

## 两层流体热毛细对流空间实验研究\*

周炳红 刘秋生 胡良 姚永龙 胡文瑞

(中国科学院力学研究所国家微重力实验室, 北京 100080)

**摘要** 1999 年, 在我国实践 5 号卫星上完成了两层流体空间实验, 实验研究两层不相混合流体的纯 Marangoni 对流(温度梯度与界面垂直)与热毛细对流(温度梯度方向与流体界面平行). 前者存在发生 Marangoni 对流的最小临界温差值  $\Delta T_c$ , 低于该值流体系统处于静止状态; 后者中只要存在沿界面的温度梯度便会产生热毛细对流. 空间实验采用石蜡和氟化液两层流体新体系, 实现了平整的液-液交界面, 并从卫星上传回上万幅数字图像. 通过多幅图像叠加处理得到了定量的流速场. 数值模拟计算分析了相应工况时对流流动的速度场, 两者的流场结构和速度大小基本一致, 实验验证了理论模型.

**关键词** 微重力流体 两层流 空间实验 热毛细对流 数值模拟

多层流体流动及界面现象是自然界和工程技术中普遍存在的物理现象. 在微重力环境中, 由于重力引起的浮力效应的极大减小, 流体自由面或界面的表面驱动对流成为主要现象. 在非均匀温度场中的多层流体热毛细对流涉及具有流体界面效应的较复杂传热传质现象, 同时也涉及许多工程技术中的流体力学问题<sup>[1]</sup>. Metz 等人<sup>[2]</sup>于 1962 年提出了液体覆盖技术用于 Czochralski 晶体生长方法(简称 LEC 方法). 为了避免某些晶体材料中挥发性成分的挥发, Johnson<sup>[3]</sup>于 1975 年提出一种加有一层覆盖液体的液桥方法(LEFZ 方法), 采用在三氧化二硼液体的包裹下地面生长砷化镓半导体材料(GaAs). 1987 年, Barocela<sup>[4]</sup>等人建议在太空(微重力环境)中采用该方法生长砷化镓. 在上述材料生长过程中, 存在两种典型的两层流体热对流运动形式: Marangoni 对流和热毛细对流. 前者的外加温度梯度垂直于流体界面, 涉及经典的 Marangoni-Benard 对流稳定性问题; 后者中与流体表面或界面平行的外加温度梯度场引起较强的热毛细力驱动流, 其流动和非稳态特征是近些年来研究热点. 由于多层流体比单层流体的对流问题复杂且具有更丰富的内涵, 人们尚需对多层流体内部的 Marangoni 对流和热毛细对流现象进一步的认识.

近十年来人们开始从理论和实验两方面研究多层流体系统的传热传质规律, 重点研究不同物理和几何参数下多层流的热对流及其不稳定性. Liu 等人<sup>[5]</sup>用数值模拟的方法分析并探讨了覆盖液体层对被覆盖液体的动力控制特性. Liu 等人<sup>[6]</sup>应用线性稳定性理论, 分析了不相混两层流体系统在两种不同加热方式下的对流不稳定性特征, 给出了临界稳定性判据(中性曲线). Legros 等人在 20 世纪 70 年代初和 90 年代末进行了单层液体(气-液) Marangoni-Benard 对流和多层热毛细对流空间实验, 实验结果与理论预测基本相符, 但实验未能观察到振荡对流现象<sup>[7,8]</sup>. 从 1996 年开始, 我国对空间多层流体热毛细对流和 Marangoni 对流实验进行了充分

2000-10-13 收稿, 2001-08-01 收修改稿

\* 国家科学技术委员会攀登预选项目(批准号: 95-Yu-34)和国家自然科学基金资助项目(批准号: 19789201)

的实验准备和理论模型研究<sup>[9,10]</sup>, 并于 1999 年 5 月搭载实践 5 号卫星成功完成两层流体空间实验. 实验采用石蜡和氟化液组成的两层流体新体系, 在轨熔化固态石蜡, 获得了平整的液-液交界面, 所观察到的石蜡空间实验熔化过程与微重力传热理论模型相符<sup>[11]</sup>. 多层热毛细对流实验研究难度大, 空间实验费用昂贵, 目前人们只能通过实验观察对流运动的一些基本典型特征, 对其进行深入的研究还主要靠理论分析和数值模拟计算.

