

荷电多相流

理论及应用

● 罗惕乾 等著

荷电多相流理论及应用

罗惕乾 张 军 王贞涛 王晓英 著
王军锋 闻建龙 郑捷庆 陈汇龙



机械工业出版社

随着静电技术在各领域的应用迅速扩展,出现了一批新的应用技术及装备,相关的荷电多相流动的研究不断深化。

全书共八章,分别介绍作者 30 多年来涉及的研究工作进展。内容包括液体的雾化机理、荷电多相流基础、静电喷洒技术、静电喷雾燃烧、静电喷粉、水煤浆静电雾化及石灰浆液雾化脱硫等。供同行研讨和参考。

本书可供热能与动力工程、环境工程等专业的师生学习使用,也可供从事流体雾化、传热传质、除虫剂喷洒、材料制造等相关工作的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

荷电多相流理论及应用/罗惕乾等著. —北京:机械工业出版社, 2010.5

ISBN 978 - 7 - 111 - 30813 - 3

I. ①荷… II. ①罗… III. ①带电粒子 - 多相流动 - 研究
IV. ①0463

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 097499 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:蔡开颖 责任编辑:章承林

版式设计:张世琴 责任校对:刘怡丹

封面设计:张 静 责任印制:李 妍

唐山丰电印务有限公司印刷

2010 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 9.75 印张 · 237 千字

标准书号:ISBN 978 - 7 - 111 - 30813 - 3

定价:22.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者服务部:(010) 68993821 封面无防伪标均为盗版

前 言

20 世纪以来, 静电技术在各领域的应用迅速扩展, 相关的基础理论研究不断深入, 涌现出一批新的应用技术及装备。

江苏大学荷电两相流理论及应用课题组从 20 世纪 70 年代开始, 立足于植物保护中农药的静电高效超低量喷洒技术的开发和研究, 逐步扩展至燃油的静电喷雾燃烧、水煤浆静电喷雾燃烧、静电喷雾脱硫除尘等领域, 在液体雾化技术、荷电多相流流动特性等方面进行了较深入的探讨。30 多年来先后完成相关研究课题约 30 项, 其中包括国家自然科学基金项目 3 项、国家发展和改革委员会高新技术产业化示范工程项目 1 项、省部级项目 10 余项。获中国机械工业联合会 (包括原国家机械工业部) 科技进步二等奖 1 项、三等奖 2 项及多项其他奖项, 授权和申请国家专利 10 余项。近 40 年来, 本课题组先后培养博士、博士后 10 余人、硕士 20 余人。本书介绍了该课题组的主要研究工作。

全书共分八章, 执笔者分别为: 第一章罗惕乾教授、第二章张军博士、第三章王贞涛博士、第四章王晓英博士、第五章王军锋博士、第六章闻建龙博士、第七章郑捷庆博士、第八章陈汇龙博士。全书统稿整理工作由王贞涛博士完成。

本书可供热能与动力工程、环境工程等专业的师生学习使用, 也可供从事流体雾化、传热传质、除虫剂喷洒、材料制造等相关工作的科技人员参考。

由于作者水平有限, 静电技术又涉及多个学科, 研究难度很大, 希望本书的观点和结论能作为抛砖引玉之用, 错误和不妥之处敬请广大读者批评指正。

罗惕乾

常用符号表

符号	物理意义与单位	符号	物理意义与单位
A	气体性质常数, $(\text{cm} \cdot \text{Pa})^{-1}$; 界面面积, m^2	$K_{\text{Ca}(\text{OH})_2, l}$	液固传质系数, m/s
a	加速度, m/s^2	$k_{\text{SO}_2, g}^q$	荷电 SO_2 气相传质系数, $\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{kPa})$
A_q	比荷, C/kg	l	电偶极子两极间距, m
B	气体性质常数, $\text{cm} \cdot \text{Pa}$	M	气体相对分子质量
c	比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	m_m	混合物质量, kg
C_d	阻力系数	N	介质单位体积中的分子数
C_1, C_2	拉格朗日乘子	N_{SO_2}	SO_2 扩散流量, kmol/s
$c_{\text{SO}_2, i}$	相界面上 SO_2 浓度, kmol/m^3	$n_{\text{Ca}(\text{OH})_2}$	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶解速率, $\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
$c_{\text{Ca}^{2+}, i}$	相界面上 Ca^{2+} 浓度, kmol/m^3	p_0	固有电偶极矩, $\text{C} \cdot \text{m}$
c	光速, m/s	p	电偶极矩, $\text{C} \cdot \text{m}$
D	雾滴粒径, mm	Pr_T	湍流的普朗特数
D_{SO_2}	SO_2 的气膜扩散系数, m^2/s	p_g	气相分压, Pa
d	直径, mm	p_i	界面分压, Pa
E	电场强度, V/m	$p_{\text{SO}_2, i}$	相界面上 SO_2 分压, Pa
E_k	湍动能, J	q_m	质量流量, g/s
e_0	入射光方向的单位矢量	q_v	体积流量, m^3/s ; 静电电量, C ; 热量, J
e_s	散射光方向的单位矢量	R	半径, m ; 摩尔气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
F_E, F_q	电场力, N	Re	雷诺数
$\vec{F}_D$	阻力, N	R_c	气体传质极限速率, m/s
F_K	附加质量力, N	r	液滴半径或电极半径, m
$F_{\Delta p}$	压差力, N	S	相变造成的单位体积中体积平均的物质源
F_B	巴西特加速度力, N	S_0	射流初始长度, m
F_L	升力, N	Sc	施密特数
F_M	马格努斯力, N	Sc_E	电场脉动施密特数
F_S	萨夫曼力, N	Sh	舍伍德数
$f_i^{(s)}$	单位质量上的相间作用力, N/kg	s_{ij}	变形速度张量
f	单位质量力, N/kg ; 频率, Hz ; 电形变力密度, N/m^3	T	时间, s ; 热力学温度, K
H	亨利系数, $\text{kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{kPa})$	t	烟气温度, $^{\circ}\text{C}$; 时间, s
h_0	射流极点到喷口的距离, m	U	速度, m/s ; 电压, V
I	电流, A	V	体积, m^3
J	电晕放电离子流密度, A/m^2	v	速度, m/s
K	标准平衡常数	v_s	相变相交界面位移速度, m/s

