

电场作用下液滴动力学 特性及应用

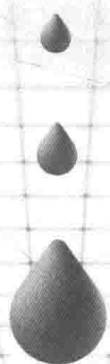
张军 何宏舟 著

DIANCHANG ZUOYONGXIA YEDI DONGLIXUE TEXING JI YINGYONG

非外借



化学工业出版社



电场作用下液滴动力学 特性及应用

DIANCHANG ZUOYONGXIA YEDI DONGLIXUE TEXING JI YINGYONG

张军 何宏舟



化学工业出版社

· 北京 ·

本书内容紧密围绕静电雾化、电破乳等工程应用领域,较为系统地介绍了电场作用下液滴的运动、变形、破碎、聚结等动力学特性及其相关应用。介绍了包括电场作用下液滴动力学特性的研究意义、电场作用下单个液滴动力学特性、静电雾化过程中的液滴动力学特性及应用、双毛细管静电雾化中液滴动力学特性、电场作用下油中水滴的聚结特性及应用等内容。本书大部分内容为作者及所指导的研究生近 10 年来在电流体力学、静电雾化技术、电破乳技术方面的阶段性研究工作的成果总结,书中也包含了其他一些研究者在该领域的一些新的研究成果。

本书不仅可供化学工程、农业工程、能源工程、微机电领域的工程技术人员以及从事电雾化、电破乳、微机电系统设计的工程技术人员和管理人员参考,还可供高等学校化学工程、能源工程、机电工程等相关专业的师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电场作用下液滴动力学特性及应用 / 张军, 何宏舟
著. —北京: 化学工业出版社, 2018. 8
ISBN 978-7-122-32239-5

I. ①电… II. ①张… ②何… III. ①液滴-动力学-
研究 IV. ①TQ038. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 112650 号

责任编辑: 卢萌萌
责任校对: 王素芹

文字编辑: 汲永臻
装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 三河市航远印刷有限公司

装 订: 三河市瞰发装订厂

787mm × 1092mm 1/16 印张 11³/₄ 字数 188 千字 2018 年 12 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 85.00 元

版权所有 违者必究



液滴在电场中会呈现出定向运动、变形、振荡、聚结、破碎、分散等行为特性,研究液滴的这些行为特性,对于人们深入了解电场力对液滴运动的影响规律、静电场和流场的耦合规律等有重要的学术意义。同时,利用液滴在电场中的这些特性,可在不同的工程场合应用以达到不同的工业需求。如静电雾化技术可用于工业喷涂、材料制备、燃油雾化燃烧、药物喷洒等;液滴的电分散特性可用于微颗粒的制备;液滴的电聚结特性可用于乳化液的破乳及油水分离等。此外,在生物检测、有机合成的微反应器中,利用外加电场来控制液滴的分裂,可实现样品和反应产物的高效分离。因此,研究液滴在电场中的动力学特性也具有较为广阔的应用前景。液滴在电场中的行为特性属于电流体力学的研究范畴,电流体力学是随着流体力学及电动力学发展而出现的新兴交叉学科,是研究电场作用下流体介质的流体动力学问题的学科。近几十年来,随着其他学科的发展,电流体力学也得到飞速发展,近年来能看到大量有关电流体力学的基础研究及在各方面应用的研究文献,电流体力学已在化工、医药、航天、微机电等许多工程领域得到了广泛应用。但是,目前涉及电流体力学的基本理论、研究成果的研究著作或书籍并不多见。2010年,江苏大学罗惕乾教授等的著作《荷电多相流理论及应用》一书出版,作者也有幸参与了其中一章的撰写。该书属于国内较早涉及电流体力学方面的著作,对于促进电流体力学的应用及发展具有非常积极的意义。但该书主要内容侧重于静电雾化或静电喷粉中荷电两相流理论及应用,而对于液滴在电场中的动力学特性较少涉及。基于此,作者将本人及所指导研究生在近10年来的有关液滴在电场中的动力学特性领域的研究成果进行了较为系统的整理,并少部分融入了其他学者的一些研究成果,撰写了本书,希望能够对促进电流体力学的进一步发展起到抛砖引玉的作用。

