ⓒ 应用数学和力学编委会, ISSN 1000-0887

http://www.applmathmech.cn

非满充液体共振强化管外对流传热特性*

屈晓航,　齐晓霓

(山东理工大学 交通与车辆工程学院, 山东 淄博 255000)

摘要: 换热器中非满充液相的晃动可显著提高液相与换热面间的传热速率,而通过适当调节外部激励,非满充液体腔会产生共振,可进一步提高晃动和传热强度.本文采用数值计算手段,探讨了容器内液相与外部激励共振时的流动和传热特性,并考察了不同液面填充高度和换热管位置的影响.因第一阶自然频率具有最大振幅,研究所涉及的外部激励频率设定在理论第一阶自然频率附近(即 $0.6f_1$ 到 $1.4f_1$,其中 f_1 为一阶自然频率).共振状态下,液体晃动最剧烈,相界面结构最复杂,甚至可以冲击容器顶部.快速 Fourier 分析(FFT)表明,液相晃动以激振频率为主,自然频率虽然存在但振幅较小.瞬时传热系数具有两个波动频率,分别为激振频率及其两倍.共振状态下平均对流换热系数可达自然对流的 5 倍,且随液面填充高度的升高而减小,随换热管位置的升高而增大.同时,共振状态下机械能耗散率最大,且耗散率亦随填充高度的升高而减少,随换热管位置的升高而增加.

关　键　词: 液相共振; 传热强化; 机械能损失; 液相晃动; 晃动诱导强制对流

中图分类号: TK124; O353　　**文献标志码:** A　　DOI: 10.21656/1000-0887.460183

Outside-Tube Convective Heat Transfer Enhancement by Partially Filled Liquid Resonance

Qu Xiaohang,　Qi Xiaoni

(*School of Transportation and Vehicle Engineering*, *Shandong University of Technology*, *Zibo*, *Shandong* 255000, *P.R. China*)

Abstract: Liquid sloshing in a partially filled vessel can remarkably improve the heat transfer rate between bulk liquid and surface. Under proper tuning of the external excitation, the liquid resonance will emerge, to further boost the intensity of sloshing and heat transfer. With the numerical method, the flow field of liquid resonance and its effects on the heat transfer under different water filling levels and tube positions were studied. Excitation frequencies from $0.6f_1$ to $1.4f_1$ were covered, where f_1 is the 1st-order natural frequency and produces the largest amplitude. The liquid sloshes the most violently at the liquid resonance, with complex interface structures formed and even impacting phenomena on the ceiling of the vessel. The fast Fourier transformation (FFT) demonstrates that, the water level sloshes with mainly the excitation frequency, but f_1 always exists with small amplitudes. There are 2 dominant fluctuating frequencies corresponding to the transient heat transfer coefficient (HTC), i.e. the excitation frequency and the double of it. The average HTC can be enhanced by 5 times compared to natural convection, with the maximum enhancement occurring at resonance. The energy dissipation

* **收稿日期:** 2025-10-09; **修订日期:** 2026-09-07

基金项目: 国家自然科学基金(52276157;12572331)

作者简介: 屈晓航(1989—),男,教授,博士生导师(E-mail: quxiaohang@outlook.com);
齐晓霓(1974—),女,教授,博士生导师(通信作者. E-mail: bmjw@163.com).

引用格式: 屈晓航, 齐晓霓. 非满充液体共振强化管外对流传热特性[J]. 应用数学和力学, 2026, **47**(10): 1312-1322.

rate also reaches the maximum at liquid resonance. Both the average HTC and the dissipation rate decrease with the water filling level and increase with the tube mounting height.

Key words: liquid resonance; heat transfer enhancement; energy dissipation; liquid sloshing; slosh-induced forced convection

0 引　　言

为了提高换热器性能,研究者在过去提出了众多强化传热措施.这些措施可以分为主动方式和被动方式.前者包含在换热面安装各种形状尺寸不同的翅片以扩展传热面积,采用诸如纳米颗粒、石墨烯等高导热材料提高传热流体等效导热系数,在换热通道内安装扰流器件提高速度场和温度场的协同性等[1-3].而后者往往需要消耗额外的机械能,例如通过外部动力输入使传热面振动或波动[4-5].当对单向流施加波动时,传热强化的机理类似扰流元件,而当对容器内的气液两相施加外部激励时,往往会导致相界面的晃动,这样的界面反过来又产生类似实体壁面晃动的效果,从而以一种不同于固体壁面波动的方式干扰流场[6].目前关于气液晃动对传热影响的研究还很少.同时,容器内液相的晃动具有不连续的各阶自然频率,当外部激励频率与自然频率匹配时,晃动最为剧烈,此时称为液相共振.共振状态下仅需消耗不多的机械能便能激发剧烈的气液界面晃动,因而尤其值得关注.

相变储能的典型形式为将相变材料封装在一个容器中,并通过内置的换热管带走或输入热量,由于相变材料一般不参与流动,因而特别适于采用晃动的方式来强化相变材料一侧的传热.本文作者曾创新性地提出利用容器的外部运动来强化储能传热[7],并通过实验或数值计算的方式探讨了多种运动形式,包括旋转[8]、加速[9]和往复运动[10]等.研究发现运动容器之所以能强化传热,是因为运动诱导产生的强制对流大大强于自然对流,而可视化研究表明,强制对流源于气液相界面的晃动[11].虽然实际中的大部分换热器通常被设计为固定不动的,但是来自厂房的机械振动、阵风的扰动以及管道内部流体的扰动都可能成为外部激励源,并且,换热器在海上作业平台以及多种运载设备中也广泛应用,这些换热器可以充分利用本就不可避免的外部波动/振动激发液相晃动从而无需额外机械能消耗[12-14].因而,深入研究利用液体晃动强化传热的方式具有重要应用价值.

在海洋作业平台、飞机油箱和高层建筑的调谐液体阻尼器(TLD)中,经常会遇到外部激励下的气液两相流晃动问题[15-17].为了避免甚至利用液体晃动,必须正确预测其频率和强度.基于理想流体势流理论的模型[18]常被用来计算自然频率、晃动力和转矩,但对于复杂结构容器及非线性液体晃动现象准确性较差.地震发生后,为了评估核反应堆在冷却剂丧失下的安全问题,诸多学者研究了由水和熔融金属组成的分层液体在不同外部激励下的晃动特征[19-20].船舶或车辆运输液体时容器的晃动会对载具的安全控制产生不良影响,因而,不同形状的挡板、多孔介质和漂浮颗粒都被尝试布置在液体中以抑制晃动[21-23].高层建筑总是经受不同振幅风的影响,使居民感到不安,并可能破坏结构,通过适当设计悬挂在建筑物顶部的 TLD,建筑的振动可以通过液体晃动所耗散的机械能来抵消[24-25].

