

Adapted SIMPLE Algorithm for Incompressible SPH Fluids with a Broad Range Viscosity.

广域粘性不可压缩SPH流体仿真

刘树森、何小伟、王文成、吴恩华

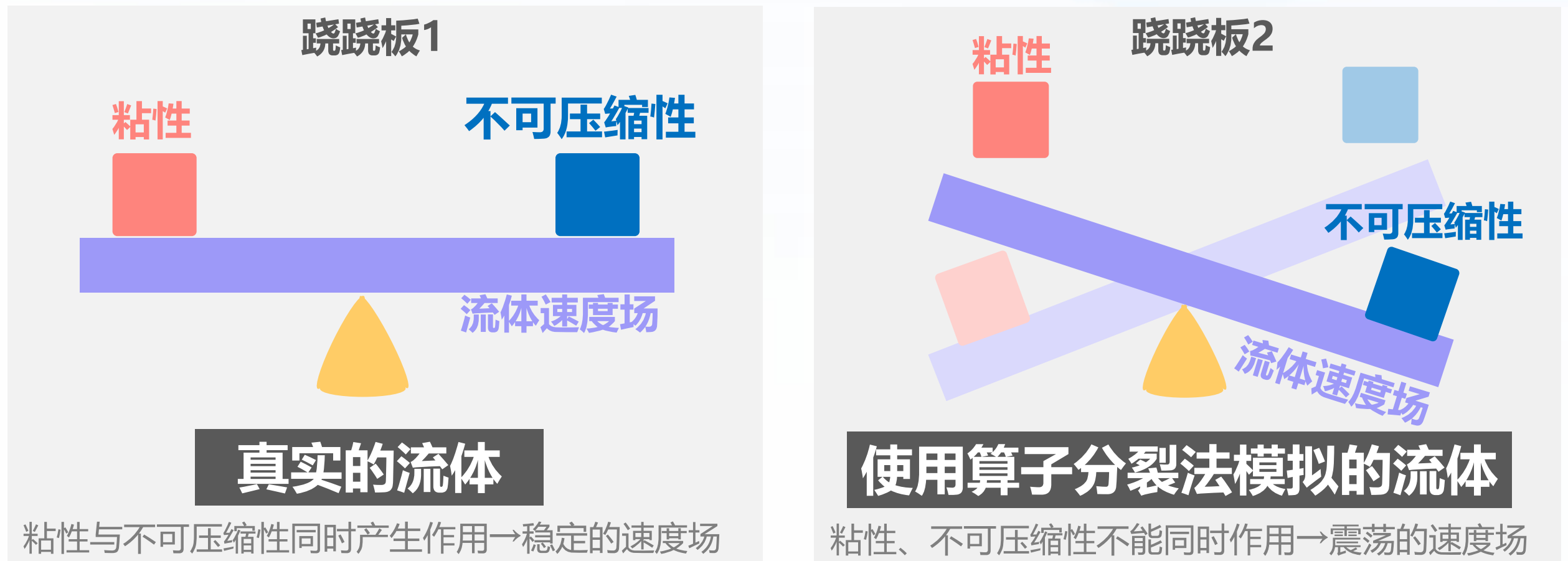
IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2021.10.1109/TVCG.2021.3055789

刘树森, 13306390787, liuss@ios.ac.cn

背景

由于粘性求解器与不可压缩性求解器之间存在冲突，导致 SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法在模拟大粘性流体时质量很差。

