

机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目
高等学校教材

喷 雾 学

曹建明 编著



机 械 工 业 出 版 社

喷射与雾化是传质传热分析的重要基础。在大多数工程应用中, 喷雾的目的是为了增强质量和热量的传递。由于喷雾的重要性, 它被深入研究了 80 年以上。本书在总结国内外最新研究成果的基础上, 系统讲述了喷射与雾化的基本理论和各种喷嘴的特点。全书共分 5 章, 分别讲述绪论、液体碎裂过程、液滴尺寸分布、液滴尺寸测量、喷嘴及其特点等。

本书可作为热能与动力工程、交通运输、车辆工程和机械设计制造及其自动化等专业的本科生或研究生教材, 也可供相关部门从事流体流动、传质传热和燃烧过程研究、设计的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

喷雾学/曹建明编著. —北京: 机械工业出版社, 2005.5

高等学校教材

ISBN 7-111-16215-3

I. 喷... II. 曹... III. 雾化—理论—高等学校—教材 IV. TQ038.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 016041 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: 邓海平 蔡开颖 责任编辑: 蔡开颖

版式设计: 冉晓华 责任校对: 李汝庚

封面设计: 责任印制:

北京中兴印刷有限公司印刷 · 新华书店北京发行所发行

2005 年 月第 版第 次印刷

850mm×1168mm $\frac{1}{32}$ · 印张 · 插页 · 千字

— 册

定价: 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

封面无防伪标均为盗版

前 言

喷射与雾化是传质传热分析的重要基础，从动力机械与工程领域的汽油机、柴油机、燃气轮机、气体燃料发动机、飞机和火箭发动机，到锅炉、制药、消防、农业灌溉以及日常生活，其应用领域非常广泛。在大多数工程应用中，喷雾的目的是为了增强质量和热量的传递。由于喷雾的重要性，它被深入研究了 80 年以上。

喷射与雾化作为机械学的分支之一受到国内外普遍重视。国外许多著名学术期刊是专门或部分刊登喷雾方面论文的，许多一流大学的机械工程系都在从事喷雾方面的基础研究和应用研究工作。毋庸讳言，我国在喷雾领域的研究与世界先进水平尚有差距，论文、尤其是高层次的论文不多，系统论述喷射与雾化的书籍还没有见到。可以说，喷雾学在我国的发展关系到机械学这门经典学科能否注入新鲜血液与活力及可持续发展的重要因素之一。本书除了反映作者本人近年来的研究成果外，还总结和译述了国内外的研究成果。本书一是供本科生或研究生使用，使他们在学习和研究中能够很快地触及学科的前沿问题，为推动和促进喷雾学在我国的发展做出一点贡献；二是抛砖引玉，为广泛的学术研究做一块铺路石。

本书可作为热能与动力工程、交通运输、车辆工程和机械设计制造及其自动化等专业的本科生或研究生教材，建议授课 50 学时，也可供相关部门从事流体流动、传质传热和燃烧过程研究、设计的科技人员参考。

作者要特别感谢加拿大维多利亚大学 (UVic) 机械工程系的教授们给予的指导和帮助，在作者访问该大学期间他们赠送了

IV

许多学术资料，使本书的写作得以顺利完成；感谢加拿大国家自然科学与工程研究理事会（NSERC）和陕西省自然科学基金委员会的支持；此外，还要感谢机械工业出版社为本书提供了基金支持。

限于作者的水平和知识范围，疏漏甚至错误之处恐难避免，谨请使用本书的读者批评指正。

长安大学 曹建明

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
第 2 章 液体碎裂过程	10
2.1 喷雾的影响因素	11
2.2 静态液滴的形成	17
2.3 液滴的碎裂	18
2.4 圆射流的碎裂	24
2.5 液膜射流的碎裂	44
2.6 结语	77
第 3 章 液滴尺寸分布	80
3.1 液滴尺寸分布图解	80
3.2 经验分布函数	83
3.3 理论分布函数	85
3.4 平均直径	97
3.5 特征直径	99
3.6 液滴尺寸的发散	102
3.7 雾化质量评价范例	104

