

# 研究需要：工业喷雾过程，喷雾干燥和传热

W. S. Janna

美国 Memphis 州立大学

**提要** 我们曾对从事喷雾、干燥和喷雾传热设备的研究者和制造者进行了一次调查。那些应邀回答的人对需要特别注意的过程和设备作了说明。这里阐述了其中的几个问题（如，雾化如何发生的统一理论；评估喷雾（这是为了往水里溶进空气以加强传质过程而采用的）性能的方法；计算高压喷雾传热的综合模型；等等）。结论是，当实际需要已经提出，而且用喷雾法代替传统方法的革新办法已形成时，许多研究课题可以从工业中找出来。

## 引言

我们接触了一些研究者和制造者，并请他们提供各自领域里当前和需要研究的课题的情况。应邀回答者提出了有价值的建议，并提供了一些学术论文。确定如何整理和组织这些材料是一个难题，但审阅了这些材料后形成了一种方法。提交来的材料分成7大类，并确定为以下7个大标题：①雾化模型；②高粘度液体的雾化；③液滴大小和速度分布的测量；④喷雾加工或干燥；⑤喷雾液体的传热（传入或传出）；⑥燃料喷雾和燃烧；⑦粉末/微粒技术。

上面每个领域（及许多其他领域）都需要进行更多的研究。而且以上课题尽管都是分别列出的，但并不意味是互不相容的。以下详述每个领域。

## 1 雾化模型

Dombrowski & Johns (1983), Janna & John (1979) 都讨论过平直扇形喷雾的雾化机理。Dombrowski 和 Johns 利用了图 1 所示的 Rayleigh 描述。液体以振荡的平直薄片形式喷射到空气中。随着离喷嘴越来越远，这个薄片展宽，并变薄。最后薄片薄得变得不稳定而开始破裂成为液滴。Dombrowski 和 Johns 分析了这个模型，并进一步提出了一个可以用于计算最终能产生多大液滴的方法。

Janna & John (1979) 指出，平直喷雾只有在低喷射压下才存在可以观测到的液体薄片。在高液体背压（约13800 kPa 或 2000 psi）下，液体薄片就不能形成。从而论证了喷嘴出口面液体所产生的剪应力是同与雾化生成有关的现象相

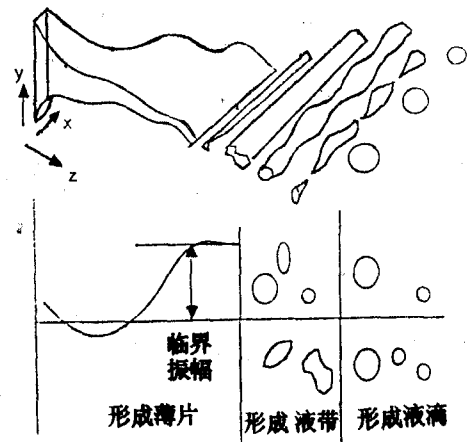


图 1 振荡液体薄片及后来破裂成小液滴

联系的。Janna 和 John 然后将喷嘴出口面的剪应力同液雾的体积平均直径联系起来，得到联系这两个变量的一个关系式。由于观测到高压和低压喷雾有很大不同，所以认识到似乎不存在平直扇形喷雾雾化如何发生的统一理论。

Reitz & Bracco (1982; 1986) 研究了圆形液体射流的雾化机理。在压强从 33 atm (500 psia) 到 166 atm (2500 psia) 范围内进行了试验，使用水和甘油不同比例的混合物，以不同的压强（到 40 atm 即 600psia）喷射入各种不同气体中。他们的目的是评价已有的射流雾化理论，并确定气动效应，液体湍流，射流速度剖面，重新排列效应以及供液压力振荡对实验结果的影响。他们的结论是，喷嘴几何形状如何影响喷雾的特定过程还有待确定。他们进一步指出，对“雾化”这一术语，似乎还没有一个广泛接受的定义。他们又指出，尽管雾化的控制过程已经发展得很成熟，但雾化发生的机理还没有很好搞清楚。

