

方柱微结构内气液界面振荡特性数值研究*

王素龙^{1,2} 杜王芳^{1,3} 何发龙^{1,3,4}
赵彦琳² 姚军² 赵建福^{1,3}

1(中国科学院力学研究所 微重力重点实验室 北京 100190)

2(中国石油大学(北京) 机械与储运工程学院 北京 102249)

3(中国科学院大学工程科学学院 北京 100049)

4(天津城建大学能源与安全工程学院 天津 300384)

摘要 重力突然下降引起的气液界面振荡和重构对空间流体管理具有重要影响. 考虑到贮箱壁面润湿特性在该问题中的重要作用, 借鉴传热强化领域方柱微结构表面设计思想, 提出一种利用方柱微结构壁面对液体振荡的衰减作用实现空间贮箱被动防晃的方法. 采用流体体积法 (VOF) 对一种方柱微结构形成的异形基本单元内气液界面振荡特性进行数值模拟, 分析自由液面随时间的变化特征, 并讨论系统振荡频率、阻尼特性等与能量耗散特性密切相关的参数变化规律. 研究发现, 初始液位主要影响液面振幅, 振幅随着初始液位高度的减小而增大, 但是液位过低时振荡过程会出现液面触底而加剧耗散; 接触角对振幅和阻尼比都有影响, 接触角增大, 振幅和阻尼比均有所减小.

关键词 微重力, 晃动, 气液界面, 空间流体管理

中图分类号 O359+.1, V448.21

Numerical Simulation of Interfacial Oscillation Inside a Micro-pin-finned Structure

WANG Sulong^{1,2} DU Wangfang^{1,3} HE Falong^{1,3,4}
ZHAO Yanlin² YAO Jun² ZHAO Jianfu^{1,3}

1(Key Laboratory of Microgravity, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2(College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249)

3(College of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

4(School of Energy and Safety Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384)

Abstract The oscillation and reconstruction of gas-liquid interface caused by sudden drop of gravity

* 国家重点研发计划项目资助 (2022YFF0503502)

2024-03-06 收到原稿, 2024-06-06 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

is of great significance to space fluid management. Taking into account of the important role of the tank wall's wetting characteristics, this paper draws on the idea of designing the surface of the square column micro-structure in the field of heat transfer enhancement, and puts forward a passive anti-shaking idea of the space tank by using the damping effect of the square column micro-structure wall on the liquid oscillation. In addition, the gas-liquid interface oscillation characteristics in a special-shaped basic unit formed by a square column microstructure were numerically simulated by using the Volume of Fluid (VOF) method, and the variation of the free liquid surface characteristics with time was analyzed. In particular, the oscillation frequency, damping characteristics and other parameters closely related to the energy dissipation characteristics of the system were discussed, which provided the reference basis for space applications. The results show that the gas-liquid interface within the square-column microstructure produces a repositioning phenomenon accompanied by damped oscillations when gravity plummets from a strongly overloaded state. The initial liquid level height mainly affects the amplitude of the liquid surface oscillation. An initial liquid level lower than $30\text{ }\mu\text{m}$ leads to a bottoming out of the liquid surface during the oscillation process, which increases the damping ratio. In the absence of bottoming out, the higher the initial level is, the lower the amplitude of the oscillation is. The contact angle affects the amplitude and damping ratio of the oscillation process, and both the amplitude and damping ratio decrease gradually as the contact angle increases. In a wide gravity range, the magnitude of the final gravity level is between microgravity and 10 times normal gravity, the gas-liquid two-phase flow characteristics inside the square-column microstructures are similar, and the gravity effect is rather weak.

Key words Microgravity, Shake, Gas-liquid interface, Space fluid management

0 引言

随着航空航天领域的深入发展,未来的空间探索任务持续时间和距离将更长,这意味着航天器需要携带的液体燃料量将增加,空间流体管理面临新的困难.为实现空间流体管理,必须关注火箭在飞行过程中流体的界面特征和运动规律.储罐的外部激励、充液深度、几何形状以及液体性质、重力水平对液体晃动的特性有很大的影响^[1].针对这些因素已开展了大量研究. Ibrahim 等^[2]实验研究了非线性随机激励下部分充液圆柱贮箱内无黏流体自由表面的动态响应行为. Cui 等^[3]使用拉格朗日方法研究了横向和纵向激励下的液体晃动. Dalmon 等^[4]在不同外部激励下研究了球形储罐的流体运动特性. Yang 等^[5]使用 VOF 方法对微重力下俯仰晃动流体行为进行数值模拟,并分析了液位与晃动频率的关系. Arndt 等^[6]研究了不同几何的圆柱贮箱内液体晃动特性,并通过计算流体力学软件进行数值模拟,模拟结果的固有频率与实验十分接近. Li 等^[7]通过落塔实验研究了重力突降时自由液面的重定位过程,并使用 VOF 方法进行了相应的数值模拟,分析自由液面的振荡频率与贮箱尺寸和充液比的关系. Wei 等^[8]通过数值模拟研究了

贮箱内重力突降引起的气液界面波的传播过程.