与以上容器相比, 传热性能对换热器或相变储能器十分关键, 然而很少有研究涉及晃动容器的传热特性.在我们过去关于液体晃动强化传热的研究中,由于容器很小(小于 100 mm),所施加的外部频率远远低于第一阶自然频率,故未曾考虑液相的自然频率和激励频率的共振.

本文采用数值计算方法研究了非满充液体容器内液相共振对传热的影响.外部激励频率设定在理论第一阶自然频率附近,分析了容器内流场、温度场的变化,获得了瞬时和平均的传热系数,以及共振情形下的机械能消耗.本研究可为充分利用液相共振促进液体晃动进而强化传热提供依据.

1 模型与方法

1.1 物理模型和网格划分

本文研究放置在容器水面以下的单根换热管,如图 1 所示,在数值计算中容器为二维矩形,宽和高分别为 190 mm 和 150 mm,容器内液面高度记为 L.换热管直径为 20 mm,中心距离容器底部的距离为 h,其表面维持 q_w

= 10 000 W/m^{2}的恒热流边界条件.在本研究中, L 的变化范围为 50~110 mm, h 的变化范围为 30~70 mm .

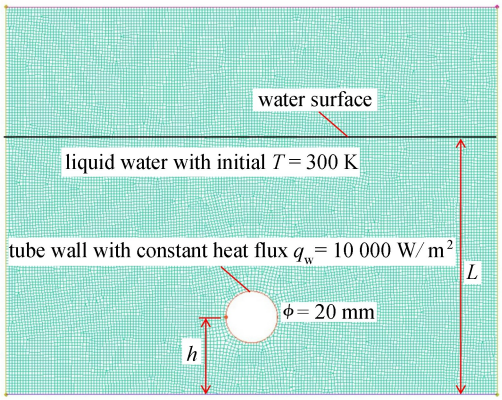


图 1 计算区域和网格划分

Fig. 1 The simulation domain and mesh

对容器施加外部激励产生的瞬时速度为时间的正弦函数,公式表示为

$$U(t) = 2\pi FA\sin(2\pi Ft), \tag{1}$$

其中, A 为激励的振幅,本文暂不研究振幅的影响,故而设定为 5 mm, F 为激励频率.基于理想流体的势流理论,方形容器内发生线性晃动的各阶自然频率可以表示为

$$f_n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\pi n\left(\frac{g}{w}\right)\tanh\left[\pi n\left(\frac{L}{w}\right)\right]}, \tag{2}$$

其中 n 为阶数,g 为重力加速度,w 为容器的宽度.本文涉及的外部激励频率分布在第一阶自然频率附近,这是因为液体晃动的强度远高于高阶频率.根据式(2)计算可得对应 L = 50 mm,70 mm,90 mm 和 110 mm 的 f_1 分别为 1.67 Hz,1.836 Hz,1.926 Hz 和 1.974 Hz .需要注意的是,黏性、容器内的特殊结构和非线性效应可能会使实际自然频率与理论值不同.

在数值仿真中,外部激励通过动网格技术实现.具体设置为将整个计算域视为一个刚体,并赋予其沿水平方向的平移运动,运动规律由式(1)定义.我们采用了铺层动网格技术,由于计算域仅发生刚体平移且无形状变化,网格质量在运动过程中得以完美保持,确保了计算的稳定性与精度.

本研究的数值计算采用商业 CFD 软件 ANSYS Fluent (v2022 R2) 实现.考虑到容器内为气液两相流,故而采用基于 Euler 框架的 VOF(volume of fluid)模型.该模型为单流体均相模型,水和空气两相共用一组质量、动量和能量方程,任意位置两相具有相同的温度、速度和压力.每个网格内的比容、黏度、比热容和导热系数都采用两者的质量加权平均值,计算中两相都视为不可压缩流体,但仍通过 Boussinesq 假设考虑自然对流效应.压力-速度耦合采用 PISO 算法,该算法适用于瞬态流动计算,能有效修正压力场.空间离散压力项采用 PRESTO! 格式,以更好地处理 VOF 模型中的剧烈密度变化.动量、湍动能和湍流耗散率方程均采用二阶迎风格式进行离散,能量方程同样采用二阶迎风格式,以保证计算精度.由于液体晃动过程产生复杂的相界面和混乱的流场,因而认为流动为湍流,并采用 RNG k-ε 湍流模型.所有方程的残差收敛标准设置为 10^{-3}(能量方程收敛标准为 10^{-6}).

本文采用以四边形为主的网格对计算域进行划分.为保证计算精度,对气-液界面可能出现的区域、换热管壁面及其周围流体进行了局部加密.为精确解析壁面流动与传热,在换热管壁面设置了边界层网格,第一层网格厚度经过精心设置,以确保对壁面湍流过程的准确捕捉.所有网格的偏斜度均小于 0.8,满足计算要求.经过网格无关性验证,不同密度网格的计算结果十分接近,网格数 16 359 和 12 475 之间的差别在形成稳定周期后约为 5%,继续增加至 23 069 后变化不足 1%,因此本文采用网格数 16 359 进行计算.

非稳态计算采用 NITA(非迭代时间推进)法,并通过动态调节时间步长将 Courant 数严格控制在 0.5 以内,在实际计算中,系统自动调整的时间步长在 1×10^{-4} s 和 5×10^{-4} s 之间.计算过程中实时检测管壁表面温度和液相区域温度,当两者以相同速率增长并呈周期性变化后,继续计算若干周期后结束计算,如图 2 所示,

可以发现在第 15 s 后，初始条件的影响完全消失，温度和瞬时传热系数已形成稳定周期.为了评估此设置下计算结果的可靠性，我们统计了共振工况（L = 90 mm，h = 30 mm，$F = 0.9f_1$）下，不同瞬时 Courant 数（对应不同的瞬时时间步长）所计算出的瞬时传热系数.分析结果表明，在该 Courant 数控制范围内，瞬时传热系数 H_t 的波动与流场周期性相关，其时间平均值和波动特征并未表现出对瞬时时间步长的系统性依赖.此外，我们固定了两种不同的时间步长上限（5×10^{-4} s 和 2.5×10^{-4} s）进行对比计算，两者所得的平均传热系数偏差小于 2%.这证明在当前严格的 Courant 数条件下，计算结果对时间步长不敏感，满足计算精度要求.

