

微重力环境下半球形贮箱液体 重定位试验研究

顾 方

(航空航天部北京强度与环境研究所)

摘 要

本文利用落塔形成的微重力环境,对半球形贮箱中液体重定位问题进行了试验研究。所用液体与半球形箱壁之间的接触角为零并在加载前形成了失重初始凹液面。本试验分侧向不加干扰及加干扰两种初始条件。通过高速摄影机观察了液体重定位的全过程并测量了重定位流速和重定位时间。试验结果表明,液体重定位呈壁流流型。实测重定位时间与理论估算值一致。

关键词 微重力环境,液体重定位,落塔试验

一、引 言

在发射同步卫星过程中,为保证其正常入轨要求星上远地点发动机进行多次点火。在远地点发动机两次点火之间卫星保持惯性滑行姿态,此时卫星贮箱内液体推进剂处于失重环境中。当远地点发动机再点火时推进剂将在贮箱内重新定位。推进剂重定位过程中液体的流型、流速及沉底时间直接影响到贮箱内液体管理系统能否正常工作。因此,对微重力环境下液体重定位的试验和研究是一个关系到卫星远地点发动机再点火成功与否的重要课题。

对微重力环境下液体重定位现象的分析,一般采用缩比模型在地面上创造的微重力环境中进行模拟试验和研究,然后通过相似准则将模型试验中的现象和数据反推到原型上而获得的。文献[1—5]报道了有关的试验方法。大体上分为两类:

1. 飞机微重力飞行试验^[1,2]

飞机作为一种微重力试验手段,是使其飞“抛物线曲线”轨迹而创造微重力环境。飞机试验微重力时间较长,但试验初始条件难以控制,且成本高周期长。

2. 落塔微重力试验^[3-5]

落塔微重力试验是利用物体自由下落时(略去空气阻力)处于失重状态的原理创造微重力环境。落塔试验微重力时间虽短(一般数秒钟),但其初始条件易保证,且成本低周期短,目前国内外微重力试验大都采用落塔方法。

由于设备所限国内此方面研究尚不多见。国外研究较多,但大都围绕圆柱型贮箱进

行试验研究。本文根据我国卫星型号的具体需要,利用我所动力试验铁塔,对半球形贮箱中液体重定位问题进行了落塔试验研究。试验结果表明,贮箱内液体重定位呈壁流型,实测重定位时间与工程估算值一致。

二、试验设备与方法

1. 相似准则

由量纲分析可知,与液体重定位有关的三个无量纲参数是

$$\text{佛罗德数} \quad F_r = \frac{v}{\sqrt{AR}}, \quad (1)$$

$$\text{帮德数} \quad B_0 = \frac{\rho AR^2}{\sigma}, \quad (2)$$

$$\text{雷诺数} \quad R_e = \frac{\rho v R}{\mu}. \quad (3)$$

式中 A 为液体加速度 cm/s^2 ; v 为液体速度 cm/s ; R 为贮箱特征尺寸、贮箱半径 cm ; ρ 为液体密度 gm/cm^3 ; σ 为液体表面张力 dynes/cm ; μ 为液体动力粘度 cp 。

对于液体大幅运动, F_r 数与 B_0 数、 R_e 数有关。但由文献[6]可知,对于任何液体推进剂重定位问题,当 $B_0 > 10$ 、 $R_e > 50$ 时, F_r 数与 B_0 数、 R_e 数无关,相似关系仅取决于 F_r 数,即

$$F_{r_p} = F_{r_m}, \quad (4)$$

$$\text{代入得} \quad t_p = t_m \sqrt{\frac{A_m R_p}{A_p R_m}}. \quad (5)$$

式中脚标 p 代表原型,脚标 m 代表模型。

式(5)给出了原型与模型之间的时间模拟关系,称为 F_r 数相似准则。通过该准则模型试验得到的液体运动规律便与实际贮箱中推进剂运动规律建立了模拟对应关系。

2. 模型贮箱与液体参数

半球形模型贮箱尺寸与图形见图1。其形状与原型贮箱上箱几何相似,模型与原型之间各种缩比关系列于表1。在选择试验液体时主要考虑两方面问题,一是选择液体物理参数使 B_0 数与 R_e 数尽量大些从而满足相似条件;二是所选液体与有机玻璃模型贮箱有较好相容性。基于以上两点,本试验选用蒸馏水为试验液体,液体参数见表2。