## 1 物理模型和数学描述

考虑填充在封闭矩形池内的两层不相混合、不可压缩的粘性流体系统模型. 分别在矩形液池的两相对边壁上保持不同的恒定温度, 可形成外加温度梯度与流体界面垂直(对应于空间实验装置的 A 液池), 此时底固壁面为高温  $T_h$ , 上固壁为低温  $T_c$ , 形成垂直于界面方向温度差  $\Delta T$ ; 和外加温度梯度与流体界面平行(对应于空间实验的 B 液池), 此时右侧壁为高温  $T_h$ , 左侧壁为低温  $T_c$ , 外加温差值是  $\Delta T = T_h - T_c$ <sup>[9]</sup>.

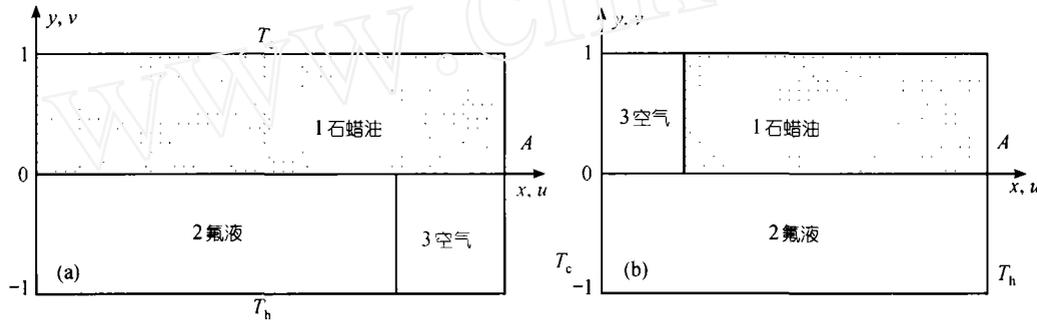


图 1 考虑气泡影响的两不同加热方式下两层流体系统理论模型图

(a) A 液池: 温度梯度与流体界面垂直; (b) B 液池: 温度梯度与流体界面平行

实践 5 号空间流体实验体系中出现了气泡, 根据实验观测和流场图像分析, 可以把气-液界面近似成平的和不变形的. 考虑气泡影响后的简化计算模型如图 1 所示. 由于引起对流的是表面张力梯度, 而不是表面张力, 因而, 这种近似只对表面张力产生比较大的影响, 却可以较好地反映表面张力梯度的作用, 保留了该系统的主要特征. 在本文中, 所有固壁处均被假设为不滑移动力学边界条件. A 和 B 液池中的加热边壁被考虑为等温热边界条件, 而其他非加热壁面被认为是绝热的. 液-液交界面上和自由面(气-液交界面)上的表面(界面)张力被认为是温度的线性变化函数:  $\sigma = \sigma_0 - \gamma(T - T_0)$ , 其中  $T_0 = (T_c + T_h)/2$  和  $\gamma = -\partial\sigma/\partial T$ . 矩形液池的长宽比定义为  $A = L/H_2$ .

