第9卷4期 2001年12月

7

文章编号:1005-0930(2001)-04-0373-08 中图分类号:O359<sup>+</sup>.1 文献标识码:A

# 微重力条件下气/液两相流压降实验研究

赵建福<sup>1</sup>, 林 海<sup>1</sup>, 解京昌<sup>1</sup>, 胡文瑞<sup>1</sup>, 吕从民<sup>2</sup>, 张玉涵<sup>2</sup>

摘要:利用俄罗斯 IL-76 失重飞机对微重力条件下方形截面管道内的水/ 气两相 流压降进行了实验研究. 利用本次微重力气/ 液两相流压降实验结果对一些目前 常用的基于地面常重力实验结果的两相流压降预测模型 (均相模型、Lockhart-Martinelli-Chisholm 模型和 Friedel 模型) 在微重力条件下的适用性进行了评估. 比较发现,均相模型和 Lockhart-Martinelli-Chisholm 模型预测结果和实验数据 差异很大;而 Friedel 模型的预测结果尽管也与实验数据有着明显的差别,但在 这些模型中是误差最小的. 因此,可以利用 Friedel 模型来对微重力气/液两相流 压降进行初步预估,而新的、更精确的模型将依赖于更有物理意义的分析方法及 不同重力条件下气/ 液两相流压降实验的结果. 关键词:微重力,气/液两相流,压降,非圆形管道

随着人类空间探测与开发活动的发展,空间飞行器尤其是载人航天器将越来越大型 化和精细化,相应地对空间飞行器的流体与热管理、动力供应、环境控制与生命保障系统 等的要求也将越来越高.气/液两相流广泛存在于上述系统,因此,此类系统设计与运行的 可靠性,将很大程度上依赖于对气/液两相流机理,包括相分布(即流型)、压力损失、传热 系数等随气、液两相流量的变化特性的充分认识.这激励了过去的十多年里微重力气/液 两相流研究的迅速发展<sup>[1]</sup>.

微重力气/液两相流实验研究的理想环境是大型地球轨道飞行器,如空间站或航天飞 机等<sup>[2,3]</sup>.然而,由于实验机会及经费等的制约,目前微重力气/液两相流实验往往只能利 用飞机沿抛物线轨迹飞行或落塔内的自由下落来产生所需失重条件的.不过,此类设施在 进入和退出失重阶段时重力变化剧烈,失重阶段持续时间过短(失重飞机约 20s,而落塔 往往仅有数秒),失重飞机还存在残余重力波动较大等问题,这些缺陷对相应实验的设备、 过程及测量结果都有很大的不良影响.此外,利用中性悬浮液/液两相系统或毛细管气/液 两相系统,在地面常重力环境中也开展了一些模拟微重力两相流实验.但由于两相流动的 极端复杂性,相关模拟实验的详细相似准则目前还不很清楚,导致模拟实验极不完备,对 实验结果的解释也还存在诸多争议.实验方法的缺陷,使得目前微重力气/液两相流研究 多集中于流型特征及其转换条件,而微重力气/液两相流压降的实验数据却很少<sup>[4,5]</sup>.

<sup>\*</sup> 收稿日期:2001-04-24;修订日期:2001-08-17 基金项目:国家自然科学基金(批准号:19789201);科技部"攀登"计划(编号:95-预-34);中国科学院"知识创新 工程"(编号:KICX2-L02)资助项目 作者简介:赵建福(1967~),男,副研究员

此外,目前微重力两相流实验往往采用圆截面流道.非圆形截面流道因更强的截面环 流作用使得强化传热成为可能,更应得到重视. Wolk 等<sup>[6]</sup>曾利用落塔研究了短时微重力 条件下水力直径约 6mm 的圆形和非圆形截面流道内的水/气两相流动现象,其中只观察 到泡状流和弹状流两种流型.该实验还同时测量了压降,但迄今未见报道.赵建福等<sup>[7]</sup>报 道了利用俄罗斯加加林国家航天员训练中心 IL-76 失重飞机开展的微重力条件下方形截 面管道内水/气两相流实验中观察到的流型特征,较 Wolk 等<sup>[6]</sup>实验更全面地包括了泡状 流、弹状流、弹-环状过度流和环状流等4 种微重力条件下可能出现的流型.

