

多相体系搅拌混合效果 评价技术

王 华 徐建新 房 辉◎著



科学出版社

多相体系搅拌混合效果 评价技术

王 华 徐建新 房 辉 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书重点阐述了多相流混合效果的评价理论和方法,内容包括:工业搅拌与混合技术的概述、搅拌混合效果评价理论与方法、多相混合水动力学实验、多相混合效果的同调刻画技术、多相混合效果的演化特征分析方法等。此外,本书还详细地介绍了多相体系搅拌混合效果评价技术在 Zn-SiO_2 复合电沉积工艺中的应用。

本书可供冶金、化工、材料、制药以及生物等专业的高等院校师生及研究人员、工程技术人员等参考。

图书在版编目(CIP)数据

多相体系搅拌混合效果评价技术 / 王华,徐建新,房辉著. —北京:科学出版社,2012

ISBN 978-7-03-034328-4

I. ①多… II. ①王…②徐…③房… III. ①多相混合物-搅拌-化工过程 IV. ①TQ027

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 097750 号

责任编辑:张 析 丛洪杰 / 责任校对:张怡君

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:东方人华

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 5 月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2012 年 5 月第一次印刷 印张:8 3/4

字数:165 000

定价:42.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

多相体系搅拌混合在工业生产中往往是最必不可少的工序,常用于冶金、造纸、食品加工、制药、生物等领域,其中艾萨炉、奥斯麦特炉、Hismelt 炉等都涉及搅拌混合,聚合反应器 85% 是搅拌混合设备,还有制药发酵过程几乎全部是搅拌混合过程。搅拌混合的目的是降低物料体系内部的非均匀性,能尽快达到混合均匀,进而促进反应的进行。如何快速、准确地表征搅拌混合效果,对于混合效果评价技术提出了更高的要求。如今的混合评价技术国内还没有一个统一的标准,加上各行业对于搅拌设备的搅拌效率和搅拌质量的更高要求,一种简单有效的评价技术将极大地推进该领域的发展,特别是医药行业中药剂以及建筑行业中混凝土等的混合质量直接关系民生问题,因此,开发一种简单高效的混合效果评价技术,进一步提高搅拌效率和混合质量,具有重要的意义和推广应用价值。

本书以艾萨炉炼铜过程中反应的多相体系为对象,阐述并提出一种简单的多相流混合效果贝蒂数评价新方法,该方法可以同时实现混合均匀性及非均匀性的有效量化,同时构建多相流混合效果评价模型,得出获得较佳混合效果所需的条件。模型计算结果表明,最佳的混合效果条件与所用模型包括大小、形状等均有密切关系。另外,对多相混合效果的演化特征及其规律进行定性、定量分析。最后,本书选择 Zn-SiO_2 复合电沉积体系,以及最常用的搅拌方式——电动桨叶式搅拌来研究电解液的流动特性,通过镀层性能分析进一步验证该技术的可行性及准确性,也为深入认识和理解复合电沉积基本科学问题及其工艺优化设计提供了重要参考。因而有望成为多相体系混合效果评价中的关键技术,以解决当前工业搅拌领域的重大问题。

全书在基于国内外大量文献的分析总结基础上,结合理论分析和实验研究,重点围绕搅拌槽内多相混合效果的评价,利用代数拓扑学、数字图像处理技术、混沌学以及统计学理论,对搅拌槽内多相混合效果的评价方法及应用开展了比较系统的研究,内容主要涉及多相混合的水动力学实验的设计、多相混合效果的贝蒂数评价方法及模型研究、多相混合效果的定性分析和定量分析以及该评价方法的应用研究,提出了一种多相体系混合效果评价的新思路。

与本书密切相关的研究课题有国家自然科学基金项目“熔融盐中催化氧

化天然气制取氢气的应用基础研究(50574046)”、“基于 Hismelt 技术的云南高磷铁矿熔融还原过程中磷行为研究(51064015)”、“蓄热功能化氧载体构筑及其在化学链燃烧中的氧传递机理与吸放热特性(E042203)”。本书在编写过程中得到了昆明理工大学冶金节能减排教育部工程研究中心全体同仁的大力支持,还得到了昆明理工大学理学院各位老师的支持和帮助,在此一并向他们表示由衷的感谢。

