

L i q u i d S p r a y s

液体喷雾学

曹建明 著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

液体喷雾学

Liquid Sprays

曹建明 著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

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, 喷雾的目的是增强质量和热量的传递。由于喷雾的重要性, 被深入研究了 100 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 8 章, 分别为绪论、平面液膜碎裂的线性稳定性理论、圆柱液体碎裂的线性稳定性理论、环状液膜碎裂的线性稳定性理论、液滴碎裂过程、液滴尺寸分布、液滴尺寸测量、喷嘴及其特点。

本书可作为热能与动力工程及工程热物理、交通运输工程、机械工程、船舶与海洋工程、航空航天科学与技术、农业工程等专业的研究生或高年级本科生的“喷雾学”课程教材, 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使用。

图书在版编目(CIP)数据

液体喷雾学/曹建明著. —北京: 北京大学出版社, 2013. 7

ISBN 978-7-301-22799-2

I. ①液… II. ①曹… III. ①汽车—发动机—燃油雾化—高等学校—教材 IV. ①U464.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 152903 号

书 名: 液体喷雾学

著作责任者: 曹建明 著

策 划 编 辑: 童君鑫 宋亚玲

责 任 编 辑: 宋亚玲

标 准 书 号: ISBN 978-7-301-22799-2/TH·0357

出 版 发 行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> 新浪官方微博: @北京大学出版社

电 子 信 箱: pup_6@163.com

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667

出版部 62754962

印 刷 者: 三河市博文印刷厂

经 销 者: 新华书店

650mm×980mm 16 开本 19.5 印张 350 千字

2013 年 7 月第 1 版 2013 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 40.00 元

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-62752024 电子信箱: fd@pup.pku.edu.cn

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，其被深入研究了 100 年以上。

喷射与雾化作为机械学的分支之一受到国内外人士的普遍重视。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。喷雾机理的研究一直是液体喷雾学的难点之一，处于累积发展阶段，尚未完善，有待于向更高层次逐步推进。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。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。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。可以说，液体碎裂与雾化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。本书是一部专著，主要反映了作者本人近年来的研究成果，同时还总结和译述了国内外的部分研究成果。本书一是供研究生或高年级本科生使用，使他们在学习和研究中能够很快地触及学科的前沿问题，为推动和促进机械学在我国的发展贡献一份力量；二是抛砖引玉，为广泛的学术研究做一块铺路石。本书涉及大量的公式推导，由于本书主要作为教材使用，因此推导过程尽量做到详尽，便于理解。

本书可作为热能与动力工程及工程热物理、交通运输工程、机械工程、船舶与海洋工程、航空宇航科学与技术、农业工程等专业的研究生或高年级本科生的“喷雾学”课程教材，建议授课 50~60 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，作者在访问该大学期间获赠了许多学术资料，使本书的写



作得以顺利完成；感谢加拿大国家科学与工程研究理事会(NSERC)对研究工作给予的支持；感谢汽车运输安全保障技术交通行业重点实验室对喷雾研究设备的支持；感谢参考文献的著者们；感谢我的研究生熊玮、侯婕、郭广祥、任欢等人所做的大量具体工作。此外，还要感谢北京大学出版社为本书的出版所做的贡献。

限于作者的水平和知识范围，疏漏之处恐难避免，谨请使用本书的读者批评指正。

曹建明

2013年2月于长安大学

目 录

第 1 章 绪论	1
习题	14
第 2 章 平面液膜碎裂的线性稳定性理论	15
2.1 概述	15
2.2 平面液膜的稳定区	20
2.3 平面液膜物理模型的建立	21
2.3.1 物理模型的建立	22
2.3.2 推导条件	23
2.3.3 参数的量纲一化	23
2.4 平面液膜控制方程组及其量纲一化和线性化	25
2.4.1 液相控制方程组及其量纲一化和线性化	25
2.4.2 气相控制方程组及其量纲一化和线性化	28
2.5 平面液膜控制方程组中气流粘性项的简化	32
2.6 平面液膜微分方程的建立和解	32
2.6.1 流函数	32
2.6.2 液相微分方程的建立	33
2.6.3 液相微分方程的解	34
2.6.4 气相微分方程的建立	38
2.6.5 气相微分方程的解	39
2.7 平面液膜的色散关系式	43
2.7.1 流动动力学边界条件	43
2.7.2 色散关系式	44
2.7.3 稳定极限	48
2.8 平面液膜的线性稳定性分析	50
2.8.1 液膜两侧气流流速比之差 $\bar{U}_d$ 的影响	50
2.8.2 液流韦伯数 We_l 的影响	52