(续)

符号	物理意义与单位	符号	物理意义与单位
We	韦伯数	λ	线电荷密度, C/m; 波长, mm; 热导率, W/(m·K)
w	浆滴的体积含水率, 质量分数	μ	动力粘度, Pa·s
α	相体积分数, 射流扩散半角	ν	运动粘度, m ² /s
Γ	液膜流率, g/(s·cm)	ξ	湍流系数
δ	气膜或液膜厚度, m	ρ	密度, kg/m ³ ; 电阻率, $\Omega \cdot m$; 电荷密度, C/m ³
γ	电导率, S/m; 气体电离系数	σ	表面张力, N/m
ε	介电常数, 湍能的耗散	τ_v	速度弛豫时间, s
ε_0	真空介电常数, F/m	τ_r	颗粒脉动弛豫时间, s
ε_k	阻尼因子	τ_{ij}	应力张量, N/m ²
ζ	充电系数, C/(kg·kV)	Φ	耗散函数
η	瑞利极限系数; 效率, %	φ	体积分数
η_0	射流的初始稠度	χ_e	介质分子的电极化率
k	湍能		

目 录

前言	
常用符号表	
第一章 绪论	1
第一节 静电现象	1
第二节 静电场	2
第三节 导体与电介质(绝缘体)	3
第四节 静电电量的测量	4
第五节 人工荷电	5
第六节 荷电多相流的应用	6
参考文献	6
第二章 雾滴的形成机理与静电雾化	7
第一节 雾滴的形成机理	7
第二节 静电雾化	11
第三节 液-液静电雾化的初步研究	26
参考文献	32
第三章 荷电多相流基础	34
第一节 荷电单颗粒动力学模型	34
第二节 荷电两相湍流方程	37
第三节 荷电两相湍流模型	43
第四节 高压静电场的模拟	44
第五节 荷电两相流场的测量	46
参考文献	52
第四章 静电喷洒技术	53
第一节 轴流风送技术	53
第二节 高压静电喷洒治蝗车	56
第三节 高压静电喷洒消毒机	63
参考文献	65
第五章 燃油静电喷雾燃烧	67
第一节 燃油的荷电	67
第二节 燃油的荷电系统与荷电特性	72
第三节 燃油荷电雾化及特性	74
第四节 燃油荷电喷雾流场	79
第五节 柴油静电喷雾燃烧	84
参考文献	86
第六章 荷电气固两相流与静电喷粉	87
第一节 固体粉粒的物理性质	87
第二节 荷电气固两相流	91
第三节 荷电固体颗粒的沉积	95
第四节 荷电颗粒的凝并	99
第五节 多功能静电喷粉机	104
参考文献	106
第七章 水煤浆的微喷静电雾化	108
第一节 水煤浆的雾化	108
第二节 水煤浆的静电雾化	110
第三节 水煤浆微喷静电雾化模式	113
第四节 水煤浆的雾化特性	115
参考文献	118
第八章 高压静电石灰浆液雾化脱硫技术	120
第一节 石灰浆液荷电雾化特性	120
第二节 石灰浆液荷电雾化脱硫机理	123
第三节 脱硫塔内流场特性	131
第四节 脱硫塔内脱硫数值模拟与试验	138
参考文献	146

第一章 绪 论

由多种物质或组分组成的混合物流动称为多相流动，其中物理化学性质或力学性质相同的组分称为一相。多相混合物的某相带有静电荷的流动称为荷电多相流。荷电多相流是一种普遍的自然现象，如雷雨时云中水滴穿过闪电产生的电离区而荷电形成的荷电两相雷雨云；又如粉尘输运过程中由于粒子的摩擦而荷电形成的荷电气固两相流。由于荷电多相流的特殊性质往往导致粉尘爆炸、火灾等严重灾害；同时这一特性在工程实践中也能得到广泛应用，如静电杀虫剂喷洒、静电喷涂、静电喷雾燃烧、静电除尘、静电复印、静电脱硫、静电植绒等。这两方面都要求对荷电多相流进行深入的研究。