不考虑重力效应( $g = 0$ )的定常二维多层不可压缩流体的 Navier-Stokes 方程组和能量控制方程的无量纲化形式可写为

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

$$V_i \cdot \nabla V_i = -C^{\rho_i} \nabla p_i + C^{\nu_i} \nabla^2 V_i, \quad (2)$$

$$V_i \cdot \nabla \theta_i = C_i^{\alpha} \nabla^2 \theta_i, \quad (3)$$

其中  $i = 1$  对应于上层流体,  $i = 2$  对应于下层流体(以在地面重力条件下的自然分层为准),  $i = 3$  对应于气体.  $V_i = (u_i, v_i, 0)$  为无量纲速度变量,  $\theta_i = (T_i - T_c)L/\Delta T \cdot H_2$  为无量纲温度,  $p_i$  为无量纲

压力. 方程里的定常系数  $C_i^p$ ,  $C_i^v$  和  $C_i^a$  代表控制方程中的无量纲系数, 它们决定于所选取的量纲参量. 当选取  $\alpha_2/H_2$ ,  $H_2^2/\alpha_2$ ,  $H_2$  和  $\Delta T \cdot H_2/L$  为速度、时间、长度和温度的无量纲化尺度后, 上述系数分别等于如下值:

$$C^{\rho_1} = \rho_2 / \rho_1, \quad C^{v_1} = Prv_1 / v_2, \quad C^{a_1} = \alpha_1 / \alpha_2,$$

$$C^{\rho_2} = 1, \quad C^{v_2} = Pr, \quad C^{a_2} = 1,$$

$$C^{\rho_3} = \rho_2 / \rho_3, \quad C^{v_3} = Prv_3 / v_2, \quad C^{a_3} = \alpha_3 / \alpha_2,$$

其中  $Pr = v_2/\alpha_2$  为对应于流体-2 的 Prandtl 数.

根据以上对边界条件的简化和定义, 并考虑两流体界面处的动力学和传热平衡关系式, 便可得到所要处理问题的全部动力学和热边界条件:

(i) 位于两侧边壁 ( $x = 0$  和  $x = A$ ):

$$u_i = v_i = 0, \quad (4)$$

$$\partial \phi_i / \partial x = 0 \text{ (A 液池)}, \quad (5a)$$

$$\theta_i = 0 \text{ (} x = 0 \text{)}, \quad \theta_i = A \text{ (} x = A \text{)} \text{ (B 液池)}. \quad (5b)$$

(ii) 位于上下壁面 ( $y = -1$  和  $y = 1$ ):

$$u_i = v_i = 0, \quad (6)$$

$$\theta_i = A \text{ (} y = -1 \text{)}, \quad \theta_i = 0 \text{ (} y = 1 \text{)} \text{ (A 液池)}, \quad (7a)$$

$$\partial \theta_i / \partial y = 0 \text{ (B 液池)}. \quad (7b)$$

(iii) 位于两流体间界面处:

各界面处的平衡关系式的推导过程完全相同, 这里仅列出液体 1-液体 2 界面 ( $y = 0$ ) 的边界条件, 至于 1-3, 2-3 界面之间的连接条件可以类似地进行推导:

$$u_1 = u_2, \quad (8)$$

$$v_1 = v_2 = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial y} - \mu^* \frac{\partial u_1}{\partial y} = -Ma \frac{\partial \theta_2}{\partial x}, \quad (10)$$

$$\chi^* \frac{\partial \theta_1}{\partial y} = \frac{\partial \theta_2}{\partial y}, \quad (11)$$

$$\theta_1 = \theta_2, \quad (12)$$

其中(8)式为切向速度连续性条件, (9)式为界面平直性假设, (10)式表示界面切向应力平衡条件, (11)和(12)式分别表示界面上的能量守恒和温度连续. 式中 Marangoni 数定义如下:

$$Ma = \gamma \delta T H_2^2 / \mu_2 \alpha_2 L,$$

其中  $\gamma$  表示流体 1 和 2 交界处的表面张力温度系数. (11)式中的  $\chi^* = \chi_1 / \chi_2$  表示两流体的热传导系数之比.

