

FLUENT 软件在粉体颗粒混合领域中的应用

叶 涛

(武汉理工大学 机电工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘要:介绍了 FLUENT 软件模拟粉体颗粒混合设备内部流场的基本理论和方法,论述了国内外应用和研究的进展及成果。结果表明,用计算流体力学技术可以模拟粉体颗粒混合设备中复杂的气-固多相流场,并可以结合实验数据解决工程实践中速度场、压力场、浓度场等分布不合理的难题,为现有的混合设备的优化与新产品的研发提供指导性参数,指出了计算流体力学技术及其 FLUENT 软件在粉体颗粒混合领域潜在的应用前景。

关键词:计算流体力学;混合;数值模拟

中图分类号:TQ018 **文献标志码:**A

文章编号:1008-5548(2009)03-0073-04

Application of FLUENT Code in Powder Mixing Field

Ye Tao

(School of Mechanical and Electromechanical Engineering,
Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: The theory, method and the application research progress were presented. The results of FLUENT code numerical simulation and the experimental results to solve the uniformity of velocity and pressure in real engineering could provide the guide parameters for the optimization mixer and exploitation of new products. From all the aspects, it was seen that the foreground of calculating fluid dynamics (CFD) and FLUENT code numerical simulation would be well and widely used in the field of powder mixing.

Key words: calculating fluid dynamics; mixing; numerical simulation

从更微观、更本质的角度,采用先进的测试手段和计算流体力学方法,可以获取混合设备中的速度场、压力场和浓度场以及颗粒运动轨迹的相关信息,如 Tsuji T 等^[1]对粉体颗粒混合过程中的粒度偏析现象进行了详细的数值模拟研究,取得了很好的可视化效果,不仅对混合设备的优化设计具有重要的经济意义,而且对粉体颗粒混合的基础研究具有现实的理论意义,将有助于更深刻、更准确地揭示粉体颗粒混合

过程的机理。

然而,目前对于混合设备的选型和设计还主要依赖经验和实验,这样会造成许多由于设计参数的不合理而引起的内部压力场、速度场和浓度场分布的不合理,并造成混合效率偏低和混合质量差等问题;对混合器内部颗粒的运动信息知之甚少,会使人们很难开发和设计效率更高的混合机器,造成对其优劣很难用理论预测。

利用计算流体力学分析可以提供工程设计、生产管理、技术改造中所必需的参数,还可以提供流动区域内精细的流场(速度矢量)、温度场、各种与反应进程有关的组分参数场,通过对这些场、量的分析,为创新设计、改造设计提供依据,相当于是一个通用的、多功能的大型冷、热态试验场(数值试验)^[2]。在粉体颗粒混合领域中,主要用 FLUENT 软件的多相流模型来模拟混合器内部的流场特性和粉体颗粒的运动轨迹。

1 颗粒流动的基本理论与物理模型

粉体颗粒流动在自然界中广泛存在,粉体颗粒的混合操作也涉及颗粒流动。对于粉体颗粒流动的研究,我们必须立足于这样的认识:粉体具有“两重性”,即宏观上的连续性和微观上的离散性,但从本质上看,离散性占主导地位,而且粉体颗粒的宏观流动和单流体有着本质上的不同。正因为如此,若单纯考虑粒子间作用力而忽略粒子间存在的介质及其影响,是不能解释粉体颗粒在混合过程中的流动规律的。所以,实际的颗粒流问题看似简单,却十分复杂,许多机理问题至今还不清楚。因此,各种流动机制差别也很大^[3]。

1.1 多相流动模式

在多相流动中,所谓的“相”可以定义为具有相同类别的物质,该类物质在所处的流动中具有特定的惯性响应并与流场相互作用。比如说,粉体颗粒材料是离散固体粒子的聚集,粒子的数目庞大,大小、形状、性质各不相同,这种相同材料的物质颗粒如果具有不同尺寸,就可以把它们看成不同的相,因为相同尺寸粒子的集合对流场有相似的动力学响应。