第一节 静电现象

一、电荷

早在 7 世纪，人们就注意到两种物质相互摩擦后，就能吸引纸屑、羽毛等轻微物体，这种现象称为物体带了电荷，带有电荷的物体称为带电体。又过了 200 年，通过试验发现带电状态有两种，而且只有两种：一种称为正的，另一种称为负的。性质相同的电荷相互排斥，性质相反的电荷相互吸引。从此开创了人类发展史上重要的电时代。

物体带电荷的多少称为电荷量，其国际制单位为库 [仑]。在工程应用中库 [仑] 又往往太大，为使用方便，常采用毫库 [仑] (mC)、微库 [仑] (μC)、皮库 [仑] (pC) 作为电荷量单位。

二、带电体上电荷的分布

带电体上电荷的分布是不均匀的，电荷的分布用电荷密度来描述。

1. 电荷线密度 λ

对于直径大小远小于长度的带电线，单位长度上的电荷量称为电荷线密度，单位为 C/m。

$$\lambda = Q/L \quad (1-1)$$

式中， Q 为静电电荷量（静电电量，C）； L 为带电线长度（m）。

2. 电荷面密度 σ

带电体单位表面积上的电荷量称为电荷面密度，单位为 C/m^2 。

$$\sigma = Q/A \quad (1-2)$$

式中， Q 为静电电量（C）； A 为带电体表面积（ m^2 ）。

3. 电荷体密度 ρ

带电体单位体积的电荷量称为电荷体密度，单位为 C/m^3 。

$$\rho = Q/V \quad (1-3)$$

式中， Q 为静电电量（C）； V 为带电体体积（ m^3 ）。

4. 比荷 A_q

带电体单位质量的电荷量称为比荷（荷质比）。这是用来衡量物体带电程度的重要参

数, 单位为 C/kg。

$$A_q = Q/m \quad (1-4)$$

式中, Q 为静电电量 (C); m 为带电体质量 (kg)。

5. 电荷守恒定律

按照现代原子理论, 原子由中子、质子和电子组成, 中子不带电, 质子带正电, 电子带负电。每个原子中电子数和质子数相等, 正常状态下原子是电中性的。由电中性原子组成的物质系统也是电中性的。电子可以在系统中由一个原子转移到另一个原子, 也可以由一种物质转移到另一种物质, 但系统中电荷量的代数和保持不变, 这就是电荷守恒定律。

第二节 静 电 场

带电体在其周围空间引起某些作用, 例如对其中的另一个带电体产生斥力或引力, 称为该带电体在周围空间形成静电场。

一、库仑定律

真空无限均匀电介质中置入两个点电荷 q_1 和 q_2 , 相距为 r_0 , 两个点电荷的相互作用力 F 与 q_1 和 q_2 之积成正比, 与 r_0 的平方成反比。

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_0^2} \quad (1-5)$$

式中, ϵ_0 为真空介电常数 (真空电容率)。

二、电场强度

由库仑定律确定的点电荷在静电场中受力的大小, 可以定量描述静电场的强弱。单位正电荷 q_0 在电场中某一点所受的力 F 称为该点的电场强度 E , 电场强度是矢量, 单位为 N/C 或 V/m。

$$E = F/q_0 \quad (1-6)$$

三、电位 (电势) 和电位差 (电压)

电场中移动一个点电荷必须克服电场力做功。静电场中将单位正电荷从某点移至无限远处所做的功称为该点的电势。

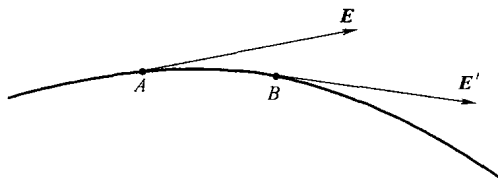
电势是标量, 在国际单位中电势的单位是 V。电势是一个相对量, 要确定电势值必须先选定参考点, 并假定该点电势为 0。常取大地作为参考点。

静电场中两点间的电位 (势) 之差称为电位差或电压 U 。

$$U = \int_a^b \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad (1-7)$$

四、电场线 (电力线) 和等势面 (等位面)

电场线是电场中一簇假想的曲线, 电场线上每一点的切线与该点处的场强方向一致 (图 1-1)。



等势面是电场中一簇假想的曲面, 同一曲面上电势相等 (图 1-2)。电场线和等势面可直观地描述电场的分布。

图 1-1 电场线

五、电偶极子

由两个电荷量相等、符号相反、相距为 r_0 的点电荷 $+q_1$ 和 $-q_2$ 构成的点电荷系称为电偶极子 (图 1-3)。从 $-q_2$ 指向 $+q_1$ 的矢量 $\mathbf{r}_0$ 称为电偶极轴, $\mathbf{p} = q\mathbf{r}_0$ 称为电偶极矩 (电矩)。