3. 落塔试验设备与试验方法

落塔试验设备由落塔、外舱(防阻力舱)、内舱(试验舱)、释放机构、缓冲回收系统、试

表1 落塔试验缩比关系

Table 1 Scales for drop tower

R_p/R_m	R_p (cm)	R_m (cm)	A_m/A_p	A_p (g_0)	A_m (g_0)	t_p/t_m	t_m (s)	t_p (s)
7	52.5	7.5	1.6	0.010	0.016	3.35	1.60	5.36

表 2 试验液体参数

Table 2 Test liquid parameters

液体名称	ρ (gm/cm^3)	σ (dynes/cm)	μ (cp)	A (g_0)	R (cm)	B_0	R_e
蒸馏水	1.00	72.90	1.0	0.016	7.5	12.10	1.37×10^4

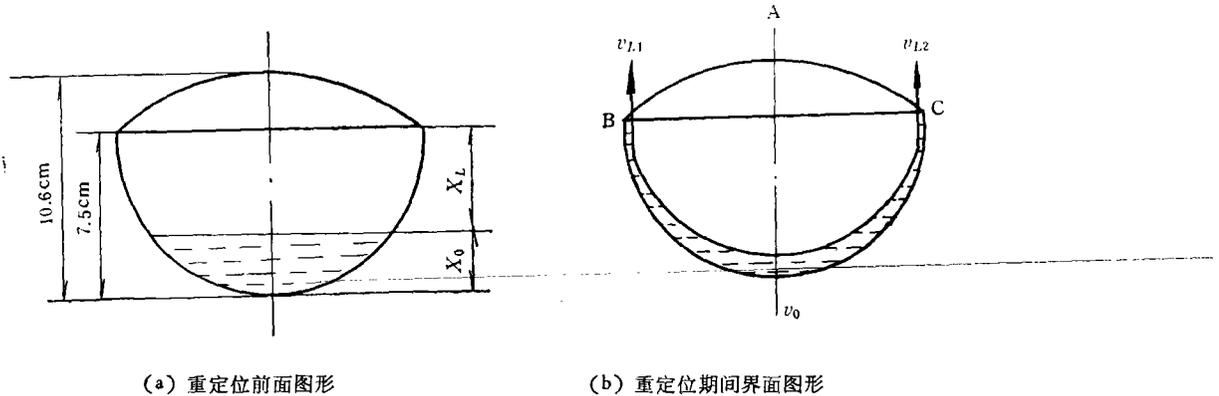


图 1 模型贮箱与重定位图形

Fig. 1 The model tank and interface profile during reorientation

验程序控制与测量系统组成,见图 2。

落塔利用振动特性试验塔,可用落高约为 37 米。外舱主要作用是承受下落时的空气阻力,内舱在外舱中自由下落,因内外舱之间相对速度很小可以忽略空气阻力,故内舱接近失重或微重状态。内舱装有模型贮箱、光源、摄影机、轴向喷气推力系统(产生轴向微重力)、侧向弹簧干扰系统(产生侧向初始干扰)。释放机构采用 GG 3-6 A 型挂弹钩,试验表明其解锁释放平稳,对液面无干扰。缓冲回收系统对下落舱体进行减速回收,经试验研究选定比重 0.1、目数 30 的聚苯乙烯球为缓冲材料,其缓冲减速度峰值小于 60 g_0 。程序控制与测量系统用来自动控制试验过程,如灯光开启、摄影机启动、释放、喷气加载等,并对试验全过程及内外舱过载环境等做实时监测,液体重定位全过程通过 S-16B 型摄影机连续拍摄记录,然后冲印放大进行分析研究。试验流程见图 3。

