

耦合晃动工况下填料塔流体分布性能

唐建峰^{1,2}, 黄彬¹, 金新明¹, 花亦怀³, 史泽林¹, 程强¹

(1. 中国石油大学储运与建筑工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石油大学山东省油气储运安全省级重点实验室, 山东青岛 266580; 3. 中海石油气电集团技术研发中心, 北京 100027)

摘要:基于一套冷模填料塔晃动试验装置研究海上晃动工况对填料塔流体分布性能的影响。根据横摇、纵摇、横荡、纵荡、垂荡、艏摇 6 个单自由度晃动试验结果,分析筛选出对流体分布性能影响较大的晃动形式。以此为基础两两两相互耦合得到两自由度耦合晃动工况。再通过分析塔出口截面处的整体流量分布、环形流量分布、径向流量分布、壁流量分布试验指标,得出两自由度耦合晃动条件下填料塔流体分布规律。结果表明,摇摆及摇摆+摇摆的耦合晃动工况对液体的流动性能影响较大,并且随着晃动幅度增加,流体不均匀性增大。平荡对于液体流动性能的影响较小。

关键词:耦合晃动; 填料塔; 流体分布性能; 冷模试验

中图分类号:TE 95 **文献标志码:**A

引用格式:唐建峰,黄彬,金新明,等. 耦合晃动工况下填料塔流体分布性能[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017,41(1):130-137.

TANG Jianfeng, HUANG Bin, JIN Xinming, et al. Fluid distribution performance of packed tower under coupling sloshing working conditions[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017,41(1):130-137.

Fluid distribution performance of packed tower under coupling sloshing working conditions

TANG Jianfeng^{1,2}, HUANG Bin¹, JIN Xinming¹, HUA Yihuai³, SHI Zelin¹, CHENG Qiang¹

(1. College of Pipeline and Civil Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Oil and Gas Storage and Transportation Safety,
China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

3. CNOOC Gas & Power Group Research & Development Center, Beijing 100027, China)

Abstract: In a sloshing experimental facility of packed tower, the fluid distribution performance of packed tower under coupling sloshing conditions was studied. The sloshing patterns which have a great influence on the fluid distribution performance were analyzed and selected through six single degrees of freedom sloshing experiments. Then, the selected sloshing patterns with single degrees of freedom were combined in pairs to get the coupling sloshing patterns. The fluid distribution performances of packed tower under the coupling sloshing conditions were obtained by analyzing the overall flow, annular flow, radial flow, wall flow in the exit area of packed tower. The results show that swaying and swaying+swaying coupling sloshing working condition have a large influence on the fluid distribution performance, and the flow unevenness is increasing accordingly with the increase of sloshing strength. Flat swing has less effects on the fluid distribution performance.

Keywords: coupling sloshing; packed tower; fluid distribution performance; cold model experiment

对能源需求的增加及陆上油气资源的日渐枯竭,使得远洋油气田开发进程不断加快,深海浮式液化天然气 (FLNG) 装置重要性凸显^[1-3]。填料吸收

塔是 FLNG 预处理工艺的核心设备,其运行情况对气体净化效果、气体品质及其经济效益等具有重大影响^[4-5]。目前关于海上晃动的研究主要是液仓、储

罐类的,关于塔器的研究较少^[6-9]。传统的陆上塔器无法在海浪、台风等恶劣条件下保证较高工作性能,因此分析填料塔在海洋晃动条件下的液体分布特征,增加其在 FLNG 装置上的适用性,促进中国深海气田、小型气田开发,充分利用中国海洋天然气资源,进而促进海上预处理关键技术国产化,推动相关产业发展具有重要意义^[10-12]。笔者研究采用的是工业中常用的 Mellapak350Y 型金属孔板波纹填料,填料高度为 2 m。首先对单自由度的影响进行试验分析,得到横摇、纵摇、横荡以及纵荡 4 个工况对流体分布的影响较大,以此为基础两两组合得到 6 组耦合试验工况。最终通过试验分析得出耦合晃动工况对规整填料塔流体分布性能的影响规律。

1 试验部分

1.1 试验流程

该试验装置的核心设备包括泵、转子流量计、冷模填料塔、晃动平台以及收集装置。转子流量计的型号是 LZB-100,最小刻度为 1 m³/h,量程为 15 m³/h,获取数据的误差为 6.8%,在允许误差范围内,满足试验精度要求。液相循环流程(图 1)为:水槽内的水经泵打入浮子流量计,水流量的大小可通过调节阀门开度进行设定。水进入填料塔后,依次经过液体分布器、填料以及取样收集装置,最终重新流回水槽。晃动平台和控制电脑组成的晃动系统可以实现冷模填料塔在单自由度以及耦合自由度不同晃动工况下的晃动,其中各单自由度晃动轨迹如图 2 所示。