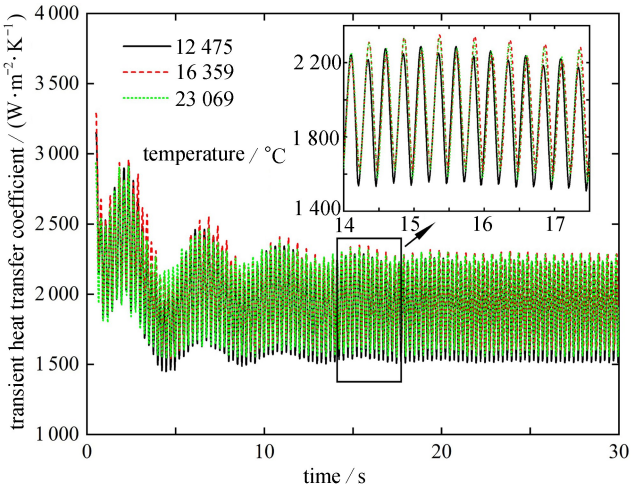


图 2　网格无关性验证

Fig. 2　The grid independence test

注　为了解释图中的颜色，读者可以参考本文的电子网页版本，后同.

1.2　模型验证

为了验证数值计算结果，搭建实验系统测量了晃动状态下的平均传热系数，如图 3 所示，实验系统由透明方形容器、晃动平台、电加热系统和温度采集系统构成.

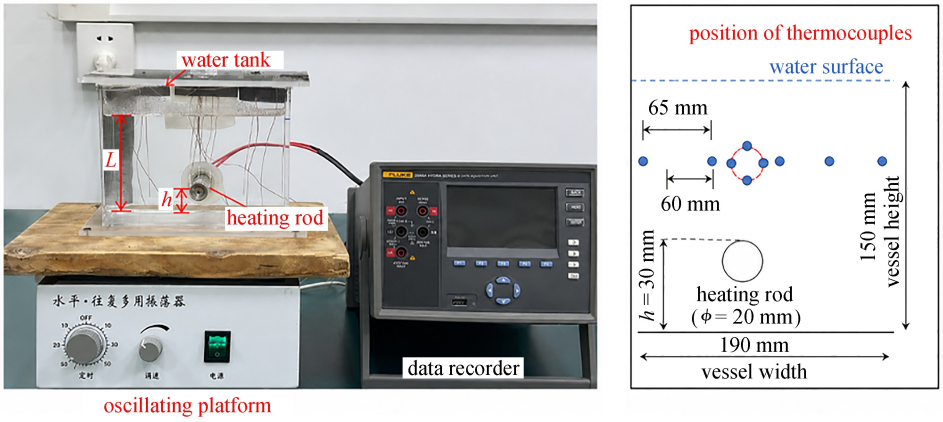


图 3　实验系统

Fig. 3　The experiment system

晃动平台可提供 10 mm 以下的振幅和 6 Hz 以内的振动频率.容器的宽和高与数值模型相同，在垂直方向深度为 90 mm.电加热棒外径亦与实验相同，长度 80 mm，置于容器底部 30 mm 高的位置，内阻 200 Ω，施加 100 V 电压后表面平均热流密度与数值模型相同.使用 8 个 T 型热电偶测量加热棒外壁面和流场的温度，它们的位置如图 3 所示，温度信号使用 Fluke 数据采集器记录，每秒记录 1.5 次.实验之前，对所有热电偶进行校核，确定热电偶和数据采集器的综合误差在 0.2 °C 以内.任意时刻，取加热棒外壁面四个温度的平均值作为管壁温度 T_w，取流场内四个温度的平均值作为流体温度 T_l，通过 $H_t = q/(T_w - T_l)$ 计算获得瞬时对流传

热系数,每次测量持续 100 s,并以后 50 s 数据的平均值作为平均传热系数.

对于 90 mm 的液面填充高度,不同外部激励频率下通过实验和数值计算获得的平均传热系数如图 4 所示.自然对流下的分析解、数值和实验结果也同时标识在了图中,由于分析解是在无限空间下获得的,而数值解是在二维矩形区域内获得的,它们都与三维空间下的实验结果略有不同.在不同激励频率下,数值方法获得的平均传热系数和实验结果的差别平均在 10%以内,这可能是数值方法采用二维空间所致.这些结果说明本文的数值方法是可靠的.

