

循环

流化床稠密

气固两相流动和
反应理论

XUNHUAN LIUHUACHUANG CHOU MI QIGU LIANGXIANG LIUDONG HE FANYING LILUN

王淑彦◇著



江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

循环

流化床稠密

气固两相流动和
反应理论

XUNHUAN LIUHUACHUANG CHOU MI QIGU LIANGXIANG LIUDONG HE FANYING LILUN

王淑彦◇著



图书在版编目(CIP)数据

循环流化床稠密气固两相流动和反应理论 / 王淑彦

著. -- 哈尔滨 : 黑龙江大学出版社, 2012. 9

ISBN 978 - 7 - 81129 - 492 - 7

I. ①循… II. ①王… III. ①内循环流化床 - 气相反
应 IV. ①TQ051.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 082004 号

循环流化床稠密气固两相流动和反应理论

XUNHUAN LIUHUACHUANG CHOU MI QIGU LIANGXIANG LIUDONG HE FANYING LILUN

王淑彦 著

责任编辑 李 丽 肖嘉慧

出版发行 黑龙江大学出版社

地 址 哈尔滨市南岗区学府路 74 号

印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司

开 本 720 × 1000 1/16

印 张 10.75

字 数 150 千

版 次 2012 年 9 月第 1 版

印 次 2012 年 9 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 81129 - 492 - 7

定 价 28.00 元

本书如有印装错误请与本社联系更换。

版权所有 侵权必究

前 言

气固流态化技术被广泛地应用于能源、化工、冶金和环保等不同的工业领域。在流化床内所呈现的稠密气固两相流动中,由于颗粒聚团形成的介观尺度导致流动结构的复杂性和影响因素的众多性,因而成为高浓度气固两相流研究领域的一个热点和难点问题。由于气固两相流动影响因素的复杂性,气固两相流动的机理尚不十分清楚。随着计算机技术的飞速发展与计算方法的不断改进和完善,结合计算数学和计算流体力学的数值模拟技术的研究方法,以其独特的优点已经成为气固两相流动研究的主要方法。

本书主要内容为:建立离散颗粒运动-碰撞解耦模型,模型中应用直接模拟蒙特卡罗方法(DSMC)模拟颗粒间的碰撞过程。应用LES-DSMC方法模拟循环流化床上升管内气固两相流动特性,得到了颗粒的运动行为与时均颗粒速度和浓度的分布规律。建立了超细颗粒运动和碰撞解耦模型,模型中考虑超细颗粒间范德华黏性作用力的影响。采用LES-DSMC方法研究超细颗粒气固两相流流动特性。建立非稳态球形颗粒群燃烧模型,模拟静态下煤粉颗粒团的着火与燃烧过程,分析颗粒团的结构参数和环境参数对着火和燃烧的影响。建立碳颗粒聚团燃烧反应模型,数值模拟气体流过碳颗粒聚团的燃烧过程,分析聚团空隙率、进口气体速度、进口气体温度和活化能等对碳颗粒聚团燃烧过程的影响,给出了颗粒聚团内不同位置的颗粒所消耗的碳量的变化规律。建立石灰石颗粒聚团脱硫化学反应过程的数学模型,数值模拟气体流过石灰石颗粒聚团的脱硫过程,分析聚团空隙率、进口气体速度和温度对石灰石颗粒聚团脱除 SO_2 的影响。建立萘颗

粒聚团传热传质过程的数学模型,数值模拟气体流过萘颗粒聚团的传热传质过程,揭示聚团空隙率、进口气体速度和温度对颗粒聚团传热传质过程的变化规律。

在本著作的撰写过程中,我得到了东北石油大学刘永建教授和哈尔滨工业大学陆慧林教授的指导,也得到了中国石油大学(北京)重质油国家重点实验室高金森教授的大力支持。感谢刘欢鹏博士、尹丽洁博士、郑建祥博士和赵云华博士与我的多年合作,在此致以诚挚的谢意。本书研究内容部分来自于国家自然科学基金项目“超重力流化床气固相间作用机理与颗粒流矩模型的研究”(No. 21076043)和国家博士后特别基金“高浓度气固两相流相间作用机理的研究”(No. 20090460070)的研究成果。本书可作为流态化理论等方面教学和科研人员的参考书,也可作为多相流领域相关专业的研究生教材。

