

学校编码: 10384
学 号: 20620101151446

分类号____密级____
UDC____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

催化裂化提升管反应器的 CFD 模拟

CFD Modeling of Fluid Catalytic Cracking Riser Reactor

李江

指导教师姓名: 罗正鸿 教授

专 业 名 称: 化 学 工 程

论文提交日期: 2013 年 5 月

论文答辩时间: 2013 年 月

学位授予日期: 2013 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2013 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

催化裂化装置的核心是提升管反应器。由于原料油的高速射入、气化和裂化反应的发生，提升管反应器在轴向、径向和圆周方向都存在明显的流动、传热和反应的不均匀分布，特别是在提升管进料混合段。因此，需要建立提升管反应器的气固两相流动、传热及反应模型，准确描述提升管反应器内部的流动、传热、传质及反应特征。

本文首先建立了提升管反应器的三维 CFD (Computation Fluid Dynamic) 模型, 并采用 PBM (Population Balance Model)-CFD 耦合模型, 在并入催化裂化十四集总动力学模型基础上对提升管反应器进行模拟。模拟结果表明, 运用该模型预测的气相组分浓度与工业数据比较吻合; 当考虑颗粒的聚并和破碎行为时, 催化剂颗粒的平均粒径减小, 粒径分布变宽, 同时提升管内的流动更加复杂。因此, 颗粒的破碎和聚并行为对提升管内流动反应有重要影响。

其次, 建立了纯粹的提升管反应器的三维 CFD 模型, 对提升管反应器进行了冷态和热态模拟。模型方程也通过了实验数据的验证。并在上述 PBM-CFD 耦合模型模拟得到的优化工艺条件下考察了冷态下喷嘴射流速度对提升管反应器内部流场的影响, 在热模条件下考察了喷嘴安装高度和喷射角度对提升管反应器内流动、传热和反应的影响。本部分模拟结果表明, 喷嘴射流速度对提升管反应器的进料混合段内的气固两相流动有重要影响, 喷嘴安装位置对提升管内的流动、传热和反应没有明显的影响。喷嘴安装角度对流动、反应有较大的影响, 喷嘴角度以不小于 30° 为宜。

考虑到工业催化裂化装置普遍存在的静电现象, 本文最后建立了耦合静电模型的双流体 CFD 模型, 并采用该耦合模型模拟了静电对流化床反应器、冷模与热模下的提升管反应器内部的流动与反应的影响。模拟结果表明, 对于流化床反应器, 静电作用会明显延长床层达到完全流化状态的时间, 同时降低了床层膨胀率。对于冷模下的提升管反应器, 静电作用对提升管底部密相区的颗粒浓度分布有明显影响; 对提升管上部稀相区, 静电影响并不明显。对于催化裂化提升管反应器, 静电作用对提升管内的颗粒浓度分布、温度分布和组分浓度分布没有明显影响。

关键词: 提升管反应器 CFD 射流速度 射流角度 静电

Abstract

Riser reactor is a prime important component of the catalytic cracking unit. Obviously non-homogeneous distribution of flow, heat and mass transfer is found in all directions in the riser reactor, especially at the feedstock mixing zone, due to the high injection velocity, feedstock spray vaporize and cracking reaction. Thus, a complete gas-solid two-phase flow reaction model should be established to simulate the complex flow, heat transfer, mass transfer and reactions in the riser reactor.

In this study, a 3-D CFD heterogeneous riser reactor model is developed to simulate the riser reactor at hot-model firstly, coupling PBM model with the 14-lump FCC kinetic model. The results show that the predicted lump concentration of gas phase agrees well with the plant data. When particle aggregation and breakage are considered in the simulation, the volume-average mean particle size becomes small and the PSD becomes flat. In addition, it also causes the flow more complex. The simulation results also show that the PSD, the particle aggregation and breakage have important influences on the flow field in the riser.

Secondly, an integrated 3-D CFD riser reactor model is established to simulate the flow and/or reaction in the riser reactor in both cold- and hot-model. The model governing equation is verified by comparing against the open experimental data. Based on the optimized operation conditions gained by the PBM-CFD model, the effect of the nozzle jet velocity on the flow of the riser is investigated at the cold-model conditions, while the influences of nozzle position and angle on flow and reaction in the riser reactor are examined at hot-model conditions. The simulation results show that the nozzle jet velocity plays an important role in determining the two-phase flow in the feedstock mixing zone and the nozzle position has a minor influence on the flow field and the cracking reactions in the feedstock mixing zone. The simulation results also show that the nozzle angle has a significant impact on the flow field and the cracking reactions in the feedstock mixing zone and the nozzle angle of no less than 30 ° is appropriate.