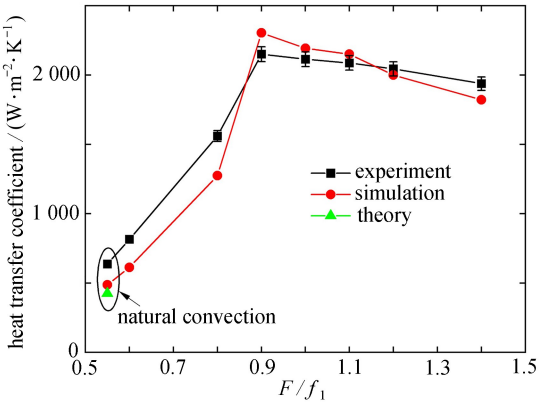


图 4 数值方法的验证

Fig. 4 Verification of numerical methods

2 结果与讨论

2.1 共振下液体晃动及瞬时传热特性

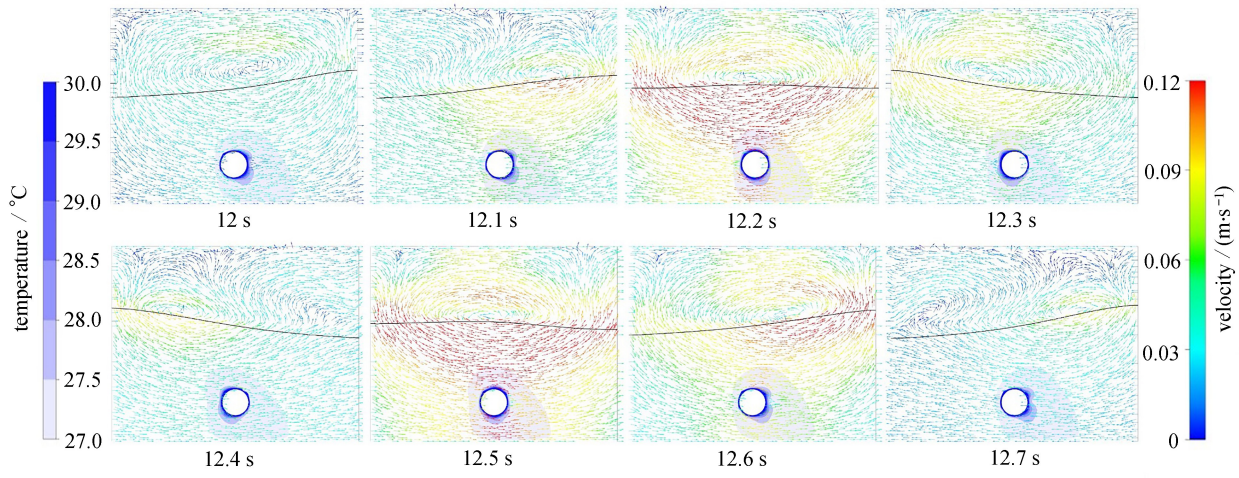
图 5 为 L = 90 mm, h = 30 mm,且激励频率为 $F = 0.8f_1$ 与 $F = 0.9f_1$ 时瞬态晃动流型图比较,图中黑色曲线为气液界面,彩色箭头表示速度大小和方向,云图为温度分布等温线,仅覆盖小于 30 ℃的范围,以便更清楚地识别温度分布.图中可见液体块在容器内周期性摆动,由于重力势能和动能守恒,当液体摆动向一端时(例如 12 s 和 12.3 s),速度变得很小,当液体块滑向接近平衡位置时(例如 12.4 s),速度明显变大.受液体块摆动的影响,靠近管壁和远离管壁的位置,流速都左右交替变化,由于换热管位于容器水平方向的中央,所以流向管的流速也是水平方向的.等温线随液体的摆动而波动,其波动周期与液体摆动周期相同,由于强制对流已远远强过自然对流,具有自然对流特征的等温线不可见.实际上,图 5 中的最大速度超过 0.4 m/s,而自然对流产生的速度小于 0.005 m/s.

这种剧烈晃动的物理本质源于外部激励施加的周期性惯性力.在水平正弦激励下,容器及内部流体承受着与加速度方向相反的惯性力,其大小与激励频率的平方成正比.此惯性力是驱动液体做往复运动的根本原因,它直接转化为容器内的压力梯度,迫使液体块周期性地冲击左右壁面,并将重力势能与动能持续相互转化.在共振状态下,惯性力的输入频率与系统的固有频率相匹配,能量积累效率达到最大,从而导致晃动幅度和速度达到峰值,气液界面也因此失稳并产生复杂的局部结构,甚至冲击容器顶部.

进一步地,由惯性力主导的宏观液体摆动,在微观上引发了流场的深刻变化.液体在加速与减速过程中,与换热管壁面和容器角落的流体之间产生强烈的速度剪切,进而诱发形成一系列尺度不一的涡旋.这些宏观摆动与微观涡旋共同作用,对换热管壁面形成了周期性的、双向的强制冲刷.每一次冲刷都会有效地破坏壁面的热边界层,使其始终保持薄而陡峭的温度梯度,这正是传热得以强化的核心物理机制.由于在一个完整的激励周期内,流体以相反的方向两次流经换热管,导致热边界层被两次剧烈扰动,这完美地解释了为何瞬时传热系数呈现出以两倍激励频率 ($2F$) 为主导的波动特征(见图 6(d)).

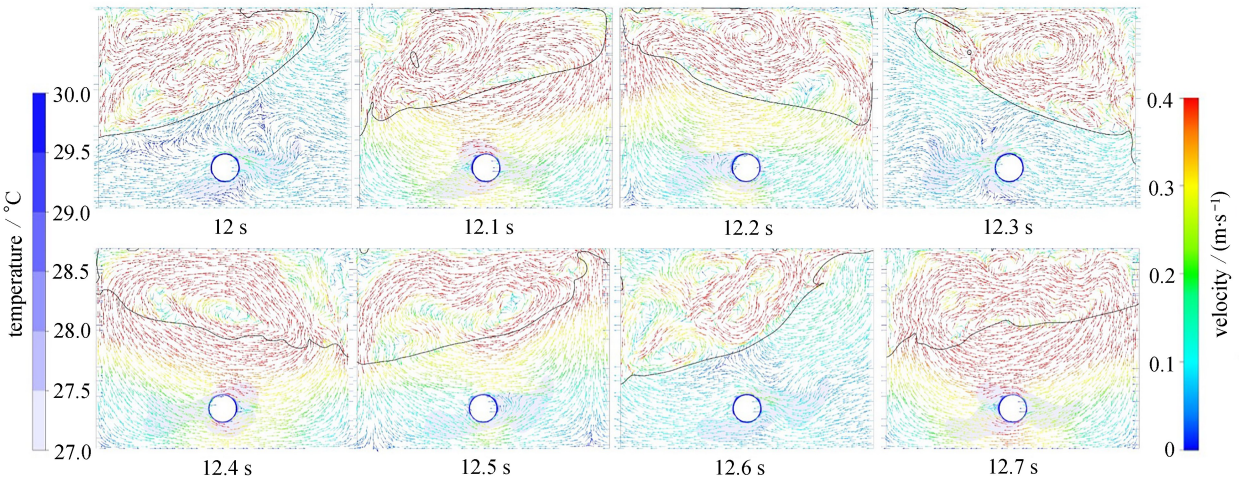
与未共振时其他激励频率下的流型图相比, $F = 0.9f_1$ 时的液体晃动最为剧烈,气液界面曲线最为复杂,局部气液结构也最多,此外可以发现图中的液体块可频繁撞击容器顶部(例如 12 s,12.2 s,12.3 s),意味着此时晃动的非线性效应十分强烈.当 F 进一步增大到 f_1 时,仍可以观察到复杂的相界面以及液体偶尔撞击容器

顶部，但晃动幅度明显减小，这说明 $0.9f_1$ 比 f_1 更接近于容器的实际一阶自然频率，因而我们认为在 $F = 0.9f_1$ 时发生了液体共振。导致实际自然频率与理论自然频率产生偏差的原因：容器内的换热管使其不是一个完整的矩形；基于势流理论的式(2)没有考虑液体的黏性；晃动的非线性效应。



(a) 未共振时的晃动流型图 ($F = 0.8f_1$)

(a) Sloshing flow patterns without resonance ($F = 0.8f_1$)



(b) 共振时的晃动流型图 ($F = 0.9f_1$)

(b) Sloshing flow patterns at resonance ($F = 0.9f_1$)

图 5　未共振与共振时的流型图比较 ($L = 90$ mm, $h = 30$ mm)

Fig. 5　Sloshing flow patterns under liquid resonance ($L = 90$ mm, $h = 30$ mm)