本书主要内容包括电场作用下单个液滴动力学特性、静电雾化过程中的液滴动力学特性及应用、双毛细管静电雾化中液滴动力学特性及电场作用下油中水滴的聚结特性及应用等。本书可供化学工程、农业工程、能源工程、微机电领域的工程技术人员及从事电雾化、电破乳、微机电系统设计的工程技术人员和管理人

员参考，也可作为化学工程、食品工程、能源工程、机电工程等相关专业的研究生及高年级本科生的专业课程及选修课程教材。

本书的一些研究成果得到了福建省科技计划项目（2017H0024）、福建省自然科学基金（D0810021，2009J01261）、福建省教育厅科研项目（JK2012027）及教育部留学回国人员科研启动基金（教外司留〔2008〕890号）等项目的资助。作者对各级政府部门的科研资助表示衷心的感谢！作者也要感谢作者所指导的硕士研究生黄冠星、龚翔等，一些研究成果是和他们协作获得的。

由于作者水平有限，加之电场中液滴动力学特性的复杂性，书中观点和结论可能有不妥之处，敬请广大读者批评指正。

著者

2018年7月于集美大学



第1章 绪论

- 1.1 电场作用下液滴动力学特性的研究意义/1
 - 1.1.1 静电雾化/1
 - 1.1.2 电破乳及电分散/2
 - 1.1.3 微流控技术/3
- 1.2 电场作用下液滴动力学特性的研究进展/3
 - 1.2.1 静电雾化中荷电液滴的动力学特性/3
 - 1.2.2 电场作用下液-液系统中离散液滴的动力学特性的基础研究/6
 - 1.2.3 与液滴动力学特性有关的电破乳应用研究/7
- 1.3 本书的主要内容/8
 - 1.3.1 电场中单液滴的动力学特性研究/8
 - 1.3.2 静电雾化过程中荷电液滴群的运动特性/8
 - 1.3.3 双毛细管静电雾化中液滴运动特性/9
 - 1.3.4 电场中液滴的聚结特性/9
- 1.4 静电的性质/9
 - 1.4.1 电荷、点电荷与库仑定律/9
 - 1.4.2 静电场与电场强度/10
 - 1.4.3 电位和电位差/11
 - 1.4.4 高斯定理/11
 - 1.4.5 电偶极子/12
 - 1.4.6 电荷分布与电荷密度/14
 - 1.4.7 导体和电介质/14
 - 1.4.8 静电容量/15
 - 1.4.9 静电场的能量/16
 - 1.4.10 物体带电方式/16

参考文献/17

第2章 电场作用下单个液滴动力学特性

- 2.1 电场中单液滴运动特性/21
 - 2.1.1 单液滴受力分析/21
 - 2.1.2 液滴所受静电力与其他力的比较/26
 - 2.1.3 电场中单液滴运动/26
- 2.2 电场中球形电介质液滴的场强分布及极化电荷分布/28
- 2.3 液滴在电场中的变形特性/32
 - 2.3.1 液滴变形理论分析/32
 - 2.3.2 电场作用下油中水滴变形的实验研究/35
 - 2.3.3 均匀电场中液滴变形的耗散粒子动力学模拟/39

参考文献/48

第3章 静电雾化过程中液滴动力学特性及应用

- 3.1 静电雾化原理/51
- 3.2 人工神经网络在液滴平均滴径预测中的应用/53
 - 3.2.1 实验配置/54
 - 3.2.2 液滴直径预测方法/54
 - 3.2.3 预测结果及分析/57
 - 3.2.4 结论/57
- 3.3 静电雾化中不同雾化空间液滴带电量的实验测试/58
 - 3.3.1 实验配置及测试方法/58
 - 3.3.2 实验结果及分析/60
 - 3.3.3 结论/62
- 3.4 静电雾化过程中液滴的尺寸及电荷密度联合分布模拟/62
 - 3.4.1 模型建立/63
 - 3.4.2 数值计算方法/66
 - 3.4.3 预测结果分析/67
 - 3.4.4 结论/70
- 3.5 静电雾化中荷电液滴的运动模拟/71
 - 3.5.1 理论模型/71
 - 3.5.2 计算过程说明/76
 - 3.5.3 模拟结果分析/79