一位在进行有专利权研究的应邀回答者，正在研究用喷雾涂敷和干燥方法沉积薄膜的过程。他也在寻求一个描述雾化机理的数学模型。

基于以上研究和其他进行的工作，可指出以下几个可以作为需要深入研究的领域：

- A. 对“雾化”这一术语应该提出一个一般定义。
- B. 应该提出一个描述雾化过程的统一理论。这一理论应该把喷嘴几何形状如何影响雾化，并与确定雾化发生机理联系起来。
- C. 如果不能对所有喷雾发生设备提出一个统一的理论，那么对每个设备应该给予专门的描述。
- D. 控制过程（如流量，喷压，湍流度等）应该辨识清楚，并对不同的喷雾发生设备予以分类。这样，将来的用户在选择喷雾器时能有一个指南。

## 2 高粘度液体的雾化

Levey (1987) 提供了 Specflo 薄膜在有空气和没有空气下发生雾化的喷枪的描述数据。在这条薄膜喷枪里，液体从一个小孔压出，然后成为液膜的形式沿着一个中空圆锥的内表面流出。当液膜到达圆锥边缘时，与一环状空气流相碰撞，结果发生了喷雾。制造者声称，对于只要环境可适用的任意喷雾器，其最小传输效率可超过60%。其他性能特征包括：处理高粘度和低粘度流体的能力，高效应用，高速高质量抛光可控的喷雾图案，减少过量喷涂。Levey 还提供了产生扇形喷雾的 Specflo 无空气喷嘴的资料。有空气和无空气系统都可以用于油漆、铺屋顶、防水液体的喷涂。根据工业需要，可以按以下几个领域来进行研究：

- A. 应提出薄膜喷雾器如何产生喷雾的理论。
- B. 应对控制过程进行一系列的试验，从而提供雾化喷漆、铺屋顶、防水材料喷涂的最佳操作方案。
- C. 在寻找更好的方法来雾化高粘液体（包括纤维产品和/或集料）方面，对Specflo 有特殊兴趣。

## 3 液滴大小和速度分布的测量

Bachalo (1987)描述了 Aerometrics 公司生产的激光 Doppler 测速计和颗粒分析仪。这一系统装有电子器件，完全由软件控制。输出数据是当得到信息时在屏幕上显示的直方图。Bachalo 还描述了相 Doppler 颗粒分析仪，该仪器也是 Aerometrics 公司制造的，使用了类似于激光 Doppler 测速计的光学系统。颗粒的大小和速度使用高聚焦激光束同时测得。可以

测得的颗粒大小范围从 1.0 到 8000 $\mu\text{m}$ 。

Bachalo & Houser (1984) 对激光散射检测法进行了研究, 这种方法用来测量球形颗粒的大小和速度。(这一研究在 Aerometrics 系统之后形成了理论。)用几何光学理论进行了分析。确定出来的仪器响应随液滴的大小线性地变化。单弥散液滴流用该系统产生和测量, 以便证实其操作后的理论。正如 Rudoff et al (1987) 和 Bachalo et al (1987) 研究过的那样, 结果完全一致。Bachalo 和 Houser 在另一出版物 (1987) 也研究了有关二相湍流的问题。

Wu et al (1986) 测量了雾化液体射流中喷嘴附近液雾边缘上喷雾液滴大小的分布。拍下了逆光闪光照片。n-己烷和n-十四烷在压强为 2.8 到 9.8MPa 范围内, 通过 3 种不同的喷嘴喷射到气态氮中。在所有情形中, 数据都很好地满足  $\chi^2$  分布。

Hebden (1987) 报道说, Spraco 公司目前在进行若干研究项目, 主要的几个是研究液体雾化的新喷雾设备。Hebden 进一步指出, Spraco 公司使用了 Aerometrics 公司的相 Doppler 系统, 他认为该系统是液滴大于 500 $\mu\text{m}$  时现有最精确的系统。然而, 当同样一个喷雾设备用 3 个不同系统进行试验时, Hebden 得到了 3 个截然不同的液滴直径, 变化相当大。这种情况给试图使客户相信它的可靠性带来了困难。