## 2 实验和数值方法

### 2.1 实验装置及流体体系

根据理论研究模型, 分别设计了两个内腔尺寸不同的矩形液池, 其中 A 液池为 48 mm × 20 mm × 32 mm, 采取上下加热方式. B 液池为 35 mm × 20 mm × 32 mm, 采取水平加热方式<sup>[9]</sup>. 两液池分别封装着厚度均为 10 mm 的液体石蜡和氟化液, 形成两层不相混合液体. 上下加热

时观察 Marangoni 对流, 水平加热时观察纯热毛细对流.

实验装置由实验液池、光学测量系统、温度测控系统和图像及数据采集系统组成. 实验采用 PIV 方法显示流场图像, 示踪粒子直径约  $100\ \mu\text{m}$ , 并由与液池最长边相平行的  $1\ \text{mm}$  厚激光片光源照亮. 流场分布图像被分辨率为  $512 \times 512 \times 8\ \text{bit}$  的 CCD 摄像机记录, 并实时传输到地面观测实验室. 事后采用多幅图像叠加方法对数字图像进行分析处理, 得到流场图像, 并根据示踪粒子在不同时刻的位移量, 求出速度值. 由于下层液体(氟化液)中示踪粒子发生了沉降, 得到的主要是上层液体(液态石蜡)的流场图像. 分别利用 6 个热电偶测量 A 液池(下壁附近)和 B 液池(右侧壁附近)的流体温度分布及可控制的加热/致冷器片间的温度差值( $\Delta T$ ).

实验中流体实验体系由石蜡(液体 1)和氟化液 FC-70(液体 2)组成. 在卫星进入预定轨道后, 升温熔化石蜡形成界面平整的两层流实验体系. 液态石蜡和氟化液的主要物理特性参数之比分别为  $\rho^* = \rho_1/\rho_2 = 0.4313$ ,  $\nu^* = \nu_1/\nu_2 = 0.9584$ ,  $\chi^* = \chi_1/\chi_2 = 2.2672$  和  $\alpha^* = \alpha_1/\alpha_2 = 2.405$ , 它们的 Prandtl 数分别为  $Pr_1 = 160.2$ ,  $Pr_2 = 402.3$ . 液-液界面上的界面张力温度梯度系数为  $\gamma = -\partial\sigma/\partial T = 3.63 \times 10^{-5}\ \text{N/m} \cdot \text{K}$ , 是引起热毛细对流的重要物理参数.  $\gamma$  值越大, 在同样温差下所形成的热毛细对流越强.

## 2.2 空间实验

实验在 SJ-5 号卫星上共进行 9 d 30 余次, 重力水平为  $1 \times 10^{-4}$  和  $1 \times 10^{-2}\ g$ . 每次卫星过顶时间为  $10 \sim 20\ \text{min}$ . 通过地面发出的遥控指令切换 A 和 B 实验液池, 并改变加热温差值  $\Delta T$  及加热速率, 以完成不同工况的科学实验. 本次实验共从卫星上传回 12000 多幅流场图像和 30 h 的实时温度数据. 本文给出的实验结果均是在  $1 \times 10^{-4}\ g$  微重力环境下获得的.

## 2.3 数值方法

数值计算是在交错网格上用 SIMPLEC 方法完成的. 其中对流项为迎风格式, 扩散项用中心差分, 然后用 ADI 方法求解离散得到的代数方程组. 采用 SIMPLEC 算法实施速度  $u$  和  $v$ , 压力  $p$  和温度  $\theta$  的代数方程的分离式求解. 计算网格取为  $(31+31) \times 121$ .

# 3 空间实验结果及数值分析

## 3.1 Marangoni 对流(A 液池)

A 液池采取上下加热方式, 图 2 给出了  $\Delta T = 23^\circ\text{C}$ (下端为热端, 上端为冷端,  $Ma = 1841$ )时该两层流体中 Marangoni 对流流动的流场和速度场分布数值计算结果, 其中在每层流体中分别存在一对相对旋转的、大小对称的对流涡. 对应的等温线图(图 2(b))表明底层氟液中的热量由中部向上传, 上层石蜡的低温流体自上向液-液界面流动.