4. 初始条件与试验控制程序

在轨道上远地点发动机再点火前卫星处于惯性滑行阶段,即处于微重状态。此时推

表 3 试验控制程序

Table 3 Test control procedure

程序内容	开始时间 (s)
接通光源启动摄影机	-0.8
释放钩解锁	0.0
轴向加载或双向加载	0.2
切断一切电源	2.5

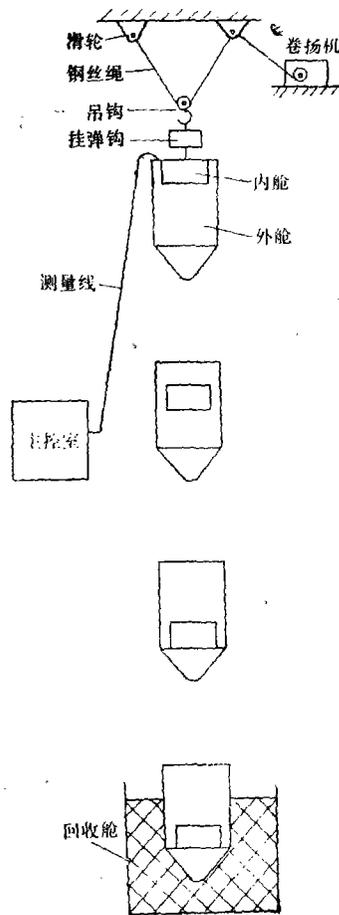


图 2 落塔试验示意图

Fig. 2 The illustrated instruction for drop tower

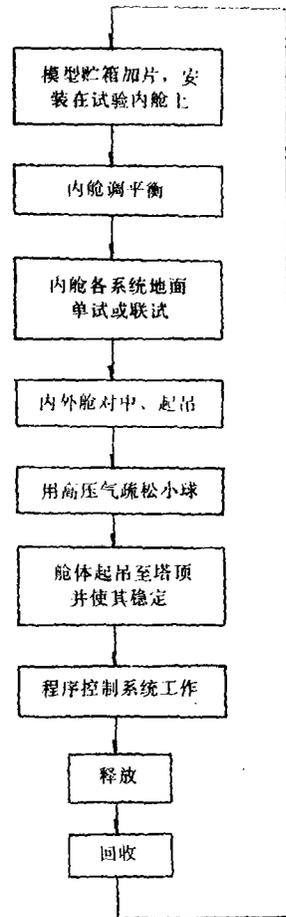


图 3 落塔试验流程

Fig. 3 The technological process for drop tower

进剂液/气界面呈微重力环境下静平衡形状。落塔试验中为了模拟这一初始条件,控制程序中采用了延迟加载方法,即释放后延迟 0.2 秒喷气加载使液/气界面略呈凹曲从而近似满足初始条件。试验控制程序见表 3。

三、试验结果与分析

本试验共进行两种工况,充液量均为整球容积的 8%。工况 1 过载环境为轴向连续加载 $0.016 g_0$, 侧向无初始干扰;工况 2 轴向加载情况同前而侧向有初始干扰。两种工况液体重定位照片分别见图 4、图 5。

1. 重定位流型

从试验结果重定位照片图 4、图 5 可见,无论侧向是否有初始干扰,液体重定位过程都是典型的壁流流型,与文献 [3,4] 所述一致。当侧向无初始干扰时,由于推力过载是轴