2.8.3 液流欧拉数 Eu_l 的影响	53
2.8.4 液流雷诺数 Re_l 的影响	53
2.8.5 气流马赫数 Ma_g 的影响	54
2.9 平面液膜的碎裂时间和碎裂长度	56
习题	56

第3章 圆柱液体碎裂的线性稳定性理论

58

3.1 概述	58
3.2 圆柱液体的稳定区	64
3.3 圆柱液体物理模型的建立	67
3.3.1 物理模型的建立	69
3.3.2 推导条件	69
3.3.3 参数的量纲一化	70
3.4 零阶圆柱液体控制方程组及其量纲一化和线性化	72
3.4.1 零阶液相控制方程组及其量纲一化和线性化	72
3.4.2 零阶气相控制方程组及其量纲一化和线性化	78
3.5 零阶圆柱液体控制方程组中气流粘性项的简化	82
3.6 零阶圆柱液体微分方程的建立和解	82
3.6.1 流函数	82
3.6.2 零阶液相微分方程的建立	83
3.6.3 零阶液相微分方程的解	87
3.6.4 零阶气相微分方程的建立	91
3.6.5 零阶气相微分方程的解	93
3.7 零阶圆柱液体的色散关系式	95
3.7.1 流动动力学边界条件	95
3.7.2 零阶色散关系式	96
3.8 n 阶圆柱液体控制方程组	98
3.9 n 阶圆柱液体微分方程的建立和解	98
3.9.1 n 阶液相微分方程的建立	98
3.9.2 n 阶液相微分方程的解	99
3.9.3 n 阶气相微分方程的建立	106
3.9.4 n 阶气相微分方程的解	107

3.10 n 阶圆柱液体的色散关系式	109
3.10.1 流动动力学边界条件	109
3.10.2 n 阶色散关系式	109
3.11 各种色散关系式的讨论	111
3.11.1 Reitz 与 Li 的零阶色散关系式	111
3.11.2 作者的零阶与 n 阶色散关系式	113
3.12 圆柱液体的稳定极限	114
3.13 圆柱液体的线性稳定性分析	115
3.14 圆柱液体的碎裂时间和碎裂长度	118
3.15 圆柱液体速度分布对碎裂过程的影响	119
习题	121
第 4 章 环状液膜碎裂的线性稳定性理论	122
4.1 概述	122
4.2 环状液膜物理模型的建立	125
4.2.1 物理模型的建立	125
4.2.2 推导条件	126
4.2.3 参数的量纲一化	127
4.3 环状液膜控制方程组及其量纲一化和线性化	129
4.3.1 液相控制方程组及其量纲一化和线性化	129
4.3.2 气相控制方程组及其量纲一化和线性化	131
4.4 环状液膜控制方程组中气流粘性项的简化	132
4.5 环状液膜微分方程的建立和解	133
4.5.1 流函数	133
4.5.2 液相微分方程的建立	133
4.5.3 液相微分方程的解	134
4.5.4 气相微分方程的建立	140
4.5.5 气相微分方程的解	140
4.6 环状液膜的色散关系式	143
4.6.1 流动动力学边界条件	143
4.6.2 色散关系式	144
4.6.3 两种色散关系式的比较	159