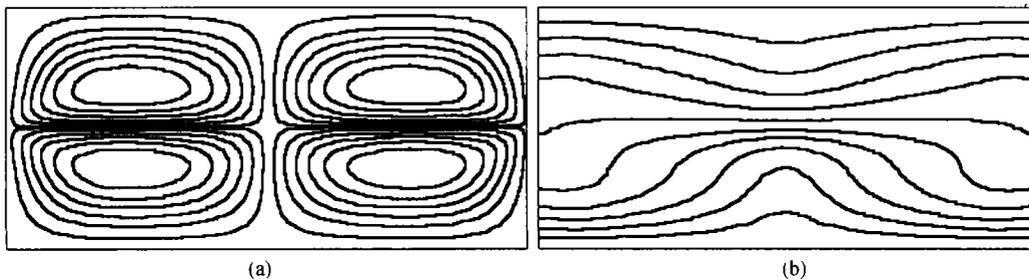


图 2 A 液池 Marangoni 对流模型计算结果(不考虑气泡的影响)

(a) 流线图, (b) 等温线图

在空间实验中温差  $\Delta T = 23^\circ\text{C}$  的实验工况下, 实际对流流动图像如图 3(a)所示. 此时液池下端加高温, 液池右下角明显存在一个直径约 10 mm 的气泡. 流体运动轨迹显示液体石蜡层中一个充满整个液层的逆时针方向旋转的对流涡, FC-70 液体层中的示踪粒子较少, 对流情况显示不佳, 但根据流体界面处的速度连续可推断出下层液体流动结构.

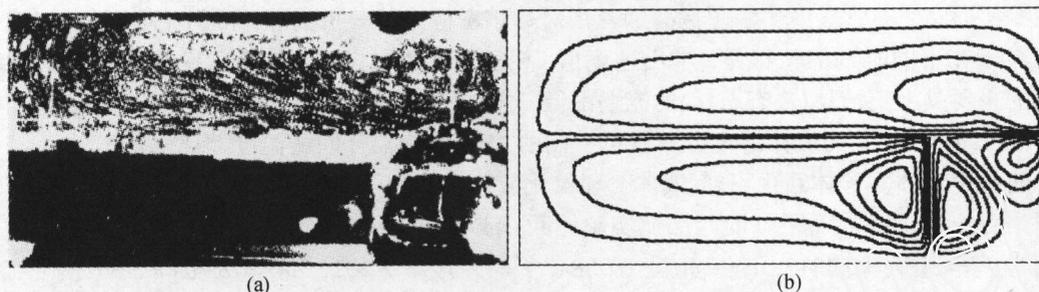


图 3 A 液池 Marangoni 对流空间实验结果和数值模拟比较(考虑气泡的影响)

(a) 空间实验流场轨迹图像, (b) 数值模拟流场流线图

图 3(b)给出了考虑实验中石蜡层右端气泡时的定常流动的近似数值模拟结果. 可以看出考虑气泡的作用后, 数值模拟得到的流场分布和实验结果基本一致, 两者具有相同的涡型. 由于气泡与石蜡液体交界面上有较大的温度梯度, 形成比较强的热毛细驱动力, 使石蜡层内形成一个整体对流涡, 并且涡心处于气泡上方. 同理想的两层流体 Marangoni 对流流型(见图 3)相比, 气泡的出现破坏了 Marangoni 对流流场的对称性和对流形成的临界特性. 尽管如此, 此次实验仍然很好地验证了具有局部气泡影响的两层流体 Marangoni 对流的新模型, 获得了理论和实验一致的定量比较结果.

表 1 列出了 A 液池中 4 个不同位置处的流体实测速度值与数值模拟结果的比较, 两者在流动方向和流动强度量级上均比较接近, 尤其是各点的水平速度分量比较误差最大不超过 43%. 证实了实验结果的可靠性.

