

# 多相热流体系统中的主导作用力分区准则

杜王芳<sup>1</sup>, 赵建福<sup>1,2</sup>, 李 凯<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院力学研究所 微重力重点实验室, 北京市北四环西路 15 号 100190;

2. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京市玉泉路 19 号甲 100049)

**摘要:**重力效应是微重力多相热流体动力学研究的核心内容之一,一直得到广泛关注。文中分析了多相热流体系统中与重力效应相关联的主要作用力,围绕重力无关性问题,系统分析和评述了多相热流体系统中主导作用力分区准则的研究现状和主要进展,给出了一个主导作用力分区图和相应分区边界判断准则,并探讨了对其深化研究的可能途径。该结果可以为航天应用多相热流体技术研发服务,同时,对地面常重力环境多相热流体系统(尤其是微通道多相热流体系统)相关技术应用的研究也同样有着明确的指导意义。

**关键词:**微重力多相热流体动力学;重力效应;主导作用力;重力无关性;分区图

中图分类号:O359 文献标识码:A DOI:10.16046/j.cnki.issn1008-3782.2018.01.001

## 1 概述

微重力多相热流体动力学是研究微重力环境中的多相热流体体系的流动、传热、传质等基本规律及其应用的一门新兴交叉学科,其形成和发展受到了航天工程和技术发展需求的强烈驱动,尤其是以载人空间站和深空探测为代表的大型航天工程对空间环境中的流体管理和热控技术、动力与推进技术及载人航天器环境控制与生命保障技术等提出的极为严苛的要求,成为推动微重力多相热流体动力学发展的主要动力。微重力多相热流体动力学研究成果往往可以直接用于解决相关的航天技术研发中遇到的难题;而航天工程所提供的不断完善和丰富的微重力实验平台,同时对该学科的发展提供了坚实的支撑<sup>[1]</sup>。

航天器在研制、测试、发射、在轨飞行、地外行星表面着陆或返回地球等全寿命期间,会经历常重力(地面)、超重力(加速过载)、微重力(在轨自由飞行)和部分重力(如月球表面  $1/6g$ 、火星表面  $1/3g$ )等复杂的重力环境,相应的多相热流体系统也同样如此。然而,和结构件或者物性参数均匀的单相流体不同,多相热流体系统中,由于气、液两相介质往往存在巨大的密度差异(如水和空气密度比可高达  $10^3$ ),重力的存在会导致巨大的浮力作用,引起的相间分离和相间滑移等效应显著影响着流动结构,并因此又影响着流动的其他特性(如摩擦压降、传热等)。因此,对于重力效应和重力在多相热流体行为中作用机制的研究,就成为微重力多相热流体动力学研究的核心内容。文中主要探讨在多相热流体系统中与重力效应相关联的主要作用力及主导区划分准则,为相关航天应用多相热流体技术研发服务。

## 2 主导作用力分析及其分区准则

顾名思义,微重力多相热流体动力学的研究内容,首先是微重力环境中的多相热流体体系的流动与传热特征及其规律。这里,“微重力”代表一种极端条件,实质上表示着重力对相关流动与传热现象的影响可以忽略不计,因此,在早期文献中甚至直接以“零重力(zero gravity)”来表示。微重力条件下的多相热流体体系的流动与传热现象具有与地面常规环境中迥然不同的特征,重力作用消失或者被抑制后,表面张力作用和界面

收稿日期:2018-01-09

基金项目:国家自然科学基金项目(11672311);中国科学院前沿科学重点研究计划项目(QYZDY-SSW-JSC040)

第一作者简介:杜王芳(1984-),女,博士,主要研究方向为微重力多相热流体动力学。

通讯作者简介:赵建福(1967-),男,博士,研究员,博士生导师,主要研究方向为微重力多相热流体动力学。E-Mail:jfzhao@imech.ac.cn

效应将对系统特性具有特别重要的影响。因此,重力(或更准确地说是浮力)和表面张力构成了一对相互竞争的作用力,二者所构成的无量纲参数 Bond 数  $Bo = (\rho_L - \rho_G)gd^2/\sigma$  (这里,  $\rho, g, d$  和  $\sigma$  分别表示密度、重力加速度、特征长度和表面张力系数,下标 L 和 G 分别表示液相和气相)是微重力多相热流体动力学中关键参数之一。由于重力(浮力)属于体积力,而表面张力则为面积力,二者之比随着系统特征尺度的减小会急剧降低,该参数在微纳多相流动研究中同样起着重要作用。

