

## ABSTRACT

Nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) released by the fuel electric plants are frequently concerned in the recent thirty years. SNCR (Selective Non-Catalytic Reduction) technology is a developed NO<sub>x</sub> control technology and already widely brought into commercial service abroad. The spray nozzle which is a crucial apparatus ejecting the reducing solution in SNCR system can effect the efficiency of NO<sub>x</sub> control directly.

Firstly, this paper introduces the development and recent situation of NO<sub>x</sub> control technology, especially the SNCR technology. Then some common performance indicators for spray nozzles are introduced, such as the flow-rate characteristics, the atomizing angle, SMD (Sauter Mean Diameter) and its distribution, velocity of droplets, AWR (Air Water Ratio) and so on. The paper also gives some examples of nozzles already applied home and abroad, including their structures and spray characteristics.

Secondly, the paper presents the composition of experimental system and the experimental procedures, and also the relevant apparatuses, including the LS-2000 laser particle analyzer and HAAKE rotary viscometer. Experiments research on the flow-rate characteristics, pressure, the atomizing angle, SMD and its distribution in transversal and lengthwise direction.

At the first stage of experimental research, a pressure-type nozzle and an air-blast nozzle are developed and compared, and the latter one is proved to be much better. Therefore different kinds of fan-shaped air-blast nozzles are developed subsequently at the second stage, including the rectangular nozzles, olive-shaped nozzles and nozzles with mixing section. With thorough analysis and comparison, it comes out that the olive-shaped nozzles and nozzles with mixing section are the better ones, and further researches are carried out on them.

These fan-shaped air-blast nozzles have a weakness that even the pressures of liquid and pressurized-air are lifted up, AWR is still a bit low and makes droplets a little bigger. On the basis of fan-shaped air-blast nozzles, by adding external-mixing passages, different kinds of partial internal-mixing nozzles are developed. Because of the existence of external-mixing passages, AWR becomes higher, and droplets become smaller. On the basis of researches on nozzles all above, a simple new-style nozzle with their merits are developed and applied in practical project at the end of chapter 4.

Because of the limitation of experimental system, the velocity of droplets can't

be measured; thereby the velocity field of spray can't be well understood. Numerical simulation of atomizing process is tried by using Fluent software. First step of simulation is to build the mesh pattern with similar structure and size of real nozzle, and then the boundary conditions and initial conditions are set, and then start the iteration by using VOF (Volume of Fluid) multiphase model. It is a good make-up to the experimental research.

**Keywords:** SNCR, Nozzle, Atomization, Air-blast, Fan-shaped,  
Partial internal-mixing

学号： 20508221

## 独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 浙江大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：

签字日期： 年 月 日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 浙江大学 有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权 浙江大学 可以将学位论文的全部或部分内 容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名：

导师签名：



签字日期： 年 月 日

签字日期： 年 月 日

# 第一章 绪论

我国是一个能源结构以煤炭为主的国家，由煤炭等化石燃料燃烧会产生大量的SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>等污染物。NO<sub>x</sub> 氮氧化物目前是主要的大气污染物之一。NO<sub>x</sub>既可直接对人体造成危害，也可形成酸雨，甚至影响气候<sup>[1~3]</sup>。随着人们环境保护意识的增强，使得NO<sub>x</sub>氮氧化物成为最近三十多年中受到极大关注的一种污染物，NO<sub>x</sub> 污染物的控制技术也已经是全世界重要的研究课题。过去的几十年，已经发展出很多低NO<sub>x</sub>技术，有些已经发展到比较成熟的阶段。选择性非催化还原SNCR技术是近年来发展比较迅速的低NO<sub>x</sub>技术，国外发展已经比较成熟，在很多电厂已经投入商业运行<sup>[4~6]</sup>。典型的SNCR系统由还原剂储槽、多层还原剂喷入装置以及相应的控制系统组成。其中十分关键的一环就是还原剂喷入装置，也就是液体气力雾化喷嘴<sup>[7]</sup>。下面将对低NO<sub>x</sub>技术的发展和现状，尤其是SNCR技术的发展状况做了详细的介绍。也十分详细的介绍了液体雾化喷嘴的性能指标和发展状况，列举了一些国内外液体雾化喷嘴的结构和雾化特性。

## § 1.1 低 NO<sub>x</sub> 技术的发展及现状

### § 1.1.1 NO<sub>x</sub> 的生成机理和危害

在煤炭等化石燃料燃烧过程中，燃料中和燃烧空气中的氮被转化成一氧化氮、氧化亚氮和二氧化氮。这些通常统称为 NO<sub>x</sub> 的氮氧化物还包括 N<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>。NO<sub>x</sub> 污染物主要来源于生产、生活中所用的煤、石油等燃料燃烧的产物（包括锅炉、汽车及一切内燃机燃烧排放的 NO<sub>x</sub>）；其次是来自生产或使用硝酸的工厂排放的废气。

NO<sub>x</sub> 的具体危害性表现在以下几个方面<sup>[4]</sup>：

- 1) 吸入 NO，很容易与血液中的血色素结合，可引起变性血红蛋白的形成并对动物和人的中枢神经系统产生影响。
- 2) 能形成酸雨，造成酸沉降污染，导致环境问题和经济损失。
- 3) N<sub>2</sub>O 是一种温室气体，造成全球气候变暖，还会破坏臭氧层，使紫外线对人体造成伤害。
- 4) NO<sub>2</sub> 通过光化学反应分解为 NO 和臭 O<sub>3</sub>，使得地表大气中臭氧浓度升高，对人体健康十分有害，对其它动植物也产生危害。
- 5) 与碳氢化物共存于空气中时，经阳光紫外线照射时，发生光化学反应，产生一种光化学烟雾，对人体健康和植物都有危害。
- 6) 容易形成 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub>，被人吸入后，会累积在呼吸系统中，引发许多疾病，对人体产生危害。

NO<sub>x</sub> 的生成机理是整个低 NO<sub>x</sub> 燃烧技术的基础。NO<sub>x</sub> 是在燃烧过程中由燃料和空气中的氮与氧发生反应生成的，煤炭燃烧过程产生的含氮污染物主要为 NO 和少量的 NO<sub>2</sub>，根据燃烧过程中 NO<sub>x</sub> 产生机理的不同，可将其分为 3 个主要的类型<sup>[8-12]</sup>，分别是：

### 1. 热力型 NO<sub>x</sub> (Thermal NO<sub>x</sub>)

在高温环境下，空气中的氮氧化生成的 NO<sub>x</sub>，称之为热力型 NO<sub>x</sub>，也称为温度型 NO<sub>x</sub>。当燃料充分混合和增加相对于碳和氢的过量氧时，热力型 NO<sub>x</sub> 的生成量会增加。当燃烧空气不足，反应温度降低和混合不均匀时使热力型 NO<sub>x</sub> 的生成量减少。生成 NO<sub>x</sub> 的量还取决于颗粒在高温区域的停留时间。

这个理论是由前苏联科学家捷里多维奇 (Zeldovich) 于 1946 年最早提出的，因而也称为 Zeldovich 机理<sup>[13]</sup>。根据这一机理，氧氮化物的生成过程是一个不分支连锁反应。首先，高温下的氧分子首先离解生成氧原子，然后氧原子 O 撞击氮分子，生成的 N 能与氧分子生成 NO 和氧原子，其生成反应式如下：



其连锁反应的总生成式为：



在过量空气系数降低、还原性的气氛下，氧气 O<sub>2</sub> 氧化氮原子 N 的作用减少，反应式 (1-1) 中析出的氮原子 (N) 主要是靠氢氧根 (OH) 氧化，这叫做反应式 (1-3) 的扩展 Zeldovich 机理，反应如式 (1-4) 所示。



从以上热力型 NO<sub>x</sub> 的反应机理可以看出，热力型 NO<sub>x</sub> 生成的主要影响因素是温度、在高温区停留的时间和氧浓度。由于相对于燃料氧化的速率来说，热力型 NO<sub>x</sub> 生成的总速率较低。因此，根据 Zeldovich 的建议，热力型 NO<sub>x</sub> 的生成反应可以从燃烧氧化反应中分离出来，热力型 NO<sub>x</sub> 并不是煤粉燃烧系统中最主要的 NO<sub>x</sub> 生成机理。因此控制热力型 NO<sub>x</sub> 的措施是：降低燃烧时的温度、避免产生局部高温区、缩短烟气在炉内高温区的停留时间以及降低烟气中氧的浓度。

### 2. 快速型 NO<sub>x</sub> (Prompt NO<sub>x</sub>)

快速型 NO<sub>x</sub> 在燃烧的初期阶段生成。在富氧燃烧条件下，燃料在燃烧器喷嘴顶部开始燃烧，氮分子和碳氢化合物发生反应，产生氢氰酸 (HCN)。随后氢氰酸就被氧化成为 NO<sub>x</sub>，快速型 NO<sub>x</sub> 在总排放的 NO<sub>x</sub> 中所占的比例是很小的。HCN 和 N 生成 NO 的反应可分为以下几步<sup>[14,15]</sup>：





### § 1.1.2 NO<sub>x</sub> 主要的控制技术

根据以上三类 NO<sub>x</sub> 生成的机理，可以针对性的减少煤燃烧过程中 NO<sub>x</sub> 生成和排放，主要途径有以下几个：

- 1) 使用含氮量低的燃料，如煤改油，煤改气和洗煤、选煤、混煤等方法。
- 2) 减少燃料周围的氧浓度。包括：减少炉内过剩空气系数；减少一次风量；减少挥发份燃尽前燃料与二次风的掺混等。
- 3) 延长在低氧浓度条件下的停留时间，降低燃料 N 转化成燃料型 NO<sub>x</sub> 的比例，而且使已生成的 NO<sub>x</sub> 经过均相或多相反应被还原分解。
- 4) 在空气过剩的条件下，降低烟气的峰值温度，以减少热力型 NO<sub>x</sub>，如采用降低预热空气温度和烟气再循环等手段。
- 5) 可加入还原剂，使还原剂生成 NH<sub>3</sub> 和 HCN 等物质，它们可将 NO<sub>x</sub> 还原成 N<sub>2</sub>，从而总体减少了 NO<sub>x</sub> 的排放。

通过这些控制途径，人们研究出许多燃烧控制技术。根据这些技术位于整个燃烧过程的相对位置可分成三类，分别是燃烧前、燃烧过程、燃烧后控制技术。

#### 1. 燃烧前控制技术

燃烧前可以使用含氮量低的燃料，如煤改油，煤改气和洗煤、选煤、混煤等方法降低燃料的含氮量，以降低燃料型 NO<sub>x</sub>；另外可使用水煤浆、澳沥等燃料代替油，降低燃烧的峰值温度和燃烧强度，这样可以减少热力型 NO<sub>x</sub> 的生成。如果再配合添加剂的使用，对降低 NO<sub>x</sub> 有很好的效果。

#### 2. 燃烧过程控制技术

在煤燃烧过程中生成的众多大气污染物中，NO<sub>x</sub> 氮氧化物是最有希望从燃烧措施的改进中得到控制的燃烧污染物。由前面可知降低 NO<sub>x</sub> 排放的基本原则是低温、短停留时间和低氧甚至缺氧燃烧。这和强化燃烧的传统燃烧原则相矛盾，使得传统燃烧方式面临新的挑战，但也导致许多新颖的燃烧方式和燃烧控制技术应运而生。

##### (1) 低 NO<sub>x</sub> 燃烧器技术，LNB(Low NO<sub>x</sub> Burner)

低NO<sub>x</sub>燃烧器技术是通过特殊结构设计的燃烧器（LNB）及改变通过燃烧器的风煤比例，以达到在燃烧器着火区空气分级、燃烧分级的效果。能在保证煤粉着火燃烧的同时，有效抑制NO<sub>x</sub> 的生成<sup>[20~23]</sup>。

不管各种低 NO<sub>x</sub> 燃烧器的结构形式如何变化，其核心原理总是浓淡燃烧原理和分级燃烧原理。燃烧过程中煤粉的高温快速分解、快速着火是 LNB 技术的关键。总的来看，目前关于低 NO<sub>x</sub> 燃烧器的研究已经到了一个比较高的水平，并得到了广泛的开发和工程应用。世界各国的大锅炉公司，为使其锅炉产品满足日益严格的 NO<sub>x</sub> 排放标准，分别开发了不同类型的低 NO<sub>x</sub> 燃烧器，一般可达到 NO<sub>x</sub> 降低率在 30~60%之间。

我国低NO<sub>x</sub>燃烧技术起步较早,国内新建的300MW及以上火电机组已普遍采用LNB技术。对现有100~300MW机组也开始进行LNB技术改造。采用LNB技术,只需用低NO<sub>x</sub>燃烧器替换原来的燃烧器,燃烧系统和炉膛结构不需作任何更改,因而成本低,运行费用也低,容易推广。

不过低NO<sub>x</sub>燃烧器也存在着下列一些问题:

- 1) 导致燃烧过程中一氧化碳和未燃尽碳损失增加;
- 2) 燃烧区域结渣问题变严重;
- 3) 炉膛水冷壁管的磨损和腐蚀程度增加。

## (2) 燃尽风技术, OFA (Over Fire Air)

燃尽风技术的原理是分流一部分二次风(10%~20%)引入炉膛主燃烧区上部,以减少主燃区的氧气量。主燃区的燃料在缺氧富燃条件下燃烧,燃烧温度降低,燃烧生成大量的CO,与燃料中的氮分解生成的HN, HCN, CN, NH<sub>3</sub>, NH<sub>2</sub>等相互复合生成氮气,或将已有NO<sub>x</sub>分解还原,从而抑制了燃料NO<sub>x</sub>的生成。然后将剩余的空气送入炉膛,供给燃料燃尽所需。这时氧气浓度虽然高,但由于火焰温度已经降低,因而减少了热力NO<sub>x</sub>的生成。

和前面的低NO<sub>x</sub>燃烧器类似,分级的程度是受到稳定燃烧所需最低空气量限制的。分级程度过高就会引起燃烧热损失增加、结渣腐蚀严重等问题。燃尽风技术是一种发展成熟的NO<sub>x</sub>控制技术,能达到30%左右的脱硝效果。它未来的发展方向是强化OFA与炉膛烟气的混合程度,达到更深层次的空气分级,同时延长缺氧燃烧的时间。

## (3) 再燃和高级再燃技术, FR (Fuel Reburning) and AR (Advanced Reburning)

再燃技术又叫三级燃烧技术。它的原理是,首先将80%~85%的燃料送入第一级燃烧区,在过量空气系数 $\alpha > 1$ 的条件下正常燃烧并生成NO<sub>x</sub>,称为主燃区。然后将剩余的15%~20%的燃料在主燃烧器的上部送入二级燃烧区,在 $\alpha < 1$ 的条件下形成很强的还原性气氛,使得在主燃区生成的NO<sub>x</sub>被还原成氮分子(N<sub>2</sub>),称为再燃区。在再燃区中不仅已生成的NO<sub>x</sub>得到还原,同时还抑制了再燃燃料中NO<sub>x</sub>的生成,使NO<sub>x</sub>的排放浓度大幅度降低。最后,燃烧产物进入燃尽区,与燃尽风OFA混合,达到最终完全燃烧<sup>[24-27]</sup>。实现再燃的方法有两种:  
a) 沿炉膛布置三段燃烧方式,实现炉内脱硝; b) 在燃烧器内设计三段燃烧方式,实现燃烧器内再燃脱硝。再燃过程中最重要的反应是CH<sub>4</sub>、CO、H<sub>2</sub>等还原性气体将NO还原成HCN的反应,其它的反应与燃料氮转化过程中的还原机理相似。BILBAO和Kristensen认为在再燃区内NO<sub>x</sub>主要被转化成其它氮物质(主要是HCN、NH<sub>3</sub>)。这些氮物质可以把NO还原成N<sub>2</sub>,也可以被氧化成NO,因此,燃尽区燃烧组织的好坏与否是决定再燃脱硝效果的关键因素。Kristensen提出使用多级OFA,充分利用HCN、NH<sub>3</sub>对NO的还原作用。

所谓先进再燃烧(Advanced Reburning) 技术是指再燃烧技术与 N 催化剂射入技术相结合,是一种更有效的 NO<sub>x</sub> 控制技术。这种技术是将氨水或尿素作为 N 催化剂加入到再燃烧区或燃尽区,进一步降低 NO<sub>x</sub> ;同时,如果将无机盐(尤其是碱金属) 助催化剂通过不同方式一并加入,将更有利于 NO<sub>x</sub> 的还原。先进再燃烧技术可降低 NO<sub>x</sub> 85 %以上,具有非常好的技术优势。

#### (4) 烟气再循环技术, FGR (Fuel-Gas Recirculation)

烟气再循环技术是目前应用比较多的技术<sup>[28~30]</sup>。它是在锅炉的空气预热器前抽取一部分低温烟气直接送入炉内,或与一次风或二次风混合后送入炉内,这样不但可降低燃烧温度,而且也降低了氧气浓度,进而降低了 NO<sub>x</sub> 的排放浓度。从空气预热器前抽取温度较低的烟气,通过再循环风机将抽取的烟气送入空气烟气混合器,和空气混合后一起送入炉内。

烟气再循环法降低 NO<sub>x</sub> 排放的效果与燃料品种和烟气再循环有关。经验表明,烟气再循环率为 15~20%时,煤粉炉的 NO<sub>x</sub> 排放浓度可降低 25%左右。NO<sub>x</sub> 的降低率随着烟气再循环率的增加而增加。而且与燃料种类和燃烧温度有关。燃烧温度越高,烟气再循环率对 NO<sub>x</sub> 降低率的影响越大。

烟气再循环法可在一台锅炉上单独使用,也可和其它低 NO<sub>x</sub> 燃烧技术配合使用,用来降低主燃烧器空气的浓度,也可用来输送二次燃料。电站锅炉和烟气再循环率一般控制在 10~20%。当采用更高的烟气再循环率时,燃烧会不稳定,未完全燃烧热损失会增加。另外采用烟气再循环时需加装再循环风机、烟道,还需要场地,增大了投资,系统复杂。

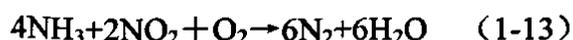
### 3. 燃烧后控制技术

燃烧后控制技术分成干法和湿法两种<sup>[28~30]</sup>。湿法脱硝主要是利用各种氧化剂,将 NO<sub>x</sub> 中占主要的不溶于水的 NO 转化成可溶的 NO<sub>2</sub>, 然后进一步使用溶液洗涤的方法进行脱除。碱性溶液和 NO<sub>2</sub> 反应生成硝酸盐和亚硝酸盐,和 N<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 反应生成亚硝酸盐。碱液吸收法的优点是能将 NO<sub>x</sub> 回收利用,具有一定的经济效益,工艺流程和设备也比较简单。干法主要包括 SCR 技术, SNCR 技术等。

考虑到技术可靠性、初投资成本、运行费用、脱硝效率等因素,目前被大规模工业应用的是干法的 SCR 技术和 SNCR 技术。下面主要介绍 SCR 技术和 SNCR 技术的发展和现状。

#### (1) 选择性催化还原技术, SCR (Selective Catalytic Reduction)

SCR 技术是还原剂(NH<sub>3</sub>、尿素)在催化剂作用下,选择性地与 NO<sub>x</sub> 反应生成 N<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O,而不是被 O<sub>2</sub> 所氧化,故称为“选择性催化还原”<sup>[31]</sup>。主要的反应式如下:



SCR 技术是利用  $\text{NH}_3$  与  $\text{NO}$  反应在一个狭窄的温度范围内的选择性, 在催化氧化剂表面将富氧烟气中的  $\text{NO}$  还原成  $\text{N}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ 。SCR 系统包括催化剂反应室、氨储运系统、氨喷射系统及相关的测试控制系统。

SCR 系统中的一个重要组成部分是催化剂, 当前流行的成熟催化剂有蜂窝式、波纹状和平板式几种形式。由于不同的催化剂的作用温度不一样, 目前使用最广泛的温度范围为  $350\sim 400^\circ\text{C}$ , 最新的 SCR 工业催化剂为  $\text{TiO}_2$  为载体的  $\text{V}_2\text{O}_5/\text{WO}_3$  及  $\text{MnO}_3$  等金属化合物。

SCR 系统的核心装置是 SCR 反应器, 有水平和垂直气流两种布置方式。根据反应器在烟气流程中的位置, 又可以分为高温高灰布置、高温低灰布置、低温低灰布置三种。高温高灰布置的反应器位于省煤器后空预器前, 催化剂需要承受高浓度飞灰的碰撞、磨损; 高温低灰布置则需要在催化塔之前布置高温静电除尘器 ESP, 位置与高温高灰布置大致相同; 低温低灰则是布置在湿法脱硫 (FGD) 工艺之后的低温环境里, 由于烟气温度低于催化条件下  $\text{NH}_3$  和  $\text{NO}$  反应的合适温度, 需要加装加热器, 造成经济性降低。目前以高温高灰的反应器布置形式应用最为广泛<sup>[31-33]</sup>。

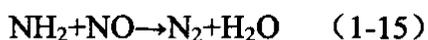
在众多的脱硝技术中, SCR 技术是脱硝效率最高, 发展也最为成熟的一种脱硝技术。1975 年在日本 Shimoneski 电厂建立了第一个 SCR 系统的示范工程, 其后 SCR 技术在日本得到了广泛应用, 大约有 170 套装置, 接近 100GW 容量的电厂安装了这种设备。在欧洲已有 120 多台大型装置的成功应用经验, 其  $\text{NO}_x$  的脱除率可达到 80~90%。美国政府也将 SCR 技术作为主要的电厂控制  $\text{NO}_x$  技术。

SCR 技术由于催化剂的作用使部分  $\text{SO}_2$  氧化成  $\text{SO}_3$ , 因此燃烧高硫煤时引起的硫酸氢氨和硫酸氨玷污腐蚀和堵塞情况比较严重。另外烟气中的碱金属和重金属 (如钾, 钠, 氧化砷等) 会使催化剂中毒失活, 加速催化剂更换的速度, 增加运行费用。不过总的来说, SCR 技术是一种十分有发展前景的脱硝技术。

## (2) 选择性非催化还原技术, SNCR (Selective Non-Catalytic Reduction)

SNCR 是一种发展成熟的  $\text{NO}_x$  控制技术。1974 年在日本首次投入商业应用, 到目前为止, 全世界大约有 300 套 SNCR 装置应用于电站锅炉、工业锅炉、市政垃圾焚烧炉和其它燃烧装置。它的原理是在  $900\sim 1200^\circ\text{C}$  下, 将含有氨基的氮还原剂 (一般是氨或者尿素水溶液) 喷入烟气中, 还原剂快速热解成  $\text{NH}_3$  并和烟气中的  $\text{NO}$  进行还原反应, 把  $\text{NO}_x$  还原, 生成氮气和水<sup>[7,34]</sup>。

目前的趋势是用尿素 ( $(\text{NH}_4)_2\text{CO}$ ) 溶液作为还原剂, 主要的反应式为:



实验表明，当温度超过 1093℃ 时，NH<sub>3</sub> 会被氧化成 NO，反而造成 NO<sub>x</sub> 排放浓度增大，其反应式为：



而当温度低于 927 °C 时，反应不完全使得氨逃逸率高，造成新的污染。可见温度过高或过低都不利于对污染物排放的控制。

典型的 SNCR 系统工艺布置图如图 (1-2) 所示。它由还原储槽、多层还原剂喷入装置和与之相匹配的控制仪表等部分组成。SNCR 系统烟气脱硝过程是由下面四个基本过程完成：接收和储存还原剂；还原剂的计量输出、与水混合稀释；在锅炉合适位置注入稀释后的还原剂；还原剂与烟气混合进行脱硝反应。

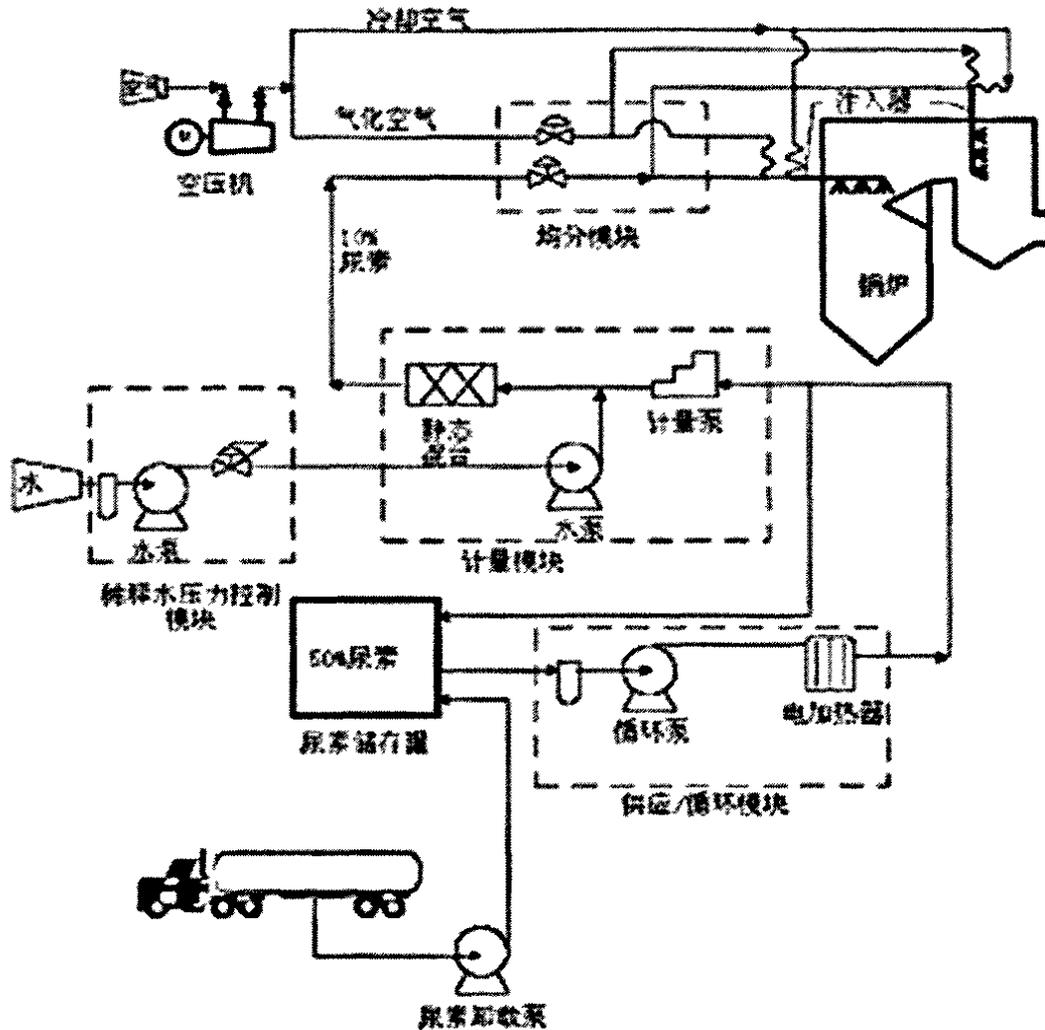


图 1-2 SNCR 系统工艺布置图

和 SCR 技术相比，SNCR 技术的主要特点有如下几点：

- 1) SNCR 利用炉内的高温驱动氨与 NO 的选择性还原反应，因此不需要昂贵的催化剂和体积庞大的反应器。
- 2) SNCR 相对于低 NO<sub>x</sub> 燃烧器和 SCR 来说，初投资低，停工安装期短，脱硝效率中等。
- 3) 参加反应的还原剂除了可以使用氨溶液以外，还可以用尿素溶液。而 SCR 烟气温度比较低，尿素溶液必须制成氨溶液以后才能喷入烟气中。

- 4) 脱硝还原反应要求的温度比 SCR 高, 比如脱硝剂为氨时, 反应温度窗为 870~1100°C。当烟气温度大于 1050°C 时, 氨就会开始被氧化成 NO<sub>x</sub>, 到 1100°C, 氧化速度会明显加快。这样一方面降低了脱硝效率, 另外一方面也增加了还原剂的用量和成本。
- 5) 由于反应温度窗的原因, 反应时间以及喷氨点的设置以及切换受锅炉炉膛和受热面布置的限制。
- 6) 为了满足反应时温度在温度窗的范围内, 对喷氨的控制要求很高。喷氨的控制成了 SNCR 的技术关键, 同时也成了限制 SNCR 系统脱硝效率和稳定运行的最大障碍。
- 7) 氨氮摩尔比 (NSR) 是获得高的脱硝效率、低的漏氨和稳定的性能的重要因素。首先, SNCR 还原反应的氨氮摩尔比不象 SCR 一样固定为 1: 1, 随着反应条件的变化, 这个比例是一个变化的值。然后, 在 SNCR 的喷氨区, NO<sub>x</sub> 的分布的均匀性很差, 而且没有使 NO<sub>x</sub> 分布变得均匀的混合手段, 因此要获得接近最佳氨氮摩尔比几乎是不可能的。SNCR 的漏氨率一般控制在 5~10ppm, 而 SCR 控制在 2~5ppm。
- 8) SNCR 脱硝效率较一般为 30~50%, 对于大型电站锅炉, 脱硝效率一般低于 40%。相比之下, SCR 技术的脱硝率比较稳定, 这是跟锅炉尾部低温区的烟气温度稳定、湍流波动小等特点分不开的。SCR 的脱硝效率在技术上几乎没有上限, 只是从性价比上考虑, 国外一般性能保证值为 90%。
- 9) SCR 在催化剂的作用下, 部分 SO<sub>2</sub> 会转化成 SO<sub>3</sub>, SCR 的催化剂会造成较大的压力损失, SNCR 则不会有这些问题。

总的来说, SNCR 的优点是投资省、可以直接使用尿素, 不存在 SCR 技术中 SO<sub>2</sub> 转化成 SO<sub>3</sub> 的问题, 缺点是脱硝效率较低、运行的可靠性和稳定性不够好。从目前投运的 SNCR 系统运行业绩来看, 电站大型机组如果脱硝效率要求在 25%~40%, 那么采用 SNCR 技术是比较合适的; 小型机组如果在配合 LNB、OFA 技术的情况下, 总的脱硝效率可达 80%左右。

另外还有一种将 SNCR 技术和 SCR 技术结合起来的技术, 叫 SNCR/SCR 混合脱硝技术。它将 SNCR 技术的还原剂溶液喷入炉膛技术和 SCR 技术利用逃逸氨进行催化反应的技术结合起来脱除 NO<sub>x</sub>。它将 SNCR 技术的低费用特点和 SCR 技术的高效率及氨逃逸率低等特点有效结合起来, 因此更有优势<sup>[35]</sup>。SNCR/SCR 混合脱硝技术于 20 世纪 70 年代首次在日本的一座燃油装置上进行试验, 试验结果表明了该技术的可行性。理论上, SNCR 技术在脱除部分 NO<sub>x</sub> 的同时也为后面的催化法脱硝提供充足的氨, 但是控制好氨的分布以适应 NO<sub>x</sub> 的分布的改变却是非常困难的。为了克服这一难点, 需要在 SCR 反应器中安装一个辅助氨喷射系统, 从而准确地试验和调节辅助氨喷射, 改善氨在反应器中的分布。