表 1 实验速度值与计算结果比较

序号	1		2		3		4	
$(x,y)(\times 10^{-3} \text{ m})$	(2.1, 6.9)		(21.5, 2.0)		(25.1, 2.4)		(27.5, 2.5)	
方法	实验	计算	实验	计算	实验	计算	实验	计算
$U(\times 10^{-6} \text{ m/s})$	18.7	10.5	-46.7	-61.4	-54.5	-42.6	-54.5	-37.8
$V(\times 10^{-6} \text{ m/s})$	27.5	13.6	0.0	-1.3	11.5	-1.4	11.5	6.8

### 3.2 热毛细对流(B 液池)

B 液池采取两侧加热方式观测微重力环境下的两层流体热毛细对流. 图 4 给出了实际外加温差为  $41^\circ\text{C}$ (右端为热端, 左端为冷端,  $Ma = 4922$ )时该两层流体中热毛细对流流动的流场和温度分布数值计算结果, 在每层流体中分别存在一个相对旋转的、大小对称的对流涡.

图 5(a) 展示了空间实验获得的稳态热毛细对流图像, 右上角明显存在一个直径约 10 mm 的气泡, 上下流场的对称性被破坏. 很明显, 在石蜡层内出现一个整体对流涡, 涡心靠近热端; 下层氟化液体(FC-70)靠近液-液界面附近处也有明显的、与上层流体涡对应的流动轨迹, 显示出典型的纯热毛细对流流动结构. 实验对流流型与数值模拟结果(见图 5(b))比较接近. 从表 2 可以看出, 两者对应位置上的流体速度值也较好地吻合, 表明本文中理论模型的正确性.

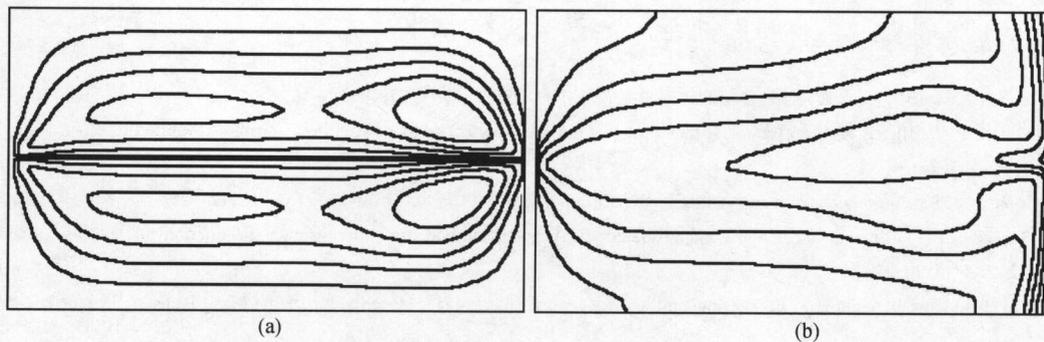


图4 B液池热毛细对流模型计算结果(不考虑气泡的影响)

(a) 流线图, (b) 等温线图

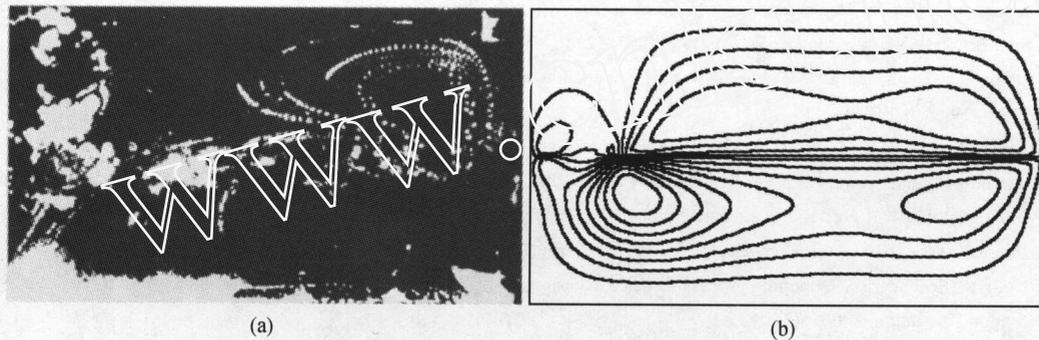


图5 B液池热毛细对流空间实验结果和数值模拟比较(考虑气泡的影响)

