

二维热毛细振荡对流的临界 Bond 数

唐泽眉 胡文瑞

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

关键词 热毛细对流、振荡流、微重力

在空间, 微重力水平为地面重力的 10^{-3} — 10^{-5} , 表面张力、相变等可能成为引起流体流动的重要原因。我们以悬浮区熔法晶体生长问题为背景, 研究表面张力驱动的半浮区液桥的对流流动。当作用于液桥两端的外加温度差超过某一临界值时, 液桥中的流场和温度场将发生振荡, 直接影响到生产材料的质量。因此, 研究热毛细振荡流的特征和产生机理, 不仅在流体力学方面有重要的理论意义, 而且在空间材料加工方面有很大的应用价值。

80 年代以来, 热毛细振荡流已成为各国研究的课题之一。德国、意大利、美国已进行了地面、火箭、航天飞机的实验^[1,2]。我们也进行了地面实验^[3]。由于实验尚不充分, 目前有关振荡机理的理论解释工作还不多。一种解释把热毛细振荡流看成是自由面上产生的环向不稳定性^[4], 另一种看法认为这种振荡流动是由于热传递过程中的不平衡所产生的^[5]。我们认为, 浮力不稳定性可能是热毛细振荡对流产生的重要原因^[6]。我们曾讨论了在地球重力环境中热毛细对流的振荡过程^[7]。本文将分析不同重力水平下振荡流的特征。不定常数数值模拟的结果表明, 对固定的液桥尺度比和外加温度差, 存在着发生振荡流的临界 Bond 数为

$$Bd = \rho g \beta L^2 / |d\sigma/dT|,$$

其中 ρ , β , $|d\sigma/dT|$ 分别指流体的密度, 热膨胀系数和表面张力梯度, g 表示重力加速度, L

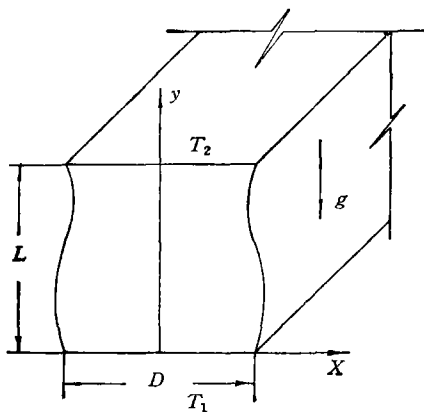


图 1

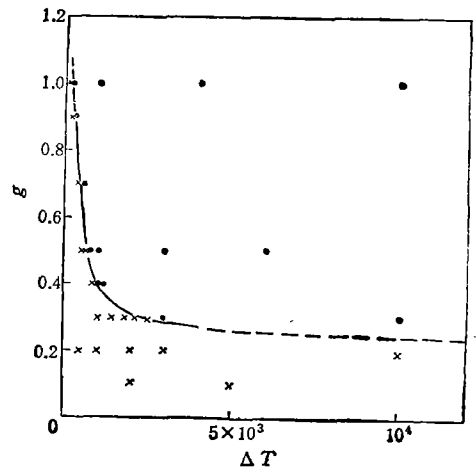


图 2

1991-12-29 收稿, 1992-07-17 收修改稿

1) Tang, Z. M., Hu, W. R., Submitted to Microgravity Quarterly

为液桥高度。它反映了重力和表面张力梯度作用的相对大小。Bond 数越大,振荡流越容易发生,相对的临界温度差越小。这意味着,与浮力有关的 Rayleigh 不稳定性,可能是热毛细振荡流产生的重要原因。

讨论如图 1 所示的二维小尺度液体桥,其中上下壁宽 D 与液桥高度均为 4 mm,液桥的最小宽度 $D_{\min} = 3.2$ mm。上壁温度大于下壁温度。自由面的形状由未加热时的液桥位形决定,在同一重力环境的计算中保持不变。重力方向竖直向下。

描述二维不定常问题的无量纲速度、流函数、能量方程及边界条件¹⁾相同。由于在振荡过程中自由面半径变化仅有几微米,因而假定自由面形状不变,液-气和液-固界面为一条流线,流体在液-固界面上不滑移,不穿透。自由面上的速度由切向应力平衡条件决定。上壁无量纲温度为 1,下壁为 0,自由面向外散热。采用二维不定常分步杂交有限元方法,对方程的对流部分用特征线法处理,扩散部分用集中质量有限元方法进行计算。以上,下壁温度差 $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ 时的收敛定常解作为初值,逐渐增加上壁温度到所需温差 ΔT 值进行不定常数值模拟。

图 2 给出了不同重力水平和外加温差的临界稳定曲线。结果表明,对一定尺度比的液桥,当重力水平减小时,发生振荡的临界温差增加。曲线上方是发生振荡流动的范围。

在某一确定的引力环境中(例如 $g = g_0$, 相应于地面重力加速度),液桥中的最大流函数值和自由面上一点的温度振荡情况绘制在图 3 上。当 $\Delta T = 140^\circ\text{C}$ 时,初始的扰动会稳定下来,流场和温度分布最终会成为对称和定常的。当 $\Delta T \geq \Delta T_c = 200^\circ\text{C}$ 时,振荡流发生,随着外加温差的增加,振荡会逐渐减弱。