表(1-1)为几种 NO<sub>x</sub> 燃烧控制技术的简单比较。

表 1-1 几种 NO<sub>x</sub> 燃烧控制技术简单比较

技术名称	脱硝效率 (%)	工程成本	运行费用
LNB 技术	25~40	较低	低
SNCR 技术	30~60	低	中等
LNB + SNCR 技术	40~70	中等	中等
SCR 技术	70~90	高	中等
SNCR/SCR 混合技术	40~80	中等	中等

## § 1.2 喷嘴常用的性能指标

### (1) 流量特性

喷嘴的流量特性是指喷嘴的质量流量(或体积流量)随着液体压力变化而变化的规律,  $Q_v(Q_{mf})=F(\Delta P_f)$ 。对于气力雾化喷嘴来说,它还包括气相的流量和压力。它决定了气液质量比,也就是喷嘴的气耗率 AWR(气体和液体质量流量之比),进而影响喷嘴的雾化质量。

对于 Y 型喷嘴来说,液体质量流量公式如式(1-18)所示<sup>[36]</sup>:

$$Q_y = 3600 \mu F_2 \sqrt{2 \rho_0 \Delta P} \quad (1-18)$$

其中,  $Q_y$  为液体质量流量,单位是 kg/h;

$F_2$  为液体通道的横截面积,单位是  $m^2$ ;

$\Delta P = P_y - \beta P_q$ , 为喷嘴液体通道入口处和混合点(气液相遇开始混合的点)的压差,  $P_y$  为喷嘴入口液压,  $P_q$  为喷嘴入口气压,  $P_h$  为混合点压力,  $P_h = \beta P_q$ ;

$\mu$  为喷嘴的流量系数,一般喷嘴设计时取 0.7;

$\beta$  为比例系数,为  $P_h/P_q$ 。一般设计喷嘴时推荐值为 0.94。

对于 Y 型喷嘴来说,气体质量流量公式如式(1-19)所示<sup>[36]</sup>:

$$Q_q = 3600 \mu F_2 \varphi \sqrt{P_a / v_a} \quad (1-19)$$

其中,  $Q_q$  为气体质量流量,单位为 kg/h;

$\varphi$  为系数,对于过热蒸汽,  $\varphi=2.09$ ; 对于饱和蒸汽,  $\varphi=1.99$ ; 对于压缩空气,  $\varphi=2.14$ ;

$P_a$  为喷嘴入口处雾化介质的绝对压力,单位为  $kgf/m^2$ ,也就是  $mmH_2O$ ;

$v_a$  为喷嘴入口处雾化介质的比容,单位为  $kg/m^3$ ;

$\mu$  为喷嘴的流量系数,一般喷嘴设计时取 0.45~0.7。

喷嘴设计时一般先确定好液流量和气耗率,再计算气流量,再最终确定喷嘴的尺寸。后面设计扇形气力雾化喷嘴时,就借鉴了 Y 型喷嘴液流量公式。

## (2) 雾化角和射程

喷雾雾化角是表征喷雾扩张程度的一个量，它直接影响到喷雾在整个空间的分布特性<sup>[37,38]</sup>。雾化角有两种定义的方法：一种是将喷嘴出口中心点到喷雾炬外包络线的两条切线之间的夹角定义为出口雾化角 $\alpha$ 。出口雾化角的大小与理论计算值比较接近，由于喷雾炬在离喷口后会有一定程度的收缩，。另一种工程上常用的表示法是以喷口为中心，在距喷嘴端面 $L$ 处与喷雾曲面的交点连线的夹角 $\alpha'$ ，称为条件雾化角，条件雾化角随 $L$ 的取值不同而不同。一般 $L$ 的取值在20mm以上，对于小流量喷嘴 $L=40\sim 80\text{mm}$ ；而对于大流量的喷嘴 $L=100\sim 250\text{mm}$ 为宜。可参照图（1-3）。

一般条件雾化角小于出口雾化角，两者有时会相差 $20^\circ$ 以上。条件雾化角随所用的距离而变，它便于测量，能更真实的反映喷雾的运动趋势，因此，实验时常常采用，雾化角 $\alpha$ 的大小影响喷雾与燃烧空气的混合，燃烧的质量等等。

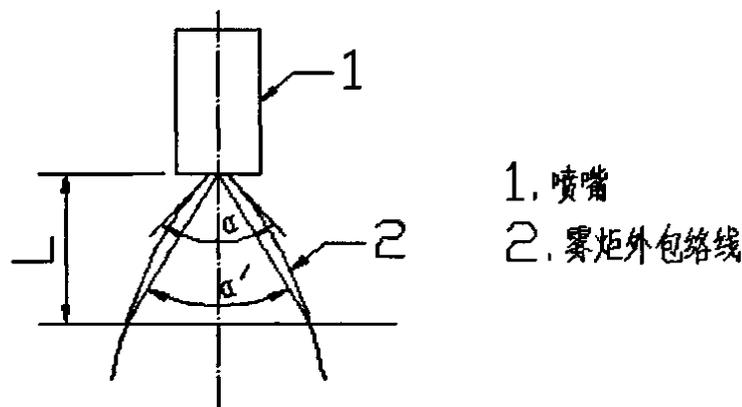


图 1-3 雾化角定义的示意图

雾炬射程是指雾化颗粒所能到达的距出口最远的距离，一般将速度衰减到出口速度的95%左右的距离作为喷雾射流的射程，从定义可以看出射程主要决定于喷雾的速度。

## (3) 雾化粒径及其分布

液态工质从喷嘴喷射出来以后，会形成尺寸差别不一的喷雾液滴群，因此液滴的平均雾化粒径是雾化质量的主要指标。对于同样的喷雾，如果采用不同的直径平均方法和不同的取样方法，所得到的平均直径是不同的。国内常用的喷雾取样方法有两种：一种是沿喷雾的横截面取样，计算平均直径；另一种是在喷雾最密集的地方取样，计算平均直径。常见的直接平均方法有表面平均直径和质量中间直径两种<sup>[36-38]</sup>。

本文中用的雾化粒径是指索特尔平均粒径，Sauter Mean Diameter (SMD)。索特尔平均粒径是按照平均直径 $D_s$ 计算的假想液滴群的总体积和总表面积的比例恰好和实际液滴群的总体积与总表面积的比例相等来确定的，因此它属于表面平均直径。

用公式 (1-20), (1-21) 表示如下<sup>[37]</sup>:

$$\frac{\frac{1}{6}\pi N_s d_s^3}{\pi N_s d_s^2} = \frac{\frac{1}{6}\pi \sum (N_i d_i^3)}{\pi \sum (N_i d_i^2)} \quad (1-20)$$

$$SMD = d_{32} = d_s = \frac{\sum (N_i d_i^3)}{\sum (N_i d_i^2)} \quad (1-21)$$

其中,  $N_i$  表示实际直径为  $d_i$  的液滴数;

$N_s$  表示假想液滴都为平均直径  $d_s$  时的液滴数。

质量中间直径 (MMD) 是大于小于这个直径的雾滴的质量各占一半。它可以从雾滴尺寸的罗辛—拉姆勒分布曲线上查取。SMD 比 MMD 能反映真实的液滴群的雾化情况, 因此在液态工质雾化中广泛应用。

雾化粒径的分布是影响雾化质量的另一个重要指标, 它包括雾化粒径均匀度和雾化粒径在空间上的分布。雾化粒径的均匀度是指某个测量点的不同尺寸的液滴的百分比分布。而雾化粒径在空间上的分布是指不同空间测量点上平均雾化粒径 (比如 SMD) 的分布。

### § 1.3 国内外液体雾化喷嘴

喷嘴是液体燃料燃烧中不可缺少的一个关键组成部分, 在 SNCR 系统中喷嘴喷射系统也是非常重要的一个环节。喷嘴是实现燃油等液态工质雾化最简单的装置, 喷嘴的基本功能是把燃油雾化成微小的液滴, 并且使液滴按要求分布在一定雾化角度的横截面上; 喷嘴的另一功能就是计量燃料, 只要在喷嘴前维持一个固定压力, 相应喷嘴就会有一个固定的燃油喷射量。目前普遍应用的喷嘴主要有以下几种类型: 机械式喷嘴, 气力式喷嘴, 旋转式喷嘴等。

#### § 1.3.1 国外液体雾化喷嘴

美国专利号 3743606 (1973 年发布) 也公布了一种三通道外混式气力雾化喷嘴, 如图 (1-4) 所示<sup>[39]</sup>。燃料为油 (或其他液态碳氢化合物), 由中间出口喷出, 内环通氧气 (或富氧空气), 外环通水蒸气。喷嘴端部周围有环形冷却通道, 用以冷却喷嘴。冷却面 36 为外凸形, 这样可以适应高压环境。喷嘴出口油速 10~50, 氧气速度 200~600, 水蒸气的速度为 100~300, 单位均为 feet/s。氧气和油之间的高速差, 可以使油得到良好的雾化, 并且混合。外环水蒸气的速度比较低, 这样在出口四周高温气体的回流漩涡减少, 从而保护了喷嘴外部受高温气体

冲刷造成的物理化学损伤。此外，在氧气周围的水蒸气层，使氧气和气化产物气体不会立即发生放热反应，从而保护了喷嘴。

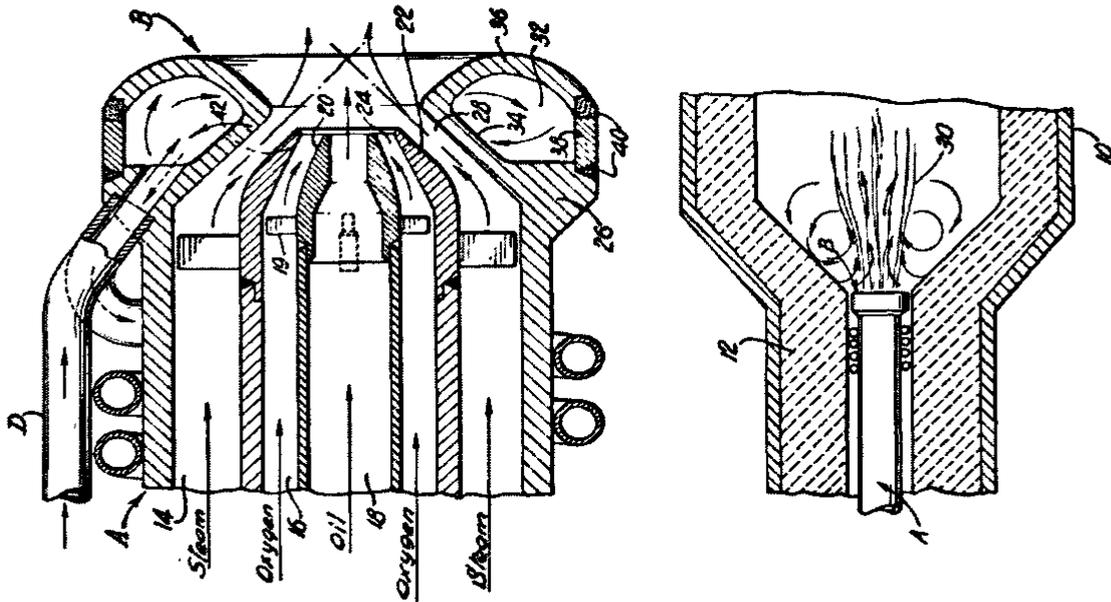


图 1-4 美国专利号 3743606 中的喷嘴示意图

美国专利号 4139157 (1979 年发布) 公布了一种双通道气力雾化喷嘴，如图 (1-5) 所示<sup>[40]</sup>，左边的是喷嘴的纵截面图，右边是喷嘴横截面图。该喷嘴应用在燃汽轮机中燃料的雾化以及和空气的混合燃烧过程。燃气轮机燃烧效果不佳一直是个问题，开发能在较大燃料流量的范围内都能将其雾化成小液滴的喷嘴非常有必要。通常的做法是采用压力式旋流喷嘴来雾化燃料。当燃料以很高的压力通入到旋流室，形成自由涡流，最后通过喷嘴出口形成圆锥形喷雾。但压力式旋流喷嘴适用的流量范围比较窄，而这个喷嘴却有适应大范围的流量变化的特点。

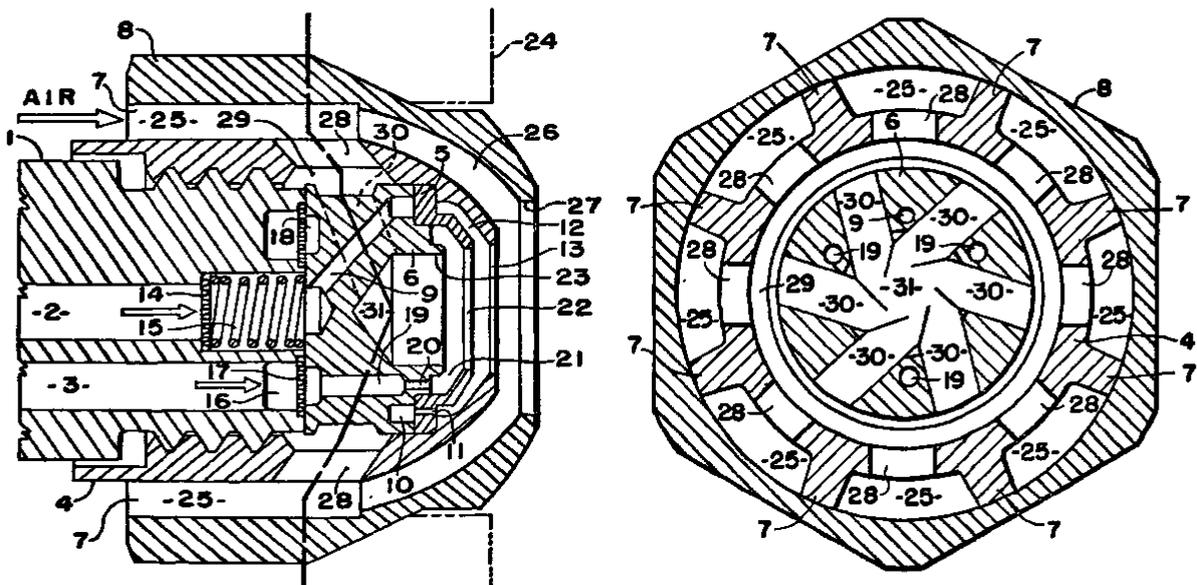


图 1-5 美国专利号 4139157 中的喷嘴示意图

如图(1-5)所示,该喷嘴的燃料通道包括一个主通道和一个辅助通道。主通道呈很细的圆柱形或者圆锥形,燃料通入后被高速高压的空气雾化。辅助通道也是圆柱形或者圆锥形,不过更粗一些,辅助通道在雾化空气作用之后才和主通道一起工作。燃料供给系统有阀门使燃料首先供给给主通道,当工况条件增加时,辅助通道开启,使得两个通道都能达到合适的流量。

燃料进入主通道(2)后,经过一个过滤屏(14)(通过弹簧(15)定位),进入斜通道(9),再进入环形通道(10),最终流入到旋流室(12),通过部件(4)和部件(5)产生自由涡流。再通过喷嘴出口(13)喷射形成圆锥形的喷雾。辅助通道燃料通过通道(3)进入,再进入环形通道(16),过滤屏(17),随后进入二级环形通道(19),通过三个旋流孔进入旋流室(21),通过部件(5)和部件(6)形成自由涡流,再由喷口(22)喷出与主通道的燃料流混合,最终形成单一的喷雾由喷口(13)喷出。由于该喷嘴有独立的主通道,因而能改善低流量下的喷嘴雾化效果;辅助通道启用后,能在所有工况下保证喷雾的形状和燃料的不间断的流动。

美国专利 6786430 B2 (2004 年发布) 发布了一种利用空气旋流的液体雾化喷嘴,如图(1-6)所示<sup>[41]</sup>。上图是喷嘴截面图,左下是 B1-B1 截面图,右下是 C1-C1 截面图。如图液体经过通道(14)进入环形通道(7),气体通过通道(10)进入环形通道(7),由于通道(14)、(10)和轴向有一定的角度且相互交错,因而在环形通道中形成旋流,气体作用在液体上面,使得液体分布到圆柱体(2)的内壁,进一步使得圆周方向的液膜厚度变得一致。当液膜从圆柱体边缘飞出后,液膜被撕碎,进一步被雾化成小液滴。

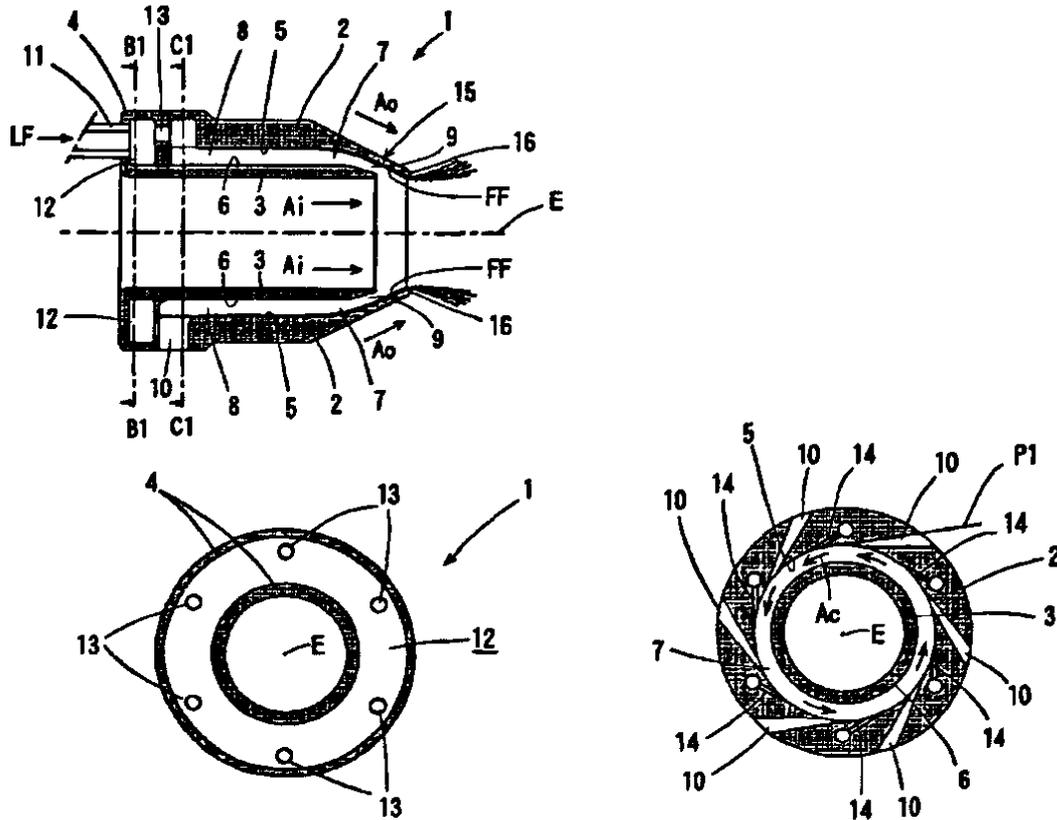


图 1-6 美国专利号 6786430 B2 中的喷嘴示意图

尽管有时候液体注入时的方向有偏差，该喷嘴仍然能够在内壁的圆周方向形成液膜。和传统的通过螺旋通道来产生旋流的气力雾化喷嘴相比，它可以通过调节气相的旋流度来改善液膜厚度的一致性，从而在边缘(16)的圆周方向能形成均匀的液体喷雾。

当液体雾化后再作为液体燃料通入到反应器里，比如燃烧室内。由于液滴变得更细，燃烧室内的燃烧温度分布偏差就会变小，避免出现局部高温。因此燃烧引起的有害物质增加和不完全燃烧等问题都可以得到很好的解决。另外也没必要减少喷嘴出口的喷射面积，因此可应用到重油由于温度升高容易引起固体沉积物沉积问题的场合。

### § 1.3.2 国内液体雾化喷嘴

专利号 92230052.6(1993 年，西安交通大学)公布的一种带有离心旋流器的雾化喷嘴，如图(1-7)所示<sup>[42]</sup>。它包括一进水管及与之配合的旋芯和挡板，旋芯上对称地布置有两个以上的离心旋流器。液体从进水管(1)、进水通道(6)沿切线方向进入离心旋流槽(7)，同时进行机械雾化，这就是喷嘴内的一次旋流作用；各自的雾化流经喇叭型通道(8)射出喷嘴后，以同一旋转方向在喷嘴外旋转，并相互作用，形成喷嘴外的二次旋流作用，使喷雾雾流成实心锥体，利用喷嘴内、外两次旋流的作用使液体雾化并在压差减小到 0.3-0.6Mpa 范围内，并使雾化锥体成实心，雾化流呈随机飘动状态，从而形成较高质量的喷雾状态。

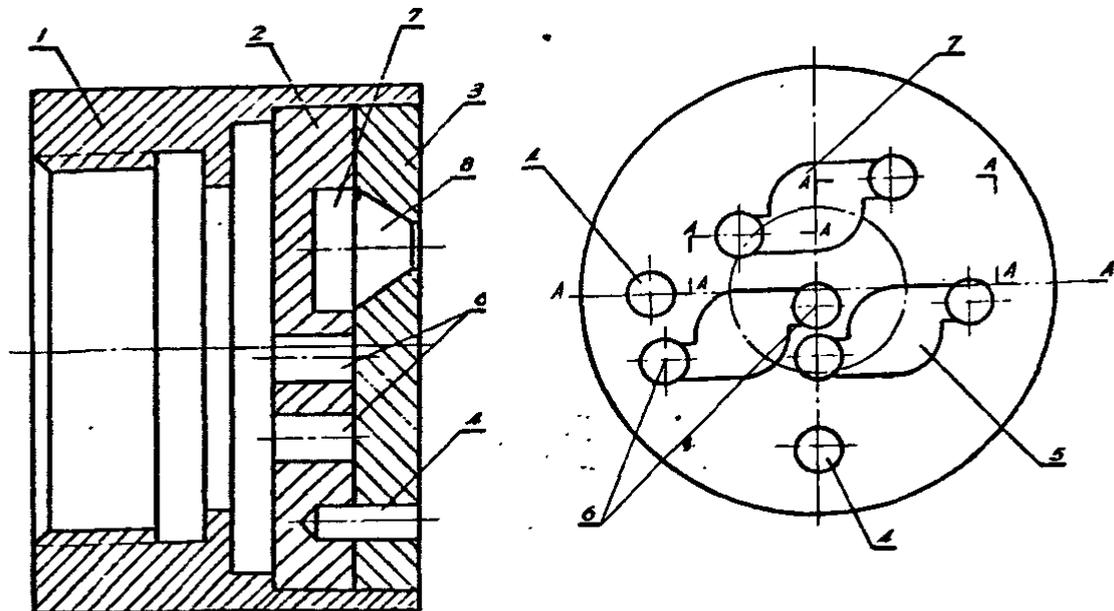


图 1-7 国内专利号 92230052.6 中的喷嘴示意图

专利 95111750.5(1996 年，华东理工大学)公布的一种带有旋流器的三通道组合式水煤浆气化喷嘴如图(1-8)所示<sup>[43]</sup>。它主要由中心喷管、内环喷管、外环喷管，以及旋流器与冷却系统诸零部件组合安装而成。燃料由入口(8)进入内环通道(15)，然后通过环形喷头通道(31)增速后喷出；气化剂分别由入口管(7)进入外环通道(16)，经旋流器(19)后由外环喷头(27)喷出，由入口管(9)进入中

心通道(14)，经旋流器(18)后由中心喷头(27)喷出；气化剂与燃料在喷嘴的喷口(30)处进行强烈混合雾化，同时高温下进行部分燃烧气化反应。

喷嘴通过在气化剂的喷头内设置旋流器来提高气化剂的旋流速率，优化提高喷嘴的雾化角，从而提高喷嘴的混合雾化效果，提高碳的利用率（或转化率），和有效气（ $H_2 + CO$ ）的产率，同时设置旋流器后可有效地缩短燃烧火焰的长度，从而起到保护造气炉的耐火砖的作用，延长了炉子的寿命。此外，喷嘴出口端的设置有冷却系统，在喷嘴的端部外侧设置了冷却室，在外环喷管的外侧设置了冷却蛇管，冷却液由入口管导入冷却室，经蛇管后，由出口管排出。所说的中心喷管、外环喷管、内环导管、冷却室、冷却蛇管、旋流器，其材料为不锈钢或者 Incone 1600 耐高温材料，内环喷头为耐磨、耐蚀、耐温的金属材料或高温陶瓷材料。喷嘴的操作压力为 0.1MPa~1.2MPa，气化剂在喷嘴出口处的速度为 30~340 m/s，燃料在喷嘴出口处的速度为 0.1~1.0m/s，氧气与燃料中碳量之比为 0.6~1.6Nm<sup>3</sup>/kg，经过实际运行测试，该喷嘴的各项指标都优于当时的标准。

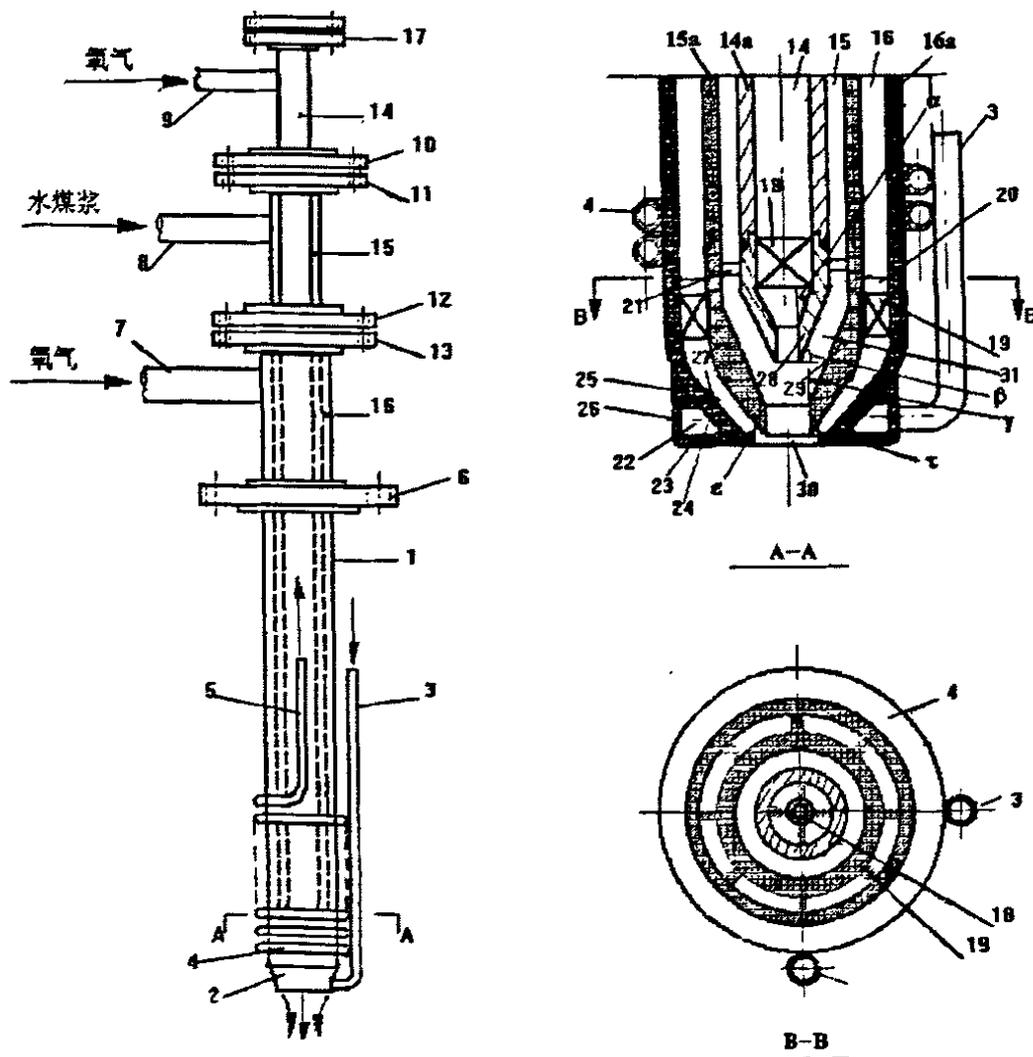


图 1-8 国内专利号 95111750.5 中的喷嘴示意图



专利号 200620022838 . 1(2007 年, 清华大学) 为一种新型的旋转型气-液雾化喷嘴, 如图 (1-10) 所示<sup>[45]</sup>。它包括油管(2), 设置在油管外部且与油管同心的气管(1), 设置在油管端部的旋片(5)和喷口(4)。喷口(4)与旋片(5)紧密配合, 通过锁紧螺母(3)固定。在所述的旋片的锥面上布置有切向进气槽(6) 和切向进油槽(7), 切向进气槽和切向进油槽的个数分别至少为 2 个, 优选为 3 个; 旋片的端面锥角  $\alpha$  为  $90-130^\circ$ , 优选为  $120^\circ$ , 并且该角度与喷口(4)的内锥角  $\beta$  互相配合。切向进气槽(6)、切向进油槽(7)的形状可以是方形、半圆形或三角形, 不影响雾化质量; 前端锥角  $\theta$  和端面锥角  $\alpha$  可以相等或不等, 对雾化影响不大。旋片(5)的端面锥角  $\alpha$  要与喷口 4 的内锥角  $\beta$  相一致, 保证端面配合严密, 使油和气完全从各自的槽道切向进入混合腔, 从不同槽道流出的油、气互相撞击, 经过混合后, 从喷嘴喷口(9) 喷出。

与一般的 Y 型喷嘴相比, 增加了几股两相流之间的相互作用, 充分利用每个槽道中流出的高速气流的动能, 撞击未被雾化的大油滴, 将每股油流中未充分雾化的大油滴继续雾化, 达到更好的雾化效果。