为了考察液体共振下的传热特性，$L = 90$ mm，$h = 30$ mm，$F = 0.9f_1$ 下瞬时液位和瞬时传热系数如图 6 所示。从图 6(a)的时域图中可以看出，液面变化的初始效应只存在 5 s 内，之后形成稳定的周期性波动，且由于容器高度为 150 mm，液面波动高度被限制在 150 mm 内。对时域下的瞬时液位进行快速 Fourier 变换(FFT)后发现，液位波动的主导频率是激励频率 F，而自然频率 f_1 的振幅要小得多，此外激励频率的 2 倍即 $2F$ 也具有较明显的幅度，如图 6(b)所示。

瞬时传热系数 H_t 的波动特性与液位不同，如图 6(c)所示，在最初的 2 s 内，H_t 迅速下降，直到大约第 5 s，波动才逐渐形成周期，并处于 1 600~2 700 ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)之间。从 H_t 的 FFT 曲线图 6(d)可以看出，自然频率几乎不可见，这是由于液位的晃动频率主要为外部激励频率，而 H_t 主要受液体的对流控制，即受液体的晃动控制。液体晃动的每一个周期内，其以相反的方向流经换热管两次，导致产生两次相同的传热系数波动，由于 H_t 是一个没有方向的标量，所以其主导波动频率为 $2F$。

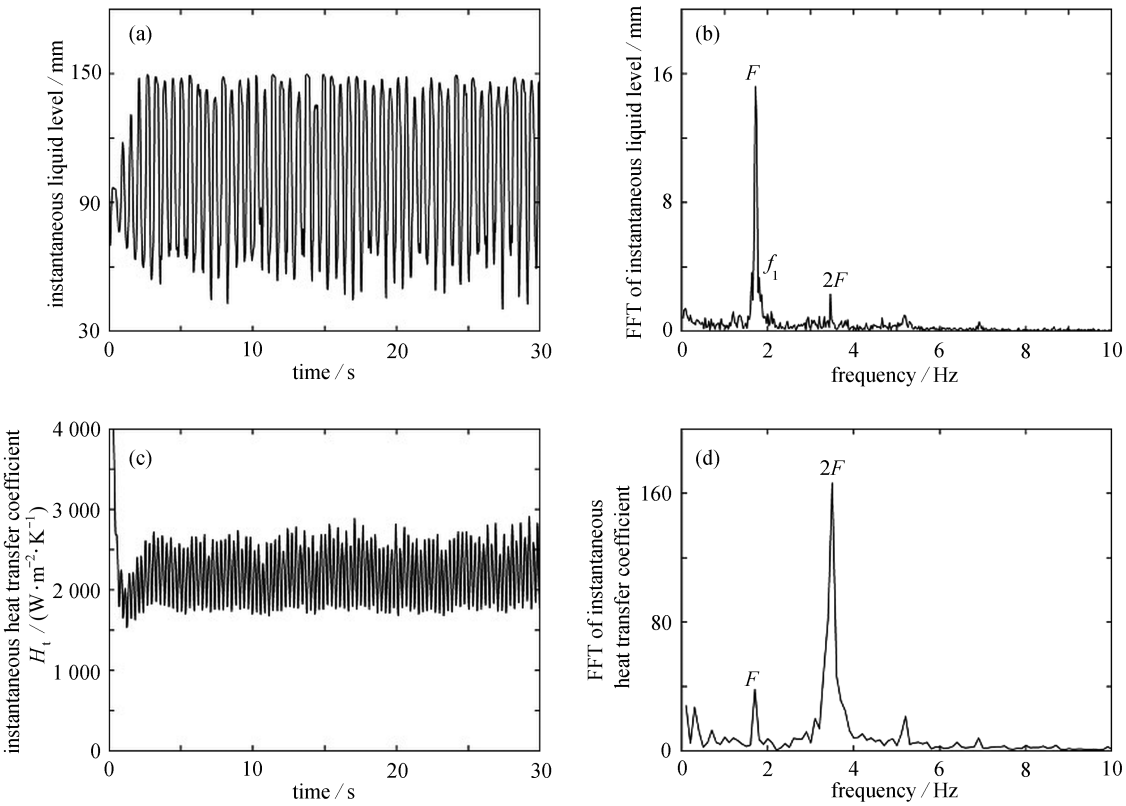


图 6 瞬时液位和传热系数变化

Fig. 6 Transient water levels and heat transfer coefficients

2.2 平均传热系数

H_t 虽然有波动,但初始效应消失后,其平均值恢复稳定,本文将每次计算最后 15 s 的 H_t 取平均作为平均传热系数 H.图 7 和图 8 分别展示了液面高度和换热管安装位置对强化传热比 H/H_0 的影响,其中 H_0 为对应液面高度和换热管位置下的自然对流传热系数.

从图 7 和图 8 可以看出,H/H_0 首先随着 F 的增大而增大,在 $F = 0.9f_1$ 时达到峰值,之后随着 F 的增大而减小,这是因为液相晃动和外部激励在 $F = 0.9f_1$ 时发生共振.共振前 H/H_0 增大较快,而共振后 H/H_0 减小较慢.随着 F 的增大,不同液位之间的 H/H_0 差别增大,且液位越高,H/H_0 越小,如图 7 所示.同时,在相同液位下,换热管离水面越近,H/H_0 越大,如图 8 所示.这可以通过图 5 所示的内部流场解释,其中速度较快的液体主要集中在水面附近,容器下部的液体流速较慢,且在底部出现流动死区.因此,在应用液体共振强化传热时,应尽量采用深水浅管的布置方式,即保证换热管具有较浅的浸没深度.本研究结果表明,为获得显著的传热强化效果,建议换热管的安装高度应不低于水深度的上半部分(即 $h/L > 0.5$).具体而言,在本文参数范围内,将换热管中心布置在距容器底部 70 mm(即 $h = 70$ mm)附近时,传热强化综合性能(PEC)最佳.同时,为避免液体剧烈晃动时换热管表面频繁接触气相而导致传热恶化,其安装高度应确保在静态液面下具有足够的浸没深度,建议其顶部距静态液面的距离不小于管径 ϕ (20 mm),以获得更好的传热性能.整体而言,液体共振对传热有明显的强化作用,本文实现的传热强化比 H/H_0 的范围在 1($F = 0.6f_1$) ~ 5($F = 0.9f_1$) 之间.

2.3 机械能耗散特性

由于流体黏性内摩擦的存在,流体晃动的机械能不断耗散,因而需要外部激励进行补充,如不考虑激励机构的机械摩擦,则机械能耗散可通过容器内液体的晃动力-位移相图来反映.如图 9 所示为 $L = 70$ mm, $h = 30$ mm 时不同激励频率下的晃动相图,其中红色代表由左到右的行程,灰色代表由右到左的行程,每幅图中的散点包含计算时长(35 s)内若干次往复循环,实线代表若干次循环的平均值.