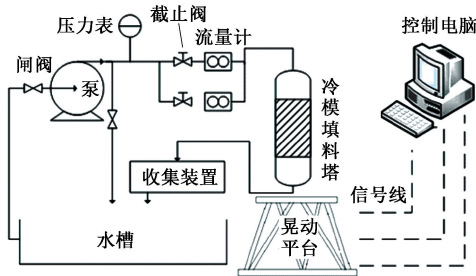


图 1 试验流程
Fig. 1 Experimental process

1.2 试验设备

试验采用的泵为离心泵,流量计为转子流量计,阀门为闸阀。主要介绍收集取样以及晃动装置。图 3 为取液装置。由图 3 可知,收集装置主要包括塔底截面处焊接的取样漏斗、同时开关系统及收集容器。装置中共存在从 1-1 开始至 5-3 结束的 19 个塔截面内部液体取样点以及 B-1 至 B-6 的 6 个壁流量取样点。取样点处装有取样漏斗,当开

始取样时,装置开关同时开启,水流入收集容器,取样结束时同时关闭,停止取液,再量取收集到的液体体积。根据水的体积以及时间得出流量数值。

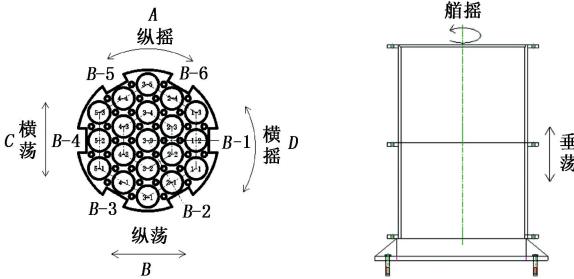


图 2 冷模塔晃动形式示意图
Fig. 2 Sloshing type of cold model tower

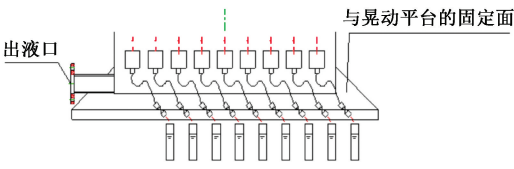


图 3 取液装置
Fig. 3 Sampling device

晃动装置如图 4 所示,主要包括晃动平台、控制柜以及控制电脑。控制电脑可以通过控制柜对晃动平台进行控制。控制平台的晃动是在伺服电机的驱动下通过液压装置实现的。该晃动平台可以实现的晃动工况为:频率 0 ~ 10 Hz,摇摆幅度 0 ~ 10°,平荡幅度 0 ~ 150 mm。

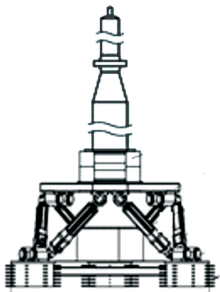


图 4 晃动平台示意图
Fig. 4 Sloshing platform

1.3 试验指标

试验指标主要包括两部分:分布不均匀度指标以及流量分布指标。两指标的确定过程如下。

(1)不均匀度指标。

不均匀度这一指标反映塔截面整体的分布均匀程度。其计算公式^[13]为

$$M_f = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{l_i - \bar{l}}{\bar{l}} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (1)$$

式中, M_f 为塔底截面上出口流量的不均匀度; n 为塔底截面上计算取样点数,个; l_i 为塔底截面上 i 点的流量, m³/s; $\bar{l}$ 为塔底截面上平均流量, m³/s。

(2) 流量分布指标。

本文中分析涉及的流量指标包括整体流量分布、环形流量分布、径向流量分布以及壁流量分布。整体流量分布是对 19 个塔底截面内部取样点的流量进行分析。

环形流量分布分析的是不同直径处环形区域内的流量分布情况,图 2 中内环取样点包括 2-2、2-3、3-4、4-3、4-2、3-2,外环取样点包括 1-1、1-3、3-5、5-3、5-1、3-1。

为分析未晃动工况下对塔截面不同径向位置流量分布的影响,引入径向流量分布曲线这一分布指标。其中 3-1、3-2、3-3、3-4、3-5 为 AB 向径向流量分布分析对象。1-2、2-2 与 2-3 的均值、3-3、4-2 与 4-3 的均值、5-2 为 CD 向径向流量分布分析对象。