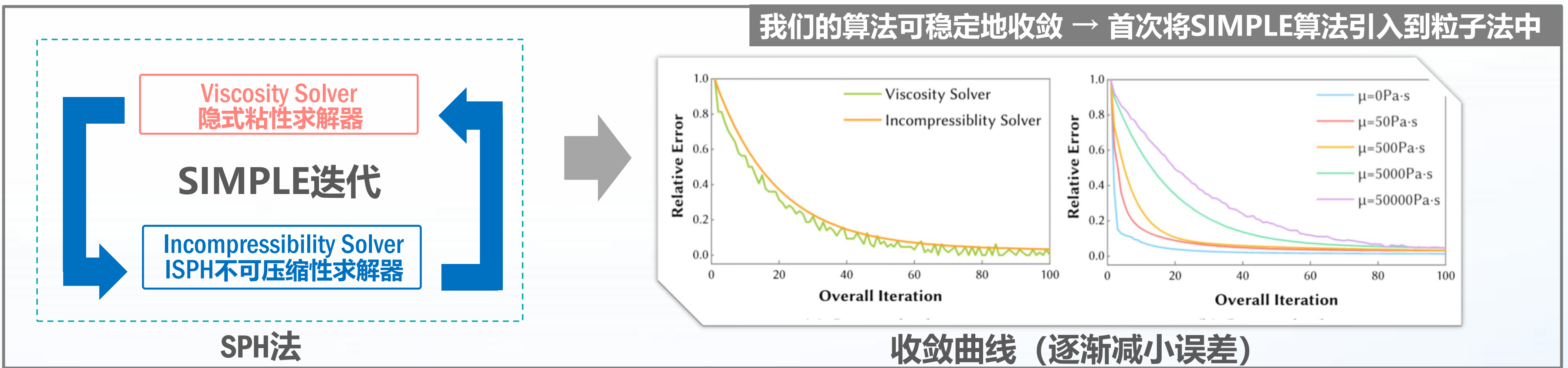
为了简化计算，研究者们通常使用算子分裂法（将一个纳维斯托克斯方程拆分成若干个独立的微分方程），对流体速度场分别施加粘性和不可压缩性约束。由于粘性与不可压缩性不能同时作用于流体，因此会引入严重的错误。



方法

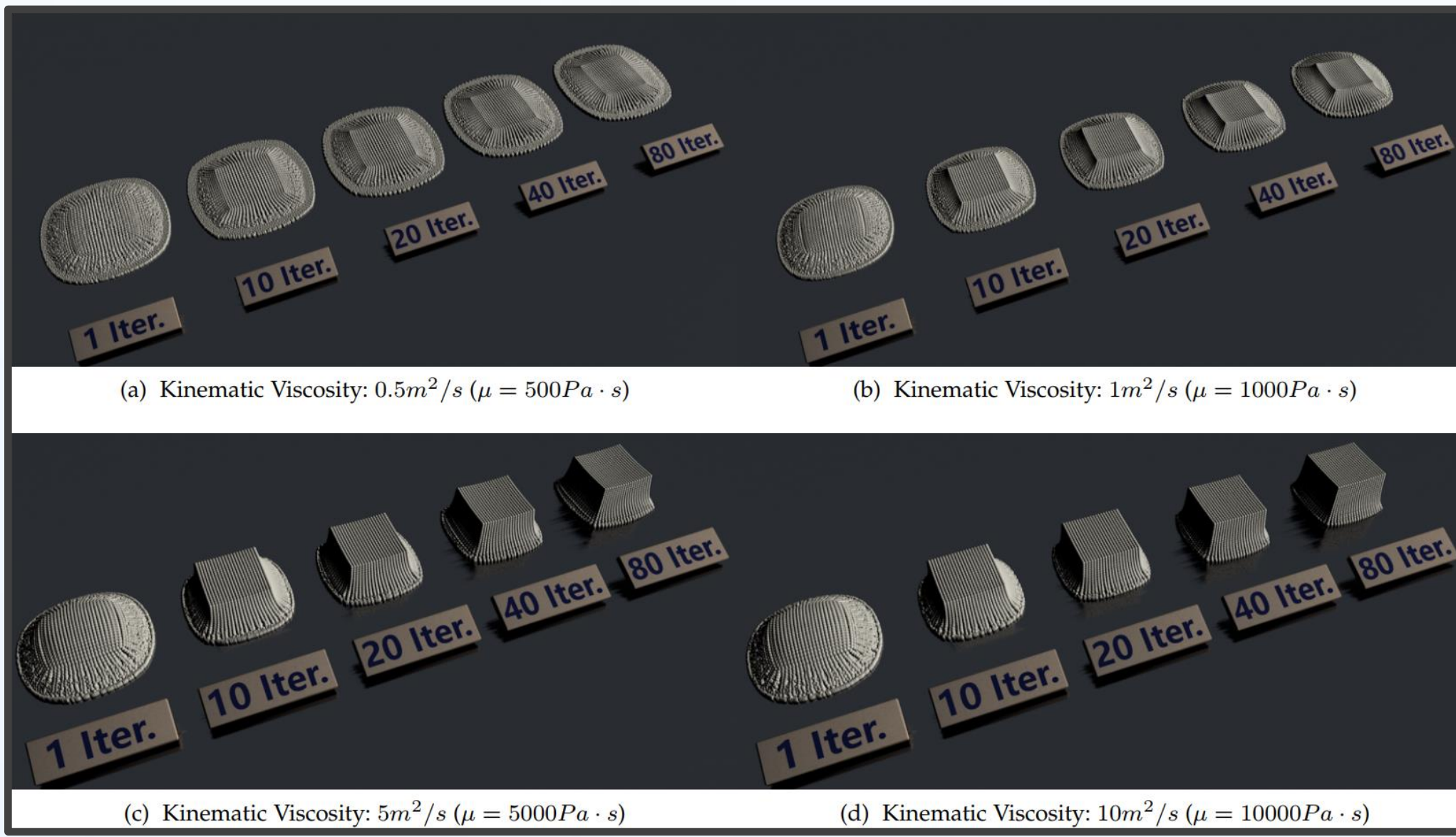
我们在SPH法中引入SIMPLE (Semi-implicit method for pressure linked equations) 迭代算法，通过迭代的方式获取同时满足粘性、不可压缩性约束的速度场，削弱两者间冲突，提高大粘性不可压缩性流体的仿真质量。