这里我们把气-固多相流分为以下几类:

收稿日期:2008-05-12,修回日期:2008-07-13。

第一作者简介:叶涛(1972-),女,副教授,博士研究生,研究方向为数字粉体技术与装备。电话:027-62654849, E-mail: whyetao@hotmail.com。

充满粒子的流动:连续气体流动中有离散的固体粒子。如水泥颗粒在均化库中的运动、粉状物料在连续混合机中的运动等。

气动输送:流动模式依赖诸如固体载荷、雷诺数和粒子属性等因素。最典型的模式有沙子的流动、填充床,以及各向同性流。

流化床:由一个盛有粒子的竖直圆筒构成,气体从一个分散器导入筒内。从床底不断充入的气体使得颗粒得以悬浮。改变气体的流量,就会有气泡不断的出现并穿过整个容器,从而使得颗粒在床内得到充分混合。

1.2 气体-颗粒多相流数值模拟模型

人们根据不同问题的研究目的和精度要求,提出了 3 类模型来描述粉体颗粒的流动:

1)连续介质模型。此类模型将颗粒相看成是拟流体,是目前在两相流动研究领域中使用最为广泛的一种方法。如果颗粒相只被处理成单相的话,常常又被称为双流体模型,这类模型对颗粒、流体皆采用欧拉坐标。

2)离散颗粒模型。这种方法将粉体看成是有限个离散元素组合,根据单元间的相互作用和牛顿运动定律来描述颗粒的运动行为。此类模型将颗粒看作是离散相,而气相仍然被视为连续相,它对每个颗粒与气体以及颗粒与颗粒间的作用都详细考虑。由于此模型可以跟踪所有颗粒的运动轨迹,也常被称为颗粒轨道模型。这类模型对颗粒相采用拉格朗日坐标,而对流体采用欧拉坐标。

3)流体拟颗粒模型。该类模型从单颗粒尺度上的运动行为入手,不仅将宏观离散的颗粒当成离散相处理,还将宏观连续的流体也采用拟“颗粒”性质的流体微团来处理,从而可以模拟远离平衡态的系统。这类模型对流体、颗粒的运动都是采用拉格朗日坐标描述。

连续介质模型、颗粒轨道模型、流体拟颗粒模型 3 大物理模型各有优缺点,互相联系、补充和促进,并在不同的研究层次上发挥着重要的作用。

2 FLUENT 模拟的基本理论和方法

FLUENT 软件是基于有限元体积法,主要用于模拟和分析在复杂几何区域内的流体流动与热交换,可用于二维平面、二维轴对称和三维流动分析,可完成多种参考系下流场模拟、定常与非定常流动分析、不可压缩流和可压缩流的计算、层流和紊流模型、传热和热混合分析、化学组分混合和反应分析、多相流分析、固体与流体耦合传热分析、多孔介质分析等。它的模型包括 $k-\varepsilon$ 模型、Reynolds 应力模型、LES 模型、标

准壁面函数、双层近壁模型等。

2.1 混合器流场特性

在粉体颗粒混合领域中,一般采用以流场为研究对象分析流场各质点运动情况的欧拉法来分析和描述混合器中的气固多相流的运动规律。混合器流场一般在用 FLUENT 软件模拟时,其中粉体颗粒为分散相,气体为连续相。混合器内含尘气流可看作是不可压缩的。

2.2 数值计算方法

目前,工程上应用最广泛的流场计算方法就是压力耦合方程组的 SIMPLE 算法^[4]。

在粉体颗粒混合领域的压力场、速度场和浓度场的模拟中,SIMPLE 算法的计算过程是:根据给定的速度来确定流过单元面上的对流量。在 FLUENT 软件中,流场的计算方法可分为耦合式求解法和非耦合式求解法两大类。耦合式求解法用于高速可压缩流动,而非耦合式求解法主要用于不可压缩和微可压缩流动。在模拟粉体颗粒混合领域的气固两相流时,由于混合器中的气固多相流是不可压缩的,因此通常采用非耦合式求解法。为了准确描述混合器的流场特性和粉尘颗粒在除尘器中的运动轨迹,进行数值模拟时还要借助离散相在 Lagrangian 坐标下模拟流场中的粉尘颗粒。