3.8 结语	114
第4章 液滴尺寸测量	116
4.1 测量的影响因素	117
4.2 机械测量方法	121
4.3 电子测量方法	127
4.4 光学测量方法	129
4.5 结语	156
第5章 喷嘴及其特点	157
5.1 压力喷嘴	158
5.2 旋转喷嘴	177
5.3 两相流喷嘴	181
5.4 超声喷嘴	189
5.5 静电喷嘴	191
5.6 结语	193
参考文献	195

第 章

绪摇摇论

摇摇喷雾是将液体通过喷嘴喷射到气体介质中，使之分散并碎裂成小颗粒液滴的过程。由于液体相对于空气或气体的高速运动，或者由于机械能的施加和喷射装置的旋转或振动，液体会雾化成各种尺寸范围的细小颗粒。

自然的雾化有下雨、瀑布和海水雾化等。喷雾的应用主要有以下几个方面：

（员）日常生活摇摇淋浴，花园和草地的浇水，整理发型的发胶和摩丝，灭蚊蝇的喷药器和空气消毒、清洁器，空气加湿器，清洁街道的洒水车，喷雾作画，喷墨打印机等。

（圆）医用摇摇雾化清痰器和挥发性麻醉剂的蒸发等。

（猿）生产和工艺流程摇摇雾化干燥（如牛奶制品、咖啡和茶叶，药片糖衣，肥皂和清洁剂等），雾化润湿，雾化冷却（如雾化池、塔、反应器等），雾化反应（如吸收器、烘干器和汽车烤漆房），粉末冶金，表面涂脂（如环氧树脂、聚酯类等），泡沫和乳化剂的制取，汽车清洗喷头，制衣（包括表面处理、喷雾印染、纤维和绝缘材料的制作等），半导体和计算机芯片的酸碱蚀刻等。

（源）农业摇摇给果树喷洒农药的喷雾器和农业灌溉等，用喷雾器进行农作物给水要比放水漫灌节约更多宝贵的水资源，而且农作物的长势良好，这种方法要求雾化液滴的尺寸不能太小，以

圆喷摇雾摇学

便喷射得更远，增大灌溉的覆盖面积。

(缘) 消防摇雾化后的水滴能够吸收更多的热量，从而有效地压制火势。

(远) 沥青雾化铺路（常表现为非牛顿流体）。

(苑) 燃烧室摇燃油锅炉、柴油机、汽油机、燃气轮机、飞机发动机和火箭发动机的燃料雾化。在这些装置中，喷嘴的设计、制造精密度很高，雾化的大量小颗粒燃料液滴能够有效地增大燃料与助燃剂接触的表面积，使燃料蒸发迅速，充分与助燃剂混合，增强质量和热量的传递并燃烧完全，减少排放污染。

喷雾可以由多种途径产生，但不论哪种途径，有几个基本的因素适于所有的雾化过程：

员) 圆射流或液膜射流喷射表面波的发展和气体的扰动作用，它涉及喷射表面波的形成与发展理论和空气动力学，由此会导致喷射液体碎裂成片、线、大颗粒液滴，直至最终的小颗粒液滴。

圆) 喷嘴的几何形状、喷嘴内部的流动特性、喷射压力与环境气体背压的差值、气体介质的性质和液体本身的物理特性，它们对于确定喷雾的形态、锥角、贯穿度、液滴尺寸和速度随时间和空间的分布至关重要。这些因素并非独立存在，而是相互影响、相辅相成，最终决定了雾化的效果。

喷雾机理的研究一直是喷雾学的难点之一，尚未完善。其物理模型和数学模型的建立要求研究者具有扎实的流体力学和数学知识。对各种边界条件的正确确定和数学推导的严密性要求很高，有时甚至需要反复研讨才会有所进展。