另一个可以抑制重力效应的是惯性力,二者之比构成了微重力多相热流体动力学中的另一个关键的无量纲参数 Froude 数  $Fr = U/\sqrt{gd}$ , 其中,  $U$  表示特征速度。

原则上,任意两个作用力都可以组成一个无量纲参数,如惯性力和表面张力即可构成 Weber 数  $We = \rho U^2 d/\sigma$ 。不过,鉴于文中主要目标是探讨多相热流体系统的重力无关性,这里就不再展开了。Bond 数、Froude 数和 Weber 数之间存在着一定的关系,即  $Fr^2 = [(\rho_L - \rho_G)/\rho] \cdot We/Bo$ , 其右端首个无量纲因子还可以表示成密度比  $\bar{\rho}_I = \rho_I/\rho$  (其中,下标 I=L 或 G)的组合形式  $(\bar{\rho}_L - \bar{\rho}_G)$ 。若采用液相密度为特征量,气液两相密度比可记为  $\bar{\rho} = \rho_G/\rho_L$ 。

这里需要强调的是,和 Bond 数定义的唯一性不同的是,在多相热流体系统中,速度(以及密度、黏度等)有着诸多不同的定义或者选择,如气相、液相或者基于某种物理原则的折算量,由此产生了 Froude 数、Weber 数和其他无量纲参数的诸多不同定义式,给应用造成了诸多不便。原则上,无量纲参数的最佳定义式对应着能够正确反映真实的多相热流体系统运动规律的机制描述,因此,发现无量纲参数的合适定义式,也成为微重力多相热流体动力学基础研究的目标之一。

基于双流体同轴环状 Poiseuille 流动的线性稳定性理论分析,赵建福<sup>[2]</sup>给出了一个关于气液两相流型特征的重力无关性的判据,即

$$Bo \leq \begin{cases} 1 \\ We \\ Ca \end{cases} \quad (1)$$

式中,毛细数  $Ca = \mu U/\sigma$ ,  $\mu$  表示动力黏性系数。

式(1)中第一种情况一般对应低速情形,此时重力无关依赖于强表面张力作用。基于该准则,在地面常重力环境中,可以采用微通道气液两相系统或者中性悬浮液液两相系统,实现对微重力气液两相系统的有效模拟<sup>[3,4]</sup>。第二种情况则对应于较大流速的情况,此时,即使在垂直上升和垂直下降两种流动构型中也可以产生相同的流动特征<sup>[5]</sup>。而由于  $Ca = \sqrt{We/Su}$ , 而 Suratman 数  $Su = \rho\sigma d/\mu^2$  往往远大于 1, 因此,第三种情况一般都被第二种情况所掩盖,而不会呈现出来。

Zhao 和 Hu<sup>[6]</sup>在研究微重力气液两相弹状流-环状流转换机理时,指出影响气液两相流型的是气相惯性力。这样,在气液两相流型特征的决定机制中起作用的是气相表观 Weber 数  $We_{SG} = \rho_G U_{SG}^2 d/\sigma$ , 即气相密度和气相表观流速是特征量。基于同样原因,式(1)中的第二种情况可以改写为

$$Fr_{SG}^2 \geq 1 \quad (2)$$

式中,  $Fr_{SG} = U_{SG}/\sqrt{(\rho_L - \rho_G)gd/\rho_G} = \sqrt{We_{SG}/Bo}$  可称之为气相表观 Froude 数。显然, Bond 数、气相表观 Weber 数和气相表观 Froude 数中只有 2 个是独立的。

实用中,重力无关性可表示为

$$\begin{cases} Bo < Bo_{cr} \\ Fr_{SG} > Fr_{SG,cr} \end{cases} \quad (3)$$

式中,下标 cr 表示临界值的意思。

利用俄罗斯和平号空间站变重力实验装置,Zhao 等<sup>[7],[8]</sup>完成了国际上首个在空间长期稳定的微重力环境开展的有人参与的微重力和部分重力条件下气液两相流型实验。基于空间实验结果及其他地基短时失重飞机实验数据,Zhao 等<sup>[9]</sup>给出了重力无关性准则中相应参数临界值的范围,即  $Bo_{cr} = 1.5 \sim 6$ ,  $Fr_{SG,cr} = 0.54 \sim 2.2$ , 并由此得到  $We_{SG,cr} = 0.8 \sim 13$ , 分别对应于图 1 所示的重力主导区、表面张力主导区和惯性力主导区之间的边界。

