

# 刮膜式分子蒸馏蒸发液膜模拟中 两种湍流模型比较\*

向爱双 许松林

(天津大学化工学院国家精馏技术中心, 天津 300072)

**摘要** 针对外热刮膜式分子蒸馏的蒸发液膜进行模拟研究. 对其湍流流场进行了二维两相流数学建模, 并利用FLUENT流体力学计算(CFD)软件进行模拟. 论文主要讨论了两种处理近壁面流动的湍流模型的优越性. 首先简要介绍了刮膜式分子蒸馏与其他分子蒸馏的不同, 说明了模拟中选用湍流模型的原因. 研究提出了三个基本假设来简化建模和计算过程. FLUENT中提供了各种湍流模型, 对于近壁面处理, 选用 $k-\varepsilon$ 模型中的RNG和Realizable均可. 由于Realizable  $k-\varepsilon$ 湍流模型在FLUENT中是一种较新的方法, 它与RNG  $k-\varepsilon$ 湍流模型的优越性需要在具体模拟操作中检验. 在旋转坐标系下, 固定其他设置, 分别选用上述两种湍流模型进行模拟, 并利用VOF多相流模型追踪气液界面. 从多个方面比较了两种模拟结果的异同, 发现两种模拟结果在与前人研究基本吻合的前提下, 均可以用来进行进一步的模拟研究.

**关键词** 刮膜式 分子蒸馏 蒸发液膜 湍流模型 计算流体力学 旋转坐标系

## 1 概述

刮膜式分子蒸馏是分子蒸馏的一种, 它与降膜式和离心式分子蒸馏的不同主要在于形成蒸发液膜的作用力不同. 随着刮膜转子的快速转动, 液体在蒸发表面上形成均匀的液体薄膜, 加强了传热、传质过程, 显著缩短了物料的停留时间, 从而能避免物料的热分解. 根据文献, 降膜式和离心式分子蒸馏的蒸发液膜呈现层流流动<sup>[1]</sup>. 但对刮膜式分子蒸馏来说, 液膜流动至少在刮膜转子附近是湍流状态的.

利用CFD软件模拟蒸发液膜的流体流动来研究刮膜式分子蒸馏, 是一种新的理论研究方法. 根据理论分析, 可以建立RNG和Realizable  $k-\varepsilon$ 两种湍流模型研究近壁面湍流流动, 但是这两种模型的优越性需要在实际模拟中加以比较<sup>[2]</sup>. 研究中还建立了VOF多相流模型来追踪气液相界面, 模拟液面的波动情况, 并采用了增强壁面函数方法进一步处理近壁面情况. 在旋转坐标下, 分别针对上述两种湍流模型进行求解, 并比较了两种模型下的模拟结果. 主要包括液面波动情况的比较、特殊点处流速随模拟时间变化

2004-09-05 收稿, 2004-12-03 收修改稿

\* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 20176037)

的比较、流场区域内流体流速、湍动能及湍流耗散率等高线和收敛性等方面的比较.

## 2 基本假设

旋转刮膜式分子蒸馏装置的蒸发器内设置了一个转动的刮膜器,使物料均匀地覆盖在加热面上,强化了传热和传质,缩短了停留时间,降低了热分解性,工业上应用比较广泛<sup>[3]</sup>.但由于物料在流动的同时也加入了机械力的作用,导致分子蒸馏过程的传热、传质研究变得异常复杂.图 1 为计算所参考的刮膜式分子蒸馏装置<sup>[4]</sup>,液膜位于加热夹套 2 与刮膜转子 4 之间的部分,转子是由三根成 120°,直径为 4 mm 的金属柱组成的.

操作中,转子的转速一般为(120 ± 30) rpm,液膜切向速度远大于重力引起的轴向速度.此外,液膜的轴向距离(20 cm)远大于液膜厚度(0.01~0.025 cm,计算中选取 0.05 cm).实际操作为高真空(绝对压力大于 0.01 Pa),存在传质和传热,非常复杂.因此,为简化计算,仅考虑不可压缩液膜并忽略传质和传热的情况.基于以上分析,作如下假设:(1)重力对流动影响忽略不计;(2)液膜轴向速度无变化,仅切向和径向速度改变;(3)计算流体为不可压缩的.