壁流量作为塔器分布性能分析的重要指标,以塔底 6 个方位的壁面取样点的流量表征塔器壁面流量分布情况。

2 试验结果及其分析

2.1 耦合晃动工况确定

根据前期资料调研,海上大型 LNG 船舶受海浪影响的晃动周期约在 10 ~ 30 s,因此取中间值附近周期展开研究,即晃动周期为 16 s;摇摆晃动幅度约在 2° ~ 6°,因此晃动幅度主要选取 2° 和 5° 展开研究;而平荡晃动幅度在 1 m 左右,由于试验塔器装置与实际

塔器直径比约为 1 : 10,因此选取平荡幅度为 0.1 m。

为了更好地反映晃动形式对填料塔流体性能的影响,减少试验误差,取样时间设定为晃动平台中立位时开始,至晃动平台到最大幅度处停止,时间间隔为四分之一周期,即 4 s。本文中所提到的流量为这 4 s 内的累积流量,单位: mL。

在单自由度晃动工况试验结果的基础上确定两自由度耦合工况。首先进行单自由度试验,单自由度试验工况:液相流量为 15 m³/h,填料层高度为 2 m,晃动周期为 16 s,摇摆运动幅度为 5°,平荡运动幅度为 100 mm。单自由度晃动试验的整体流量分布情况如图 5 所示。

单自由度晃动条件下整体流量分布如图 5 所示。横摇 5° 时, B 侧取样点流量较大,最高流量在 300 mL 左右, A 侧取样点流量较少,最少流量为 100 mL 左右,整体呈现出一种 AB 方向分布不均的现象。这与塔器摇动轨迹有密切联系。由于摇动方向为 AB 向,塔体产生倾斜,液体受重力和加速度的影响,导致液体向倾斜的方向累积,使得此方向的流量大于相反方向,产生流量分布不均匀。与之类似,当纵摇 5° 时,截面 CD 方向取样点的流量发生变化,变化规律与横摇 5° 相类似。从图 5 中可以看出,艏摇 5° 时,外部取样点的流量大于内部取样点的流量,这是由于艏摇产生的离心力使液体向外部偏移的结果。

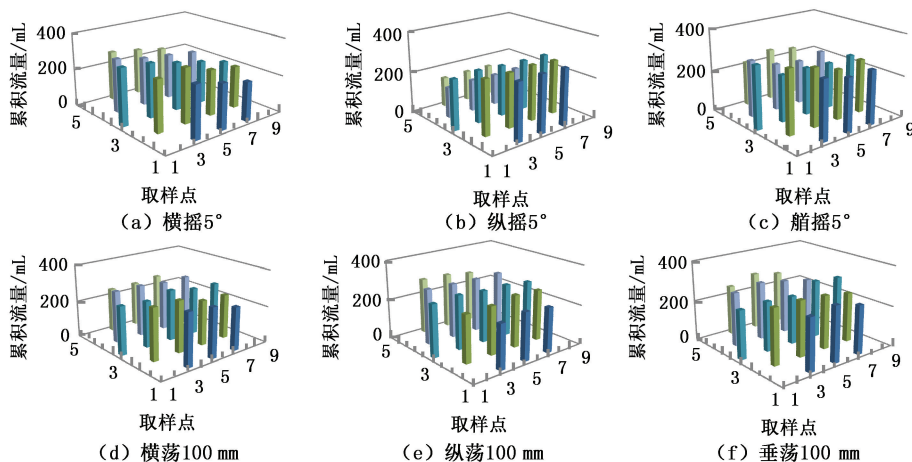


图 5 单自由度晃动条件下整体流量分布

Fig. 5 Overall flow distribution under single degree of freedom sloshing condition

当晃动形式为横荡 100 mm 时,塔内的流量分布出现了一定的波动,塔 B 侧的流量略微大于 A 侧流量,原因是横荡轨迹沿 AB 方向平动,在运动过程中产生的加速度使得塔内流体向塔一侧聚集,导致该侧流体较多,流量也较另一侧高;与之类似,当纵

荡 100 mm 时, CD 方向流量也会出现同样的分布情况。当晃动形式为垂荡 100 mm 时,塔内的流量分布较为均匀,各点流量相差不大。各单自由度工况对壁流分布性能的影响情况如图 6 所示。

由图 6 可以看出,横摇和纵摇工况下壁流量波

动较大,垂荡时各壁流取样点流量基本相同。横荡和纵荡时壁流量产生轻微波动,波动幅度明显小于横摇和纵摇。横摇和纵摇运动时,也是由于受到重力和加速度的影响,使得液体向倾斜的方向累积。艏摇工况下,壁流取样点流量均在 300 mL 左右,为所有工况中壁流量最大的情况,这是由其运动轨迹产生的离心力导致的。通过分析发现,壁流量分布情况和整体流量分布试验结果吻合。