根据形状和喷射的特点，喷嘴可以分成许多类型，每种喷嘴都有它特定的用途和雾化的特点。最典型的喷嘴是平孔喷嘴，它广泛地应用于汽车、飞机和火箭发动机的燃烧室中。平孔喷嘴所形成的圆射流在很高的喷射压力下高速喷出，受气流的扰动作用而碎裂。

研究结果提出,只要液体圆射流表面波的波长接近圆射流直径两倍时,气流的扰动就会导致圆射流碎裂^[1],而湍流圆射流能够在没有任何外力作用的情况下,仅仅依靠其本身的湍流脉动就会碎裂。一旦液体离开喷嘴,喷嘴壁面就不再控制圆射流,液体将主要受本身表面张力的直接影响。当液体克服了自身的表面张力时,圆射流就会碎裂。液体在形成小的片、线或颗粒液滴情况下达到新的平衡,一旦液体由于本身或气体的扰动而再次克服表面张力时,就会进一步碎裂成更加细小的颗粒。液体的粘度抑制圆射流不稳定性的增长及推迟液体碎裂的进程,使雾化发生在气、液相对速度较低的下流区域。在大多数情况下,液体的湍流、喷嘴的空腔、环境气体密度的增大和气体动力作用都对雾化有利。能够产生液膜射流的喷嘴使液体雾化,并使液、气充分混合。平面液膜射流通常是由高压液体通过一个狭缝所产生,如扇形喷嘴,它应用于制衣工业和小型环状燃气轮机燃烧室中。环状液膜射流是由高压液体通过一个环形狭缝产生,如压力喷嘴中的轴针式喷嘴和喷气喷嘴中的预膜喷嘴,它们分别应用于柴油机和燃气轮机中,或者通过一个转盘或转杯所产生,分别称为转盘喷嘴和转杯喷嘴,应用于雾化干燥、雾化冷却和农业灌溉。这些喷嘴要求一定的喷射压力或旋转离心力,以便产生一定的喷射速度。液膜射流一旦形成,其最初的液体动力稳定性就会被空气动力的扰动所破坏。随着液膜射流远离喷嘴的扩展,液膜射流的厚度会逐渐增大,使之碎裂成液线及最终的液滴。如果喷射压力足够大,液体在喷嘴的出口处就会雾化成细小颗粒,而没有线状过渡区。除此之外,液膜射流的初始厚度、与环境气体的相对速度、液体的粘性和表面张力也是决定雾化液滴尺寸范围和平均直径的重要因素。喷气喷嘴喷射的液体与环境气体之间有很高的相对速度,液体运动速度较慢,而喷射的空气速度却很快,流量也大。其基本机理是低压喷嘴将低粘度的液体随高速气流喷出,液膜射流的表面波由于高速喷射气流的扰动而碎裂、雾化。图 5-1 所示为几种典型喷嘴的简图,各种喷嘴的优缺点和主要应用领域见表 5-1。

