

射流混合器内气体湍流扩散过程的CFD数值模拟与实验研究

陈翼, 张林进, 叶旭初

(南京工业大学 CFD 技术工程模拟研究中心, 江苏 南京 210009)

摘要: 利用计算流体力学 CFD(Computational Fluid Dynamics)商业软件 CFX4.4 对二氧化碳与空气的射流混合过程进行数值模拟. 湍流模型采用标准 $k-\epsilon$ 模型和 RNG 模型, 模拟预测不同断面上的 CO_2 浓度分布, 并与实验结果进行比较. 结果表明, 模拟预测值与实验结果基本吻合, 也验证了 CFD 技术应用于混合扩散过程预测分析的可靠性; 靠近空气一侧的 CO_2 浓度普遍高于另一侧, 当 CO_2 平均浓度为 6% 时, 距射流出口 100 mm 剖面上的浓度极差达到 6%. 本研究中的气体混合湍流模型影响不明显. 采用标准 $k-\epsilon$ 模型分别对两种进气方式的射流混合器内部速度场、浓度场进行模拟分析, 发现 T 型射流混合器的混合均匀性比单边进气的射流混合器明显提高.

关键词: 计算流体力学; 射流混合; 湍流模型; 扩散

中图分类号: TQ051 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2007)05-0865-06

1 前言

氧气(空气)与可燃气体的混合过程在化学工业中广泛应用, 如乙烯在银催化下被氧化制环氧乙烷工艺中, 乙烯与空气、富氧空气或纯氧以一定的比例混合, 再通入置有银催化剂的反应室进行反应^[1-3]; 乙烯气相 Bayer 法^[4]制备醋酸乙烯的生产过程中, 乙烯和乙酸的混合气体从蒸发器顶部出来后, 经预热送入氧气混合器混合后再进入反应器; 合成氨工业的生产过程中, 天然气、保护蒸汽要经过氧气混合器与富氧空气进行混合, 喷向二段炉内^[5,6]. 因为可燃气体与氧气的混合易燃易爆, 在这类看似比较简单的气体混合设备中, 安全性问题就显得尤为重要, 有时还是核心问题和技术关键.

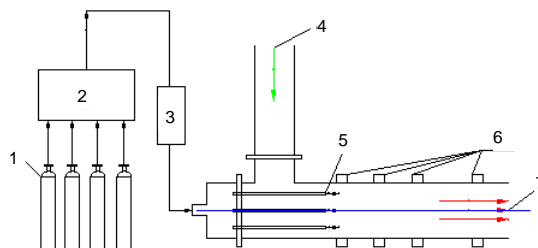
目前, 混合的安全性研究主要是在静态条件下对可燃气体的爆炸极限和氧浓度的测定以及影响因素的研究^[7-9], 张增亮等^[7]通过实验分析了可燃气体浓度与最大允许氧含量的关系以及可燃气体爆炸极限规律; 文献^[8]中设计了一个测定可燃气体爆炸极限的装置; 刘斌等^[9]对固定浓度下的最小氧浓度进行了测定和分析. 但对实际的混合过程、混合器内部的对流扩散问题研究较少, 而静态下得到的安全极限指数也未必能用于实际工程. 只有充分掌握混合器内气体混合特性及浓度分布规律, 再结合爆炸条件参数, 找出混合器存在的爆炸危险区域, 才能真正对混合器结构的优化改进提供理论依据.

本研究采用 CFD 通用软件 CFX4.4 来模拟射流混合器^[10]的内部流场和组分浓度场, 并通过冷模实验验证其可靠性, 探讨了湍流模型对 CFD 预测结果的影响规律, 分析了射流混合器内的速度场及浓度场分布特性, 指出

了现有混合器存在的不足, 为新型混合器的优化设计提供理论依据.