计算不同晃动形式下流量分布的不均匀度可知,在摇摆幅度为 5°时,横摇和纵摇的不均匀度分别为 0.243 和 0.248,大于艏摇时的 0.114,因此对流体分布性能影响也更大;同理在平荡幅度为 100

mm 时,横荡和纵荡的不均匀度分别为 0.063 和 0.067,大于垂荡时的 0.062,即横荡和纵荡对流体分布性能的影响大于垂荡。

确定耦合工况的原则是找出对流体分布影响较大的单一晃动工况,并以此为基础进行耦合,得到更不利工况。通过分析更不利工况的流体分布,为海上填料塔优化提供依据。基于上文分析,摇摆运动中选取横摇与纵摇,平荡运动中选取横荡和纵荡,最终确定两自由耦合工况为 3 类,摇摆+摇摆耦合、摇摆+平荡耦合以及平荡+平荡耦合。其中,摇摆运动幅度为 2°与 5°,平荡运动幅度为 100 mm。

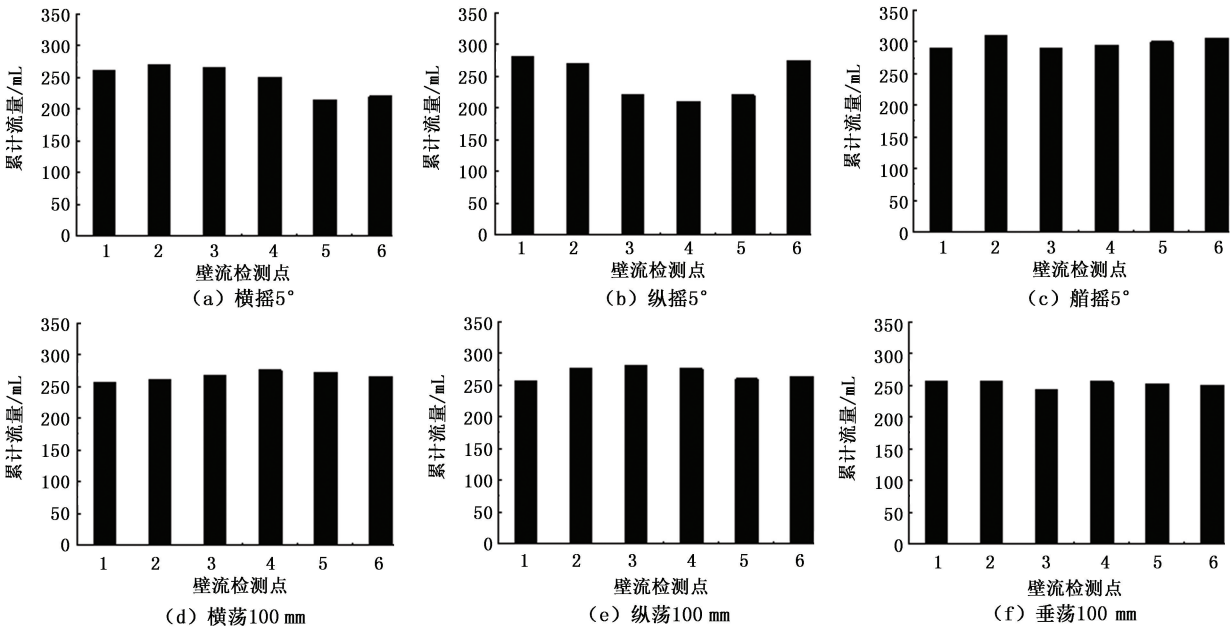


图 6 单自由度晃动条件下壁流量分布

Fig. 6 Wall-flow distribution under single degree of freedom sloshing condition

2.2 耦合晃动工况下填料流体分布性能

2.2.1 整体流量分布

两自由度耦合试验条件及晃动周期与单自由度试验相同。通过试验得到的整体流量分布如图 7 所示。

由图 7 可知,当横摇 2°+纵摇 2°耦合时,其整体分布规律为 BC 部分流量明显大于 AD 部分流量。当横摇 2°+纵摇 5°耦合时,其分布不均匀性较上一工况增加,此时 CD 方向的不均匀程度比 AB 方向明显要大,产生该现象的原因是纵摇幅度较大,其晃动以纵摇为主,导致其 CD 方向的不均匀程度大于 AB 方向。而当晃动工况变成横摇 5°+纵摇 5°时,其分布不均匀程度最大,BC 部分的最大流量已接近 350 mL,AD 部分流量约为 100 mL。当晃动角度逐渐增加时,整体流量不均匀度变化增加。耦合工况中,如