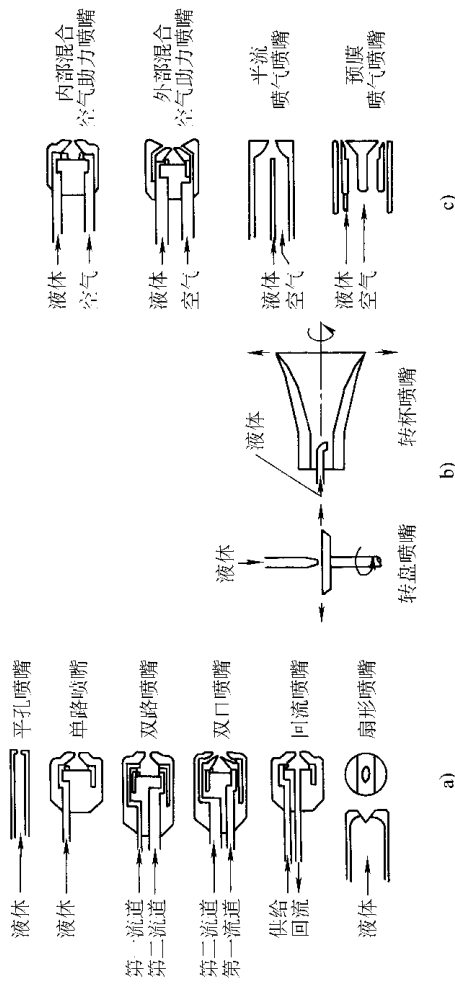


图 典型喷嘴简图

压力喷嘴 旋转喷嘴 两相流喷嘴

表 1-1 各种喷嘴的优缺点和主要应用领域

类 型	喷 嘴	优 点	缺 点	应 用
压力喷嘴	平孔喷嘴	简单, 便宜	高的喷射压力, 喷雾锥角较小	柴油机、喷气发动机、冲压发动机和火箭发动机
	单路喷嘴	简单, 便宜 雾化角宽, 可达 180°	很高的喷射压力, 喷雾锥角随压力和环境气体的密度变化	燃气轮机和工业锅炉
	双路喷嘴	简单, 便宜 喷雾锥角宽, 可达 180° 雾化质量高	喷雾锥角随液体流动速率的增大而减小	燃气轮机
	双口喷嘴	喷雾锥角保持不变 雾化质量高	过渡区雾化较差, 设计复杂	飞机发动机和工业用燃气轮机
	回流喷嘴	结构简单 在整个流动区雾化质量高	很高的喷射压力, 喷雾锥角随液体流动速率变化	各类燃烧室
	扇形喷嘴	雾化质量高	高的喷射压力	高压制衣、工艺流程和环状燃气轮机燃烧室
旋转喷嘴	转盘喷嘴	转盘高速旋转产生 360° 雾化模式, 液滴均匀	雾化颗粒较大	雾化干燥、农业灌溉
	转杯喷嘴	转杯高速旋转产生 360° 雾化模式, 可雾化高粘度液体	雾化颗粒较大	雾化干燥、雾化冷却

此为试读, 需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

(续)

类 型	喷 嘴	优 点	缺 点	应 用
空气助力 喷 嘴	内部混合 喷 嘴	雾化质量高，可雾化高粘度液体	会有液体回流气路发生 需要辅助仪表监测 需要高压空气	工业锅炉和工业燃气轮机
	外部混合 喷 嘴	雾化质量高，可雾化高粘度液体，防止液体回流气路	需要高压空气，不能采用低的空燃比	工业锅炉和工业燃气轮机
喷气喷嘴	平流喷嘴	结构简单，雾化质量高	喷雾锥角较小	工业燃气轮机
	预膜喷嘴	喷雾锥角宽，在高背压空气环境下雾化质量高	喷射气流速度低时雾化差	工业和飞机用燃气轮机
气泡喷嘴		在低喷射压力和小气液比下保证高的雾化质量，喷口不易结焦阻塞，碳烟排放少	需附加供气装置	工业锅炉
汽哨喷嘴		直接产生液滴雾化	雾化液滴尺寸变化较大，不易控制	燃烧装置
超声喷嘴		电控雾化效果，液体流动速率低时保证高的雾化质量	喷射速度高时雾化差	小型锅炉、药片糖衣、加湿器、雾化干燥、蚀刻
静电喷嘴		雾化质量很高	喷射速度高时雾化差	喷墨绘画、喷墨打印机、燃烧装置