2 冷模实验装置与 CO_2 测量系统

考虑到安全性, 在实验中采用 CO_2 代替氧气. 图 1 为冷模实验流程图, 图 2 为混合器的结构平面示意图, 内有 6 根 CO_2 喷射管, CO_2 浓度测量孔的位置与内部喷射管出口的距离分别为 100, 300, 500, 850 mm. 实验中为保证 CO_2 供气的稳定性, 采用了 4 个钢瓶同时供气, 气体流量由管式流量计测量; 离心风机通过空气进口向混合器内鼓风, 风量采用热球式风速仪按等面积环测量; CO_2 浓度由芬兰引进的传感器在线测量系统测定, 如图 3 所示, 该传感器属于红外吸收型气体传感器, 当传感器探头感应到 CO_2 时, 信号模拟量输入单元 (LTM-8911), 通过智能模块把电信号放大后经 A/D 转换器, 最终把数值信号传到上位机, 并在上位机上显示出来, 整个在线测量系统的相对误差小于 2%.



1. CO_2 cylinder 2. Buffer tank 3. Flowmeter 4. Air entrance
5. Sprayer nozzle 6. Measuring point 7. Mixed gas outlet

图 1 冷模实验流程

Fig.1 Apparatus for cold model experiment

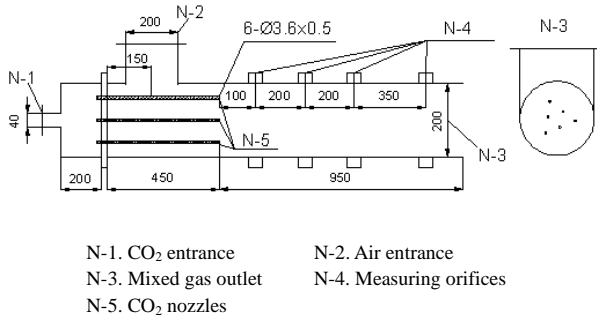


图2 混合器的几何结构与工艺尺寸
Fig.2 Configuration and dimensions of the mixer

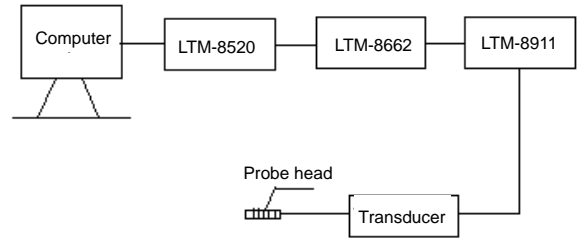


图3 CO₂在线测量系统
Fig.3 CO₂ on-line measuring system

3 CFD 技术基本理论与网格划分

3.1 湍流模型方程

连续性方程和动量方程^[11]分别表示为

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho U) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \rho U + U \cdot \nabla (\rho U) - \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} \nabla U) = -\nabla p' + \nabla \cdot [\mu_{\text{eff}} (\nabla U)^T] + B, \quad (2)$$

式中， ρ 为流体的混合密度(kg/m³)， τ 是时间(s)， U 为流体速度(m/s)， p' 是静压强(Pa)， μ_{eff} 为有效粘度(Pa·s)， $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_T$ ， μ 是流体的动力粘度， μ_T 为湍流粘度。对于标准 $k-\varepsilon$ 模型，假定 $\mu_T = C_{\mu} \rho k^2 / \varepsilon$ ； B 表示体积力(N/m³)，本研究中， $B=0$ ；上标 T 表示矩阵的转置。

对于标准 $k-\varepsilon$ 模型，湍流动能 k 和湍流耗散率 ε 的定义式分别为

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \rho k + \nabla \cdot (\rho U k) - \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] = P + G - \rho \varepsilon, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \rho \varepsilon + \nabla \cdot (\rho U \varepsilon) - \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] = C_1 \frac{\varepsilon}{k} \left[P + C_3 \max(G, 0) \right] - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (4)$$

其中， C_1, C_2, C_3 是模型常数：对于 $k-\varepsilon$ 模型， $C_1=1.44, C_2=1.92, C_3=0$ ；对于 RNG 模型， $C_1=1.42, C_2=1.68, C_3=0$ 。 P 和 G 的定义分别为

$$P = \mu_{\text{eff}} \nabla U \left[\nabla U + (\nabla U)^T \right] - \frac{2}{3} \nabla \cdot U (\mu_{\text{eff}} \nabla \cdot U + \rho k), \quad (5)$$

$$G = G_{\text{buoy}} + G_{\text{rot}} + G_{\text{res}}, \quad (6)$$

其中， G_{uoy} 是浮力项， G_{rot} 是旋转离心力项， G_{red} 是阻力项。

对于 RNG 模型，只是对标准 $k-\varepsilon$ 模型中的湍流耗

散率 ε 进行修正，引入 2 个模型参数如下：

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \rho k + \nabla \cdot (\rho U k) - \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] = P + G - \rho \varepsilon, \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \rho \varepsilon + \nabla \cdot (\rho U \varepsilon) - \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] = (C_1 - C_{\text{IRNG}}) \frac{\varepsilon}{k} \left[P + C_3 \max(G, 0) \right] - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k},$$