果横摇和纵摇角度不同,晃动对整体分布性能的影响以摇摆角度较大的工况为主。

对于摇摆运动+平荡运动耦合工况,当横摇 5°+横荡 100 mm 耦合时,其分布规律与横摇 5°相类似,出现了 B 多 A 少的情况,但是其不均匀程度比横摇 5°时增加。而横摇 5°+纵荡 100 mm 耦合时,其分布规律在 B 多 A 少的情况下也略微出现了 D 多 C 少的情况,但总的来说纵荡对流量的影响不大。因此,当耦合晃动为摇摆+平荡耦合时,晃动对整体流量分布性能的影响以摇摆运动的影响为主。

最后分析平荡运动+平荡运动的耦合工况。从图 7 中可以看出,横荡和纵荡的整体流体分布比较均匀,没有出现较高的流量波动点。平荡+平荡运动对整体流量分布性能的影响较小。

耦合晃动条件下塔底截面各取样点平均流量如

下所示:横摇 5°+横荡 100 mm 时为 223 mL;横摇 5°+纵荡 100 mm 时为 228 mL;横摇 2°+纵摇 2°时为 231 mL;横摇 2°+纵摇 5°时为 215 mL;横摇 5°+纵摇

5°时为 213 mL;横荡 100 mm+纵荡 100 mm 时为 244 mL。相应的不均匀度分别为 0.291、0.250、0.246、0.270、0.298 和 0.118。

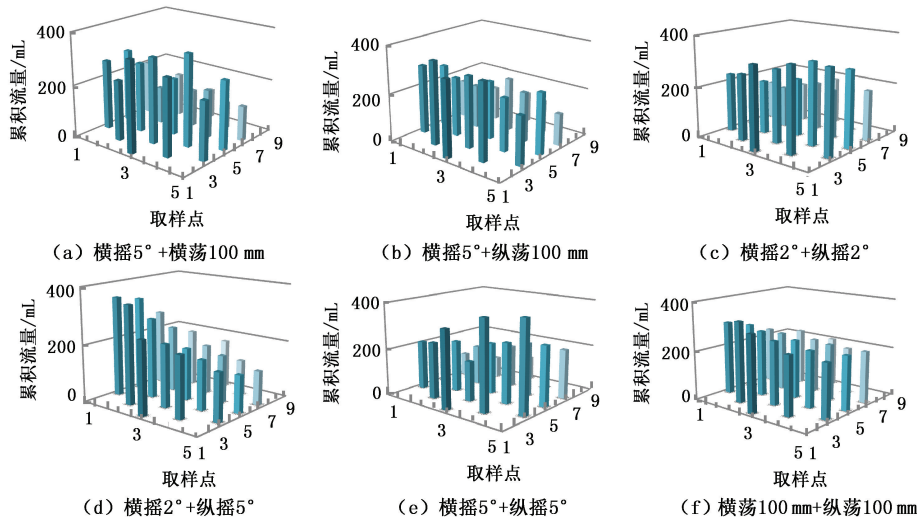


图 7 耦合晃动条件下整体流量分布

Fig.7 Overall flow distribution under two degrees of freedom sloshing condition

摇摆+摇摆工况的不均匀度数值最大,平均流量较小,例如横摇 5°+纵摇 5°的平均流量最小,只有 213 mL,不均匀度最大为 0.298。这是由于晃动幅度较大,壁流量增加,导致横截面内的流量减少产生的。摇摆+平荡的平均流量大于摇摆+摇摆工况,分布均匀性变好。当平荡+平荡时其平均流量最大,不均匀度为 0.12,分布性能最好。

小依次为:横摇 5°+纵摇 5°>横摇 2°+纵摇 5°>横摇 5°+横荡 100 mm>横摇 5°+纵荡 100 mm>横摇 2°+纵摇 2°>横荡 100 mm+纵荡 100 mm。