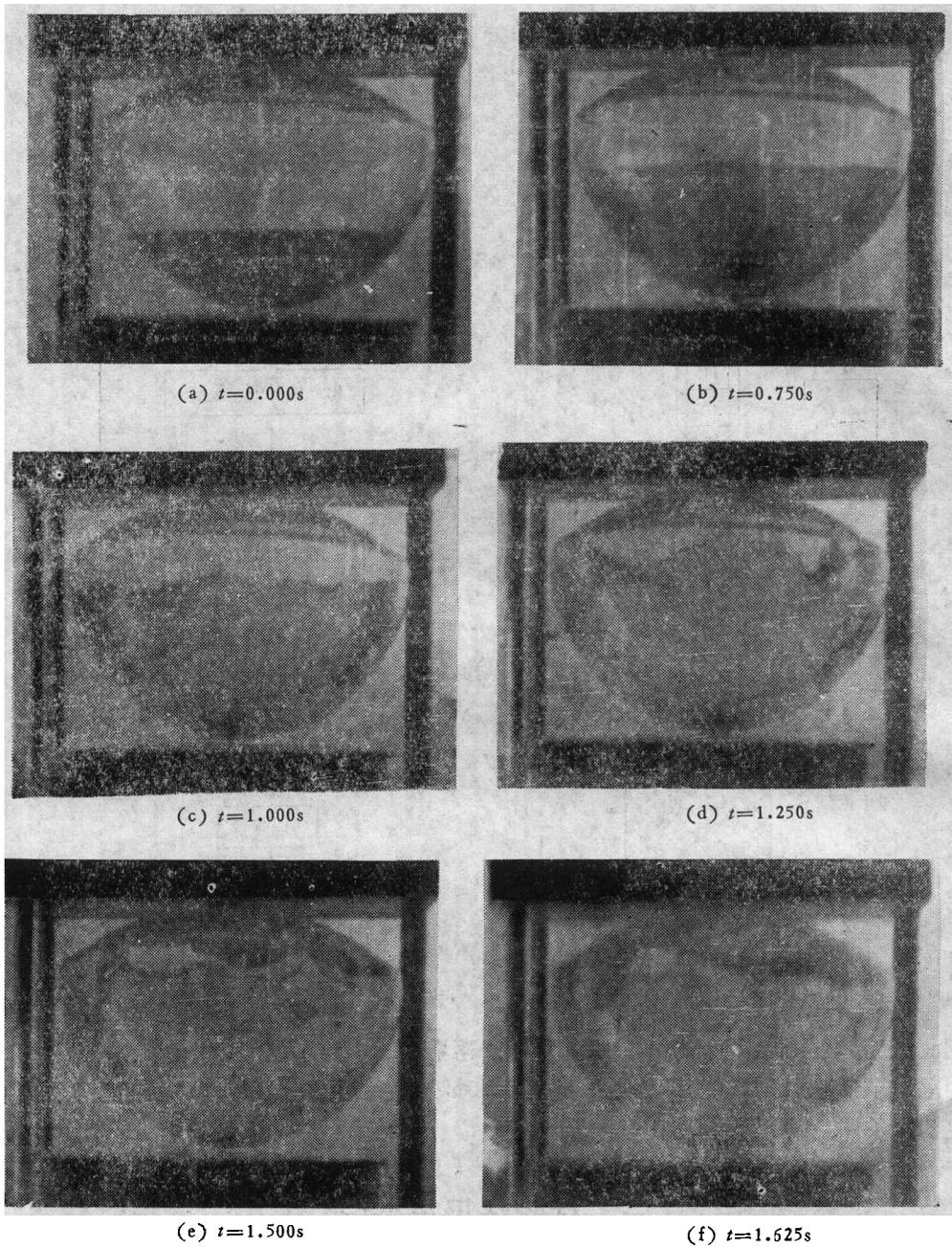


图4 工况1重定位图形

Fig. 4 Liquid reorientation of test 1

对称的,因此液体重定位呈轴对称壁流流型(图4);当侧向有初始干扰时,推力过载为非轴对称,故液体重定位呈非轴对称壁流流型(图5)。

工况1液体重定位过程:释放后0.2秒时液面略呈凹曲(图4(a)),轴向开始加载,液面轴对称沿箱壁上爬,凹曲逐渐明显(图4(b)、(c)),直至液体前缘与箱底(图1中B、C点)碰撞(图4(d)),此后一部分液体在此聚集而另一部分液体继续向前扩展最后

