

RSM-Barth 模型在旋风分离器性能预测中的应用

任晓庆 赵 峰

(青岛市计量技术研究院, 山东 青岛 266000)

摘要: 利用 RSM 瞬态法求解旋风分离器的内流场分布特性, 结合 DPM 算法对入射颗粒稳态模式下的分级效率进行计算, 得到了一种具有快速、准确预测旋风分离器性能的模型, 并结合经典分离理论, 系统地研究了该模型同实验值之间的误差和修正方法。研究结果表明, 稳态颗粒模式计算得出的 D50 值通过 Barth 公式修正后, 其预测结果与实验之间的误差在 $\pm 5\%$ 以内, 精度优于瞬态颗粒注入算法, 并且较之节约了 82% 的仿真时间。有效地提高了仿真在旋风分离器结构设计过程中的适用性, 克服了瞬态颗粒注入法计算时间长、与实验值之间偏差较大的缺点。

关键词: 离心分离; 两相流; 计算流体力学; 模型; 分级效率

旋风分离器在空气净化、药物制备和环境监测等诸多领域具有广泛的应用。当粉尘颗粒进入旋风分离器受离心效应的影响, 在被甩出主流区后, 会与旋风分离器的壁面接触, 然后沿着壁面滑落至底部料斗内, 进而被收集。

自 19 世纪末旋风分离器问世以来, 旋风分离理论得到了长足发展, 具有典型代表的有转圈理论、平衡轨道理论和边界层分离理论模型等, 其之间最主要的区别在于 D50 的预测方法。为了能够通过仿真实现更为精确的预测, 王博等人采用瞬态仿真的方法, 对旋风分离器内流场和颗粒的注入、分离过程进行求解, 同时对比了不同湍流模型对强旋流场的解算精度, 得出了 RSM 湍流模型在求解旋风分离器流场时适用性较好的结论。另外 Schiller L 等人进行了颗粒碰撞理论研究, 得出了壁面形状和恢复系数之间的规律。牟春宇在进口边界选取不同位置射入粒子, 通过统计颗粒的捕集数量进行加权处理, 来均化颗粒受湍流脉动的影响。Wan G 对瞬态模拟的时间步长和网格节点数进行了研究, 得出瞬态仿真时间步长控制在 10~4s 量级的结论。

国内外普遍采用瞬态法对流场和颗粒轨迹进行耦合求解以提

高计算精度, 为了能够准确捕捉颗粒的位移状态, 通常都会采用极小的时间步长, 使得计算求解时间显著增加, 这对于追求设计效率的工程应用而言, 难以满足需求。

本文将颗粒的轨迹跟踪和流场求解分离开, 首先获得瞬态下的流动分布规律, 其次通过稳态颗粒注入法获得颗粒的分级效率和 D50 值, 最后通过 Barth 方程修正分级效率曲线, 获得了较为准确和稳定的颗粒分离规律, 可以在工程应用过程中提高结构性能评估效率和准确度。

一、数值模拟

(一) 几何模型与网格划分

本文在进行验证时, 为了保证方法的可重复性, 分别采用了不同文献中所使用的结构原型 A 和 B, 但在以下前处理的示意过程中, 仅使用其中之一为代表进行说明。

经过网格无关性验证, 最终确定体网格总数量为 38 万, 体网格类型采用多面体, 体单元过度因子为 1.1, 近壁面边界层数为 5, 层单元过度因子为 1.2。两种旋风分离器的具体结构参数置于表 1 之中。

表 1. 旋风分离器结构尺寸 (单位 mm)

结构	柱段直径 D	排气管直径 De	锥端底部直径 d	柱段高度 h_1	锥段 h_2	排气管置入深度 S	入口宽度 a	入口高度 b
A	290	145	107.3	435	1160	145	145	58
B	31	15.5	19.4	31	46	15.5	12.5	5

(二) 仿真参数设置

1. 材料与物性

由于该仿真属于多相流问题, 包括颗粒相和气相。本文在模拟中采用的物性参数分别参照文献, 并假设计算的过程中气体温度与密度不发生变化。

2. 颗粒运动与湍流模型

对颗粒相的跟踪分为欧拉法与拉格朗日法, 前者侧重密相颗粒流动问题, 而后者适用稀相颗粒流动问题。由于本文处理的实际问题, 颗粒浓度保持在 10% 以下, 因此使用拉格朗日法比较合适, 即采用 DPM 模型对颗粒的运动进行模拟。