本文将对利用俄罗斯加加林国家航天员训练中心 IL-76 失重飞机开展的微重力条件 下方形截面髓道内水/气两相流实验中测量到的两相流压降进行报道,并将其与目前常用 的基于地面常重力实验结果的两相流压降预测模型(均相模型、Lockhart-Martinelli-Chisholm 模型和 Friedel 模型)进行比较,以检验这些模型在微重力条件下的适用性.

## 1 实验装置

374

实验装置如图 1 所示,是针对俄罗斯加加林航天员训练中心 IL-76 失重飞机搭载实 验要求研制的.为了减弱在失重飞行阶段开始与结束时加速度变化对沿程压降及差压传 感器的冲击影响,实验段平行于失重飞机翼展方向水平安装.



图 1 实验装置结构简图

Fig. 1 A schematic diagram of the test facility

实验介质为水和空气. 泵将水由分离器抽出,经实验段再流回分离器,形成一个封闭 环路.水流量利用流量调节阀控制,并由质量流量计(量程 0~1500kg/h,精度 0.15%全量 程).该质量流量计同时还可测量液体温度(量程 0~200).空气贮存在一个 8L 高压气 瓶内,初始压力约 6MPa. 气相压力由减压阀降低到 0.5MPa,然后与两个气流测控支路相 连,每个气流测控支路都有一个电磁阀和气体质量流量控制器. 气体质量流量控制器的量 程分别为 0~100SLM(标准状态下 L/min)和 0~10SLM,精度均为 1.5%全量程. 若气流 质量流量大于 10SLM,开启大流量支路测控气相流量,小流量支路关闭;反之,则开启小 流量支路测控气相流量,大流量支路关闭. 空气经实验段进入分离单元后,被从水中分离 出来,直接排入机舱. 整个实验过程由公用测控平台通过测控装置按预定程序进行自动控 制.

混合器为内、外套管构成,内管外径 8mm,在其周壁上均匀分布着 54 个直径 0.8mm 的小孔,空气由这些小孔沿径向进入在内、外管间流动着的水中,形成均匀的水/气混合 物,然后进入实验段.混合器外管和实验段截面形状相同,横截面积均为 12mm ×12mm. 实验段长 960mm.实验段外壁为铝制框架,内壁为透明有机玻璃以便观察内部流型.水/ 气两相流型用 Hi8 摄像机(SON Y CCD-TR705E)记录,观察范围长 150mm,起点距混合器 出口 640mm,快门速度设定为 1/4000s 以减小图像的模糊程度.距混合器出口 180mm 处 安装有绝压传感器(量程 0 ~ 300kPa)测量实验段内的绝对压力,两个差压传感器(量程 0 ~ 20kPa)分别安装在距混合器出口 300mm 和 810mm 处,传感器精度均为 0.25 %全量 程.两个差压传感器的参考端均连接在一个充满水的压力旁管上,后者通过安装在实验段 出口前 80mm 处的后向皮托管与实验段相连.这样,两个差压传感器的参考端压力将保持 与实验段出口静压相同,以避免在飞行实验中差压传感器发生严重过载.实验段内沿程压 降由两差压传感器输出信号相减得出.

### 2 实验结果

Table 1

此次失重飞行实验于 1999 年 7 月利用俄罗斯加加林航天员训练中心 IL-76 失重飞 机在莫斯科星城进行.针对失重飞行实验的具体特点,设计了如下实验程序以便进行实验 过程的自动测控:在飞机起飞前,由公用测控平台给实验装置供电,启动泵,利用调节阀人 工设置水相流量(实验中水流量将随系统阻力变化而略有改变);同时,测控装置自动进入 预热、自检及待命状态.气相流动为间断形式,即仅在失重阶段才打开气相回路.在飞行实 验过程时,测控装置根据公用测控平台发出的指令,打开或关闭相应气相支路中的电磁 阀,并在相关气体质量流量控制器上施加规定的电压,控制气相流量的大小.在 5 个架次 的飞行实验中,共获得 42 组实验数据(表 1).