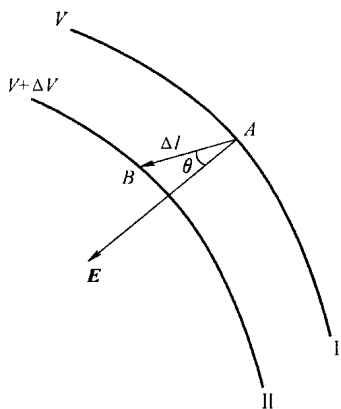


图 1-2 等势面

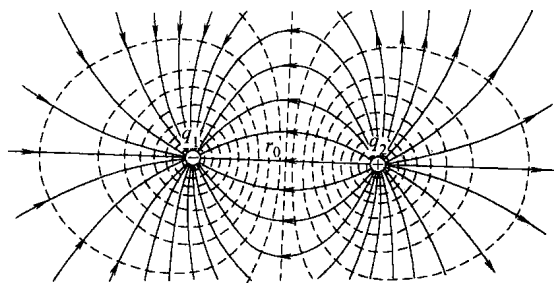


图 1-3 电偶极子 (虚线为等势面、实线为电场线)

第三节 导体与电介质 (绝缘体)

物质中存在大量可以自由移动的称为载流子的带电物质微粒, 如金属中的电子、电解质及电离气体中的离子, 在电场作用下载流子作定向运动形成电流, 这类物质称为导体。不善于传递电流的物质称为绝缘体或者电介质。电介质也能以极化的方式传递电的作用和影响。物质的导电特性与外部条件相关, 如某些电介质在高压下被击穿而转化为导体。

一、电介质的极化

电介质只有在外电场作用下才显现电性。物质中在电场作用下可宏观移动的载流子叫自由电荷; 如果载流子被紧紧束缚在局部位置上不能作宏观移动, 只能在原子范围内活动, 这种电荷称为束缚电荷。实际上电介质中也总是存在少量自由电荷。在外电场作用下, 少量自由电荷作宏观移动, 而束缚电荷作局部移动, 致使介质的表面和内部不均匀分布电荷而宏观上显示出电性, 称为电介质的极化, 出现的不均匀分布的电荷称为极化电荷。

二、介电常数和极化率

介电常数 (电容率) ε 是表征电介质性质的宏观物理量之一, 定义为电位移 $\mathbf{D}$ 与电场强度 $\mathbf{E}$ 之比。

$$\varepsilon = \frac{\mathbf{D}}{\mathbf{E}} \quad (1-8)$$

真空介电常数 $\varepsilon_0 = 8.854187818 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ 。

电介质的介电常数 ε 又称为绝对介电常数, 它与真空介电常数之比称为电介质的相对介电常数 ε_r 。

$$\varepsilon_r = \varepsilon / \varepsilon_0 = (1 + \chi_e) \quad (1-9)$$

式中, χ_e 为电极化率。

外电场作用下单位体积电偶极矩称为电极化强度 $\mathbf{P}$, 用以衡量介质电极化的程度。

$$P = \chi_e \varepsilon_0 E = (\varepsilon_r - 1) \varepsilon_0 E \quad (1-10)$$

三、电介质的击穿

电介质在一定的外部条件下受到足够强的外电场作用失去其介电性能而成为导体称为电介质击穿，电介质击穿时的场强称为击穿场强。电介质击穿机理十分复杂，与介质物性、结构、环境条件等有关。击穿的主要类型有：由于电场强度超过临界值引起的电击穿、由于温度升高引起的热击穿、由于电介质化学成分变化引起的化学击穿等。

第四节 静电电量的测量

单位质量物质的电荷量称为比荷。比荷是荷电两相流中荷电相的一个重要参数，其准确测量是十分困难的。美国物理学家密立根（R. A. Milikan）准确测定了电子比荷，并于1923年获得诺贝尔奖。

下面介绍几种静电电量的测量方法。

一、密立根油滴仪法

密立根油滴仪由两块水平放置的平板、显微镜和电源组成（图1-4）。上平板中有小孔，荷电油滴由小孔引入，在两平板间下落。当两平板间未加外电场时，下落油滴受向下的重力 G 和向上的粘滞阻力 F_r 作用。