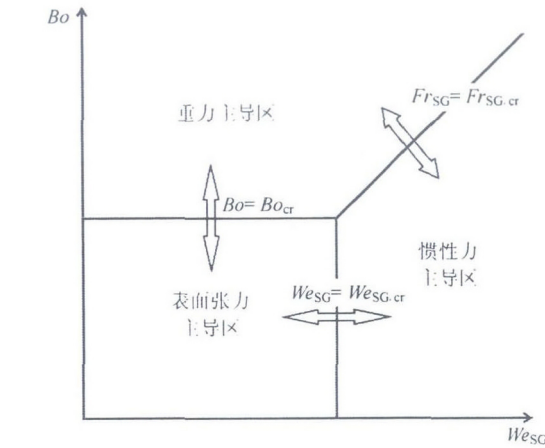


图1 多相热流体系统中的主导作用力分区图

表面张力主导区在小尺度气液两相流中同样存在,对应的流型主要是孤立气泡流或起泡聚并流,而环状流中流道周边附着液膜周向厚度呈均匀分布。与此对应,重力主导区则以具有伸长气泡特征的塞状流、具有非对称液膜的环状流和分层流为主要特征。基于对单个流体颗粒所受表面张力与浮力间的尺度分析(scaling analysis),Brauner 和 Moalem-Marón<sup>[10]</sup>建议  $Bo_{cr} = 6$ ;而基于对分层流的线性稳定性分析,Brauner 和 Moalem-Marón<sup>[11]</sup>给出了一个明显更高的临界 Bond 数  $Bo_{cr} = (2\pi)^2 \approx 40$ 。Kew 和 Cornwell<sup>[12]</sup>基于所观察流型特征建议  $Bo_{cr} = 4$ ,Ong 和 Thome<sup>[13]</sup>则建议  $Bo_{cr}$  的上限大约为 6.25~11,下限为 1。Nema<sup>[14]</sup>基于 Barnea 等<sup>[15]</sup>对分层流或环状流向间歇流过渡时所形成的最小液团的受力分析,考虑了气相重力的作用,提出了一个临界 Bond 数的计算式

$$Bo_{cr} = \left( \frac{1}{1-\bar{\epsilon}} - \frac{\pi}{4} \right)^{-1} \quad (4)$$

鉴于一般情况下  $\bar{\epsilon} \leq 1$ ,式(4)给出的临界 Bond 数约为 4.7。这些结果与图1相当接近。

Harirchian 和 Garimella<sup>[16]</sup>提出了一个依赖于流动特征的新判据:

$$Bo_{cr}^{1/2} \cdot Re_{LO} = 160 \quad (5)$$

其中,全液 Reynolds 数  $Re_{LO} = Gd/\mu_L$ ,这里,  $\mu$  表示动力黏性系数,总质量速度  $G = \rho_G U_{SG} + \rho_L U_{SL}$ 。由于 Reynolds 数对应于惯性力与黏性力之比,式(5)预示着惯性力会弱化重力的影响,会降低 Bond 数的临界值,这与前述趋势分析结果是一致的。但式(5)同时还预示着黏性力会强化重力影响进而提高 Bond 数的临界值,这与式(1)第三种情况是矛盾的。

与流动特征相关的重力无关性一般发生在高速情况。Reinarts 等<sup>[17]</sup>研究了地面常重力和空间微重力条件下氨工质在内径 3.34 mm 不锈钢管内的绝热两相流压降,实测数据表明所研究的流动处于环状流区域,在相应工况下气液两相压降与重力无关。不过,作者发现,在  $We_{SG} < 20$  时光滑环状流模型能很好地预测实测的两相压降,而 Chen 模型<sup>[18]</sup>则存在明显高估的现象;当  $We_{SG} > 20$  时光滑环状流模型显示出明显低估的现象,而 Chen 模型则能很好预测实测的两相压降。Ungar 和 Cornwell<sup>[19]</sup>地面实验结果(氨工质,内径 3.15 mm 不锈钢水平管)也有同样的表现。这正反映了表面张力和气相惯性力间主导地位的竞争:在较小的气相表观 Weber 数时,流动特征由表面张力主导,液气界面光滑,满足光滑环状流模型假设;而在较大的气相表观 Weber 数时,气相惯性力主导着流动特征,液气界面波动剧烈,呈现出如 Chen 模型所对应的粗糙液气界面结构,气、液相间作用增强,整体压降超过光滑环状流构型。这给出了气相表观 Weber 数的临界值范围  $We_{cr} = 20$ 。