Finally, considering the widespread electrostatic effects in industrial FCC riser, a

Two Fluid Model couples with the electrostatic model is carried out to investigate the effect of electrostatics on the flow and/or reaction in fluidized-bed reactor, cold- and hot-model riser reactor. And the results show that the electrostatic will prolong the time of completed fluidization in fluidized-bed reactor and reduce the bed expansion rate. The electrostatic has a significant influence on the particle distribution in the bottom dense region for cold-model riser reactor, while it has a small influence in the upper dilute region. When the cracking reaction is considered, the electrostatic has a small influence on the particle concentration, temperature and lump concentration distribution in the FCC riser reactor.

Keywords: FCC riser; CFD; injecting velocity; injecting angle; electrostatic

摘要	I
Abstract	II
第一章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 气固两相流数值模拟方法	4
1.2.1 颗粒轨道模型.....	4
1.2.2 欧拉双流体模型.....	6
1.3 湍流模型	15
1.3.1 标准 $k - \varepsilon$ 模型(Standard)	15
1.3.2 重整化群 $k - \varepsilon$ 模型(RNG)	16
1.3.3 可实现 $k - \varepsilon$ 模型(Realizable).....	16
1.4 催化裂化反应动力学模型	17
1.4.1 催化裂化三集总模型.....	18
1.4.2 催化裂化十集总模型.....	19
1.4.3 催化裂化十一集总模型.....	20
1.4.4 催化裂化十三集总模型.....	21
1.5 论文研究内容	23
第二章 多分散颗粒的 FCC 提升管反应器内流动-反应的模拟	25
2.1 概述	25
2.1.1 模型控制方程.....	25
2.1.2 裂化反应动力学模型.....	26
2.1.3 粒群衡算模型.....	29
2.2 FCC 提升管反应器模型	32
2.2.1 反应器物理模型.....	32
2.2.2 边界条件及模型参数设置.....	33
2.3 结果与讨论	34

2.3.1 提升管内颗粒粒径分布.....	34
2.3.2 提升管内流场分布.....	36
2.3.3 提升管内温度场分布.....	40
2.3.4 提升管内浓度场分布.....	41
2.4 本章小结	44
第三章 喷嘴进料对 FCC 提升管反应器内部流场影响的模拟.....	45
3.1 概述.....	45
3.2 提升管反应器模型	45
3.2.1 反应器物理模型.....	45
3.2.2 边界条件及模型参数设置.....	46
3.3 结果分析与讨论	47
3.3.1 模型验证及网格独立性分析.....	47
3.3.2 进料速度的确定.....	49
3.3.3 喷嘴进料对进料混合区的影响.....	53
3.4 本章小结	62
第四章 静电对提升管反应器内部流场影响的模拟.....	64
4.1 概述.....	64
4.1.1 模型控制方程.....	65
4.1.2 静电模型.....	66
4.1.3 Fluent 求解过程	67
4.2 反应器模型	68
4.2.1 流化床反应器模型.....	68
4.2.2 提升管反应器模型.....	69
4.2.3 边界条件及模型参数.....	70
4.3 结果与讨论	72
4.3.1 模型验证.....	72
4.3.2 流化床模拟结果分析.....	73
4.3.3 提升管反应器模拟结果分析.....	78
4.4 本章小结	84
第五章 结论与展望	85