2.3 数学模型

在混合器的流场进行模拟时,由于其内部含尘气流一般是气-固多相的混合物,所以一般采用多相流模型。FLUENT 软件提供的多相流模型包括 VOF 模型、混合模型、欧拉模型。

VOF 模型是通过求解单独的动量方程和处理穿过流体区域各相的体积比来模拟多相流的,主要用于流体喷射、喷嘴出流、气液界面的稳定和分层等;混合模型假定了局部空间上的平衡,是一种简化的多相流模型,主要用于模拟各相同性多相流和各相以相同速度运动的多相流,如粉体沉积、气固分离、气相容积率很低的泡状流等;欧拉模型可用于多相分离流及其相互作用的模拟。

混合和欧拉模型适合于流动中有相混合或分离,混合模型用于分散相有着宽广的分布、系统相间的曳力规律不知道或不确定、对计算精度要求不高的流体,而欧拉模型则适用于分散相只集中在区域的一部分、系统的相间曳力规律是可利用、对计算精度要求极高的流体。因此,我们认为,在模拟混合器流场特性和粉尘颗粒运动轨迹时一般选用多相流模型,并采用 $k-\varepsilon$ 紊流模型求解混合相的动量方程、第二相的速度方程以及相对速度的代数表示。离散方法一般采用有限体积法,因此具有良好的守恒性,为使计算结果准

确,必须考虑紊流对离散相轨迹的影响,FLUENT 提供了2个考虑紊流影响的模型:一个是随机轨迹模型;另一个是云轨迹模型,粉体颗粒混合领域的模拟中主要考虑颗粒运动的随机性,一般选用随机轨迹模型。

3 CFD 在各类混合器中的研究应用前景

3.1 基于 FLUENT 的静态混合器研究

静态混合器是20世纪70年代发展起来的一种新型高效化工单元设备。目前,对于静态混合器的研究大多还只是停留在经验和实验的基础上,随着计算流体力学的发展,数值模拟的优越性越来越突出,静态混合器的数值模拟也日渐成熟。

国内外基于 FLUENT 进行静态混合器设计与数值模拟的应用的例子很多,如 Bakker 和 LaRoche 用 FLUENT 软件求解了螺旋形静态混合器^[5]。赵建华等^[6]利用 FLUENT 软件中 Gambit 前处理器构造了一个简化的 SMV 型静态混合器模型,并用软件数值求解混合器的流场,对模拟结果进行了分析。刘春江等^[7]针对立交盘静态混合器的流体力学性能,并基于 FLUENT 软件的数值计算得到流体流经2个混合元件的流场变化和压降情况。叶旭东等^[8]应用 FLUENT 分析了聚酯在 SK 型静态混合器的混合流动,并采用 FLUENT 的 Carreau 模型描述了非牛顿流体聚酯的黏度-温度特性,得出了混合器的压力降及出口混合温度。