贮箱内液体晃动行为会产生干扰力和力矩,一方面影响系统对航天器姿态调整和轨道运行的控制,另一方面会威胁航天设备上敏感元件的运行^[3],剧烈的流体晃动会对航天器内部结构造成疲劳损坏,很大程度上影响着航天器运行的安全与稳定性.目前,航天工程对航天器姿态控制的要求越来越高^[9],通常需要增设挡板来抑制贮箱推进剂的晃动. Aoki 等^[10]实验研究了推进剂非线性晃动过程中防晃挡板的结构形式和布置方式的影响,并给出合理的安装建议. Maleki 等^[11]通过实验对比了在水平平动激励下环形挡板和垂直叶片挡板的阻尼比. Yang 等^[12]使用 VOF 方法,对出流过程航天器贮箱内的液面晃动进行分析,得出挡板尺寸和布置方式对抑制液体晃动的影响. Yu 等^[13]采用缩比贮箱模型,研究了不同的挡板结构形式以及尺寸对阻尼比的影响.

在微重力条件下,润湿性对自由液面的振荡阻尼以及动态行为有很大的影响,而润湿性由接触角衡量. Wölk 等^[14]研究发现液面振荡频率随着接触角的增大而增大. Gerstmann 等^[15]使用有限元程序 FIDAP 对重力阶梯降低的液面阻尼振荡进行数值研究,发现静态接触角对振荡稳定时间的影响比较小.

Michaelis 等^[16] 关注在重力阶梯下降中自由液面重定位的初始行为 (即第一周期), 研究发现接触点的初始上升速度取决于 Mo 数和静态接触角. Michaelis 等^[17] 继续研究了重力阶梯式下降过程中的部分充液圆柱贮箱内自由液面重定位的阻尼特性, 发现阻尼比基本取决于 Oh 数和静态接触角. Li 等^[18,19] 采用动态接触角模型研究了贮箱内自由液面在不同充液比以及不同重力水平下的振荡特性.

关于使用方柱微结构改变表面润湿性的方法已有较多研究. Öner 等^[20] 通过光刻法在硅片上制备了方柱微结构表面, 研究尺寸、形状、柱高和排列间距对表面润湿性的影响, 发现方柱微结构的间距在 $2\sim 32\ \mu\text{m}$ 时表现了较强的疏水性, 而在间距为 $64\sim 128\ \mu\text{m}$ 时, 液滴可以进入柱间, 接触角明显减少表现为较好的亲水性. Yoshimitsu 等^[21] 研究了方柱高度和液滴质量对阵列方柱微结构表面润湿性的影响. Liu 等^[22] 通过压板对圆柱微结构和方柱微结构表面上的液滴施加压力, 研究润湿模式的转变机理. 方柱微结构在强化传热方面也有应用. Zhang 等^[23] 发现柱状微结构除增加了核态沸腾汽化核心数目之外, 毛细作用力不断抽吸新鲜液体向加热面的供应, 强化了换热效果. Xue 等^[24] 在微重力环境下对方柱微结构进行了沸腾换热实验, 结果表明方柱微结构铺设表面相比光滑表面显著强化了传热. Kong 等^[25] 研究了微重力下复合微结构在三组工况下的沸腾换热性能. 本文结合方柱微结构对润湿性和换热输送的影响, 提出新的建议——通过内壁面布置方柱微结构的方法实现能量的被动吸纳与耗散, 并采用数值模拟方法研究方柱微结构内重力骤降时液面重构行为, 分析方柱微结构内液面振荡衰减过程特性, 验证其吸纳液面波动能量的功能.

1 计算模型

1.1 物理模型

针对部分充液的方柱微结构内气液界面振荡运动特征, 选取方柱包围形成的异形空间为基本研究单元, 如图 1 所示, $a = b = 80\ \mu\text{m}$, $h = 300\ \mu\text{m}$, 基于对称性考虑, 取相邻 4 个方柱各 $1/4$ 柱体及其包围的空间为基本单元, 如图 2 所示, 相邻方柱间距 $m = a = 80\ \mu\text{m}$, 边长 $n = a/2 = 40\ \mu\text{m}$.

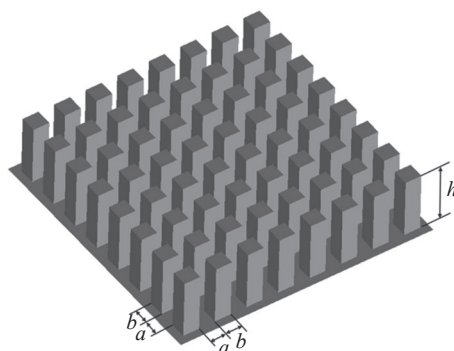


图 1 方柱微结构表面

Fig. 1 Surface diagram of the square column

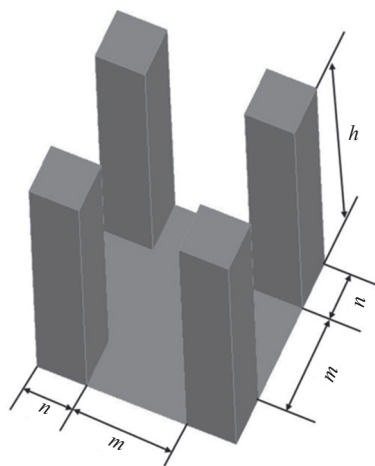


图 2 基本研究单元

Fig. 2 Schematic diagram of the basic research unit

表 1 给出了气液两相的物性参数, 工质选用航天热控领域常用工质氨, 对应温度为 20°C , 重力加速度取 $0\ \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$.

以表面张力为主导的计算过程使用六面体网格, 使得计算更加精确, 通过 ICEM 对计算单元流体域进行结构化网格划分, 并对近壁区做细化处理, 如图 3 所示, 网格首层高度为 10^{-6} , 网格质量在 8 以上. 在边界条件设置中, 将 4 个尺寸为 $80\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$ 的侧面设置为对称面边界条件, 其余均设置为壁面条件.