4.6.4	稳定极限	161
4.7	环状液膜的线性稳定性分析	163
4.7.1	气液流速比 $\bar{U}$ 的影响	163
4.7.2	气液密度比 $\bar{\rho}$ 的影响	168
4.7.3	表面张力和空气动力的影响	170
4.7.4	液流雷诺数 Re_l 的影响	171
4.8	环状液膜的碎裂时间和碎裂长度	171
4.9	环状液膜碎裂的实验研究	172
4.10	线性稳定性理论结语	177
习题		178
第5章	液滴碎裂过程	179
5.1	静态液滴的形成	179
5.2	液滴的碎裂	180
5.2.1	静态液滴的碎裂	180
5.2.2	液滴在稳定气流中的碎裂	181
5.2.3	液滴在湍流区中的碎裂	184
5.2.4	液滴在粘性流体中的碎裂	184
习题		185
第6章	液滴尺寸分布	186
6.1	液滴尺寸分布图解	186
6.2	经验分布函数	188
6.2.1	Nukiyama-Tanasawa 分布	188
6.2.2	Rosin-Rammler 分布	188
6.2.3	Rosin-Rammler 修正分布	189
6.2.4	上限函数分布	189
6.3	理论分布函数	190
6.3.1	正态分布	190
6.3.2	对数正态分布	191
6.3.3	最大熵分布	192
6.4	平均直径	200

6.5	特征直径	201
6.6	液滴尺寸的发散	204
6.6.1	均匀度	204
6.6.2	相对尺寸范围	205
6.6.3	发散度	205
6.6.4	发散边界	205
6.7	雾化质量评价范例	205
6.7.1	实验方案和实验装置	206
6.7.2	喷雾锥角	210
6.7.3	平均直径和尺寸分布	211
6.7.4	特征直径和尺寸发散	215
6.8	结语	216
	习题	217
第7章	液滴尺寸测量	218
7.1	测量的影响因素	219
7.1.1	测量装置的使用误差	219
7.1.2	测量模式	219
7.1.3	测量范围	220
7.1.4	采样样本	220
7.1.5	液滴的蒸发和碰撞	222
7.2	机械测量方法	222
7.2.1	液滴固化法	222
7.2.2	沉降法	224
7.2.3	压痕法	225
7.3	电子测量方法	227
7.3.1	电极法	227
7.3.2	导线法	227
7.3.3	热线法	227
7.4	光学测量方法	228
7.4.1	闪光摄影法	229
7.4.2	激光全息摄影法	232



7.4.3	高速摄影和高速摄像法	233
7.4.4	激光多普勒法	235
7.4.5	干涉条纹光谱法	240
7.4.6	散射光强比法	241
7.4.7	多源散射光法	242
7.4.8	马尔文法	245
7.4.9	仪器的标定	248
7.5	结语	249
	习题	250
第8章	喷嘴及其特点	251
8.1	压力喷嘴	252
8.1.1	平孔喷嘴	252
8.1.2	单路喷嘴	257
8.1.3	宽域喷嘴	260
8.1.4	扇形喷嘴	265
8.2	旋转喷嘴	267
8.3	两相流喷嘴	270
8.3.1	空气助力喷嘴	270
8.3.2	喷气喷嘴	273
8.3.3	气泡喷嘴	274
8.3.4	气哨喷嘴	276
8.4	超声喷嘴	276
8.5	静电喷嘴	278
8.6	结语	280
	习题	280
附录	主要符号	281
参考文献		291

第 1 章 绪 论

喷雾是将液体通过喷嘴喷射进入气体介质中，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。

(1) 日常生活。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。

(2) 医用。雾化清痰器和挥发性麻醉剂的蒸发等。

(3) 生产和工艺流程。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。

(4) 农业。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，以便喷射得更远，增大灌溉的覆盖面积。

(5) 消防。雾化后的水滴能够吸收更多的热量，从而有效地压制火势。

(6) 沥青雾化铺路(常表现为非牛顿流体)。

(7) 燃烧室。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，有以下几个基本的因素适于所有的雾化过程。



(1) 圆柱液体或液膜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。

(2) 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，它们对确定喷雾的形态、锥角、贯穿度、液滴尺寸和速度随时间、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。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柱液体在很高的喷射压力下高速喷出，受气流的扰动作用而碎裂。Rayleigh [1] (1878) 提出，只要圆柱液体表面波的波长接近圆柱液体直径两倍时，气流的扰动就会导致圆柱液体碎裂；而湍流圆柱液体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柱液体，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，圆柱液体就会碎裂。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。液体的粘度抑制圆柱液体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游区域。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。能够产生液膜的喷嘴使液体雾化，并使液、气充分混合。平面液膜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。随着液膜远离喷嘴的扩展，液膜的厚度会逐渐增大，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，液膜的表面波由于高速喷射气流的扰动而碎裂、雾化。图 1.1 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 1-1。