目 录

第1章 概述	1
1.1 引言	1
1.2 整体流动结构	3
1.3 局部流动结构	7
1.4 气固两相流动数值模拟	10
参考文献	17
第2章 稠密气固两相流中气体-颗粒-颗粒聚团流动的 Euler-Lagrangian 计算模型	20
2.1 引言	20
2.2 气固两相流动的数学模型	21
2.3 气相欧拉坐标与颗粒相拉格朗日坐标的耦合	33
2.4 数值方法和边界条件	36
参考文献	39
第3章 循环流化床内气体-颗粒-聚团流体动力特性	40
3.1 引言	40
3.2 计算模型和条件	41
3.3 计算结果与讨论	42
参考文献	66
第4章 静态下煤粉颗粒群的燃烧特性	69
4.1 引言	69
4.2 煤粉颗粒聚团的群燃烧模型	70
4.3 计算结果与讨论	78

参考文献	92
第5章 循环流化床内碳颗粒聚团燃烧反应特性	94
5.1 引言	94
5.2 气体-碳颗粒聚团的流动和反应模型	95
5.3 颗粒聚团阻力系数	100
5.4 颗粒对颗粒聚团的作用	110
5.5 颗粒聚团内气体温度和浓度的变化	115
5.6 温度对颗粒聚团反应的影响	120
5.7 进口气体速度对颗粒聚团反应的影响	120
5.8 进口氧气浓度对颗粒聚团反应的影响	122
5.9 颗粒聚团空隙率对反应过程的影响	123
5.10 颗粒直径对聚团反应过程的影响	124
5.11 碳颗粒物性对聚团反应过程的影响	124
参考文献	127
第6章 循环流化床内石灰石颗粒聚团脱硫反应特性	130
6.1 引言	130
6.2 石灰石颗粒聚团脱硫反应过程的数学模型	132
6.3 石灰石颗粒聚团对 SO_2 排放量影响的分析	136
参考文献	143
第7章 循环流化床内气体与颗粒聚团间传热传质特性	145
7.1 引言	145
7.2 气体与颗粒聚团的传热传质计算模型	146
7.3 气体与颗粒聚团间的传热传质特性分析	148
参考文献	160

第1章 概述

1.1 引言

循环流化床技术不仅越来越广泛地应用于石化、煤炭、冶金和能源等现代基础工业领域,而且也逐渐成为材料、生物等新兴工业的重要单元操作,这些都促使循环流化床的研究不断深入。认识循环流化床中颗粒流体流动的动力学规律是定量设计各种反应器的基础,这一直是近年来流态化领域的研究重点。迄今为止,各国研究者对循环流化床内两相流动特征都有了整体上的认识,即表现为两相流动在局部和整体上的不均匀性——其中,局部不均匀性表现为颗粒的聚集与解体;整体不均匀性表现为颗粒浓度和颗粒速度的轴、径向的不均匀分布。^[1,2]同时,这种局部和整体上的不均匀性有着相互的关联和影响。然而,由于循环流化床内两相流系统流动行为的复杂性和多样性,学术界和工程界至今仍很难对该系统的各种流动现象和流动参数作出准确的分析和预测,以至循环流化床反应器的设计和放大仍然依赖于经验或半经验式的逐级放大。由于气固循环床内的两相流动行为与气固的停留时间、传质传热、气固混合、床体磨损、设计放大等紧密相关,所以研究循环流化床流动规律及其与结构的关系便成了认识和设计循环流化床反应器的基本课题与前提条件。