其中， $C_{\text{IRNG}} = \eta(1 - \eta/\eta_0)/1 + \beta\eta^3$ ，而 $\eta = (p_s/\mu_T)^{0.5}(k/\varepsilon)$ ， $p_s = \mu_{\text{eff}} \nabla U [\nabla U + (\nabla U)^T]$ ， $\eta_0 = 4.38, \beta = 0.015$ ^[12]。

3.2 质量组分扩散方程

二氧化碳组分扩散质量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \rho_{\text{CO}_2} + U \cdot \nabla (\rho_{\text{CO}_2}) = \nabla \cdot (D_{\text{eff}} \rho_{\text{CO}_2}),$$

式中， ρ_{CO_2} 表示 CO₂ 组分的分密度； $D_{\text{eff}} = D_{\text{mol}} + \mu_T / Sc$ ， D_{eff} 为有效扩散系数， D_{mol} 是分子扩散系数， $Sc = \nu / D$ (ν 为流体的运动粘性系数， D 为扩散系数)。

3.3 数值建模与网格划分

图4是本研究的实验模型的几何示意图，以主管道轴线为 Z 轴，喷管进气剖面中心为原点，侧管道轴线以及所有测量孔都在 YOZ 平面上。相应的网格分布如图5, 6所示，其中图6是出口断面上的网格分布图。整个网格分布最密的地方出现在侧管与主管相连处，最小网格为 0.3 mm，总网格数为 310000。

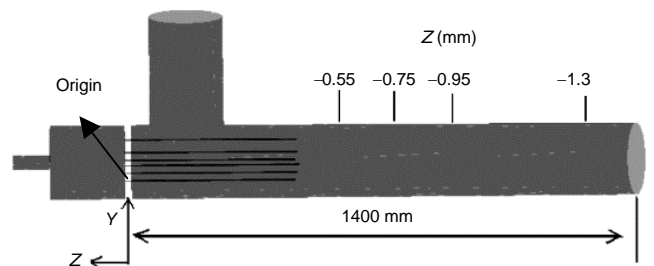


图4 模型的几何示意图
Fig.4 Geometry of the model

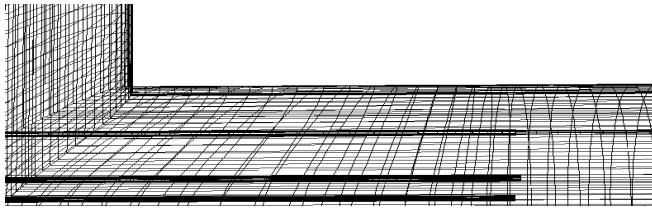
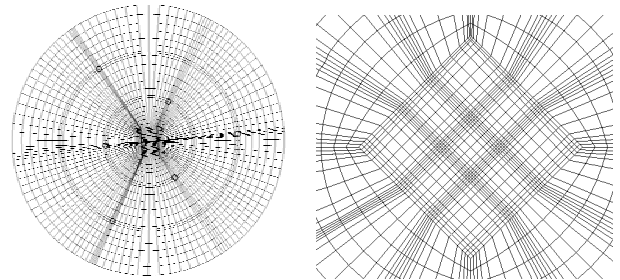


图 5 模型的局布网格示意图
Fig.5 Grid of the model



(a) Whole cross section (b) Central part of the grid
图 6 出口断面上网格的示意图以及局部放大图
Fig.6 Grid at the outlet

4 结果分析

考虑到本研究工业化氧气-乙烯混合器装置中氧气实际操作浓度为 6%~8%，为适应预测分析需求，选定 CO₂ 平均浓度 $C_{CO_2,ave}$ 为 6%，8% 作为实验条件。整个实验过程都在室温 (25 °C) 下进行，控制空气流量 V_{air} 为 293.9 m³/h，管道流动的雷诺数 $Re > 10^4$ 。