应当指出, Carnegie Mellon 大学 (Pittsburgh, PA) 开了一门“颗粒大小和速度测试仪”的短期课程。这门课程是为技术人员设立的, 训练他们操作测量液滴大小和分析喷雾分布的实验室设备的技能。设备和方法包括高速脉冲照相术, 电影摄影术, 全息摄影术, 纹影法, 电视成象, 自动成象分析, 激光 Doppler 测风法, 干涉测量术, 速度和颗粒大小同时测量法, 信号处理, 计算机接口, Fraunhofer 绕射颗粒大小测量, 层析 X 射线摄影法, 双色双速度分量激光 Doppler 测速仪 (TSI), 液滴大小的干涉测量仪 (Spectron), 相 Doppler 喷雾分析仪 (Aerometrics 公司), 光衍射颗粒分析仪 (Malvern 公司), 以及高速电影摄影机 (Hycam)。显然所有这些技术是非干扰的。亦即, 所有这些使用测量设备的方法都不会与喷雾本身互相干扰, 例如, 允许一些液滴碰撞直接位于喷雾路径上的显微镜载物玻璃片。

基于以上探讨所得的一些了解和基于颗粒大小分析的相当新的进展, 可以确定以下的一些研究需要:

A. 应进行液滴大小测量方法的评论, 以便给新的研究人员提供一个方便的参考文献目录。

B. 拥有喷雾液滴大小分布的广泛可靠数据的研究人员, 应该和颗粒大小分析仪的制造者协同努力, 以获得表明各自动设备之间很好的一致结果。(这里困难可能在于对哪种测量液滴大小分布的方法是最精确的取得一致意见。)

C. 应该在干扰测量法和非干扰测量法之间的鸿沟上架起一座桥梁, 说明传统方法的可靠性, 并相对于新的设备来评价它们。

#### 4 喷雾加工或干燥

Crosby (1978) 曾提出“喷雾加工中的雾化想法”一文, 其中综述了有关的运行特性。他考虑了雾化过程中气体的卷挟作用, 研究了最佳的干燥室的构形。在后来的工作中, Matsumoto et al (1985) 讨论了旋转式雾化器, 特别注意了它的突出设计特征。这两篇论

文都指出了如下事实：液滴云的形成和弥散是所有喷雾过程的中心。因此在喷雾加工和干燥领域的主要推动力，看来与一些不同工艺过程中所用的多相原料的生产技术和方法有关。

Dickerson & Claunch (1987) 报告了如下显然的观察结果（但尚未经试验验证）：铅直向下喷向附近液体自由面的喷雾，卷挟走了周围的大量空气，比其他传统的空气卷挟设备所带走的多得多。他们提出的设备类似于图 2 所示的一个含有水和空气混合物的压力容器。水通过一个非常接近水面的喷放液体的喷雾器进入水箱。高压的空气被压入水箱里，含气原料从底部排出。据报告，液体自由表面增强的湍流加速了空气溶于水的过程。如果今后的试验表明这是一个有效方法，那么很多生物过程的效率就可以提高。

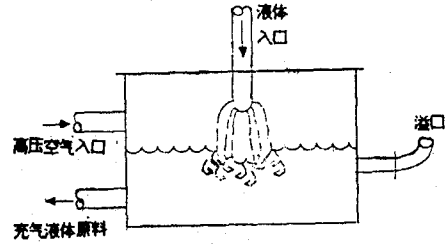


图 2 水充气器设计构形

一个不愿透露姓名的应邀回答者从事薄膜沉积领域工作。尽管他的工艺过程是可行的，但还需要进行计算提高性能方面的分析。

基于以上讨论，可以认为对下面一些领域可以进行更多的研究：

- A. 应该进行一项解决怎样使用喷雾器才能促进气体溶解于喷雾液体之中的研究。
- B. 应该进行一项描述薄膜沉积的分析研究，包括研究喷雾如何碰撞表面，随后薄膜实际上是如何形成的。
- C. 应该提出喷雾干燥机理的定量描述。