喷雾液束的形态、发散度、锥角和贯穿距离统称为喷雾特性。在大多数实际应用中，喷雾液束形态的对称性是重要的参数。非对称液束削弱了液体碎裂的效率，使雾化质量变差。在喷雾印染中，液束的对称和均匀是保证印染质量的基本要求。液束的对称性对于燃烧装置中的喷雾也是十分重要的，燃油必须均匀地分布于整个燃烧室空间，以便燃油和空气能够充分混合，提高燃烧效率，降低排放污染物。但是喷雾液束的不对称通常不易察觉，除非这种不对称已经非常严重才会被观测到。液束的发散度是喷雾液束内液体与气体的总体积与液束内液体体积的比值。发散度高的液束能够使雾化液体与环境气体的混合更为迅速，液滴的蒸发速率更高。发散度与喷雾锥角密切相关，平孔喷嘴的喷雾锥角较小，发散度也小。通常，能够使喷雾锥角增大的因素都会使液束的发散度增大。由于喷雾液束与环境气体的相互作用，使得液束的边界不是直的，而是一个曲面，这将造成喷雾锥角定义和测量的困难。为了解决这个问题，通常以从喷嘴出口到液束某一轴向位置所连接的直线来代替液束轮廓的曲线。用闪光照相法测量喷雾锥角，通常要将液束的侧面照片放大至少 10 倍，测量结果才较准确。一种简单的测量方法是 将一张白纸放置于液束的某一轴向位置，喷雾会将白纸浸湿，立即测量白纸上湿润印迹的直径，经简单计算就可得到喷雾锥角。喷雾的贯穿距离可以定义为液束能够到达的最大距离。它由两个相互作用力的差值决定：一个是液体射流的初始动力，另一个是环境气体的空气动力阻力。射流的初始速度很高，但随着喷雾过程的进展，以及雾化液滴数目的增多和总表面积的增大，由于液滴与环境气体的摩擦，液体动能逐渐减弱。当最终耗尽了液滴的动能时，液滴就会随着环境气体的运动而运动，或者受重力作用而下落。喷射压力越大，环境气体阻力越小，喷雾锥角越小，贯穿距离就越大。

通常，雾化液滴的尺寸范围很广。液滴尺寸分布的知识对于

评估雾化质量，以及液滴与环境气体之间的质量和热量传输的计算十分有益。由于喷雾的液体动力学和气体动力学研究还不够完善，有关液滴尺寸分布的系统的数学描述显得不够深入，数学模型或经验关系式与实验结果的对比研究比较缺乏。数学模型或经验关系式的优劣取决于其分布函数是否与实验数据拟合得好，其雾化液滴最大直径初始迭代计算值是根据具体情况设定的，最小直径则通常假设为零，即可忽略不计。确定雾化液滴尺寸分布的困难致使人们去使用比较容易确定的平均直径来评估雾化质量的好坏。雾化液滴的平均直径通常是以 μm 为单位的，其表示方法很多，如长度平均直径 $\bar{d}_L$ 、表面积平均直径 $\bar{d}_S$ 、面长比平均直径 $\bar{d}_{L/S}$ 、体积平均直径（或称质量平均直径） $\bar{d}_V$ 、体长比平均直径 $\bar{d}_{L/V}$ 、索特（ $Sauter$ ）平均直径 $\bar{d}_S$ （或以符号 d_{32} 表示）和德布鲁克（ $Debye$ ）平均直径 $\bar{d}_D$ 等。最常用的是索特平均直径，尤其对于燃烧室内燃料的传质、传热问题，多用它来进行评估，其次为体积平均直径和长度平均直径。

蒸发将使雾化的大颗粒液滴变小，小颗粒液滴成为气体，即粒径为零。它与液滴的相互碰撞一同直接影响液滴的存留时间，从而使液滴的尺寸随着时间的推移而重新分布。其对于燃烧室中燃油的雾化质量随时间变化的评估意义重大，它也对燃烧产物的排放产生很大影响。

雾化特性和液滴尺寸分布的测量方法有很多，目前最先进的测量方法有激光全息摄像法、高速摄像法、激光多普勒法和马尔文法等。激光全息摄像法曝光时间极短，可以记录喷雾粒子的三维瞬态图像，静态再现。高速摄像的频率可以达到每秒 1000 帧以上，而且配有计算机图像处理软件，还可以用来研究喷雾速度、锥角、贯穿距离等喷雾特性。激光多普勒和马尔文粒子分析系统可以准确高效地研究雾化液滴的尺寸分布。这些测量方法的共同缺点是高质量仪器的价格较贵。近年来，高清晰度数码照相