最近,Baba 等<sup>[20]</sup>提出了一个与图1类似的主导作用力分区模型,所采用的混合 Weber 数和混合 Froude 数的定义依据的是混合流速  $U_m$  和混合密度  $\rho_m$ :

$$We_m = \frac{\rho_m U_m^2 d}{\sigma} = \frac{G^2 d}{\rho_m \sigma} \quad (6)$$

$$Fr_m = \sqrt{\frac{We_m}{Bo}} = \frac{G}{\sqrt{\rho_m(\rho_L - \rho_G)gd}} \quad (7)$$

其中,混合密度  $\rho_m = G/U_m = [x/\rho_G + (1-x)/\rho_L]^{-1}$ ,干度  $x = G_G/G = \rho_G U_{SG}/G$ 。可以导出混合速度  $U_m = U_{SG} + U_{SL}$ 。引入参数  $\psi = [x + (1-x)\bar{\rho}]/x^2$  (由于气液两相密度比  $\bar{\rho} = \rho_G/\rho_L$  往往远小于 1,故  $\psi \approx 1/x$ ), Baba 等<sup>[19]</sup>和式(2)的定义存在如下关系:  $We_m = \psi \cdot We_{SG}$ ,  $Fr_m = \psi^{1/2} \cdot Fr_{SG}$ 。

基于单组份工质流动沸腾传热地面小管道实验结果, Baba 等<sup>[20]</sup>提出相应参数的临界值分别为:  $We_{m,cr} = 5$ ,  $Fr_{m,cr} = 4$ 。由此也可得到  $Bo_{cr} = 0.31$ , 该数值在现有 Bond 数临界值中是最小的一个。作者正在开展一个国际空间站(ISS)实验计划,对该准则做进一步的验证是其主要研究目标之一<sup>[20,21]</sup>。

由于干度  $x$  总是小于 1, 同样工况条件下,  $We_m$  和  $Fr_m$  总是大于  $We_{SG}$  和  $Fr_{SG}$ 。考虑到气相惯性力起主导作用时  $x$  不可能小于 0.1, 参数  $\psi$  的取值将在 1~10 之间, 相应地,  $\psi^{1/2} \approx 1 \sim 3$ 。这样, Zhao 等<sup>[9]</sup>和 Baba 等<sup>[20]</sup>的分区图在实用意义上是近似等效的。不过, Zhao 等<sup>[9]</sup>分区准则有众多来自流型观测、摩擦压降的实验数据和流型转换机理等方面的支持, Baba 等<sup>[20]</sup>目前仅有地面小管道流动沸腾传热实验结果予以佐证。

这里,值得注意的是, Zhao 等<sup>[9]</sup>和 Baba 等<sup>[20]</sup>的分区准则中不同速度选择的一个可能的技术性起源,来自实验对象和测试方法的不同。流型和摩擦压降实验往往针对气液两相绝热流动, 实验中一般采用独立计量的方式分别测量气、液两相流量后, 经混合器使其相互混合, 随后被引入实验段进行观测, 因此, 气、液两相介质流速等信息可以准确获得。然而, 在单组份工质流动沸腾实验中, 可以直接测量的往往只能是进入实验段的工质总流量, 有时也会直接测量截面含气率(即空隙率  $\alpha$ ), 但由于气、液两相介质之间往往存在相间滑移现象, 干度并不能直接测量或间接计算而准确得到, 常规的处理往往基于热平衡假设通过输入热量换算而得, 这在非平衡效应显著(如过冷流动沸腾)的情况中与实际相差显著。显然, 对流动沸腾实验数据采用总质量速度处理是方便的, 但混合密度的确定因平衡干度测算方法而引入不可避免的偏差, 并不利于准确揭示流动过程中的基本机制。因此, 进一步检验不同准则参数定义的正确性, 需要测量技术及其理论的创新, 以便提供更直接、准确的流动信息。