参考文献.....	87
主要符号说明	95
硕士期间发表文章	98
致谢.....	99

厦门大学博硕士论文摘要库

Contents

Abstract.....	I
Abstract.....	II
Chapter 1 Introduction.....	1
1.1 Overview	1
1.2 The Numerical Simulation Method of Gas-solid Two Phase Flows	4
1.2.1 Particle Trajectory Model	4
1.2.2 Eulerian Two Fluid Model	6
1.3 Turbulence Model	15
1.3.1 Standard $k - \varepsilon$ model	15
1.3.2 RNG $k - \varepsilon$ model.....	16
1.3.3 Realizable $k - \varepsilon$ model	16
1.4 Cratalytic Cracking Reaction Kinetic Model.....	17
1.4.1 The 3-lump FCC Kinetic Model	18
1.4.2 The 10-lump FCC Kinetic Model	19
1.4.3 The 11-lump FCC Kinetic Model	20
1.4.4 The 13-lump FCC Kinetic Model	21
1.5 The Main Work	23
Chapter 2 Modeling of Gas-solid Flow and Reaction in a Polydisperse FCC Riser Reactor	25
2.1 Overview	25
2.1.1 CFD Model Governing Equation.....	25
2.1.2 Cratalytic Cracking Reaction Kinetic Model	26
2.1.3 Population Balance Model.....	29
2.2 FCC Riser Reactor Model.....	32
2.2.1 Physical Model.....	32

2.2.2 Boundary Conditions and Model Parameters	33
2.3 Results and Discussion.....	34
2.3.1 Particle Size Distribution	34
2.3.2 Flow fields Distribution	36
2.3.3 Temperature Distribution	40
2.3.4 Gas Compositions Concentration Distribution	41
2.4 Brief Summary	44
Chapter 3 Numerical Simulation of the Influence of Feed Injection on Hydrodynamic Behavior in a FCC Riser Reactor	45
3.1 Overview	45
3.2 FCC Riser Reactor Model.....	45
3.2.1 Physics Model.....	45
3.2.2 Boundary Conditions and Model Parameters	46
3.3 Results and Discussion.....	47
3.3.1 Model Validation and Grid Independency	47
3.3.2 Determination of Nozzle Jet Velocity	49
3.3.3 The Effect of Feed Injection	53
3.4 Brief Summary	62
Chapter 4 Modeling the Electrostatic Effect on Hydrodynamic Behavior in a FCC Riser Reactor	64
4.1 Overview	64
4.1.1 CFD Model Governing Equation.....	65
4.1.2 Electrostatic Model	66
4.1.3 Fluent Solution Strategy	67
4.2 Reactor Model	68
4.2.1 Fluidized-bed Reactor Model.....	68
4.2.2 FCC Riser Reactor Model.....	69
4.2.3 Boundary Conditions and Model Parameters	70
4.3 Results and Discussion.....	72
4.3.1 Model Verification	72

4.3.2 Data Analysis of Fluidized-bed Reactor	73
4.3.3 Data Analysis of Riser Reactor	78
4.4 Brief Summary	84
Chapter 5 Conclusions and Prospections	85
References	87
Notation.....	95
Published Papers During Author’s Master Period.....	98
Acknowledgements	99

厦门大学博士论文摘要

第一章 绪论

1.1 概述

催化裂化 (Fluid catalytic cracking, FCC) 是原油二次加工中最重要的过程, 是生产柴油、高辛烷值汽油等轻质油的主要手段。催化裂化工艺以其投资和操作费用低、原料适应性强、转化率高等特点, 已经成为我国最重要的重油轻质化过程。目前催化裂化承担了我国 75% 以上汽油、35% 以上柴油和约 35% 丙烯的生产任务^[1]。然而随着原油的重质化和劣质化问题越来越严重, 以及不断严格的环保标准对汽油和柴油的质量提出了更高的要求。因此, 提高重油的转化率和改善裂化产品的质量已成为我国催化裂化技术发展的主要方向, 也是现有催化裂化工艺所面临的重大挑战。近年来, 各国学者针对催化裂工艺进行了大量的研究, 在工艺和设备方面都取得了大量的研究成果。工艺方面有双提升管工艺、毫秒催化裂化 (MSCC) 工艺、两段提升管催化裂化 (TSRFCC) 技术以及多区协控重油催化裂化 (MZCC) 技术等; 设备方面有催化高效再生器、提升管末端快速分离装置等^[2]。但应指出这些研究大多集中在反应前、后或反应器外部改进, 而对反应过程及反应工艺的研究则很有限。