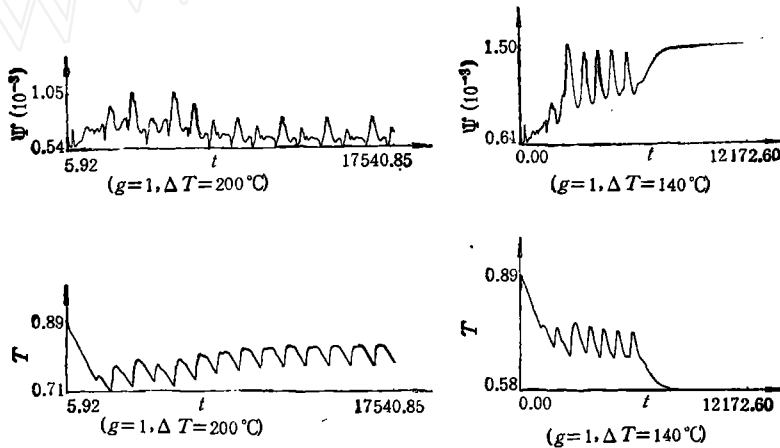


图 3

图 4 描述了当外加温差为 1000°C 时,随着引力的减小,热毛细振荡流的流动特征。值得注意的是,当引力从 $0.4 g_0$ 减小到 $0.3 g_0$ 时,温度和流场都不再振荡,其间一定有振荡开始发生的临界 Bond 数。在我们计算的范围内,引力越小,相应的临界 Bond 数越高。

图 5 绘制的是在 $g = \xi_0$, $\Delta T = 200^\circ\text{C}$ 时,一振荡周期中液桥的流场变化情况。图 5 是

1) 同 1941 页脚注 1)

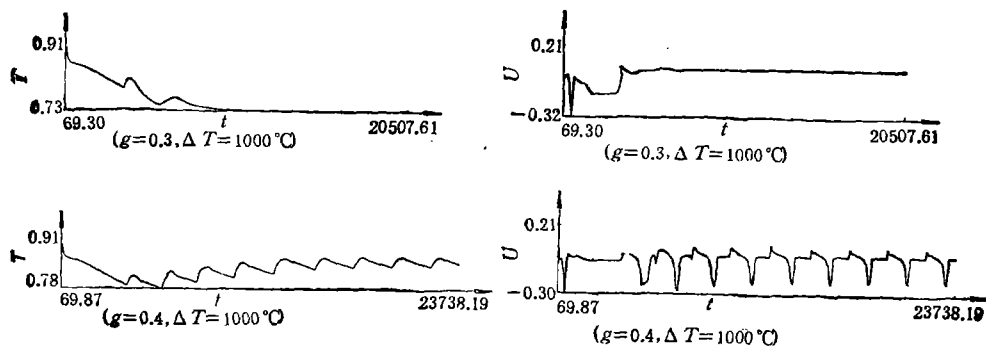


图 4

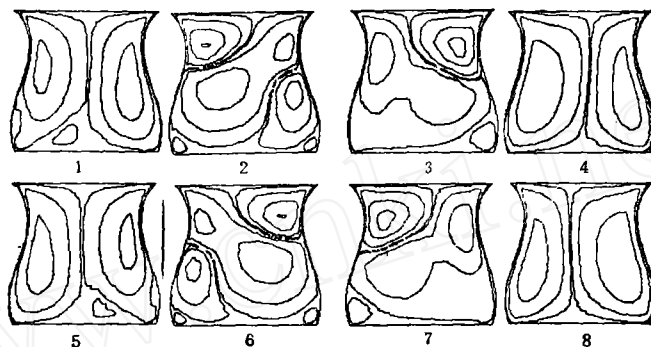


图 5

按 1/8 时间周期序列排列的流函数分布图,图中绘出了等流函数线。对流按非定常、复杂的非对称模式周期变化,振荡周期为 0.85 s。振荡的图样和周期都与二维轴对称液桥的实验结果类似。在振荡过程中,沿自由面会出现下部温度高于上部温度的 S 型温度分布。

本文再次指出,在一定的引力环境和外加温差范围内,小尺度上加热液桥中会产生热毛细振荡流。在固定的液桥尺度比和外加温差条件下,相应会有振荡流发生的临界引力水平,临界 Bond 数。引力水平越高,发生振荡的临界温差越低,热毛细振荡流就越容易激发。这说明,在通常认为是浮力稳定的上加热液桥中,表面张力驱动的热毛细对流在外加温差足够大时,会在液桥内部形成与重力平行且同向的温度梯度区,只要有引力存在,就可能由浮力不稳定性产生振荡热毛细对流,重力仍是这种流动产生的重要原因。

参 考 文 献

- [1] Monti, R., Fortezza, R., *Microgravity Quarterly*, 2 (1991), 163.
- [2] Schwabe, D., Preisser, F., Scharmann, A., *Acta Astronautica*, 9 (1982), 265.
- [3] Cao, Z. H., Xie, J. C., Tang, Z. M., Hu, W. R., *Science in China, Ser. A*, 35 (1992), 7:725.
- [4] Preisser, F., Schwabe, D., Scharmann, A., *J. Fluid Mech.*, 126 (1983), 545.
- [5] Ostrach, S., Kamotani, Y., Lai, C. L., *PCH Physicochemical Hydrodynamics*, 6 (1985), 585.
- [6] Hu, W. R., Tang, Z. M., *Science in China, Ser. A*, 33 (1990), 8:934.