大量的试验研究结果表明,在循环流化床中颗粒被速度大于单颗粒终端速度的气流所流化,以各种形态的颗粒和颗粒团聚物的形式上下运动,产生高度的返混。颗粒聚团向各个方向运动,而且不断地形

成和分解。床内包含分散的固体颗粒和相对紧密的颗粒聚团两部分。当床内颗粒浓度很低时,颗粒均匀地弥散在气流中,每一颗粒将单独地运动。当床内颗粒浓度达到某一临界值时,床层中开始形成颗粒聚团,一部分颗粒处于均匀分散相,而另一部分颗粒处于颗粒聚团中。颗粒团聚是气固两相流动中,特别是在循环流化床内稠密流动条件下的一种重要现象。

颗粒团聚物是指单位体积内比周围稀相含有更多颗粒的密相颗粒集合。可以分为两大类:一类是 Geldart 分类中的 A、B、D 类颗粒(非黏附性颗粒)在气流作用下形成的颗粒富集区;另一类是 Geldart 分类中的 C 类颗粒(黏附性颗粒)在气流和颗粒内部物性的共同作用下,颗粒和颗粒相互之间发生碰撞,借助于碰撞接触点处的表面力聚合而成的团状物或团聚体。在实际的流化床中,这两类颗粒团同时存在。例如,在循环流化床的近壁面区域,由于颗粒的高浓度和惯性作用,颗粒间相互作用使得碰撞概率增大,容易黏附形成明显的颗粒聚团;在细粉流态化中,属于 Geldart 分类中难以流化的 C 类细粉和超细粉颗粒,在表观气速达到一定值后,会形成较为稳定的颗粒团聚,从而正常流化。因此,颗粒团聚现象是循环流化床内气固两相流的典型特征,颗粒团聚物的时空特征直接影响气固两相在循环流化床内轴、径向的分布及运动状态,传热传质速率和颗粒与管壁间的磨损等。因此,研究循环流化床中颗粒团聚物的行为特征是气固循环流化床动力学研究的一个重要切入点,可以为循环流化床反应器的认识、模拟、设计、放大和优化操作等提供依据。

颗粒聚团对流化床的流动和传热等都有很大的影响:1. 由于颗粒聚团的出现改变了流体的流动,影响颗粒和流体之间的相互作用。在颗粒聚团中排列的颗粒比均匀分散时的颗粒有较高的滑动速度;同时,由于颗粒聚团产生的旋涡引起大规模的速度波动,将会影响单个颗粒运动。2. 流化床内壁面传热的方式是覆盖在壁面表面的颗粒聚团的非稳态导热,颗粒聚团沿壁面下滑的速度决定传热量的大小。颗粒聚团阻挡了颗粒与壁面的换热;同时,颗粒聚团阻挡颗粒与流体有

效地接触,从而导致传质率下降。在任意给定的表观气体速度下,较高的固体循环流量引起较小的气固滑移速度,并明显降低了对流质量交换。3. 在循环流化床中,颗粒聚团在床内上下运动,形成固体颗粒在轴向的返混;同时,还将引起床内的径向运动,形成径向的固体颗粒混合。此外,颗粒团还会影响到压力波动和环核流动结构的发展。所以,研究高颗粒浓度两相流流动中颗粒聚团规律及其对流动和反应过程的关系,对认识和设计循环流化床反应器具有重要的意义。

1.2 整体流动结构

循环流化床内的气固两相流动特征可以表征为在局部和整体上的不均匀性,同时,局部上的不均匀性和整体上的不均匀性又相互关联和影响。很多研究者分别对循环流化床内气固两相在径向和轴向上的流动结构进行了大量的研究。