2.2.2 环形流量分布

从环形流量分析指标入手,探究各晃动形式对环形流量的影响。各晃动工况的内外环流量如图 8 所示。

在耦合工况中对流体整体分布性能影响从大到

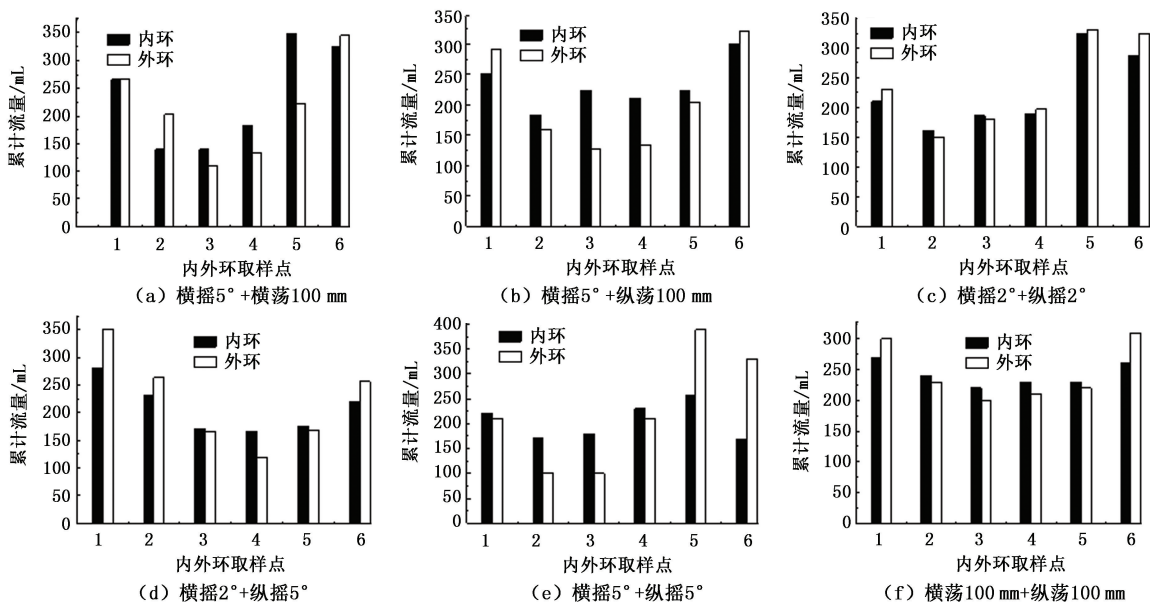
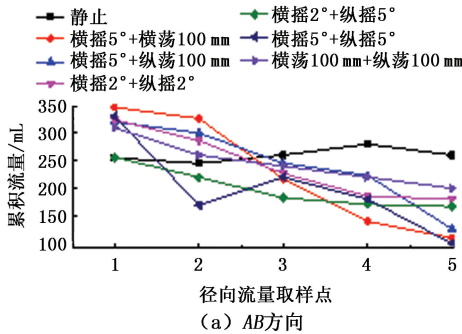


图 8 耦合晃动条件下内外环流量分布

Fig.8 Flow distribution of inner and outer ring under two degrees of freedom sloshing condition

由图 8 可以看出,横荡 100 mm+纵荡 100 mm 耦合工况的内外环流量基本相同,所以平荡+平荡

的形式基本不影响环形流量分布。摇摆+摇摆运动的耦合工况中,横摇 2°+纵摇 2°的内外环流量基本相同,随着晃动幅度增加,当横摇 2°+纵摇 5°时内外环流量差增加,而当晃动角度达到横摇 5°+纵摇 5°时,内外环流量差最大,个别取样点的内外环流量差达到了 150 mL。随着晃动角度增加,内外环流量分布性能降低。当耦合工况为摇摆+平荡时,其内外环流量差要大于横摇 2°+纵摇 5°的耦合工况,接近



横摇 5°+纵摇 5°耦合工况。
综上所述,对环形流量分布影响较大的工况为:横摇 5°+纵摇 5°,横摇 5°+横荡 100 mm,横摇 5°+纵荡 100 mm。

2.2.3 径向流量分布

径向流量分布用来表征晃动对塔截面不同径向位置流量分布的影响。从 AB 方向截面和 CD 方向截面分析,具体分布结果如图 9 所示。

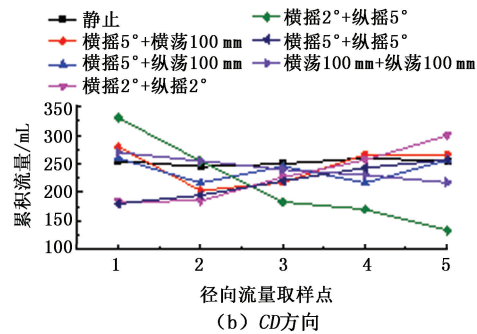


图 9 耦合晃动条件下径向流量分布

Fig.9 Radial flow distribution under two degrees of freedom sloshing condition

由图 9 可知,在 CD 径向流量分布图中,只有摇摆+摇摆运动曲线斜率较大,径向各点的流量差距较大,其他工况的曲线均与静止时分布情况相同,由于纵摇和纵荡的运动方向均在 CD 方向上,且只有纵摇对径向流量产生了较大影响,可知横荡运动对径向流量的影响不大。在 AB 径向流量分布中,横荡 100 mm+纵荡 100 mm 的径向流量变化幅度稍微大于静止的幅度变化范围,其余工况中,由于横摇的存在,其径向流量变化波动较大,均出现了 B 多 A 少的现象,并且以横摇 5°+横荡 5°和横摇 5°+横荡 100 mm 变化幅度最大,流量差达到 200 mL。