$$G = mg \quad (1-11)$$

$$F_r = 6\pi\mu r v_1 \quad (1-12)$$

式中， m 为油滴质量（kg）； μ 为气体介质动力粘度（Pa·s）； r 为油滴直径（m）； v_1 为油滴下落速度（m/s）。

当 $G + F_r = 0$ 时，油滴下落速度达到最大速度 v_1 。

$$v_1 = \frac{mg}{6\pi\mu r} \quad (1-13)$$

当两平板间加上外电场 E 时，荷电油滴除重力和粘性阻力外，还受到电场力 F_E 的作用。

$$F_E = qE \quad (1-14)$$

当 $G + F_r + F_E = 0$ 时，油滴下落的速度 v_2 达到最大值。

$$mg - 6\pi\mu r v_2 - qE = 0 \quad (1-15)$$

$$v_2 = \frac{mg - qE}{6\pi\mu r} \quad (1-16)$$

由式（1-13）和式（1-16）消去 mg ，则油滴电荷量为

$$q = \frac{6\pi\mu r (v_1 - v_2)}{E} \quad (1-17)$$

式中， r 、 v_1 、 v_2 由测速显微镜测定； E 为试验时加的外电场； μ 为已知物理量，由此可测出油滴的电荷量，进而求出油滴的比荷。

密立根油滴仪测量精度高，但只能在实验室中进行，难于应用到工程在线测量中。

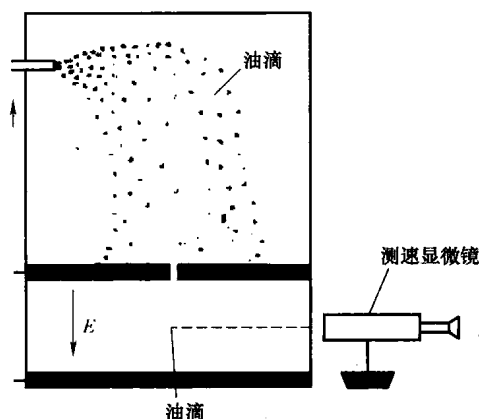


图 1-4 密立根油滴仪

二、法拉第筒法

法拉第筒是由两个套装在一起又相互绝缘的金属圆筒及相应测量仪表组成（图 1-5）。当外筒接地、内筒引入质量为 m 的荷电物质时，由于静电感应，内筒外表面和外筒内表面分别带有等量异性电荷，于是内外筒之间存在电位差（电压） U 和电容 C ，测出电压 U 和电容 C ，即可求出内筒中荷电物质的总电荷量 Q 。

$$Q = CU \quad (1-18)$$

荷电物质的比荷为

$$A_q = Q/m \quad (1-19)$$

法拉第筒是静电测量的一个重要仪器，也主要用在实验室内，难于应用到工程在线测量中。

三、网状目标法

网状目标法比荷测量装置由金属网和金属锥形筒组成的荷电物质收集器以及测量仪表组成（图 1-6）。当荷电物质由收集器收集时，其电荷转移到收集器上，通过检流仪表向大地排放。若测出单位时间进入收集器的荷电物质的质量为 m ，检流计测得其放电电流为 I ，则收集的荷电物质的平均比荷 A_q 为

$$A_q = \int_0^t Idt / \int_0^t mdt \quad (1-20)$$

网状目标法测量荷电两相流动中荷电相平均比荷的方法，使用方便，对测量环境要求不高，可以在工程中进行连续实时测量和监控。

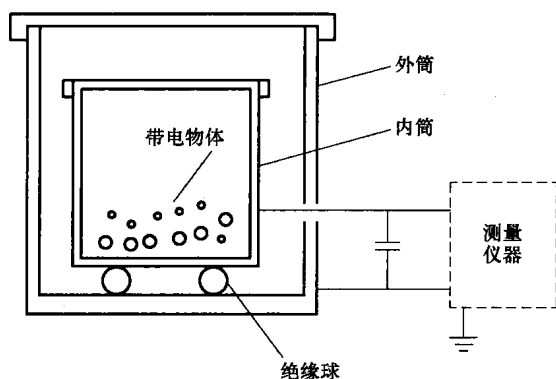


图 1-5 法拉第筒

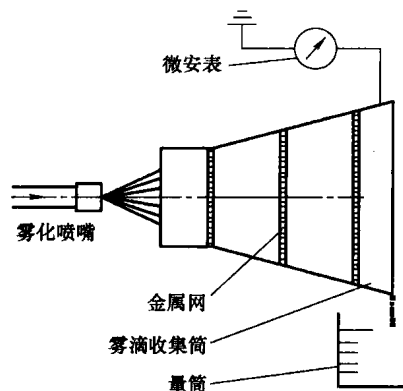


图 1-6 网状目标法比荷测量装置

第五节 人工荷电

人工荷电就是在尽可能短的时间内给予对象物质尽可能多的电荷的技术。随着静电技术的应用范围不断扩展，人工荷电技术的研究也不断深入和发展。

物质的荷电机理十分复杂。多相流动中离散相粒子和带电体接触，电荷转移到粒子上而接触荷电；多相流体与输运管道摩擦以及离散相间相互摩擦导致电荷转移的摩擦荷电；由于外电场感应导致的感应荷电；由于多相流体通过电离区吸附离子而荷电等。物质的荷电往往是各种荷电机理的综合结果。

一、摩擦荷电

静电最早是在物体相互摩擦时发现的一种物理现象。在多相流动中利用离散相与输送管道的摩擦以及相间的相互摩擦使离散相荷电形成荷电多相流动。粒子荷电效果与各相组分的物性、管道材料、流动参数等有关,而流动参数和组成相组分是由应用问题所确定的。所以,重点研究对象是输送管道的材料及其起电效果。现在高分子材料很多,合理选用管道材料可以达到很好的起电效果。摩擦荷电虽然结构简单,但影响起电量的因素很多,有些因素难于控制,同时还与环境条件密切相关,如温度、湿度等。荷电量不稳定是摩擦荷电在应用中存在的主要问题。

二、感应荷电

导电性物质导入电场中,由于静电感应作用,电荷分布是不均匀的。当该物质分裂时,分裂出的部分带上正或负的电荷。这种起电方式对液体雾化时给雾滴荷电十分有效,试验研究表明粒子荷电量与粒子和荷电电极间的电容有关。

三、电晕充电

充电电极上电荷分布是不均匀的,与电极的形状有关,因此在电极周围产生的静电场也不均匀。针状电极上曲率半径很小的针尖附近电场强度很大,介质产生电离和激发,产生一个发光的电晕区,电晕区中电场强度是不均匀的,电离和激发的强度也不同,由中心向外减弱,最后电晕消失形成暗区。当多相流体通过电晕区时,离散相与离子碰撞而场致荷电,或者离子由于热运动而附着在粒子表面而扩散荷电,是十分有效的人工荷电方法。