循环流态化包括快速流态化和密相气力输送两个操作区域。研究表明,整体流动结构为中心区颗粒浓度稀且(时均)向上运动、边壁区颗粒浓度高且(时均)向下运动的环核流动结构。^[3] Rhodes 等^[4]采用动量探头和电容层析技术系统研究了提升管内的整体流动结构,并给出了一个较完整的循环流化床提升管内的整体流动结构图像。当提升管在高密度条件下操作时,中心区颗粒浓度稀且向上流动、边壁区颗粒浓度高且向下流动的环核流动结构消失,代之以中心快边壁慢,但时均都向上且颗粒浓度都很高的环核结构。下行床气固流动发展过程中沿轴向大致分为3个发展阶段,即第一加速段、第二加速段和第三恒速段,揭示了下行床特有的径向流动结构和在下行床内动态颗粒聚团运动对流动的影响。

关于循环流化床内气固两相整体流动结构,同样,在底部浓相段,同样存在核心区颗粒浓度低、边壁区颗粒浓度高的环核流动结构,并且边壁区的厚度比上部稀相区的要大;在底部浓相段以下,各径向位置上局部颗粒浓度的时均值及其截面平均颗粒浓度沿轴向基本上保

持不变。在底部浓相段,颗粒的加速作用非常明显。颗粒浓度的径向分布、颗粒浓度的概率密度分布、颗粒浓度的标准偏差分布以及颗粒浓度的频率谱分布表明,在底部浓相段也存在典型的环核流动结构;同样,各种参数的径向分布在底部浓相段内沿轴向基本保持一致。

1.2.1 轴向流动结构

循环流化床提升管中的轴向流动结构通常是指颗粒浓度及颗粒速度等在不同轴向位置处的空间分布。提升管轴向流动结构,其颗粒浓度的轴向分布为S型分布(即底部为颗粒浓度较高的浓相段、上部为颗粒浓度较稀的稀相段、中间为过渡段的典型分布),并受操作气速和颗粒循环速率的影响,S型分布是快速流态化的特征分布。但是,在更宽的操作条件、颗粒物性和设备结构范围内,提升管内的颗粒浓度的轴向分布并不总是S型分布:在一定的条件下,可能是S型分布,可能是指数型分布,也可能是反C型分布,还可能是直线型分布。但总的来说,提升管内颗粒浓度的轴向分布从下到上可能(但不一定同时)出现4个不同的区域:床层底部的浓相段(是否出现依赖于颗粒循环速率与相应气速下的饱和夹带速率之比、循环系统的总体压力平衡、储料罐中的存料量)、过渡段或加速段、充分发展段和顶部出口附近的相对浓相段(只有在使用强约束出口时才出现)。众多因素都不同程度地影响颗粒浓度的轴向分布,例如,颗粒循环速率和操作气速、颗粒物性、进出口结构、提升管直径及形状等。虽然提升管内颗粒浓度的轴向分布受到很多因素的影响,但是由于循环流化床提升管、储料罐、控制阀、旋风分离器等部件所构成的颗粒循环系统是一个压力平衡系统,各部分的压降之和应当等于零。因此,这些影响因素大都可以从这个关系中找到对应的变化规律。

1.2.2 径向流动结构

1.2.2.1 颗粒浓度的径向分布

颗粒浓度径向分布的不均匀性是提升管内气固流动的固有属性。为了表征提升管内气固流动的径向不均匀性,表现出了环核流动结构,即提升管内气固两相流动分为两个区域——占提升管截面面积大部分的核心区和靠近提升管管壁的环隙区,其中核心区内的颗粒浓度很稀且分布较均匀,而环隙区的颗粒浓度较浓且大都向下运动。

颗粒浓度的径向分布受操作气速、颗粒循环速率、颗粒物性、床层直径以及床层轴向高度等因素的影响。对于不同的颗粒种类,在不同的提升管内和操作条件下,只要截面平均颗粒浓度一定,颗粒浓度的径向分布就只是无因次径向距离的函数,而与操作条件无关。无因次颗粒浓度的径向分布具有相似的特征。根据这种相似性,可以通过实验(如压降测定)得到某操作条件下的截面平均空隙率,便可方便地得到空隙率的径向分布。值得注意的是,在充分发展段,无因次颗粒浓度的径向分布沿轴向呈现出较强的相似性,但是在加速段和出口区域,无因次颗粒浓度的径向分布不仅是径向位置的函数,而且还与床层截面高度有关。因此,对加速段和出口区域的局部颗粒浓度分布作进一步的实验研究,对于掌握整个提升管中的颗粒运动状态是必要的。