受作者水平所限,书中不妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

作 者

2012 年 5 月于春城

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 工业搅拌与混合技术	2
1.2.2 多相体系搅拌混合效果评价技术	7
第 2 章 搅拌混合效果评价理论与方法	14
2.1 引言.....	14
2.2 计算同调群理论.....	14
2.2.1 贝蒂数	14
2.2.2 贝蒂数的性质	15
2.3 混沌理论.....	16
2.3.1 混沌混合.....	17
2.3.2 混沌理论的基本原理	18
2.3.3 混沌行为研究方法	19
2.4 统计学理论.....	23
2.5 本章小结.....	26
第 3 章 搅拌槽内多相混合的水动力学实验	27
3.1 引言.....	27
3.2 多相体系混合水动力学实验.....	27
3.2.1 模型假设.....	27
3.2.2 实验装置.....	28
3.2.3 实验方法.....	29
3.3 数字图像处理.....	31
3.3.1 二值化	31
3.3.2 腐蚀	31
3.4 本章小结.....	34
第 4 章 多相混合效果的同调刻画	35
4.1 引言.....	35

4.2	多相混合效果贝蒂数评价技术	36
4.3	实验结果分析	38
4.3.1	喷枪流量大小对混合效果的影响	48
4.3.2	喷枪浸入深度对混合效果的影响	48
4.3.3	多相混合效果评价模型	49
4.4	不同方法混合效果的比较分析	52
4.5	本章小结	57
第5章	多相混合效果的演化特征分析	59
5.1	引言	59
5.2	多相混合效果的统计学特征分析	60
5.2.1	混合效果柱状图表征	60
5.2.2	累积分布	69
5.2.3	概率分布图	75
5.3	多相混合效果的混沌特征分析	82
5.3.1	混沌混合的 0-1 检验表征	82
5.3.2	庞加莱截面法	93
5.3.3	其他方法	98
5.4	本章小结	100
第6章	多相体系搅拌混合效果评价技术应用	102
6.1	引言	102
6.2	Zn-SiO ₂ 复合电沉积工艺研究	103
6.2.1	Zn-SiO ₂ 复合电沉积工艺的选择	103
6.2.2	相关参数的实验测定	104
6.3	Zn-SiO ₂ 复合电沉积实验研究	104
6.3.1	实验方案	104
6.3.2	PIV 前期实验	107
6.3.3	技术路线	108
6.4	Zn-SiO ₂ 复合电沉积流场混合效果评价	109
6.5	本章小结	120
第7章	总结及展望	121
7.1	总结	121
7.2	展望	123
参考文献		124

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

混合是化工、冶金、材料、制药、造纸、建筑、食品加工、生物和环境等应用领域必不可少的关键单元操作之一,在物理反应过程中,搅拌混合主要是为了获得混合的均匀度,而在有化学反应参加的搅拌过程中则是为了优化反应进程^[1]。搅拌混合是对物料体系进行适当处理以降低物料内部的不均匀性,使被搅拌物料的物理或化学性质发生改变,最终达到实际工艺的要求。在工业生产中,通常都是涉及多相搅拌槽,在多相搅拌混合的过程中,搅拌设备中的流体力学状态直接影响物料的混合过程,而这些物料的搅拌混合状态往往直接决定传热、传质和化学反应的速率^[2,3]。因此,深入研究搅拌槽内多相混合效果的评价对于搅拌反应器的设计、优化以及放大具有重要意义。

根据研究尺度的异同可以将混合过程分为微观混合和宏观混合。其中微观混合是分子尺度上的均一化过程,宏观混合则指的是整个搅拌槽内的循环、分散和混合过程。本书立足宏观混合技术领域,探索搅拌槽内多相混合效果评价的新方法及其应用。