(a) 空间实验流动轨迹图, (b) 数值模拟流场流线图

表2 实验速度值与计算结果比较

序号	1		2		3		4	
$(x, y)(\times 10^{-3} \text{ m})$	(22.1, 0.4)		(23.0, 0.5)		(23.9, 0.5)		(30.5, 5.7)	
方法	实验	计算	实验	计算	实验	计算	实验	计算
$U(\times 10^{-6} \text{ m/s})$	-343	-479	-445	-461	-480	-471	240	215
$V(\times 10^{-6} \text{ m/s})$	-26	-3.4	26	1.9	26	8.7	-419	-110

## 4 结论

实践5号卫星两层流体热毛细对流空间实验是我国首次成功完成的流体动力学空间实验. 实验观察到典型的定常热毛细对流现象, 获得了微重力条件下热毛细对流的流动结构和定量速度值. 并利用直接数值模拟计算, 分析了微重力环境中两种不同加热方式下的两层流体对流特征. 数值分析了考虑空间实验中气泡出现的液-液和液-气液面同时存在的新模型和具有气泡影响的 Marangoni 对流和热毛细对流. 其实测结果与数值模拟分析结果进行了比较, 两者的对流流动结构一致, 速度大小基本吻合, 验证了微重力环境下多层热毛细对流的理论模型和流体界面张力驱动对流的流动特性, 尽管是在实验系统中出现了气泡.

## 参 考 文 献

- 1 刘秋生, 胡文瑞, Roux B. 有关多层流体对流的研究. 力学进展, 1997, 27(4): 518 ~ 537
- 2 Metz E P A, Miler R C, Mazelsky R. A technique for pulling single crystals of volatile materials. J Applied Physics, 1962, 33 : 2016 ~ 2017
- 3 Johnson E S. Liquid encapsulated floating zone melting of GaAs. J Crystal Growth, 1975, 30: 249 ~ 256
- 4 Barocela E, Jalilevand A. Liquid encapsulated float zone method for microgravity production of gallium arsenite. AIAA-87-0390, 1987
- 5 Liu Q S, Roux B, Velarde M G. Thermocapillary convection in two-layer systems. Int J Heat Mass Transfer, 1998, 41: 1499 ~ 1511
- 6 Liu Q S, Hu W R. Theoretical investigations of convective flow in multi-layer fluids-for the SJ-5 space fluid experiment mission. In: 49th Int Astronautical Congress. IAF-98-J 408. Heibournl, 1998
- 7 Legros J C, Dupont O, Vaerenbergh S Van, et al. Low-Gravity Fluid Dynamics and Transports Phenomena. In: Koster J N, Sani R L, eds. Washington DC: AIAA, 1990. 207 ~ 238
- 8 Georis Ph, Hennenberg M, Lebon G, et al. Investigation of thermocapillary convection in a 3 liquid-layer system. J Fluid Mech, 1999, 389: 203 ~ 228
- 9 Yao Y L, Liu Q S, Zhang P, et al. Space experiments on thermocapillary convection and Marangoni convection of two immixible liquid layers. J Jpn-Soc Microgravity Appl, 1998, 150: Supplement II
- 10 Liu Q S, Hu W R. Instability of convection in multilayer fluids subjected to a horizontal temperature gradient. In: 48<sup>th</sup> International Astronautical Congress Oct6 ~ 10 1997/Turin(Italy): IAF-97-J406. 1997
- 11 Geng R H, Zhang P. The melting process in space experiment of fluid physics on board satellite SJ-5. Microgravity and Space Station Utilization, 2000, 1(3): 5 ~ 12