- 3.6 液液静电雾化过程中液滴运动特性/87
 - 3.6.1 理论模型/88
 - 3.6.2 实验测试/90
 - 3.6.3 模拟过程/93
 - 3.6.4 模拟结果分析/95
 - 3.6.5 结论/99
- 3.7 采用高压静电雾化法制备油水乳化液的实验研究/100
 - 3.7.1 实验配置/100
 - 3.7.2 实验结果及分析/101
 - 3.7.3 结论/108

参考文献/109

第4章 双毛细管静电雾化中液滴动力学特性

- 4.1 双毛细管及多毛细管静电雾化简介/113
- 4.2 相位多普勒测试技术简介/115
 - 4.2.1 SCD-23 二维激光相位多普勒粒径测速仪主要技术指标/115
 - 4.2.2 测试原理及系统组成/116
- 4.3 双毛细管静电雾化的实验研究/120
 - 4.3.1 双毛细管雾化模式/120
 - 4.3.2 双毛细管雾化中液滴速度及尺寸的实验研究/123
 - 4.3.3 液滴沉积特性的实验测试/126
- 4.4 双毛细管静电雾化过程中液滴运动模拟/128
 - 4.4.1 理论模型/129
 - 4.4.2 计算过程说明/132
 - 4.4.3 计算结果分析/134
- 4.5 结论/141

参考文献/142

第5章 电场作用下油中水滴的聚结特性及应用

- 5.1 液滴电聚结原理/145
- 5.2 油水系统中两个临近液滴的聚结特性/147
 - 5.2.1 两个相邻液滴聚结过程的实验研究/147
 - 5.2.2 两相邻液滴聚结过程理论模拟/151
 - 5.2.3 结论/157

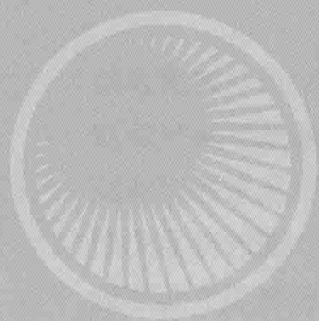
5.3 油水系统中荷电离散液滴运动特性/158

5.3.1 不考虑液滴运动中因聚结而引起的液滴尺寸的变化/158

5.3.2 考虑液滴运动中因聚结而引起的液滴尺寸的变化/168

5.3.3 结论/177

参考文献/179



第1章 绪论

1.1 电场作用下液滴动力学特性的研究意义

液滴在电场中会呈现出定向运动、变形、振荡、聚结、破碎、分散等行为特性,研究液滴的这些行为特性对于人们深入了解电场力对液滴运动的影响规律、静电场和流场的耦合规律等有重要的学术意义。同时,利用液滴在电场中的这些特性,可在不同的工程场合应用以达到不同的工业需求,因此,研究液滴在电场中的力学行为及动力学特性也具有重要的应用背景。以下简单介绍一下所涉及的几个工业应用场合。

1.1.1 静电雾化

在电场作用下,液体射流破碎成细小液滴的过程称为静电雾化(electrospray)。静电雾化的实质是库仑力克服液体表面张力使液体分散成细小液滴的一个电分散过程。与其他雾化方式相比,静电雾化具有一些独特的优点,如形成的液滴尺寸更小且直径分布均匀,通过调节电参数可对液滴运动轨迹、速度及沉积特性进行调控^[1]。因此,在雾化燃烧、药物喷洒、工业喷涂、分散体系制备、微小胶囊制备、纳米薄膜材料制备、小卫星推进等许多工程场合得到广泛应用^[1~3]。在静电雾化的应用中,荷电液滴的运动特性与雾化效果及液滴沉积特性有直接的关系。如在汽车喷漆中或其他工业喷涂中,小液滴比大液滴更容