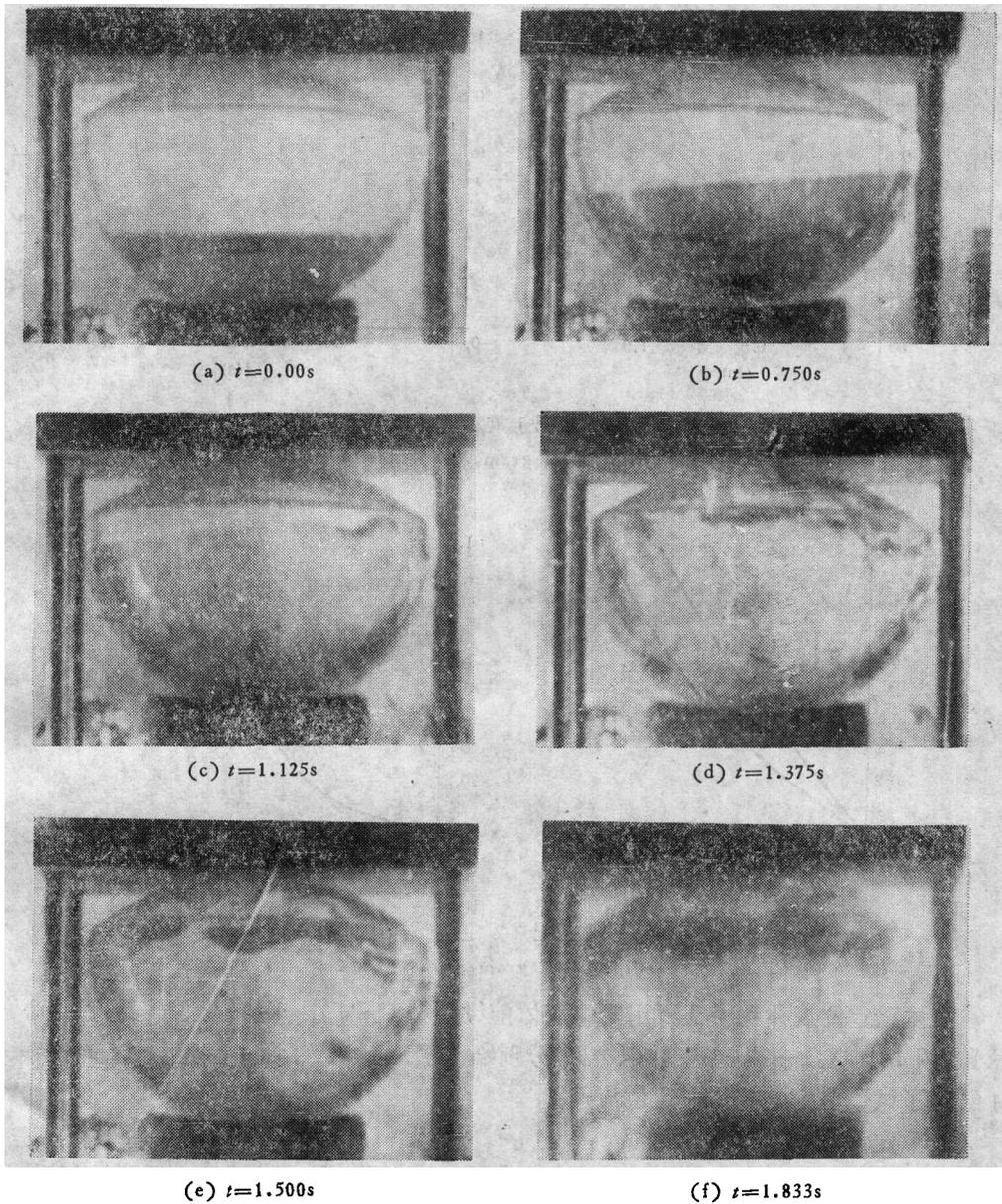


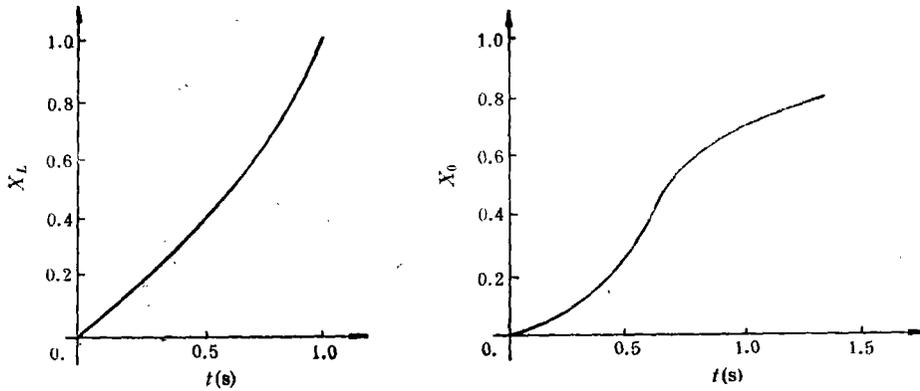
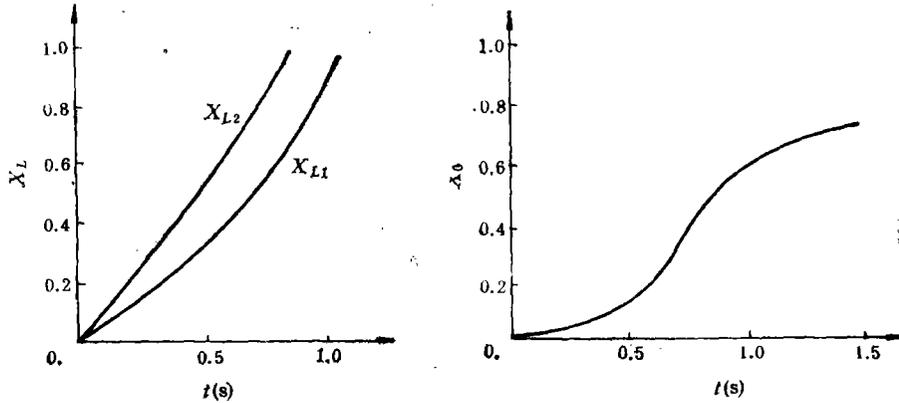
图 5 工况 2 重定位图形

Fig. 5 Liquid reorientation of test 2

在箱底中心出流口(图 1 中 A 点)聚集(图 4 (e))。

工况 2 液体重定位过程: 释放后 0.2 秒时液面略呈凹曲(图 5 (a)), 轴向加载与侧向干扰同时开始, 液体一侧快、另一侧慢非轴对称沿箱壁上爬(图 5 (b)), 直至一侧液体前缘与箱底碰撞(图 5 (c)), 然后另一侧液体前缘与箱底碰撞(图 5 (d)), 最后液体在箱底中心出流口聚集(图 5 (e))。

2. 重定位流速

图 6 工况 1 重定位 $X-t$ 曲线Fig. 6 Diagram $X-t$ of test 1图 7 工况 2 重定位 $X-t$ 曲线Fig. 7 Diagram $X-t$ of test 2

液体重定位规律和特征可用两侧液体前缘位置(图 1 中 X_L)及液/气界面中心顶点位置(图 1 中 X_0)来描述。图 6、图 7 分别给出了工况 1、工况 2 重定位 $X-t$ 曲线。表 4 给出了试验测定的液体重定位流速。