在多次不同循环中,散点表示的力并不重合,而是分布在一定范围内,且液面晃动的幅度越大,散点也越分散,表明了气液界面的复杂性和随机性.这些点的平均值形成的曲线可以代表晃动力和容器位置的对应关

系.可以发现向右行程和向左行程的曲线不重合，意味着容器在相同位置不同运动方向时晃动力不同，因而称为力-位移滞回曲线.力与行程的乘积是容器对流体所做的功（负值为流体对容器做功），上下两条滞回曲线之间的面积则为每个往复运动循环下的机械能耗散量，记为 E_c.

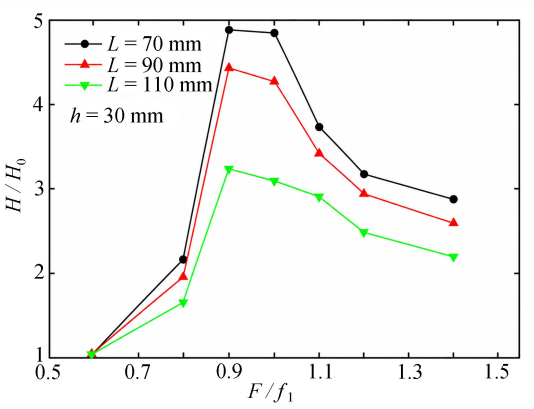


图 7　不同液面填充高度时的传热强化比

Fig. 7　Ratios of heat transfer enhancement for different water filling levels

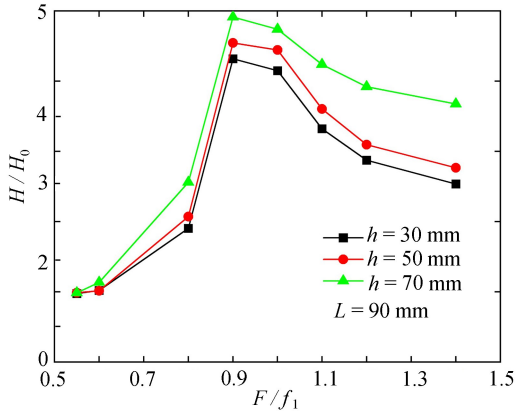


图 8　不同换热管安装位置时的传热强化比

Fig. 8　Ratios of heat transfer enhancement for different tube mounting heights

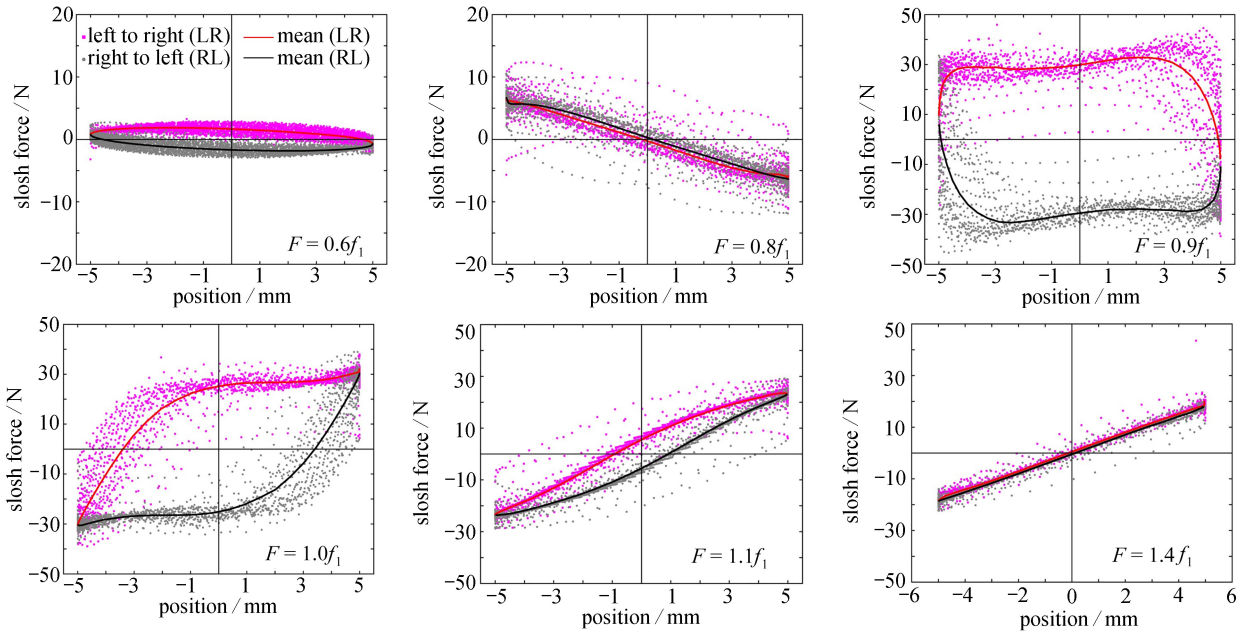


图 9　不同激励频率下的晃动力-位移相图（L = 70 mm，h = 30 mm）

Fig. 9　Slosh force-displacement phase diagrams for different excitation frequencies (L = 70 mm, h = 30 mm)

从图 9 可以看出，晃动力随着激励频率的增大而增大，并在液体共振状态下达到最大，随着频率的继续增大，晃动力开始减小.对于不同激励频率，滞回曲线的形状并不相同，其倾斜方向也不一样，这可能与晃动的初始条件有关，但其中包含的面积即 E_c 却随激励频率的增大而增大，在共振状态下达到最大并随着激励频率的进一步升高而减小.

图 10 为激励频率为 $F = 0.9f_1$ 时，不同液位高度和换热管安装高度下的滞回曲线，可以发现液位高度对滞回曲线的形状和黏性耗散量有明显影响，而换热管位置的影响则很小，这是因为本文只涉及一根换热管，其在容器中所占体积和对流场的扰动作用都非常有限.

单个循环的耗散量与激励频率的乘积 $E_c \times F$ 定义为耗散率 E_d，不同液位高度、换热管高度和激励频率下的耗散率如图 11 和 12 所示，可见黏性耗散率在共振时达到最大，非共振状态下，黏性耗散率非常小.相同换热管位置时，黏性耗散率随液面高度的升高而减小，而相同液面高度时，黏性耗散率随换热管位置的升高

而增大.