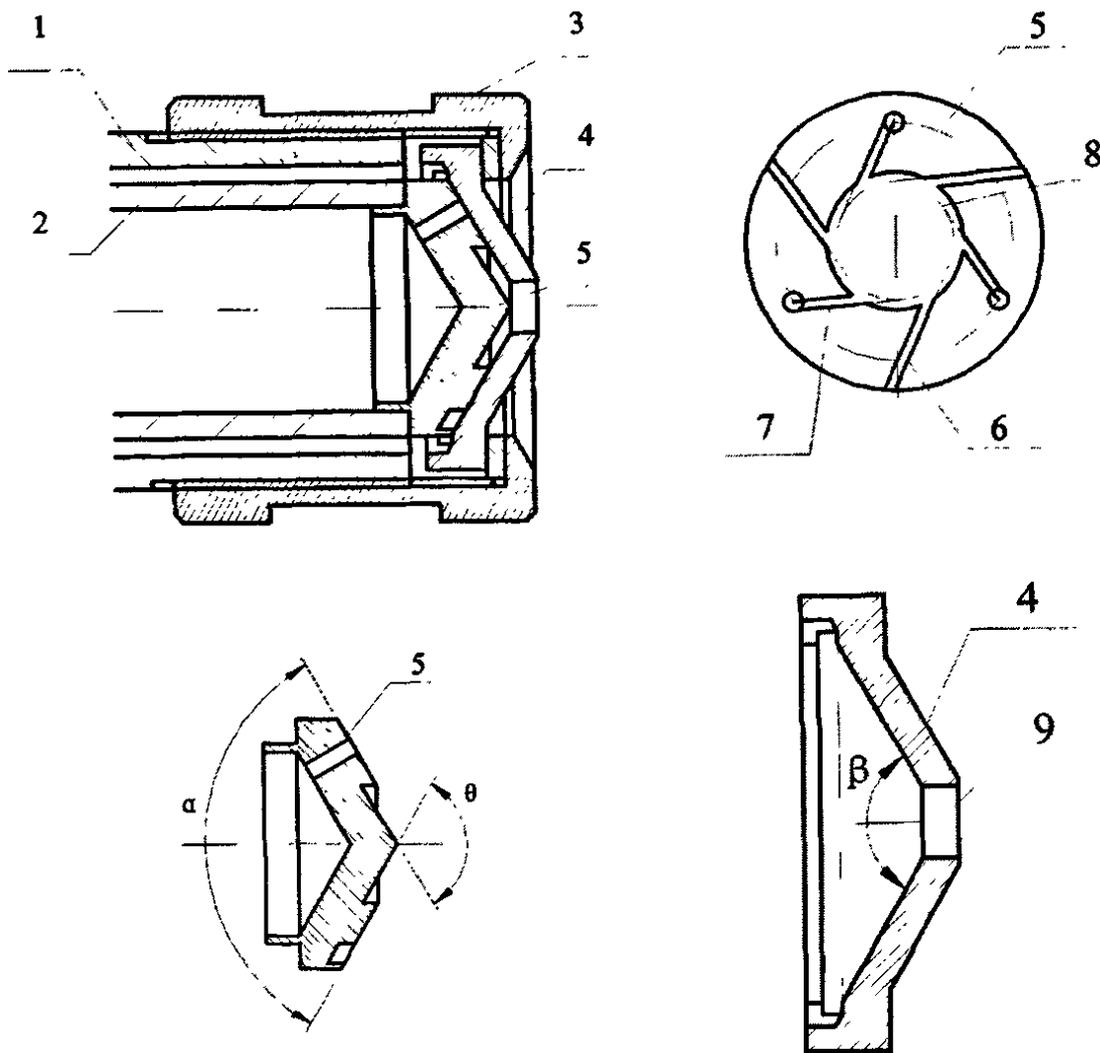


图 1-10 国内专利号 200620022838 . 1 中的喷嘴示意图

专利号 200610104706.8 (2007 年, 西安交通大学) 公布了一种交错喷雾式液体雾化喷嘴, 如图 (1-11) 所示<sup>[46]</sup>。主要包括以下几个部分: 外壳(1), 旋芯(2), 挡板(3), 圆形旋转圈(4), 进液槽(5), 进液孔(6), 圆锥旋转圈(7), 出液孔(8)。1 个圆锥旋转圈和 1 个出液孔组成 1 个挡板雾化单元。1 个圆形旋转圈、2 个进液槽和 2 个进液孔组成 1 个旋芯雾化单元。它克服了常规的旋转式机械雾化喷嘴具有的液滴的空间分布形状为空心锥形体, 锥体中间没有液滴存在的弊端, 提供一种交错喷雾式液体雾化的方式, 该方式使得液滴在空间分布为多个相互交错的锥形表面体, 能充满整个喷雾空间。

可以通过增减挡板雾化单元数量和旋芯雾化单元的方式, 在液体进出交错喷雾式液体雾化喷嘴压力差不变的情况下增减交错喷雾式液体雾化喷嘴的流量。根据雾化液体的化学、物理、力学性质来确定交错喷雾式液体雾化喷嘴的材料, 因此可以不限限制交错喷雾式液体雾化喷嘴所用的材料法, 外壳(1)、旋芯(2) 和挡板(3)之间连接方式不受限制, 因此设计十分简单方便。

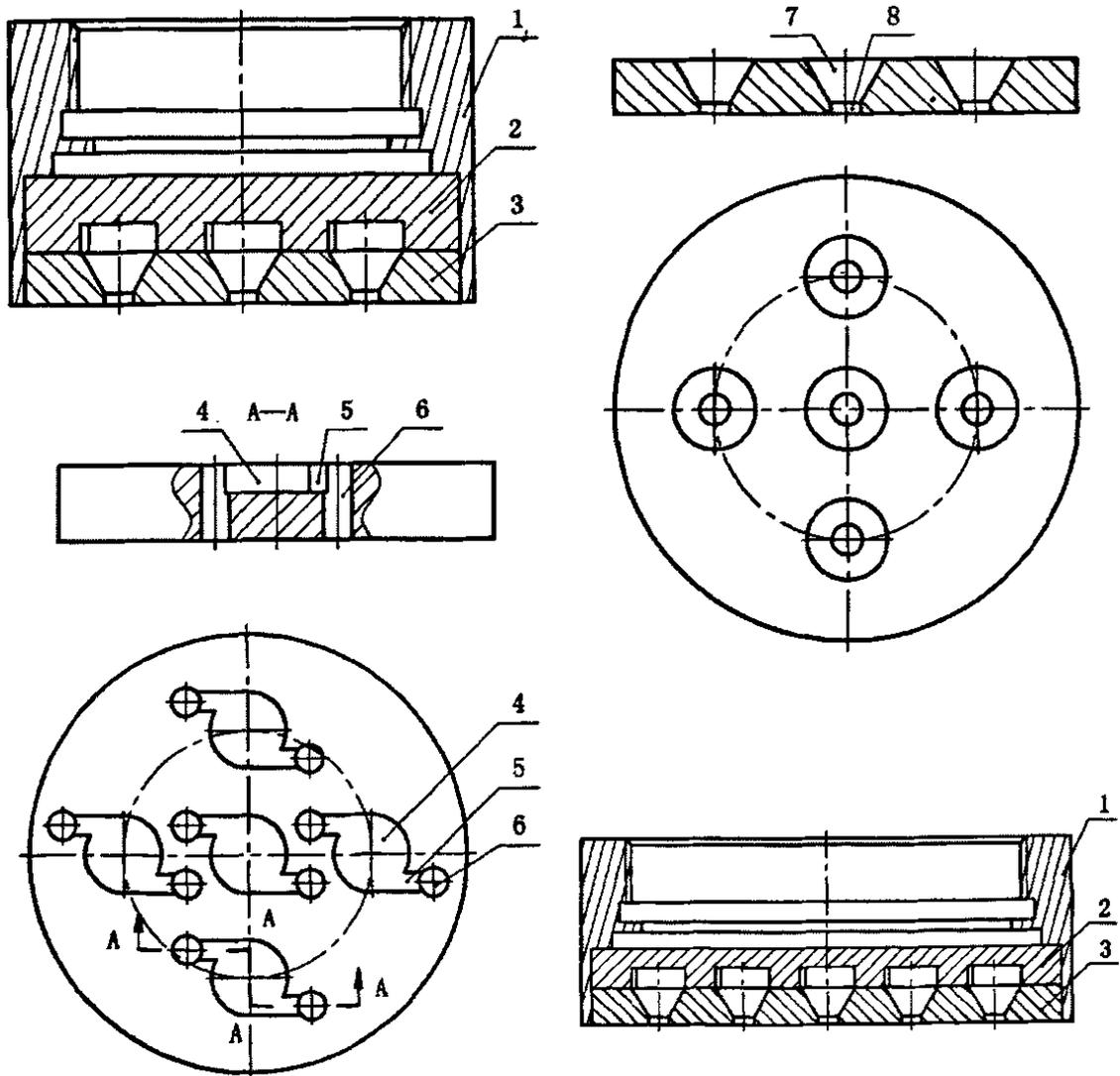


图 1-11 国内专利号 200610104706.8 中的喷嘴示意图

2007年西安交通大学还公布了专利号为200610104673.7的一种依靠压力将液体雾化的中心雾多层旋转式液体雾化喷嘴,如图(1-12)所示<sup>[47]</sup>。它由外壳(1),圆周旋转器(2),圆锥旋转器(3),螺旋间隔壳(4),螺旋液槽(5),出液槽(6),旋转加速器(7),出液孔(8),圆形旋转圈(9),进液槽(10)等部分组成。在圆锥旋转器和螺旋间隔壳的外表面有螺旋线状的螺旋液槽。

它的工作原理是:液体流入外壳(1),经进液槽(10)沿着圆形旋转圈(9)的圆周切线方向进入圆形旋转圈(9)内后,在圆形旋转圈(9)中产生圆周性流动。圆周性流动的液体进入圆锥旋转器(3)内部后,受旋转加速器(7)的作用,液体的旋转程度加剧,当液体从出液孔(8)流出后便被雾化成液滴。另一部分液体流入外壳(1)后进入螺旋液槽(5),因螺旋液槽(5)呈螺旋形状,故液体在离开螺旋液槽(5)时为旋转的液膜或液柱,旋转的液膜或液柱受到扰动后破裂形成液滴。

从圆锥旋转器(3)喷出液滴和从各个螺旋液槽(5)喷出液滴在空间均呈空心锥形体分布,但这些锥形体同轴、锥形体顶角不同,这样使得中心喷雾多层旋转式液体雾化喷嘴喷出液滴在空间分布为多层的锥形体。圆锥旋转器(3)在中心喷雾多层旋转式液体雾化喷嘴轴线部位喷出液滴,消除了常规多层螺旋线式液体雾化喷嘴轴线部位雾化液滴少的不良现象。圆锥旋转器(3)与螺旋液槽(5)两者喷雾的共同作用产生了液滴充满喷雾空间的效果。

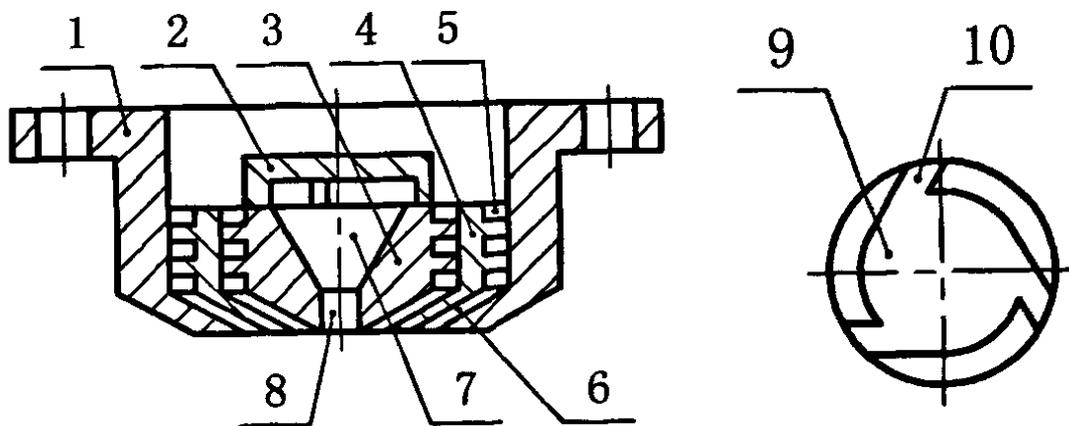


图 1-12 国内专利号 200610104673.7 中的喷嘴示意图

## § 1.4 本文研究的主要内容及意义

煤、石油等化石燃料的燃烧均会产生  $\text{NO}_x$  的排放,但是以煤燃烧产生的污染最为严重。中国以煤为主的能源结构近期内不会改变,因此控制燃煤引起的  $\text{NO}_x$  污染成为我国能源和环境保护部门的紧迫任务。 $\text{NO}_x$  控制技术中的 SNCR 技术是国外已经投入商业运行的比较成熟的烟气脱硝技术。SNCR 系统中一个非常关键的装置就是喷射还原剂溶液的喷嘴,它直接影响 SNCR 脱硝的效果。

从 SNCR 系统的要求和喷嘴相关文献得知, 比较理想的 SNCR 喷嘴应该具有以下特点: a) 喷嘴形式采用气力雾化; b) 喷射速度要高, 一般要达到 50m/s 以上比较好; c) 雾化粒度在 50~300 $\mu\text{m}$  之间, 分布要比较均匀; d) 根据炉膛的结构尺寸可知, 喷射距离也不能大小, 5m 以上为佳。

喷嘴实验内容包括喷嘴在不同气液压力下喷嘴的流量、压力、雾化角和索特尔平均粒径以及粒径在空间上的横向和纵向分布等性能参数。具体的技术路线可归纳为以下几个方面: a) 研究液压和气压对液流量和气流量的影响; b) 研究定气耗率下各参数的变化规律; c) 研究气耗率对喷雾 SMD 的影响; d) 研究气耗率对喷雾雾化角  $\alpha$  的影响; e) 研究气耗率对喷雾射程的影响; f) 研究典型工况下 SMD 的空间分布; g) 比较不同尺寸和结构喷嘴的雾化性能, 筛选出效果较好的喷嘴, 进一步对结构改进、重新实验。

最开始设计了机械式和气力式雾化喷嘴, 实验研究发现气力雾化喷嘴性能更好, 于是决定选用气力雾化喷嘴。于是在 Y 型喷嘴的基础上设计了新型的扇形气力雾化喷嘴, 包括方形槽、橄榄型、混合孔等几类类型。实验研究发现橄榄型和混合孔型喷嘴的雾化性能比较突出, 于是对这两种喷嘴做了进一步详细的实验研究。

实验发现扇形气力雾化喷嘴在压力比较高时, 气耗率还是比较小, 使得雾化粒径偏大。因此考虑在扇形气力雾化喷嘴的基础上加上外混通道, 设计了部分内混式喷嘴。由于增加的外混通道使得气耗率变大, 外混的气流也会将液流进一步雾化, 因此雾化粒径更小。通过前面喷嘴的研究和比较, 设计出一种综合了以上喷嘴优点的结构也比较简单的喷嘴, 并应用在实际的工程项目里。

由于实验台设备条件的限制, 无法测量喷嘴的喷射速度, 对整个喷雾的流场缺乏认识。因此尝试用 Fluent 软件尝试对喷嘴雾化过程进行数值模拟。首先建立和实验喷嘴尺寸和结构都相近的网格模型, 设定好边界条件与初始条件, 采用 VOF 多相流模型进行数值计算, 这对之前的喷嘴实验研究是一个很好的补充。

## § 1.5 本章小结

本章首先介绍了  $\text{NO}_x$  的生成机理和它的危害以及低  $\text{NO}_x$  技术的发展现状, 重点介绍了 SNCR 脱硝技术。接着介绍了 SNCR 系统中还原剂喷射装置—喷嘴的常用性能指标和参数, 还列举分析了国内外一些喷嘴的结构特点和雾化性能等等。这些为后面 SNCR 系统喷嘴的设计提供了基本的方向, 同时扩展了喷嘴设计的思路和方法。

## 第二章 实验仪器和实验系统

### § 2.1 冷态雾化实验系统

该冷态雾化实验台建成于 2005 年，冷态雾化实验台的组成如图 (2-1) 所示。它主要由空气压缩机、水泵、储水罐、节流阀门、玻璃转子流量计、压力表、喷枪、激光粒度测量系统等设备组成。实验系统用水作为被雾化介质，用压缩空气作为雾化介质。水和压缩空气的压力和流量采用旁路阀和调节阀来调节控制。考虑到管路中存在的压力损失，将压力表安装在喷枪入口处，测量喷枪入口前的水和压缩空气的压力。水和压缩空气的流量使用玻璃转子流量计测量。喷雾的雾化粒度用上海理工大学开发的 LS-2000 分体式激光喷雾粒度分析仪来测量，它能测量从 0.5~1000 $\mu\text{m}$  的颗粒粒径。

实验步骤大致是：实验开始时，分别通入压缩空气和水，控制调节阀和旁路阀让喷嘴达到预定的工况。水和压缩空气的压力和流量可以由压力表和流量计直接读得。喷雾雾化角采用数码相机拍照，再用软件进一步处理测得。喷枪能够上下左右沿着支架上的刻度自由移动，可准确调节激光测量光束和喷嘴出口之间的水平距离和垂直距离，因而能测量喷雾不同空间位置测点的雾化粒度，得到雾化粒度的空间横向和空间纵向分布。

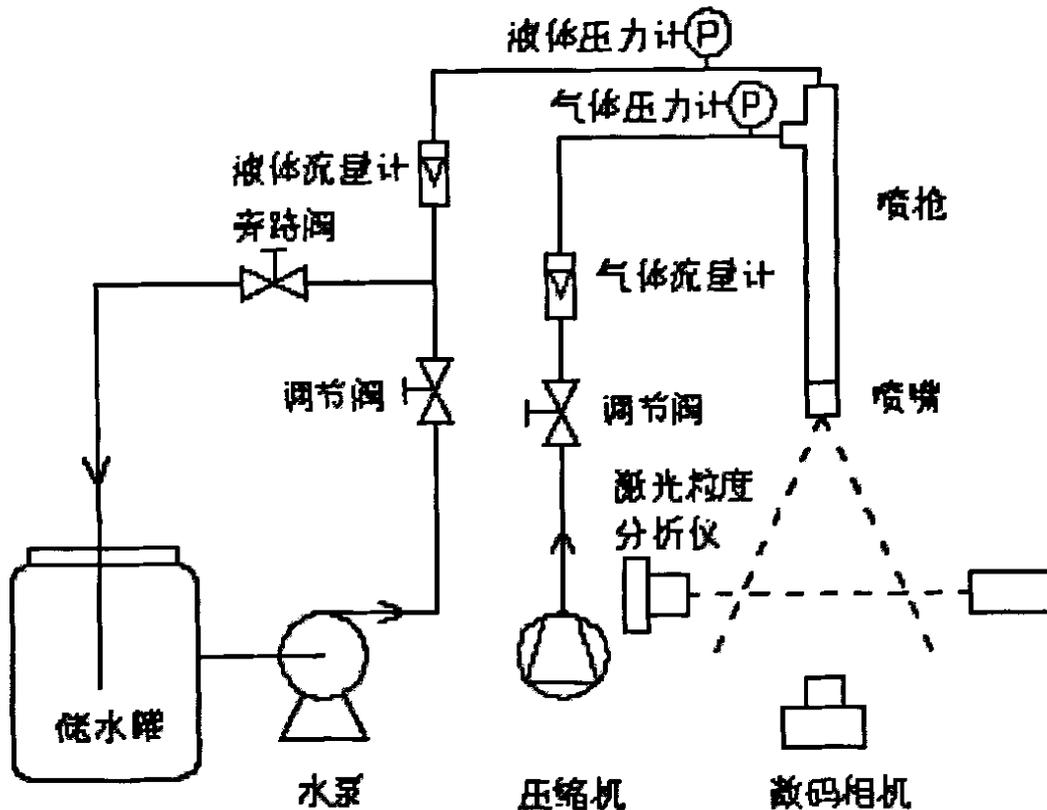


图 2-1 冷态雾化试验系统图

总体来说，该实验台有如下优点：

- 1) 整个雾化实验台比较小巧，各种实验操作简单。雾化室的高度只有 2 米左右，喷枪的安装，定位，拆卸都很方便，流量和压力的调节通过阀门调节，也很容易控制。
- 2) 整个系统的管路都采用专门的橡胶管和接头，密封性能十分优良，确保了实验数据及其分析的准确性。
- 3) 由于实验系统的气源和水源都比较稳定，因此流动也稳定没有大的扰动，流量、压力以及雾化粒径等都是在工况稳定后由仪器测量，因此测量准确误差小。
- 4) 由于雾化室的四周壁面是有机玻璃，完全透明，实验时能清楚观察喷雾的情况，并根据雾化情况做相应的操作。由于雾化室相对密封，因此不会对实验室造成雾滴大量溢出造成的环境污染。
- 5) 在已有雾化实验台的基础上，可以自由搭配各种测量仪器，进行各种相关实验，十分灵活。

## § 2.2 实验仪器

### § 2.2.1 流量计和压力表

实验过程中，必须通过流量计和压力表来了解当前气液流的流量和压力，从而调节流量和压力达到预定的工况。该实验台使用的流量计是 LZB 系列的玻璃转子流量计，液体流量计量程为 0~200 kg/h，精度为 1 kg/h。气体流量计的量程为 25 kg/m<sup>3</sup>，精度为 1kg/m<sup>3</sup>；压力表就是普通的机械式压力表，量程为 0~1.0MPa，精度为 0.1MPa。如图（2-2）所示<sup>[48]</sup>。



图 2-2 实验用的流量计和压力表

### § 2.2.2 LS-2000 分体式激光雾化液滴粒度分析仪

雾化液滴粒径的测量有光散射法，光衍射法，电学法等。本文实验使用

LS-2000 分体式激光雾化液滴粒度分析仪来测量雾化液滴的粒径。它是上海理工大学在颗粒测量技术研究及激光颗粒仪研制的基础上研制的一种新型激光雾化液滴粒度分析仪。LS-2000 分体式激光雾化液滴粒度分析仪由激光发射箱、激光接收箱、USB 信号电缆和计算机、操作软件等组成。由于采用 USB 接口，仪器所需计算机可以采用任何有 USB 的计算机，如台式计算机、笔记本电脑、移动 PC 等，大大方便了用户使用。

LS-2000 分体式激光雾化液滴粒度分析仪的主要性能参数如下：

- 1) 粒度测量范围：0.5~1000 微米（单一量程）
- 2) 测量区长度： <1 米
- 3) 测量时间： <1 秒
- 4) 重现性： <5%
- 5) 测量精度： <10%（国家标准颗粒检验）
- 6) 数据输出： 包括体积、数量微分分布和累积分布表和图；多种统计平均直径；操作者姓名、单位、样品名、选用折射率、测量时间等相关信息；有连续测量功能；
- 7) 电源： 100 伏—240 伏，50 赫兹，10VA
- 8) 环境温度： 5—30 °C
- 9) 外形尺寸： 激光发射箱：350×250×130mm<sup>3</sup>；  
激光接收箱：1200×250×130mm<sup>3</sup>

LS-2000 分体式激光雾化液滴粒度分析仪基于激光颗粒前向散射原理，如图（2-3）中左图所示。当一束激光束照射到被测液滴时，受液滴的散射作用，激光会向四面八方散射，其中大部分散射光能量处于前向方向。散射光能的分布与被测液滴的大小有关，采用专门设计的扇形多元光电探测器测出前向散射光能的分布，根据光散射理论及反演算法对测得的散射光能分布数据进行处理，就可以得到被测液滴的粒度分布。右图是 LS-2000 分体式激光雾化液滴粒度分析仪的实物图。

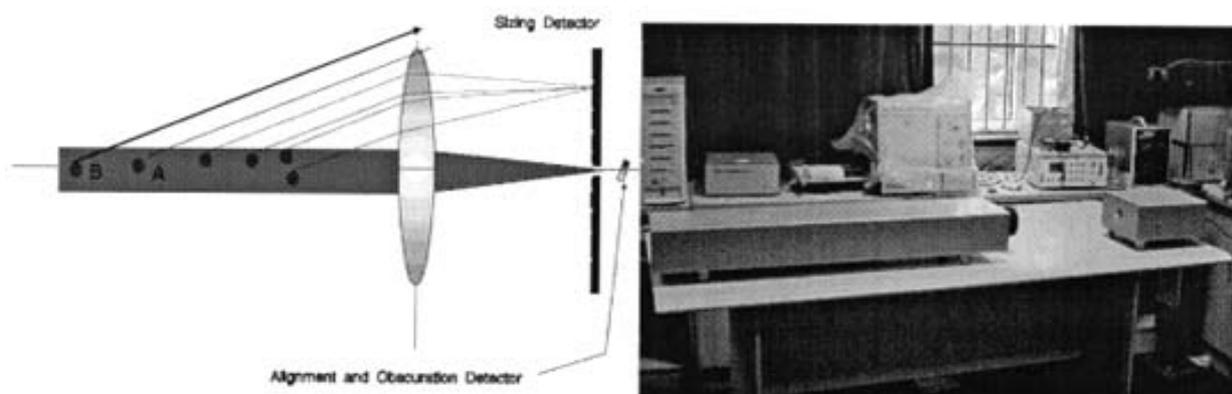


图 2-3 粒度仪的原理图和实物图

使用 LS-2000 进行雾化粒度的测量时,最关键的一步就是调节好测量的背景光。通过接收箱里的微调按钮可以调节,要尽量调节到软件背景光的柱状图中红色柱达到最高,而其它的蓝色柱尽量的保持一致的高度,见图(2-4)。但这是一个理想的状况,实际操作中由于各种因素的影响,往往不可能达到这个精度,但应该尽量靠近这个状态,否则会影响测量的准确性。

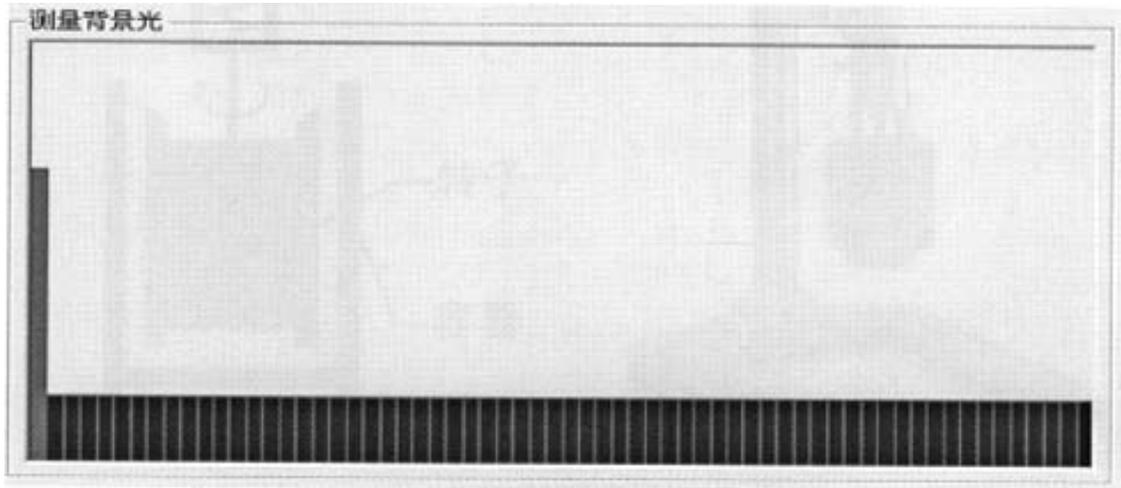


图 2-4 理想的测量背景光分布图

### § 2.2.3 HAAKE 旋转粘度计

本文实验采用 Thermo 公司生产的 HAAKE Viscometer VT550 旋转粘度计来测量溶液的粘度,如图(2-5)所示。它包括支架, HAAKE Viscotester, 电源, 温度控制装置, 温度传感器, 转子, 圆筒容器等几部分。其中转子根据测量溶液所在粘度范围有 NV, MV, SV 几种类型可选。本文尿素溶液粘度的测量,使用 MV1 转子比较合适。

HAAKE Viscometer VT550 粘度计的主要参数如下:

- 1) 测量范围 ( $\eta$ ):  $2.8 \sim 1.78 \times 10^7$  mPa·s;
- 2) 剪切应力 ( $\tau$ ): 27.67~21970 Pa;
- 3) 剪切速率 ( $D_s$ ):  $1.23 \sim 996$  s<sup>-1</sup>;
- 4) 转速 (rad): 5.6~360 r/min;
- 5) 温度范围 (T): -10~150 °C;
- 6) 重现性:  $\pm 1\%$  (F·S)

HAAKE Viscometer VT550 的工作原理是:如图(2-5)左图所示。用一个步进电机作为驱动,采用同轴圆筒上旋式结构的工作原理,外筒固定、内筒旋转,被测物料充满在两个圆筒之间。当电机带动内筒旋转时,内筒表面受到被测物料的作用,而内筒又与电机的转子同时旋转,转子也受到了同样的力矩;此力矩传到可动框架并使其偏转,当偏转到某一角度时测量弹簧的力矩和这力矩相等时达到平衡,此时的偏角由刻度盘读出,刻度盘的读数与粘度成正比。不过粘度计有配套的软件自动读取,不用手工操作。

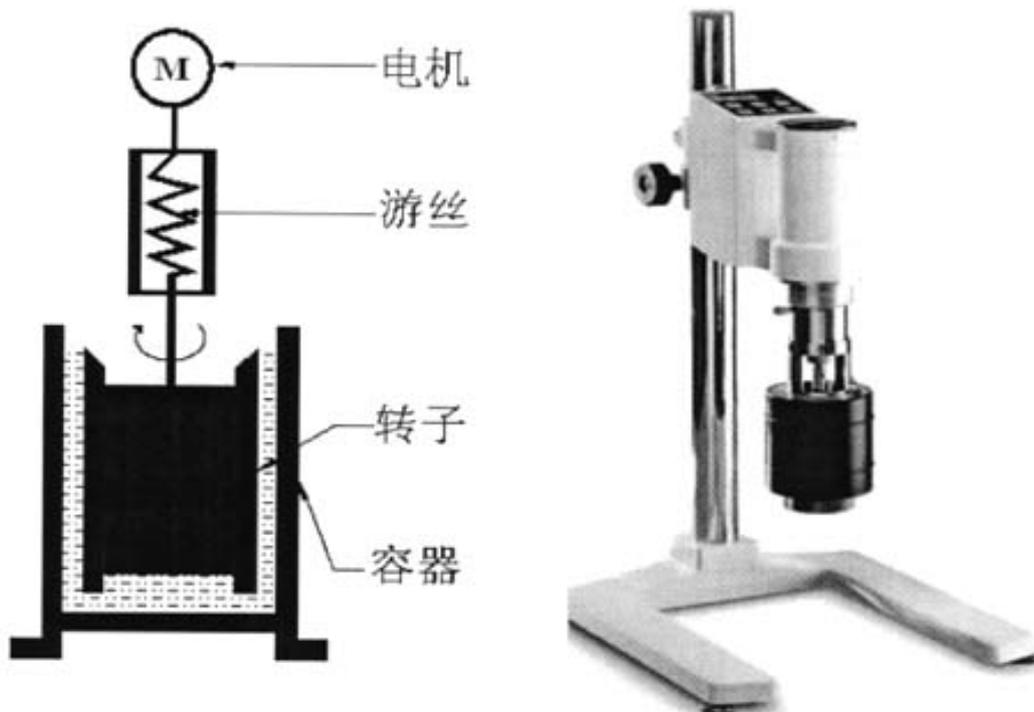


图 2-5 粘度计原理图和实物图

HAAKE Viscometer VT550 可以测量牛顿流体和非牛顿流体的流变特性，同时绘制出流体的流动曲线、粘温曲线、时间曲线、触变曲线等，其特殊的 CD（控制形变）控制模式，可以准确测量屈服应力、粘度等，并可通过其控制及分析软件包对所测数据进行分析。

HAAKE 旋转粘度计的力矩传感器是一种内藏式结构，仪器的测控部分与主机为一体，扭矩的测量采用非接触式电感偏移转换器，有各种不同几何结构的探测系统，可根据不同条件选择不同的转子。同时本机附有带制冷的控温水浴，其温度精确可到 $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ 。

### § 2.3 尿素溶液粘度实验

本文研究 SNCR 喷嘴，实验应当用尿素水溶液和压缩空气作为液相和气相工质。但用尿素水溶液做实验一方面会增加实验的成本，另一方面做过的尿素水溶液不妥善处理，会造成一定的环境污染。因此本文实验考虑用水来代替尿素水溶液，这样既能节约实验成本，又不会破坏环境。下面的尿素溶液粘度实验证明这种方法是可行的<sup>[49]</sup>。