此外, 主导作用力的更迭并非是突然发生的, 而往往要经历一个此消彼长的渐变过程, 因此, 主导作用力的分区边界原则上应该是一个区间而不是一条几何曲线。其次, 对于不同的研究目标(如流型、压降、传热系数、临界热流密度等), 主导作用力可能因主要控制机制的不同而有所不同, 相应的表征参数和/或其临界值也有可能是不同的<sup>[20]</sup>。因此, 尽管 Zhao 等<sup>[9]</sup>和 Baba 等<sup>[20]</sup>的分区准则初步成功整合了流型、压降、传热系数等方面的实验结果, 目前还需要更深入的理论研究和实验验证, 特别是后者所需要的实验测量结果要涵盖足够广泛的研究目标, 尤其需要在长期的空间微重力环境中利用大型变重力实验装置开展的实验研究。目前已经在建研制中的中国空间站及变重力科学实验柜将为此提供极为优异的空间实验平台支撑, 进而极大地促进该理论的发展和完善。

### 3 结论

鉴于气、液两相介质一般存在巨大的密度差异, 多相热流体系统在不同重力环境表现出迥异的特征, 因此, 多相热流体行为中的重力效应和重力作用机制的研究, 作为微重力多相热流体动力学研究的核心内容之一, 一直得到广泛关注。

文中基于对多相热流体系统中与重力效应相关联的主要作用力的分析, 围绕着重力无关性问题, 系统分析和评述了目前关于多相热流体系统中主导作用力分区准则的研究现状和主要进展, 给出了一个主导作用力分区图和相应分区边界判断准则, 并探讨了对其深化研究的可能途径。该结果可以为航天应用多相热流体技术研发服务, 同时, 对地面常重力环境多相热流体系统(尤其是微通道多相热流体系统)相关技术应用的研究也同样有着明确的指导意义。

#### 参 考 文 献

- [1] 赵建福. 气液两相流动与相变传热[C]. //胡文瑞等. 微重力科学概论[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 127-164.
- [2] 赵建福. 微重力条件下气/液两相流动研究[D]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2000.

- [3] 赵建福. 微重力条件下气/液两相流流型的研究进展[J]. 力学进展, 1999, 29(3): 369-382.
- [4] 吕成道, 李佛金, 王汉强, 等. 地面模拟微重力下两相流动沸腾换热的分析[J]. 华中理工大学学报, 1998, 26(4): 81-83.
- [5] 张红星, 苗建印, 王录, 等. 嫦娥三号两相流体回路的地面试验验证方法及试验结果分析[J]. 中国科学, 2014, 44(6): 589-596.
- [6] Zhao JF, Hu WR. Slug to annular flow transition of microgravity two-phase flow [J]. Int. J. Multiphase Flow, 2000, 26(8): 1295-1304.
- [7] Zhao JF, Xie JC, Lin H, etc. Experimental studies on two-phase flow patterns aboard the Mir space station[J]. Int. J. Multiphase Flow, 2001, 27(11): 1931-1944.
- [8] 赵建福, 解京昌, 林海, 等. 不同重力条件下气/液两相流实验研究[J]. 工程热物理学报, 2001, 22(3): 367-369.
- [9] Zhao JF, Xie JC, Lin H, etc. Experimental study on gas/liquid two-phase flow in microgravity [C]. In: 51st Int. Astronautical Cong., 2-6 Oct. 2000, Rio de Janeiro, Brazil.
- [10] Brauner N, Moalem-Maroon D. On the relations between two-phase flows under reduced gravity and earth experiment [J]. Int. Commun. Heat Mass Transfer, 1990, 17: 271-282.
- [11] Brauner N, Moalem-Maroon D. Identification of the range of small diameter conduits regarding two-phase flow pattern transitions [J]. Int. Commun. Heat Mass Transfer, 1992, 19: 29-39.
- [12] Kew PA, Cornwell K. Correlations for the prediction of boiling heat transfer in small diameter channels [J]. Appl. Therm. Eng., 1997, 17: 705-715.
- [13] Ong CL, Thome JR. Macro-to-microchannel transition in two-phase flow: part 1 - two-phase flow patterns and film thickness measurements [J]. Exp. Therm. Fluid Sci., 2011, 35: 37-47.
- [14] Nema G. Flow regime transitions during condensation in microchannels [D]. Ph.D. Dissertation, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA, 2008.
- [15] Barnea D, Luninski Y, Taitel Y. Flow pattern in horizontal and vertical two phase flow in small diameter pipes [J]. Can. J. Chem. Eng., 1983, 61(5): 617-620.
- [16] Harirchian T, Garimella SV. A comprehensive flow regime map for microchannel flow boiling with quantitative transition criteria [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 2010, 53: 2694-2702.
- [17] Reinarts T R, Ungar E K, Butler C D. Adiabatic twophase pressure drop in microgravity: TEMP2A-3 flight experiment measurements and comparison with predictions [C]. In: 33rd Aerospace Sci. Meeting & Exhibit, Reno, NV, Jan. 9-12, 1995.
- [18] Chen I, Downing R, Keshock EG, Al-Sharif M. Measurements and correlation of two-phase pressure drop under microgravity conditions [J]. J. Thermophysics & Heat Transfer, 1991, 5(4): 514-523.
- [19] Ungar EK, Cornwell JD. Two-phase pressure drop of ammonia in small diameter horizontal tubes [C]. In: 17th AIAA Ground Testing Conf., Nashville, TN, July 6-8, 1992.
- [20] Baba S, Sakai T, Sawada K, Kubota C, Wada Y, Shinmoto Y, Ohta H, Asano H, Kawanami O, Suzuki K, Imai R, Kawasaki H, Fujii K, Takayanagi M, Yoda S. Proposal of experimental setup on boiling two-phase flow on-orbit experiments onboard Japanese experiment module "KIBO" [J]. J. Phys. Conf. Ser., 2011, 327: 012055-1/12.
- [21] Ohta H, Baba S. Boiling experiments under microgravity conditions [J]. Exp. Heat Transfer, 2013, 26(2-3): 266-295.