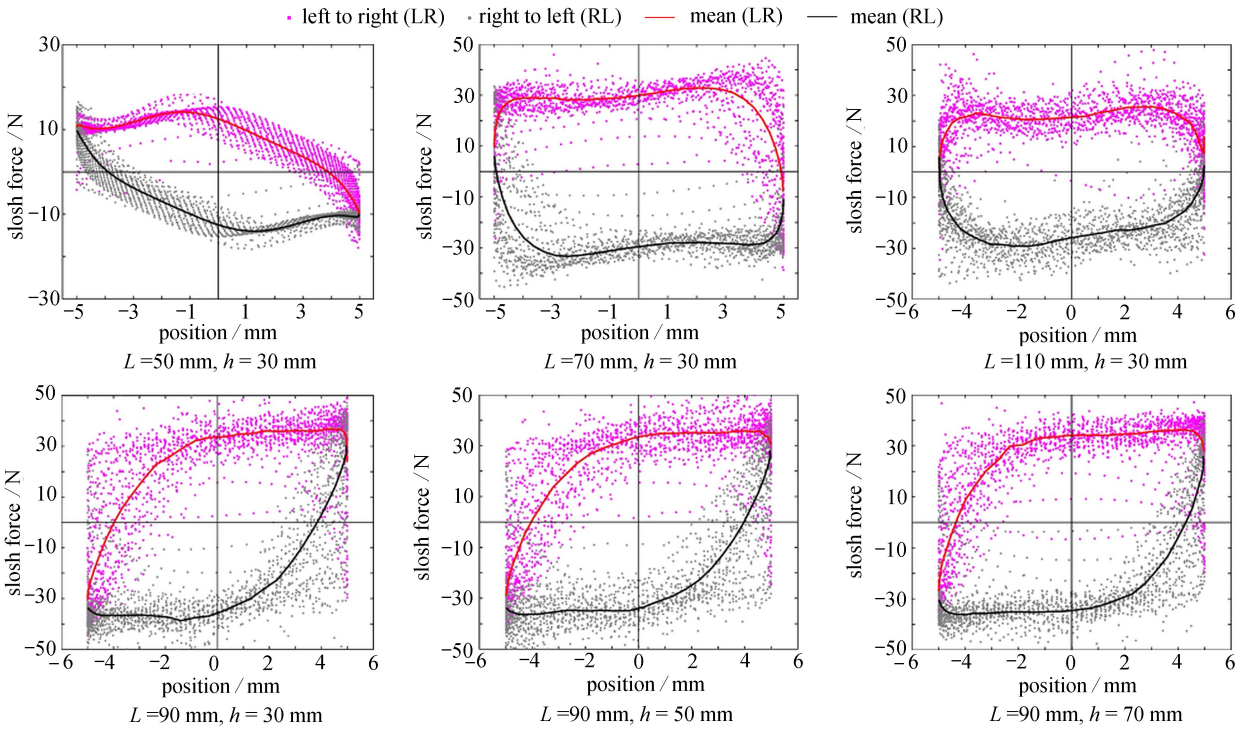


图 10 不同容器结构的晃动力-位移相图 ($F = 0.9f_1$)

Fig. 10 Slosh force-displacement phase diagrams for different vessel structures ($F = 0.9f_1$)

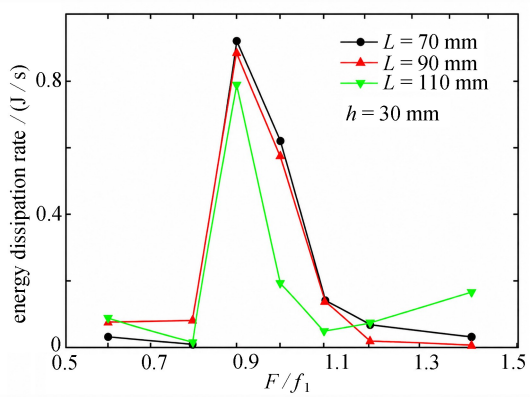


图 11 不同液面填充高度的黏性耗散率

Fig. 11 Energy dissipation rates for different water filling levels

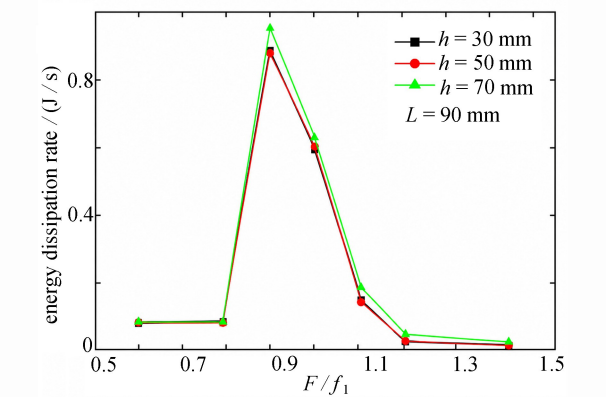


图 12 不同换热管安装位置的黏性耗散率

Fig. 12 Energy dissipation rates for different tube mounting heights

对比 2.2 小节传热结果,发现传热强化比大时,黏性耗散率也大,不妨将传热强化比 (H/H_0) 与黏性耗散率(E_d) 的比值定义为传热强化综合性能评价指标 η_{PEC}, 并将共振状态下不同容器的值列于表 1 中.

表 1 不同容器结构的 η_{PEC}($F = 0.9f_1$)

Table 1 Values of η_{PEC} for different vessel structures ($F = 0.9f_1$)

L/mm	h/mm	η_{PEC}
70	30	5.30
90	30	4.98
110	30	4.09
90	50	5.20
90	70	5.25

可以发现, η_{PEC} 仍然随着液面高度的升高而减小, 随着换热管位置的升高而增大, 与 H/H_0 和 E_d 的变化

趋势一致, 这表明在本文涉及的容器结构参数范围内, 提高黏性耗散率总是可以获得更好的传热强化综合性能.

3 结　　论

本文提出利用液体共振将自然对流转变为强制对流的新强化传热方式,尤其适用于储能强化传热领域,并有望利用自然波动避免额外机械能输入.主要结论如下:

1) 容器内液体晃动幅度在共振状态下最剧烈,激励频率稍远离共振频率则液体晃动幅度迅速下降,温度场亦随液体晃动出现周期性波动,且在越靠近气液界面的位置,波动越剧烈.

2) 瞬时液位的晃动包含自然频率和外部激励频率,但以外部激励频率为主,瞬时传热系数则以激励频率和它的两倍为主要波动频率,而自然频率几乎不可见,液位高度和瞬时传热系数的波动振幅都在共振状态下达到最大.

3) 平均传热系数在共振状态下达到最大,可达静止状态下自然对流传热系数的 5 倍,同时它随着液面高度的升高而减小,随着换热管安装位置的升高而增大.