Table 1 The experimental results of two phase gas inquid now at reduced gravity conditions									
序号	残余重力 a <sub>Y</sub> ,g	$U_{SG}$ , m/s	$U_{\rm SL}$ , m/ s	P, kPa	<i>t</i> ,	d p / d z, Pa/m	流型		
1.1	0.038	0.15	0.30	81	34.2	590	泡状流		
1.2	0.026	7.99	0.26	161	34.8	1855	环状流		
1.3	0.012	0.21	0.21	81	35.6	538	弹状流		
1.4	0.018	7.45	0.19	124	36.1	1223	环状流		
1.5	0.026	0.30	0.16	79	36.6	570	弹状流		
1.6	0.026	6.12	0.22	107	36.9	1184	弹-环状过度流		
1.7	0.023	0.42	0.19	80	37.4	671	弹状流		
1.8	0.030	4.86	0.19	97	38.2	929	弹-环状过度流		
1.9	0.028	0.57	0.28	82	38.5	713	弹状流		
1.10	0.018	3.56	0.25	97	38.6	914	弹-环状过度流		
1.11	0.017	0.77	0.25	83	38.9	926	弹状流		

表1 失重条件下气/液两相流实验结果

The experimental results of two-phase gas-liquid flow at reduced gravity conditions

(法主 1

							关我 1
序号	残余重力 a <sub>Y</sub> ,g	$U_{\rm SG},  {\rm m/s}$	$U_{\rm SL}$ , m/s	P, kPa	<i>t</i> ,	d p/d z, Pa/m	流型
1.12	0.026	2.67	0.24	91	39.3	949	弹-环状过度流
4.1	0.016	0.14	0.61	90	39.7	869	泡状流
4.2	0.019	6.52	0.49	204	40.0	3079	环状流
4.3	0.023	0.19	0.61	92	40.5	1022	泡状流
4.4	0.019	5.52	0.51	174	41.0	2875	环状流
4.5	0.011	0.27	0.58	89	41.5	980	泡状流
4.6	0.016	4.58	0.53	147	41.8	2460	弹-环状过度流
4.7	0.019	0.37	0.61	94	42.1	1427	泡状流
4.8	0.019	3.63	0.56	134	42.6	2814	弹-环状过度流
4.9	0.027	0.50	0.61	96	42.8	575	弹状流
4.10	0.022	2.85	0.57	125	43.2	2677	弹-环状过度流
6.1	0.017	0.13	0.82	97	43.7	1126	泡状流
6.2	0.012	6.47	0.54	209	44.0	3147	环状流
6.3	0.022	0.18	0.84	97	43.8	1191	泡状流
6.4	0.014	5.12	0.66	191	44.0	3304	弹-环状过度流
6.5	0.018	0.24	0.82	101	43.7	1462	泡状流
6.6	0.020	4.00	0.68	172	44.3	3224	弹-环状过度流
6.7	0.014	0.42	0.18	81	44.2	595	弹状流
6.8	0.012	3.67	0.60	134	43.4	2380	弹-环状过度流
6.9	0.009	0.48	0.79	100	44.0	1217	泡状流
6.10	0.024	2.86	0.62	125	44.2	2831	弹-环状过度流
6.11	0.015	0.61	0.81	108	44.4	2410	泡状流
6.12	0.018	1.96	0.76	129	44.9	3751	弹-环状过度流
7.1	0.009	0.12	1.06	103	34.2	1777	泡状流
7.2	0.024	4.30	0.79	284	36.2	_	环状流
9.1	0.021	0.15	0.49	88	37.4	1080	泡状流
9.2	0.035	6.01	0.43	187	38.3	2455	环状流
9.3	0.021	0.20	0.49	89	37.7	1235	泡状流
9.4	0.013	5.72	0.41	170	38.6	2164	弹-环状过度流
9.5	0.016	0.28	0.41	86	38.7	1107	泡状流
9.6	0.023	4.94	0.38	136	38.7	2139	弹-环状过度流