衡量多相混合效果的技术方法非常多,通常采用的是计算混合时间的方法。混合时间是表征搅拌槽中流体混合状况的一个重要参数,是评定搅拌设备效率的关键指标,同时也是搅拌反应器设计及放大的主要依据之一^[4,5]。随着搅拌混合技术的迅速发展,搅拌反应器正朝着大型化、标准化、机电一体化、智能化、高效节能化以及特殊化的方向发展。尽管如此,衡量混合效果的方法各有优缺点,且还没有形成统一的衡量标准。随着层析成像技术的发展,如电子过程断层成像(electrical process tomography, EPT)、电阻层析成像(electrical resistance tomography, ERT)、正电子发射断层扫描成像(positron emission tomography, PET)和磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)等非接触式成像技术能够实时地获取非透明及透明物料搅拌混合过程的图像^[6],使得其在流体混合效果评价方面的研究具有非常大的潜力。

本书的研究目的就是在现有搅拌混合技术研究的基础上,运用数字图像

处理技术、代数拓扑理论、混沌学以及统计学来研究搅拌槽内的多相流混合效果,提出一种简单易行的多相混合效果评价方法,并通过实际应用验证该技术的可行性,不仅可以为工业搅拌反应器的设计及参数优化提供技术支持,而且也构建和完善多相混合效果评价体系提供一定的理论和方法支撑。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 工业搅拌与混合技术

混合技术广泛应用于冶金、化工、材料、制药等工业领域。在冶金领域,如艾萨炉、奥斯麦特炉等国外先进的冶炼工艺,通过核心技术喷枪搅拌混合,提高炉内传热,促进化学反应等。在高分子材料方面,聚合反应器 85% 是搅拌混合设备,还有制药发酵过程几乎全部是搅拌混合设备。随着工业及科学技术的不断发展,流体混合技术领域在 20 世纪 60~80 年代获得了突飞猛进的发展,主要针对固液体的悬浮、气液的分散等体系的搅拌功耗以及混合时间等宏观量进行实验研究^[7]。从微观的角度主要是利用先进的测试技术和建立数学模型,获得搅拌槽内速度场、温度场和浓度场来分析流场的变化。近些年来,工业搅拌混合技术的一些进展主要体现在以下几个方面^[6]。

1. 新型搅拌与混合设备的开发

工业搅拌过程主要是混合和固液悬浮、气液扩散等,其中搅拌反应器通常采用轴流式搅拌器或开启涡轮,往往这些通用的混合设备占据了此类公司大部分的销售量,因此很多企业立足于该领域进行新产品的开发研究,致力于节能。世界最大的搅拌混合设备公司——莱宁(LIGHTNIN)公司 20 世纪 80 年代已经开发设计出大量的新型轴流式搅拌器,逐渐成为搅拌技术的领跑者。

气液两相流的混合过程(如发酵)广泛地运用于气体分散的圆盘涡轮类搅拌混合装置。随着 20 世纪 80 年代测试技术及计算流体力学的发展和研究的不断深入,世界各国相关技术领域的公司逐渐推出许多功耗更低,气体分散效果更好的搅拌反应器,而在高分子产业,聚合反应器高效性的需求大大推动了搅拌设备的发展。优化设计聚合反应器不仅要考虑其良好的混合性能,而且还要充分提高传热能力,轴流式搅拌器并不能满足这种需求。为了综合考虑混合性能、剪贴能力、传热能力以及对液体黏度的充分适应性,一些国内外的石油化工企业开始研究开发最大叶片式、叶片组合式搅拌器。

1) 新型轴向流搅拌器

目前,大多数搅拌混合设备用于低黏度的混合和固液悬浮操作,需利用叶轮提供高速的轴向循环流量,如船舶所用的推进叶轮能满足此要求,然而叶片结构复杂,要达到大型化比较困难。