3. 重定位时间

对于本试验模型贮箱液体重定位问题,有三个时间常数对设计非常重要:(1)液体前缘与箱底(图 1 中 B、C 点)碰撞时间 t_1 ; (2)液体前缘到达箱底中心出口(图 1 中 A 点)的时间 t_2 ; (3)液体全部重定位箱底新平衡位置的时间 t_3 。由于落塔试验微重模拟时间较短,所以 t_1, t_2 可由试验实测得到,而 t_3 则用工程估算得到。

由模型贮箱实测的重定位时间可通过 F_r 数相似准则式(5)推出原型贮箱相应的重定位时间。表 5 给出了模型与原型的重定位时间。对于实际贮箱中液体推进剂重定位,其液体前缘到达箱底中心出口时间 t_2 的工程估算值 $t_2 = 4.14 s^*$,这与落塔试验实测值 $t_2 = 4.355 s$ 比较一致。

* 李本儒、郭树玲,航空航天部五〇二所资料室,1985。

表 4 重定位液体流速

Table 4 Liquid reorientation velocities

时间 (s) \ 流速	工 况 1		工 况 2		
	$v_{L_1} = v_{L_2}$ (cm/s)	V_0 (cm/s)	V_{L_1} (cm/s)	V_{L_2} (cm/s)	V_0 (cm/s)
0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.050	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00
0.175	2.74	0.00	2.49	4.73	0.00
0.300	2.99	1.74	2.24	4.98	0.25
0.425	3.23	1.99	2.24	3.73	1.49
0.550	3.48	1.74	2.99	4.23	2.49
0.675	3.73	5.47	3.98	4.48	4.98
0.800	4.23	4.98	4.48	4.98	3.73
0.925	5.72	2.24	4.98	6.97*	2.49
1.050	7.96*	1.24	5.47		1.24
1.175		1.24	5.72*		1.24
1.300		1.00			1.00

注: 带*号数值为液体前缘碰底速度。

表 5 液体重定位时间

Table 5 Liquid reorientation times

重定位时间 (s)	工 况 1		工 况 2	
	模 型	原 型	模 型	原 型
前缘到底时间 t_1	1.050	3.518	0.925	3.099
前缘到出口时间 t_2	1.300	4.355	1.300	4.355

四、结 论

1. 对两种试验工况, 液体重定位均为典型的壁流流型。轴向加载侧向无干扰时液体重定位呈轴对称壁流流型; 轴向加载侧向有干扰时液体重定位呈非轴对称壁流流型。

2. 液体重定位前缘到达箱底中心出口时间为 4.355 秒, 与工程估算值 4.14 秒基本一致。

参 考 文 献

- [1] Tegart, J. R., ZGTP-001, 1978.
- [2] 褚桂敏, 强度与环境, 第 2 卷, 1977.
- [3] Salzman, J. A. and W. J. Masica, N73-16252, 1973.
- [4] Tegart, J. R., AIAA 75-1195, 1975.
- [5] Labus, T. L. and W. J. Masica, NASA TMX-1659, 1968.
- [6] Berry, R. L., L. J. Demchak and J. R. Tegart, N83-30515, 1983.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF LIQUID REORIENTATION IN SEMISPHERES UNDER MICROGRAVITY CONDITIONS

Gu Fang

(Beijing Institute of Structure and Environment)

Abstract

An experimental investigation of liquid reorientation in semispherical container by means of microgravity accelerations is conducted in a drop tower. The liquid used has zero-degree-static-contact angles on the semispherical container and is exposed to an initially concave interface in a zero- g environment before thrust. The study is conducted at two initial conditions, with and without an initial pulse. Liquid reorientation is observed by means of a high-speed camera. Reorientation flow velocity and time are measured. The results of this study indicate that liquid reorientate along the container wall and the reorientation time measured is consistent with theoretical estimation.

Key words Microgravity, Liquid reorientation, Drop tower test