由于喷雾实验更多关注的是雾化效果，因此对尿素水溶液的化学性质不做过多考虑，下面主要是比较水和尿素溶液物理性质是否相近，比如粘度，密度等。

尿素是白色结晶颗粒，分子式是  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ，具有很强的吸湿性。密度为  $1.335\text{g}/\text{cm}^3$ ，熔点为  $135^{\circ}\text{C}$ ，易溶于水和液氨。

尿素水溶液常压下溶解度随温度变化，如表（2-1）所示。

表 2-1 常压不同温度下尿素水溶液的溶解度 (g/L)

温度, °C	0	10	20	30
溶解度, g/L	680	850	1060	1330

由此可以算出 0°C, 10°C, 20°C, 30°C 下尿素饱和溶液的质量分数  $\omega$  分别为 40%, 46%, 51%, 57%。

1. 尿素水溶液的密度

(1) 不同质量分数下尿素水溶液的密度

由相关文献查得在常压, 温度 24°C 下不同质量分数 ( $\omega$ ) 尿素水溶液的密度 ( $\rho$ ) 值, 如图 (2-6) 所示。

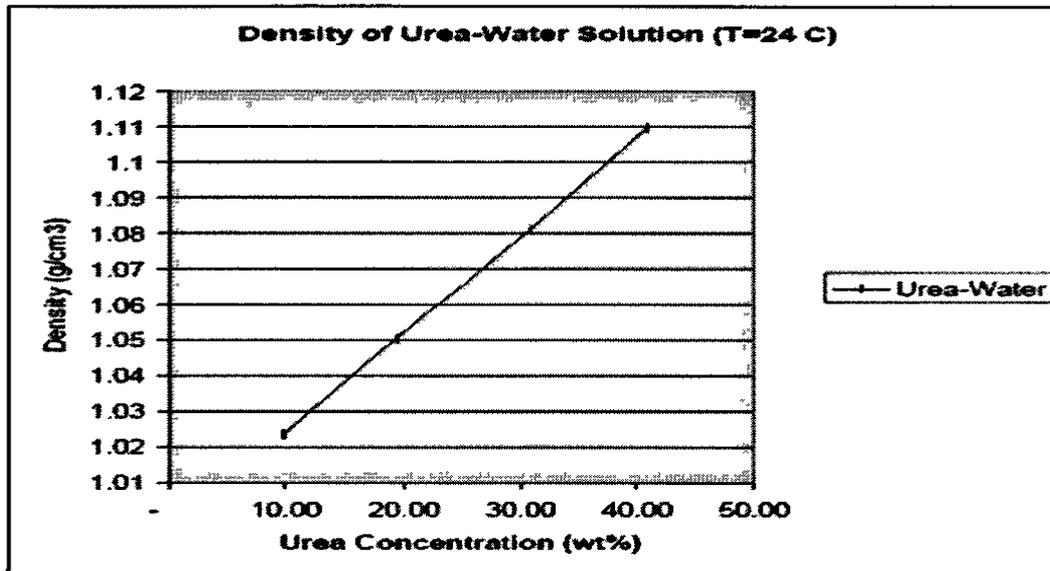


图 2-6 不同  $\omega$  的尿素水溶液  $\rho$  的变化

(2) 不同温度下尿素水溶液的密度

另外文献查得了不同温度 (T) 下饱和的尿素水溶液的比重 (SG) 值。比重 (SG) 和密度 ( $\rho$ ) 值在数值上是相等的, 如表 (2-2) 所示。

表 2-2 不同温度下饱和尿素水溶液的比重值

溶液质量分数, %	饱和温度, °F	比重, 1
30	13	1.094
32.5	11.3	1.101
35	19	1.109
40	33	1.121
45	47	1.133
50	62	1.145
55	78	1.155
60	96	1.164
65	115	1.172
70	135	1.182

## 2. 尿素水溶液的粘度

尿素水溶液的粘度用 HAAKE Viscometer VT550 旋转式粘度计来测量。实验主要测量了不同质量分数 ( $\omega$ )、不同转速( $\gamma$ )、不同温度 (T)下尿素水溶液的粘度(用  $\eta$  表示, 单位是  $\text{mPa}\cdot\text{S}$ )。本次实验共配制了 10%,20%,30%,40%四种不同质量分数的溶液, 温度 T 变化从 20~60°C。

### (1) 温度 T 恒定时, 尿素水溶液粘度 $\eta$ 随 $\gamma$ 的变化

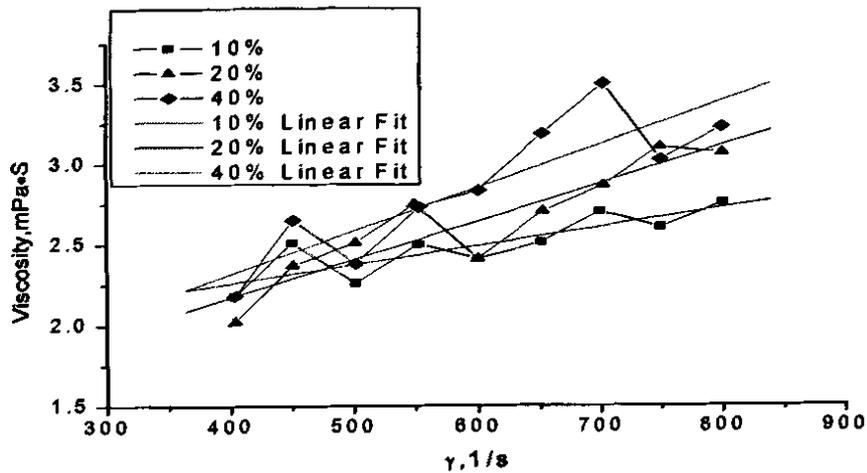


图 2-7 T=20°C 时尿素水溶液随  $\gamma$  变化的  $\eta$  变化

由图 (2-7) 可以看出, 尿素水溶液的粘度  $\eta$  很小, 只有 2~4  $\text{mPa}\cdot\text{S}$ 。随着  $\gamma$  的增加,  $\eta$  变大, 但增加的幅度不大, 大约为 1.5~2  $\text{mPa}\cdot\text{S}$  左右。另外可以看出  $\gamma$  相同时, 质量分数  $\omega$  大的溶液的粘度  $\eta$  也大一些。

### (2) 质量分数 $\omega$ 恒定时, 尿素水溶液粘度 $\eta$ 随 $\gamma$ 的变化

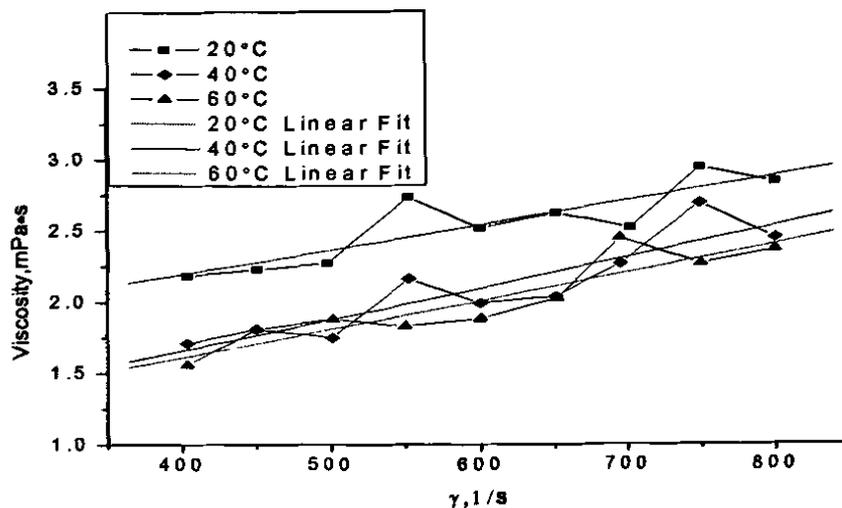


图 2-8  $\omega=20\%$ 时尿素水溶液  $\eta$  随  $\gamma$  的变化

从图(2-8)可以看出,在 $\omega$ 相同的情况下,同一温度下仍然是随着 $\gamma$ 的增加,粘度 $\eta$ 增加。而 $\gamma$ 相同时, $T$ 越高, $\eta$ 反而有所下降,不过下降的幅度很小。且 $\Delta T$ 相同时, $T$ 越高则 $\eta$ 下降的幅度越小。

### 3) 实验总结

总的来说,尿素水溶液的密度 $\rho$ 比水稍稍大一些,且随着质量分数 $\omega$ 的增加而增加,不过幅度很小。尿素水溶液的粘度 $\eta$ 也很小,只有 $1\sim 5\text{mPa}\cdot\text{S}$ ,和常温水的粘度 $1\text{mPa}\cdot\text{S}$ 相近。当转速 $\gamma$ 增加时,粘度 $\eta$ 增加,增加的幅度也很小。当温度 $T$ 增加时,粘度 $\eta$ 有所下降,下降的幅度也很有限。因此用水来代替尿素水溶液进行喷嘴雾化实验证明是可行的。

## § 2.4 本章小结

本章首先介绍了冷态雾化实验台的组成和喷嘴实验基本的操作步骤。接着介绍了喷嘴实验涉及到的LZB玻璃转子流量计和普通机械式压力表,介绍了它们的量程和精度。重点介绍了LS-2000分体式激光雾化液滴粒度分析仪和HAAKE旋转粘度计的测量原理和仪器操作方法以及要特别注意的地方。最后说明了实验系统用水代替尿素水溶液的原因,并通过尿素水溶液粘度实验说明两者的粘度和密度都十分相近,从而证明用水来代替尿素水溶液进行喷嘴雾化实验证明是可行的。

### 第三章 扇形雾化喷嘴开发及实验研究

液体雾化是农业生产、能源利用和环境工程等领域中一个普遍存在的过程，在干燥、粉末冶金、航空航天等领域都有广泛的应用。在过去的几十年里，人们对各种不同的液体雾化方法进行了广泛的实验与理论研究，并研制开发出各种不同结构和用途的喷嘴<sup>[50-60]</sup>。目前普遍应用的液体雾化喷嘴有机械式喷嘴、气力式喷嘴、旋转式喷嘴等几种。其中气力式雾化喷嘴由于结构简单、加工方便、气耗率低、雾化质量好等诸多优点，更是得到了广泛的应用。

液体雾化喷嘴是实现燃油等液态工质雾化最简单的装置，它的基本功能是把燃油雾化成微小的液滴，并且使液滴按要求分布在一定雾化角度的横截面上；液体雾化喷嘴的另一功能就是计量液流量，只要在喷嘴前维持一个固定压力，相应喷嘴就会有一个固定的液流喷射量。由于气液两相喷嘴的雾化机理十分复杂，还没有建立成熟的理论体系，影响喷嘴雾化效果的因素也很多，因而进行实验研究是十分必要且有效的一种手段。

对于实际应用的 SNCR 系统来说，SNCR 喷枪有两种常见的安装方式<sup>[61,62]</sup>，如图 (3-1) 所示：

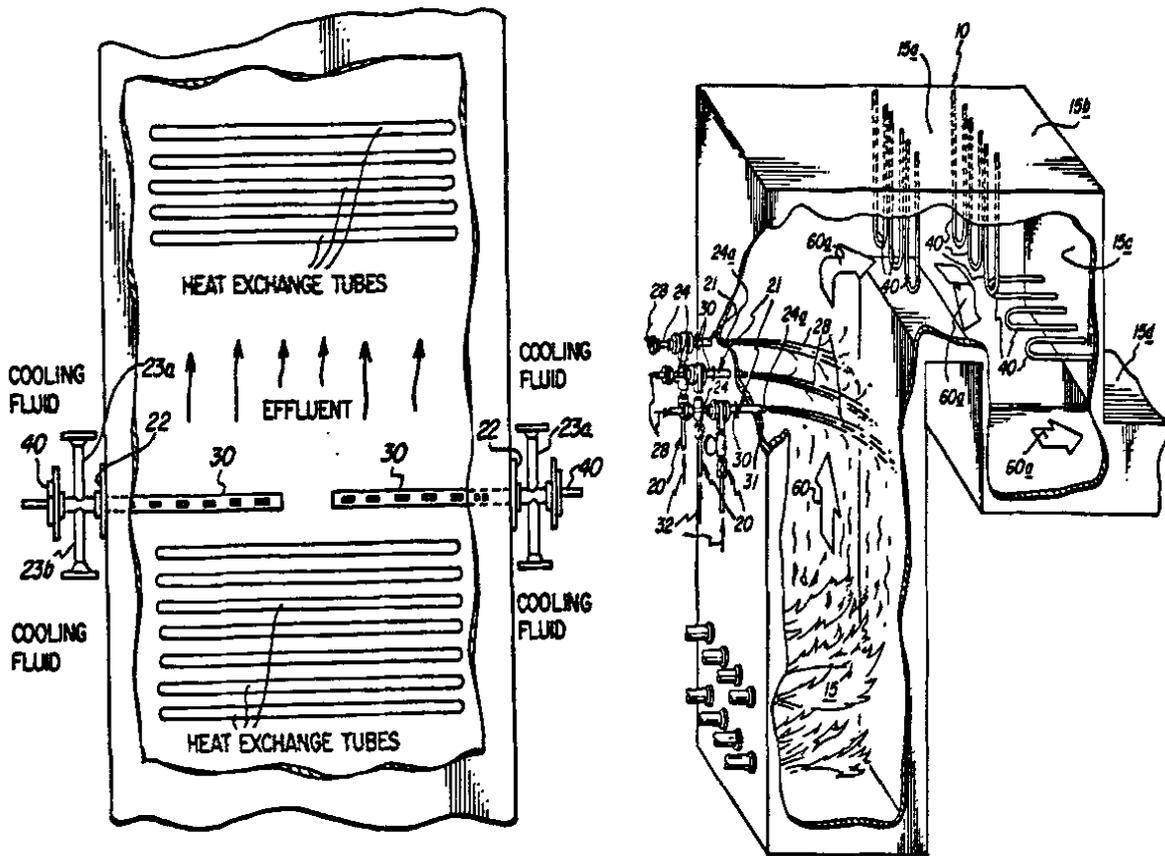


图 3-1 喷枪的两种安装方式示意图

- 1) 左图为长喷枪方式,长喷枪插入烟道,可以沿整个喷枪喷射还原剂。主要的优点:实现炉内多点喷射,单个雾炬只覆盖一个小范围,减少对壁面,受热面的影响。缺点是:长喷枪长期插入高温的锅炉内,会造成材料变形,喷枪弯曲而不能取出。其他腐蚀磨损情况也严重。
- 2) 右图为墙式喷嘴方式,布置在炉膛的壁面上,不伸入炉膛内部。它的优点是操作和维护方便,不容易损坏;缺点是喷雾液滴难以深入到炉膛内,尤其对于大容量锅炉来说这个问题更加严重。

对用于 SNCR 系统的喷嘴来说,有如下几个方面的要求:

- 1) 材料性能要求:抗高温冲击,抗热变形,耐磨耐腐,容易维护;
- 2) 雾化性能要求:雾化液滴能粗细结合,喷雾覆盖面要广,最好能均匀分布到整个炉膛截面;
- 3) 运行控制要求: a) 布置多层多点不同形式的喷嘴组合,根据工况变化选择不同的组合喷射方式,实现覆盖面积最大; b) 能灵活调整单个喷嘴的雾化粒度,改变液滴蒸发时间,以适应温度变化; c) 防堵塞,维护简便。

从已有的文献资料来看,SNCR 和喷嘴喷嘴应该满足如下特点:

- 1) 喷嘴雾化形式:气力雾化
- 2) 喷射速度高:一般要能达到 50m/s
- 3) 雾化粒度:在 50~200 $\mu\text{m}$  之间,分布要有粗有细。在不出现很多大颗粒的情况下,平均雾化粒度可以再大一点。
- 4) 墙式喷枪外径:30mm~60mm。
- 5) 喷枪壁厚:大于 2mm。

本文实验研究的目的是在对各种类型喷嘴结构及其雾化特性研究分析的基础上<sup>[63-68]</sup>,经过几个阶段的实验和改进,最终设计出适合 SNCR 系统中尿素水溶液雾化的喷嘴类型和结构,也就是既有较好的穿透深度,又有较好的雾化覆盖面积,当工况发生变化时,喷嘴的喷射距离、雾化角、雾化粒度等有一个稳定变化的过程,方便现场进行控制调节。

初步确定喷嘴的具体性能指标如下:

- 1) 流量范围:76kg/h (50~100kg/h);
- 2) 射程尽量大,穿透性能越好;
- 3) 雾化性能随流量变化不大;
- 4) 雾化粒度:20 $\mu\text{m}$ ~150 $\mu\text{m}$
- 5) 雾化角:20°~110°

通过上面的结论可以知道,气力雾化喷嘴应该比较符合要求。为了验证这个结论是否正确,首先实验研究比较传统的压力式雾化喷嘴和气力式雾化喷嘴的雾化性能,看看孰优孰劣。

### § 3.1 压力式和气力雾化喷嘴比较实验研究

实验第一阶段设计了两个喷嘴，一个是压力式喷嘴<sup>[66]</sup>，另一个是扇形气力雾化喷嘴。实验目的是得到两种结构形式的喷嘴的雾化特性哪个更好。喷嘴的主要结构参数包括：a) 气孔直径和气孔个数；b) 液孔孔径和液孔个数；c) 液孔与气孔中心线交角  $\alpha$ ；d) 出口窄缝深度、长度及宽度。通过两个喷嘴之间的对比可以得到哪种雾化方式有更好的雾化特性。

表 3-1 实验第一阶段喷嘴的结构参数表

喷嘴编号	液孔直径, mm 和个数	气孔直径, mm 和个数	夹角 $\alpha$ , °	窄缝宽度, mm	设计流量, kg/h
1-1#	1.4*1	1.4*2	45	0.7	60
1-2#	2.2*1	无	无	0.7	60

下面的图(3-2)是实验喷枪和这次实验喷嘴的结构示意图。

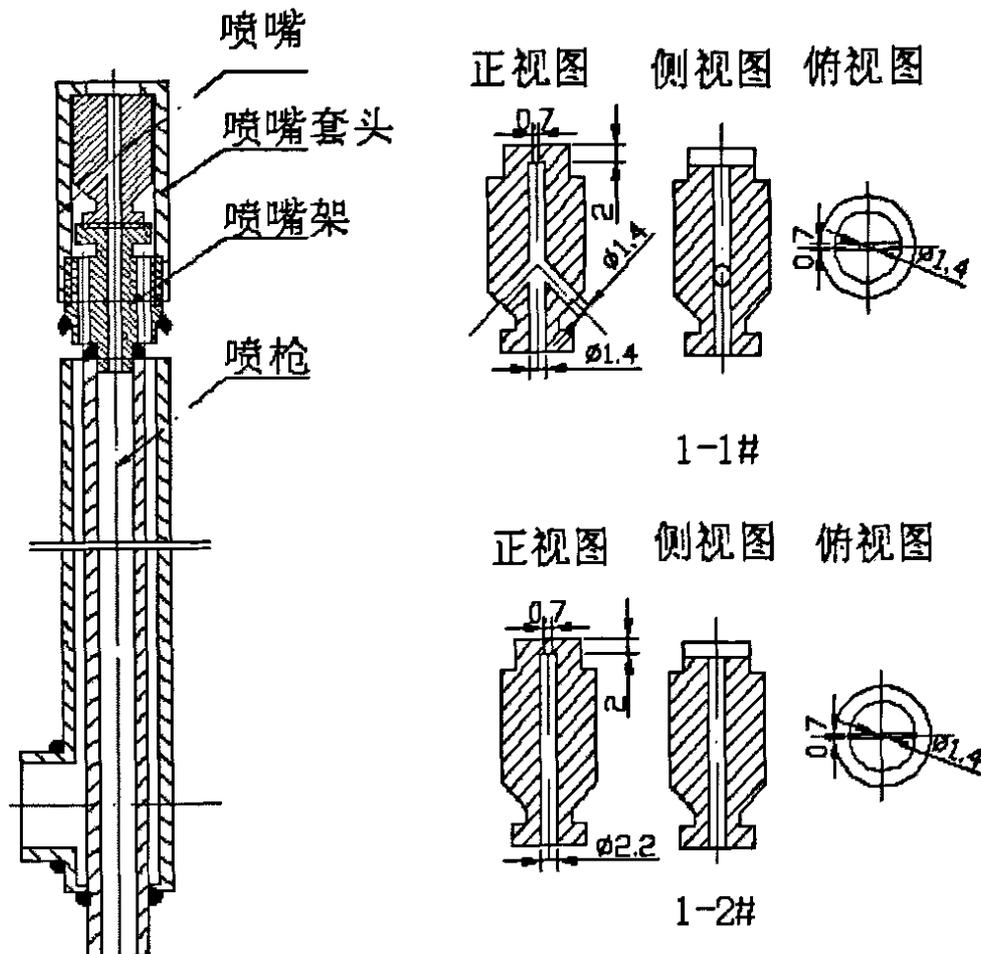


图 3-2 喷枪和喷嘴结构示意图

本次实验结果分析比较如下：

### 1. 流量特性比较

由图（3-3）可以看出，当气压一定时，喷嘴液流量随液压的升高而呈近似线性升高，并且压力式喷嘴 1-2# 在低压力条件下就可达到大流量。而气力雾化喷嘴 1-1# 则需较高的压力才能达到比较大的流量。

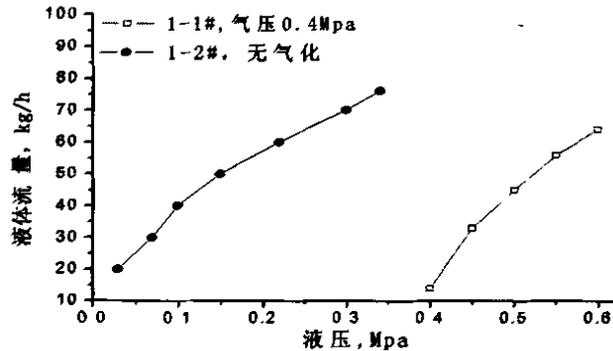


图 3-3 液流量随液压的变化

### 2. 雾化角的比较

由图（3-4）左图可以看出，1-1# 喷嘴雾化角大，在 100° 以上，且随液压的变化不大。没有空气雾化的 1-2# 喷嘴，雾化角在 60° 左右，随液压的升高有较大的变化。明显气力雾化喷嘴的雾化角比压力式喷嘴大。

### 3. 喷射距离的比较

由图（3-4）右图可以看出，1-1# 喷嘴喷射距离在 2.5m 左右，且上升的趋势比较明显。没有空气雾化的 1-2# 喷嘴，喷射距离在 2.7m 左右，随液压的升高曲线逐渐变得平缓，喷射距离增加不多。另外可以看出压力式喷嘴在同液流量情况下的喷射距离小于气力雾化喷嘴。

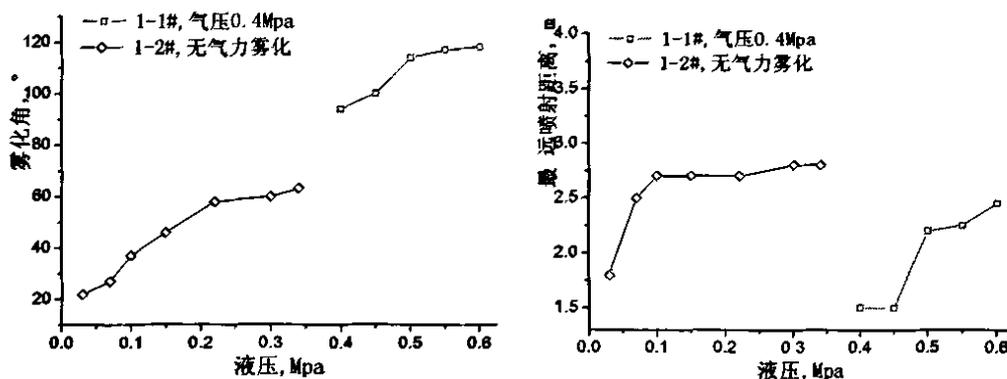


图 3-4 雾化角和喷射距离随液压的变化

化

### 4. 雾化粒度横向空间分布比较

雾化粒度横向空间分布是指垂直于喷射中心线的横截面上以距离喷嘴出口 200mm 的喷雾中心位置作为第一个测点，再向两边每隔 20mm 作为一个测点得到的雾化粒度分布，见图 3-5。

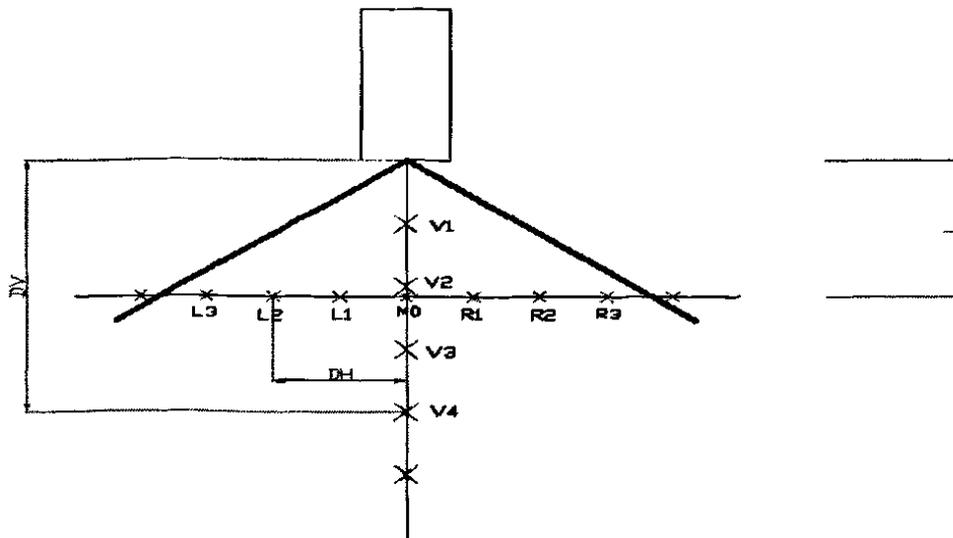


图 3-5 雾化粒度测量示意图

如图 (3-5) 在测量雾化粒度分布时, 记录横向点时, 要记下测点名和该点距喷口的水平距离 DH。记录的格式为: 测点名,DH。记录纵向点时, 要记下测点名和该点距喷口的垂直距离 DV。记录的格式为: 测点名,DV。横向测点中心的一点计为 M<sub>0</sub>, 两边分别记为 L<sub>1</sub>,R<sub>1</sub>,L<sub>2</sub>,R<sub>2</sub>.....。纵向测点从距喷口最近的一点开始, 记为 V<sub>1</sub>,V<sub>2</sub>,V<sub>3</sub>.....。

由图 (3-5) 可知气力雾化喷嘴的雾化粒度分布呈现类似“W”形分布, 而且在液流量小, 气耗率相对提高的情况下, 仍能保持很好的整体雾化效果。1-2 #喷嘴没有出现中心粒度明显增大的情况, 分布比较平均。1-1 #喷嘴雾化粒度有粗有细, 平均粒径也适中。

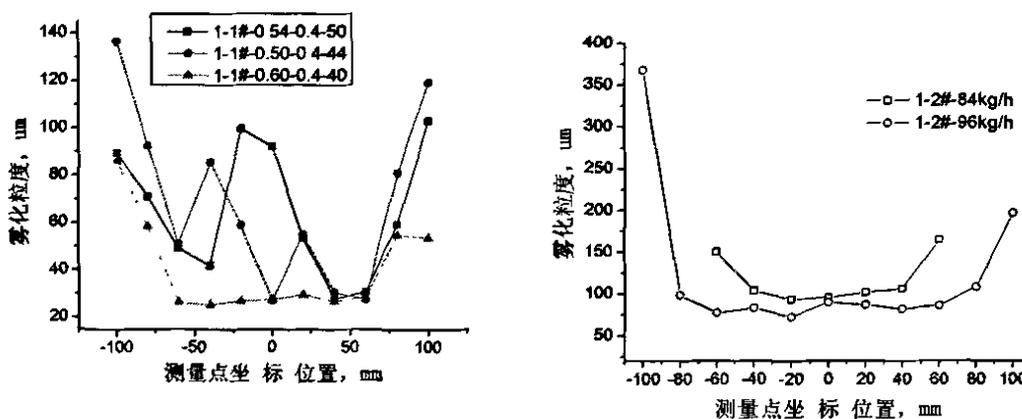


图 3-6 雾化粒度的横向空间分布

综合以上各个指标的比较结果, 发现气力雾化喷嘴 1-1 #雾化角大、雾化粒度适中, 分布有粗有细, 因而更加适用于 SNCR 系统。下面一个阶段就是接着进行气力雾化喷嘴的实验研究。

### § 3.2 扇形气力雾化喷嘴出口槽比较实验研究

通过第一阶段的实验，决定对气力雾化喷嘴做进一步研究。实验重点是研究不同的出口槽形状对雾化特性的影响，通过比较找到雾化性能好的出口槽形式。在已有的 Y 型喷嘴的基础上，借鉴 Y 型喷嘴的流量设计公式，共制造了 4 个不同出口槽的扇形气力雾化喷嘴，喷嘴的设计流量仍然是 60kg/h。它们的基本结构特点和实验意义如表 (3-2) 所述。

表 3-2 不同出口槽的扇形气力雾化喷嘴的说明

喷嘴编号	喷嘴结构描述	实验意义
2-1#	头部开一道贯通的槽，截面为长方形。	作为对比的基础。
2-2#	头部开一道方形凹槽，截面为梯形，夹角为 60°	渐扩的出口，使压缩的气流能自然膨胀，平滑过渡，减少喷雾两侧的大液滴。
2-3#	头部开一道贯通的槽，俯视成橄榄形。	加强中心喷雾射流流量，增加穿透能力
2-4#	头部开一道橄榄形凹槽，截面为梯形，夹角为 60°	渐扩的出口，使压缩的气流能自然膨胀，平滑过渡，减少喷雾两侧的大液滴。

下面的图 (3-6) 是 4 个喷嘴的结构示意图。

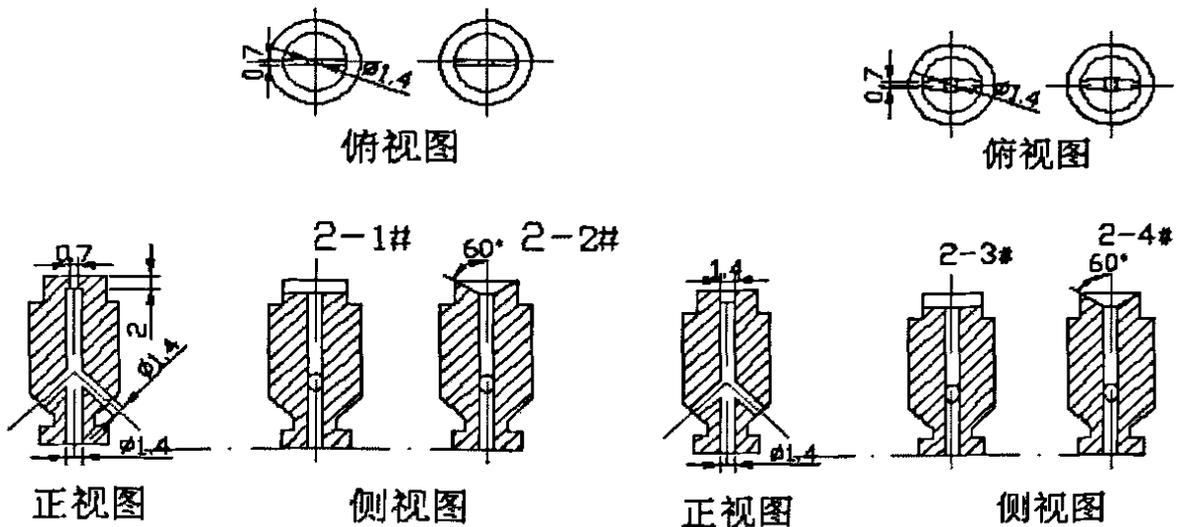


图 3-7 扇形气力雾化喷嘴结构示意图

#### 1. 扇形雾化喷嘴的流量特性比较

由图 (3-8) 可知，扇形喷嘴的流量特性依然满足普遍的变化规律，即当气压一定时，喷嘴流量、雾化角随液压的升高而近似线性升高，同时喷射距离升高、气流量减少；当液压一定时，喷嘴流量、喷射距离和雾化角随气压的升高而减小，