1.2.2.2 颗粒速度的径向分布

操作条件对局部时均颗粒速度的径向分布有影响,当表观气速一定时,颗粒循环速率增大使得边壁区的颗粒聚集倾向明显增强,大量气体更加集中于中心区,进而使得颗粒在边壁处运动速度减慢,中心区的颗粒速度增大,即颗粒速度径向分布随颗粒循环速率的增大而愈趋不均匀。当颗粒循环速率一定时,增大表观气速,各点的颗粒速度均随之增大,但中心区颗粒速度增大的程度大于边壁区增大的程度。

在提升管中,几乎所有径向位置都同时存在向上运动的颗粒和向

下运动的颗粒,颗粒速度也存在着中心区高、边壁区低的环核流动结构。在中心稀相区,颗粒主要向上运动,其时均速度为表观气速的1.5~5倍;在环隙区,颗粒大部分向下运动且速度较小,其时均向下速度一般为 $1.0 \sim 2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。^[5]

1.2.2.3 气体速度的径向分布

局部气体速度在床层径向具有很大的非均匀结构。与局部颗粒浓度的径向分布一样,也具有明显的环核结构:在中心区,局部气速较高且分布很均匀;而环隙区的局部气速明显低于核心区。并且操作条件对局部气速径向分布的影响趋势与操作条件对局部颗粒浓度径向分布的影响趋势相同:当颗粒循环速率增加时,由于床层壁面处颗粒浓度相对于床层中心处增加较大,对气体产生较大阻力,致使气流更加集中于床层中心稀相区,因而,局部气体速度在中心区增大,在边壁区减小;当表观气速增大时,床层径向各点局部气速均增大。但是,由于床层中心区的阻力小(颗粒浓度小),因此,床层中心稀相区的局部气体速度比边壁处增大得更为明显。同时,随着颗粒直径增大局部气体速度径向分布也愈趋于平坦。

对循环流化床内局部气体速度的径向分布尚缺少全面和完整的实验研究,特别是对提升管内加速段局部气体速度的实验研究没有系统性,还远远不能为理论建模提供更多详细且真实的信息,因此,对循环流化床内局部气体速度的进一步实验研究是十分必要的。

综上所述,循环流化床提升管内气固两相流动在径向上具有的非均匀性是其流动的固有属性。然而,这种非均匀性增加了床内颗粒的返混,影响颗粒停留时间的分布,也在实际工程应用中产生了不利的作用,如颗粒的磨蚀、受热面的磨损等。为了克服循环流化床环核流动结构,Jiang等^[6]通过在提升管内加入内构件迫使气固两相重新分布,从而改善循环流化床内气固流动的不均匀程度,消除或者减弱环核流动结构,使气固混合及接触得以加强,从而提高气固化学反应的效率。当表观气速较高或颗粒循环速率较低时,由于构件的存在,颗粒浓度径向分布会发生逆转,即出现床层中心浓、边壁稀的分布状态。

但是,应当注意的是由于循环流化床内气、固流动速度均较高,因此,应当特别注意固体颗粒对构件的磨损以及由构件存在造成的床层压降的增加所带来的问题。^[7] Huilin 等^[8]提出的锥形循环流化床克服了常规循环流化床内气固流动的不均匀性,消除了环核流动结构,提高了气固混合及接触,防止或者减轻了颗粒的返混,从而有效地提高了气固化学反应的效率。