最近几十年,国内外混合设备公司竞争日趋激烈,不断开发节能高效、成本低且容易大型化的轴向搅拌反应器。最有代表性的就是莱宁公司开发的新型搅拌器,这些搅拌器均有一个共同点,其叶轮的倾角和宽度是随着其径向位置而变化的^[8-10]。另外,国内外其他搅拌设备公司包括相关的科研机构也不断开发了具有自己特点和优势的轴向流搅拌器。例如,EKATO 集团设计的 INTERPRO 搅拌器,其特点是在主叶轮上单独添加了一个辅助小叶片用于消除主叶轮后面所产生的流动剥离现象,减小搅拌功率,适用于几千立方米的大型固-液悬浮搅拌设备;法国 ROBIN 公司研发的 HPM 搅拌器对叶片的倾角进行了改进,也适用于数百立方米的大型搅拌槽;国内主要是北京化工大学、华东理工大学以及浙江长城减速机有限公司等自主研发的轴向流搅拌器,这些搅拌器历经十多年的工业应用,已经创造了非常显著的经济和社会效益。

2) 新型径向流搅拌器

Rushton 涡轮作为典型的径向流搅拌器,其结构简单,在一个圆盘上安装 6 个叶片,这种圆盘涡轮搅拌器的主要作用是防止气体未分散就溢出,广泛用于气体和液体的分散过程。长期的工业应用发现该结构并不是用于气体、液体分散的最优结构。Smith 等提出利用弯曲叶片来代替直叶片的观点,研究证明该弯曲叶片可以减小背面的漩涡,进而抑制叶片后方产生气穴。该结构具有载气能力和分散传质能力强等优点,使得因为通气而产生的搅拌功率变化减小。1998 年,Bakker 等提出了弯曲非对称叶片的构想,并开发了一系列的搅拌器,这些搅拌器采用上下不对称结构,叶片曲线采取抛物线设计,实验证明该类型搅拌器综合性能明显优于前述各种径向流气液分散搅拌反应器。

3) 新型宽黏度域搅拌器

传统搅拌器主要有用于低黏度流体的桨式、涡轮式搅拌器以及用于高黏度流体的螺带、框式等搅拌器。然而,在众多反应中,往往既有低黏度流体也存在高黏度流体混合,如聚合反应^[11],此种情况下可以采用组合式搅拌器。近些年来,日本研发了一系列的宽黏度域搅拌器,其结构简单、性能高效。例如,日本住友重机、三菱重工等公司研发的最大叶片式、泛能式、叶片组合式搅拌器。这些搅拌器均具有一个相同点,即叶片在搅拌器的纵剖面的投影占据总槽纵剖面的比例非常大,使得其适应范围更广,如固液悬浮、晶析、液液分散

等,同时也使搅拌槽壁局部传热膜系数比较均匀,从而提高整体传热膜系数。

2. 搅拌测试技术与计算流体力学

评价混合设备的混合效果方法很多,如搅拌功率、传热系数、混合时间等^[12,13],其中比较常用的是测量混合时间,但是所有研究内容最基本的是测量搅拌槽内物料混合的流场,如温度场、速度场、浓度场等,随着数字图像处理技术的发展,越来越多的设备开始采用该技术获得内部流场的变化情况,进而分析其混合效果。结合先进的测试技术和计算流体力学来研究搅拌混合效果,不仅对搅拌器的优化设计意义重大,而且对于设备放大以及搅拌混合的基础研究也具有现实的理论意义^[14-17]。

1) 激光多普勒测速技术

激光多普勒测速仪(laser Doppler velocimetry, LDV)是借助被测流体中示踪颗粒的运动速度反映整个流动自身速度的点测量设备,工作原理如图 1.1 所示。从 20 世纪 70 年代开始的第一代激光多普勒测速技术产品发展到光纤化、智能化的第三代 LDV,从不能实现流体速度三个分量的同时测量,到最多可以同时测量八个点的三维速度。光纤的应用在一定程度上促进了 LDV 的飞速发展,同时也不断地扩展了测量区域,使得 LDV 可以满足很多高危险、高腐蚀环境的测量需要^[18,19]。在信号处理技术方面(如波群信号及自相关分析技术)的推广应用极大地推动了 LDV 的发展。实际上示踪颗粒的跟随性决定了 LDV 的测量精度以及可靠性,在连续牛顿流体中,示踪颗粒直