气流量增加。

另外当液压相同时,有梯形导向槽的 2-2 #喷嘴比 1-1 #喷嘴的液流量要大,说明梯形导向槽有利于增加流量,橄榄形槽 2-3 #的液流量明显小于其他类型,说明橄榄形槽有降低液流量的作用。

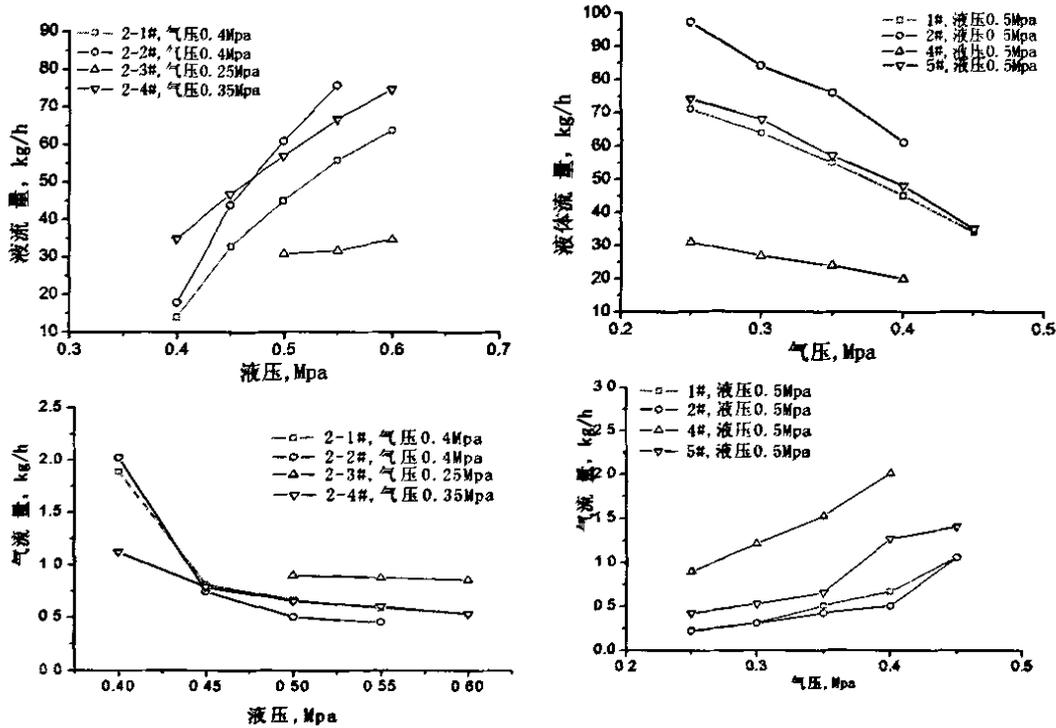


图 3-8 扇形雾化喷嘴的气液流量特性

## 2. 扇形雾化喷嘴的雾化角和喷射距离比较

由图 (3-9) 左图可以看出,喷嘴雾化角随工况的变化不大,方形槽喷嘴 2-1 #、2-2 #的雾化角在  $100^\circ$  左右,橄榄形喷嘴的雾化角在  $20^\circ$  附近。喷射距离随液压增大而增加,橄榄形喷嘴的喷射距离在 3m 左右,比方形槽喷嘴要大一些。说明橄榄形喷嘴雾化角小,但射程远,而方形槽喷嘴雾化角大,射程不远。带梯形导向槽的 2-2 #、2-4 #比同类型的 2-1 #、2-3 #喷嘴的射程要远一些。

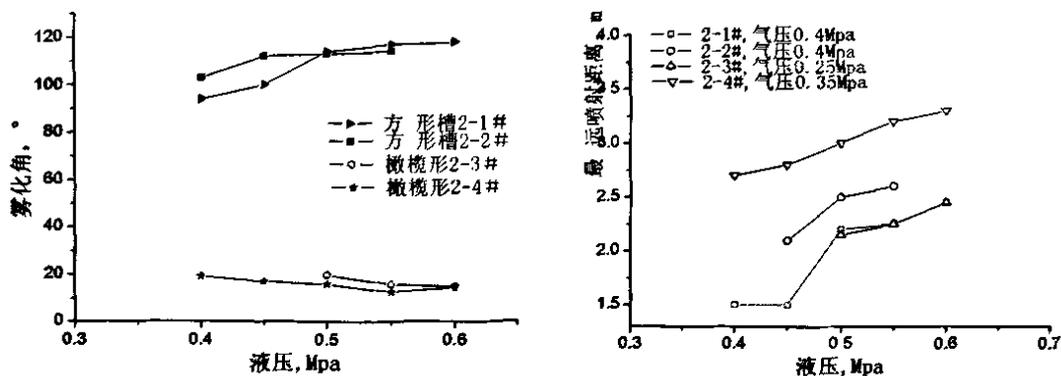


图 3-9 扇形雾化喷嘴的雾化角和喷射距离比较

### 3. 扇形喷嘴雾化粒度的变化

扇形喷嘴雾化粒度分布的测量方法和前一阶段的相同。从图(3-10)的曲线来看,扇形喷嘴的雾化粒度都比较适中,基本上分布在 $30\sim 120\mu\text{m}$ 的区间内。和第一阶段的那个扇形气力雾化喷嘴相比,方形槽喷嘴的雾化粒度分布还是呈现类似“W”形状的分布,而橄榄形喷嘴的喷雾由于喷雾宽度不够,经过测量只能得到喷雾两侧雾化粒度上升的曲线,类似“V”的形状。总的来说,扇形喷嘴的中心两侧接近边缘的测点都会出现雾化粒度上升的情况。有关研究文献把这种现象叫做“胡子”现象。

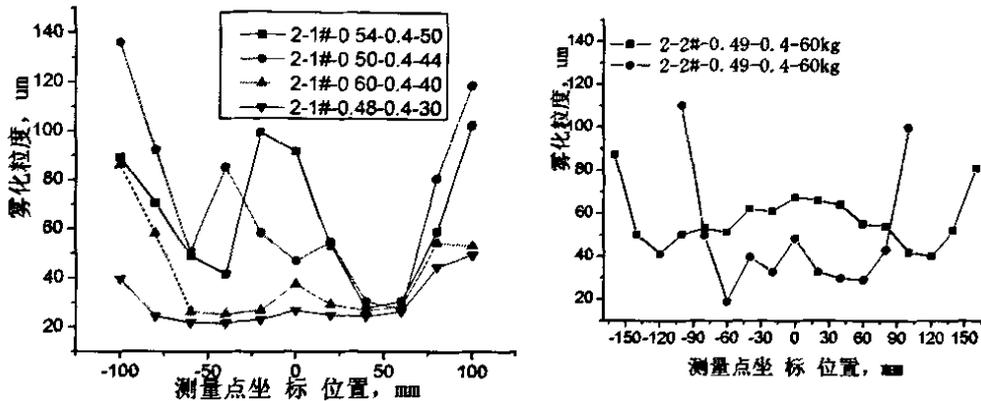


图 3-10 扇形气力雾化喷嘴的雾化粒度分布

总的来说,4种扇形气力雾化喷嘴的雾化特性还是不错的。由图(3-11)可以看出,方形槽总的性能表现比较稳定,橄榄形槽的射程表现十分突出,而梯形导向槽的存在能使方形槽和橄榄形槽喷嘴的性能变的更好,因此会在下次设计时保留。雾化粒度的分布规律还不是很明确,后面将着重研究。另外喷嘴的流量和根据Y型喷嘴的流量公式得到的设计流量相比,有一定的差别。说明用Y型喷嘴流量公式来设计扇形喷嘴的思路是对的,不过也要考虑扇形出口对流量的影响,这可以通过对已有的实验数据拟合,反推得到适合扇形喷嘴的流量公式中的相关系数。这也是后面实验要解决的问题。

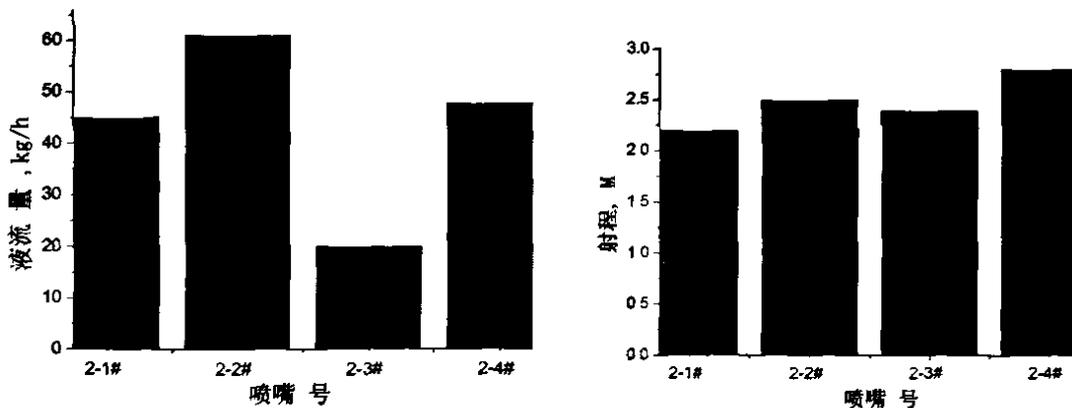


图 3-11 扇形气力雾化喷嘴的雾化粒度分布



表 (3-3) 是每个喷嘴的基本结构型式和设计参数。

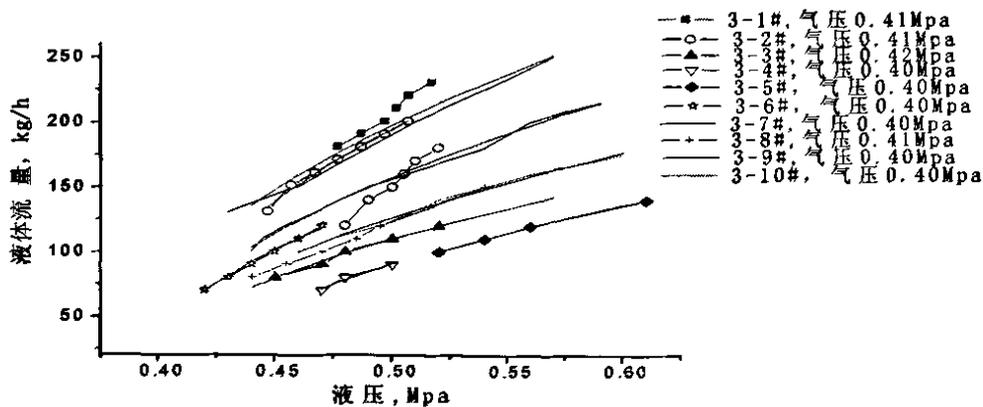
表 3-3 喷嘴的基本参数表

编号	型式	喷嘴结构尺寸					设计参数	
		气/液孔直径 (mm)	气孔个数	混合孔直径 (mm)	槽边沿宽度 (mm)	槽中心宽度 (mm)	设计气耗率 (%)	设计流量 (kg/h)
3-1#	方形槽	3.8	2	3.8	0.9	0.9	0.12	450
3-2#	方形槽	3.1	3	3.1	0.9	0.9	0.18	300
3-3#	方形槽	2.2	4	2.2	0.9	0.9	0.24	150
3-4#	方形槽	2.2	6	2.2	0.9	0.9	0.36	150
3-5#	方形槽	2.2	8	2.2	0.9	0.9	0.48	150
3-6#	橄榄形	2.2	4	2.2	1.0	1.8	0.24	150
3-7#	橄榄形	3.1	4	3.1	1.0	1.8	0.24	300
3-8#	混合孔	2.2	2	4.0	0.9	0.9	0.24	150
3-9#	混合孔	2.2	3	4.0	0.9	0.9	0.18	150
3-10#	混合孔	2.2	4	4.0	0.9	0.9	0.12	150

这次实验由于喷嘴数量很多，可能给出的图表中为了清晰，省略了某些喷嘴的数据。也由于这个原因，没有测量喷嘴雾化粒度的横向分布，而只是测量了每个工况下的中心粒度。计划在筛选出好的喷嘴后，下个阶段再详细测量。这次实验的具体数据及其分析如下。

### 1. 流量特性

流量特性和之前做出来的规律差不多，如图 (3-15)。当气压一定时，喷嘴液流量随液压的升高而线性升高，当液压一定时，喷嘴液流量随气压的升高而线性减小。当气压一定时，气流量随液压的升高而降低，当液压一定时，气流量随气压的升高而升高。



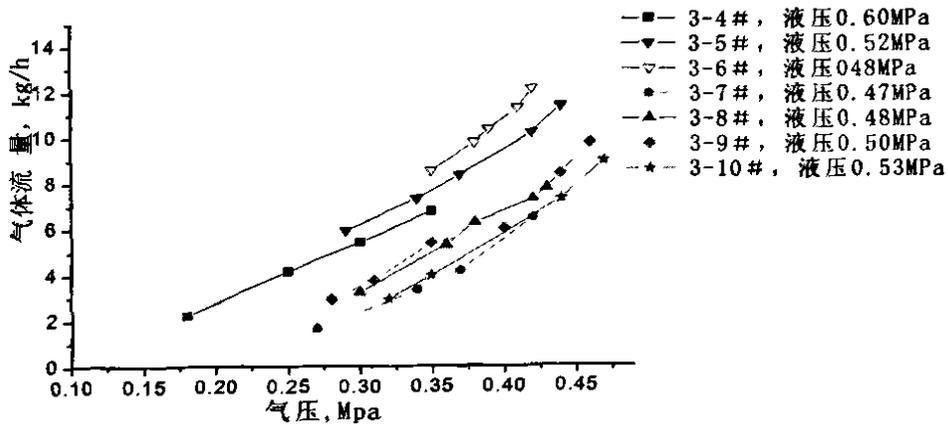


图 3-15 喷嘴气液流量特性

## 2. 雾化角

从图 (3-16) 中可以看出, 雾化角随着液压的变化只是小范围的波动。方形槽喷嘴的雾化角在  $100\sim 120^\circ$  之间, 橄榄形喷嘴中 7# 雾化角落在  $100\sim 120^\circ$  之间, 6# 落在  $60\sim 80^\circ$  之间, 7# 的雾化角明显大于 6# 的雾化角, 可见同类型喷嘴中结构尺寸大的雾化角要大些, 混合孔喷嘴在  $60\sim 80^\circ$  之间。

方形槽和橄榄形喷嘴是由于头部有  $120^\circ$  的梯形导向槽, 因此雾化角相对没有梯形导向槽的混合孔喷嘴要大。因而要使雾化角足够大且随液流量的增加变化不大的话, 可以采用橄榄形或者混合孔类型的喷嘴, 并且可通过增加梯形导向槽的方法来增加雾化角。

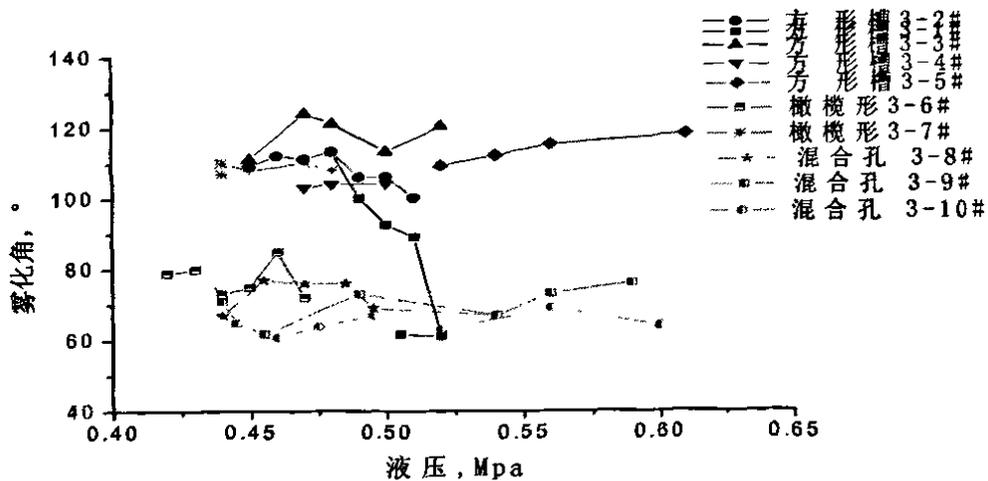


图 3-16 喷嘴雾化角的变化

## 3. 喷射距离

从图 (3-17) 中看出, 最大喷射距离可以达到 6m 左右, 当气压一定时, 最远喷射距离随液压的升高而有所升高, 当液压一定时, 最远喷射距离随气压的升高而有所减小, 但总的来说随工况变化的幅度不大。也可以理解成, 当喷嘴工作在设计流量周围的一个小范围时候, 最远喷射距离和喷嘴的结构参数有比较大的

关系，而与此时代工况变化的关系不大。随着喷嘴设计流量的增加，喷嘴喷射距离也增加了许多，其中以混合孔喷嘴和橄榄形喷嘴的射程最远。方形槽类型的喷嘴（3-2#~3-5#）最远喷射距离的范围为2~4m，一般在3m左右。混合孔类型的喷嘴（3-8#~3-10#）的最远喷射距离大大优于其它喷嘴，在5~6m之间，其中9#喷嘴的最远喷射距离一直保持在6m左右。橄榄形喷嘴中3-7#的最远喷射距离也不错，比起6#有很大的提高，这可能是7#喷嘴的设计流量大，也就是孔径比较大造成的。而且大部分喷嘴的最远喷射距离随液流量的变化并没有大的变化，其中以3-9#变化最小。因此要想有较大的喷射距离和较好的稳定性，可以采用混合孔类型喷嘴或者橄榄形类型的喷嘴，并且可以通过提高喷嘴的设计流量的方法进一步增加喷嘴的喷射距离。

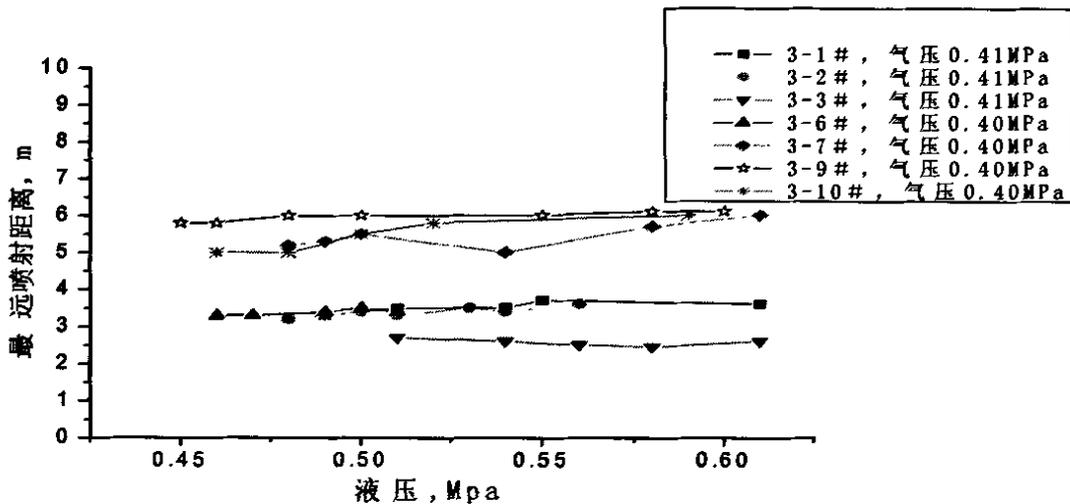


图 3-17 喷嘴喷射距离的变化

#### 4. 雾化粒度

从图(3-18)中可以看出，不论是气压保持一定还是液压保持一定，气耗率的上升都导致雾化粒度的下降。雾化粒度随着气耗率的增加有明显的下降，而且气耗率达到15%以上，雾化粒度往往就达到一个很低的水平，继续增大气耗率，并不能使雾化粒度继续降低。喷嘴的雾化粒度随液流量的增加而上升的比较剧烈，并且随着同一类型喷嘴的设计流量的增加，雾化粒度的增加趋势下降。方形槽类型的喷嘴当气孔数目较少时(3-1#、3-2#)，雾化粒度达到300 $\mu\text{m}$ 以上，当气孔数较多时，雾化粒度落在(100~200) $\mu\text{m}$ 之间。而混合孔类型的喷嘴如3-9#喷嘴，当流量达到200kg/h，雾化粒度为150 $\mu\text{m}$ 左右。另外混合孔类型喷嘴的雾化粒度随液流量变化的趋势比起其它两种喷嘴较平缓，也就是说液流量需要变化较大的一个值时，雾化粒度才会有明显的变化。橄榄形喷嘴中3-7#的雾化粒度当液流量达到200kg/h，雾化粒度为100 $\mu\text{m}$ 左右，变化趋势也比较平缓，3-6#的变化曲线十分陡峭，不利于现场的调节控制。所以要想得到适当的雾化粒度(100~200 $\mu\text{m}$ )和较好的稳定性，可以选择橄榄形或混合孔类型的喷嘴，并可以加大设计流量来增加稳定性。

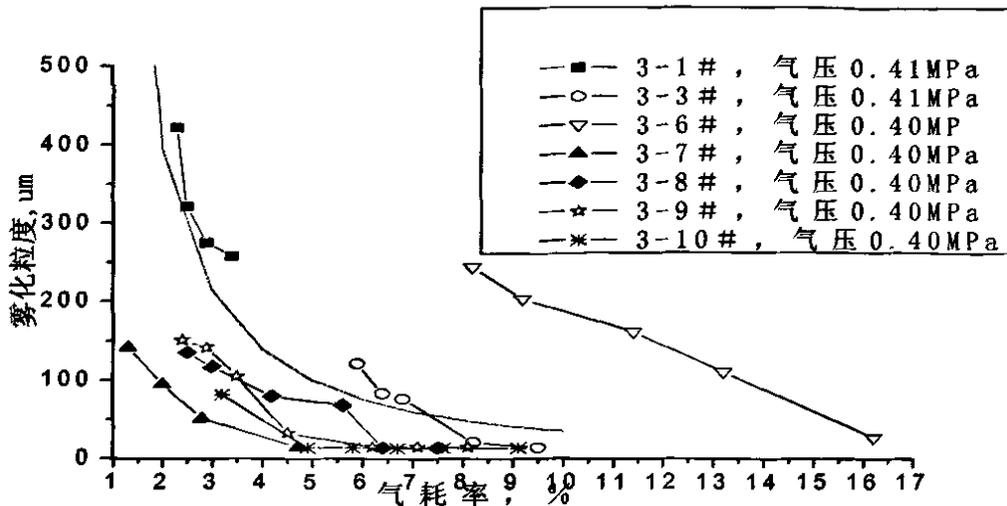


图 3-18 喷嘴中心雾化粒度的变化

综上所述，方形槽喷嘴的最远喷射距离比较小，雾化角比较大，当气孔数较少的时候，雾化不完全使得雾化粒度比较大，当喷嘴工况发生变化时，方形槽喷嘴的最远喷射距离不发生大的变化，而雾化粒度和雾化角将发生较大的变化。橄榄形喷嘴的最远喷射距离可通过改变设计流量的方法实现较大范围的应用，并且它的雾化粒度比较适中。当喷嘴工况发生变化时，如果是改变液压，那么橄榄形喷嘴的最远喷射距离不发生大的变化，雾化粒度和雾化角也只是在小范围内波动，变化趋势比较平缓；如果是改变气压，那么是喷嘴的最远喷射距离和雾化角在较小范围内变化，但是此时雾化粒度会发生比较大的变化。混合孔喷嘴的喷射距离比较大，雾化粒度也很适中，但是雾化角偏小。当工况发生变化时，混合孔喷嘴的最远喷射距离和雾化角变化较小，雾化粒度相对其他类型喷嘴而言变化也是最平缓的。

因此如果要想找既有较好的穿透深度，当工况发生变化时，还要喷射距离、雾化角、雾化粒度有一定的稳定性，方便现场进行控制调节，适合 SNCR 系统中氨水雾化的喷嘴，可以考虑选用混合孔（比如 3-9#）或者橄榄形（比如 3-7#）类型的喷嘴。如果要想找有较好的雾化覆盖面积的喷嘴，可以考虑选用混合孔（比如 3-7#）或者方形槽（比如 3-4#）类型的喷嘴。

### § 3.4 优选的扇形气力雾化喷嘴实验研究

经过前一阶段对扇形气力雾化喷嘴的比较研究，发现橄榄形喷嘴 3-7# 和混合孔喷嘴 3-9# 的总体雾化性能最好。所以优选出这两个喷嘴作为这次实验的喷嘴，进行更加深入详细的实验研究。

这次实验只针对两个喷嘴，所以整个实验测量内容十分丰富，其中包括雾化粒度在空间横向和纵向的分布等。

這次實驗過程中的操作步驟大致如下：

- 1) 實驗中氣壓的設定值初步定為 0.45Mpa、0.4Mpa、0.35Mpa、0.3Mpa、0.25Mpa、0.2Mpa 這幾個值。調節液壓變化時最好使液流量的變化範圍大致為 50% 設計流量~150% 設計流量。
- 2) 實驗時，先將氣壓調到一個設定值後保持恒定，然後通過調節液壓變化，來測得相對應的一組數據。再將氣壓調到另一個設定值後保持恒定，重複以上步驟，便可得到多組不同的定氣壓值下的實驗數據。
- 3) 在測量霧化粒度分布時，記錄橫向點時，要記下測點名和該點距噴口的水平距離 DH。記錄的格式為：測點名,DH。記錄縱向點時，要記下測點名和該點距噴口的垂直距離 DV。記錄的格式為：測點名,DV。橫向測點中心的一點計為 M<sub>0</sub>,兩邊分別記為 L<sub>1</sub>,R<sub>1</sub>,L<sub>2</sub>,R<sub>2</sub>.....。縱向測點從距噴口最近的一點開始，記為 V<sub>1</sub>,V<sub>2</sub>,V<sub>3</sub>.....。最後通過實驗數據的整理，便可獲得噴霧橫向和縱向的空間分布，見圖 (3-5)。
- 4) 縱向測點的間距取為 50mm，橫向測點的間距取為 20mm，橫向面距噴口的垂直距離取為 200mm。縱向測點取 7 個，橫向測點除中心 M<sub>0</sub> 點外，每側取 5 個測點左右。
- 5) 測量噴嘴的中心霧化粒度時，選擇 M<sub>0</sub> 點作為測量點。

圖 (3-19) 和圖 (3-20) 分別是 3-7# 噴嘴和 3-9# 噴嘴的結構圖。從圖 (3-19) 中可以看出，液體通道和氣體通道成 45° 的夾角，液體通道位於中心，4 個氣體通道呈中心對稱分布。水和壓縮空氣進入混合段後相互混合，到達噴霧口時，水被壓縮空氣霧化，並在噴霧口被出口槽整流成扁平的扇形噴霧形狀。

圖 (3-20) 為混合孔噴嘴 3-9# 的結構示意圖。它的結構和橄欖形噴嘴的結構基本相似，不過它只有 3 個氣體通道，且帶有的混合段直徑要比液體通道和氣體通道大，讓壓縮空氣有充分膨脹加速的空間，同時使得氣孔和混合段之間有較大的壓降，液體不容易倒流入氣孔內。

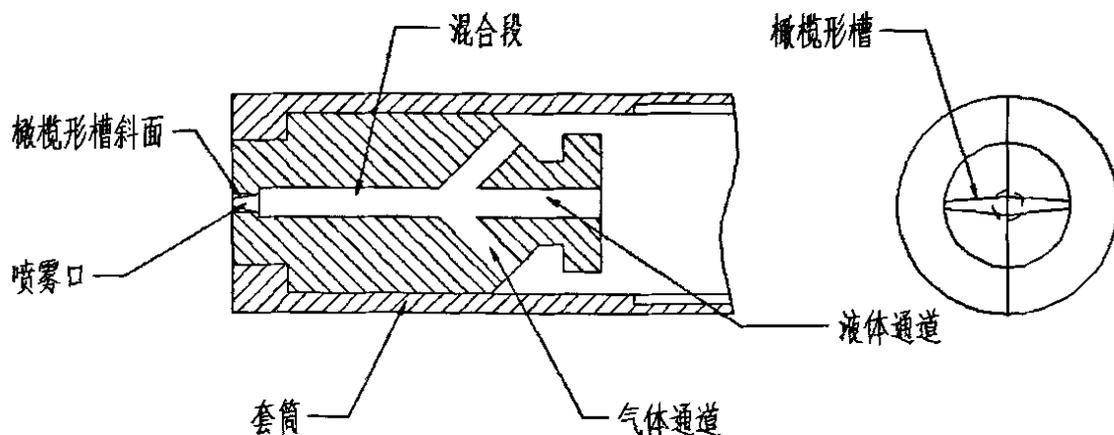


圖 3-19 橄欖形噴嘴結構示意圖

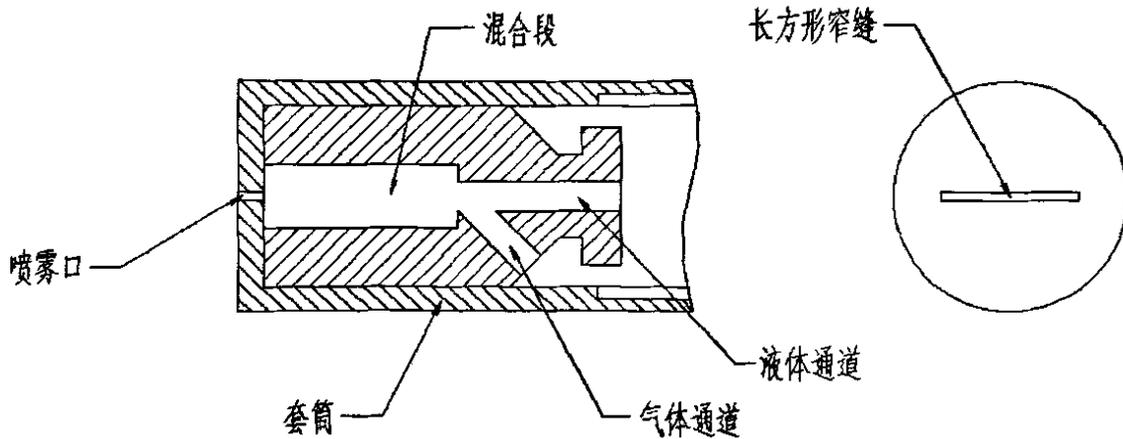


图 3-20 混合孔喷嘴结构示意图

两个喷嘴的具体结构尺寸见表 (3-4)。

表 3-4 两种喷嘴的结构尺寸表

喷嘴编号	喷嘴类型	气孔个数	液孔直径/mm	气孔直径/mm	混合孔直径/mm	槽中心宽度/mm	槽边沿宽度/mm
3-7#	橄榄形	4	3.1	3.1	3.1	1.8	0.9
3-9#	混合孔	3	2.2	2.2	4.0	0.9	0.9