实验过程中,水相流量和温度、气 相流量、实验段内绝对压力和差压传感 器输出信号等,均由公用测控平台自动 采集,采样频率为4Hz.此外,由于实验 段内沿程压降是由两个差压信号相减 得出,为保证其测量精度,在失重飞行 过程中,对两个差压信号进行了同步采 集,采样频率为125Hz,并单独存储.为 减少测量数据的转换误差,所有信号均 直接记录相应传感器的电压输出结果, 实验结束后再对数据进行转换处理. 图 2 为一典型失重飞行过程中气、液两相表观流速及三轴残余重力加速度随时间的 变化情况(常重力条件相当于  $a_{Y}=1_{g},g=9.80665$ m/s<sup>2</sup>,为地面重力加速度).可以看到, 该失重过程持续时间约 23s,残余重力水平为 10<sup>-2</sup>g,其波动幅度与此量级相同(这是该实 验方法的最大缺陷).失重过程前半段由于重力场的剧烈变化及气相流量的加入,两相流 动处于暂态调整状态;后半段则处于相对稳定状态(图中以虚的竖线予以标示),其持续时 间约 9s(所有实验中稳定流动状态持续时间均不小于 8s).表 1 中所有数据均为该稳定状 态下相关测量数据的平均值,流型特征则依据相同时间段内的录像资料慢速回放确 定<sup>[7]</sup>.

# 3 比较与讨论

目前,气/液两相流压降预测模型基本上都是基于大量精心设计的、在地面常重力环 境中进行的两相流实验结果的经验模型,因此,其适用范围有限,能否成功预测微重力条 件下的气/液两相流摩擦压降,尚需要进行严格的检验.

均相模型是现有模型中最简单的.此类模型假设在两相流动中,气、液两相介质形成 为一种等效的均匀混合物,具有某种等效的密度 <sub>M</sub>、粘度 µ<sub>M</sub> 和速度 U<sub>M</sub>,因此,可以利用 单相流摩擦压降关系来计算相应的两相流摩擦压降 d<sub>p</sub>/d<sub>z</sub>(在失重条件下,摩擦压降直 接对应于管道内沿程压力损失),即

$$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}z} = \frac{2}{D} f_{\mathrm{M} \mathrm{M}} U_{\mathrm{M}}^2 \tag{1}$$

其中, f<sub>M</sub>为两相摩擦因子, 可以利用 Blasius 关系计算:

$$f_{\rm M} = C R e_{\rm M}^{\cdot n} \tag{2}$$

其中,  $Re_{M} = {}_{M} U_{M} D / \mu_{M}$ 为两相 Reynolds 数,参数 C 和 n 依赖于流动状态或两相 Reynolds 数的大小,即当流动为湍流( $Re_{M} \ge 2000$ )时, C = 0.079, n = 0.25; 流动为层流 时, C = 16, n = 1.

根据 Dukler *et al*<sup>[8]</sup>的建议,混合物等效 密度  $M^{1} = x G^{1} + (1 - x) L^{1}$ ,粘度  $\mu_{M} = M^{(x\mu_{G'} - G} + (1 - x) \mu_{L'} L^{)}$ ,速度  $U_{M} = M^{10^{3}}$  $U_{SG} + U_{SL}$ ,其中 x 为干度(即气相介质的质 量分数),下标 L、G和 S 分别代表液相、气相

图 3 给出了均相模型预测结果与实验数 据的比较,二者的符合程度较差,平均误差超 过 30 %.一般地说,该模型预测结果普遍偏 低,尤其是对泡状流和弹状流.这在某种意义 上验证了 Chen *et al*<sup>[9]</sup>的结论,即失重条件下 气/液两相流摩擦压降一般要比常重力水平 流动时大.图 3 中还反映出一个有趣的现象,





即对于和均相模型基本假设偏离最大的环状流 其预测结果与实验数据反而有着相当好 的一致性. Abdollahian 等<sup>\*</sup> 也曾发现,均相模型能很好地预测利用 R114 为工质进行的失 重条件下汽/液两相流实验中测量到的两相流压降.该实验没有同时对流型进行观测,不 过,由质量流率与加热功率可估算其大致位于环状流区,因此,本文的结论和 Abdollahian 等 是一致的. 但是, Zhao & Rezkallah<sup>[10]</sup>失重条件下的水/气两相流实验并不支持上述结 论.

