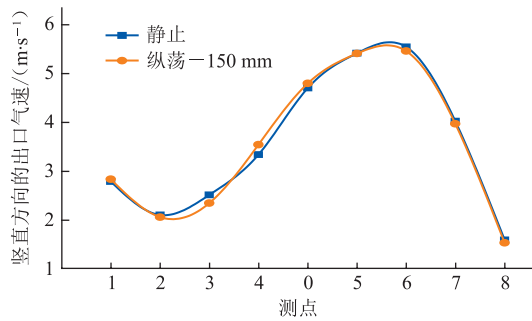


图 12 气量为  $6\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$  时静止与纵荡  $-150\ \text{mm}$  工况下 3 条测量线气速对比图

当双切向环流式气体分布器纵荡至最大幅度处分布器出口气速分布与静止时刻规律相同,各区域气速分布受横荡影响较小且规律不明显,这与气体流动性大,惯性小有关系;当纵荡  $150\ \text{mm}$  时,气体分布不均匀

系数较静止时降低  $-0.26\%$ ,对均布效果有一定促进作用,这是由于纵荡使内部气流产生紊动,降低了分布不均匀性。因此,纵荡对气体分布器的影响可以忽略。

2.2.2.6 垂荡

根据双切向环流式气体分布器实验结果,当气量为  $6\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$  时,将垂荡  $150\ \text{mm}$  与静止工况下 4 个区域各测点气速平均值进行对比,并根据式(1)计算得到出口气体分布不均匀系数(表 8、图 13)。

表 8 垂荡  $150\ \text{mm}$  与静止时分布器出口不同区域气速平均值及整体分布不均匀系数

| 出口区域   | 气速平均值/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ |       | 分布不均匀系数             |       |
|--------|---------------------------------------|-------|---------------------|-------|
|        | 垂荡 $150\ \text{mm}$                   | 静止    | 垂荡 $150\ \text{mm}$ | 静止    |
| 区域 I   | 2.757                                 | 2.644 | 0.749               | 0.760 |
| 区域 II  | 1.614                                 | 1.580 | 0.749               | 0.760 |
| 区域 III | 1.957                                 | 1.921 | 0.749               | 0.760 |
| 区域 IV  | 2.219                                 | 2.143 | 0.749               | 0.760 |

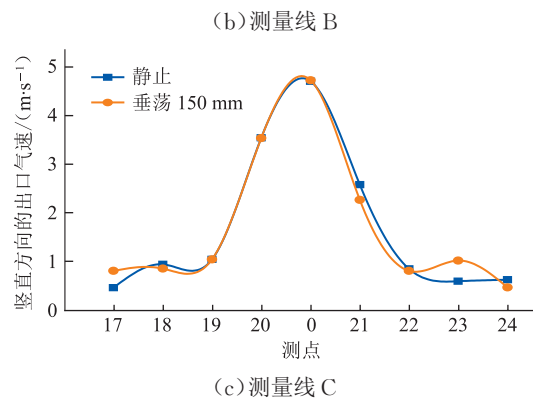
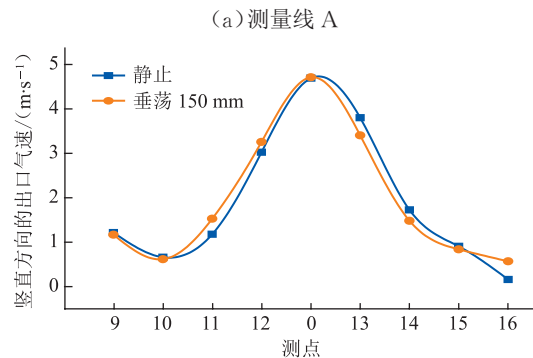
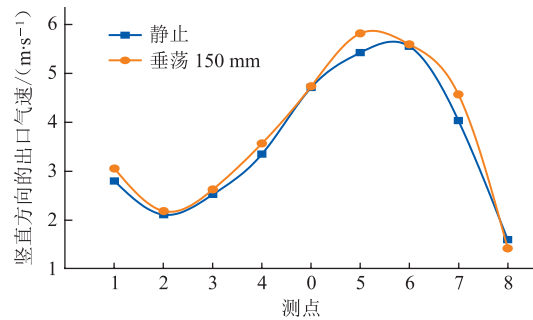
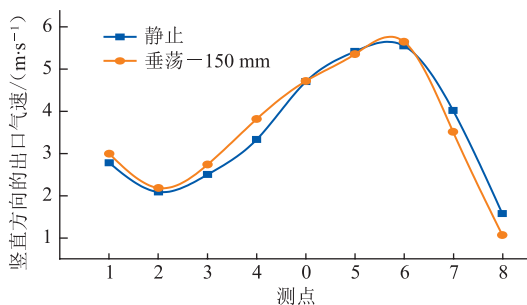


图 13 气量为  $6\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$  时静止与垂荡  $150\ \text{mm}$  工况下 3 条测量线气速对比图

