

**简介:** 马兰戈尼 (Marangoni) 流是由液体表面张力梯度引起的流体流动现象。流体表面的温度梯度和溶质浓度梯度都可以形成表面张力梯度。本论文研究在一个准二维空间中的液滴由浓度梯度引起的马兰戈尼流。一滴水滴被夹在两个方形玻璃片之间形成一个薄的圆形液滴。在溶解有表面活性物质的水滴周围构造不均匀的表面蒸发速率, 使得水滴表面不同位置表面活性物质的浓度不同, 进而形成马兰戈尼流。或者在这个圆形液膜周围构造一个有梯度的有机溶剂 (如乙醇) 蒸汽浓度场, 同样能产生表面浓度梯度和马兰戈尼流。图1. 是实验中得到的流线照片, 通过COMSOL仿真我们能够研究流线形状、速率等物理量与各种影响因素之间的关系, 帮助优化实验条件。

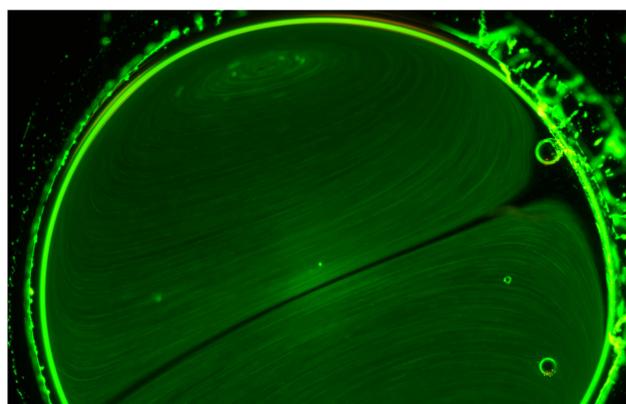


图 1. 乙醇水溶液在蒸发过程中形成马兰戈尼流。

**计算方法:** 通过使用COMSOL我们可以方便的模拟流体流动, 蒸发和稀物质传递相互耦合的问题。使用层流两相流, 动网格物理场接口, 我们通过将表面张力写成与浓度相关的表达式能实现马兰戈尼流的模拟。可以使用一个稀物质传递物理场同时模拟溶剂在水中和空气中的扩散。

下面考虑溶解有乙醇的溶液蒸发形成马兰戈尼流的模拟。在气液界面使用分配条件, 分配系数为  $K$ 。认为在界面处气相浓度 ( $C_g$ ) 与液相 ( $C_l$ ) 浓度始终保持一个平衡状态:

$$K = C_l / C_a$$

在外围边界设置浓度为零。另外在气相和液相中分别使用不同的扩散系数。

在流体模拟中, 启用“浅槽近似”使得能在二维模型下得到准确的一定厚度的薄层液膜的流体仿真。这个设置会在Navier-Stokes方程中引入一个额外的体积力:

$$F = -12\mu\mathbf{u} / d_z^2$$

最后计算得到的速度可以认为是薄层液体的在厚度方向上的平均速度。流体-流体界面条件中我们可以设置表面张力随乙醇浓度线性减小, 由此会产生从浓度低到浓度高方向的流动。需要使用 up 或 down 算子提取界面上的浓度。外围边界设置为开放条件。模型设置如图2. 所示。