第六节 荷电多相流的应用

荷电多相流在工程实际中得到广泛的应用。随着静电技术研究的深入和发展,各种实用的静电技术和装备不断投入应用,如静电喷涂、静电除尘、静电脱硫、静电复印、静电植绒等,在国民经济的诸多领域发挥重要作用,显示出广阔前景。

荷电多相流应用技术主要是应用其荷电相的电特性。物质荷电后其物性、力学和运动特性等发生变化,流动还可以用外电场进行控制。荷电多相流应用技术的发展必须对相关因素进行深入探讨。

江苏大学荷电两相流理论及应用课题组从20世纪70年代开始从事荷电多相流及其应用技术研究。近40年来,先后完成多项国家自然科学基金项目,国家发展和改革委员会高技术产业化示范工程项目,省、部级科学基金项目,以及企业单位委托研究项目,开发出高压静电超低量喷洒治蝗车、静电防疫喷洒消毒车等应用机具,培养博士及博士后10余名,硕士20余名。本书主要介绍多年来该课题组的研究工作,主要包括荷电两相流动、雾化理论及工程应用、农药静电喷雾技术、静电喷雾燃烧、静电喷雾脱硫、水煤浆静电喷雾燃烧等,供从事相关工作的工程技术人员参考。

参考文献

- [1] 马文蔚. 物理学:上册 [M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [2] 殷之文. 电介质物理学 [M]. 北京:科学出版社,1989.
- [3] 鲍重光. 静电技术原理 [M]. 北京:北京理工大学出版社,1993.
- [4] 罗宏昌,毕载俊. 静电实用技术手册 [M]. 上海:上海科学普及出版社,1990.

第二章 雾滴的形成机理与静电雾化

第一节 雾滴的形成机理

在许多重要的工程领域，如燃油喷雾燃烧、喷雾干燥、工业喷涂、薄膜材料制备、农药喷洒等，需要采用各种雾化技术将液体进行破碎，进而分散成许多离散的液滴，即雾滴。雾化技术是借助于各种外力，如气动力、机械力、静电力、超声波等，达到液体破碎，并生成一定尺寸分布的雾滴，以满足不同工程领域的需要。各种雾化方式及所采取的装置虽然不同，但从受力角度看液体破碎的机理是相似的。当液体暴露在大气（或另一种连续介质）中，作用在液体表面有两种力：一种是表面张力，它使液体表面收缩、总试图使液体表面能趋向最小而使液体保持稳定；另一种是破碎力，即液体所受到的各种外力（如气动力、离心力、静电力等），这些外力作用在液体表面，总试图使液体发生变形和破碎。当液体表面所受破碎力超过表面张力时，液体将发生破碎，这就是液体破碎的实质。

一、雾滴生成模式

雾滴生成大致分成滴状、圆柱射流破碎、液膜（或液帘）破碎几种模式。

1. 滴状模式

滴状模式是最简单并最常见的一种雾滴生成形式。如图 2-1 所示，液体从小孔或细管中缓慢流出，表面张力将使液体在孔口形成悬挂的雾滴，滴状模式形成的雾滴较大。由于液体流速极低，假如不考虑液体粘性，重力和表面张力将控制雾滴的形成过程，当重力超过表面张力时，雾滴将被拖离孔口而形成下落的雾滴。当表面张力为 σ 、密度为 ρ_l 的液体，从管径为 d_0 的细管缓慢流出，根据重力和表面张力的受力平衡，产生的雾滴直径为

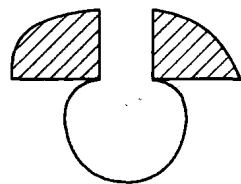


图 2-1 滴状模式

$$D = \sqrt[3]{\frac{6d_0\sigma}{\rho_l g}} \quad (2-1)$$

2. 圆柱射流破碎模式

圆柱射流破碎模式是雾化过程中最常见的一种雾滴生成模式，普通圆孔压力雾化器多是以这种模式雾化的。当液体从喷嘴以较高速度流出，液体将会形成射流。由于气液两相的相互作用，在射流的表面会形成振荡和扰动（关于轴线对称的 Varicose 波及不对称轴线的 Sinuous 波），这种不稳定的扰动增长到一定程度，在波长大于射流周长的轴向扰动作用下，将会变得不稳定。在射流端部，射流液柱就会破碎成一个个的雾滴，如图 2-2 所示。

根据瑞利（Rayleigh）的不稳定性理论，受表面张力作用的无粘性圆柱射流，发生不稳定情况时的扰动增长率和波长可分别为

$$\kappa = 0.97 \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_l d_j^3}} \quad (2-2)$$