易随气流流过目标表面,液滴的传输效率取决于不同大小的液滴运动速度及轨迹,因此,了解不同滴径液滴的速度及运行轨迹对提高液滴输运效率及喷涂质量极为关键。在薄膜材料的静电喷雾沉积制备中,如何通过静电场来控制液滴轨迹,对液滴沉积效果及所制备的材料性能有更为实际的意义。在静电雾化燃烧中,喷射角与贯穿距则直接关系到燃烧效果,而归根到底都取决于液滴的运动特性。因此,无论静电雾化应用于任何工业场合,都会涉及一些普遍存在的机理性问题,如荷电液滴的速度及轨迹是怎样的?荷电液滴的相互作用(同性电荷的排斥力)如何影响速度和轨迹?滴径与滴速的关系是怎样的?雾化随着时间是如何演化的?搞清这些问题不仅直接关系到雾化质量的提高,而且可以获得静电雾化场更多的信息,更进一步揭示荷电雾化流场的内在规律。

1.1.2 电破乳及电分散

电破乳(electric demulsification)技术是通过对原油乳状液施加电场、促使原油乳状液中的小液滴聚结成为大液滴后沉降,实现油水分离的方法。由于其结构简单,能耗低,效率高,适用范围广,目前已在石油化工、化学工程等领域得到广泛应用^[4]。在直流电场中,液滴的电聚结主要表现为电泳聚结和偶极聚结。电泳聚结是在电场力作用下,离散水滴向同自身所带电荷电性相反的电极运动,由于离散水滴大小、带电量、运动阻力各不相同,水滴会发生碰撞、合并而增大,从油中沉降。多数未聚结的液滴将运动到电极附近,使电极附近液滴浓度激增,从而在电极附近进一步聚结,并在重力作用下沉降。此外,在高压电场作用下,乳化液离散液滴受电场的极化和静电感应,使液滴两端带上不同极性的电荷,即形成诱导偶极。液滴在两端不同极性的电荷作用下沿外电场方向被拉长变形,这使得液滴界面膜强度变弱,相临近液滴相互碰撞而聚结为大液滴,即偶极聚结。显然,研究液滴在电场中的定向运动、液滴的变形及聚结动力学特性,对于静电破乳器的设计及提高破乳效率极其重要。当外加电场较高时,液滴还会出现电分散特性,即较高的场强使得液滴破碎成更小的液滴,这对于电破乳显然不利,但液滴在高场强下的电分散特性可用于化工、食品等领域液液两相分散体系的制备,因此,研究液滴在高场强下的电分散特性也具有重要的应用价值。

1.1.3 微流控技术

微流控技术(microfluidics)广泛应用于微电子、微机械、生物工程和纳米技术领域。在微流控技术中,会涉及液滴在电场中的变形、分裂、合并等特性^[5]。如在微机械系统中会涉及电润湿(electrowetting),即通过施加在固体电极与导电液体间的电场来调节固-液间界面张力,进而改变液滴在基板上的润湿性,即改变接触角,从而实现固体表面上的液滴驱动或操纵。因此,研究电场作用下液滴在基板上的变形、铺展特性对于微机械中的液滴操纵及驱动尤为重要。

此外,还有其他一些场合也会涉及电场中的液滴动力学问题。如研究表明,电场有助于改善液滴的传质^[6],因此,利用液滴的电分散特性可用于提高液液萃取中的传质效率。在生物检测、有机合成的微反应器中,利用外加电场来控制液滴的分裂,可实现样品和反应产物的高效分离^[7]。利用液滴电分散特性还可用于制备乳化液,尤其是微乳液等^[8]。这些场合同样会涉及电场作用下的液滴动力学问题。

1.2 电场作用下液滴动力学特性的研究进展

电场作用下液滴动力学特性涉及电流体力学、多相流体力学以及微流动等研究内容的交叉领域,除了一些共性的基础问题的研究外,研究的侧重点还与工程应用背景有关。为清楚起见,以下分不同方面对近些年的研究情况综述如下。

1.2.1 静电雾化中荷电液滴的动力学特性

自泽莱尼(Zeleny)较早发现液体的静电雾化现象以来,许多学者对荷电射流的形成、射流破碎及所形成的荷电液滴的运动特性进行了大量的卓有成效的研究,许多成果在不同的工程领域得到较好应用。有关静电雾化中荷电液滴的