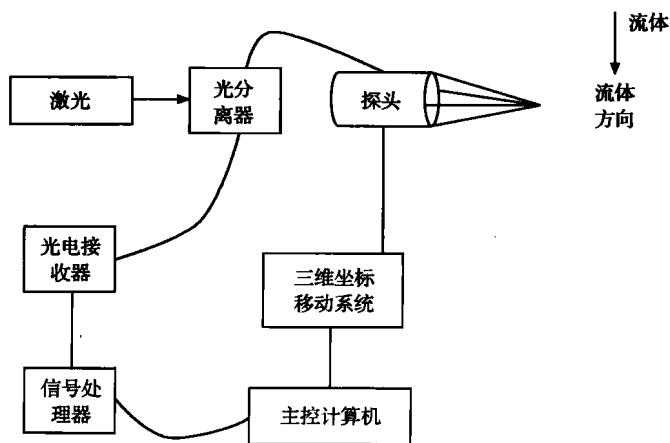


图 1.1 LDV 测速原理示意图

径为 $1\sim 10\mu\text{m}$ 时,其跟随性对 LDV 的精度影响很小,一旦涉及颗粒跟随性限制很大的流场就不能使用 LDV。

通过 LDV 不仅可以获取搅拌槽流场的速度场、湍流强度场、雷诺应力场等,而且还可以进一步计算获取排量、功耗等宏观特征参数。最近几年,激光多普勒测速技术还被广泛应用于测量一些多层桨的混合特性,主要原因是单层桨所用的测排量的颗粒跟踪法是不适应多层桨的。

激光多普勒测速仪是在某一个测点位置一段时间内进行测量的,获得的是流场中点单元在其采样时间之内的平均速度大小,往往对于瞬时速度的响应不敏感,所以只适应稳态或者周期变化的流场,而且如果要得到整个流场必须逐点测量每个点的速度,显然计算量很大。

2) 粒子成像测速技术

粒子成像测速仪 (particle image velocimetry, PIV) 的基本原理是激光束通过光学调制为片光源,在流场添加示踪颗粒,利用两个脉冲激发光源,获得流场的两次曝光图,然后通过曝光时间和位移计算速度场,原理如图 1.2 所示。PIV 是在数字图像处理技术的基础上发展而来的,目前的 PIV 主要有二维和三维,一般的二维 PIV 是采用自相关或者互相关技术获取片光源照射下的二维流场,而三维 PIV 是采用两个同步相机 (charge-coupled device, CCD) 或者全息技术^[20-26]。