- 严格基于粘性不可压缩流体动力学方程（纳维斯托克斯方程与无散度条件）构建隐式粘性与压强求解器；
- 通过在压强泊松方程源项重要引入密度补偿项削弱密度误差的影响；
- 使用半解析式Ghost气体粒子方案，无需额外布设Ghost粒子即可削弱粒子邻域缺失问题的影响。



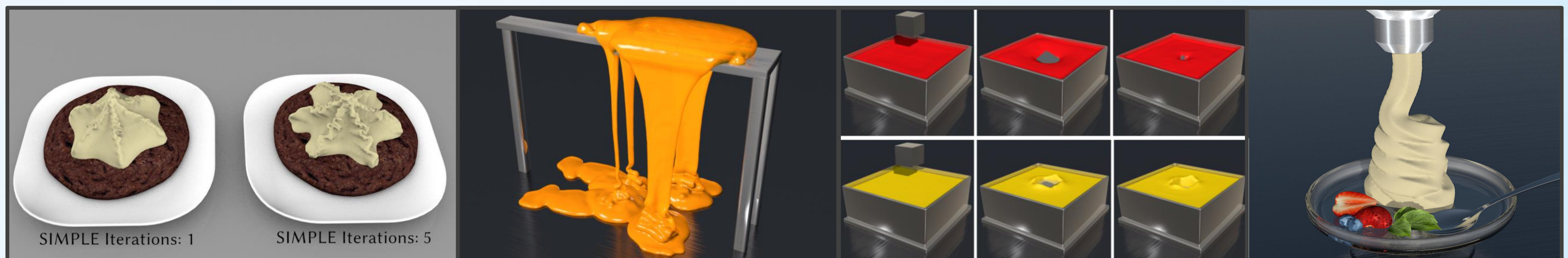
结果

我们的方法能够更稳定地保持大粘性流体形态，流体可产生更准确、更丰富的表面细节，并且可以稳定地模拟流体的拉伸状态，以及粘性大范围变化的非牛顿流体。



对于多数粘性流体材料的仿真场景，使用10次以下的迭代次数即可获得较理想的仿真质量。

- 1次迭代：流体会快速的“融化”，无法稳定的保持形态；
- 10次迭代：流体的表面细节可以有效地保持；
- >10次迭代：粘性流体仿真质量的提升已经不太明显。



相比只进行1次迭代（左图），使用5次迭代（右图）模拟的奶油具有更丰富、更稳定的表面细节。
($\mu = 5 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\Delta t = 1 \text{ ms}$)

我们的方法可稳定、逼真地模拟大粘性流体的拉伸状态。
($\mu = 5 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\Delta t = 1.4 \sim 2.2 \text{ ms}$)

我们的方法可稳定模拟粘性大范围变化的非牛顿流体（上：剪切变稠流体，下剪切变稀流体）
($\mu = 50 \sim 5 \times 10^5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\Delta t = 1 \text{ ms}$)

我们方法模拟的冰淇淋不会快速融化，能够保持较为锋利的棱角
($\mu = 5 \times 10^7 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\Delta t = 1 \text{ ms}$)



甜点

(粒子数量: ~1百万, 时间步长 $\Delta t = 1.0 \text{ ms}$)

该场景中包含有:

- 大表面张力的奶油与拉伸状态下的糖稀（最左， $\mu = 200 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ）；
- 能够保持锋利的表面细节的奶油（中间， $\mu = 5 \times 10^5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ）；
- 展现出稳定buckling效应的奶油（最右， $\mu = 5 \times 10^4 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ）。

本文之前的SPH法无法模拟该场景。