12th 流体力学与流体动力学国际及52nd 全国会议（FMFP 2025）论文集，2025年12月19日至21日，印度艾哈迈达巴德Nirma大学。

FMFP2025–CFD–052

颗粒动量对旋流燃烧器内等温流场的影响

Madan Lal Mahato 和 Nitesh Kumar Sahu*

印度理工学院（ISM）丹巴德分校燃料、矿物与冶金工程系，贾坎德邦 - 826004，印度。*通讯作者：nitesh@iitism.ac.in

注：本文已提交至《2025年流体力学与流体动力学会议论文集》，目前正在审稿。发表后，可在《会议论文集讲义》中查阅。

© 2025 Madan Lal Mahato 和 Nitesh Kumar Sahu。本文根据知识共享署名—非商业性使用 4.0 国际许可协议（CC BY-NC）发布。
https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/

摘要

本文采用稳态CFD模拟，研究固定入口旋流数为 0.67 时，颗粒对实验室规模旋流燃烧器内等温流动的影响。无颗粒条件下的燃烧器几何结构和基准条件取自 Taamallah 等 [1], , 但作了简化。本研究通过速度边界条件使流动产生旋转，而在 [1], 中，则在几何结构中内置旋流器以实现相同效果。采用剪切应力输运（SST）$k–\omega$ 模型，即基于涡黏性的雷诺平均纳维–斯托克斯方程方法，对湍流进行建模。综合模型通过 [1]中的实验轴向速度数据进行验证。采用离散颗粒模型（DPM）进行了两次模拟，一次使用 75 m 颗粒，另一次使用 100 μm 颗粒，以分离颗粒运动对无燃烧旋流燃烧器流动的影响。分析结果显示，中心回流区（CRZ）显著向下游移动。这一效应可能会显著影响粉体颗粒反应器中煤火焰的稳定性。

关键词：旋流燃烧器；中心回流区；离散颗粒模型；等温流动。

1. 引言

旋流稳定流广泛应用于燃气轮机、工业燃烧器和炉窑，以增强火焰锚定和混合。这类流动的一个显著特征是形成中心回流区（CRZ）：沿轴线分布的低速区，可使高温气体和活性组分回流至上游[2]。实际应用中，CRZ有助于稳定火焰并拓宽贫燃熄火极限 [3]。在气流床反应器中，CRZ可延长颗粒的停留时间，从而提高反应器性能[4]。然而，大多数研究都聚焦于反应环境中的这种流动结构，而众所周知，反应环境会调制流场[1,3,5,6]。因此，了解非反应流和分散相等温流中CRZ的形成，对于燃烧器设计也十分重要。

2. 文献综述与研究目标

多位研究人员致力于理解旋流中中心回流区（CRZ）的特性。Syred [7] 指出，在反应性气体流中，临界旋流数约为0.6；超过该值便会发生涡破裂。Chakroun [8] 在气相反应环境中考察了当量比的影响，发现当量比增大时，CRZ尺寸会减小。Sahu 等 [4] 研究了质量流量和压力对气流床气化炉中CRZ的影响。他们报告称，所研究的两个参数增大后，CRZ尺寸均会减小。Sahu 等 [9] 考察了粉碎颗粒尺寸对气流床气化炉中CRZ的影响，发现随着颗粒尺寸变化，CRZ尺寸会减小。然而，众所周知，反应环境会调制流场。因此，为了单独分离颗粒尺寸的影响，鉴于相关研究十分有限，我们开展了本研究。

3. 研究方法

3.1 计算建模

我们参考 Taamallah等人[1], 所示的实验室尺度旋流燃烧器几何结构，建立了计算模型，如图 1 所示。该结构包括一段直入口管，随后突然扩张至圆柱形腔室，并在入口处通过速度边界条件使流体产生旋转。入口段直径为 0.038 m，长度为 0.045 m，而主腔室的直径为

0.076 m，长度为 0.225 m。 基流条件列于表 1。流动的入口雷诺数为~20,000。采用雷诺平均纳维–斯托克斯方程方法，将流场建模为稳态、不可压缩、等温流动，并使用剪切应力传输（SST） $k–\omega$模型进行湍流封闭。仿真使用 ANSYS Fluent 2024R2 商业软件完成。