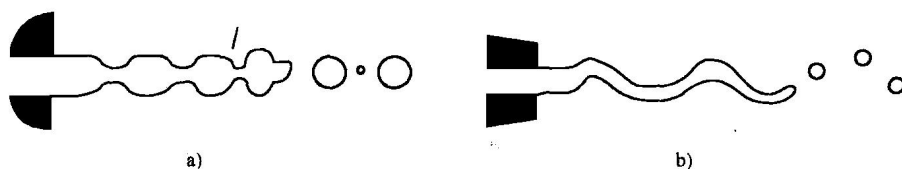


图 2-2 射流液柱的破碎
a) Varicose 波 b) Sinuous 波

$$\lambda = 4.51d_j \quad (2-3)$$

式中, d_j 为未受扰动时圆柱射流直径。

假定一个射流波长的液柱破碎成一个雾滴, 则射流破碎而成的平均雾滴直径为

$$D = 1.89d_j \quad (2-4)$$

瑞利的理论假设射流为层流, 气液相对速度较小, 并且没有考虑液体粘性及周围空气对射流的作用。此外, 在两个大雾滴之间一般会出现小的卫星滴 (satellite droplets), 因此根据瑞利理论估算出的粒径往往为实际粒径的上限。对于更一般的情况, 综合考虑液体的粘性、表面张力、气液两相相对速度、湍流等诸多因素的影响, 严格的射流稳定性理论还很难建立, 为此很多学者做了大量的试验研究。图 2-3 为 Hoyt 等拍摄的距喷嘴不同距离处的射流形态照片。照片表明, 在射流的早期阶段 (图 2-3a), 由于气动力对射流表面产生较为强烈的撕裂作用, 使射流表面产生很细的液条 (或液丝), 而液丝在表面张力作用下会进一步形成很小的雾滴, 随着射流的发展, 湍流、惯性及其他因素都会对射流产生影响, 因此实际情况下的射流破碎更为复杂。

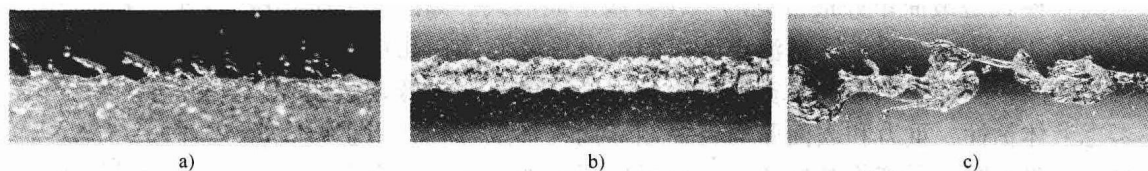


图 2-3 Hoyt 等拍摄的射流照片

a) 4 倍射流直径处 b) 72 倍射流直径处 c) 312 倍射流直径处

根据一些学者的试验研究, 对于综合考虑气液相对速度、气液两相的物理性质等因素的实际射流, 根据几个量纲一的数 (We 数, Re 数, Oh 数), 圆柱射流在空气中的破碎可分为四个破碎区域:

1) 当 $We < 0.4$ 或 $We > 1.2 + 3.41Oh^{0.9}$ 时, 射流速度较低, 气液相间作用不明显, 此时表面张力对破碎产生主要影响, 射流在距喷嘴较远距离处破碎, 射流破碎是由轴对称扰动的增长所引起的, 所形成的粒径较大、且较均匀, 称为瑞利射流破碎, 如图 2-2a 所示。

2) 当 $1.2 + 3.41Oh^{0.9} < We < 13$ 时, 表面张力、周围空气动压对破碎产生影响, 此时射流具有向径向方向扭曲的振荡 (Sinuous 波), 如图 2-2b 所示。射流在距喷嘴距离较短处破碎, 所形成的雾滴直径要小于射流直径, 此区域为 Sinuous 波破碎区。

3) 当 $13 < We < 40.3$ 时, 空气动压对破碎产生影响, 射流破碎距离更短, 雾滴直径小于射流直径, 此区域为具有空气摩擦的波动破碎区域。

4) 当 $We > 40.3$ 或 $Oh > 100 Re^{-0.92}$ 时, 由于气液相对运动、两相摩擦、惯性及其他一

些未知因素对破碎产生影响,射流在距离喷嘴很近的地方就完全雾化,雾滴呈锥角散开。

上述量纲一的数定义如下:

$$Re = \frac{\rho_l U_l d_0}{\mu_l}, We = \frac{U_l^2 \rho_l d_0}{\sigma}, Oh = We^{0.5} Re^{-1} = \frac{\mu_l}{(\rho_l \sigma d_0)^{0.5}}$$

式中, U_l 为液体在喷嘴出口处的速度; μ_l 为液体的动力粘度。

由于射流破碎的影响因素较多,上述射流破碎区域是根据试验研究在考虑不同情况下相对速度、液体粘度、惯性、湍流结构等因素对破碎影响而大致划分的。此外,其他一些学者也有一些不同的有关射流破碎区域的分类。

3. 液膜 (或液帘) 破碎模式

在很多雾化装置中会首先形成各种形状 (如平面液膜、锥形液膜等) 的液膜。对于平面压力喷嘴,会形成平面射流液膜,如图 2-4 所示。对于压力旋流雾化器,通过旋流腔使液体形成锥形液膜。对于离心式雾化器,当流量较大时,在转盘的周围也会形成液膜,在离心力的作用下液膜的边缘处形成雾滴,如图 2-5 所示。