4) 在本文研究的容器结构和外部激励范围内,黏性耗散率小于 1 W,在共振状态下达到最大,且随着液面高度的升高而减小,随着换热管安装位置的升高而增大.定义传热强化综合性能评价指标 η_{PEC} 为强化传热比与黏性耗散率的比值,发现 η_{PEC} 的变化趋势亦与黏性耗散率一致.

本研究通过对单管模型的深入分析,揭示了液相共振强化传热的普适性物理机制,即利用惯性力诱导的宏观晃动与微观涡旋来破坏热边界层.这一核心机理为将其推广至真实的管束阵列提供了理论基础.在阵列系统中,尽管管间复杂的流动干扰会使流场结构更为复杂,但共振所带来的整体流体动能急剧增加和强烈的定向冲刷效应依然是主导传热强化的关键.本研究结论为多管阵列的共振强化设计提供了重要指导原则: ① 应确保管束布置在晃动剧烈的液面以下区域(即遵循“深水浅管”原则); ② 阵列的布置应避免严重阻碍液体块的整体往复运动,以维持共振强度.未来的工作将基于本研究的发现,进一步探讨特定管排布置下的共振特性与优化策略.

参考文献(References):

[1] Ji W T, Jacobi A M, He Y L, et al. Summary and evaluation on the heat transfer enhancement techniques of gas laminar and turbulent pipe flow[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, **111**: 467-483.

[2] Li S, Zhang H, Cheng J, et al. A state-of-the-art overview on the developing trend of heat transfer enhancement by single-phase flow at micro scale[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, **143**: 118476.

[3] 屈晓航, 田茂诚, 冷学礼. 振荡流通过内插螺旋翅片管传热特性的数值模拟[J]. 化工进展, 2014, **33**(7): 1691-1696.(Qu Xiaohang, Tian Maocheng, Leng Xueli. Numerical simulation of heat transfer of oscillatory flow in a tube fixed with spiral fins[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2014, **33**(7): 1691-1696. (in Chinese))

[4] Qu X, Fang D, Qi X. Direct contact heat transfer enhancement between two stratified immiscible fluids by artificial interface oscillations[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, **138**: 226-234.

[5] 苗春虎, 齐晓霓, 屈晓航, 等. 通道内置三维柔性元件强化传热特性的数值模拟研究[J]. 热能动力工程, 2022, **37**(8): 100-108.(Miao Chunhu, Qi Xiaoni, Qu Xiaohang, et al. Numerical simulation research on enhanced heat transfer characteristics of three-dimensional flexible elements embedded in channels[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2022, **37**(8): 100-108. (in Chinese))

[6] Qu X, Sui H, Lai K, et al. Experimental study on the slosh-induced force generated by a partially filled spherical capsule[J]. *Physics of Fluids*, 2024, **36**(12): 123340.

[7] Qu X, Jiang S, Qi X. Experimental investigation on performance improvement of latent heat storage capsule by oscillating movement[J]. *Applied Energy*, 2022, **316**: 119130.

[8] Qu X, Qi X, Zhang Y, et al. Performance of a rotating latent heat thermal energy storage unit with heat transfer from different surfaces[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, **248**: 123147.

[9] Lai K, Qi X, Zhou D, et al. Slosh-induced force of a partially filled capsule and its effect on the heat transfer [J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, **130**: 117489.

[10] Yuan Y, Guo P, Fang D, et al. Slosh induced forced convection enhances heat transfer in a partially filled PCM capsule[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2025, **247**: 127161.

[11] 姜珊, 齐晓霓, 屈晓航, 等. 变速运动相变胶囊强化传热实验研究[J]. 热能动力工程, 2024, **39**(2): 117-125. (Jiang Shan, Qi Xiaoni, Qu Xiaohang, et al. Experimental study on heat transfer enhancement of variable speed motion phase change capsules[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2024, **39**(2): 117-125. (in Chinese))

[12] Qiu Y, Bai M, Liu Y, et al. Effect of liquid filling level on sloshing hydrodynamic characteristic under the first natural frequency[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, **55**: 105452.

[13] Khor W H, Goh J H, Yew Q M, et al. Residence time distribution of an offshore floating photobioreactor under hydrodynamic sloshing effect[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2023, **198**: 340-348.

[14] 李佳鹏, 齐晓霓, 屈晓航. 相变颗粒转鼓中非满充颗粒休止角实验研究[J]. 应用数学和力学, 2025, **46**(7): 882-892.(Li Jiapeng, Qi Xiaoni, Qu Xiaohang. Experimental study on the dynamic angles of repose of non-fully filled phase change particles in a rotating drum[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2025, **46**(7): 882-892. (in Chinese))

[15] Jiang S C, Ran Y Q, Feng A. On the hydrodynamicbehaviour of second-order harmonic induced sloshing-mode resonance in moonpool[J]. *Marine Structures*, 2023, **92**: 103503.

[16] Gligor D, Salgado Sánchez P, Rodríguez J, et al. Sloshing reduction with passive spring-mass baffles in partially filled containers[J]. *Ocean Engineering*, 2024, **310**: 118675.

[17] Nerattini A, Pizzoli M, Martinez-Carrascal J, et al. Loads-based optimal fuel-usage strategy by using a neural-network-based reduced-order model for vertical sloshing[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2024, **152**: 109408.

[18] Dodge F T. The New "dynamic behavior of liquids in moving containers"[R]. San Antonio, Texas: Southwest Research Institute,2000.

[19] Chen Y, Ming P, Yu G, et al. Sloshing damping assessment and structural dynamic analysis of perforated structures for heavy liquid metal under seismic excitation[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2024, **195**: 110178.

[20] Moreau V, Profir M. Gen-IV pool reactors: validation of sloshing CFD modelling and behavior under large seismic events[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2025, **435**: 113920.

[21] Cheng S, Li X A, Liang F, et al. Study on sloshing motion in a liquid pool with non-spherical particles[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2019, **117**: 103086.

[22] Saghi R, Ning D, Mayon R, et al. Evaluation of angular and linear spring systems linked to a dual baffle against the sloshing phenomenon[J]. *Ocean Engineering*, 2022, **266**: 113045.

[23] Poguluri S K, Cho I H. Effect of vertical porous baffle on sloshing mitigation of two-layered liquid in a swaying tank[J]. *Ocean Engineering*, 2023, **289**: 115952.

[24] Vîlceanu V, Kavrakov I, Morgenthal G. Coupled numerical simulation of liquid sloshing dampers and wind-structure simulation model[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2023, **240**: 105505.

[25] He X, Li C, Chen L, et al. Numerical research on nonlinear liquid sloshing and vibration control performance of tuned liquid damper[J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, **96**: 110660.