二、结果与讨论

(一) 流场结果对比

仿真过程中, 压力-速度耦合相求解时采用 SIMPLEC, 压力相采用 PRESTO!, 其余方程求解精度为 QUICK。本文采用瞬态 RSM 湍流模型, 对比验证的数据引自 Chengming Song 的文献。

以旋风分离器柱段顶部平面为基准面, 分别提取距该平面向下 0.75D、2.0D 和 2.5D 高度平面上的切向速度分布, 利用柱段半径 R 与入口速度 U_{in} 进行无量纲化处理并与文献中的实验、仿真计算数据进行对比, 见图 1 所示, 可见仿真得出的切向速度趋势与文献实验值基本吻合。

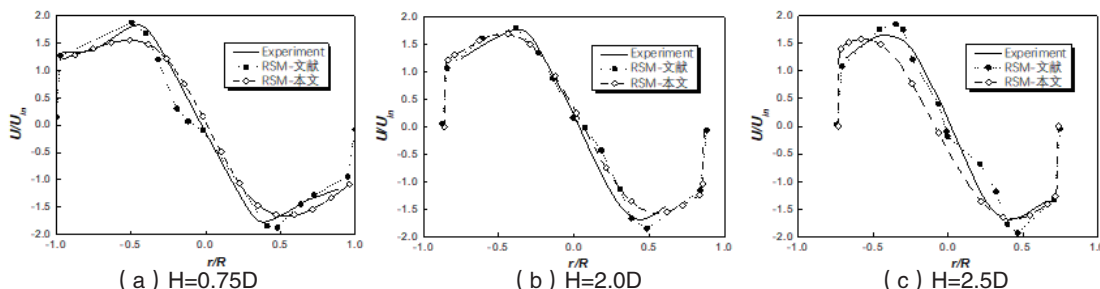


图 1. 不同高度位置上的切向速度分布对比

(二) 颗粒分级效率

本文利用瞬态 RSM 法计算旋风分离器内流场的过程中,并不同步进行颗粒的跟踪仿真。当流场计算结束后,采用稳态的方法注入不同粒径颗粒,得出颗粒的分级效率曲线。从曲线上得出 50% 分离效率对应的粒径,即为 D50。如前所述,由于本文并不直接采用 Trap 边界捕集颗粒,而是通过统计出口颗粒的数量来求取分离效率,其计算方法见式(1)所示。

$$\eta_i = \frac{N_{trap}}{N_{inject}} \times 100\% = \frac{N_{inject} - N_{escape}}{N_{inject}} \times 100\% \quad (1)$$

其中: N_{trap} 为底部面捕集的颗粒数量, N_{inject} 为进口入射的总颗粒数量, N_{escape} 为出口逃逸颗粒的数量。

采用旋风分离器结构 A, 结合本文仿真得出的颗粒分级效率

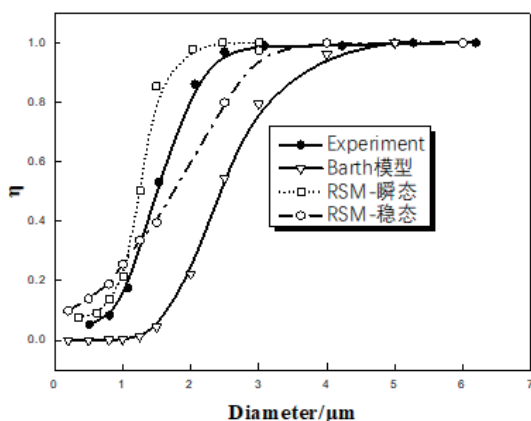


图 2. 分级效率曲线对比

图 2 为实验、Barth 理论模型、瞬态颗粒注入法与稳态颗粒注入法分别得出的分级效率曲线。对比看出 RSM 瞬态法最接近实验曲线, RSM 稳态法偏差稍大, 但都要较 Barth 理论模型精度优势明显。结合仿真计算出的 D50 值, 采用 Barth 公式修正仿真计算出的分级效率曲线。式(2)为 Barth 分级效率方程:

$$\eta = \frac{1}{(1 + \frac{D_{50}}{D_i})^m} \quad (2)$$

其中: D50 为 50% 分离粒径值, D_i 为单分散粒径值, m 取值为 2~7, 本文取 6.4。

为了在 RSM 稳态颗粒注入法的基础上, 获得更高精度的分离效率预测, 将稳态仿真得到的 D50 值带入式(2)中, 验证分级效率曲线同实验以及瞬态颗粒注入法之间的偏差。本文将这种仿真与理论结合预测分级效率的方法称作 RSM-Barth 法, 三者之间的对比见图 3 所示。可见 RSM-Barth 法提高了稳态仿真在预测分级效率上的精度, 但相比实验值仍然偏低, 这是由于仿真获得的 D50 值较实验值偏大的缘故。

三、结论

本文摒弃了利用瞬态仿真提高颗粒分离预测精度的主流方法, 以仿真时效为目标, 节省了计算时长。同时结合理论, 提出 RSM-Barth 应用模型, 使得分离效率曲线同实验之间的偏差显著缩小, 并取得了较好的重复性。

数据, 同 Barth, Muschelknautz 和 Residence Time 理论模型预测出的 D50 进行对比, 结果见表 2 所示。相比理论模型预测出的 D50 值, 瞬态和稳态颗粒注入法同实验值之间的偏差更低, 且当采用 RSM 湍流模型时, 二者之间的相对偏差绝对值近乎相当, 说明本文的仿真设计方法具备可行性。

表 2.D50 预测值对比

实验 D ₅₀ /μm	方法模型	计算预测 D ₅₀ /μm	误差
1.5	Barth	2.43	+62%
	Muschelknautz	2.13	+42%
	Residence time	2.16	+44%
	瞬态法	1.75	+17%
	稳态法	1.25	-16.7%

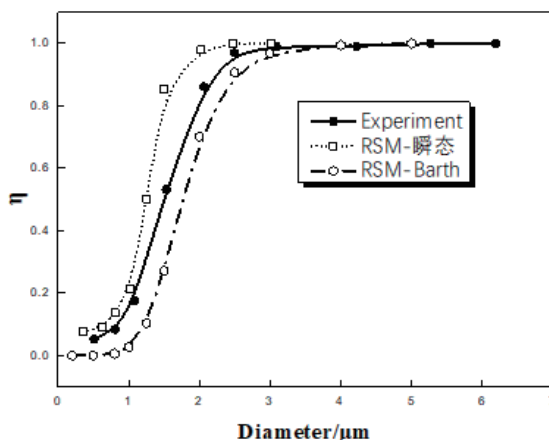


图 3. RSM-Barth 法同实验、瞬态法对比

当然, 利用仿真预测旋风分离器效率这一方法依然存在诸多问题, 例如:

(1) 仿真同实验之间的偏差存在何种影响因素以及每种影响因素的权重;

(2) 对于 1.5 μm 以下颗粒的捕集效率, 包括本文的稳态颗粒注入法在内, 大多仿真结果偏高, 是否还有提高计算精度的可行方法。

参考文献:

- [1] 王博. 旋风分离器内气固两相运动的数值仿真研究 [D]. 西安建筑科技大学, 2024.
- [2] 王锁芳, 赵浩宇, 柴金孟, 等. 出口结构对轴流式旋风分离器性能影响的数值模拟 [J]. 安全与环境学报, 2024 (002): 024.
- [3] 孙亚权, 冯静安, 王卫兵, et al. 新型高效低阻旋风分离器流场的数值分析 [J]. 计算机仿真, 2020 (011): 037.
- [4] 满林香. 基于 STAR-CCM+ 的旋风分离器油气分离性能数值模拟分析 [J]. 机电信息, 2019 (26): 2.
- [5] 黄仕昭, 郑麟, 李玉秀, 等. 基于离散元法的二元颗粒流剪切分离机理分析 [J]. 济南大学学报: 自然科学版, 2023, 37(1): 8.
- [6] 刘道银, 范志恒, 马吉亮, 等. 湿颗粒倾斜碰撞恢复系数的直接数值模拟 [J]. 化工学报, 2023, 74 (10): 4063-4073.