另外, 在研究设置里, 先对稀物质传递单独进行一小段时间的瞬态计算, 将得到浓度分布作为初始值进行多物理场全耦的求解, 有利于提高收敛性。

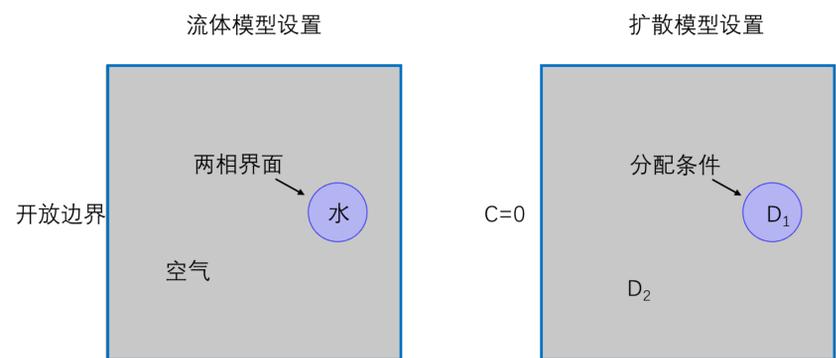


图 2. 模型设置

**结果与结论:** 在模型中把液滴设置在非中心的位置, 如图2. 所示。靠近边界的一层乙醇会挥发的更快, 相应的这一部分的水中浓度较低, 表面张力较小。以下是通过仿真得到的浓度、总通量和流体速度的分布图。现象与实验基本符合。

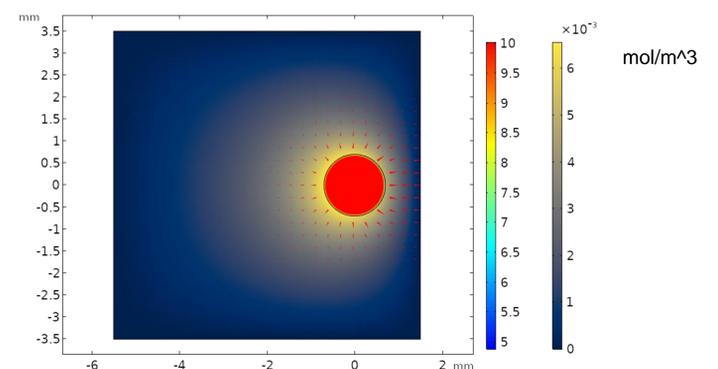


图 3. 乙醇浓度分布, 液相和气相中分别使用两个颜色图例。

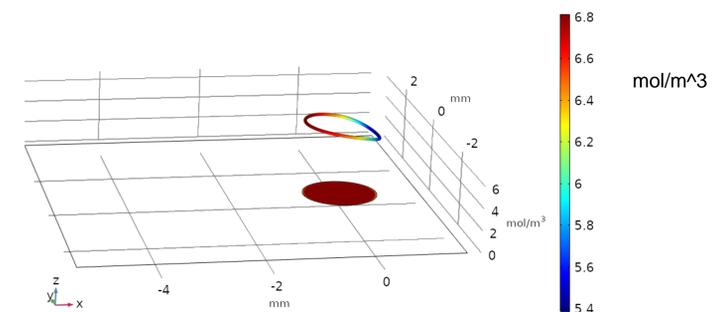


图 4. 液相和界面上乙醇浓度分布。

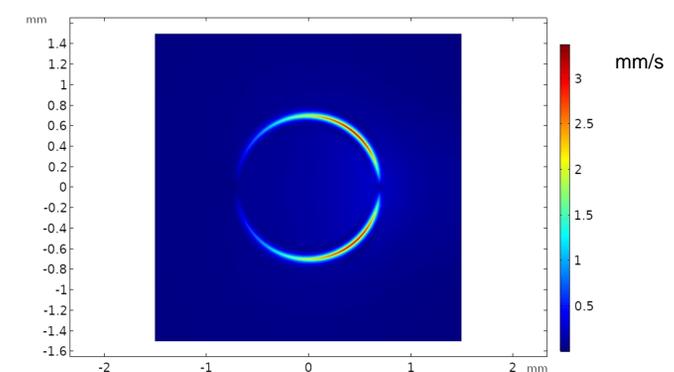


图 5. 流速大小分布。

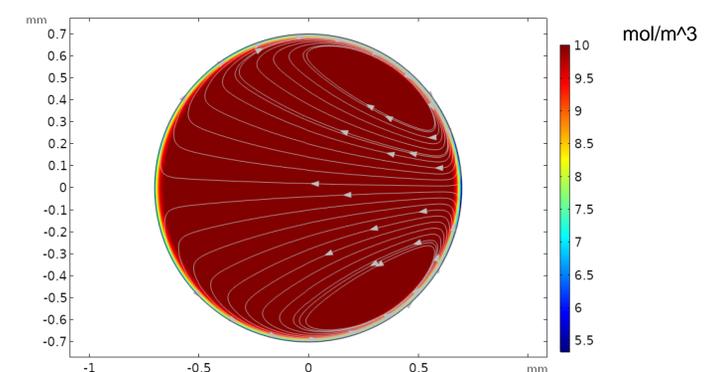


图 6. 流线和浓度分布。