

前言

表面冷凝是一种自然现象，广泛存在于日常生活、工厂车间、实验室等各类场景中，通常发生于高湿低温环境中。生活中常见的现象包括眼镜起雾、车窗起雾等。在某些应用场景下，表面冷凝是有害现象，需要尽可能避免。

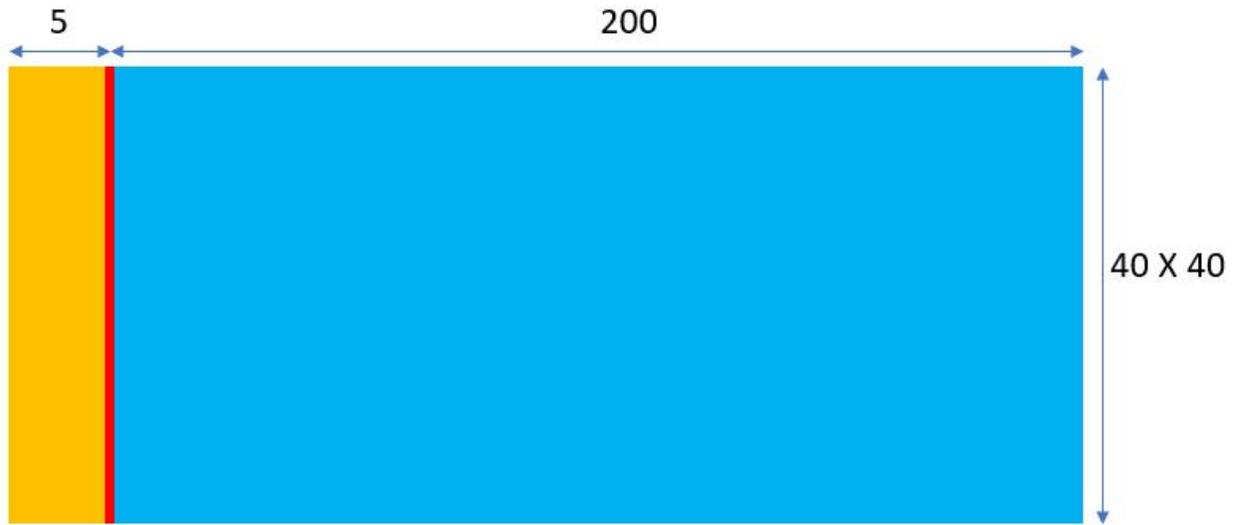


热水导致的玻璃杯起雾

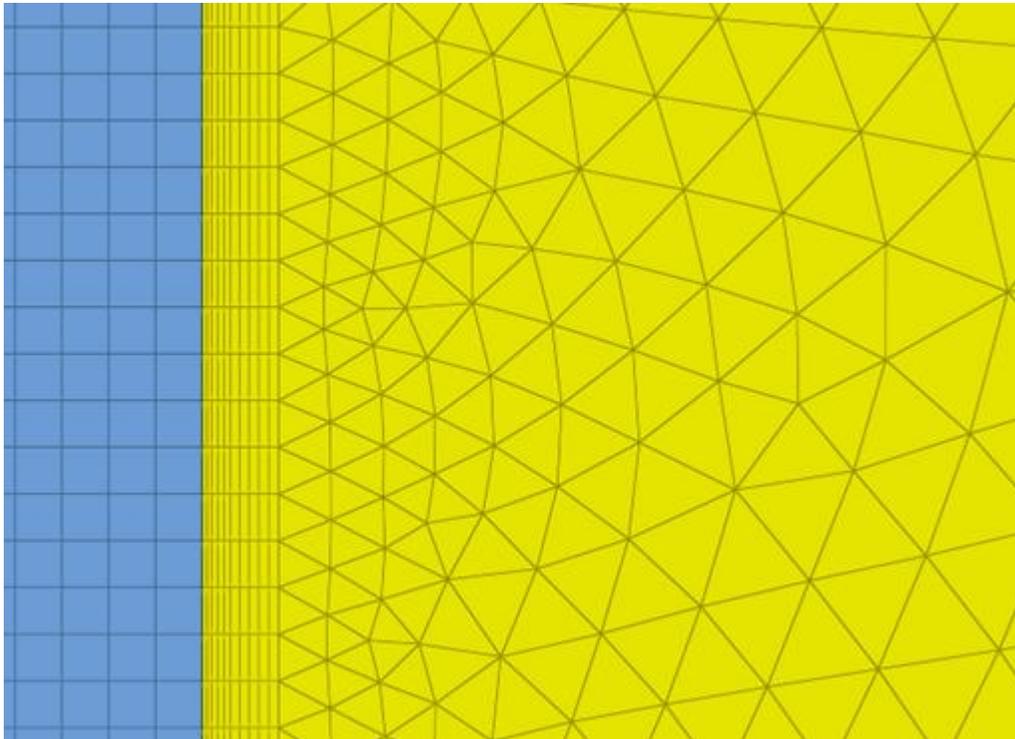
表面冷凝的起因因为固体表面温度低于露点温度，导致空气中水蒸气在固体表面液化。

1 仿真场景与网格划分

本文仿真场景如图所示，橙色为固体域，蓝色为空气域，红色为考虑起雾的表面。现考虑冷凝的水雾从 0 厚度发展 30 分钟后的厚度变化。



模型的单元总数约 2.4 万。固体区域采用三棱柱单元。在空气域的冷凝表面划分了边界层，其他部分采用四面体单元。固体域和空气边界层区域如图所示（蓝色为固体域单元，黄色为空气域单元）



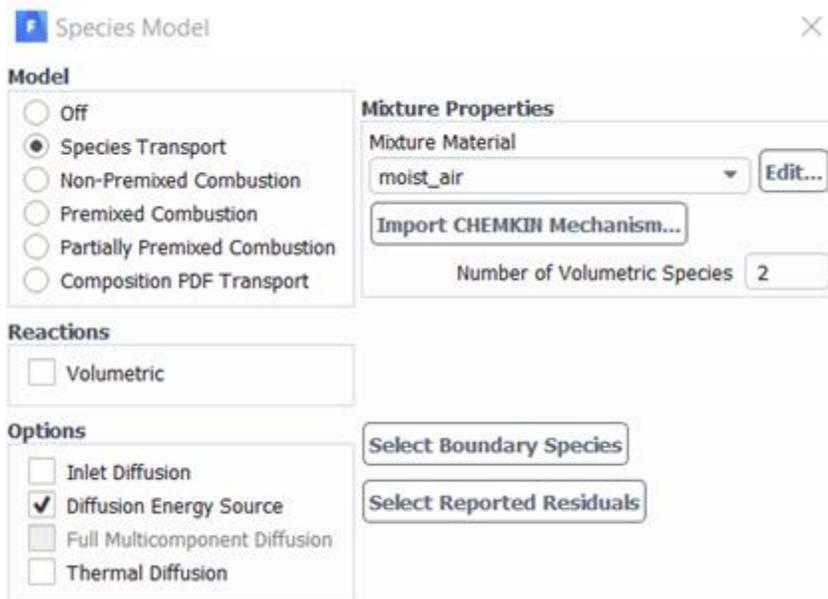
2 FLUENT 设置 (2020R2 版)