几乎所有工业催化裂化装置都包括两个基本的部件, 催化裂化反应器和催化剂再生器。提升管反应器是目前催化裂化装置普遍采用的一种反应器, 在提升管催化裂化过程中, 由于中间产物又是目的产物, 因此提升管反应器较床层反应器优越得多, 多年来在催化裂化发展过程中起了关键作用。在提升管反应器中, 原料油与催化剂的接触时间很短 (少于 5s), 但是几乎所有的裂化反应都发生在提升管反应器中。提升管反应器沿轴向可分为预提升段、进料混合段、反应段以及出口快分区分 4 部分^[3]。高温再生催化剂由预提升蒸汽携带进入提升管反应器底部, 为原料油的气化和裂化反应提供热量。原料油从提升管侧壁的原料喷嘴以一定的入射角度高速射入提升管反应器, 与高温再生催化剂接触、传热, 并迅速气化, 同时裂化反应迅速发生。在提升管末端, 油气与催化剂经过快速分离装置 (RTD) 分离离开提升管反应器。催化剂经过旋风分离器进入汽提区, 在汽提段内催化剂吸附的油气及颗粒间的油气被进一步地分离, 最后催化剂颗粒进入再生器高温再

生。

重油催化裂化的核心是提升管反应器，重油的转化率和产品的分布与质量完全取决于原料在提升管中的雾化效果和反应状况。目前提升管反应器研究和工业应用已经比较成熟，但是提升管反应器仍然存在若干不足或不适宜之处，尤其对于重油催化裂化过程。例如，在提升管进料混合段原料油与催化剂分布不均匀，造成油剂接触效率低，而有效的油剂接触效率对于裂化反应非常重要；提升管反应器中仍然存在明显地催化剂颗粒的轴向滑落和返混现象，特别是在提升管进料混合段，而该区域的流动特性对整个提升管内的流动和裂化反应都是至关重要的；提升管长度过长造成裂化反应时间过长，中间产物发生过裂化，影响产品性能；提升管反应器内气固流动非常复杂，偏离平推流较大。上述这些现象都不利于重油转化率的提高和获得好的产品性能及分布。

针对上述提升管反应器中存在的问题，很多研究者进行了大量的研究。对于提升管进料混合段的催化剂滑落与返混问题，部分研究者^[4,5]提出了一些新型抗滑落提升管反应器，主要是通过改变提升管预提升段的集合机构和添加内构件，从根本上改善原料混合区域及其以下区域的流化状态，有效地减小了催化剂的返混和轴向滑落的影响。但是目前还没有关于抗滑落提升管反应器在工业中应用的报道。为了提高裂化反应深度，改善产品品质和分布，或在相同操作温度下获得最高的轻质油收率，国内外学者研究开发了一些新型提升管设备和技术。例如，新型进料雾化喷嘴、法国 IFP 的油剂混合温度控制技术（MTC）、Kellogg 公司开发的提升管急冷油技术以及国内的反应终止剂技术、UOP 公司开发了 VDS 和 VSS 提升管终端技术；以及石油大学（北京）研制的旋流式快速分离系统等。然而，上述技术大多数都是以提升管两端作为研究重点，针对提升管中部的研究只有急冷油技术和反应终止剂技术。但是由于对提升管内复杂的多相流动、物料分布以及裂化反应认识的不足，急冷油技术和反应终止剂技术的工业应用仍然缺乏有利的理论指导。

对于提升管反应器内气固两相流动的研究，大部分的实验研究者^[6-8]以实验室规模的小型提升管反应器进行冷模实验研究，由于测量设备和手段等因素的影响，实验研究只能得到一些宏观的结论，此外由于实验室规模的小型提升管装置内的情况与工业提升管出入甚大，所以没有太大的实际意义。为了定量掌握工业

提升管反应器内催化剂性能变化规律和原料油裂化反应历程规律，钮根林等^[9]采用在线取样的方法，分析了重油转化过程中液体产品、催化剂活性以及焦炭含量沿提升管分布，得出了一些有益的结论。但由于在工业装置上进行在线取样十分困难，同样也存在一定的限制，只能得到较为有限的信息。同时，随着提升管反应器的不断发展和改进，单靠实验操作以及经验分析对提升管进行设计与推断是不够的。因此，为了正确地对提升管进行设计和预测，获取重油催化过程的详细信息，必须借助于计算机对反应器进行模拟与研究。在过去的十年间，随着计算机技术的发展，计算流体力学理论不断完善，计算流体力学（Computational Fluid Dynamic, CFD）已经成为研究化学反应器内流动反应行为的强大工具，运用计算流体力学方法能够有效地分析反应器内部的各种传递规律，指导反应器的设计、优化及放大。