### 5 喷雾液体的传热（传入和传出）

Yao & Cai (1985) 报告了有关液滴冲撞热表面的研究。用压电液滴发生器来产生同一大小液滴流，并且用一个旋转圆盘表面做了实验。当冲撞角度是  $90^\circ$  时，如果是高速流或所用液体的表面张力比较低，液滴就会发生破碎。如果有切向速度分量，则撞击的液滴就会进一步失去稳定性。已提出一些关系式来说明，传热速率极大地取决于表面温度是否高于 Leidenfrost 温度。Deb & Yao (1987) 对稀薄喷雾冲撞一个温度高于 Leidenfrost 温度的表面的情况，建立了一个传热的解析模型。能量传递是通过液滴与表面的接触以及与周围空气的对流和辐射进行的。为了计算液滴接触传热，导出了一个关系式。建立了水平喷雾和铅直喷雾的模型，对薄膜沸腾状态得到了满意的计算结果。Choi & Yao (1987) 研究了喷雾正撞热板时的薄膜沸腾传热机理，力求提供一个物理上精确的描述。Talley & Yao (1984) 描述了有关非定常液滴汽化的实验。Kabadi & Yao (1987) 分析了平板边界层中的弥散流动和传热。

Herman et al (1983) 进行了从高压（高达 2500 psi）喷雾传递到周围空气这个过程的一些传热实验。用一个喷嘴来产生铅直向下的热水扇形喷雾。测得喷嘴上游的水温约为  $140^\circ\text{F}$ ，而在喷嘴下方 12in 处，测得喷雾液体平均温度约为  $75^\circ\text{F}$ 。使用了两种尺寸的喷嘴，提出了一个关系式把喷雾液体平均温度和各种工作变量联系起来。Green et al (1985) 用甘油进行了类似的实验。

基于以上的研究，以及收到的意见建议，可以定出以下几个研究课题：

- A. 喷雾和表面之间的传热和动力相互作用，除了薄膜沸腾状况以外，在其他一些区域

还需进行深入研究。（包括喷雾淬火，喷雾涂层，以及柴油喷射过程等应用。）应该建立一个计算格式。

B. 在从高压喷雾传递到周围环境的传热领域方面应该进行更多的工作。（其应用包括建立有关冷却塔和喷淋池的模型，以及冷凝和汽化设备内的热交换。）应该提出一个综合的描述方程。

## 6 燃料喷雾和燃烧

Varde et al (1985) 针对高喷射压下柴油燃料喷雾的试验特性进行了研究。他们试图揭示喷雾射程，喷雾锥角，液滴大小及分布等效应。燃料喷入一个充氮气的燃烧室里，其氮气密度变化，但同在室温下。他们得到了计算喷雾射程和喷雾锥角的关系式。他们讨论了设计参数对液滴大小测量的影响。然而整个研究的最终目的，是想提高柴油发动机的燃烧效率。研究指出，燃烧过程的成功取决于燃料是如何引入燃烧室的，而后者又决定于喷射燃料的喷射器的运行情况。此外，尽管喷射压强很高（约 70 MPa），但据认为需要更高的压强（约 140 MPa）才可能提高发动机的性能。Varde 等不能按原计划完成他们的研究工作，因此他们着重测量一些具体的喷雾特性。他们的工作是研究在恒定不变的喷射压强下产生的喷雾。下面列举了这一研究的发展。