1.2 数学模型和计算方法

使用流体体积函数 (VOF) 模型^[26] 进行计算, VOF 模型利用相体积率捕捉气液界面, 相体积率定义为流场网格中目标流体体积与网格体积之比, 当其值处于 $0\sim 1$ 之间时表示网格中存在气液两相分界面,

这里将数值 0.5 定义为气液分界面。

假定流动为不可压缩, 流动状态为层流, 控制方程如下:

$$\nabla \cdot v = 0, \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v \right) = -\nabla p + \mu \Delta v + \rho a + F_\sigma, \quad (2)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} + v \cdot \nabla f = 0. \quad (3)$$

其中, v , ρ , p 和 μ 分别为流体的运动速度、密度、压力和动力学黏性系数; F_σ 为体积力, 对应连续表面张力模型中自由液面附近的表面张力; f 为流体体积函数, 即任意空间单元内目标流体体积与该单元体积之比。

壁面满足如下无滑移条件:

$$v = v_w. \quad (4)$$

在不考虑接触角滞后效应的情况下, 假设表观接触角恒定, 即

$$\theta_c = \text{const}. \quad (5)$$

初始时流体静止, 液面保持水平, 相当于初始处于极强过载状态, 毛细效应被完全抑制。

采用 ANSYS Fluent 求解上述控制方程, 方程求解选用压力基 (Pressure Based) 求解器, 方程中的瞬态项利用一阶隐式差分法进行离散, 对流项和扩散项分别采用 QUICK 和基于控制体的最小二乘法 (Least

Squares Cell Based) 进行处理, 采用 SIMPLE 算法求解压力-速度方程, 对界面上的压力采用 PRESTO 算法进行插值。为获得清晰的相界面, 模拟中采用 Geo-Reconstruct 模型进行相界面重构。此外, 为了维持方程计算的稳定性, 采用固定步长进行计算, 步长设置为 10^{-8} , 计算中库朗数小于 0.02。

1.3 网格无关性验证

当重力骤降为 0 后, 接触线区域的运动引起自由液面的波动, 并沿界面传播^[27]。由于 $Bo = 0$, 界面波的特征速度^[28]可表示为

$$v \sim \left(\frac{\delta \cos \theta}{\rho R} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

对应的特征时间为

$$t_0 \sim \left(\frac{\rho R^3}{\delta \cos \theta} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (7)$$

考虑几何构型及对称性选取 5 个特征点, 其位置如图 4 所示。

用计算模型中水力直径的一半代替 R 计算波的特征时间, 有 $t_0 = 12.35 \mu\text{s}$, 即波传播到中心点的时间, 通过图 5 可以看出对应点 5 开始振动的时间为 $12 \mu\text{s}$

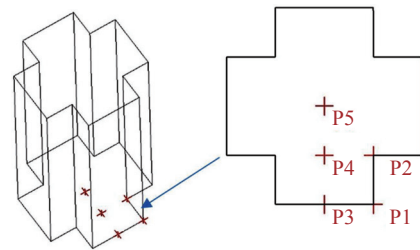


图 4 特征点位置

Fig. 4 Feature point location diagram

表 1 氨工质的气液两相流体物性参数
Table 1 Physical properties of gas and liquid phase of ammonia

特性	气体	液体
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	6.7	610.2
动力黏度/($\mu\text{Pa} \cdot \text{s}$)	9.68	138.32
表面张力/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)		0.0072
接触角/($^\circ$)		30

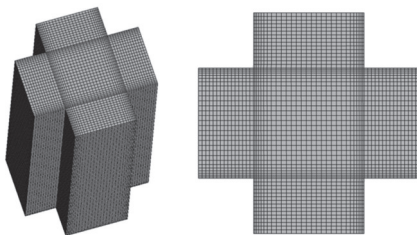


图 3 网格划分

Fig. 3 Diagram of grid division

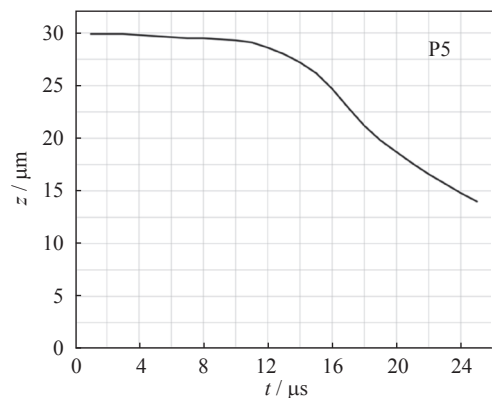


图 5 点 5 初始时刻的振荡

Fig. 5 Point 5 oscillation at the initial moment

左右, 与模拟计算结果基本一致.

图 6 给出了 5 个特征点在 0.5 ms 时高度随着网格数量的变化, 结果显示随着网格数量的增多, 计算结果变化不大, 综合考虑计算的效率和准确性, 后续计算选取网格数为 350000.