4.1 CO₂ 浓度分布规律的比较

通过冷模实验，测得 4 个断面在中心线上的 CO₂ 浓度分布；在同等条件下对混合器内的湍流场、CO₂ 混合浓度场进行了 CFD 数值模拟(分别采用上述的 2 种湍流模型)。实测和预测出的 CO₂ 浓度分布规律如图 7, 8 所示 (CO₂ 平均浓度为 6% 和 8%)。图中 d 表示各断面离射流出口的距离， x 表示距管轴线的垂直距离，以侧管接入方向为正方向。

从图 7, 8 可以看出，在 4 个断面的中心线上，无论是采用 RNG 模型还是 $k-\epsilon$ 模型，CO₂ 浓度变化规律的预测结果与实测值吻合较好，虽然 2 个模型的预测结果在某些点上有差异，但误差不大，只在紧靠 CO₂ 喷射管出

口的第一个断面上个别点的实测值与预测值的误差高达 20% 左右，这可能是 CO₂ 传感器受到 CO₂ 射流的干扰造成的，由图 9 就很容易理解该现象。图 9 是传感器探头与喷管出口位置的示意图，当传感器向前推进时，必然会扰动射流核心区的高浓度 CO₂。传感器对 CO₂ 浓度的干扰情况如图 10，传感器的干扰会使局部测得的 CO₂ 含量偏高。总的来说，数值模拟能比较准确地反映实际混合情况。

以上实验证明，采用 CFD 技术对射流型的气体混合器形成的组分浓度场的预测是可靠的，从而说明了本研究中采用的湍流模型、扩散等模型的正确性。

从图 7, 8 中 CO₂ 浓度的分布情况来看，靠侧管一边的浓度明显高于另一侧，当 CO₂ 平均浓度为 6% 时，第一剖面 ($d=100$ mm) 上浓度极差达到 6%，这主要是由空气气流的分布不均造成的。图 11 为 YOZ 平面上的速度矢量图，可知在混合器两侧形成了一对反向涡流，原因主要是侧向进空气引起的，侧向进入的流体在惯性作用下，会一直流向对面，从而会在侧管附近产生“真空”，导致流体回流形成第一个涡流；而侧向流入的流体在向

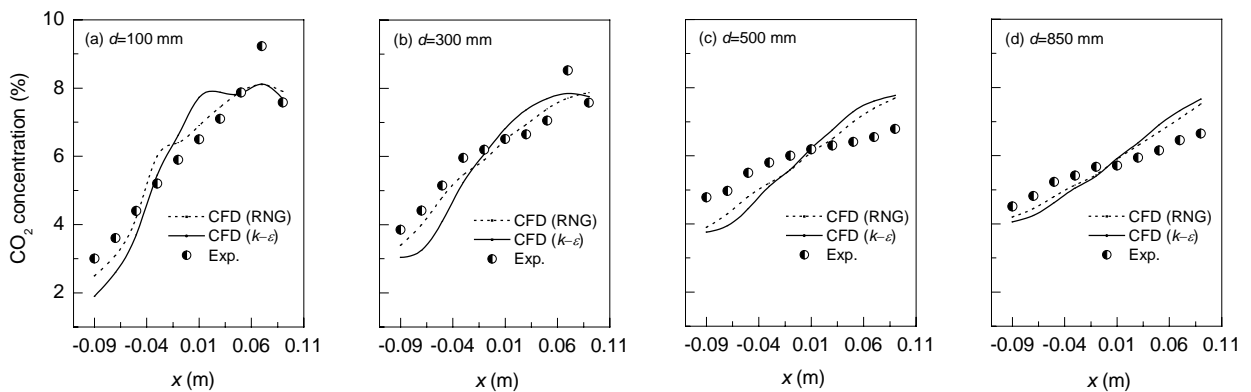


图 7 CO₂ 流量 18 m³/h、平均浓度 6% 及空气流量 293.9 m³/h 时实测值与模拟预测值之间的比较
Fig.7 Measured CO₂ concentrations vs. predicted results by simulation under $V_{CO_2}=18$ m³/h, $C_{CO_2,ave}=6\%$, $V_{air}=293.9$ m³/h