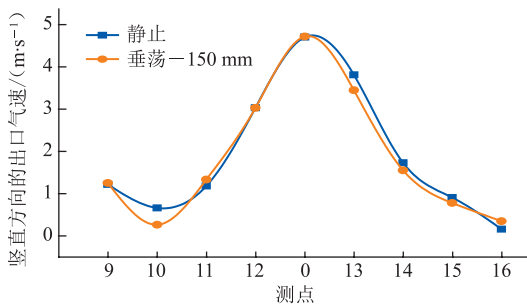
根据双切向环流式气体分布器实验结果,当气量为  $6\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$  时,将垂荡-150 mm 与静止工况下 4 个区域各测点气速平均值进行对比,并根据式(1)计算得到出口气体分布不均匀系数(表 9、图 14)。

表 9 垂荡-150 mm 与静止时分布器出口不同区域气速平均值及整体分布不均匀系数

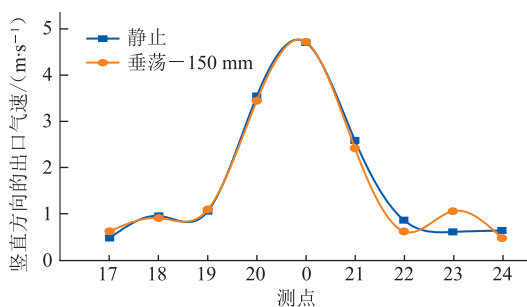
| 出口区域   | 气速平均值/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ |       | 分布不均匀系数   |       |
|--------|---------------------------------------|-------|-----------|-------|
|        | 垂荡-150 mm                             | 静止    | 垂荡-150 mm | 静止    |
| 区域 I   | 2.573                                 | 2.644 | 0.744     | 0.760 |
| 区域 II  | 1.638                                 | 1.580 | 0.744     | 0.760 |
| 区域 III | 1.965                                 | 1.921 | 0.744     | 0.760 |
| 区域 IV  | 2.098                                 | 2.143 | 0.744     | 0.760 |



(a) 测量线 A



(b) 测量线 B



(c) 测量线 C

图 14 气量为  $6\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$  时静止与垂荡-150 mm 工况下 3 条测量线气速对比图

当双切向环流式气体分布器垂荡至最大幅度时,分布器出口气速分布与静止时变化规律相同,各区域气速受垂荡影响较小且规律不明显,这与气体流动性大、惯性小有关;垂荡-150 mm 时刻气体分布不均匀系数较静止时降低-2.11%,对均布效果有一定的

促进作用,这是由于垂荡使内部气流产生紊动,降低了分布不均匀性。因此,垂荡对气体分布器的影响可以忽略。

### 3 结论

(1) 设计了双切向环流式气体分布器,并应用于实验塔段内,通过实验方法得到静止条件下该分布器的规律:距入口较远侧气速偏大,离入口较近处气速偏小;以气速最大处为中心,沿各方向气速有降低趋势。

(2) 借助双切向环流式气体分布器晃动平台,研究了横摇、纵摇、艏摇、横荡、纵荡、垂荡 6 种单自由度晃动形式对气体分布器性能的影响,其中横荡  $8^\circ$  时分布不均匀系数存在最大增幅 3.03%,较静止时偏差较小。综合考虑,海上晃动工况对双切向环流式气体分布器影响可以忽略,在 FLNG 中填料塔内气体分布器设计与陆上设计一致。

#### 参考文献:

- [1] 薄玉宝. 浮式液化天然气 (FLNG) 技术在中国海上开发应用探讨[J]. 中国海洋平台, 2013, 28(3): 1-5, 9.
- [2] BO Y B. Floating liquefied natural gas (FLNG) technology in China offshore development application to discussion[J]. China Offshore Platform, 2013, 28(3): 1-5, 9.
- [3] 夏丹, 郑云萍, 李剑峰, 等. 浮式液化天然气技术综述[J]. 天然气与石油, 2013, 32(3): 9-13.
- [4] XIA D, ZHENG Y P, LI J F, et al. Review on floating LNG production facility technology[J]. Natural Gas and Oil, 2013, 32(3): 9-13.
- [5] 颜映霄, 徐正斌, 王世清. 国内外海上油田油气集输及配套技术现状和发展趋势浅析[J]. 中国海洋平台, 2002(2): 9-12.
- [6] YAN Y X, XU Z B, WANG S Q. An analysis on the gathering & transportation technologies of offshore oil and gas and their relevant facilities[J]. China Offshore Platform, 2002(2): 9-12.
- [7] 唐建峰, 张豪杰, 程强, 等. 晃动对填料塔持液量影响研究[J]. 化学工程, 2017, 45(10): 54-58.
- [8] TANG J F, ZHANG H J, CHENG Q, et al. Influence of sloshing on dynamic liquid holdup of packing column[J]. Chemical Engineering (China), 2017, 45(10): 54-58.
- [9] 陈勇, 郑玄亮. 浮式液化天然气生产储卸船方案设计关键问题浅析[J]. 天津航海, 2016(3): 61-64.