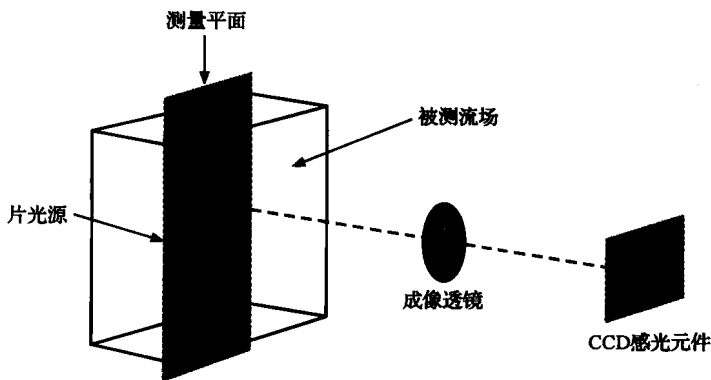


图 1.2 PIV 测速原理示意图

3) 电子过程断层成像技术

前面所述的 LDV 和 PIV 均属于光学设备,必须限制在光学透明的搅拌槽内进行测量,而且液体内不能出现高浓度的气泡以及悬浮的固体。20 世纪

80 年代后期,英国 UMIST 大学自主研发了一种称为电子过程断层成像的新技术,简称 EPT(electrical process tomography),该技术不仅可以测量透明介质的物料混合,而且还可以测量不透明介质的流场,是一种适用于各种多相流体系的非接触式实时检测和可视化技术^[6]。EPT 的工作原理与计算机层析成像(computerized tomography,CT)类似,一般情况下有 8~16 只传感器围绕在被测槽或者被测管外壁一周(图 1.3),这些传感器是等距离贴附在外壁的,所用的传感器一般是长方形不锈钢电极片,既充当发射器又起到接收器的作用。该技术要求管槽内要有两种不同电性能(如电导率、电容率等)的物质混合,然后通过有规律的电脉冲作用,四周所有的传感器组合会将数据采集传送给计算机,而计算机将会按照顺序和信号进行记录,利用数字图像重建技术将搅拌槽或者管道的横截面图进行还原操作,其速度可以达到 100 帧/s,根据实际情况,若需要重构槽或者管内的三维图像和实体造型,那么要采用多组传感器对不同高度或者断面进行断层成像。

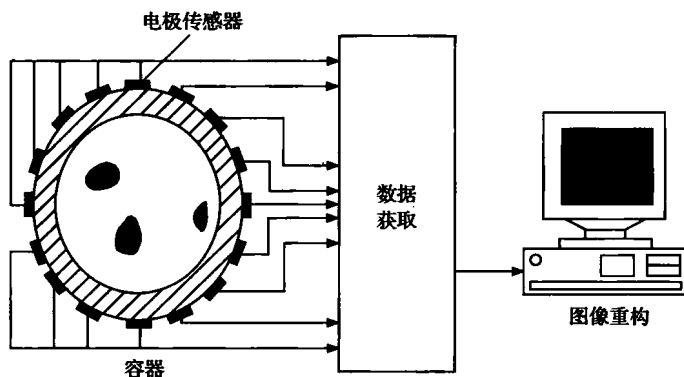


图 1.3 配置 16 只传感器的 EPT 系统

EPT 技术已经成功地应用于气液两相流混合问题,实现了搅拌槽内载气分布的三维图像重构,还被应用到固液悬浮体系中计算固体在搅拌反应器内的浓度分布。

4) 计算流体力学技术

目前,计算流体力学(computational fluid dynamics,CFD)技术在搅拌槽流场模拟中的应用已经逐渐深入和细致,相关文献报道自从 20 世纪 80 年代就已经开始,涉及多相流混合的仿真模拟,甚至加入化学反应的情况等模拟工作陆续开展。众所周知,关于多相流搅拌混合的研究还没有形成一套完整的理论体系,还要借助一些经验。大量的实践发现^[27-37],根据操作经验设计优

化的搅拌反应器仍然有很多是处于非最佳状况的。伴随工业的发展,工业生产中的混合、传热传质要求也不断提高,这就使得 CFD 技术有了非常大的优势,不仅可以直观地掌握搅拌槽内的混合流动情况,而且能够模拟各种工况来预测结果,方便指导用户进行搅拌反应器的优化设计以及新型搅拌器的开发。

尽管计算流体动力学发展迅速,但是该技术仍然面临很多问题。CFD 技术是基于 N-S 方程和湍流模型,在模型计算时做了很多假设,这使得模型缺乏准确性。例如,湍流模型一般都不考虑漩涡、强涡流区等物理过程,化学反应也无法准确描述,复杂的几何体结构、黏弹性和各向异性等使得 CFD 模拟发展非常困难^[38-44]。

3. 搅拌设备选型与专家系统

目前,搅拌混合设备的开发设计多数依据专家的经验,并结合人工智能技术和基于知识的系统共同应用到混合设备选型和优化设计中。据统计,几乎所有的专业混合设备公司均有自己的设计软件^[45]。

20 世纪 90 年代开始就有关于混合设备选型设计的专家系统报道。例如, CHEMINEER 公司开发设计了涡轮搅拌设备研发的知识库软件 AgDesign, 90% 的混合设备是通过此软件设计的。另外, 1994 年芬兰 Lappeenranta 工业大学也公开发表了混合设备初步开发设计的知识库系统论文。国内主要有浙江大学等单位自主研发了搅拌反应器的智能化辅助选型和设计系统。该软件不仅可以实现搅拌反应器的选型设计、机械设计以及经济性评价,而且还可以直接给出智能化的计算机辅助设计。该系统适用于牛顿流体和非牛顿流体、液液体系、固液体系以及气液体系,甚至可以用于计算容积超过几百立方米的体系。目前,浙江长城减速机有限公司也正在与国内科研机构联合开发搅拌专家系统,已经初步完成了数据库的设计和部分设计工作,系统全面的研发工作正在稳步进行。