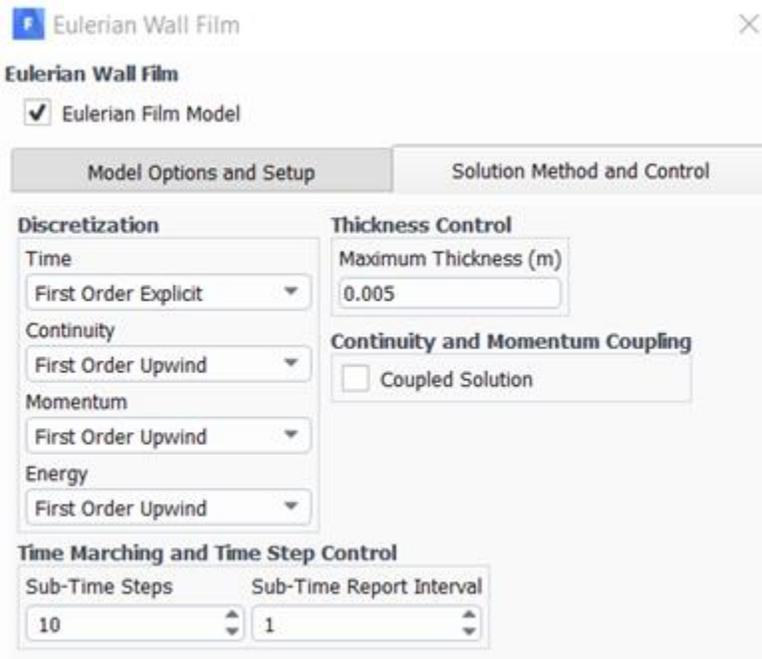
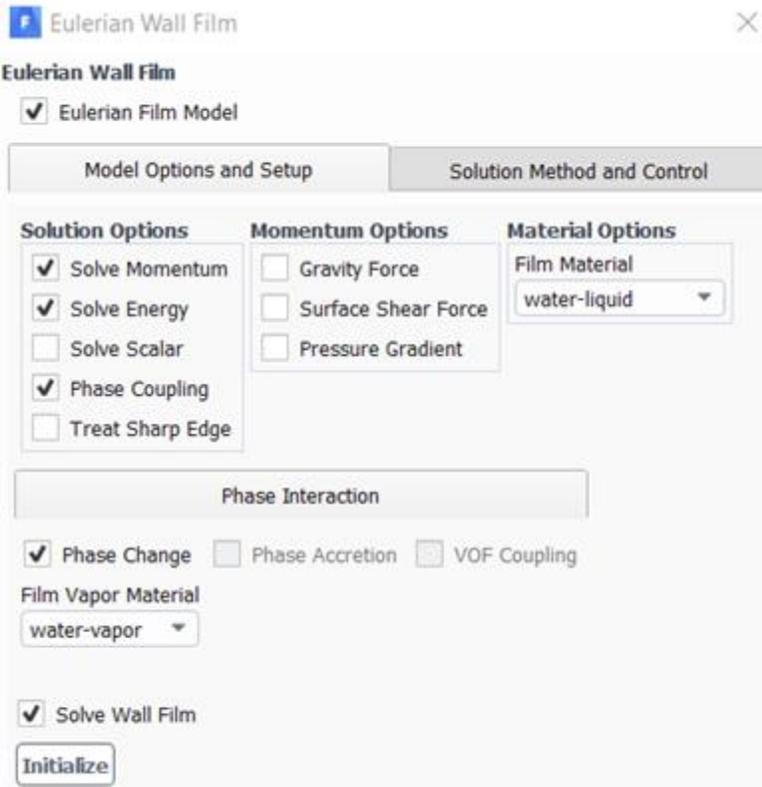
2.1 模型设置

冷凝问题是随时间发展的过程，需要采用瞬态计算。此案例中，流动的驱动因素为气体的密度差驱动，因此需要考虑重力。在 FLUENT 中需要开启以下物理模型：

- 能量方程 (energy)
- 组分运输 (species transport)
- 欧拉液膜 (Eulerian wall film)