还有几个有关研究是用柴油燃料或柴油喷雾来进行的。Wu et al (1984) 用激光 Doppler 测速仪测量了柴油型喷雾中液滴的速度。Martinelli et al (1985) 用激光 Doppler 测速仪的数据验证了根据理论模型用数值计算得到的液滴速度计算值。Bracco (1985) 综述了有关发动机喷雾建模的一些课题。Felton et al (1987) 用激光 Doppler 测速仪测量了汽化柴油型喷雾的液滴速度。Chehroudi et al (1987) 拍摄到类似于分层进气发动机中喷雾情况的喷雾照片。Reitz & Diwaker (1986) 用一个计算机模型研究了液滴破碎对燃料喷雾的影响。在其后的研究中，Reitz & Diwaker (1987) 研究了在喷嘴附近，高压稠密喷雾中靠近喷嘴处喷雾液滴与气体运动之间的相互作用。Ingebo (1986) 为了研究汽化对燃烧器性能的影响，用一个气力喷雾器产生能模拟燃料喷雾的水雾。

基于已进行的工作和从报告中得到的意见，可定出以下几个领域需要进行更多的研究：

A. 柴油燃烧室里的状况完全不是定常的。因此，对随时间变化的背压下产生的喷雾需要进行研究。

B. 汽缸里活塞的运动引起空气运动。在变化的压力下产生的喷雾射入涡流式的空气中，这种喷雾还需要进行研究。

C. 喷雾液体和喷射接收器流体之间的温度差引起传热效应，这又反过来影响液滴大小和燃烧速度。温度对产生喷雾的影响需要进行研究。

D. 喷雾喷射器的二维和三维模型都已提出，但需要作实验验证。这些模型尚未作过试验。

E. 喷射过程、汽化和燃烧都已在一个受控的试验室里进行了简单的模拟和试验，但还应该在发动机型的环境下进行验证。

## 7 粉末/微粒技术

Lawley (1986) 在他的 1985 年 Henry Krumb 讲座中，对与现代粉末冶金有关的一些课题进行了综述。然而，我们这里有兴趣的是，在生产金属粉末时采用的雾化工艺过程。目

前有 5 种制造粉末的工业方法，雾化法只是其中的一种。Lawley 报告说，雾化法科学技术的发展非常重要，特别是对于特种合金。这些合金包括铝合金，铜合金，不锈钢，工具钢，超耐热不锈钢，以及钛合金。喷雾法使我们能对粉末化学，清洁度，颗粒大小及形状进行控制。

Lawley 描述了如图 3 所示的水的雾化过程。用一个熔炉将感兴趣的金属熔化，然后在重力作用下使液态金属流进一个反应室中。液态金属象一个圆柱流流下来。水射流或喷雾对准液态金属流喷射。其结果是在反应室底部收集到固化的金属粉末。一般说来，由水雾化产生的粉末颗粒，其形状是不规则的（不是希望要的球形）。Grandzol & Tallmadge (1973; 1975) 提出过一个液滴形成的模型以描述金属流的粉碎。他们提出的结论是，水流垂直于液态金属流的速度分量，是控制颗粒大小的主导因素。

除此之外，Klar & Fescar (1982) 阐述了高压水流和液态金属的相互作用。液态金属经历了一个波浪式的扰动状况，然后形成丝带状以及产生液滴（如图 1 的 Rayleigh 描述）。最后的颗粒形状决定于液态金属破碎后的液滴固化有多快。

Lawley (1986) 接着阐述气体喷雾法。和水一样，也是用来生产粉末金属。设备的结构几乎和图 3 中水喷雾过程一样。不一样的是，在气体雾化法中气体（如空气、氮气、氧气或某种惰性气体）是撞击液态金属射流的介质。气体可以具有亚声速或超声速速度。用气体喷雾法，液态金属的冷却/固化速率比用水喷雾的要慢。因此在气体喷雾法中，金属粉末由具有相当光滑表面的球形颗粒组成。Small & Bruce (1968) 得出了把平均颗粒大小和气体压力联系起来的一个幂律方程。See & Johnston (1978) 对气体雾化过程提出了一个描述。用这两种方法，效率都低于 1%。

Lawley (1986) 进一步阐述了用于粉末金属生产的其他一些雾化过程，包括旋转电极过程，真空雾化方法，离心式雾化方法，以及超声气体雾化过程。所有这些方法都不是工业上可行的。