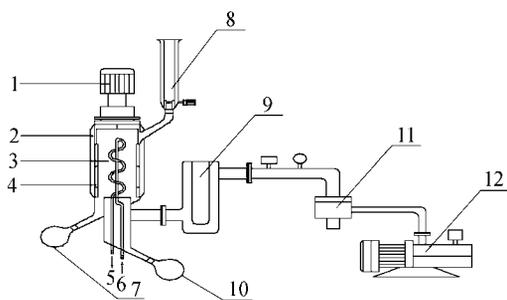


图 1 VKL70 型刮膜式分子蒸馏装置简图

1. 转子驱动马达, 2. 加热夹套, 3. 冷凝器, 4. 转子, 5. 冷却水出口, 6. 冷却水进口, 7. 残留物收集器, 8. 针形阀, 9. 冷阱, 10. 馏出物收集器, 11. 油扩散泵, 12. 旋转式真空泵

根据假设,流体力学计算(CFD)区域简化为二维情况,且不受重力影响,操作压力为常压.由于液面是波动的,并需追踪其界面,故整个区域应设为两相流.简化后的计算区域如图 2 所示.蒸馏器的直径为

100 mm,液膜初始厚度为 0.5 mm,转子直径 4 mm,截去气体区域及冷凝部分直径 80 mm.截去气体区域大小的原则是不影响液膜的计算.实际操作中,液膜是不允许从转子背面绕流的,也即原则上不会到达直径 80 mm 内的区域.

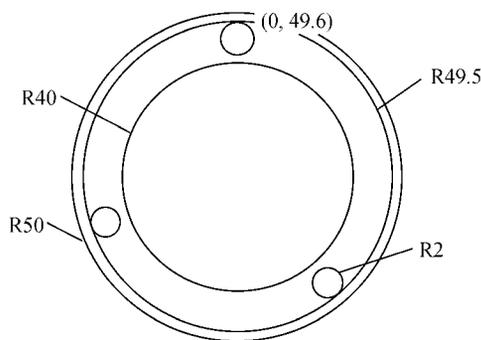


图 2 流体计算区域简图

## 3 建立数学模型与计算方法

两种湍流模型都是建立在  $k-\varepsilon$  湍流模型基础上的.模型的连续性方程和动量传递方程如下:

$$\frac{\partial (u_i)}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial (u_i)}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial (-\rho \overline{u_i' u_j'})}{\partial x_j}, \quad (2)$$

根据重正规化群(RNG)方法,给出  $k, \varepsilon$  方程分别为

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon, \quad (3)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - C_{2\varepsilon}^* \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (4)$$

在 Realizable 湍流模型中,  $k, \varepsilon$  方程分别构建成:

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon, \quad (5)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v\varepsilon}} \quad (6)$$

汽液界面的形状随着流动时间而改变, 其变化情况可以用VOF模型来追踪. 另外, 使用了增强壁面模型方法来进一步考虑壁面的影响. 该方法结合了双层模型和增强壁面函数来模拟近壁面区域流体流动. 上述方程的模型常数均与软件说明一致<sup>[2]</sup>.

利用Gambit软件所述的Pave方法在整个计算区域内生成网格<sup>[5]</sup>. 最终网格数大于 150000, 并且液膜部分网格远比其他部分要稠密. 转子的实际转速固定为 120 rpm, 因此当设定旋转坐标系的速度为 120 rpm时, 转子速度为 0, 蒸馏器壁面速度为 -120 rpm. 坐标为(0, 49.6)的固定点位于转子和蒸馏器壁面之间(见图 1). 液体切向和径向速度的初始值分别赋为 0.1 m/s和 0 m/s. 当流动时间为 1.0 s时, 计算均已收敛.

#### 4 模拟结果与讨论

计算中, 利用VOF模型追踪气液界面, 对于上述两种湍流模型, 液膜波动情况分别如图 3 和 4 所示. 由于液膜所占比例太小且整个流体区域可以三等分, 因此为看清规律, 图中仅截取部分流域显示. 由图可见, 在转子的头部, 两种情况下均出现了头波, 并且由于转子的拖曳作用, 位于转子前面的液膜明显增厚, 与刮膜式薄膜蒸发器内液膜流动情况非常一致<sup>[6]</sup>. 刮膜式分子蒸馏蒸发液膜流动应与刮膜式薄膜蒸发器内液膜流动非常相似, 上述模拟结果说明两种湍

流模型模拟出的刮膜式分子蒸馏蒸发液膜流动情况是有效的.

上述两种模型主要的不同点在于计算湍流黏度、Prandtl数的方法以及 $\varepsilon$ 方程中湍流的产生和消失项的不同<sup>[2]</sup>. 两种模型不同的推导方法, 必然导致不同的模型常数以及 $k$ 和 $\varepsilon$ 输运方程中出现不同的附加项及附加函数. 因此, 两种模型的模拟结果出现细微差别是可以理解的.