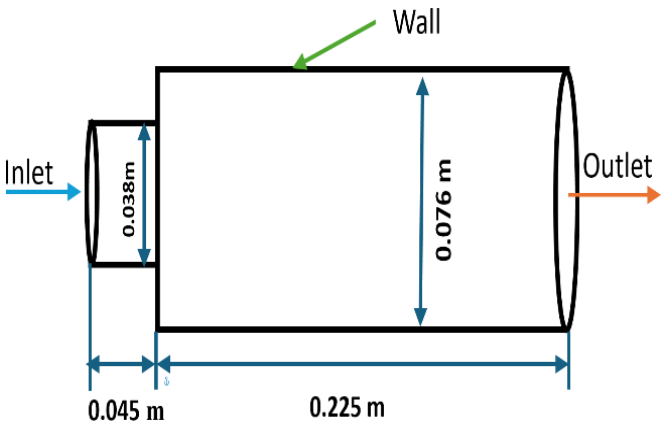

图 1：燃烧器几何结构示意图（Taamallah 等[1]）。

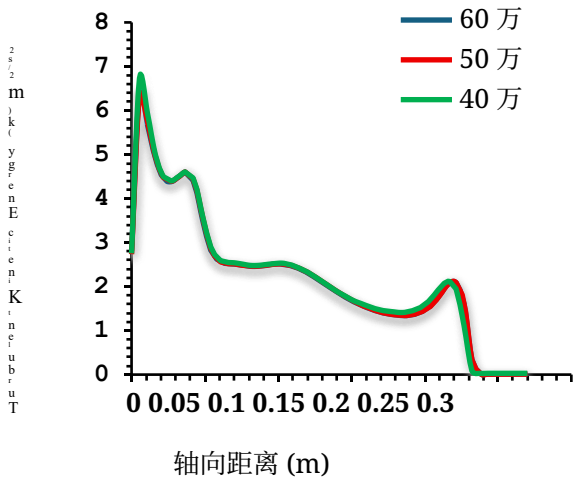

图 2：网格无关性研究

表 1：基准工况的运行条件 [1]

速度（m/s）	压力（bar）	温度（K）
8.2	1.0	300

3.2 边界条件

在入口施加大小为 8.2 m/s 的均匀速度分布，并采用速度入口边界条件（b.c.）。出口设为环境压力，并采用压力出口边界条件。在壁面施加无滑移边界条件（b.c.）。

3.3 求解器设置

对流项采用基于压力的稳态耦合求解器和二阶迎风离散格式，扩散项采用中心差分格式。压力插值采用 PRESTO 格式。所有物理量的缩放残差均迅速降至 $\sim 10^{-6}$ 以下。通过监测计算域内两个点处轴向速度随迭代次数的变化，确认了计算结果的收敛。

3.4 网格无关性研究

通过比较三套逐步加密网格上的湍动能（k）轴向变化，进行了网格无关性研究，如图 2 所示。这些网格中的所有单元均为六面体。两套较精细网格所绘变化曲线之间的差异可以忽略，因此我们选择包含 50 万个六面体单元的网格进行研究。所选网格的正交质量和长宽比如图 3 所示，分别为 0.52 和 6.7。距壁面最近的第一层网格单元的 y^+ 约为 20。

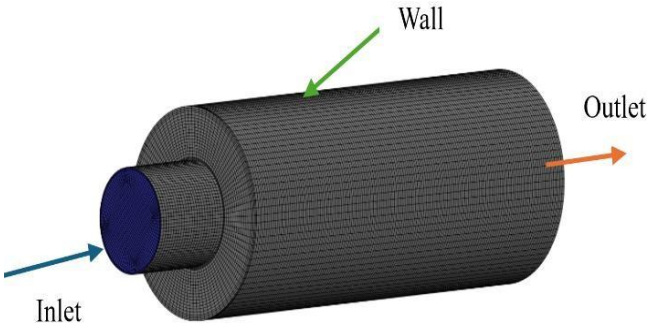

图 3：包含 50 万个六面体单元的计算网格。

3.5 基流与离散颗粒模型的验证研究

我们将计算得到的轴向速度分布径向变化与 [1] 中的实验数据进行比较。在两个轴向位置 x/R = 0 和 0.5 处的比较结果如图 4 所示，其中 x 表示距扩张段的距离，R= 0.038 m。计算结果与实验结果吻合较好。因此，我们将模型扩展用于进一步研究。

在基流模型中加入离散颗粒模型（DPM），以研究煤粉颗粒的影响。颗粒体积分数低于 1%，这是煤反应器的典型特征 [10]。DPM 是一种众所周知的模型，可用于模拟分散相对流体流动的影响 [11]。通过双向耦合考虑颗粒与气流之间的相互作用。采用稳态离散颗粒模型方法模拟两个新工况：一个工况中的离散颗粒直径为 70 μm，另一个工况中的离散颗粒直径为 100 μm。颗粒密度为 1000 kg.m^3，根据低于 1% 的体积分数，注入速率设为 0.093 kg/s。每次模拟均追踪 6000 个颗粒，并使用离散随机游走法考虑湍流扩散