2 结果分析与讨论

2.1 气液界面振荡过程

对初始液位为 $30\ \mu\text{m}$ 、接触角为 30° 的情况进行计算. 图 7 显示了特征点和质心的位置随着时间的变化关系, 位置变化呈现弹簧阻尼振动的形式, 各点的位置在 0.5 ms 后基本呈现为一个较为稳定的振动,

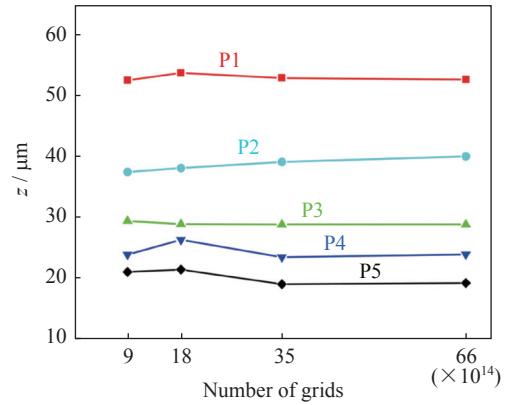


图 6 网格无关性验证

Fig. 6 Grid independence verification

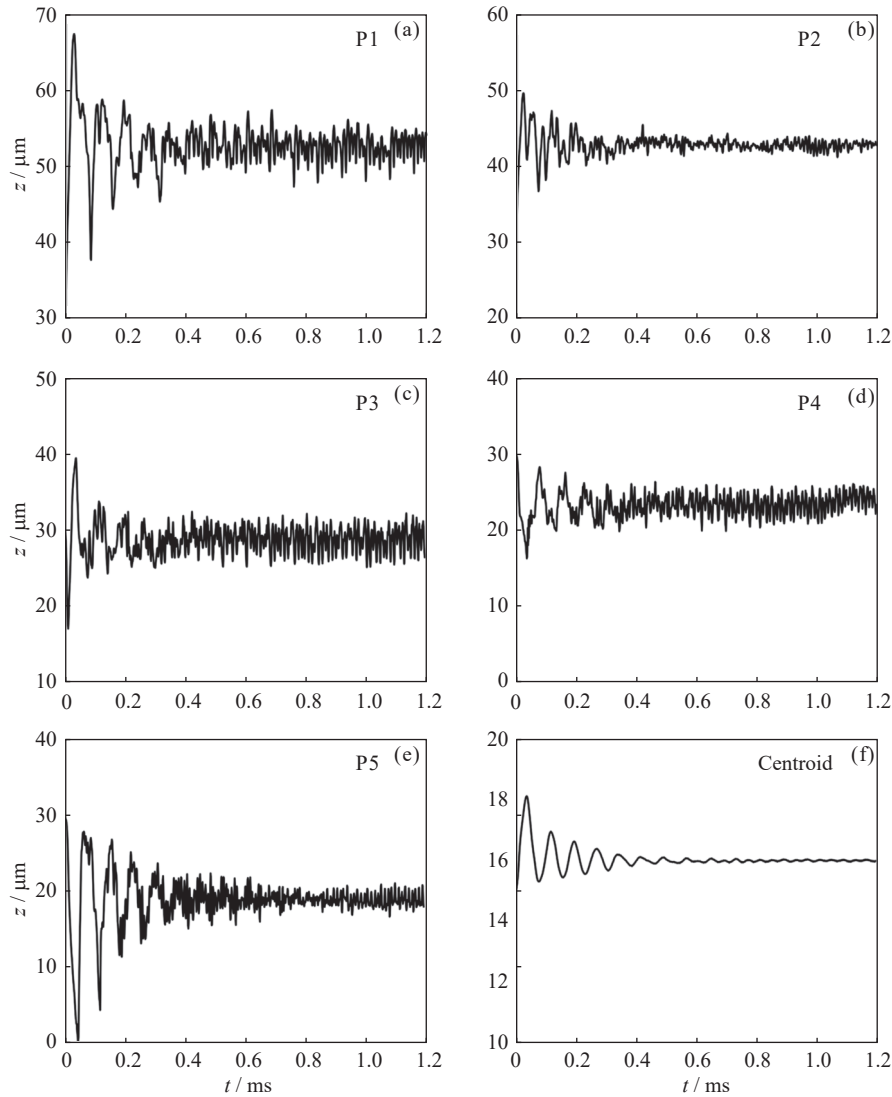


图 7 各点随时间的振荡曲线

Fig. 7 Oscillating images of each point over time

考虑数值不稳定性, 可以认为达到近似稳态, 因此将 0.5 ms 视为界面达到平衡的时间, 其自由液面构型如图 8 所示.

图 9 提取了三个截面气液界面更清晰的液面演变过程. 结合图 9 和图 10 对振荡过程进行分析. 当重力从强过载状态骤降为零时, 点 1 和点 2 由于处于壁面位置, 瞬间触发沿壁面向上爬升. 大量研究表明, 根据微结构毛细运动各阶段发生的时间顺序, 将界面重构过程分为 4 个阶段, 即惯性阶段、黏性和惯性阶段、纯黏性阶段、黏性和重力阶段^[29,30]. 由于本文研究忽略重力的影响, 液面演变过程分为惯性阶段、黏性和惯性阶段以及纯黏性阶段. 在惯性阶段毛细位置变

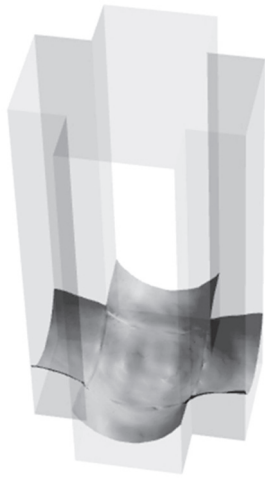


图 8 0.5 ms 时液面构型

Fig. 8 Interface configuration at 0.5 ms

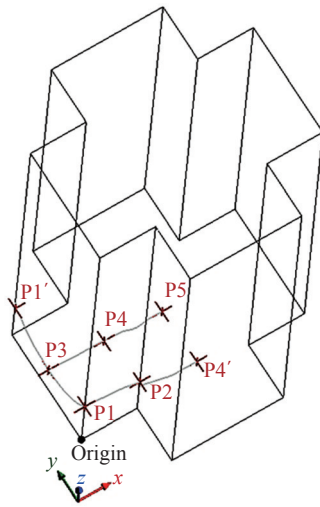


图 9 界面位置

Fig. 9 Interface position diagram

化与时间呈线性关系. 如图 11 所示, 点 1 在 20 μs 内呈线性爬升, 斜率为 1.49, 点 2 基本也呈线性爬升, 斜率为 0.79, 因此认为 20 μs 内为惯性阶段.