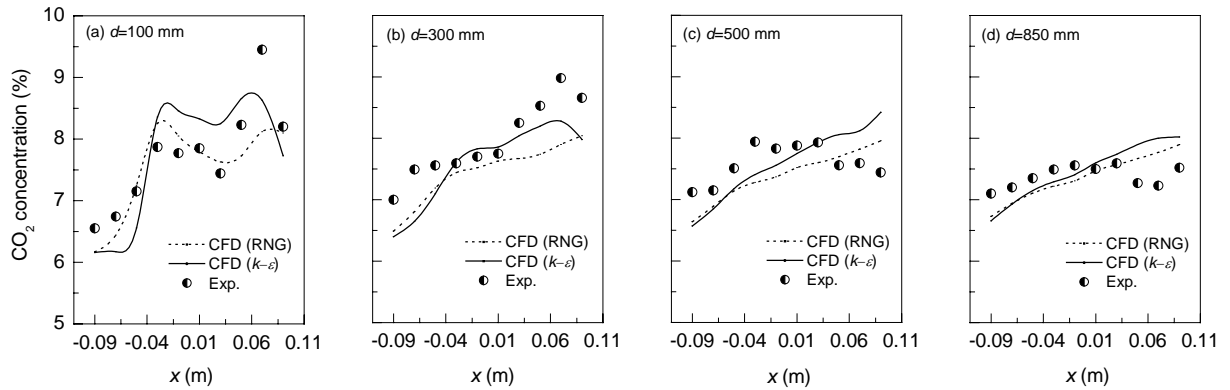


图8 CO₂流量 24.8 m³/h、平均浓度 8%及空气流量 293.9 m³/h时实测值与模拟预测值之间的比较
 Fig.8 Measured CO₂ concentrations vs. predicted results by simulation under $V_{CO_2}=24.8\text{ m}^3/\text{h}$, $C_{CO_2,ave}=8\%$, $V_{air}=293.9\text{ m}^3/\text{h}$

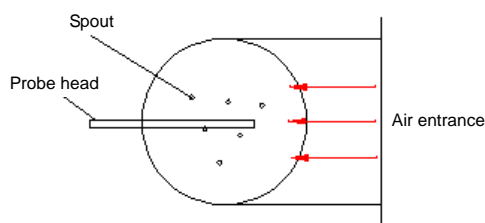


图9 传感器测量示意图
 Fig.9 Illustration of sensor measuring

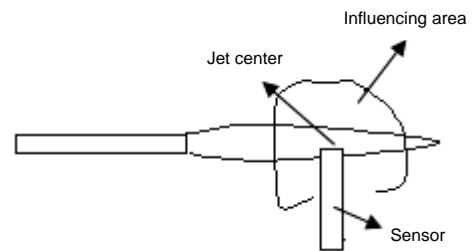


图10 传感器对二氧化碳射流核心干扰示意图
 Fig.10 Illustration of sensor interference at the jet center

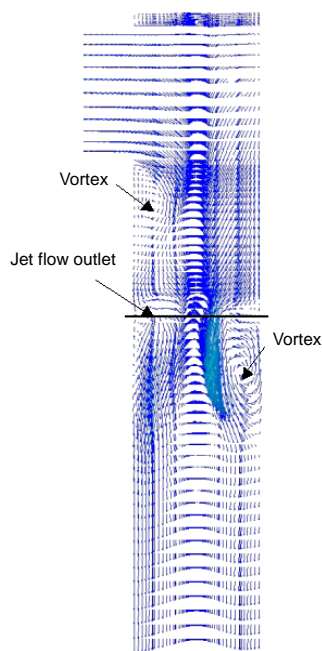


图11 YOZ平面上的速度矢量图
 Fig.11 Distribution of velocity vectors in YOZ plane
 ($V_{CO_2}=18\text{ m}^3/\text{h}$, $V_{air}=293.9\text{ m}^3/\text{h}$)

前运动的过程中，受对面管壁的反射，改变流动方向，再与射流喷出的混合气体作用，形成右侧涡流。从图中可以看出，中心线和壁面处气流流速相对较小，这是由

射流喷管的位置及侧流共同作用的结果，6个喷口分布在2个同心圆上(参见图9)，混合器中心处无喷管，侧流的流动如“之”字，中心又无射流，形成局部“真空”，即回流。壁面流体流速小是由边界层效应决定的。