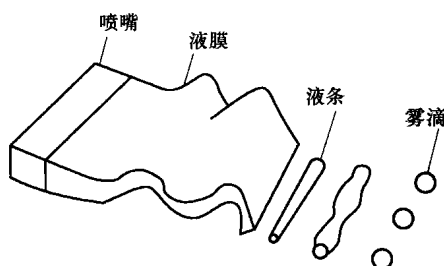


图 2-4 平面射流液膜破碎成雾滴

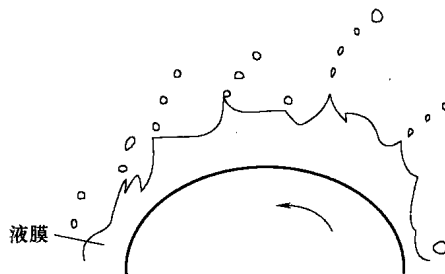


图 2-5 离心雾化中液膜的形成

以图 2-4 所示的平面射流液膜为例来介绍雾滴的生成。由于气液两相的相互作用,在射流液膜界面上形成不稳定性波 (不对称轴线的 Sinuous 波或对称于轴线的 Varicose 波),当波幅达到一定值时,液膜就会破碎成不规则的液条,液条在气动力的作用下进一步分散成不同粒径和粒速的雾滴,即为平面射流液膜破碎的过程。对于液膜破碎的更详细的不稳定性分析及粒径估算可参见本章参考文献 [1, 8, 9]。

二、二次雾化

由上述雾滴生成模式中产生的雾滴假如在输运过程中不稳定,还会发生进一步破碎而生成更小的雾滴,称为二次雾化。输运过程中,气流中雾滴表面同样受到两种力的作用,即外力 (气动力) 和雾滴内力 (表面张力和粘性力)。当气动力不足于克服试图保持雾滴稳定的表面张力及粘性力时,雾滴将保持稳定,不会发生破碎;而当气动力大于试图保持雾滴稳定的内力时,雾滴将失稳、发生变形而破碎。假如不考虑液体粘性,雾滴所受气动力和表面张力的力平衡方程为

$$\frac{\pi}{4} D^2 C_D \frac{\rho_g U_r^2}{2} = \pi D \sigma \quad (2-5)$$

式中, C_D 为阻力系数; ρ_g 为气体密度; U_r 为雾滴相对速度。

由上式可得到雾滴发生破碎时的临界粒径 D_{cr} 及无粘性临界韦伯数 $We_{cr,0}$ 分别为

$$D_{cr} = \frac{8\sigma}{C_D \rho_g U_r^2} \quad (2-6)$$

$$We_{cr,0} = \frac{8}{C_D} \quad (2-7)$$

进一步考虑液体粘性, Hinze 给出临界韦伯数为

$$We_{cr} = We_{cr,0} + 14Oh \quad (2-8)$$

二次雾化雾滴的破碎过程也存在几种典型模式, Hinze、Reitz、Pilch 等进行了相关研究, 但他们对破碎模式的分类及描述有所不同。图 2-6 是比较典型的两种破碎模式。



图 2-6 雾滴破碎模式

a) 袋状破碎模式 b) 剪切破碎模式

当雾滴在气流中稳定加速时, 雾滴形状逐渐变平, 当达到一定的相对速度时, 变平的雾滴会被气流吹成一个类似空袋子的形状, 袋状的雾滴进一步破碎成更小的雾滴, 这种破碎模式即为所谓的袋状破碎 (bag breakup), 如图 2-6a 所示。当雾滴突然暴露在高速气流中时, 雾滴会变形为一个中间凸起的类似碟子的形状, 碟子的边缘会逐渐变为薄的液膜, 液膜的外部会进而形成很多不规则的液丝, 液丝在高速气流的作用下分散成很多小的雾滴, 雾滴的这种破碎模式即所谓剪切破碎 (shear breakup), 如图 2-6b 所示。Hsiang 根据试验给出以下破碎模式的转化边界:

- 1) 当 $We_g < 1.1$ 时, 雾滴不发生变形。
- 2) 当 $1.1 < We_g < 13$ 时, 雾滴发生非振荡和振荡变形。
- 3) 当 $13 < We_g < 35$ 时, 雾滴发生袋状破碎。
- 4) 当 $35 < We_g < 80$ 时, 雾滴发生多模式的破碎。
- 5) 当 $We_g > 80$ 时, 雾滴产生剪切破碎。

这里韦伯数 We_g 定义如下:

$$We_g = \frac{D \rho_g U_r^2}{\sigma}$$

三、带电雾滴的破碎

静电雾化中涉及到带电雾滴的破碎。对于一个带电量为 q 的导电雾滴, 同时受到表面张力和静电力两种力的作用, 表面张力使雾滴保持稳定, 而静电力则是使雾滴变形而破碎的非稳定力, 当静电力大于表面张力时, 雾滴将失去稳定性而变形破碎。根据稳定性分析, 瑞利获得了雾滴保持稳定时的最大带电量为

$$q = 2\pi \sqrt{2\varepsilon_0 \sigma D^3} \quad (2-9)$$

式中, ε_0 为真空介电常数; D 为雾滴直径。

上式即瑞利极限, 它给出了稳定雾滴所能携带的最大临界电荷量, 假如雾滴表面所带电荷量超过此临界电荷, 雾滴将失去稳定性而破碎。对于直径为 D 的球形雾滴 (体积 $V =$