运动特性的研究,可见的文献不少。从20世纪70~90年代开始,Gañán-Calvo、Keki Tang、Hartman等的研究均涉及荷电液滴的运动特性,主要研究方法为实验测试及理论模拟。在实验测试方面,主要通过PDPA、高速摄影等测试仪器对液滴的尺寸分布、液滴速度以及液滴的运动轨迹进行测试,以了解雾化空间中液滴的动力学特性。如Keki Tang, Hartman等采用PDA对不同雾化条件下的液滴尺寸、速度进行了测试,揭示了不同尺寸液滴的运动趋势。Gañán-Calvo对不同物性参数的流体静电雾化的液滴尺寸及雾化电流进行了实验测试,获得了一些计算液滴尺寸的经验公式。在理论模拟方面,更多是采用拉格朗日法对荷电液滴运动进行模拟。如Gañán-Calvo考虑液滴空气阻力、电场力(由外加电场引起),建立了液滴运动方程,描述了荷电液滴在强电场中的运动,他的运动方程中没有考虑荷电液滴之间的库仑斥力。Keki Tang则对液滴在雾化轴心的运动进行了一些模拟,分析了液滴在轴心的运动规律,其滴径采用测得的平均滴径。在上述基础上,Hartman^[9]考虑了液滴空气阻力、电场力(由外加电场引起)及荷电液滴之间的库仑斥力,建立了荷电液滴群运动方程,对120个荷电液滴的运动进行了模拟,一定程度上揭示了小液滴和大液滴的运动趋势、荷电液滴之间的相互作用对液滴运动的影响及雾化随时间的演化规律。他的模拟滴径及初始速度采用实验测得滴径分布及速度分布,液滴初始位置根据实验大致假设,并且由于其外加电场强度(接静电高压的金属毛细管及接地的平板电极形成)采用四个电量不同的点电荷形成的近似电场来代替,故只适用于距毛细管较近处。2006年,Colbert^[10]在对Rotary-Bell雾化器研究中也对荷电液滴的轨迹进行了模拟及数值求解,他虽然考虑了连续相流场对液滴运动的影响,但他的运动方程中只考虑阻力和外加电场力,没有考虑荷电液滴之间库仑斥力,不能揭示荷电液滴相互作用对运动的影响。Colbert求解方程时的液滴初始速度及位置也是根据实验而假设的。2010年,Khalid^[11]考虑静电力,采用商业软件对静电液滴的生成进行了数值模拟,其模拟只涉及射流液柱破碎成液滴阶段的运动,而没有涉及大量液滴的后续运动。Hume^[12]还对液液静电雾化中的单个液滴运动进行了模拟,他的运动方程涉及液滴的阻力、重力、浮力及电场力,并且考虑了电荷衰减,但他只是模拟了单液滴的运动,并且只是一维运动,其液滴的初始速度及位置也是假设的。国内有关学者也对荷电液滴的运动进行了一些模拟研究,如文献[13]采用商业软件Fluent对静电雾化沉积过程中荷电液滴

群的运动进行了模拟,揭示了液滴运动对沉积效率的影响,其滴径分布采用实测的分布,液滴群的初始速度及初始位置也是假设的。文献[14, 15]则对荷电液滴及荷电油滴的轨迹进行了模拟,其模拟计算时没有考虑液滴直径分布,模拟液滴采用平均滴径进行计算,其液滴初始速度及位置也是假设的。近年来,作者^[16]也对静电雾化中荷电液滴群的运动特性进行了模拟。考虑了射流破碎位置、液滴的尺寸分布及电荷分布、荷电液滴之间的相互作用,尤其考虑了在液滴生成过程中液滴随时间的变化,对连续生成的液滴群的运动进行了模拟,并定量分析包括外加电场力、液滴之间相互作用力等各种力对液滴运动的贡献。此外,作者^[17]还对液液静电雾化中的液滴运动特性进行了研究,揭示了不同于空气中雾化的液滴运动的一些特点。