以上的研究成果都表明,FLUENT 软件能够数值模拟复杂的流场,可以为进一步的研究提供条件,解决了靠解析方法无法解决的问题。

3.2 计算流体力学技术在机械混合数值模拟中的应用

在机械混合的数值模拟方面,国内外许多学者已经有了很多很好的应用实例^[9],如孙其诚等^[10]通过建立颗粒混合的二维模型,对水平圆筒混合机中颗粒的混合进行了数值模拟,分析了颗粒流动的变化规律和混合曲线。Maher Moakher 等^[11]在双锥和 V 形混合器中完成了混合过程的三维数值模拟。Cleary^[12-13]提出了一个利用颗粒分布来表征颗粒混合程度的方法,通过离散颗粒方法模拟了铲斗挖土、转筒内的混合以及离心研磨机的加料过程,发现颗粒的物性和形状对混合的影响很大。Kuo 等^[14]将线性弹性、减震器阻尼和滑动摩擦模型应用到颗粒间以及颗粒和壁面间的接触力中,模拟 V-型混合器中颗粒的混合过程,分析颗粒接触力模型中各参数对混合过程的影响,通过与试验结果的比较,得到了最佳的模型参数。Yasunobu 等^[15]利用离散颗粒模型模拟了螺旋带混合器内颗粒的三维流动,结果发现颗粒在叶片区和中心区分别向上、向下流动时轴向混合得很差,另外床高对颗粒的混合和

循环影响很大。Stewart 等^[16]数值模拟了搅拌混合器中颗粒的流动,通过离散颗粒获得混合器内三维的数据,同时使用离散颗粒模型获得了混合器内部更多细节的数据来用于指导混合器的设计和操作。

利用计算流体力学技术及其相关软件可以实现实验室中难以正确测定和描述的流场规律,把这种可视化结果结合实验研究,可以解决工程实践中的速度场、压力场和浓度场分布的难题,为已有混合器结构、性能的优化和新产品的研发提供指导性参数。

3.3 计算流体力学技术在气力混合中的研究与应用

气力混合由于库内物料依靠高压气流均化,因此不论是间歇式混合还是连续式混合,其混合效果与库的结构形式、库容量、空气的压力及流量、充气形式均有密切的关系,均化操作过程中对充气形式即气流分布的要求是非常严格的,气流分布不合理就不能使物料在库内用最短的时间被流化,从而可导致其混合效率的下降。

目前,计算流体力学技术在水泥工业中的已经有很多很好的应用实例^[17],运用该技术可以对水泥工业中的分解炉、燃烧器、烘干炉、换热器、均化、增湿、旋转机械等内的流体流动等进行数值预测研究,给出相应的温度场、压力场、组分浓度场、颗粒浓度场、三维流场、燃烧率、分解率等信息,预测过程的显示直观、生动,可视化效果好,为分析、方案优化等提供依据与素材,提高设计水平、促进技术进步。这些研究都表明计算流体力学技术可以提供大量的精细研究结果以及与工程设计相关的工艺参数。

因此,应用计算流体力学技术可以预测水泥工业主要相关设备的几何尺寸(如均化库、分解炉、燃烧器、增湿塔、预热器等),即可用计算流体力学技术及其 FLUENT 软件辅助进行均化库的设计,比传统的工程研究方法,快速、经济。但是,国内外在水泥粉体的气力混合方面的数值模拟和预测的工程应用研究少见报道,这方面的研究工作还有待进一步深入。

4 结论

1) FLUENT 软件是基于有限元体积法的,用于模拟和分析在复杂几何区域内的流体流动与热交换的计算流体力学软件。在粉体颗粒混合领域中可以采用 FLUENT 软件多相流混合模型来模拟混合器中的流场特性及粉尘颗粒的运动轨迹。

2) FLUENT 软件在粉体颗粒混合领域中有潜在的应用前景,应用该软件可以实现在实验室中难以正确测定和描述的流场规律;可视化结果结合实验研究,可以解决工程实践中的速度场、压力场和浓度场分布不均的难题,为已有混合设备结构、性能的优化

和新产品的研发提供指导性参数。

3) 由于粉体颗粒的混合过程具有复杂性和不确定性以及目前 FLUENT 软件的功能和计算机的硬件条件等因素,在进行混合设备内部流场的模拟时,所模拟的粉体颗粒混合过程时与理论上肯定会存在一定的出入,难以再现实际的颗粒混合过程,在这方面还有待进一步深入研究。

参考文献(References):