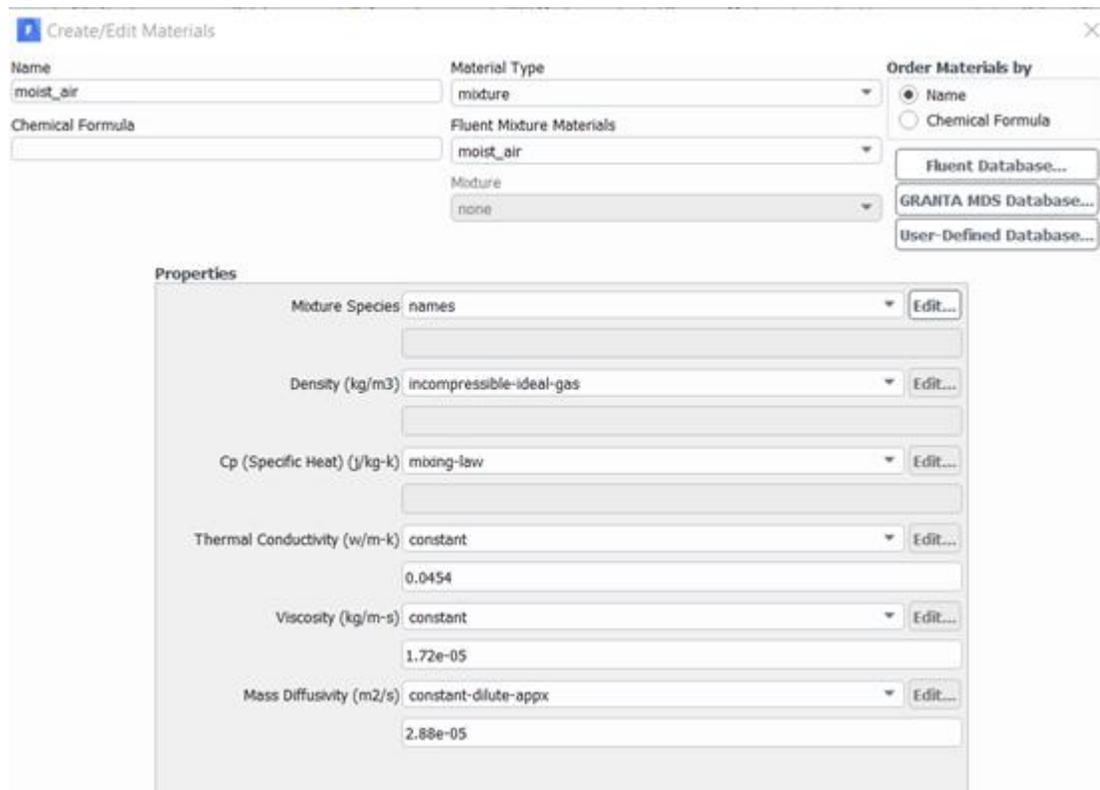
其中组分运输和欧拉液膜的模型设置如下图所示





2.2 材料设置

固体材料为铝，流体包括空气和液态水，混合组分为空气和水蒸气的混合物。混合组分的设置如图所示