在某些应用场合,为了提高雾化效率,往往需要较大的雾化流量,此时,可能需要双喷嘴或多喷嘴(多毛细管)雾化系统。近20年来,也有一些关于这一主题的研究报道。与单毛细管(单喷嘴)雾化不同的是,多毛细管(或多喷嘴)系统之间存在着多雾化之间的相互影响,此外,毛细管之间的间距及布置还会带来场强分布的改变。Snarski^[18]、Dunn^[19]等对静电双雾化进行了实验研究,分析了施加电压及毛细管间距对液滴速度分布及两个雾化之间的液滴混合的影响。Snarski等的研究表明,由于两个雾化的相互干涉,两个雾化所形成的羽流(plume)均有向外侧扭曲的趋势。当施加电压增大时,两雾化的液滴混合趋于均匀。最近一年来,作者^[20]也对双毛细管雾化的射流及液滴运动整个过程进行了理论模拟,揭示了双雾化之间的干涉机理,模拟的两个雾化所形成的羽流扭曲形态与Snarski等的研究结果较为相符。Rulison等^[21]对一组线性排列的多毛细管静电射流进行了研究,研究表明,毛细管间距越小,出现稳定锥-射流所需的电势越高。Regele^[22]、Si^[23]等针对多毛细管组,建立了预测中心毛细管形成稳定锥-射流的起始电压。这些研究表明,多毛细管系统形成稳定锥-射流所需要的起始电压要高于单毛细管系统。此外,Lhernould等也针对不同的应用场合,对多喷嘴的配置、场强分布及多喷嘴设计做了一些工作,并取得一定进展。但是,由于多毛细管雾化过程的复杂性,如何考虑更多因素,对液滴运动进行精确控制,获得所需的雾化效果及沉积特性,仍需要做大量的工作。

1.2.2 电场作用下液液系统中离散液滴的动力学特性的基础研究

当液滴处在电场中时, 由于两流体间(液滴及周围流体)电特性的不同, 在界面处会产生切向与法向应力, 使得液滴发生变形, 液滴的变形又会使得界面膜变弱, 使得相近的液滴容易聚结。在过高的场强下, 液滴又会发生破碎。液滴在电场中的变形、分裂、聚结、振荡等行为特性不仅是重要的基础研究课题, 同时对电破乳、液液两相系统的电分散以及微流动中的液滴操纵等应用场合均有实际意义。O'Konski 等^[24]较早开展了液滴的电变形理论研究, 建立了理想介电模型(perfect dielectric model)。根据该模型的预测, 当一个导电液滴浸没在非导电流体中时, 施加外电场会使得液滴沿电场方向被拉长, 变为椭球形, 即液滴发生扁长形(prolate)变形。当液滴和周围流体均为非导电介质时, 液滴也会发生扁长形变形。但是, 一些研究者(如 Allan & Mason 等)的实验数据表明, 液滴也存在扁平形(oblate)的变形, 即液滴沿电场的垂直方向被拉长。在此基础上, Taylor^[25]又建立了漏电介质模型(leaky dielectric model)。该模型将液滴变形参数与液滴内外流体的黏度比、电导率比、介电常数比进行关联, 可成功预测液滴的扁长形(prolate)变形和扁平形(oblate)变形(变形类型取决于液滴内外流体的黏度比、电导率比、介电常数比)。Taylor 的漏电介质模型被很多学者的实验数据所证实, 并被较为广泛地应用于不同介质中液滴变形的预测, 但漏电介质模型对于液滴的大变形的预测与实验数据有较大出入。为此, 其他学者又提出了各种理论及方法。如 Ajayi^[26]考虑了变形液滴的边界条件, 将 Taylor 所采用的线性理论扩展到高阶, 提出含二阶量的理论模型。Baygents 等^[27]提出了适用于液滴大变形的电动模型(electrokinetic model)。随着计算机技术的发展, 数值模拟技术也成为模拟液滴变形、振荡、破碎的有力工具。很多学者采用不同的数值计算方法对液滴变形及破碎进行了模拟。如 Basaran 等^[28]通过对液滴形状的 Bernoulli 方程与液滴内部速度势及液滴外部电势的 Laplace 方程数值求解, 对导电液滴的非线性振荡及破碎行为进行了研究, 并分析了外加电场对液滴变形振荡频率及液滴稳定性的影响。Lac 等^[29]采用边界积分法, 通过同时求解电场和流场, 得到了均匀电场中中性漏电液滴的变形与稳