如图 3~7 所示, 通过比较两种模型下的模拟结果比较了两种湍流模型. 图 4 为固定点处流体流速随计算时间变化情况的比较. 除了 Realizable 模型下径向速度稍大一点外, 两种模型下切向速度和径向速度的变化都非常相似. 图 5 表明每种模型下都获得了很相似的速度等高线, 并且两者都模拟出了转子附近的对流流动. 但是 RNG 模型下的等高线较密, 说明该模型模拟得到的湍流强度较大, 但两者的这种相异是不太明显的.

两种模型均是根据 Reynolds 平均方法及 Boussinesq 假设推导得来的. 但是 Realizable 模型的一个缺陷是, 在我们的模拟情况下, 产生了非物理意义上的湍流黏度. 原因在于该模型在定义湍流黏度时考虑了平均转动情况的影响. 而 RNG 模型在 $\varepsilon$ 方程中引入了一个附加项, 显著增强了模拟快速剪切流的准确度. 并且, RNG 模型还考虑了涡流对湍流的影响, 从而提高了对涡流模拟的精确度. 因此, 在我们的模拟条件下, RNG 模型模拟的结果稍好一些, 也是完全合理的.

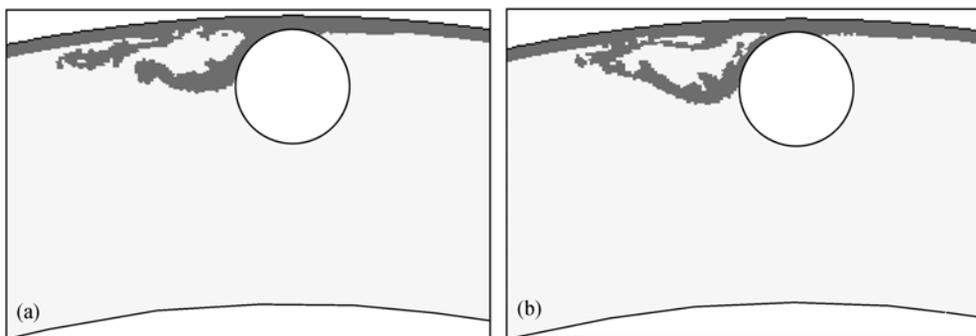


图 3 两种湍流模型下液膜波动情况的比较

(a) RNG 模型; (b) Realizable 模型

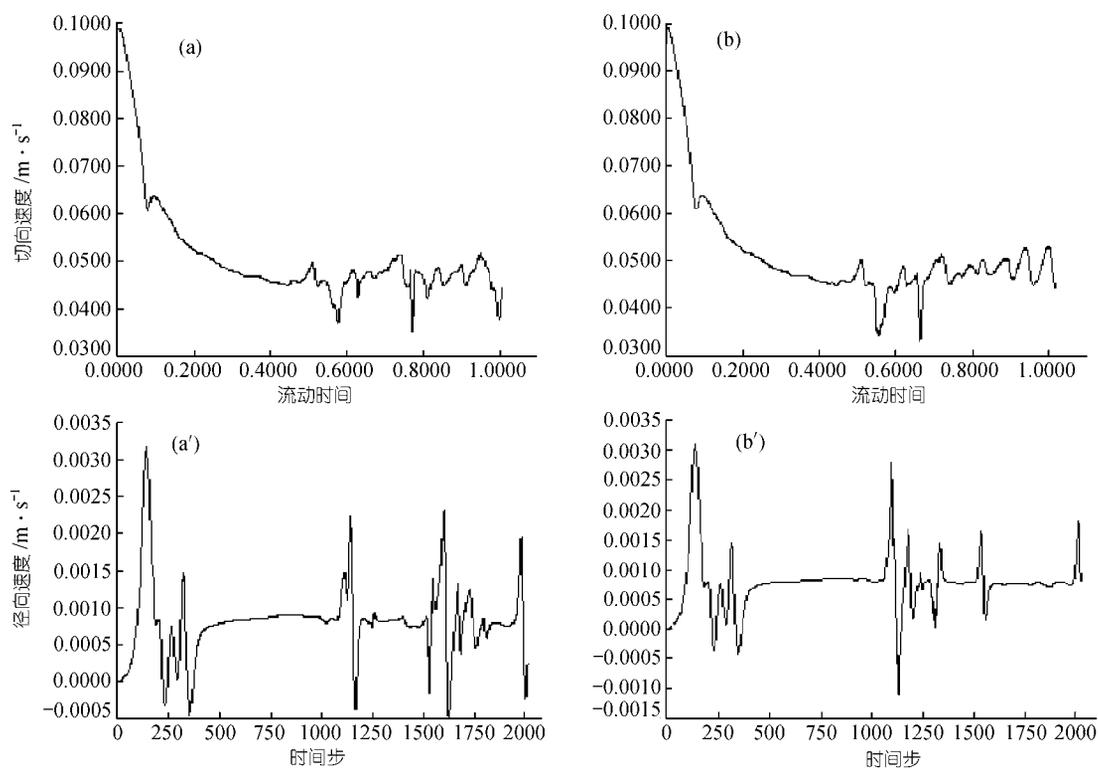


图 4 固定点处切向和径向速度随计算时间的比较

(a), (a') RNG 模型; (b), (b') Realizable 模型

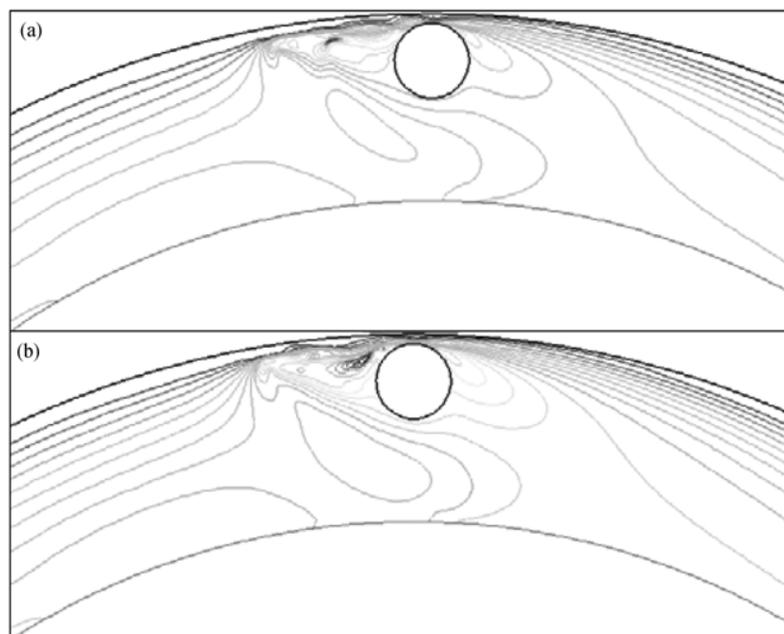


图 5 两种模型下速度等高线的比较