另一种常用的摩擦压降预测模型为 Lockhart Martinelli-Chisholm 模型 (Chisholm, 1983). 该模型利用摩擦乘子  $\frac{2}{L} = (d_p/d_z)/(d_p/d_z)_L$  将气/液两相摩擦压降表示为 Martinelli 参数  $X^2 = (d p/d z)_L/(d p/d z)_G$ 的函数:



#### 失重实验数据与 Lockhart-Martinelli-Chisholm 图 4 模型的比较

 $^{2}_{L} = 1 + C/X + 1/X^{2}$ (3)

> 其中.经验参数 C 依赖于气、液两相流动 状态,例如,气、液两相均为湍流时 C =20.气、液两相均为层流时 C = 5.其它流 动状态经验参数 C的数值则处于上述范 围内. 出现在摩擦乘子和 Martinelli 参数 中的 $(d_p/d_z)_L$ 和 $(d_p/d_z)_G$ 为相同流量 的液体或气体单独流过管道时的摩擦压 降.图4比较了失重条件下气/液两相流 摩擦压降实验数据与 Lockhart-Martinelli-Chisholm 模型的预测结果, 二者差别相当 明显,说明该模型不能适用于失重条件下 的两相流动.这和 Abdollahian 等 及 Zhao & Rezkallah<sup>[10]</sup>是一致的,不过.这里实验 数据的分散程度更大.

Friedel (1979) 模型是目前唯一考虑 了重力和表面张力等因素对两相流动摩擦压降影响的经验模型:

$${}^{2}_{L_{0}} = E + \frac{3.24 FH}{Fr^{0.045} Wa^{0.035}}$$
(4)

其中,  $E = (1 - x)^2 + x^2 \frac{Lf \omega}{Gf_{L0}}, F = x^{0.78}(1 - x)^{0.24}, Fr = \frac{G^2}{gD_M}, We = \frac{G^2 D}{M}, H =$  $\left( \begin{array}{c} -L \\ -L \\ -L \\ -L \end{array} \right)^{0.91} \left( \begin{array}{c} \mu_G \\ \mu_L \end{array} \right)^{0.19} \left( 1 - \frac{\mu_G}{\mu_L} \right)^{0.7}, x$ 为干度,  $f_{\omega} \ln f_{L0}$ 为质量流速等于气/液两相总质量流 速 $G = _{G}U_{SG} + _{L}U_{SL}$ 的单相气体或液体流过管道时的摩擦因子.

Friedel 模型对重力作用的归纳,同样只是基于地面常重力实验结果,因此,该模型对 失重条件下的两相流动是否适用仍然有待检验.图5比较了失重条件下气/液两相流压降 实验数据与 Friedel 模型的预测结果,其误差仍很明显,不过,相对而言, Friedel 模型的预

Fig. 4 Comparison of two-phase pressure drop at reduced gravity conditions with Lockhart-Martinelli-Chisholm s model

Abdollahian D, Quintal J, Barez F, et al. Study of critical heat flux and two-phase pressure drop under reducedgravity. NASA CR 198516, 1996

测 与 本 次 实 验 的 符 合 程 度 最 好. Abdollahian 等 和 Zhao & Rezkallah<sup>[10]</sup> 也曾得到类似结论.

## 4 结论

本文利用俄罗斯 IL-76 失重飞机对 失重条件下方形截面管道内的水/气两相 流进行了实验研究,测量了相应条件下气 /液两相流压降.微重力气/液两相流压降 的实测结果与目前常用的基于地面常重 力实验结果的两相流压降预测模型(均相 模型、Lockhart-Martinelli-Chisholm 模型 和 Friedel 模型)的详细比较表明,均相模





型和 Lockhart-Martinelli-Chisholm 模型与实验结果间存在很大的差异,无法给出令人满意的预测结果;相对而言,Friedel 模型与实验结果符合最好,可以用来对微重力气/液两相流压降进行初步预估.上述结论和 Abdollahian 等 及 Zhao & Rezkallah<sup>[10]</sup>基本上是一致的.这样,可以采用 Friedel 模型对微重力气/液两相流压降进行初步预估.不过,Friedel 模型的预测误差仍然很明显,这说明其在微重力条件下的适用性也难以令人满意.