综上所述,摇摆运动比平荡运动对径向流量的分布影响大,且在摇摆+平荡的耦合工况中,对径向流量的分布影响以摇摆运动为主。

2.2.4 壁流量

从 6 个壁流取样点的流量及总壁流量两个方面分析耦合晃动对壁流量分布的影响,壁流取样点的具体结果见图 10。

耦合晃动条件下总壁流量如下所示:横摇 5°+横荡 100 mm 时为 1 480 mL;横摇 5°+纵荡 100 mm 时为 1 475 mL;横摇 2°+纵摇 2°时为 1 475 mL;横摇

2°+纵摇 5°时为 1 495 mL;横摇 5°+纵摇 5°时为 1 510 mL;横荡 100 mm+纵荡 100 mm 时为 1 600 mL。

由图 10 可知,横荡+纵荡的耦合工况壁流量较大,各取样点的流量波动幅度相对较大,因此可认为平荡运动产生的横向加速度能够使壁流量加大,横荡运动对填料塔最大的影响是壁流量较大,会引起传质效果下降。

摇摆+摇摆耦合运动不均匀度较大,流量分布均匀性较差,但是通过壁流量可以看出,摇摆运动的壁流总量不大,壁流各点的流量随着晃动幅度增加,不均匀性增大。例如横摇 5 度+纵摇 5 度的各壁流量最大差值为 100 mL,远大于横摇 2°+纵摇 2°时的 50 mL。摇摆+平荡的各壁流点的流量变化规律与摇摆运动相类似,均出现较大波动,但其壁流总量并未明显增加。

综上所述,摇摆+摇摆耦合运动能够产生较大的壁流波动,但其壁流总量并未明显增加。平荡+平荡耦合运动壁流量波动不大,但是其壁流总量较多。

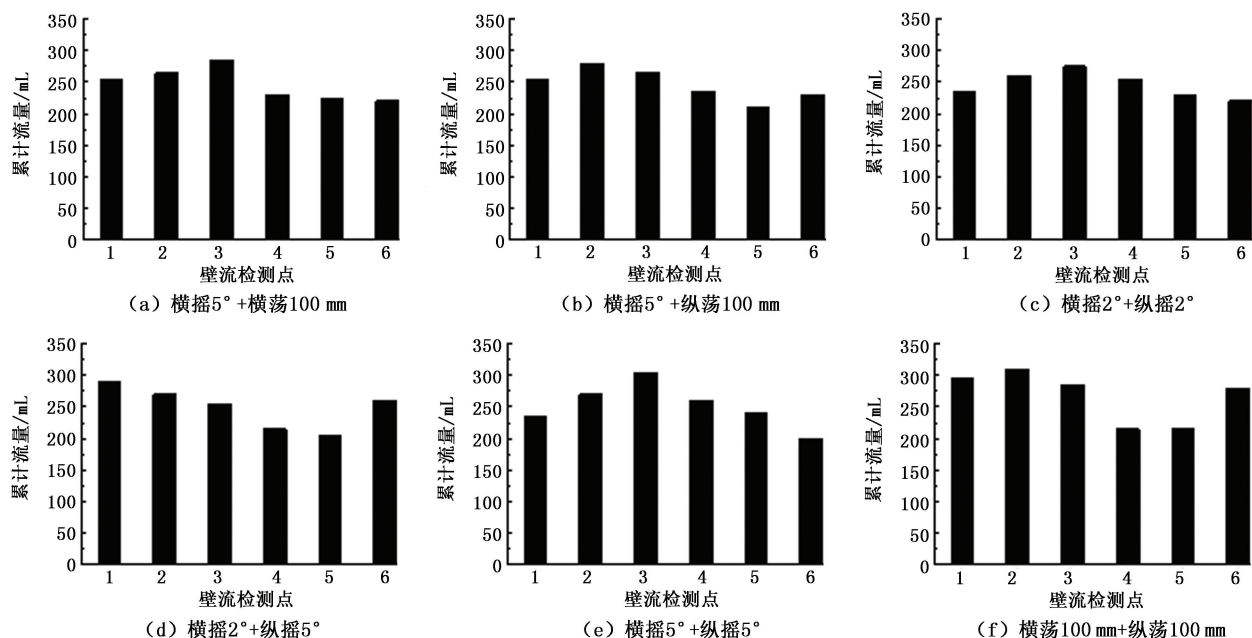


图10 耦合晃动条件下壁流量分布

Fig. 10 Wall-flow distribution under two degrees of freedom sloshing condition

3 结 论

(1)单自由度晃动工况对填料塔流体分布性能的影响从大到小为:横摇 5° =纵摇 5° >艏摇 5° >横荡100 mm=纵荡100 mm>垂荡100 mm。

(2)两自由度耦合工况对填料塔流体分布性能影响从大到小为:横摇 5° +纵摇 5° >横摇 2° +纵摇 5° >横摇 5° +横荡100 mm>横摇 5° +纵荡100 mm>横摇 2° +纵摇 2° >横荡100 mm+纵荡100 mm。