模型。下文将讨论颗粒对流场的影响。

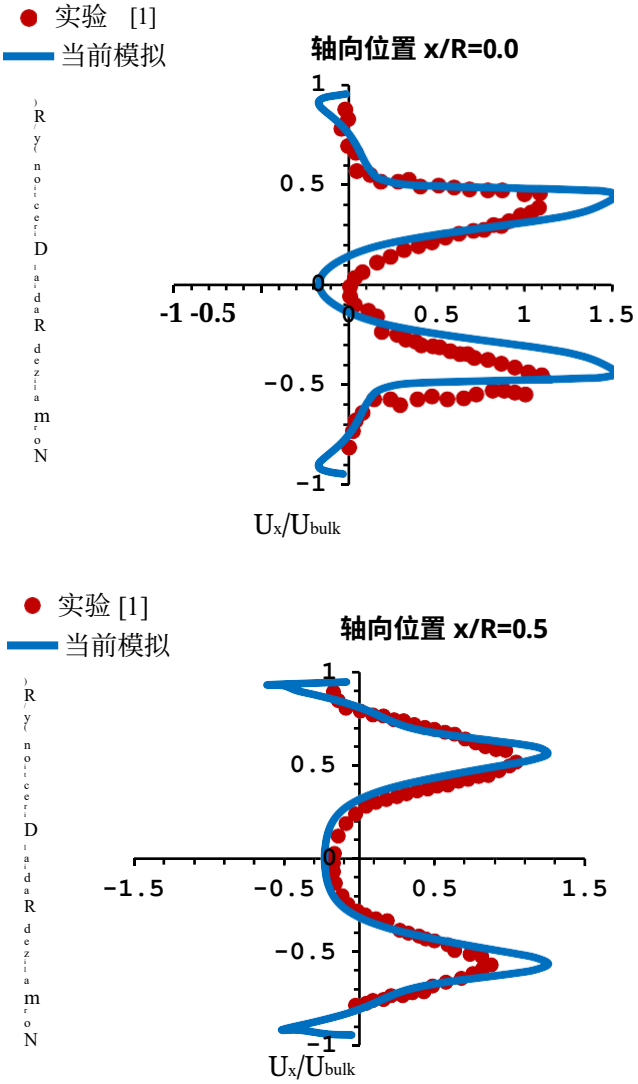

图4：轴向速度径向剖面与实验数据的对比，[1] 在 x/R = 0.0 和 0.5 处。

4. 结果与讨论

从图5中三个模拟工况的轴向速度等值线可以看出颗粒对中心回流区的影响。A
与无颗粒的基准工况相比，两个含颗粒工况中的中心回流区位置均明显向下游偏移。这一偏移可归因于颗粒传递给流动的动量。

图6显示了燃烧室内轴向速度的轴向变化。颗粒的存在增强了中心回流区（CRZ）内负轴向速度的强度，但使其向下游偏移。100 μ微米颗粒引起的偏移幅度大于75 μ微米颗粒，这表明具有更高惯性的较大颗粒对中心回流区位置的影响更为显著。然而，本文未研究涡破裂的细节，因为重点