- [1] TSUIJ Y. Computer simulation of particle motion [C] //2nd International Powder/ Bulk Conference, Shanghai, China. 2004.
- [2] 叶旭初,胡道和. CFD 技术与工程应用[J].中国水泥,2003(2):29-32.
- [3] 张欣,王文庆,武锦涛,等. 颗粒流动模型研究进展[J].中国粉体技术, 2007,13(6):36-40.
- [4] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [5] BAKKER A, LAROCHE R. Flow and mixing with Kenics static mixers [J]. Cray Channels, 1993, 15(3): 25-28.
- [6] 赵建华,黄次浩. SMV 静态混合器的数值模拟[J]. 海军工程大学学报,2002,14(6):59-62.
- [7] 刘春江,陆寒冰,刘辉,等. 静态混合器流体力学性能的 CFD 模拟[J]. 天津大学学报,2007,40(6):677-682.
- [8] 叶旭东,王小芳,毕龙. 基于 FLUENT 的 SK 型静态混合器的数值模拟[J]. 现代制造工程, 2006(3):74-75.
- [9] 欧阳鸿武,何世文,陈海林,等. 粉体混合技术的研究进展[J]. 粉末冶金技术,2004,22(2):105-108.
- [10] 孙其诚,王光谦,杨宁. 水平圆筒型混合机中颗粒混合的离散模型[J]. 中国粉体技术,2002,8(1):6-9.
- [11] MOAKHER Maber, SHINBROT Troy. Experimentally validated computations of flow, mixing and segregation of non-cohesive grains in 3D tumbling blenders[J]. Powder Technology, 2000, 109:58-71.
- [12] CLEARY P W, METCALFE G, LIFFMAN K. How well do discrete element granular flow models capture the essentials of mixing processes [J]. Applied Mathematical Modeling, 1998, 22:995-1 008.
- [13] CLEARY P W. DEM simulation of industrial particle flows: case studies of dragline excavators, mixing in tumblers and centrifugal mills[J]. Powder Technology, 2000, 109:83-104.
- [14] KUO J P, KNIGHT P C, PARKER D J, et al. The influence of DEM simulation parameters on the particle behaviors in a V-mixer [J]. Chemical Engineering Science, 2002, 57:3 621-3 638.
- [15] KANEKO Yasunobu, SHIOJIMA Takeo, HORIO Masayuki. Numerical analysis of particle mixing characteristics in a single helical ribbon agitator using DEM simulation[J]. Powder Technology, 2000, 108:55-64.
- [16] STEWART R L, BRIDGWATER J, ZHOU Y C, et al. Simulated and measured flow of granules in a bladed mixer—a detailed comparison[J]. Chemical Engineering Science, 2001, 56:5 457-5 471.
- [17] 叶旭初,胡道和. CFD 数值预测与工程应用[C]// 第五届全国新型干法水泥生产技术交流会论文集, 2003:95-103.

优惠征订粉体专著

你想掌握粉体设备 / 材料企业的新名录吗?

你了解粉体新设备 / 技术开发新进展吗?

下列各类粉体专著可满足你的需求:

- ◆中国粉体企业大全(2008 版):优惠价 150 元 / 本;
- ◆中国粉体工业通鉴(2008 版):优惠价 150 元 / 本;
- ◆中国粉体工业通鉴(2007 版):优惠价 150 元 / 本;
- ◆中国粉体工业通鉴(2006 版):优惠价 120 元 / 本;
- ◆中国粉体工业通鉴(2005 版):优惠价 100 元 / 本;
- ◆超细粉碎工程:优惠价 50 元 / 本;
- ◆中国粉体工业产业政策汇编:优惠价 50 元 / 本。

注:1、均免邮费;2、如原价订各版《通鉴》,均可获赠名片广告。

邮购地址:(310012)杭州市西湖区学院路枫华府第 5-3-602

联系电话:0571-88785188、137 3582 3588

联系人:吴宏富 先生

网 址:www.ftj.cn