如图 10(b) 所示, 点 1 和点 2 爬升高度差逐渐增大, 从 0.5 ms 的 1~2 界面构型可以看出, 沿着 1~2 方向高度逐渐降低, 这是由于流道构型的影响, 点 1 爬升高度最高为 60.20 μm , 点 2 处在钝角位置, 其爬升最高高度为 49.83 μm , 平衡位置依次为 54.55 μm 和 43.31 μm . 由图 10(c) 结合点 3、点 4、点 5 的振动图像可以看出, 当界面波动从壁面位置沿界面传

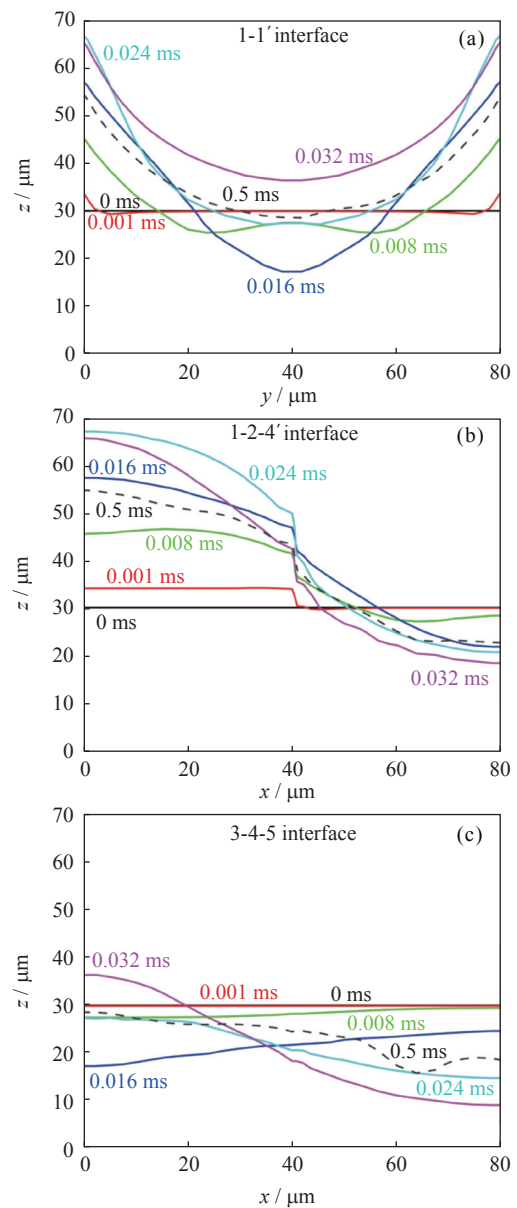


图 10 界面位置演变

Fig. 10 Interface position evolution

播时, 点 3 和点 4 在约 $8\ \mu\text{s}$ 之前以及点 5 在 $10\ \mu\text{s}$ 之前的平缓下降, 均为补充壁面接触位置上升而导致的微小波动, 点 3、点 4、点 5 三点依次触发且位置均下降, 这是由于位置靠近壁面的距离远近以及钝角流的影响, 三点的平衡高度依次为 $28.60, 24.54, 18.58\ \mu\text{m}$. 点 5 在振动过程 $50\ \mu\text{s}$ 时位置下降至 0, 即底部中心处液面触底出现干斑. 在换热应用中, 振荡中点 5 处的干斑将两相换热变为单相换热, 对换热影响极大. 由于液面构型呈现中部凹陷, 点 5 的平衡高度最低, 相应形成的液膜最薄. 通过控制初始液位高度并结合点 5 的振荡特性, 可以在换热应用中控制液膜厚度且避免产生干斑.

从图 8 液面构型中可以看出两个拐角之间有一条明显的沟壑, 从图 10 所示的 1-2-4' 界面型态可以看出, 由于点 2 处在钝角位置, 沿着点 4' 的方向有一个明显的位置阶跃, 这是钝角构型对液面爬升的影响.

2.2 振荡能量的衰减

对特征点和质心的振动进行傅里叶变换分析, 这里只展示质心的频谱分析图, 得到质心振动的主频为 $12000\ \text{Hz}$, 如图 12 所示.

用一维弹簧系统描述自由液面的振动, 弹簧阻尼振动公式如下:

$$x(t) = A_0 \exp(-\zeta\omega_0 t) \cos(\omega_d t + \Phi), \quad (8)$$

$$\omega_d = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2}. \quad (9)$$

式中, A_0 为振幅, ζ 为阻尼比, ω_0 为无阻尼固有频率, ω_d 为有阻尼固有频率, Φ 为初始相位.

据弹簧阻尼振动公式对质心振动的图像进行拟合计算, 由于无外部激励, 有阻尼固有频率为傅里叶

变换得到的主频, 曲线拟合中以振动的起始位为起点, 得到各点振动的幅度以及衰减程度. 这里主要关注振动主频、振幅和阻尼比, 计算结果见表 2.