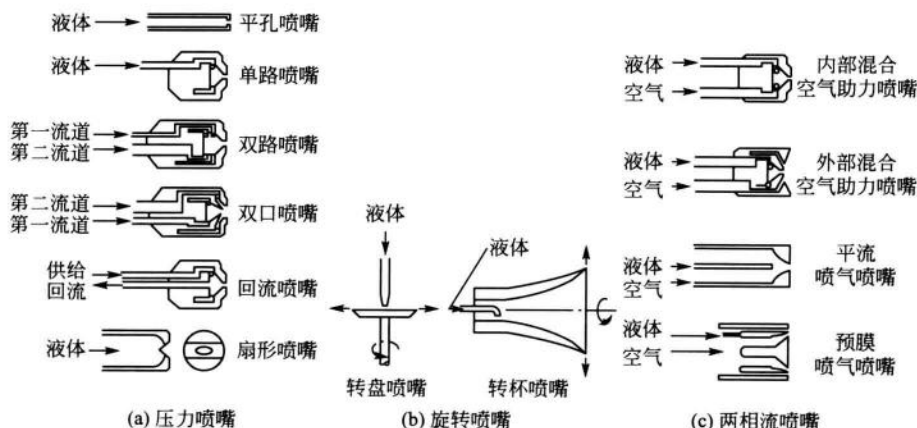


图 1.1 典型喷嘴简图

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



续表

类型	喷嘴	优点	缺点	应用
压力 喷嘴	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
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

续表

类型	喷嘴	优点	缺点	应用
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

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。Tate [2](1969)、Christensen 和 Stealy [3](1980)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系数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。液体碎裂与雾化过程中常用到的量纲一参数——韦伯数 We 就与空气动力与表面张力的比值有关。通常, 水的表面张力系数为 0.073N/m , 石油产品的表面张力系数为 0.025N/m 。对于大多数置于空气中的液体, 其表面张力系数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。液体粘度系数的增加将使雷诺数 Re 减小，减缓湍流的发展，阻止喷雾圆柱液体或液膜的碎裂，使雾化液滴的尺寸增大。液体粘性对喷嘴内部流动的影响是十分复杂的。对于低粘度液体，粘度系数的增大会使流动速率增加，在这种情况下，喷嘴流通面积对流动速率的影响是很大的。不过，对于高粘度液体，流动速率通常会随着液体粘度系数的增大而减小。液体粘度系数的增大会使压力旋转喷嘴的喷雾锥角变窄，当液体粘度很高时，锥形液束可能演变成一条长长的直线。对于燃油来讲，液体的粘性通常会影响雾化的质量，使之变差。燃气轮机和航空推进器所用喷气喷嘴的燃油，其粘度要比用于汽车上压力喷嘴燃油的粘度低，因而喷气喷嘴所产生的油滴尺寸对于燃油粘度系数的些小变化就不是那么敏感。

表 1-2 列出了用于喷雾的一部分液体的物理性质，液体的粘度系数通常随着温度的升高而减小，加热燃油会使喷雾得到改善。温度对某些碳氢化合物燃料的表面张力和粘度的影响如图 1.2 和图 1.3 所示。图 1.2 所示为高温下不同密度的汽油和煤油的表面张力系数随温度的变化关系；图 1.3 所示为高温下空气和各种燃料蒸汽的动力学粘度系数随温度的变化关系。

表 1-2 液体的物理性质

液体	温度 $t/^\circ\text{C}$	动力学粘度系数 $\mu/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	表面张力系数 $\sigma/(\text{N}/\text{m})$
水	18	0.00105	999	0.073
	27	0.00085	996	0.0717
汽油	20	0.0017	720	
煤油	20	0.0016	800	0.026
柴油	20	0.5208	840	0.031
轻机油	16	0.114	895	
	38	0.0342	884	
	100	0.0049	846	