目前已经有很多研究者^[10-16]利用计算流体力学方法对提升管反应器进行数值模拟。Theologos^[10,11]建立了第一个 CFD 模型，采用两相流动模型和三集总模型预测提升管内压降、催化剂滑落等因素的变化情况。随后采用更加详细的催化裂化十集总模型，考察原料入射几何方式对提升管反应器性能的影响。Gao 等^[12]将颗粒动力学双流体模型和渣油十三集总动力学模型进行耦合，建立了三维气固两相的流动、传热及反应的数值模拟，得到了提升管反应器气固两相的环-核流动、温度分布以及气相组分浓度分布等。Novia 等^[14]采用欧拉-拉格朗日多相流和三集总动力学模型对提升管反应进行数值模拟。Baudrez 等^[15]采用稳态模拟的方法，并提出一种新的方法以考察提升管内裂化反应对流动的影响。

Buchanan^[17]研究发现，对于 100 μm 的原料液滴，完全气化的时间约为 0.3-30ms（远小于原料油的停留时间）。因此，虽然渣油催化裂化原料存在部分气化的问题，但模型研究中假设原料油液雾进入提升管后全部瞬间气化应是可行的，而且目前发表的反应动力学模型中模型参数的回归都是在气相进料的假设下进行的，采用气相进料的形式可以与这些反应动力学模型中的动力学参数保持一致。基于两相流假设，Gao 等^[12]提出了如图 1.1 的气固两相流动反应的物理模型。

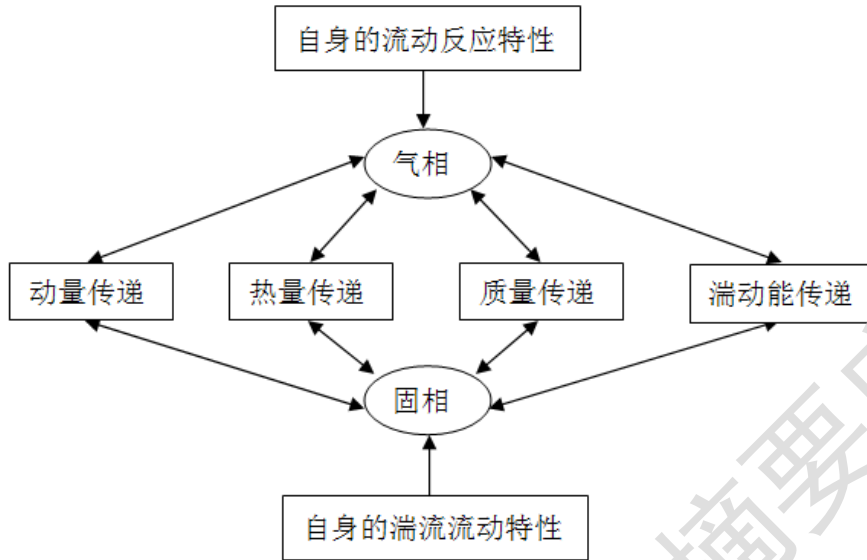


图 1.1 提升管反应器气固两相流动反应的物理模型

Fig. 1.1 Physical model of gas-solid flow and reaction in FCC riser reactor

1.2 气固两相流数值模拟方法

目前对于颗粒-流体（包括气体、液体）两相流体系的模拟，根据参照的坐标系的不同，流动模拟方法可以分为利用欧拉坐标系建立的双流体模型和在拉格朗日坐标系下建立的颗粒轨道模型。前者是将颗粒相视为连续流体进行处理，认为颗粒与流体是共同存在、相互渗透的连续介质，其中典型的代表就是欧拉双流体模型；后者是把流体当做连续介质，将颗粒相视为离散相，使用欧拉坐标系研究流体相的运动状态，在拉格朗日坐标系下对颗粒群的运动状态进行研究，即颗粒轨道模型，可用于研究多个颗粒之间的相互作用的离散单元法（DEM）在这一类模型中得到广泛的应用。

1.2.1 颗粒轨道模型

颗粒群轨道模型（Particle Trajectory Model）又称离散单元模型（Discrete Element Method, DEM），采用欧拉-拉格朗日观点，在拉格朗日坐标系下，将颗粒视为离散相，建立单个颗粒的运动方程，与气相的 N-S 方程进行耦合求解，根据求得的颗粒速度和模拟设定的时间步长积分得到颗粒的运动轨迹。然后将大量颗粒轨迹进行统计分析，得到颗粒相的流场。

根据颗粒轨道的确定方法，颗粒轨道模型又可分为确定性轨道模型和随机轨

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库