由拟合参数可知, 各点振动的阻尼比不同. 质心振动的阻尼比为 0.0793 , 用质心振动的阻尼比表征系统振荡的阻尼比. 以下分析初始液位和接触角对系统振动能量和衰减程度的影响, 同样以起始位作为振动起点.

计算不同的初始液位, 分别为 $60, 90, 120\ \mu\text{m}$, 由图 13 和表 3 分析可得, 初始液位增大, 振幅减少, 除了 $30\ \mu\text{m}$ 之外, 其他三种情况的阻尼比几乎不变, $60, 90, 120\ \mu\text{m}$ 均未出现液面触底, 初始液位为 $30\ \mu\text{m}$ 时出现了液面触底, 而触底的影响使得耗散增大, 由此增加了初始液位为 $20\ \mu\text{m}$ 的计算, 计算结果列入表 3, 与 $30\ \mu\text{m}$ 情况相同出现一次触底, 计算阻尼比为 0.0713 , 相比没有发生触底的情况阻尼比大.

为避免触底的影响, 采用初始液位为 $60\ \mu\text{m}$ 计算接触角分别为 $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 的情况, 结果 (图 14

表 2 特征点和质心的振动拟合参数
Table 2 Vibration fitting parameters of feature points and centroid

Point	A_0/mm	ζ	$\omega_d/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$
1	1.90×10^{-5}	0.0776	78000
2	7.00×10^{-6}	0.0362	170000
3	1.35×10^{-5}	0.0817	78000
4	8.15×10^{-6}	0.0665	78000
5	2.10×10^{-5}	0.0742	78000
质心	1.70×10^{-6}	0.0793	75398

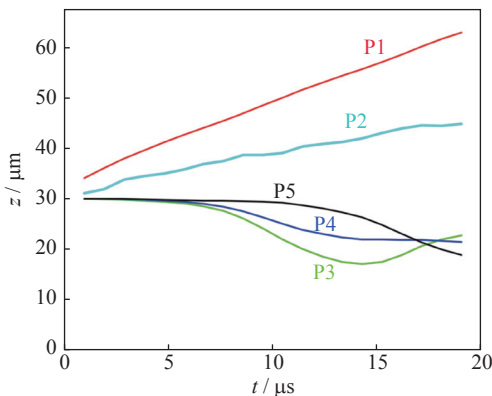


图 11 五个特征点的初始振动
Fig. 11 Initial vibration of five characteristic points

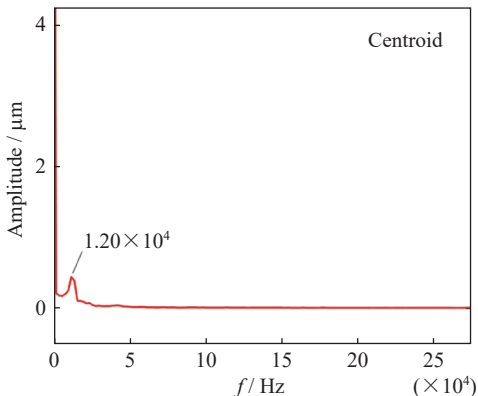


图 12 质心的频谱分析
Fig. 12 Analysis of centroid spectrum

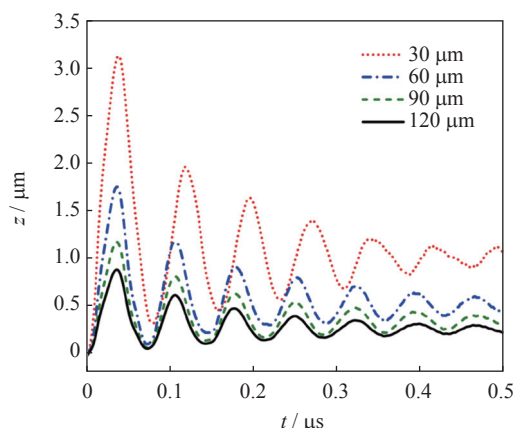


图 13 不同初始液位下质心的振动

Fig. 13 Vibration of center of mass at different initial liquid levels

表 3 不同初始液位下的振动拟合参数
Table 3 Vibration fitting parameters at different initial liquid levels

$h/\mu\text{m}$	A_0/mm	ζ	$\omega_d/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$
20	1.1×10^{-6}	0.0713	64114
30	1.7×10^{-6}	0.0793	75398
60	1.0×10^{-6}	0.0624	87965
90	7.0×10^{-7}	0.0624	87965
120	5.0×10^{-7}	0.0624	87965

表 4 不同接触角下的振动拟合参数
Table 4 Vibration fitting parameters at different contact angles

θ	A_0/mm	ζ	$\omega_d/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$
15°	1.6×10^{-6}	0.1055	75398
30°	1.0×10^{-6}	0.0624	87965
45°	4.0×10^{-7}	0.0298	100530
60°	1.6×10^{-7}	0.0219	100530

和表 4) 表明, 随着接触角的增大, 阻尼比减小, 振幅减小, 且减小幅度随接触角增大而减弱。

考虑到终态重力水平有可能在气液界面振荡过程中产生一定的作用, 图 15 特别比较了终态重力分别为 1 g 和 10 g 时的计算结果, 并与零重力下的结果进行比较 (初始液位为 $60\text{ }\mu\text{m}$ 、接触角为 30°), 三种终态重力条件下质心的振荡曲线几乎重合。事实上, 基于终态重力和方柱微结构特征尺寸的 Bond 数在上