综上所述,由于实际应用体系表现出多样性以及物料流变特性的复杂性,如何准确描述和模拟复杂的混合与反应耦合的过程,成为搅拌混合技术的一个很好的发展方向。随着新的测试技术以及仿真模拟技术的发展,流体混合技术发展空间不断扩大,也在一定程度上为搅拌混合设备的设计优化和放大提供理论指导和技术支撑。

1.2.2 多相体系搅拌混合效果评价技术

评价一个搅拌设备的混合效果主要有宏观和微观两种手段,宏观的方法主要有测量搅拌功率、搅拌混合时间等,微观的测量方法主要有测量速度场、

温度场等,而在实际应用及研究中,主要是通过测量混合时间这一宏观量来衡量混合效果^[46-65]。混合时间是衡量搅拌器混合性能的一个重要参数,定义为达到一定均匀程度所需要的时间。

目前,测量混合时间的方法有很多,如电导率法、光学法、温差法、激光感应荧光法、计算机层析成像法、液晶温度记录法以及计盒维数法等。最近,法国 Le Coent 等^[66]提出了一种新的测量混合时间的方法,称为计盒维数腐蚀法,该方法具有好的重复性、准确性、不破坏反应器内的流动状态、廉价、稳定性好并能应用于工业反应器中,下面对这些国内外的测量混合时间的方法进行简单的介绍。

1. 电导率法

电导率法是最常用的测量混合时间的方法之一。该方法是在混合体系渐进稳定状态后,往搅拌槽内瞬时添加少量的电解质(如 NaCl 等),然后通过电导率仪测定并记录下搅拌槽中某个位置或者几个位置电导率随着时间的演化趋势,根据演化曲线来判断混合时间。在国际上通用的是 95% 规则来判断,即示踪剂浓度达到最稳定浓度的 95%~105% 时的时间可以确定为混合时间^[67]。

电导率法测量起来简单方便,因此得到较为广泛的应用。然而该方法的缺点是探针的安放位置、个数以及尺寸均带有主观性,一定程度上会影响测量混合时间的精度。而且该方法不适合于高黏流体,搅拌介质要求为去离子水,同时,电导电极对搅拌槽的流场也会有一定的影响^[68-72]。

2. 光学法

光学法的主要原理是往搅拌槽内加入一种可以与反应器内的液体发生带颜色变化的化学反应的示踪剂,通过目测或者高速摄像机记录颜色的变化全过程,判断混合时间。

光学法是从整体上对混合时间进行考察,测量方法简单,近年来许多研究者都采用此方法测量混合时间。但由于该方法只能在透明或者半透明的搅拌反应器中进行,不能应用于工业尺度的搅拌反应器,也由于装置复杂,因此实际应用较少^[73]。

3. 温差法

温差法的原理是往搅拌槽内的液体中添加少量的热流体,借助热电偶来

测定搅拌反应器中某个位置或者某几个位置温度随时间的演化,从而获得响应曲线来确定混合时间。

温差法的缺点是受热电偶安放位置和个数的影响,同时热电偶的插入在一定程度上干扰搅拌反应器的流场^[74]。

4. 激光感应荧光法

激光感应荧光法的原理是往搅拌反应器内添加一种荧光指示剂,同时借助激光片光源照射,荧光指示剂伴随浓度的变化而在激光照明的薄片中发出对应强度的光,整个混合过程利用高速摄像机进行捕捉记录,然后根据图片确定混合时间。