机开发速度很快，高端产品不断更新。它拍摄便捷、可靠性高，易于对拍摄位置和参数进行调整，图像清晰，试验成本低廉，可以用于喷雾特性的比较研究。

在过去的 100 年中，喷雾科学与技术有了长足的发展，应用领域不断扩大，目前，喷雾学已经成为国际性的研究领域。其发展主要表现在喷雾数学模型的进展、数值计算分析的不断完善和光学测试技术的改进与开发。由于喷雾的重要性日益显著，就要求研究人员具备更多的喷雾基础理论知识，熟悉相关的喷雾装置，了解什么样的喷嘴最适合给定的用途，以及液体性质和环境因素如何影响喷嘴的雾化特性，这也是本书的目的所在。

第 章

液体碎裂过程

摇摇雾化使连续液体碎裂成为大量离散型液滴，明显地增大了液体的表面积。在动力装置和燃油锅炉的燃烧室中，雾化使随之发生的燃烧——传质传热过程大为加强。因此，雾化机理的研究对于实际喷雾和燃烧系统的设计和改进行是十分重要的。

雾化可以认为是在内、外力的作用下，液体的碎裂过程。一方面表面张力将促使液滴成为球形，因为球形液滴所需要的表面能是最小的；液体的粘性也会抵抗液滴几何形状的任何变化而使之趋于稳定。另一方面，湍流的径向速度分量和作用于液体表面的空气动力会促使其碎裂。一旦外部作用力超过了表面张力，碎裂就会发生。如果喷射压力不是足够高，连续的圆射流或液膜射流的初级碎裂会形成液片、液线及许多大颗粒的液滴，但该过程是不稳定的。若有更进一步的碎裂发生，才会形成大量的细小液滴。在这种情况下，雾化形成的最终液滴尺寸将不仅取决于初级雾化所形成的大颗粒液滴尺寸，还取决于二级雾化的碎裂作用。因此，在讨论实际的喷雾过程之前，有必要先明确雾化最基本的机理，本章将着重探讨喷雾的影响因素以及液滴、圆射流和液膜射流雾化的基本过程和碎裂机理。

影响喷雾的影响因素

液体的物理性质

在喷嘴的喷雾过程中，液体的物理性质——密度、粘度和表面张力极大地影响着喷嘴的流动特性和雾化特性。^[1] 魏建强等人^[2]研究了液体的物理性质对雾化特性的影响。理论上，通过压力喷嘴的质量流动率将随着液体密度的变化而改变。实际上，如果没有液体其他的物理性质和外部环境的影响，液体的密度将很难改变。由于液体的可压缩性极小，密度变化不大，所以在大多数情况下液体密度本身对雾化的影响很小。但由于气体的可压缩性较大，气液密度比对雾化过程的影响就不能忽略不计了。因此，必须清楚液体物理性质各参数之间的关系以及它们对雾化过程的影响。

喷雾使连续的液体碎裂成为细小的液滴，液滴的稳定将取决于液体的表面张力，它阻止液滴表面的变形，雾化所需要的最小能量就等于表面张力乘以液体表面积的增加量。因此，无论喷雾发生在何种条件下，表面张力都是雾化过程十分重要的液体物理性质。喷雾学中常用的量纲一的参数——韦伯数 We 就与空气动力与表面张力的比值有关。通常，水的表面张力为 0.0728 N/m ，石油产品的表面张力为 $0.025 \sim 0.035 \text{ N/m}$ 。对于大多数置于空气中的液体，其表面张力要随温度的升高而减小，而与液体放置的时间无关。

在大多数情况下，粘性是最重要的液体性质。虽然它对喷雾影响的敏感程度不如表面张力，但是它的影响不仅体现在雾化液滴的尺寸分布，而且还有液体在喷嘴内部的流动速率和雾化的模式。液体粘度的增加将使雷诺数 Re 减小，减缓湍流的发展，阻止喷雾圆射流或液膜射流的碎裂，使雾化液滴的尺寸增大。