(3)在摇摆+摇摆耦合工况中,晃动对填料塔流体分布的影响以晃动幅度较大的摇摆工况为主;在摇摆+平荡耦合工况中,晃动对填料塔流体分布的影响以摇摆工况为主。

(4)横摇、纵摇以及摇摆+摇摆耦合运动能够产生较大的壁流波动,但其壁流总量并未明显增加。横荡、纵荡以及平荡+平荡耦合运动壁流量波动不大,但其壁流总量较多。

参考文献:

[1] 赵文华. 浮式液化天然气装备 (FLNG) 水动力性能的数值分析及试验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
ZHAO Wenhua. Numerical and experimental study on hydrodynamics of an PLNG system[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2014.

[2] 陈海阳, 李玉星, 孙法峰, 等. LNG FPSO 液舱内储液晃动特性的数值模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2011, 35(4): 134-139, 143.

CHEN Haiyang, LI Yuxing, SUN Fafeng, et al. Numerical simulation of liquid sloshing characteristics in LNG FPSO containers[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2011, 35(4): 134-139, 143.

[3] 王文娟. 海洋平台浮托安装数值模拟研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.

WANG Wenjuan. Numerical simulation of float over installation for offshore platform[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.

[4] 谢彬, 王世圣, 喻西崇, 等. FLNG/FLPG 工程模式及其经济性评价[J]. 天然气工业, 2012, 32(10): 99-102.

XIE Bin, WANG Shisheng, YU Xichong, et al. FLNG/FLPG engineering pattern and economic evaluation[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(10): 99-102.

[5] 张鹏, 刘春江, 唐忠利, 等. 规整填料塔内气相流动的计算流体力学模拟[J]. 天津大学学报, 2005, 38(6): 503-507.

ZHANG Peng, LIU Chunjiang, TANG Zhongli, et al. CFD simulations of single-phase gas flow in a structured packing column[J]. Journal of Tianjin University, 2005, 38(6): 503-507.

[6] 尹江洲. 基于晃荡荷载的 FLNG 液舱围护系统结构设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.

YIN Jiangzhou. FLNG containment system structure design based on sloshing[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.

[7] 朱小龙. 基于晃荡荷载分析的 FLNG 储液舱舱型设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.

- ZHU Xiaolong. Design of FLNG tank type based on analysis of sloshing load[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [8] 赵文华,胡志强,杨建民,等. 频域范围内液舱晃动对 FLNG 运动影响的研究[J]. 船舶力学, 2011, 15(3): 227-237.
- ZHAO Wenhua, HU Zhiqiang, YANG Jianmin, et al. Investigation on sloshing effects of tank liquid on the FLNG vessel responses in frequency domain[J]. Journal of Ship Mechanics, 2011, 15(3): 227-237.
- [9] ZHAO Wenhua, YANG Jianmin, HU Zhiqiang, et al. Experimental investigation of effects of inner-tank sloshing on hydrodynamics of an FLNG system[J]. Journal of Hydrodynamics, 2012, 24(1): 107-115.
- [10] 张雪. 规整填料塔内流体力学行为模拟研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- ZHANG Xue. Study on simulation of fluid dynamic in-structured packed tower[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [11] 裴俊红,陈国标,计建炳. 波纹板规整填料塔液体分布[J]. 化工学报, 2003, 54(5): 646-652.
- QIU Junhong, CHEN Guobiao, JI Jianbing. Liquid distribution in corrugated sheet structured packed column[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2003, 54(5): 646-652.
- [12] ZHAO Wenhua, YANG Jianmin, HU Zhiqiang, et al. Experimental and numerical investigation of the roll motion behavior of a floating liquefied natural gas system[J]. Science China (Physics, Mechanics & Astronomy), 2013, 56(3): 629-644.
- [13] 林秀锋,陈桂珍. 液体分布器分布质量评价体系综述[J]. 化学工程, 2008, 36(12): 74-78.
- LIN Xiufeng, CHEN Guizhen. Overview on evaluation system of liquid distributor quality[J]. Chemical Engineering, 2008, 36(12): 74-78.

(编辑 沈玉英)