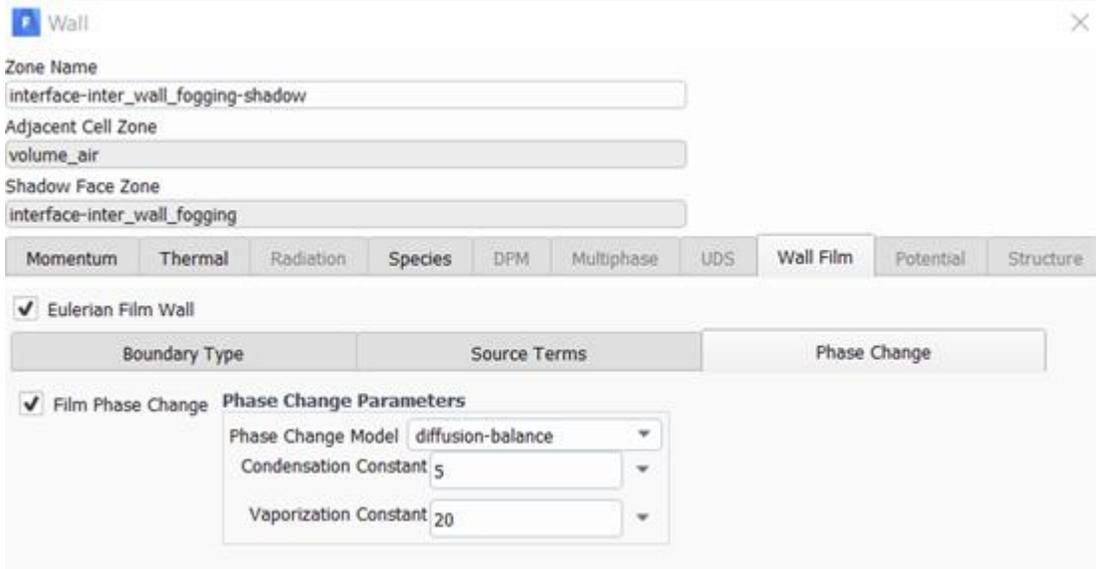
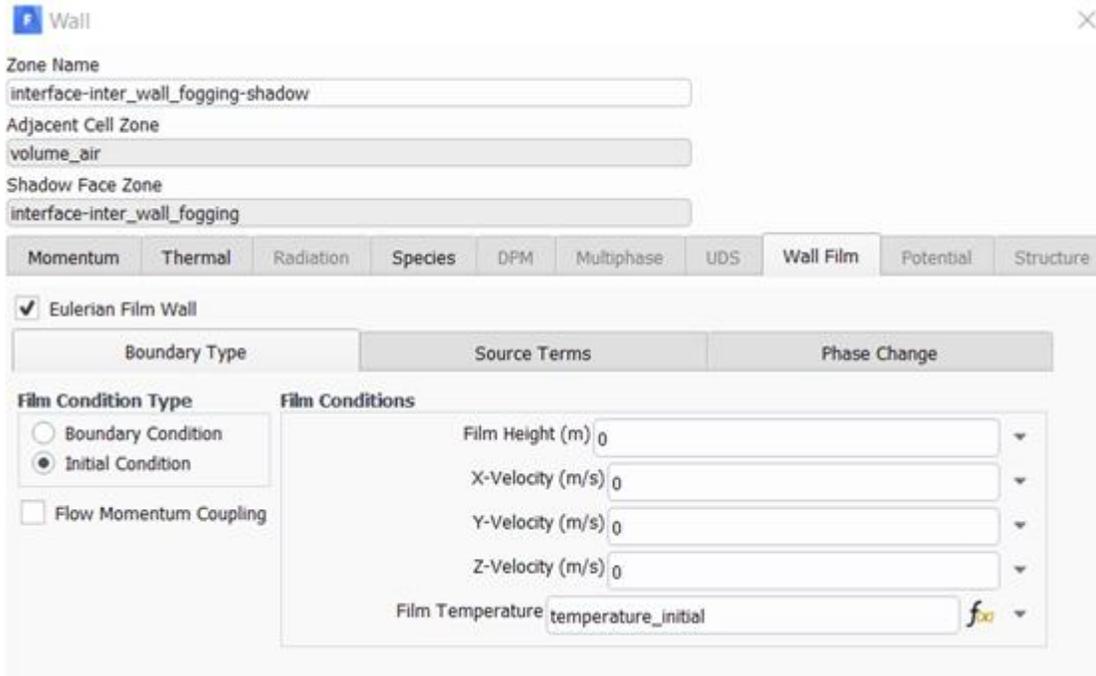
固体域的材料为铝，空气域的材料为混合组分（不是空气！）。