1.3 局部流动结构

1.3.1 颗粒聚团流动形态

循环流化床中存在气固两相间的高滑落速度现象。气固高滑落速度取决于循环流化床内存在的颗粒团聚,壁面区域颗粒团聚体的形成影响床内的环核流动结构;同时,对壁面的磨损起重要作用。在床的中心区域,主要存在絮状物颗粒团的运动,还存在大量带状物和簇状物的颗粒团聚体。在环区,主要是絮状物和簇状物的颗粒团聚体;而在壁面区域,主要是带状物的颗粒团聚体。颗粒聚集体无论是在形状、尺寸和运动状态,还是在时间和空间的分布上,都处于动态的变化过程之中。在循环流化床中,以单颗粒形式存在的分散相和以颗粒聚集体形式存在的团聚相并存,且分散相和团聚相内部也存在非均匀性。由于颗粒速度的差异,颗粒相互碰撞作用,团聚相能够分解形成分散相,分散相也能够合并成为团聚相。颗粒聚集体的形成和分解是一个动态的过程,从而形成复杂的动态流动结构。因此,在循环流化床内气固两相的局部相结构是由分散相为连续相、团聚相(絮状物)为分散相组成的,并且这种稀浓两相的局部相结构在操作条件、气固物性和设备结构变化时并不发生根本的变化,只是稀浓两相的比例及其在时间和空间上的分布发生了相应的变化。

循环流化床内固体颗粒聚集体可主要分为4类:絮状物(Cluster)、带状物(Streamer & Strand)、簇状物(Swarms)和片状物(Sheet)。

颗粒之间的碰撞导致约小于 1 cm 的絮状物在床层中心稀相区形成,而 1~2 cm 的颗粒较密集的簇状物则由于颗粒与床体壁面的作用而在壁面附近形成。当床内平均颗粒浓度提高时,壁面附近的簇状物进一步发展成为形体较大的片状物。而片状物尖端分离下来的颗粒则形成中心区的带状物,同时颗粒之间或絮状物之间的相互作用也可能形成带状物。

絮状物形成的原因:在颗粒之间、颗粒与壁面之间的相互作用过程中,固体颗粒为了达到气固相互作用最小,为了达到能在稳定状态下运动所维持的一种动态平衡。

给予循环流化床内气体-颗粒的能量可以分解为气体-颗粒悬浮输送需要的能量和气体-颗粒流动消耗的能量两部分。在悬浮输送部分,流体消耗的能量全部用于悬浮和输送颗粒;而在气体-颗粒流动消耗的能量部分,流体的能量消耗于颗粒之间的碰撞、混合、加速和循环等过程。^[9,10]仅通过质量和动量守恒关系并不足以确定流化床的局部非均匀流动状态,流动稳定性的条件是必需的。当并流向上的气固两相流动达到稳定时,流体总是趋向于选择阻力最小的路径向上流动,颗粒则因重力的影响,总是尽可能趋向处于最小位能的位置。由于两相之间运动的相互约束,实际上是依据各自控制流场运动趋势的能力相互协调,才使局部流动处于稳定状态。颗粒为了实现自身的运动趋势,会通过聚集成团,降低气固阻力,增大沉降速度来抵抗气流的夹带;而气流为了选择阻力最小的路径,更多地会选择绕流颗粒聚团而不是试图穿过它。因此,气体与颗粒间相互协调的结果使当地悬浮输送颗粒所消耗的能量趋于最小。由此可见,在高颗粒浓度气固两相流动系统中,气流运动遵循能量最小的原则,而颗粒团聚也是流动本身为了减小能量损失所作的一种自适应调节。

判断颗粒团聚物的准则:(1)当局部的颗粒浓度明显大于当地平均颗粒浓度,一般为几倍的标准方差;(2)局部高颗粒浓度的扰动应明显大于随机颗粒浓度的变化;(3)局部颗粒体积的变动应比单颗粒体积大若干数量级,但远小于当地局部颗粒体积的变化,则认为该瞬时

局部高颗粒浓度下形成的是颗粒团聚物。^[11]通过判断颗粒团聚物的准则可以确定颗粒聚团的形成频率、颗粒聚团出现的时间份额等,而颗粒聚团的尺寸等仍然没有确定的方法。