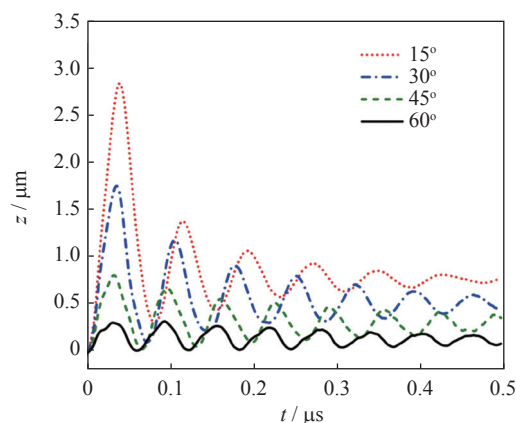


图 14 不同接触角下质心的振动

Fig. 14 Vibration of the center of mass at different contact angles

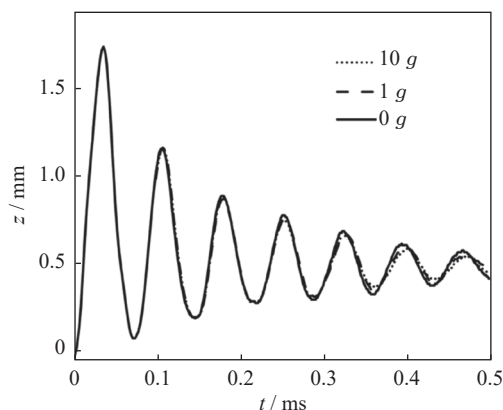


图 15 不同重力水平下质心的振动

Fig. 15 Vibrations of the centroid at different gravitational levels

述 3 种情形中均远小于 1, 结构内部的气液两相流动中, 重力效应相当微弱, 其差异显然是可以忽略的. 这也表明采用方柱微结构表面可以在较宽的重力范围内实现消能效果。

3 结论

采用流体体积法 (VOF) 数值模拟了一种方柱微结构形成的异形基本单元内重力突降引起的气液界面振荡特性, 研究了不同初始液位和接触角下的界面振荡规律, 主要研究结果如下。

(1) 得出了异形基本单元内液面初始演变以及特征点的振动过程。

(2) 毛细重力波的特征时间关联式对本文研究的

异形基本单元同样适用。

(3) 壁面接触点越靠近钝角位置, 其爬升高度越低。

(4) 初始液位高度影响着振幅, 在没有触底的情况下, 初始液位越高振幅越小, 当液位低于 $30\text{ }\mu\text{m}$ 时会在振荡过程中产生液面触底, 触底会增大阻尼比。

(5) 接触角影响着振荡过程的振幅和阻尼比, 随着接触角的增大, 振幅和阻尼比都随之减小, 且减小幅度也趋缓。

(6) 在较宽的重力范围内, 方柱微结构内部的气液两相流动特征相近, 呈现相当微弱的重力效应。

研究表明, 方柱微结构单元可以充分利用表面张力效应, 形成较大的液体晃动阻尼, 实现自主消能并起到稳定静液面的作用。结合宏观尺度的防晃挡板合理使用可以进一步提高阻尼比, 后者将是今后深入研究的方向。

参考文献

- [1] AKYILDIZ H. A numerical study of the effects of the vertical baffle on liquid sloshing in two-dimensional rectangular tank[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2012, **331**(1): 41-52
- [2] IBRAHIM R A, HEINRICH R T. Experimental investigation of liquid sloshing under parametric random excitation[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1988, **55**(2): 467-473
- [3] CUI D L, YAN S Z, GUO X S, *et al.* Parametric resonance of liquid sloshing in partially filled spacecraft tanks during the powered-flight phase of rocket[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2014, **35**: 93-105
- [4] DALMON A, LEPILLIEZ M, TANGUY S, *et al.* Comparison between the FLUIDICS experiment and direct numerical simulations of fluid sloshing in spherical tanks under microgravity conditions[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2019, **31**(1): 123-138
- [5] YANG W J, ZHANG T T, LI C, *et al.* Numerical simulation of pitching sloshing under microgravity[J]. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2019, **12**(5): 1527-1537
- [6] ARNDT T, DREYER M. Damping behavior of sloshing liquid in laterally excited cylindrical propellant vessels[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2008, **45**(5): 1085-1088
- [7] LI J C, LIN H, ZHAO J F, *et al.* Dynamic behaviors of liquid in partially filled tank in short-term microgravity[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2018, **30**(6): 849-856
- [8] WEI Lie, DU Wangfang, XUE Ziyang, *et al.* Wave propagation law at the gas-liquid interface in a storage tank due to gravity jumps[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(5): 875-882 (魏列, 杜王芳, 薛子扬, 等. 重力跳变引起的贮箱内气液界面波传播规律 [J]. *空间科学学报*, 2023, **43**(5): 875-882)
- [9] MIAO Nan, WANG Tianshu, LI Junfeng. Research progress of liquid sloshing in microgravity[J]. *Mechanics in Engineering*, 2016, **38**(3): 229-236 (苗楠, 王天舒, 李俊峰. 微重环境下液体晃动研究进展 [J]. *力学与实践*, 2016, **38**(3): 229-236)
- [10] AOKI K, NAKAMURA T, IGARASHI I, *et al.* Experimental investigation of baffle effectiveness on nonlinear propellant sloshing in RLV[C]//43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Cincinnati: AIAA, 2007
- [11] MALEKI A, ZIYAEIFAR M. Sloshing damping in cylindrical liquid storage tanks with baffles[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2008, **311**(1/2): 372-385
- [12] YANG Chang, SUN Bing, FANG Jie. Liquid sloshing and anti-sloshing of spacecraft tank during outflow[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2018, **33**(12): 3065-3072 (杨唱, 孙冰, 方杰. 航天器贮箱出流过程液体晃动及防晃 [J]. *航空动力学报*, 2018, **33**(12): 3065-3072)
- [13] YU Jin, LI Baohai, WANG Qiusheng, *et al.* The research of sloshing suppression baffle structure and slosh damping of propellant tank[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2021(5): 147-149, 154 (于瑾, 李宝海, 王求生, 等. 贮箱防晃挡板结构形式和晃动阻尼研究 [J]. *导弹与航天运载技术*, 2021(5): 147-149, 154)
- [14] WÖLK G, DREYER M, RATH H J, *et al.* Damped oscillations of a liquid/gas surface upon step reduction in gravity[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1997, **34**(1): 110-117
- [15] GERSTMANN J, DREYER M E, RATH H J. Surface reorientation upon step reduction in gravity[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2000, **504**(1): 847-853
- [16] MICHAELIS M, DREYER M E, RATH H J. Experimental investigation of the liquid interface reorientation upon step reduction in gravity[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2002, **974**(1): 246-260
- [17] MICHAELIS M, GERSTMANN J, DREYER M E, *et al.* Damping behavior of the free liquid interface oscillation upon step reduction in gravity[J]. *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics*, 2003, **2**(1): 320-321
- [18] LI J C, LIN H, LI K, *et al.* Liquid sloshing in partially filled capsule storage tank undergoing gravity reduction to low/micro-gravity condition[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2020, **32**(4): 587-596
- [19] LI J C, LIN H, LI K, *et al.* Dynamic behavior in a storage tank in reduced gravity using dynamic contact angle method[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2020, **32**(6): 1039-1048
- [20] ÖNER D, MCCARTHY T J. Ultrahydrophobic surfaces.