(a) RNG 模型; (b) Realizable 模型

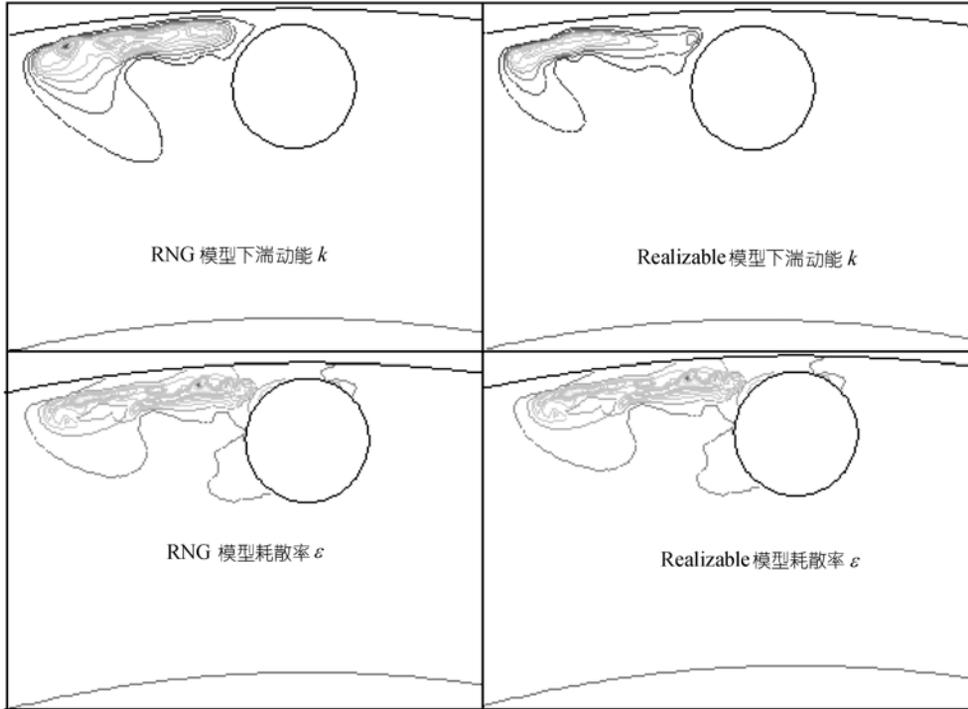


图 6 两种模型下湍动能( $k$ )及其耗散率( $\epsilon$ )等高线的比较

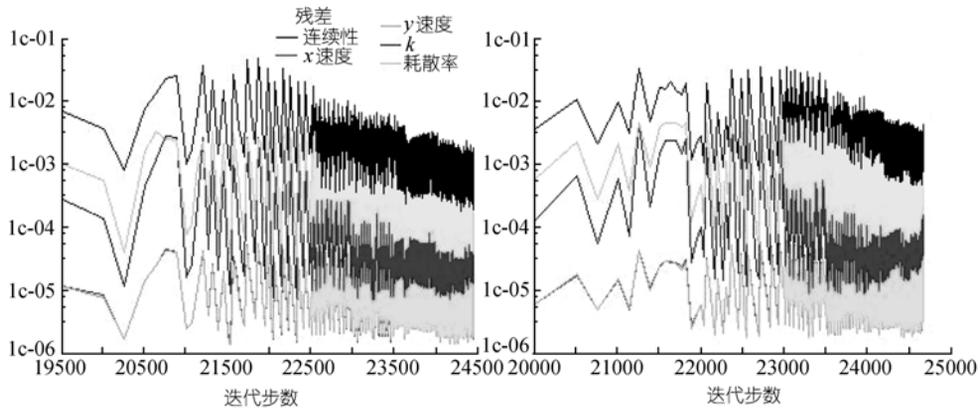


图 7 两种模型下迭代收敛性的比较

(a) RNG 模型; (b) Realizable 模型

湍动能及其耗散率大小表明了流体的微湍尺寸, 对于判断是否发生了湍流极为重要. 如图 6 所示, 湍动能及耗散率等高线分布表明湍流发生在转子前面. 并且两种模型显示了非常相似的湍动能及耗散率等高线分布.

图 7 比较了两种模型的迭代残差图, 说明两种情况下均有较好的收敛性. 两种模型下的计算时间惊

人地相似. 连续性的收敛情况没有其他的, 但当考虑到实际操作中液体会出现向外飞溅时, 这种不理想是可以理解的.

### 5 结论

在此之前的研究中, 我们在固定坐标系下比较了上述两种湍流模型的优越性, 发现 RNG  $k-\epsilon$  湍流

模型较  $k-\varepsilon$  湍流模型有优势<sup>[7]</sup>。但是在旋转坐标系下的研究显示, RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型的优越性并不十分明显。

较先前研究的另一个不同之处在于, 详细给出了两种湍流模型的数学方程。模拟结果显示, 两种模型均能较好地表达刮膜式分子蒸馏蒸发液膜的流场流动情况, 均可以用来进一步研究蒸发液膜的传递现象。

另外, 研究还提供了一种判断 CFD 模拟中模型优劣的方法, 即通过实际计算, 根据模拟结果来作出判断。

## 参 考 文 献

- 1 Batistell C B, Maciel M R W. Modeling, simulation and analysis of molecular distillators: Centrifugal and falling film. *Computers Chem Engng*, 1996, 20: S19~S24[DOI]
- 2 Fluent Incorporated. FLUENT 5 Tutorial Guide Volume 1~3, 1998
- 3 许松林, 徐世民, 干爱华. 天然产物分离的新技术——分子蒸馏技术. *中草药*, 2001, 32(6):562~566
- 4 Xu Songlin, Wang Junwu, Xu Shiming, et al. Purification of octacosanol by agitated short-path distillation. *Chinese J Chem Eng*, 2003, 11(4): 480~482
- 5 Fluent Incorporated. GAMBIT 2 Tutorial Guide Volume, 2001
- 6 Godau H J. Flow processes in the thin-film evaporators. *International Chem Eng*, 1975, 15(3): 445~449
- 7 向爱双, 许松林. CFD 模拟刮膜式分子蒸馏蒸发液膜流动中湍流模型. 第一届全国化学工程与生物化工年会, 2004