4.2 对称型侧向射流混合器的流场模拟

为了解决侧向射流混合过程中由于气流分布不均而造成的浓度分布不均问题，设计了一个对称侧向射流混合器，如图12，其结构尺寸与原模型相同，只是由原来的单向侧管进空气变为对称进气，在保证总气体流量不变的情况下，对这种新型混合器的内部流场进行模拟分析，并与原模型的预测结果进行比较。

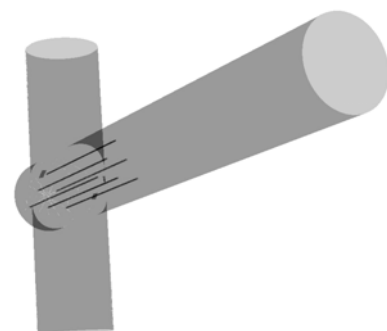


图12 对称射流混合器的几何示意图
 Fig.12 Geometry of the T-mixer

图 13 为对称射流混合器中心剖面上的速度矢量图, 在气流混合过程中, 基本消除了空气气流分布不均的现象, 虽然在 CO₂ 喷射流出口处形成了一对小涡, 但这对涡流具有对称性, 所以不会造成空气分布不均, 反而会促进混合的进行。

图 14 为 CO₂ 流量 18 m³/h, 空气流量 293.9 m³/h 时对称模型与原模型模拟预测的 CO₂ 浓度分布. 由图可知, 对称射流混合器的混合效果明显得到提高, 在距离 CO₂ 喷口 300 mm 处混合已经比较均匀, 这也验证了单向射流混合过程中的混合不均主要是由于侧向射流引起的。

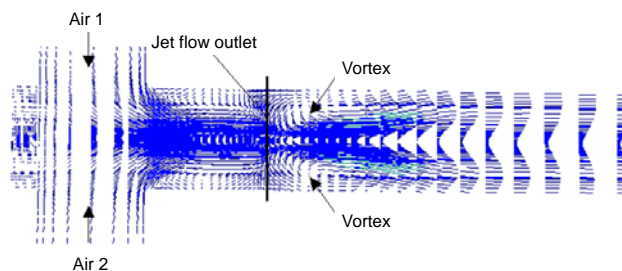


图 13 中心剖面上的速度矢量图
Fig.13 Distribution of velocity vectors in the central section
($V_{CO_2}=18\text{ m}^3/\text{h}$, $V_{Air\ 1}=146.9\text{ m}^3/\text{h}$, $V_{Air\ 2}=146.9\text{ m}^3/\text{h}$)

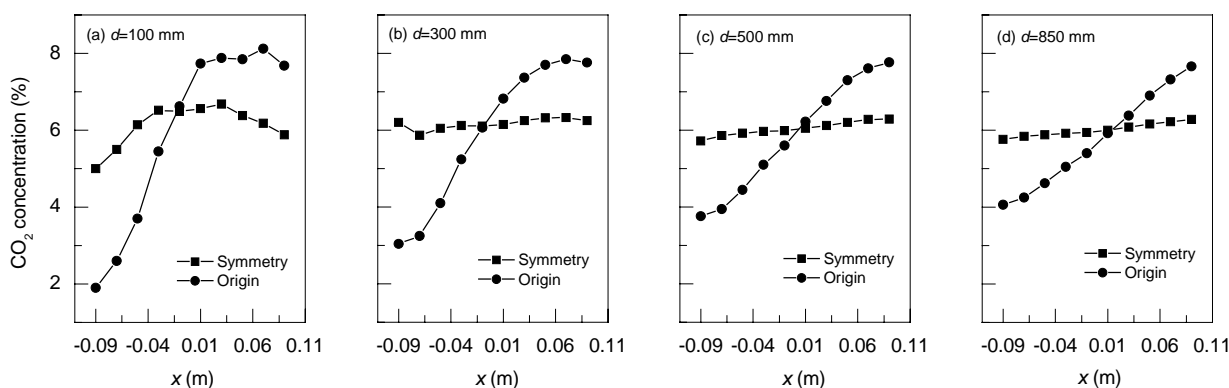


图 14 相同流量下对称模型与原模型模拟预测的浓度分布图
Fig.14 CO₂ concentration distributions by simulation in different experimental models ($V_{CO_2}=18\text{ m}^3/\text{h}$, $V_{air}=293.9\text{ m}^3/\text{h}$)