2.3 边界条件 & 计算方法设置

由于此案例不存在出口和入口，因此仅需要设置各个壁面的边界条件。壁面均为固定无滑移壁面，热边界条件如下：

- 固体域和外界的接触面，采用换热系数边界条件，外界温度 5℃
- 空气域的最远端为 30℃ 固定温度
- 空气域侧壁为绝热壁面

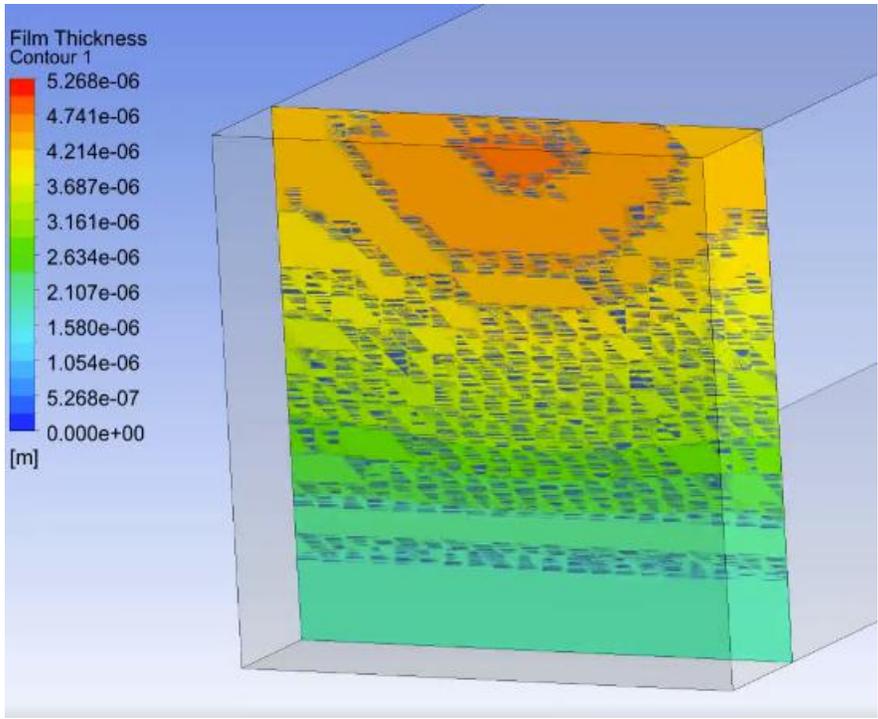
考虑出现液膜的区域，其液膜边界条件如图所示



总共计算 30min 的物理过程，采用固定时间步长 10s。初始状态，空气域温度 30℃，相对湿度 90%（水蒸气质量比例约 2.454%）。

3 仿真结果

中间时刻液膜厚度所示。随着时间的增加，液膜逐渐变厚。由于 30min 时长对于此类问题发展过程而言相对较短，且温差较小，因此其厚度最大也仅为微米级。



中间时刻液膜厚度



中间时刻温度