Leroux & St-Onge (1986) 描述了一个 1985 年交付使用的水雾化的锌粉生产设备。这一成套设备在雾化设备周围有几个附属设备。雾化水经过回收，处理，然后重新使用。指望这套设备有较高效率，因为它的雾化系统能生产出平均颗粒大小较小的不规则颗粒形状。

Matson et al (1986) 叙述了用喷雾喷嘴沉积出微细粉末的新方法。SiO<sub>2</sub> 玻璃和蒸馏水的超临界溶液以  $6 \times 10^7$  Pa 的压强进行喷雾。喷嘴附近区域的照片表明，在 515℃ 温度下，离开喷嘴的流体是看不见的。颗粒大小和沉积速率是压力、温度、混合物中的硅浓度的函数。溶液中的少量盐含量也对颗粒大小和沉积速率有影响。

Booz et al (March 1986; April 1986) 已在成套设备，方法及一个对控制雾化粉末生产有用的装置方面得到了专利。

基于以上讨论，可以得到以下几个需要研究的课题：

A. 应提出一个单一的理论来描述在粉末金属生产中的水和气体雾化过程。

B. 应该研究使用水以外的液体的效果，以便确定是否能得到“更好”的雾化法。（“更

（下转第 224 页）

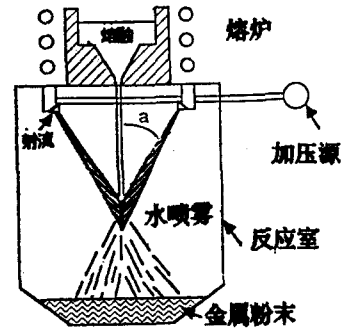


图 3 水雾化过程

- 40 Langer K. Zur Anatomie und physiologie der haut: I. Uber die spatbarkeit der cuits. *Sitzungber. Akad. Wiss. Wien.*, **44** (1981) : 19—46
- 41 Furnas D W, Fischer G W. *J. Plast. Surg.*, **24** (1971) : 144—160
- 42 Kraissl C J. *Plast Reconstr. Surg.*, **8** (1951) : 1—28
- 43 Bradsley T J. A finite element stress analysis of biological tissue. M. Sc. thesis, Bucknell University, Lewisburg, Pa. (1978)
- 44 DeHoff P H, Key J E. *J. Biomech.*, **14** (1981) : 549—554
- 45 Berard C W, Woodward S C, Herrmann J B, Pulaski E J. *Ann. Surg.*, **159** (1964): 260—270

## ADVANCES IN MECHANICS OF SKIN

Zeng Yan-jun    Ni Qian  
Beijing Polytechnic University

**Abstract** In this paper, the recent developments of the skin mechanics are summarized and the methods and the apparatus of experiments *in vivo* or *in vitro* are introduced. The mechanical models and the main mechanical properties are discussed. Finally, the application of skin mechanics to clinical practice is briefly reviewed.

**Keywords** *skin mechanics; stress-strain relationship; experiments in vitro; experiments in vivo; viscoelasticity*

(上接第 279 页)

好”是用想要的粉末的特性来确定,而这一特性又取决于粉末本身的最终用途。)

C. 生产粉末金属中雾化过程的控制因素应该予以分类编目,以供用户参考。

D. 为了使方法的经济效益更高,应该努力提高雾化过程的效率。

E. 在超临界流体喷雾领域中可以进行更基本的研究。(如,不同的流体,变化的压力、温度和流量等。)

### 结 论

从根据那些应我们要求作了答复的研究者和生产者提出的意见中,我们确定了 7 个研究领域。每个领域的论文都作了概述或提及。认定和列举了可能进行深入研究的一些领域。尽管列举得并不全面,但覆盖范围广泛而且突出了某些重要领域。希望这里提供了足够的信息,使得那些雄心勃勃的研究者们能够在喷雾方面继续在他/她们选定的研究领域作出贡献。

参 考 文 献 (41篇, 略)

梁 焰译自: *Appl. Mech. Rev.*, **41**, 10(1988): 365—369.

(董务民校)