5 结论

(1) 利用 CFD 模型对 CO₂ 与空气的射流混合过程进行数值模拟, 实测值与 CFD 模拟值吻合较好, 个别点的误差在 20% 左右, 主要是测量传感器的空间分辨率造成的, 验证了 CFD 技术在分析射流式气体混合中的可靠性。

(2) 在射流式气体混合过程模拟中, RNG 和 $k-\epsilon$ 湍流模型影响不明显。

(3) 单边进空气时, 在混合区的两侧形成一对反向涡流, 造成靠近空气的一边 CO₂ 浓度普遍偏高, 混合不均匀, 当 CO₂ 平均浓度为 6% 时, 距射流出口 100 mm 剖面上浓度极差达 6%。

(4) 双边对称进空气时, 可以消除反向涡流, 使气流速度场、CO₂ 浓度场的混合均匀性得到明显提高。

参考文献:

[1] 沈景铄. 我国环氧乙烷/乙二醇生产技术现状和发展对策 [J]. 当代石油石化, 2001, 9(5): 15-18.
[2] 沈菊华. 国内外环氧乙烷生产技术及市场分析 [J]. 化工技术经济, 2005, 23(11): 20-27.

[3] 李翠清, 任晓光, 刘守义. 环氧乙烷反应器工况模拟 [J]. 石油化工高等学校学报, 2002, 15(4): 78-80.
[4] 毛阿利. 醋酸乙烯的生产消费与技术进展 [J]. 化学工业与工程技术, 1998, 19(3): 22-28.
[5] 翟玉雷, 陆奇志. 氧气混合器结构简介及运行总结 [J]. 中氮肥, 2004, (1): 53-54.
[6] 李琼玖, 叶传湘. 二段转化炉气体混合器的选择 [J]. 合肥设计, 1997, 35(3): 26-28.
[7] 张增亮, 李革梅. 可燃气体的爆炸极限和最大允许氧含量的测定及影响因素研究 [J]. 湘潭师范学院学报(自然科学版), 2006, 28(3): 67-70.
[8] Smith H N, Valley P, Woolf M A, et al. Apparatus for Determining the Explosion Limits of a Flammable Gas [P]. US Pat.: 4140004, 1979-02-20.
[9] 刘彬, 谭迎新, 傅志远. 可燃性气体(蒸汽)最小氧浓度的测定 [J]. 石家庄铁路工程职业技术学院学报, 2004, 3(4): 35-38.
[10] 黄强华. 氧气混合器顶盖穿孔破裂失效分析 [J]. 中国锅炉压力容器安全, 1995, 13(2): 23-24.
[11] 章梓雄, 董曾南. 粘性流体力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1998. 274-279.
[12] 郭尚群, 赵坚行. RNG $k-\epsilon$ 模型数值模拟油雾燃烧流场 [J]. 航空动力学报, 2005, 20(5): 807-812.

CFD Analysis and Experimentation on Gas Turbulent Mixing Process in a Jet Mixer

CHEN Yi, ZHANG Lin-jin, YE Xu-chu

(*CFD Research Centre of Engineering Simulation, Nanjing University of Technology, Nanjing, Jiangsu 210009, China*)

Abstract: The carbon dioxide–air jet mixing process is simulated with commercial CFD software. The simulated concentrations of CO₂ in different section planes with the standard $k-\varepsilon$ model and the RNG turbulent model are compared with experimental data. The results indicate that the numerical results agree well with the experiments, CFD simulation is reliable in predicting the turbulent diffusing process, the CO₂ concentration by the side of the lateral-inlet is generally higher than the other side, and the concentration range in the first section plane ($d=100$ mm) reaches 6%, while the CO₂ average concentration is 6%. The influence of turbulent model on CFD simulation is not significant in gas jet mixing process. The velocity field and concentration field of a T-type symmetrical jet mixer and the original single-lateral-inlet jet mixer are then simulated with the standard $k-\varepsilon$ model, showing that the uniformity of the T-type symmetrical jet mixer is much improved as compared with the original single-lateral-inlet jet mixer.

Key words: computational fluid dynamics; jet mixing; turbulent model; diffusion