- Effects of topography length scales on wettability[J]. *Langmuir*, 2000, **16**(20): 7777-7782
- [21] YOSHIMITSU Z, NAKAJIMA A, WATANABE T, *et al.* Effects of surface structure on the hydrophobicity and sliding behavior of water droplets[J]. *Langmuir*, 2002, **18**(15): 5818-5822
- [22] LIU B, LANGE F F. Pressure induced transition between superhydrophobic states: Configuration diagrams and effect of surface feature size[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2006, **298**(2): 899-909
- [23] ZHANG Yonghai, XUE Yanfang, WEI Jinjia, *et al.* Pool boiling heat transfer and bubble dynamics over micro-pin-finned surface under microgravity[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013, **34**(11): 2112-2115 (张永海, 薛艳芳, 魏进家, 等. 微重力下微结构表面池沸腾气泡动力学研究[J]. 工程热物理学报, 2013, **34**(11): 2112-2115)
- [24] XUE Yanfang, WEI Jinjia, ZHAO Jianfu, *et al.* Boiling heat transfer enhancement by using micro-structure surface under microgravity[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2012, **33**(3): 441-444 (薛艳芳, 魏进家, 赵建福, 等. 微重力下微结构表面强化沸腾换热研究[J]. 工程热物理学报, 2012, **33**(3): 441-444)
- [25] KONG Xin, ZHANG Yonghai, WEI Jinjia, *et al.* Investigation of boiling heat transfer performance and mechanism of critical heat flux for micro-structured surface under microgravity[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2023, **44**(6): 1587-1593 (孔新, 张永海, 魏进家, 等. 微结构表面微重力下沸腾换热及临界机理研究[J]. 工程热物理学报, 2023, **44**(6): 1587-1593)
- [26] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. *Journal of Computational Physics*, 1981, **39**(1): 201-225
- [27] WEI Lie, DU Wangfang, ZHAO Jianfu, *et al.* Numerical study on gas-liquid interface waves in partially filled tanks under microgravity condition[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, **54**(4): 1004-1011 (魏列, 杜王芳, 赵建福, 等. 微重力条件下部分充液贮箱气液界面波动特性的数值模拟[J]. 力学学报, 2022, **54**(4): 1004-1011)
- [28] Weislogel M M. Fluid interface phenomena in a low-gravity environment: recent results from drop tower experimentation[C]//Space Forum. Gordon and Breach Science Publishers, 1998, 3(GRC-E-DAA-TN58785)
- [29] BOSANQUET C H. LV. On the flow of liquids into capillary tubes[J]. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1923, **45**(267): 525-531
- [30] CAI J C, CHEN Y, LIU Y, *et al.* Capillary imbibition and flow of wetting liquid in irregular capillaries: A 100-year review[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2022, **304**: 102654

作者简介



王素龙 男, 1999年12月出生于江苏省徐州市, 现为中国石油大学(北京)硕士研究生, 主要研究方向为多相流体力学。
E-mail: 18751526319@139.com



杜王芳(通信作者) 女, 现为中国科学院力学研究所副研究员, 主要研究方向为微重力多相热流体、空间流体管理等。
E-mail: duwangfang@imech.ac.cn



赵彦琳(通信作者) 女, 现为中国石油大学(北京)热能工程系教授, 博士生导师, 主要研究方向为多相流体力学、多相流冲刷腐蚀等。
E-mail: ylzhao@cup.edu.cn