激光感应荧光法的缺点与光学法类似,同样只能用于透明或半透明的搅拌反应器中,不能用于工业搅拌槽的诊断实验^[54]。

5. 计算机层析成像法

计算机层析成像法的原理是从四个方向对搅拌反应器进行照射,利用平行单色光照射染色的液体,获得一个二维图像,然后确定混合时间^[75,76]。

该方法也只能用于透明或者半透明反应器中,不能应用到工业搅拌反应器中。此外,通过添加少量的具有放射性的液体示踪剂(如锝 99、钠 24 等),监视其浓度变化来研究混合时间。这种示踪剂灵敏度较高,能够在百万分之一的数量级之上进行测量,工业中只需要加入一点示踪剂便可以得到基本的动态响应。但是该方法的缺点是放射性物质的获取较为困难,并且对含放射性实验材料的废弃物处理要求较为严格。

6. 液晶温度记录法

液晶温度记录法的原理是根据热敏液晶在不同的温度状态下显示颜色的不同来确定混合时间。先将热敏液晶混合在搅拌槽内的液体中,然后加入热的脉冲,其混合过程就表现为槽内不同位置的液晶显示不同的颜色。然后通过目测或数码摄像记录,分析图像后获得混合时间^[74]。

此技术克服了温差法采用传感器的缺点(如需要同时多点测量、耗时、干扰流场等)。此方法的缺点是要求反应器透明或者半透明,而且测定的精确度依赖于温度的标定(液晶颜色显示与温度信息之间的关系),同时准确解释液晶的图像也是一个非常复杂的过程。

7. 计盒维数法

假定 N 维直角坐标空间中有一个集,于是我们就可以想象用边长为 ϵ 的 N 维立方盒来覆盖这个空间 ($N = 2$ 时,“盒子”为正方形; $N = 1$ 时,“盒子”是长度为 ϵ 的间隔)。由于分形内部有各种层次的空洞和缝隙,有些盒子是非空的,而另外的盒子是空的。数一下有多少盒子是非空的,即数出需要覆盖的盒子的数目 $\tilde{N}(\epsilon)$ 。当 ϵ 充分小时,计盒维数可表示为

$$D_0 = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln \tilde{N}(\epsilon)}{\ln(1/\epsilon)} \quad (1.1)$$

作为例子,我们先考虑康托尔集合:取 $[0,1]$ 线段,三等分之后舍去中段;再三等分剩下的两段,同样舍去相应的中段;如此无穷重复下去,最终剩下的点的集合称为康托尔集合,因此康托尔集合包含 2^n 段,每段的长度为 $1/3^n$ 。故 $D_0 = \lim_{n \rightarrow \infty} \ln 2^n / \ln 3^n = \ln 2 / \ln 3 \approx 0.6309$ 。

计盒维数法^[77]的主要缺点是不能反映几何对象的不均匀性:含有一个点和众多点的盒子在式(1.1)中均具有同样的权重,不能完全反映出分形内部的不均匀性。修正的办法是把计盒维数做得更细一些,数清每个盒子中的点数,算出分形中的点落入第 i 个盒子的概率 P_i ,就可以写出用尺寸为 ϵ 的盒子进行测度所得出的信息量

$$I(\epsilon) = - \sum_{i=1}^{N(\epsilon)} P_i(\epsilon) \ln P_i(\epsilon) \quad (1.2)$$

信息维数则定义为

$$D_1 = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{I(\epsilon)}{\ln(\epsilon)} \quad (1.3)$$

不难看出,当各盒子具有相同的权重,即 $P_i(\epsilon) = 1/\tilde{N}(\epsilon)$ 时,信息维数等于计盒维数。图 1.4 为含 500 个像素图样的分形维数的计算,图中斜率值即为 D 。

8. 计盒维数-腐蚀法

通过对均匀分布情况下颗粒的分布进行研究,法国学者 Le Coent 等^[66]得出下面的结论:在对同一幅图像进行腐蚀操作 5 次后,发现 $\ln N_r$ 与 $\ln r$ 的拟合曲线始终是一条直线,但是分形维数 D 在任何情况下是不变的,充分说明了分形维数 D 并不能准确地代表图样中颗粒的分布,如图 1.5 所示,因此他们改进了经典方法,将连续腐蚀五次后的图样计算所得到的分形维数 D 进