对 CRZ位移的影响仍然存在。与基准工况相比，100 μm 颗粒工况下观察到 0.17 m 的偏移，而 75 μm 颗粒工况下观察到 0.145 m 的偏移。

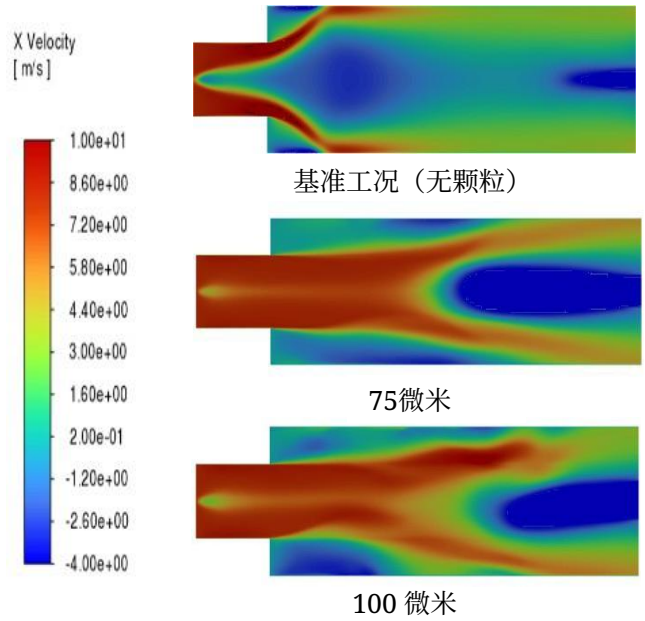

图 5：轴向速度等值线。

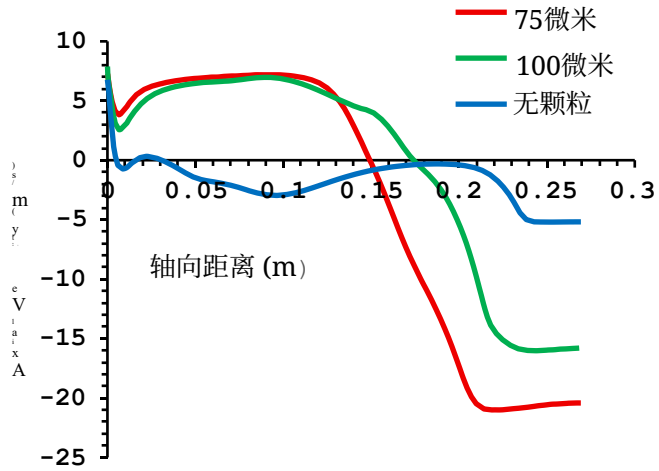

图6：轴向速度的轴向变化。

5. 结论

本研究通过数值方法考察了实验室规模燃烧室内等温旋流中颗粒对所形成的中心回流区的影响。该流动的入口旋流数为0.67。研究建立了一个综合模型，其中包括SST k-ω湍流闭合模型、用于颗粒相互作用的离散颗粒子模型以及其他子模型。对模拟结果的分析表明

与无颗粒情况相比，中心回流区的位置发生了显著偏移。偏移程度还受到颗粒尺寸的影响。这些发现对于煤粉燃烧器设计尤为重要，因为颗粒动量可能改变火焰稳定位置

致谢

本研究ได้รับ IIT-ISM Dhanbad 的 Faculty Research Scheme（FRS）资助；资助编号为 FRS (217)/2024-25/FMME。

术语表

CRZ 中心回流区 --*DPM* 离散颗粒模型 --*SST k–ω* 剪切应力输运 *k–ω* 模型 -- *Re* 雷诺数 -- ρ 密度 [kg/m^3] *S* 旋流数 --*U* 轴向速度 m/s *CFD* 计算流体动力学 -- *k* 湍动能 m^2/s^2

参考文献

[1] S. Taamallah 等人，Combustion and Flame，153(3)，2008，第 616–633 页。 [2] N. K. Sahu、A. Dewan 和 M. Kumar，《加压切向喷射燃气反应器中的流场转变特征》，Thermal Science and Engineering Progress，41，2023，101811 页。 [3] Syred, N.，Prog. Energy Combust. Sci.，32，2006，第 93–161 页。[4] N. K. Sahu、A. Dewan 和 M. Kumar，《运行条件之间的复杂相互作用决定了切向燃烧气化炉中的流场转变和最佳转化》，Energy，252，2022，123975 页。 [5] Oschwald, R.、Smith, J. J. 和 Habiballah, M.，Journal of Propulsion and Power，2006。 [6] Xue, D.、Sommerfeld, M. 和 Al Taweel, S.，International Journal of Multiphase Flow，2014。 [7] N. Syred 和 P. N. B. Beer，《旋流燃烧：综述》，*Combustion and Flame*，23(2)，1974，第 143–201 页。[8] N. W. Chakroun、S. J. Shanbhogue、S. Taamallah、D. Michaels、G. Kewlani 和 A. F. Ghoneim，《用于准确大涡模拟及预混旋流富氧燃烧动态特征尺度化的简化动力学机理研究》，Combustion Science and Technology，193(7)，2021，第 1099–1119 页。 [9] N. K. Sahu、A. Dewan 和 M. Kumar，《煤进料粒径对切向燃烧气化炉影响的计算研究》，Combustion Science and Technology，196(14)，2024，第 2938–2957 页。 [10] H. Barik、M. Liu 和 D. Chen，“基于 CFD-DPM 的流化床焦炭气化数值模拟”，Canadian Journal of Chemical Engineering，卷 101，第 1 期，第 421–433 页，2023 年。 [11] N. M. Zahari、N. A. Abu、S. Hasan 和 K. Mahat，“在流体流场”，《AIP会议论文集》，第2030卷，第1期，第020234页，2018年。