实验开始时首先将喷嘴安装到喷枪上，由于喷枪可以上下左右沿着刻度自由移动，因而可准确调节激光测量光束和喷嘴中心出口之间的水平距离和垂直距离，进而能测量不同空间位置测点的雾化粒度。另外为了排除随机脉动对测量结果的影响，实验中每个测点取样 20 个，最后数据处理时去掉其中明显不合理的样品数据，来减少测量的误差。

本次实验结果及分析包括以下几个方面：

### 1. 流量特性

如图 (3-21) 所示，同一气压下 3-7#喷嘴和 3-9#喷嘴的液流量随液压的增大而升高，不同气压之间的流量曲线间隔和气压间隔一样，比较均匀。液压的变化范围从 0.20MPa~0.55MPa，液流量的变化范围从 60kg/h~200kg/h。可以看出气压越高，要达到某个液流量需要的液压也随之升高。因此如果在工况发生变化的时候，要保持液流量比较稳定，可以通过同步改变气压和液压来实现。

气流量的变化和液流量的变化相反，唯一不同的地方在于压缩空气存在的可压缩性，因此定气压下，当液压增加时气流量下降的速度变慢，所以这里就不赘述了。

由于这次实验数据十分充足，可利用实验数据绘制液流量随着液压的变化关系曲线，并采用 Y 型喷嘴的液流量计算公式对该流量曲线进行拟合。设计喷嘴时推荐值为  $\mu=0.7$ ， $\beta=0.94$ 。

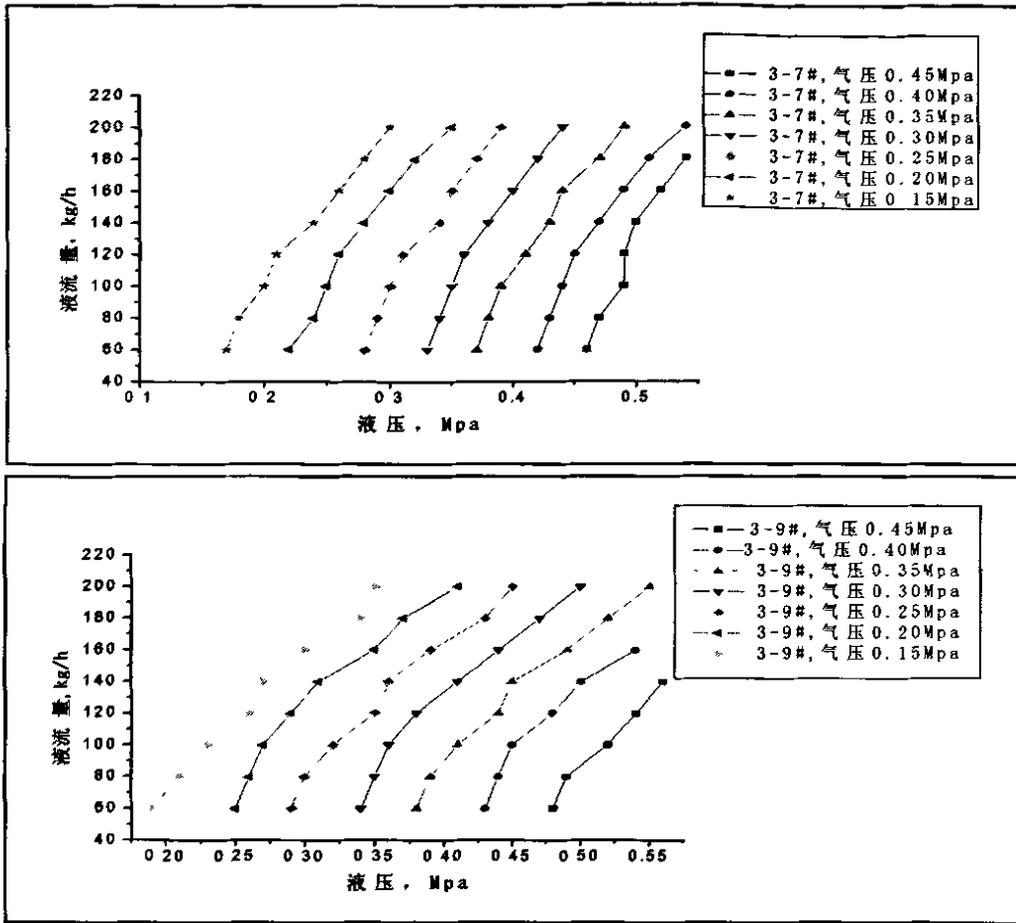


图 3-21 定气压下喷嘴的液流量特性曲线

根据两个喷嘴的流量曲线拟合得到综合的扇形喷嘴的流量系数  $\mu$  范围为 0.35~0.42, 推荐值为 0.39,  $\beta$  推荐值为 0.98。拟合值与 Y 型喷嘴的推荐值有较大差异, 这是两种喷嘴结构上的不同造成的。通过得到的系数取值, 重新计算液流量  $Q_y$ , 比较发现当液流量在设计流量附近时, 计算值与实际值之间的误差很小, 在  $\pm 5\%$  之间; 当液流量较高时, 计算值与实际值之间的误差在  $\pm 10\%$  之间; 当液流量较低时两者之间误差较大, 在  $\pm 20\%$  之间, 如图 (3-22) 所示。

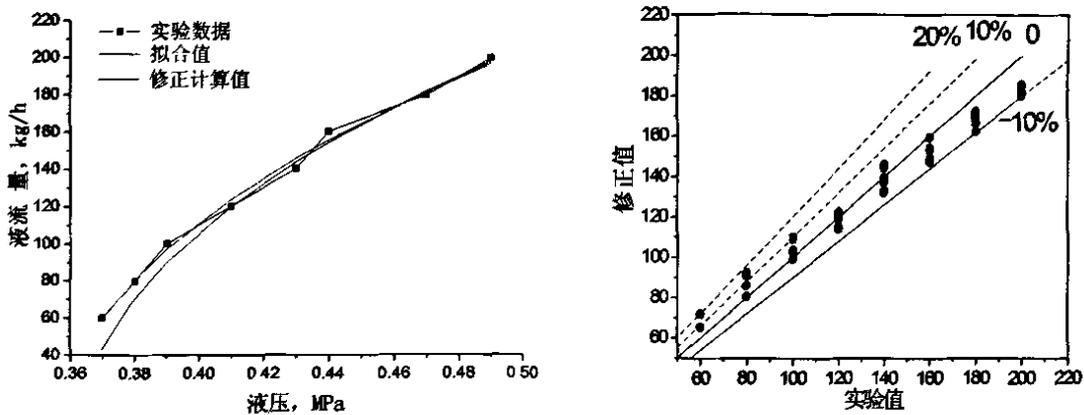


图 3-22 气压为 0.35 MPa 时液流量的拟合情况和拟合误差分布

目前对扇形喷嘴的研究不多，还没有现成的设计经验公式可以直接使用，因而扇形喷嘴的设计也都是借鉴已有的一些经验公式。由于本实验喷嘴的结构和 Y 型喷嘴在结构上有一定相似，故设计喷嘴时使用了 Y 型喷嘴的设计公式，这样便存在一定的设计误差。上面通过对大量实验数据的拟合，得到适合扇形喷嘴相关系数的取值范围和推荐值，较之以前 Y 型喷嘴设计公式的推荐值有了较大的改进，这对以后设计同类型的扇形喷嘴有一定的实际指导意义。

### 2. 雾化角

喷嘴雾化角是表征喷雾扩张程度的一个量。从下面的图 (3-23) 中看出，雾化角随工况的变化并不发生很大的变化，只是在一个小范围内波动。3-7# 喷嘴的雾化角大都在  $90^{\circ}\sim 98^{\circ}$  之间，变化幅度约为  $4^{\circ}$ 。3-9# 喷嘴的雾化角大都在  $45^{\circ}\sim 55^{\circ}$  之间，变化幅度约为  $5^{\circ}$ 。因此可以得出，3-7# 和 3-9# 喷嘴的雾化角相差比较大，总体上扇形雾化喷嘴的雾化角比较大，喷雾的覆盖面积广，但雾化角受工况变化的影响比较小，主要是由喷嘴自身的结构和尺寸决定的。

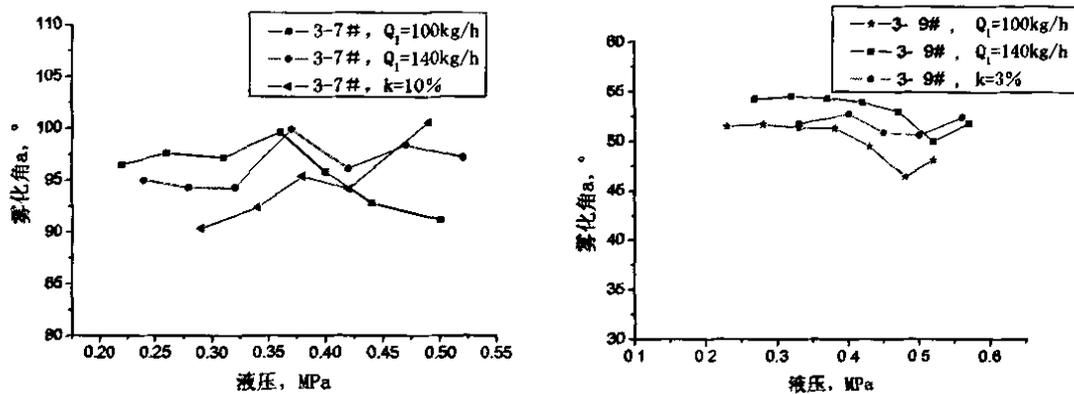


图 3-23 喷雾雾化角随液压的变化

### 3. 中心雾化粒度

本次实验中喷嘴的中心雾化粒度指的是在位于喷雾的中心，距喷嘴的出口 200mm 的测点所测得的 SMD 值。扇形喷嘴的液压和气压变化对中心雾化粒度都有影响，下面用气耗率来同时包含气压和液压对中心雾化粒度的影响。气耗率是指某个工况下气体质量流量和液体质量流量之比，常用  $k$  表示。

从图 (3-24) 中可以看出，不论是气压保持一定还是液压保持一定，气耗率的上升都导致雾化粒度的下降。当气流量很小，液流量较大的时候，气耗率  $k$  比较低，这时候机械雾化起主导作用，因而 SMD 较大，接近  $150\mu\text{m}$ 。当液流量减少，气流量增加时，气耗率  $k$  变大，使得 SMD 下降，且下降的速度随着  $k$  的增加有所减缓。当喷嘴气耗率  $k$  大于 10% 时，气流量很大，液流被压缩空气冲击撕碎直至完全雾化，这时 SMD 趋向于  $20\mu\text{m}$  左右，并且不再继续下降。

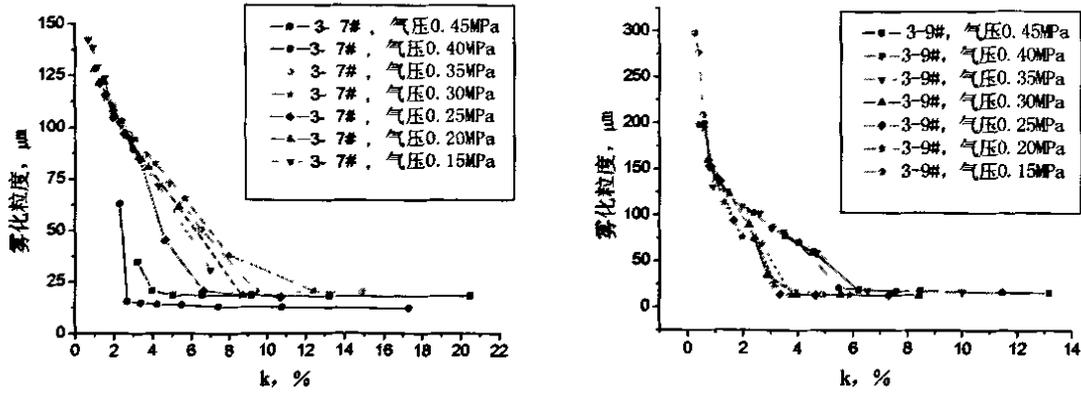


图 3-24 喷嘴中心雾化粒度随气耗率的变化

#### 4. 喷嘴雾化粒度的空间横向分布

在实际的工程应用中，喷嘴的雾化质量不但取决于喷嘴的平均雾化粒度的大小，还和雾化粒度的分布有很大的关系。雾化粒度满足一定规律的分布，有时能更有利于雾化之后的过程，比如混合燃烧过程等。

本实验的横向雾化粒度分布指的是距喷嘴出口 200mm 的喷雾中心位置为第一个测点，再向两边每隔 20mm 作为一个测点得到的雾化粒度分布。从图 (3-25) 中可以看出，两种喷嘴的雾化粒度分布都呈现 W 形分布。喷雾中心位置的 SMD 最大，往两边随着距中心测点的距离 DH 增加，SMD 减少，接近喷雾边缘的测点的 SMD 又有所增加，整个 SMD 的分布呈“W”形状。随着气耗率的增加，SMD 分布整体下降，最大和最小 SMD 的差距变大，且分布的下凹处变的更陡峭，SMD 分布趋向更加明显的“W”形状。

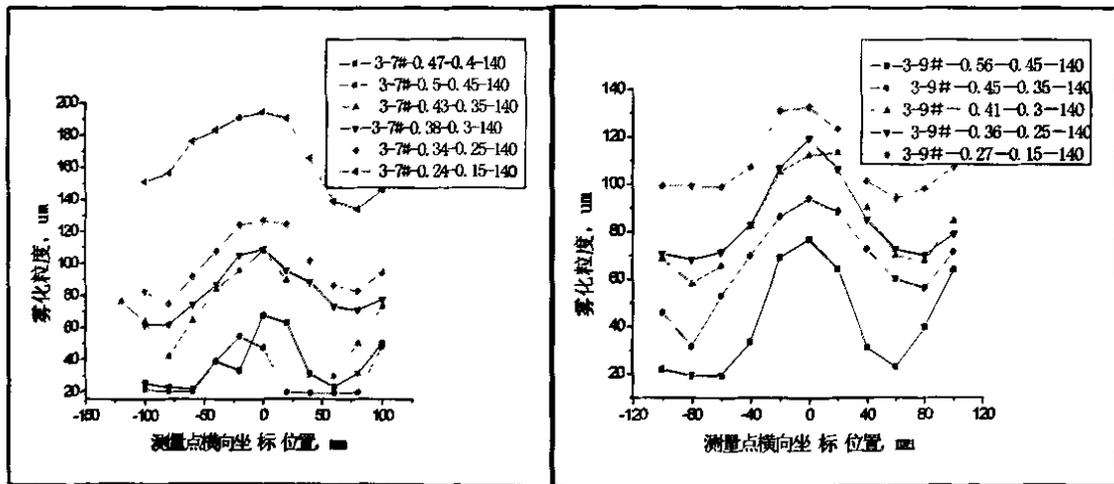


图 3-25 喷嘴雾化粒度的空间横向分布

由于液压和气压相对较高时，扇形面两端尾部剧烈摆动，雾化粒度明显增大，估计颗粒之间互相碰撞，产生二次凝聚，使得雾化粒度变大。但液压和气压相对较低时，两侧雾化粒度分布趋于平坦，能保持很好的整体雾化效果。在实际运行的锅炉炉膛中，由于燃烧时的高温使小粒径的液滴进入炉内后很快就蒸发

掉，只有大粒径的液滴才能深入到炉膛里面，因此我们需要喷嘴形成这样的液滴分布：一部分大粒径的液滴集中在喷雾中心，可以进入到炉膛的深处；一部分小粒径颗粒分散在喷雾的两边，在喷嘴出口处附近就可以与烟气混合并反应。可见具有“W”形雾化粒度分布的扇形喷嘴是比较理想的喷嘴雾化形式，能兼顾大颗粒大的穿透距离和小颗粒的混合均匀。

### 5. 喷嘴雾化粒度的空间纵向分布

喷嘴的纵向粒度分布指的是位于喷雾的中心位置，距离喷嘴出口每 50mm 作为一个测点得到的喷嘴雾化粒度分布，纵向测点距喷口的距离用 DV 表示。从图（3-26）中可以看出，当距离喷嘴较近时，由于液滴还没有完全雾化，液滴较粗，SMD 比较大。当纵向高度小于 200mm 左右时，雾化粒度随高度的增加而减少，而且气压和液压相对较小时的雾化粒度下降幅度比气压和液压相对较大的雾化粒度大，其中 3-9# 喷嘴特别明显。随着测点距喷嘴出口的距离 DV 的进一步增加，发生进一步的雾化使得 SMD 变小，当 DV 超过 200mm 后雾化粒度变化趋于平缓，当距离 DV 达到 300mm 以上，这时液滴已经完全雾化，SMD 便趋于一个稳定的值，大约在 100 $\mu$ m 左右。

对于 3-7# 喷嘴来说，最终稳定的 SMD 范围在 60~200 $\mu$ m 之间，对于 3-9# 喷嘴来说，最终稳定的 SMD 范围在 80~140 $\mu$ m 之间。并且同一喷嘴气耗率低的工况，SMD 最终稳定的值要高。这样粒径范围的液滴既能较快的与其它射流混合，又能有较远的穿透距离，整体效果好。

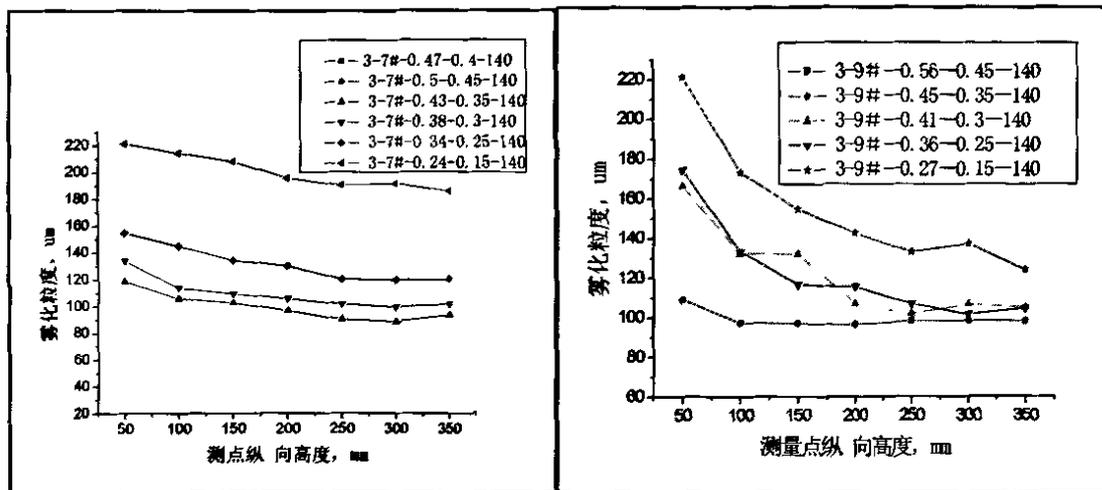


图 3-26 喷嘴雾化粒度的空间纵向分布

现将扇形喷嘴的特点总结如下：

- 1) 扇形空气雾化喷嘴的流量特性与 Y 型喷嘴相差较远，不能直接使用其流量计算公式。根据已有实验数据拟合液流量和液压曲线，得到喷嘴设计公式中的流量系数  $\mu$  范围为 0.35~0.42，推荐值为 0.39， $\beta$  推荐值为 0.98。当液流量在喷嘴设计流量附近时，计算值与实际值之间的误差在  $\pm 5\%$  之间；当液流量较高时，误差在  $\pm 10\%$  之间；当液流量较低时误差较大，在  $\pm 20\%$  之间。

- 2) 长扁形的喷嘴出口是形成平面扇形喷雾的关键。
- 3) 喷嘴气耗率明显偏低,在设计工况下的气耗率为 6~8%,只有设计值的 17~25%左右。
- 4) 定气压下,当气耗率很小时,喷雾中心的 SMD 接近 150 $\mu\text{m}$ ;随着气耗率的增加,喷雾中心的 SMD 逐渐降低,并稳定在 20 $\mu\text{m}$  左右。说明喷嘴雾化粒径小,雾化效果好。
- 5) 喷雾的雾化角较稳定,雾化角在 70~110°,设置梯形导向槽有利于增加雾化角。当工况变化时,只作小范围的波动。
- 6) 气、液流量的增大都能提高射程。喷嘴射流射程最大可达到 6m 左右,混合孔结构的喷嘴射程最大。
- 7) 喷雾的整个横向 SMD 的分布呈类“W”形状。随着气耗率的增加,SMD 分布整体下降,最大和最小 SMD 的差距变大,下凹处变得更突出,SMD 趋向更加明显的类“W”分布。纵向 SMD 随着距离的增加而下降,当距离大于 300mm 时,SMD 稳定在 100 $\mu\text{m}$ 。
- 8) 总之,扇形雾化喷嘴的结构简单、加工方便;雾化质量高,能把液体雾化到粒径为 150 $\mu\text{m}$  以内的细液滴;雾化角大,喷雾覆盖面积广。因而是一种性能优越的喷嘴,有着很好的应用前景。

### § 3.5 本章小结

本章从 SNCR 系统喷射装置的几种喷射方式开始,说明了 SNCR 喷嘴的基本特点。接着从压力式喷嘴和扇形气力雾化喷嘴的比较开始,逐步确定设计喷嘴的雾化形式采用气力雾化,出口槽采用橄榄形,并带有梯形导流槽,或者采用混合孔结构。经过实验研究比较得出,3-7#喷嘴和 3-9#喷嘴的雾化性能比较优越,并进一步对这两个喷嘴进行深入的研究,最终总结出扇形喷嘴的一般特点,同时指出扇形喷嘴还存在气耗率低的问题。希望保留混合孔结构,保持高射程特性,在增加气耗率的同时,保持雾化粒度在 100 $\mu\text{m}$ ~150 $\mu\text{m}$  左右。这成为下一章部分内混式喷嘴的开发的最初缘由,也为部分内混式喷嘴的设计做了铺垫。

## 第四章 部分内混式喷嘴开发及实验研究

前面开发的扇形雾化喷嘴中 3-7#, 3-9#的雾化性能已经相当不错, 可是还是存在一些问题, 比如气耗率小导致雾化粒径偏大等等。而外混式喷嘴的气耗率虽然高, 但是射程小, 气液混合的过程太短, 雾化效果也不好。因此这一章的思路就是在扇形雾化喷嘴和外混式喷嘴的基础上, 设计几种带有外混气体通道的扇形雾化喷嘴, 由于它既有外混通道, 又有内混式喷嘴的结构, 因此将它们称之为部分内混式喷嘴。同样通过实验研究了它们的雾化性能, 并和前面的扇形雾化喷嘴做了简单比较。

### § 4.1 部分内混式喷嘴的设计

喷嘴的设计主要参考了扇形气力雾化喷嘴和外混式喷嘴的结构, 共制造了 1 个外混式喷嘴和 2 个部分内混式喷嘴。外混式喷嘴仅仅作为其他喷嘴的一个参考。每个部分内混式喷嘴游配有两个不同外环通道面积的套筒。

表 (4-1) 是它们的基本结构参数表。

表 4-1 喷嘴的结构参数表

喷嘴编号	气孔直径,mm	液孔直径,mm	气孔数	中心出口宽度,mm	外环比例	组合代号
4-1#	5	12	10	3	1	D5
4-2#	2	2	4	0.6	0.3	D2-30%
					0.5	D2-50%
4-3#	3	3	4	1	0.2	D3-20%
					0.3	D3-30%

图 (4-1) 是外混式喷嘴的结构示意图。

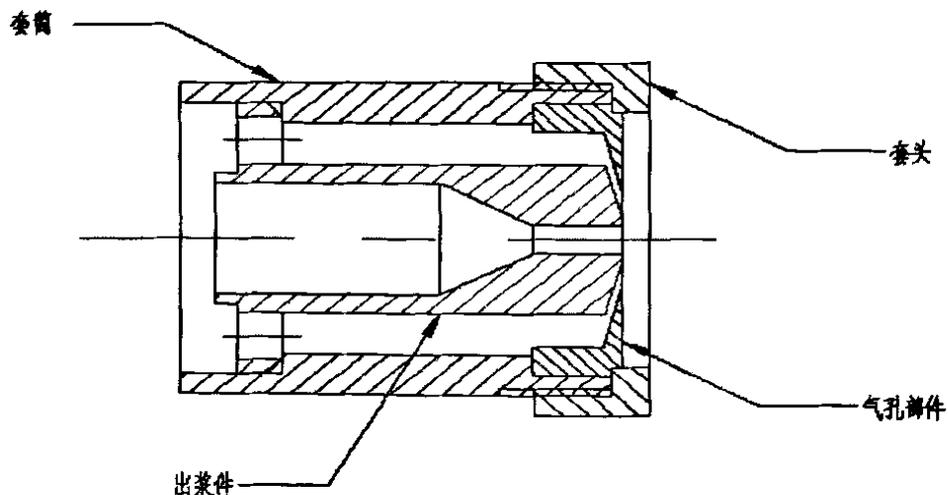


图 4-1 外混式喷嘴结构示意图

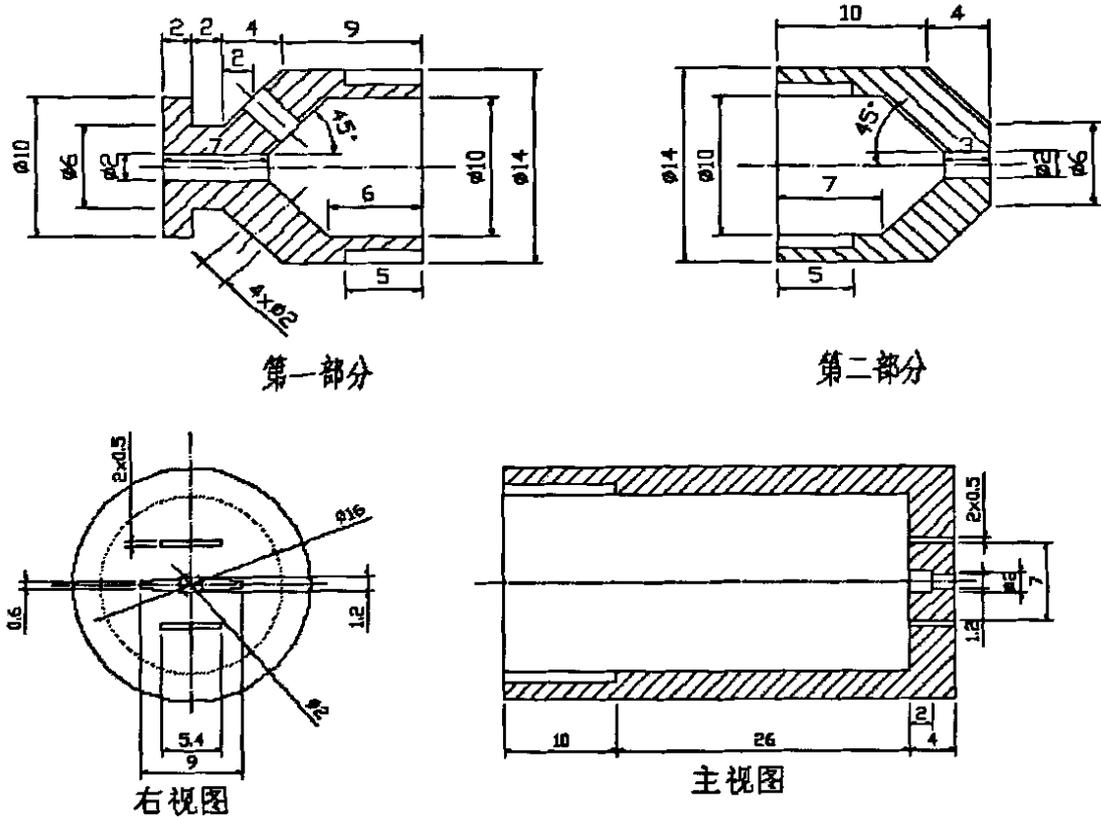


图 4-2 4-2# 部分内混式喷嘴和套筒结构示意图

## § 4.2 部分内混式喷嘴实验研究

### § 4.2.1 部分内混式喷嘴的雾化特性研究

部分内混式喷嘴比起内混式喷嘴最大的不同就是多了外混的气通道，使得喷嘴气耗率有了明显的上升，整个流动过程阻力变小了，外混气对喷出的气液混合物进一步进行雾化冲击，使得雾化更彻底，且对喷雾有一定保护作用。下面是实验数据及其分析。

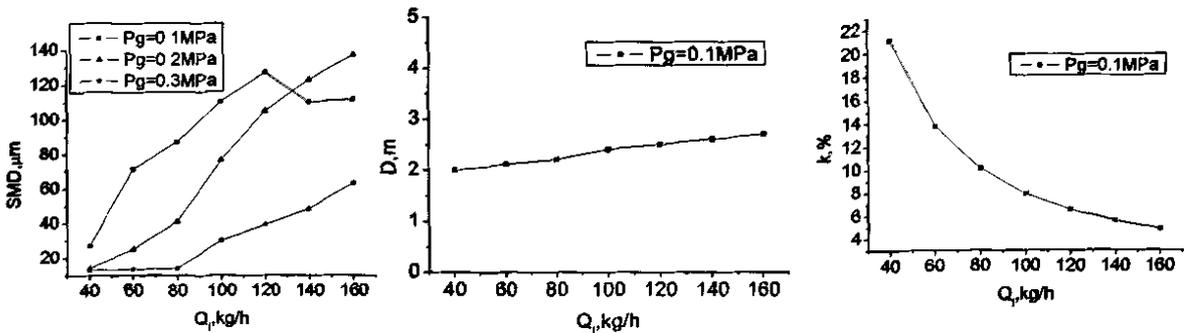


图 4-3 4-1# 外混式喷嘴的雾化粒度、喷射距离及气耗率随液流量的变化

图 (4-3) 是 4-1# 外混式喷嘴的雾化粒度 (SMD)、气压 ( $P_g$ ) 0.1MPa 下的喷射距离 ( $D$ )、气压 0.1MPa 下的气耗率 ( $k$ ) 随液流量的变化曲线。从图中

可以看出, 4-1#喷嘴的喷射距离比较近, 在 2~3m 之间。气耗率  $k$  最大时为 22% 左右。当气压为 0.1MPa 时, 液流量为 140kg/h 时, SMD 为 120 $\mu$ m 左右, 但当气压升高到 0.3MPa 时, SMD 最大只能达到 60 $\mu$ m。