## Criteria for Dominated Force Regime Map in Multiphase Thermal Fluid System

DU Wang-fang<sup>1</sup>, ZHAO Jian-fu<sup>1,2</sup>, LI Kai<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Microgravity, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 100190, Beijing, China;

2. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, 100049, Beijing, China)

**Abstract:** The gravity effect is one of the key problems of microgravity multiphase thermal fluid dynamics, which has attracted wide attention. In the present paper, focusing upon the gravity-independence, the up-to-date progress of the research on dominated force regime map (下转第 12 页)

- [19] Ashton, G. D., 2008. Ice entrainment through submerged gates. 19th IAHR international symposium on ice[C], Using new technology to understand water-ice interaction, Vancouver, British Columbia, Canada, July 6 to 11, 129-138.

## Study on Control Mode of Open Channel Water Conveyance in Ice Age

CHEN Wen-xue<sup>1</sup>, MU Xiang-peng<sup>2</sup>, CUI Wei<sup>2</sup>, HE Sheng-nan<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 100038, Beijing, China;

2. Department of Hydraulics, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 100038, Beijing, China)

**Abstract:** Conveying water under ice sheet is an important way of open channel water conveyance in high latitude area, if it is controlled improperly, the disasters such as ice jam and ice dam will occur. Combining with the characteristics of open channel water conveyance in ice age, this paper puts forward that the constant level mode before sluice is suitable for open channel in ice age. In the process of open channel running in ice age, the flow Froude number should be controlled within 0.08~0.09 to guarantee the stability of ice sheet. Since the ice sheet roughness changes in the process of water conveyance, to adopt the proper control algorithm and to guarantee the stability of constant level before sluice is the key for improving the safety running in ice age. The reasonable ice boom does not only promote the formation of ice sheet, but also improves the water conveyance ability in ice age, as well as the response capacity on extreme ice damage.

**Keywords:** open channel; constant level before sluice; water conveyance in ice age; ice boom; control algorithm

(责任编辑:翟国静)

(上接第5页) in multiphase thermal fluid system is reviewed comprehensively based on analyzing main forces which can act as an opposite side of gravity in multiphase thermal fluid system. A dominated force regime map and the corresponding criteria for the boundaries between adjacent regimes are presented. The future directions are also discussed and pointed out to deepen the research. The results are helpful for the research and development of multiphase thermal fluid technology in space applications, as well as for those in ground applications, such as micro-channel multiphase thermal fluid system.

**Keywords:** microgravity multiphase thermal fluid dynamics; gravity effect; dominated force; gravity-independence; regime map

(责任编辑:郭书俊)