- CHEN Y, ZHENG X L. Analysis on the key problems of the scheme design of floating liquefied natural gas production and unloading ship[J]. Navigation of Tianjin, 2016(3): 61-64.
- [6] 陈飞, 威尔·施密特, 杨绍军. 天然气液化工艺发展的新趋势——关键技术问题与案例分析[J]. 化工学报, 2015, 66(增刊 2): 22-29.
- CHEN F, SCHMIDT W, YANG S J. Meet new needs of LNG industry: liquefaction technology selection and case study[J]. CIESC Journal, 2015, 66(S2): 22-29.
- [7] 王俊美, 张道光, 卜晓玲, 等. 浮式 LNG 装置适用标准探讨[J]. 石油工业技术监督, 2013, 29(8): 23-27.
- WANG J M, ZHANG D G, BU X L, et al. Discussion on applicable standards for floating LNG plant[J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2013, 29(8): 23-27.
- [8] 潘国昌, 郭庆丰, 杨伯极. 填料塔进料气体分布器的研究[J]. 炼油设计, 1995, 25(2): 28-33.
- PAN G C, GUO Q F, YANG B J. Investigation on gas distributors in packing towers[J]. Petroleum Refinery Engineering, 1995, 25(2): 28-33.
- [9] 董谊仁, 侯章德. 现代填料塔技术(三) 填料塔气体分布器和其它塔内件[J]. 化工生产与技术, 1996, 4(12): 5-13.
- DONG Y R, HOU Z D. The technology for modern packed column (III) gas distributor and other tower internals[J]. Chemical Production and Technology, 1996, 4(12): 5-13.
- [10] 丰存礼. 双切环流气体分布器性能及放大规律研究[D]. 天津: 天津大学, 2004: 1-7.
- FENG C L. Study on performance and scale-up rule of twin-tangential annular flow gas distributor[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004: 1-7.
- [11] 刘德新, 李鑫钢, 徐世民. CFD 优化双切向环流式气体分布器设计[J]. 化工进展, 2007(增刊 1): 127-130.
- LIU D X, LI X G, XU S M. Optimized design of twin-tangential annular deflector vapor distributor with CFD[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2007(S1): 127-130.
- [12] 李焱, 喻西崇, 王春升, 等. 浮式液化天然气船 FLNG 工艺系统关键设备海上适应性分析[J]. 中国造船, 2016(A01): 154-161.
- LI Y, YU X C, WANG C S, et al. Analysis on the marine adaptability of key equipment of FLNG process system for floating liquefied natural gas vessel[J]. Shipbuilding of China, 2016(A01): 154-161.
- [13] 方华灿, 余雄鹰. 海上浮式采油用的油气水分离器内的液气界面晃动分析[J]. 石油矿场机械, 1989, 18(3): 5-11.
- FANG H C, YU X Y. Analysis of liquid gas interface sloshing in oil and gas water separator for offshore floating oil recovery[J]. Oil Field Equipment, 1989, 18(3): 5-11.
- [14] 唐建峰, 杨帆, 崔健, 等. 晃动对 FLNG 排管式液体分布器性能的影响[J]. 天然气工业, 2016, 36(1): 123-128.
- TANG J F, YANG F, CUI J, et al. Effects of sloshing on the performance of FLNG calandria liquid distributors[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(1): 123-128.
- [15] 刘婷婷, 阮诗伦, 尹江洲, 等. 浮式液化天然气液货围护系统的失效模式分析[J]. 海洋工程装备与技术, 2014, 1(1): 51-54.
- LIU T T, RUAN S L, YIN J Z, et al. Failure modes analysis of box structure of the containment system in FLNG[J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2014, 1(1): 51-54.
- [16] HWANG Y, JUNG J, KIM D, et al. An experimental study and numerical simulation on sloshing impact pressures with two identically shaped rectangular 2-dimensional model tanks with different sizes[C]. Vancouver: The Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, 2008: 16-28.
- [17] LUND-JOHANSEN Ø, ØSTVOLD T, BERTHON C F, et al. Full scale measurements of sloshing in LNG tanks[C]. Amsterdam: Proceedings, Det Norske Veritas Technical Papers, GASTECH Conference, 2011: 21-24.
- [18] ALAN M B, KEITH N G, WILLIAM J A, et al. Acid gas scrubbing composition: US2010/0329953A1[P]. 2010-10-03.
- [19] 张吕鸿, 张海涛, 姜斌, 等. 双切向环流气体分布器结构优化的研究[J]. 化学工程, 2008, 1(1): 34-36, 47.
- ZHANG L H, ZHANG H T, JIANG B, et al. Study on structural optimization of twin-tangential annular flow gas distributor[J]. Chemical Engineering (China), 2008, 1(1): 34-36, 47.

(收稿日期: 2016-12-25; 修回日期: 2018-05-21; 编辑: 李在蓉)

**基金项目:** 国家工信部项目“天然气预处理用大型塔器研制”, [2014]495。

**作者简介:** 唐建峰, 男, 1973 年生, 教授, 2011 年博士毕业于中国石油大学(华东)油气储运工程专业, 现主要从事气田集输、天然气预处理、FLNG 关键设备相关研究。地址: 山东省青岛市黄岛区长江西路 66 号中国石油大学(华东)工科楼 D 座, 266580。电话: 0532-86983173, Email: tangpaper@126.com