### 1. 部分内混式喷嘴流量特性比较

图(4-4)中, 同样液压下, 孔径 3mm 的液流量大于孔径 2mm 的 50% 左右。升高同样液压的情况下, 部分内混式喷嘴 d3-30% 的液流量比 d2-30% 喷嘴增加的要多, 同一个喷嘴组合的外环通道面积虽然不一样, 但液流量特性几乎相同, 在图(4-4)中表现为流量曲线几乎重合, 所以外环气道面积对液流量的影响可以忽略。

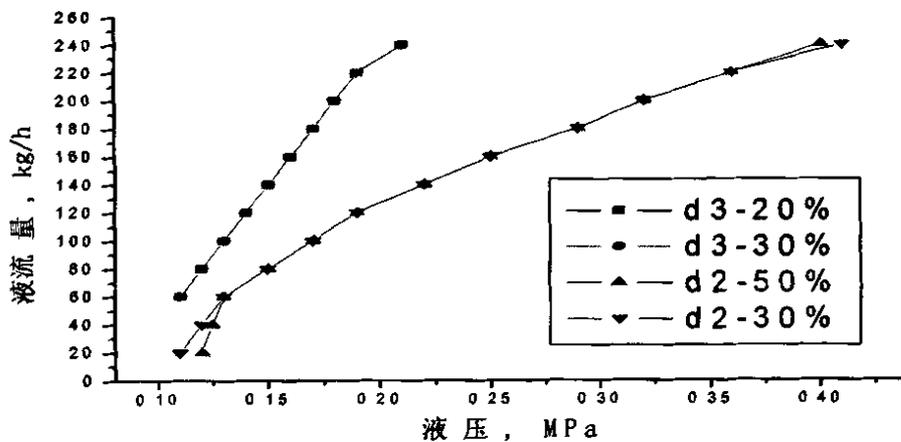


图 4-4 部分内混式喷嘴的液流量特性

图(4-5)是 d3-30% 和 d2-30% 喷嘴在恒定液流量为 80kg/h 的情况下, 气耗率和雾化粒度随液压力的变化曲线。可以看出, 同时增大液压力和气压, 能够在恒定流量下的气耗率增加和雾化粒度变细。当气耗率在 10% 以上时, 雾化粒度仍大于 100 $\mu$ m。这一结果比内混式的气耗率可增加 5% 左右。d2-30% 喷嘴在 0.15~0.4MPa 液压力下能实现 80kg/h 的稳定流量, 调节适应性好。

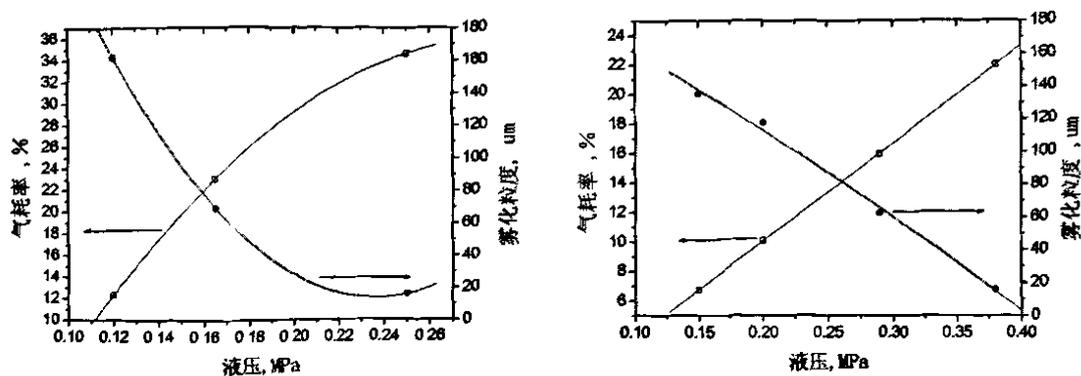


图 4-5 部分内混式喷嘴的气耗率和雾化粒度随液压力变化

### 2. 部分内混式喷嘴雾化角比较

如图(4-6)所示,部分内混式喷嘴的雾化角大都在 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 之间,随液流量的变化很小。和前面的扇形喷嘴相比,大部分压缩空气从外环通道喷出,进入内混通道的压缩空气变少,因此雾化角要小很多。

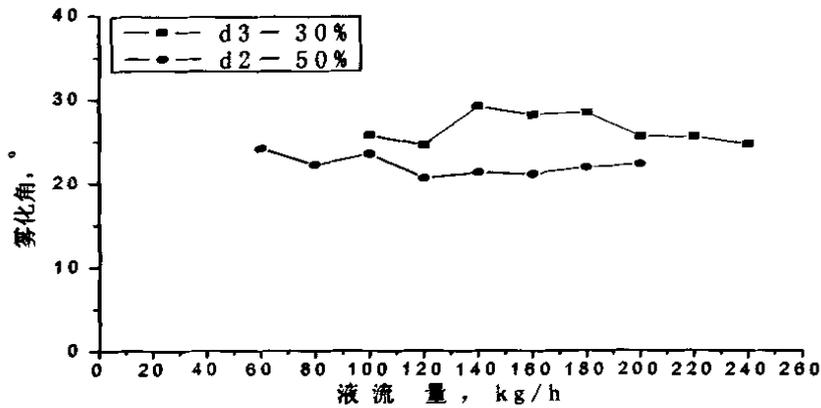


图 4-6 部分内混式喷嘴的雾化角随液流量的变化

### 3. 部分内混式喷嘴射程比较

从图(4-7)中可以看出,部分内混式喷嘴的喷射距离随液流量的增大而增加比较多,和扇形喷嘴的喷射距离不发生大的变化不同。其中 d3-30%的喷射距离比较远,当液流量达到 $240\text{kg/h}$ 时,射程可达 $5\text{m}$ 左右。大尺寸喷嘴的喷射距离要大一些,同一个喷嘴使用外环通道比例大的套筒组合时,喷射距离也要大一些,这应该是外环气流对喷雾的保护作用的体现。

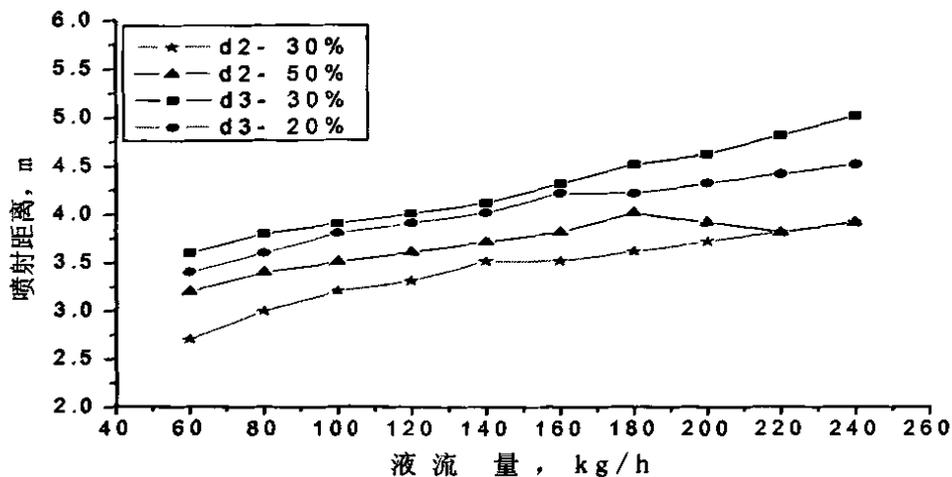


图 4-7 部分内混式喷嘴的喷射距离随液流量的变化

### 4. 部分内混式喷嘴雾化粒度比较

图(4-8)是雾化粒度随液流量的变化曲线。D3-20%当气压为 $0.1\text{MPa}$ 时,液流量为 $140\text{kg/h}$ 时, SMD 为 $100\mu\text{m}$ 左右,但当气压升高到 $0.3\text{MPa}$ 时, SMD

最大只能达到  $50\mu\text{m}$ 。D2-50%喷嘴当气压为  $0.1\text{MPa}$  时，液流量为  $140\text{kg/h}$  时，SMD 为  $140\mu\text{m}$  左右，当气压升高到  $0.3\text{MPa}$ ，液流量为  $140\text{kg/h}$  时，SMD 只有  $70\mu\text{m}$  左右。所以内混通道大一些的喷嘴雾化效果要更好些，同一喷嘴外环通道比例大的，由于外混气流对喷雾的二次雾化更强些，液体雾化也更彻底。

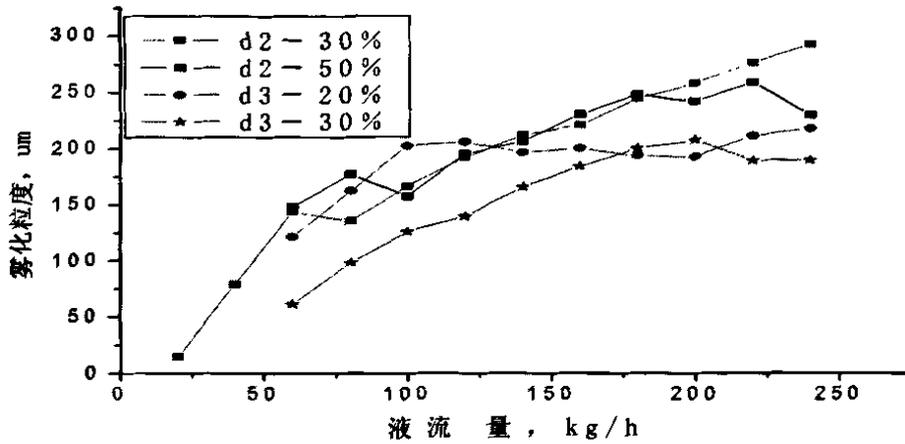


图 4-8 部分内混式喷嘴的中心雾化粒度随液流量的变化

#### § 4.2.2 部分内混式喷嘴和扇形喷嘴雾化特性的比较

通过选取和橄榄形喷嘴结构尺寸差不多的 d3-30%部分内混式喷嘴作为比较。图（4-9）中分别是部分内混式喷嘴和橄榄型喷嘴的液流量随液压的变化关系。从图中可以看出部分内混式的喷嘴在不同气压下的流量曲线之间都是呈现平行均匀分布的形态，这点和橄榄型喷嘴类似。部分内混式的喷嘴在气压较低的时候，液流量就已经很大了，这是因为气体的通道面积大大增加，导致整个通道的阻力下降，因此不用多大的压力就能达到很大的流量。

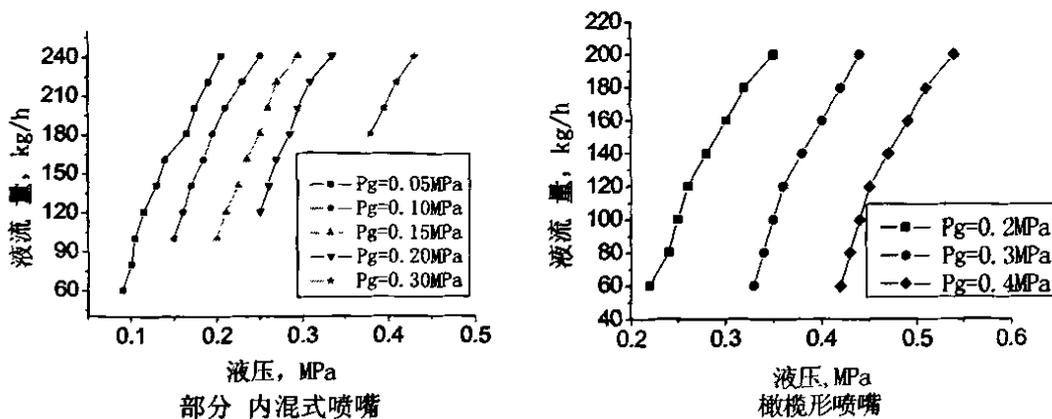


图 4-9 两种喷嘴的液流量特性

图（4-10）分别是部分内混式喷嘴和橄榄型喷嘴的中心雾化粒度和液压的关系。从图中可以看出，由于外混气的存在，当液流量都为  $240\text{kg/h}$  时，雾化粒度

随着气压提高一个等级后，有很明显的下降，这是因为外混气对气液混合物进一步冲击撕裂，使得中心雾化粒度的下降明显。而橄榄型喷嘴随着气压的提高，中心雾化粒度没有很大的降低。

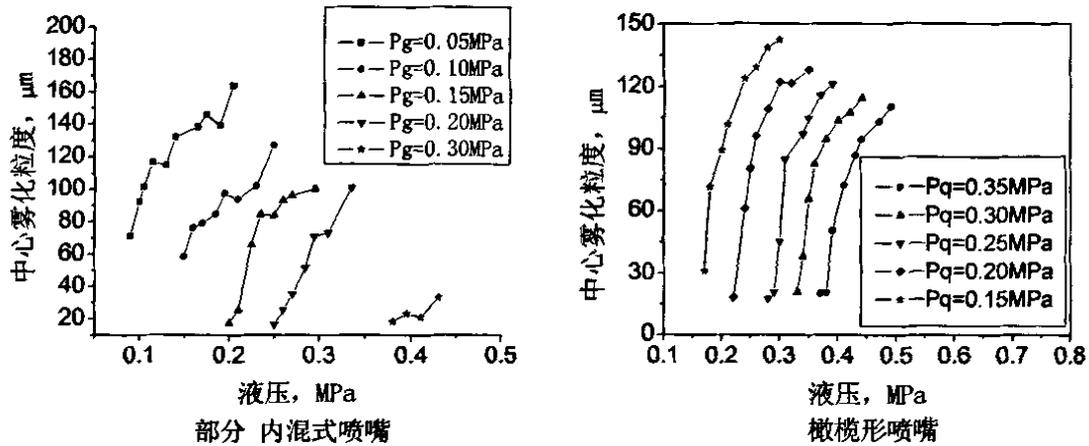


图 4-10 两种喷嘴的中心雾化粒度随液压的变化

图 (4-11) 是喷嘴的中心雾化粒度随气耗率的变化关系曲线。可以看到同样的中心雾化粒度下，部分内混式喷嘴的气耗率要比橄榄型喷嘴大许多。这是因为外混气加大了气体的流量。另外随着气耗率的增加，部分内混式喷嘴的雾化粒度下降的要缓慢些，同样气耗率变化范围，雾化粒度下降的幅度要小些。

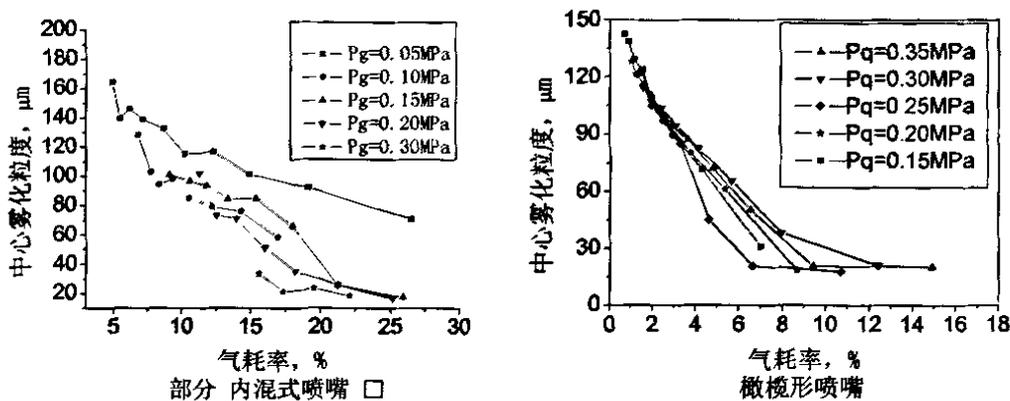


图 4-11 两种喷嘴的中心雾化粒度随气耗率的变化

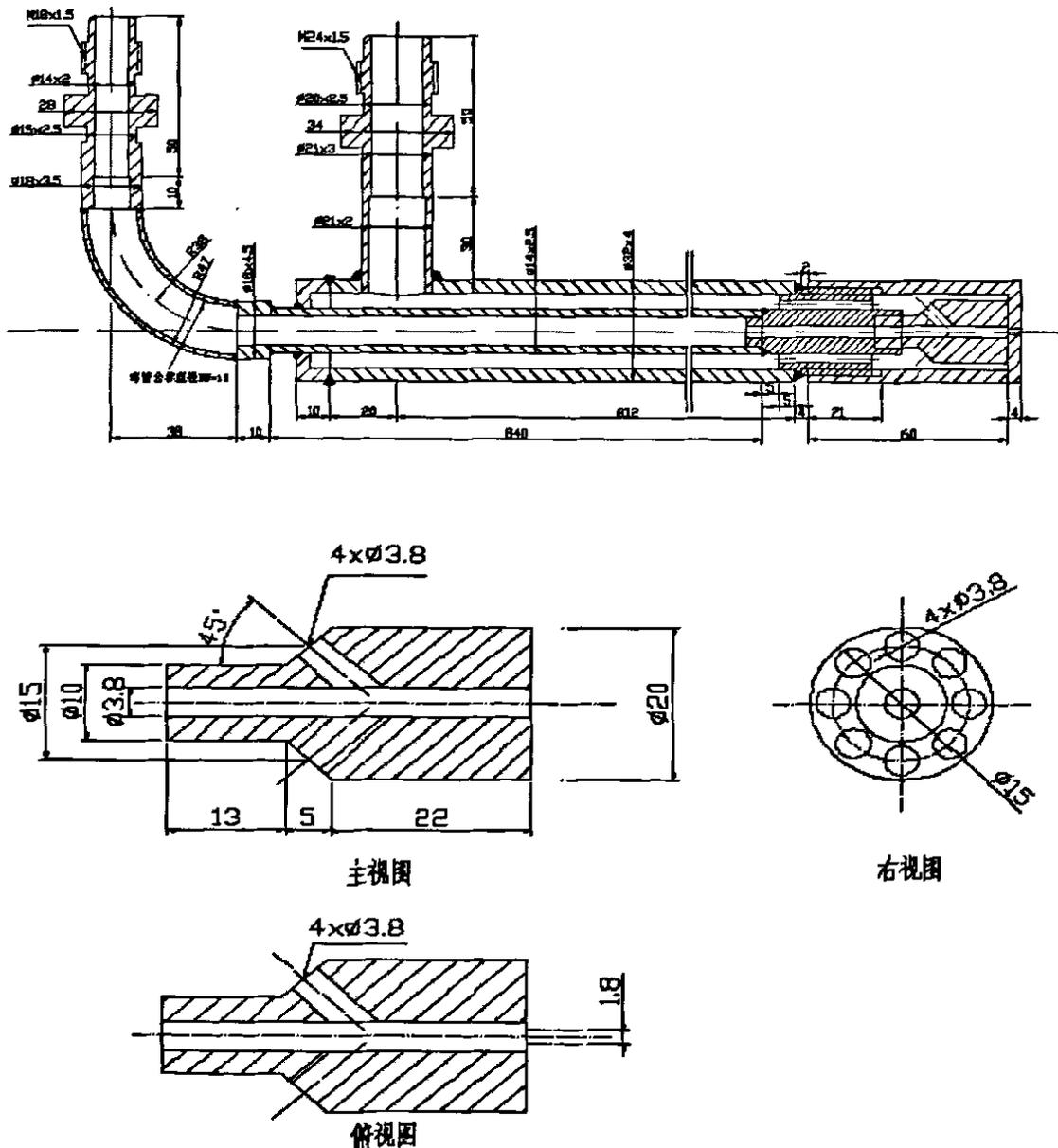
另外部分内混式喷嘴  $d_{3-30}\%$  在气压 0.05MPa 下，最大的喷射距离达到 5.1m。最小距离也有 4.5m 左右。和橄榄型喷嘴最大 5m 不相上下。不过部分内混式喷嘴的雾化角只有  $25\sim 30^\circ$ ，和橄榄型喷嘴的  $90^\circ$  相比小了很多，比混合室喷嘴的  $50^\circ$  也要小很多。

总的来说就是部分内混式喷嘴的压力等级不需要太高就能达到较高的液流量，雾化粒度受气压的影响的比橄榄型喷嘴要明显许多。不过定气压下，雾化粒度随气耗率的增加下降的速度要慢些。喷射的距离要比橄榄型喷嘴更远，由于经过内混出来的空气量变小，使得雾化角比较小。外混式喷嘴的射程在流量很大的

时候射程才比较远，雾化粒度在气压比较高的时候也比较小。部分内混式喷嘴当气液孔径一样时，外环气孔出口面积大的喷射距离要大些，气耗率也要大些，外混气流作用使得雾化粒度要更小些；当外环通道比例相同时，气液孔径大的喷射距离要大，气耗率要大些，雾化粒度要小些。喷嘴雾化角随着尺寸和面积比的变化并不发生大的变化，维持在  $25^\circ$  左右。所以部分内混式喷嘴更适合大流量场合的应用。

### § 4.3 喷嘴定型及实验总结

通过前面的实验最后设计了如下的喷枪和喷嘴，它综合了之前各个喷嘴的优点。喷嘴采用混合孔结构，套筒上采用橄榄槽出口。实验得到喷嘴的各项指标都比较好，并且已经应用在实际的 SNCR 系统中。详细的结构图如下图 (4-12)：



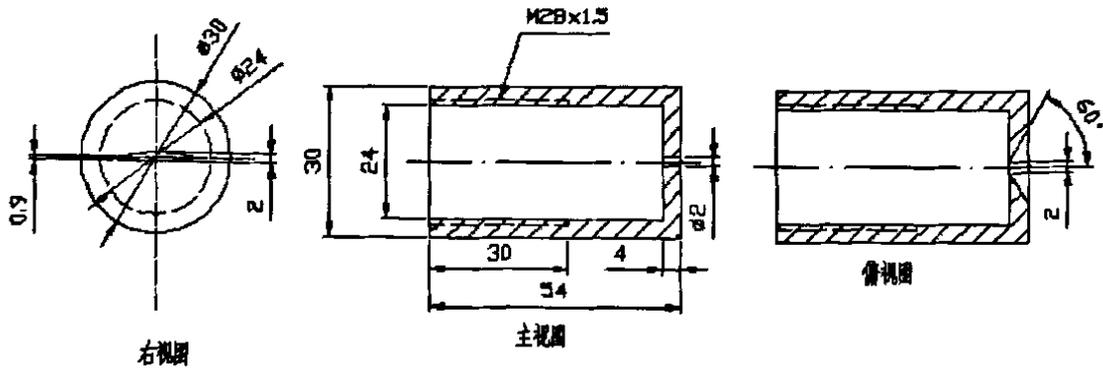


图 4-12 定型喷枪和喷嘴及其套筒的结构示意图

## § 4.4 本章小结

下面对前面喷嘴实验作个总结。

- 1) 喷嘴雾化形式选择气力雾化；
- 2) 能够实现扇性雾化喷射，头部整流槽采用深度梯形—头部橄榄形；
- 3) 喷嘴选择混合孔结构：混合孔结构的射程最大可到达 6m ；
- 4) 扇型雾化喷嘴的雾化粒度分布都呈现类似“W”形分布，雾化角在 70~110°之间；
- 5) 扇形雾化喷嘴的气耗率偏低：设计工况下的气耗率在 6~8%左右，为设计值的 17~25%左右。气耗率为 5%以上时雾化粒度往往就达到一个很低的水平，只有 20 $\mu\text{m}$ ；
- 6) 外混式喷嘴的雾化效果欠佳，射程较小，仅有 2.0~2.7m；
- 7) 部分内混式喷嘴：外混气道面积对液流量的影响可以忽略。雾化角仅有 20°左右。同时增大液压和气压，能够在恒定流量下的气耗率增加和雾化粒度变细，但射程变化不大。当气耗率在 10%以上时，雾化粒度仍大于 100 $\mu\text{m}$ ，这一结果比内混式的气耗率可增加 5%。
- 8) 最后定型的喷嘴综合了之前各个喷嘴形式的优点。喷嘴采用混合孔结构，套筒上采用橄榄槽出口，实验得到的各项指标都比较好。

## 第五章 喷嘴流场数值模拟计算

### § 5.1 Fluent 软件简介

由于实验条件的限制,不能测得某测点的喷雾的速度,因此想通过数值模拟的方法来了解喷雾过程中流场的基本情况<sup>[69]</sup>。本章采用了最常见的 Fluent 和 Gambit 软件包来进行数值模拟。在 CFD 软件中, Fluent 软件是目前国内外使用最多、最流行的商业软件之一,在转换与湍流、传热与相变、化学反应与燃烧、多相流、旋转机械、动/变形网格、噪声、材料加工、燃料电池等方面有广泛应用。Fluent 软件主要有如下优点<sup>[70]</sup>:

- 1) 功能强,适用面广。包括各种优化物理模型,如:计算流体流动和热传导模型,辐射模型,相变模型,离散相变模型,多相流模型及化学组分输运和反应流模型等。
- 2) 高效率,省时。Fluent 将不同领域的计算软件组合起来,成为 CFD 计算机软件群,软件之间可以方便地进行数值交换,并采用统一的前、后处理工具,这就省却了科研工作者在计算方法、编程、前后处理等方面投入的重复、低效的劳动,而可以将主要精力和智慧用于物理问题本身的探索上。
- 3) FLUENT 经过大量算例考核,同实验符合较好。对每一种物理问题的流动特点,有适合它的数值解法,用户可对显式或隐式差分格式进行选择。同传统的 CFD 计算方法相比,它的计算速度快、稳定性好,精度很高,可达二阶精度。

Fluent 软件包主要由以下几个部分组成:

- 1) Gambit, 用于建立几何模型,并生成相应的网格。
- 2) Fluent, 用于进行流动和传热等过程的模拟计算的求解器。
- 3) PrePDF, 用于模拟 PDF 燃烧过程。
- 4) TGrid, 用于从现有边界网格生成体网格。
- 5) Filters, 用于转换其它程序生成的网格,供 Fluent 使用。

利用 Fluent 软件进行求解的步骤大致可分为如下几步:

- 1) 确定研究对象的几何形状,用 Gambit 或者其它软件生成可供 Fluent 计算的网格。
- 2) 打开 Fluent,输入网格文件,并检查网格。
- 3) 选择 Fluent 2d 或者 3d 求解器。
- 4) 设置要求解的流体方程:通过判断有无粘性,层流或者湍流,是否有传热,是否有化学反应等等来决定求解哪些方程。
- 5) 根据实际情况确定流体的材料和相关的物性。

- 6) 根据实际情况确定网格边界的边界类型和边界条件。
- 7) 条件计算控制参数。
- 8) 初始化流场, 并开始迭代计算。
- 9) 看计算结果是否满意, 来决定是否需要重新设置边界条件或是需要重新建立模型, 生成网格。
- 10) 保存计算结果, 进行数据后处理。

## § 5.2 模型选择及条件设定

Fluent 本身带有许多的计算模型, 来满足不同场合的流动计算, 而用于多相流动问题的模型有混合物模型、VOF (Volume of Fluid) 模型、欧拉模型等几种。尽管 Fluent 有多种模型, 来解决各种问题。但是对于气力式喷嘴雾化过程的精确模拟以及 SMD 的预测都还没有相应的数学模型, 因为人们对气力式雾化过程的机理还没有十分明确的认识。考虑到 VOF 模型适用于计算空气和水这样不能相互渗透的多相流体流动, 因此本文采用 VOF 模型来进行数值模拟。通过流场中每相的体积分数可以定性了解到雾化过程的情况, 注意在 VOF 模型中假设流场中各点的速度与各个相的速度是相同的。

按照 3-9#喷嘴的实际尺寸, 用 Gambit 软件绘出了三维的喷嘴模型, 网格划分采用混合类型的网格, 划分后网格数是 16 万左右。图 (5-1) 是整个模型划分网格后的三维效果图。

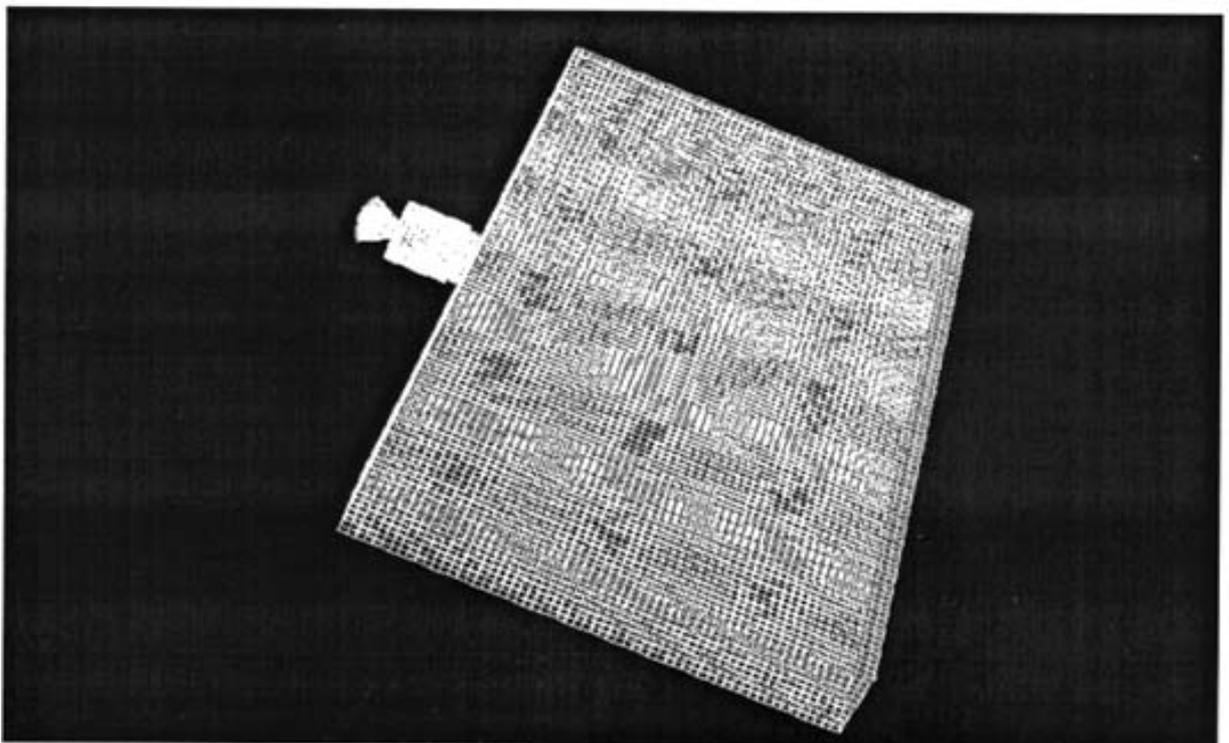


图 5-1 计算模型的三维网格示意图

下面图(5-2)是放大的喷嘴立体图和纵截面图。

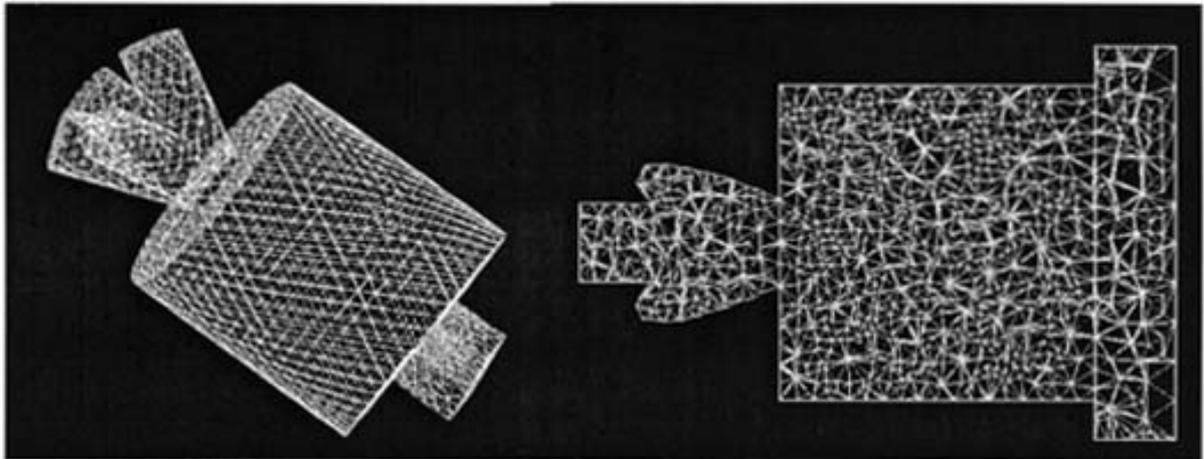


图 5-2 放大的喷嘴模型立体图和纵截面图

如图(5-2),模型以可压缩理想空气作为雾化介质气体,水作为雾化工质。水从中心孔进入,空气从四周的三个斜通道进入,经过混合室的混合后,从中心扁平的扇形喷嘴出口喷出,整个流动视为定常流动。模拟计算采用非耦合的隐式求解器求解,采用的湍流模型是 $k-\epsilon$ 模型。由于水相和气相之间存在表面张力的作用,所以设置两相的表面张力系数为0.073。重力对喷雾也有一定的影响,因此选用隐式彻体力模型。压强的离散化格式采用Presto!格式,体积百分比采用二阶上风格式,其它各项均为一阶上风格式,压力和速度耦合采用SIMPLE算法。计算的松弛因子采用默认值。边界条件设置如下:气相通道为压力入口,总压为4atm,湍流强度2%,水力直径为2mm;液相通道也为压力入口,,总压为5atm,湍流强度2%,水力直径为2mm。出口边界类型为压力出口,为一个大气压,回流湍流强度为1%,水力直径为5mm。