1.3.2 颗粒聚团的表征

描述颗粒聚团的参数主要包括颗粒聚团平均浓度、颗粒聚团直径、颗粒聚团形状系数和颗粒聚团贴壁份额等。

1.3.2.1 颗粒聚团浓度

颗粒聚团平均浓度可采用电容探针、光导纤维探针等方法确定。^[12]随着床层横截面颗粒浓度的增加,颗粒团聚体的颗粒浓度也随的增加。颗粒聚团平均浓度与床层横截面平均颗粒浓度有如下关系:

$$\varepsilon_c = 0.58\varepsilon_s^{1.48} / (0.013 + \varepsilon_s^{0.48})$$

其中, ε_s 为床层横截面颗粒浓度。一般来说,床层横截面颗粒浓度可以采用测量床层压降的方法获得。因此,通过上述关系可以确定颗粒团聚物的平均浓度。

1.3.2.2 颗粒聚团当量直径

颗粒团聚物具有各种各样的形态。为了研究方便,通常定义当量球形的颗粒团聚体的直径。颗粒团聚物当量直径的测量主要采用高速摄像的方法,通常采用电容探针方法确定团聚物直径,此时定义的团聚物当量直径是实测的团聚物的垂直高度,即团聚体的垂直高度定义为颗粒团聚体的当量直径。由此可以看出,颗粒团聚体当量直径不能全面反映实际团聚物的尺寸;而采用摄像方法只能获得壁面区域颗粒团聚物的大小,不能获得床中心区域颗粒团聚物的尺寸。颗粒团聚物当量直径为: $d_c = \varepsilon_s / (40.8 - 94.5\varepsilon_s)$ 。其中, ε_s 是床层横截面平均颗粒浓度。由此可以看出,随着床层横截面颗粒浓度的增加,颗粒团聚物当量直径也增加,从而形成大的颗粒聚团。颗粒团聚物当量直径受表观风速、颗粒循环量、颗粒直径和密度的影响。颗粒团聚物当量直径随颗粒循环量的增大而下降。但是数据的分散性导致难以准确

描述颗粒聚团直径与颗粒循环量间的关系。实验研究结果发现,颗粒团聚物当量直径随床高而增加。

颗粒聚团呈现不同的形状,如球形、椭圆形、抛物线形等。颗粒聚团形状系数 Ψ_c 被定义为: $\Psi_c = \pi d_c / P$ 。其中, d_c 为球形颗粒聚团直径, P 为颗粒聚团的湿周。采用热成像系统测得颗粒聚团形状系数为 0.48。^[13]

1.3.2.3 颗粒聚团平均流动速度

采用不同的测量方法,如光导纤维探针、电容探针、热成像系统等可以确定颗粒聚团流动的速度。颗粒聚团速度几乎是常数,与颗粒浓度和其他操作参数无关。颗粒聚团下降流动速度为 $0.5 \sim 2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

1.3.2.4 颗粒聚团的聚团颗粒温度

Cody 等^[14]采用激光测速仪 PIV,获得了循环流化床内颗粒和颗粒聚团的速度分布,计算得到颗粒温度和聚团颗粒温度。颗粒聚团内颗粒数为 4~8 时,分散独立的颗粒温度大于聚团颗粒温度,上升流动的颗粒聚团温度大于下降流动的颗粒聚团温度。

1.4 气固两相流动数值模拟

1.4.1 双流体模型

循环流化床内颗粒团聚物的形成直接影响床内颗粒浓度分布、床层压降、气固两相与受热面间的传热、气固两相间的传质、反应速率以及床内气体和颗粒的混合。因此,数值模拟循环流化床内颗粒团聚物流动,对于确定床内颗粒流动行为、改善循环流化床设计等具有实际意义。应用双流体模型研究气固两相流动,较早被人们应用,目前发展也比较成熟。这种方法认为,气相和颗粒相是两种互相渗透的连续相,各自满足连续性方程、动量方程和能量守恒方程,在模型的概念上较为清晰简单。