定性规律。近些年来,微观及介观模拟也逐步应用于液滴动力学模拟。如文献^[30]采用光滑粒子动力学对油水系统液滴变形进行了模拟,模拟表明,电场强度越大,液滴变形速度越快;但场强过高将导致液滴破裂,直径较小的液滴比较大的液滴变形更为困难。作者^[31]也采用耗散粒子动力学方法建立了电场中的近似液滴粒子力学模型,模拟了两相不相溶液体中的液滴变形特性。模拟结果表明,场强较小时,液滴变形度随时间呈现振荡状态,变形度不随时间继续增大;场强较大时,液滴变形幅度增大,振荡频率变慢;当外加场强增大到一定程度时,液滴变形度不再振荡,而是随时间急剧增大,以至液滴最终破碎,且外加场强越大,液滴破碎所需的时间也越短。文献^[32]采用分子动力学模拟,对电场作用下液滴的蒸发、分裂以及聚合等过程进行了研究,揭示了一些液滴微观动力学方面的特性。

1.2.3 与液滴动力学特性有关的电破乳应用研究

电破乳是实现油水分离,尤其是稠油乳化液破乳的主要方法之一,电破乳中破乳效果的好坏、效率的高低直接与离散液滴在电场中的力学行为及运动特性有关。电破乳的关键是乳化液中离散液滴在电场中的聚结特性。电场中液滴聚结的主要方式有:①电泳聚结,即液滴在电场中定向运动过程中的聚结;②偶极聚结,即离散液滴极化或静电感应而发生变形,沿电场方向形成“水链”,相邻液滴正负偶极相互吸引而发生聚结;③振荡聚结,在交流电场中,离散液滴内各种正负离子不断做周期性往复,使得液滴两端的电荷极性发生相应变化,使得液滴聚结。为了提高破乳效率,很多学者对不同场强、不同电极配置情况下的液滴各种聚结特性及破乳效率等进行了很多理论及实验研究。如文献^[33,34]通过测试离散相滴径的方法,分析了电场强度、液滴在电场的停留时间等对液滴聚结的影响。文献^[35]对高压直流及交流静电破乳时的液滴聚结及破乳效率进行了实验对比。文献^[36,37]对脉冲交流高压电破乳进行了实验研究,分析了W/O型乳化液中电压、频率、脉宽比、电场停留时间等参数对分散水滴静电聚结特性的影响。这些研究工作对破乳效率的提高及电破乳器的设计提供了有益的指导,并且开发了各种形式的电破乳器。目前,电破乳从采用的电场方式来看,主要有直流、交流、脉冲破乳等类型。直流电场破乳中液滴的聚结

形式是以电泳聚结为主、偶极聚结为辅。交流电场则主要是偶极聚结和振荡聚结。交流电场破乳的特点是脱出水清澈，水中含油率较低，电路简单，无需整流设备，但乳化液的处理量较低，单位体积乳化液处理的耗电量较高。直流电场破乳的优缺点与交流相反。高频脉冲电破乳是近年来新兴的破乳方式，即常规电脱水的电压输出波形上叠加了高频脉冲信号进行破乳，具有能耗小、效率高显著优势，但对其研究还不全面，较广泛应用还需一定时日。电破乳所采用的电极形式主要有裸电极和绝缘电极。裸电极使得高压直接作用在乳化液上，没有额外的能量损失，但较高施加电压时容易击穿，实际应用中裸电极不是太多。

1.3 本书的主要内容

本书绝大部分内容是作者及所指导研究生在电场作用下液滴动力学特性方面的研究成果的较为系统的整理，实际上是近 10 年来作者及合作者在该领域研究成果的一个阶段性总结，书中也包含了其他一些研究者在该领域的研究成果。主要内容如下。

1.3.1 电场中单液滴的动力学特性研究

主要包括电场中单液滴受力与运动，球形液滴场强分布及极化电荷分布分析，电场作用下液滴在另一种不相溶液体中的变形机制分析、单个液滴变形实验研究及液滴变形与破碎的介观模拟。

1.3.2 静电雾化过程中荷电液滴群的运动特性

主要包括静电雾化原理介绍，人工神经网络在液滴平均直径预测中的应用，液滴直径与电荷密度联合分布的统计模拟，雾化空间中液滴局部电荷密度分布的实验研究，静电雾化中荷电液滴群的运动模拟、液液静电雾化过程中离散液滴运动特性以及静电雾化法制备油水乳化液的实验研究等。