需要说明的是,上述模型都是基于大量地面常重力实验结果总结出来的经验或半经验的关联式,在不同流动情况下即使对常重力环境中的两相流动也不可避免地存在有较大偏差.因此,将其推广应用到失重条件下的两相流动时偏差的存在在所难免.只有采用具有明确物理意义的分析方法,并结合不同重力条件下的气/液两相流实验结果,才能获得具有普适意义的、更为精确的压降预测模型.这将是今后微重力气/液两相流研究的一个重要方向.

### 参考文献

- [1] 赵建福. 微重力条件下气/ 液两相流流型研究进展[J]. 力学进展,1999,29(3):369~382
- [2] Zhao J F, Xie J C, Lin H, et al. Experimental study of two-phase flow in microgravity [A]. In: 51<sup>st</sup> International Astronautical Congress [C]. Rio de Janeiro, Brazil, 2000
- [3] Reinarts T R, Ungar E K, Butler C D. Adiabatic two-phase pressure drop in microgravity: TEMP2A 3 flight experiment measurements and comparison with predictions [A]. In: 33<sup>rd</sup> Aerospace Sciences Meeting and Exhibit [C]. Reno, NV, USA, 1995
- [4] Reinarts T R, Ochterbeck J, Lebaigue O, et al. A review of flow regimes, pressure drops, convective boiling, and condensation in microgravity environments [A]. In: 31<sup>st</sup> AIAA Thermophysics Conference [C]. New Orleans, LA, USA, 1996
- [5] Mc Quillen J, Colin C, Fabre J. Ground-based gas liquid flow research in microgravity conditions: state of knowledge
  [J]. Space Forum, 1998, 3: 165 ~ 203
- [6] Wolk G, Dreyer M, Rath HJ. Investigation on two-phase flow in small diameter non-circular channels under low and

### 见第 378 页脚注

379

7

normal gravity [A]. In: Space Technology & Applications International Forum 1999 [C]. Albuquerque, NM. USA,1999

- [7] 赵建福,林海,解京昌,等.失重飞机搭载气/液两相流实验研究[J].空间科学学报,2000,20(4):340~347
- [8] Dukler A E, Wicks M, Cleveland R D. Frictional pressure drops in two-phase flow: B. An approach through similarity analysis [J]. AIChEJ, 1964, 10(1): 44 ~ 51
- [9] Chen I Y, Downing R S, Keshock E, et al. Measurements and correlation of two-phase pressure drop under microgravity conditions [J]. J Thermophy & Heat Transfer, 1991, 5: 514 ~ 523
- [10] Zhao L , Rezkallah K S. Pressure drop in gas liquid flow at microgravity conditions [J]. Int J Multiphase Flow , 1995, 21: 836~849

# Experimental Study on Pressure Drop of Two-phase Gas-liquid Flowat Microgravity Conditions

ZHAO Jianfu<sup>1</sup>, L IN Hai<sup>1</sup>, XIE Jingchang<sup>1</sup>, HU Wenrui<sup>1</sup> L  $\Gamma$ Congmin<sup>2</sup>, ZHAN G Yuhan<sup>2</sup>

National Microgravity Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences. Beijing 100080;
 Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences. Beijing 100080)

Abstract : Experimental studies have been performed on the board of Russian IL-76 reduced gravity airplane for two-phase air-water pressure drops in a square cross-section channel. Some widely used models, such as the homogenous, Lockhart-Martinelli-Chisholm and Friedel models, which are built on a foundation of a large empirical database developed with the aid of numerous meticulous experiments on Earth, are evaluated using the present experimental data. It is found that very large differences exist between the experimental data and the predictions of the homogenous model and the Lockhart-Martinelli-Chisholm model, while the Friedel model provides the best agreement with the experimental data among these models, although an obvious error still exists. Thus the Friedel model can be used to estimate preliminarily the two-phase pressure drops at microgravity conditions. A more accurate model should be developed based on a more physical analysis and a large empirical database developed with the aid of numerous meticulous experiments at normal and reduced gravity conditions.

Keywords: microgravity, two-phase gas-liquid flow, pressure drop, non-circular cross-section