### § 5.3 计算结果分析

迭代计算经过3000步左右收敛,下面为计算结果分析。

#### 1. 静压分布

根据边界条件可知,喷嘴气相入口静压为3atm,液相入口静压为4atm。根据图(5-3)可知,进入混合室后,静压迅速下降到1atm左右。在喷嘴的扇形出口处,有一个微负压区,喷出后又回复到大气压附近。

#### 2. 流场分布

从图(5-4)可以看出,气液混合流从喷口喷出后,在正面形成雾化角比较大的喷雾,而从侧面看则是扁平的喷雾形状。从图(5-5)喷嘴流场的速度矢量图来看,混合室出口为狭长的扇形出口,混合室内有较大的回流,符合气液混合的流场分布。混合流喷出后短距离内由于压缩空气的继续膨胀,速度有一个上升的过程,随着喷射距离的增加,压缩空气已经膨胀完全,所以速度由于阻力作用逐渐衰减,出口处喷雾横向的速度分布呈山峰状,往两侧速度迅速衰减,如图(5-6)所示。

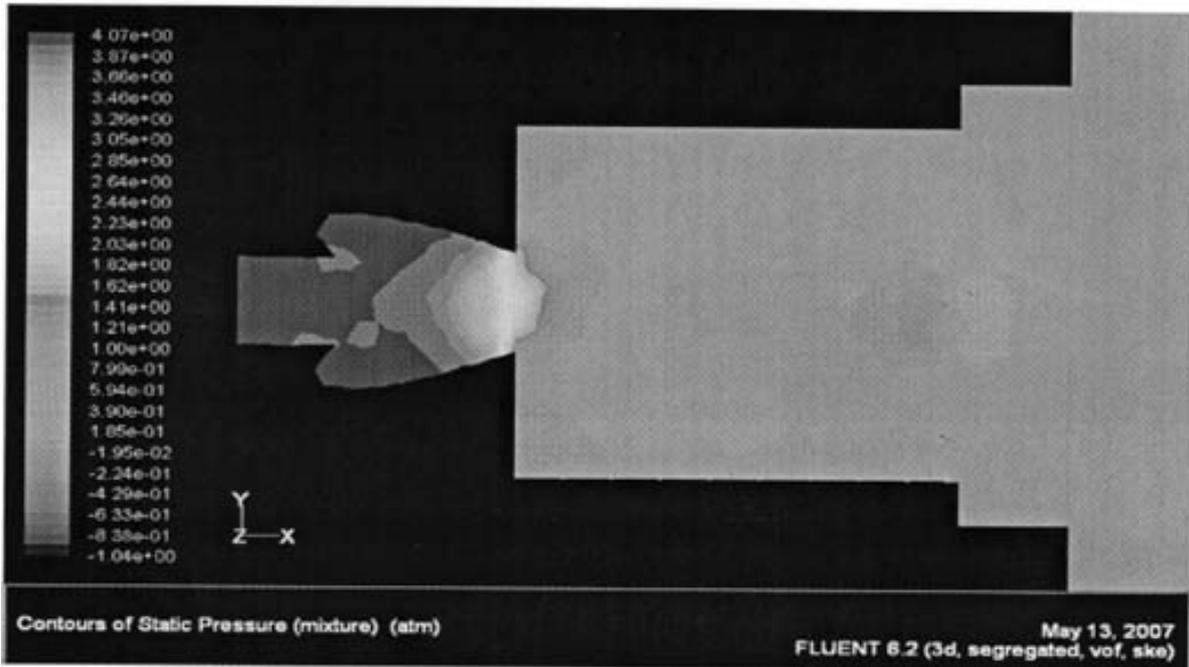


图 5-3 喷嘴内静压分布

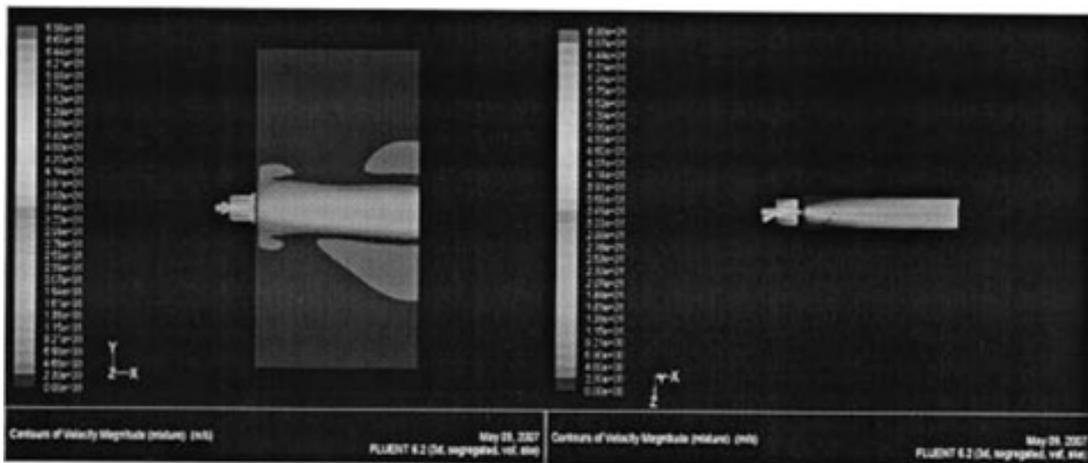


图 5-4 喷嘴纵截面  $z=0$  和  $y=0$  速度等高分布

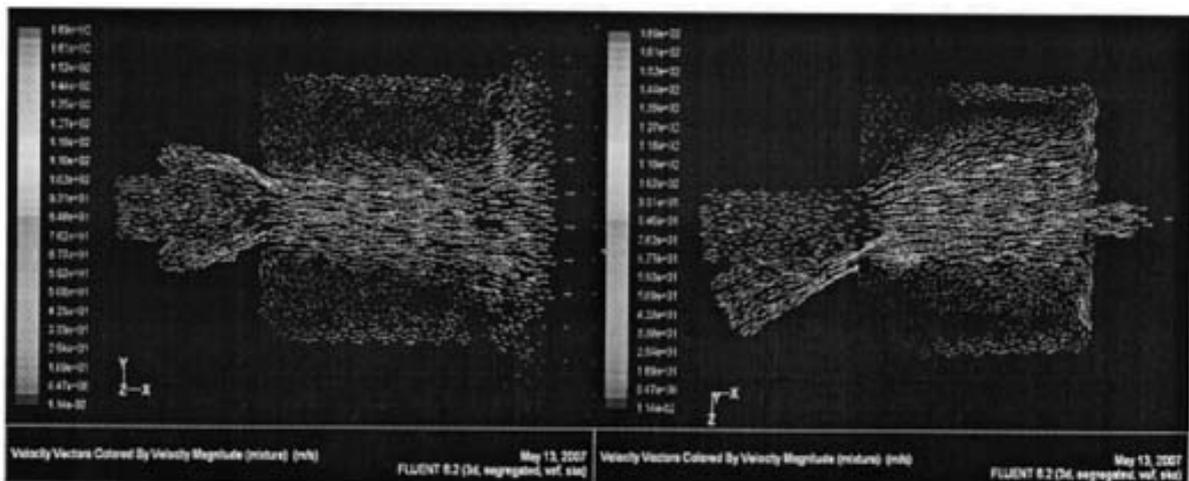


图 5-5 喷嘴纵截面  $z=0$  和  $y=0$  速度矢量图

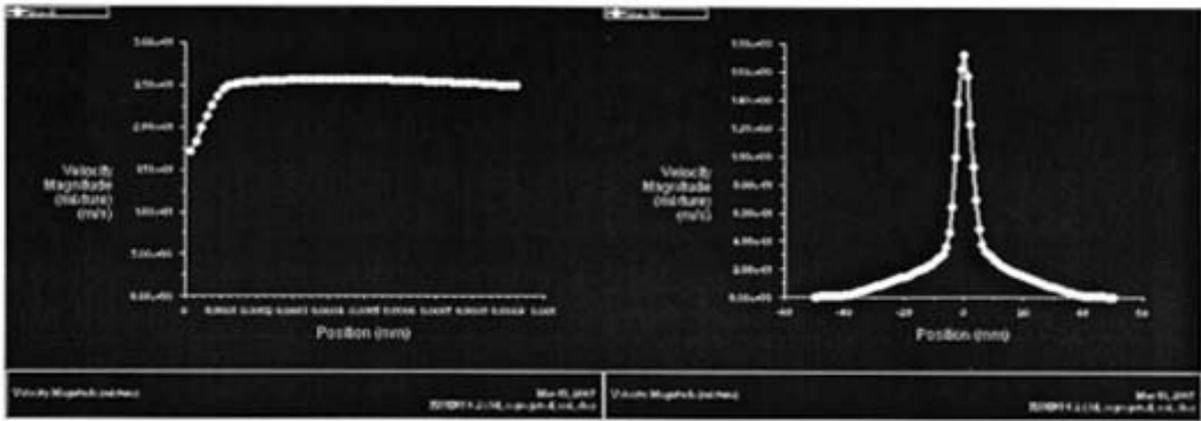


图 5-6 喷嘴出口后沿 x 轴和 y 轴的速度分布

### 3. 液相体积分数分布

图(5-7)是液相体积分数的分布。在气液相遇后，液相渐渐被空气撕裂、粉碎。进入内混室内，压缩气体膨胀使得液体进一步被雾化，不过沿液体来流方向的中心轴线上，液相的体积分数始终比较大，并且随着混合的进行，气相体积分数逐渐增加。到喷嘴出口的地方时，液相的体积分数降低到 0.1，这正反应了射流中水被压缩空气雾化的过程。

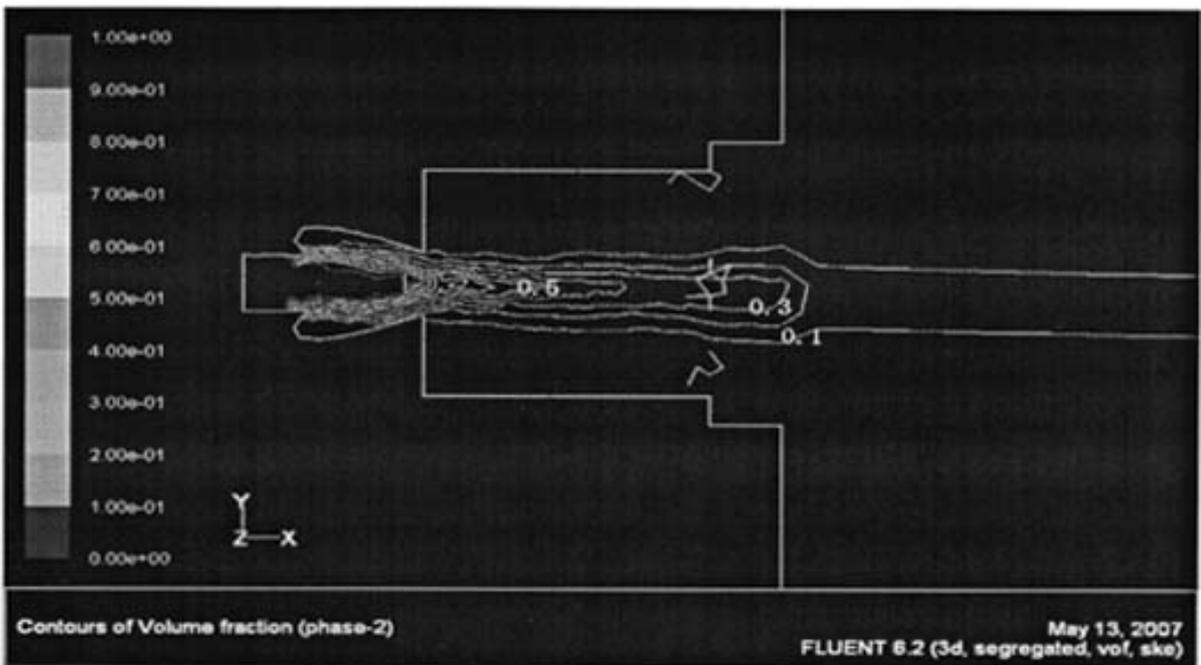


图 5-7 液相体积分数的分布

## § 5.4 本章小结

本章采用 VOF 多相流模型对喷嘴的雾化过程进行模拟，了解到喷嘴喷雾大致上的流场分布和液体被雾化的过程，对前面的喷嘴实验做了一个重要的补充。但是受到 VOF 模型本身的限制，模拟的结果不能很精确的描述射流变形、分裂并粉碎成雾滴的这个详细过程，也无法预测雾化粒径的分布和最终的雾化质量，但是至少可以定性的描述射流的发展趋势。

## 第六章 全文总结和展望

### § 6.1 全文总结

本文首先介绍了 SNCR 喷嘴的应用背景, 了解了 SNCR 喷嘴基本的要求。然后在 Y 型喷嘴的基础上开发了几种扇形气力雾化喷嘴, 并通过实验研究这些喷嘴的雾化特性。通过几种类型喷嘴雾化性能的对比, 找到了 3-7#, 3-9# 这样雾化性能不错的喷嘴, 并进一步开发出了部分内混式雾化喷嘴, 使喷嘴得到进一步的改进。最后用 Fluent 软件对喷嘴进行了数值模拟, 研究了喷嘴雾化过程中的流场分布。主要的研究结果总结如下:

- 1) 喷嘴的气液压力对气液流量有很明显的作用效果, 通过对扇形喷嘴的实验研究, 可以得出液压升高, 液流量基本呈线性升高, 气流量下降。气压升高, 液流量下降, 气流量升高。
- 2) 雾化液滴的 SMD 不仅取决于喷嘴的结构特点, 还和气耗率, 气流速度, 气液压力等有关。比如液压升高, 液流量增大, 雾化粒径 SMD 也会随之增大。
- 3) 某个测量点的不同直径雾化液滴的分布, 呈山峰状, 存在一个百分比最大的粒径范围, 通过这个分布可了解液滴的破碎情况。
- 4) 扇形喷嘴的 SMD 空间横向分布基本呈现“W”形状, 并且随着喷嘴结构不同而有所不同, SMD 纵向分布基本是从喷口到远处慢慢降低, 并趋于稳定。
- 5) 扇形喷嘴的气耗率低, 外混式喷嘴的雾化效果欠佳, 射程较小, 仅有 2.0~2.7m, 但从整体的雾化效果来看, 第三批喷嘴实验的 3-7# 喷嘴、3-9# 喷嘴以及部分内混式喷嘴中的 5-3#、5-4# 效果比较好。
- 6) 环形气孔的雾化效果不如 Y 型内混气孔, 喷嘴出口面积小的喷嘴, 一般雾化粒径 SMD 也小一些, 带有混合室的喷嘴混合效果更好, 因此破碎的效果也要好一些, 有利于液体雾化。
- 7) 扇形喷雾的雾化角对于同一个或同类型的喷嘴来说, 变化并不大, 但不同类型的喷嘴雾化角相差可能很大。在喷嘴出口设置梯形导向槽有利于增加雾化角。
- 8) 最后定型的喷嘴综合了之前各个喷嘴形式的优点。喷嘴采用混合孔结构, 套筒上采用橄榄形槽出口, 实验得到的各项指标都比较好。
- 9) 通过 VOF 多相流模型模拟喷嘴雾化过程, 由计算结果可知, 喷嘴出口的喷射速度沿喷雾横向分布呈“山峰”状, 沿喷射方向先有一个升高, 再逐渐衰减。

## § 6.2 未来工作展望

- 1) 首先, 本文并没有涉及到喷嘴的雾化机理方面的研究, 而是通过设计和实验不断来研究改进, 并反复实验。这不是说机理研究不重要, 而是因为喷嘴的雾化机理十分复杂, 也不是本文的研究重点。也正是如此, 从理论上对喷嘴雾化过程进行研究是未来的难点和重点, 一旦取得突破, 新的理论将对喷嘴的设计和实验研究起到巨大的推动作用。
- 2) 由于本文目的是研究适合 SNCR 系统中使用的喷嘴, 因此只针对和水差不多粘度的尿素溶液的雾化过程研究, 而没有做过雾化喷嘴通入其它粘度液体的雾化过程, 希望以后的实验能得到补充。
- 3) 对于喷嘴结构上的特点, 比如有无混合室, 混合段长度, 出口形状, 有无外混等对最终的雾化效果的影响, 尽管已经有了初步的认识, 但需要进一步深入的比较研究。
- 4) 部分内混式喷嘴的实验研究还只是进行了一部分, 还有大量的研究工作没有完成, 需要对其进行更详细的实验研究和改进。
- 5) 通过用 VOF 多相流模型对扇形气力雾化喷嘴进行了数值模拟, 得到了流场的分布, 但是只能定性的描述喷雾的流场。因此可以尝试用其它多相流模型对扇形喷嘴或部分内混式喷嘴的雾化过程进行比较精确的数值模拟, 以便进行相互比较。

## 参考文献

- [1] 曾汉才. 燃烧与污染[M]. 华中理工大学出版社, 1999.
- [2] 2005年中国统计年鉴, 能源消费总量及构成. 2005, 统计出版社.
- [3] GB13223-2003, 火电厂大气污染物排放标准. 2004.
- [4] 李智森. 燃烧中氮氧化物的形成和防治[J]. 污染防治技术, 1994(11): 6-7.
- [5] Jodal M, Lauridsea T L, Data-Johansen K. NO<sub>x</sub> removal on a coal-fired utility boiler by selective none-catalytic reduction[J]. Environ Prog, 1992, 11(2): 296~301.
- [6] 王文选, 肖志均, 夏怀祥. 火电厂脱硝技术综述[J]. 电力设备, 2006, 7(8): 1~5.
- [7] 朱江涛, 王晓晖, 田正斌. SNCR 脱硝技术在大型煤粉炉中应用探讨[J]. 能源研究与信息, 2006, 22(1): 18~21.
- [8] 蒋扬虎, 丁翠娇, 郑兆平等. 燃烧 NO<sub>x</sub> 生成机理及抑制方法[J]. 武钢技术, 2000, 38(6): 17~21.
- [9] 卢志民. SNCR 反应机理及混合特性研究, 机械与能源工程学院. 2006, 浙江大学博士学位论文: 杭州.
- [10] 樊俊杰, 金晶, 钟海卿. 煤粉燃烧时 NO<sub>x</sub> 析出规律的试验研究[J]. 锅炉技术, 2005, 36(3): 38~41.
- [11] 赵利敏, 吴小梅, 毕良俐等. 燃烧过程 NO<sub>x</sub> 的生成及控制技术[J]. 电站系统工程, 1996, 12(5): 50~52.
- [12] 张强, 李彦鹏, 徐益谦等. 再燃烧还原 NO<sub>x</sub> 机理及其技术发展[J]. 环保技术, 2000, 66(2): 17~19.
- [13] Ron Zevenhoven, P. K. Control of pollutants in flue gases and fuel gases[M]. 2nd ed. 2002: Espoo/Turku, Finland.
- [14] S. C. Hill \*, L. D. S. , Modeling of nitrogen oxides formation and destruction in combustion systems[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2000. 26: 417~458.
- [15] J. A. Miller, C. T. B. , Mechanism and Modeling of Nitrogen Chemistry in Combustion[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1989. 15: 287-338.
- [16] R. P. van der Lans, P. G. , K. Dam-Johansen, Influence of process parameters on nitrogen oxide formation in pulverized coal burners[J]. Progress in Energy and Combustion Science 1997. 23(4): 349~377.
- [17] Molina, A. , Eddings, E. G. , Pershing, D. W. , Sarofim, A. F. , Char nitrogen conversion: implications to emissions from coal-fired utility boilers[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2000. 26(4-6): 507~531.
- [18] Thomas, K. M. , The release of nitrogen oxides during char combustion[J]. Fuel, 1997. 76(6): 457~473.

- [19] 金维平. 燃料型 NO<sub>x</sub> 的生成机理及控制措施[J]. 科技论坛,2005,22:17,26.
- [20] 吴碧君, 刘晓勤. 燃烧过程 NO<sub>x</sub> 的控制技术与原理[J]. 电力环境保护, 2004, 20(2): 29—33.
- [21] 吴碧君, 刘晓勤. 燃烧锅炉低 NO<sub>x</sub> 燃烧器的类型及其发展[J]. 电力环境保护, 2004, 20(3): 24~27.
- [22] Bruce Partlow, P. M., Robert Kaltenback P. E., Tmpa Cuts NO<sub>x</sub> Below 0.11 lb/MBtu with State-of-the-Art Combustion and Controls Technology[J]. 2002.
- [23] Bruce Partlow P. E., P. M., Virgil Joffrion Experience with advanced controls when combined with an Ultra Low NO<sub>x</sub> Combustion System[J]. 2004.
- [24] 钟秦. 燃煤烟气脱硫脱硝技术及工程实例[M] 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [25] 黄伟, 曾汉才. 分级燃烧对 NO<sub>x</sub> 排放的试验研究[J]. 电站系统工程, 2005, 21(4): 8~10.
- [26] Douglas J Smith, Coal-fired plants reduce NO<sub>x</sub> emissions with staged combustion[J]. Power Engineering; Oct 2001; 105, 10; 71~74.
- [27] 徐华东, 罗永浩, 王恩禄. 再燃烧技术及其在我国的应用前景[J]. 动力工程, 2001, 21(4): 1320~1323.
- [28] 王恩禄, 彭玲, 罗永浩等. 燃煤电站锅炉 NO<sub>x</sub> 排放的控制措施[J]. 锅炉技术, 2003, 34(5): 48~52.
- [29] 王恩禄, 张海燕, 罗永浩等. 低 NO<sub>x</sub> 燃烧技术及其在我国燃煤电站锅炉中的应用[J]. 动力工程, 2004, 24(1): 23~28.
- [30] 姜涌, 赵爱虎, 许睿. 低 NO<sub>x</sub> 燃烧技术简介[J]. 电站系统工程, 2005, 21(1): 61~62.
- [31] White Paper: Selective Catalytic Reduction control of NO<sub>x</sub> emissions[J], I. SCR committee institute of clean air companies, Editor. 1997.
- [32] DOE, US, Control of nitrogen oxide emissions: selective catalytic reduction (SCR) [J], T. R. Clean Coal Technology, Editor. 1997.
- [33] Lucas, D., Brown, N. J. Characterization of the Selective Reduction of NO<sub>x</sub> by NH<sub>3</sub>[J]. Combustion and Flame, 1982. 47: 219-234.
- [34] 路涛, 贾双燕, 李晓芸. 关于烟气脱硝的 SNCR 工艺及其技术经济分析[J]. 现代电力, 2004, 21(1): 17~22.
- [35] Jost O L Wendt, William P Linak, Hybrid SNCR-SCR technologies for NO(x) control: Modeling and experiment[J]. American Institute of Chemical Engineers. AIChE Journal; Nov 2001; 47, 11; 2603~2617.
- [36] 曹建明. 喷雾学[M]. 北京机械工业出版社, 2005. 5.
- [37] 候凌云, 候晓春. 喷嘴技术手册[M]. 北京: 中国石化出版社, 2002.
- [38] 秦裕琨. 燃油燃气锅炉实用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [39] Synthesis Gas Generation, 3743606, July. 3, 1973, United States Patent Office.
- [40] Dual Air-blast Fuel Nozzle, 4139157, Feb. 13, 1979, United States Patent Office.

- [41] Liquid Atomizing Nozzle,6786430 B2,Sep. 7 2004, United States Patent Office.
- [42] 雾化喷嘴, 92230052. 6, 1993. 2. 22, 中华人民共和国国家知识产权局.
- [43] 带有旋流器的三通道组合式水煤浆气化喷嘴, 95111750. 5,1996. 6. 26, 中华人民共和国国家知识产权局.
- [44] 气液混合相气化喷嘴及使用方法, 200410025866. 4, 2005. 8. 3, 中华人民共和国国家知识产权局.
- [45] 旋转型气-液雾化喷嘴, 200620022838 . 1, 2007. 4. 11, 中华人民共和国国家知识产权局.
- [46] 交错喷雾式液体雾化喷嘴, 200610104706. 8, 2007. 3. 28, 中华人民共和国国家知识产权局.
- [47] 中心喷雾多层旋转式液体雾化喷嘴, 200610104673. 7, 2007. 4. 11, 中华人民共和国国家知识产权局.
- [48] 梁国伟, 蔡武昌等. 流量测量技术及仪表. 北京机械工业出版社, 2002.
- [49] 陈惠钊. 粘度测量[M]. 中国计量出版社, 1994. 6.
- [50] 田春霞, 仇性启, 崔运静等. 喷嘴雾化技术进展[J]. 工业加热, 2005, 34(4):40~43.
- [51] 秦军, 陈谋志, 李伟锋, 刘海峰等. 双通道气流式喷嘴加压雾化的实验研究 [J]燃烧科学与技术. 2005,11(4):384~387.
- [52] 崔彦栋, 气力式喷嘴雾化机理研究及水煤浆气化喷嘴的开发. 机械与能源工程学院. 2006, 浙江大学硕士学位论文: 杭州.
- [53] Rizk N K, Lefebvre A H. Spray Characteristics of Plain-jet Air-blast Atomizers [J]. Trans ASME J Eng Gas Turbines Power,1984,106(3): 634~638.
- [54] Lefebvre A H. Energy Considerations in twin-fluid atomization [J]. Engineer for Gas Turbines and Power, 1992, 114(1):89~96.
- [55] 陈斌, 郭烈锦, 张西民等, 喷嘴雾化特性实验研究[J]. 工程热物理学报,2001,22(2):237~240.
- [56] 马其良, 张松寿, 王国华等. 大容量 Y 型气体雾化油喷嘴的结构特点及冷态试验研究[J]. 动力工程, 1998, 18(5): 32—35.
- [57] 刘海峰, 李伟锋, 陈谋志, 大液气质量流量比双通道气流式喷嘴雾化滴径[J]. 化工学报,2005,56(8):1462~1466.
- [58] 崔彦栋, 黄镇宇等. 两通道气力式喷嘴雾化特性的研究[J]. 电站系统工程,2006,22(5):8~11.
- [59] 龚景松, 傅维标等. “旋转型气-液雾化喷嘴” 流量特性的实验研究[J]. 热能与动力工程, 2004, 19(4):376~379.
- [60] 龚景松, 傅维标等. 旋转型气-液雾化喷嘴的雾化特性研究[J]. 热能与动力工程, 2006, 21(6):632~639.
- [61] Duane Swoboda, Kevin Largis. SNCR Lance Cuts NOx[J]. Power Engineering; Nov 1998; 102, 11; 66~73.

- [62]王智化. 不同温度下炉内喷射氨水脱除 NO<sub>x</sub> 的模拟与试验研究[J]. 燃料化学学报, 2004, 32(1): 48~53.
- [63]Christine Pagcatipunan, Rudi Schick. Maximize the Performance of Spray Nozzle Systems[J]. Chemical Engineering Progress; Dec 2005; 101, 12; 38~44
- [64]Peter Welander, Terra L Vincent. Selecting the Right Spray Nozzle[J]. Chemical Engineering Progress; Jun 2001; 97, 6; 75~79
- [65]马其良, 毕政益等. 结构及运行参数对内混喷嘴压力的影响研究[J]. 热能动力工程, 2006, 21(2): 183~185.
- [66]李天友, 叶世超, 李黔东等. 压力式喷嘴雾化特性研究[J]. 化工装备技术, 2006, 27(3): 27~28.
- [67]龚景松, 傅维镛. 一种新型喷嘴的提出及其流量特性的研究[J]. 工程热物理学报. 2005, 26(3): 507~510.
- [68]杨学军, 严荷荣, 周海燕等. 扇形雾喷嘴的试验研究[J]. 中国农机化, 2004, 1: 39~42
- [69]徐初力, 唐传忠等. 某型喷嘴流量特性的数值模拟[J]. 节能技术, 2006, 24 (137): 287~289
- [70]韩占忠等. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京理工大学出版社, 2005: 19~22.

## 致 谢

在本论文完成之际，回想两年来的硕士学习生活，有些许感慨。在这里学到了别的地方学不到的东西，更是认识了许多对科研默默奉献、为了理想默默奋斗的人，影响着我，也激励我继续努力向上！这这里我衷心的感谢您们，也祝福您们前程似锦！

首先要感谢周俊虎教授和刘建忠教授在科研工作和生活中的言传身教和悉心指导。周俊虎教授不但理论知识渊博，而且在课题和工作生活上都给我做了很多细致的指导。您的严格要求使我改变了许多不好的习惯，从一个稚气的本科生，成为今天可以走进社会适应社会的有用之材。刘建忠教授严谨踏实的学术作风、丰富的实践经验将是我终生学习的榜样。日后承担起科研工作的重责，必将时刻紧记各位导师的教导，继承发扬浙大优秀的学风！

感谢杨卫娟讲师在实际的科研中给予我的许多具体指导和时时的帮助鼓励，让我能按时完成硕士阶段的学习和科研。感谢我的师兄卢志民博士，两年来在你的细心引导下，使我比较顺利的过渡到硕士阶段的学习，希望日后还能有再向你学习的机会。也感谢邱坤赞德育老师，在两年研究生的学习生活当中，给予我们的关怀照顾。

同时感谢岑可法院士、曹欣玉教授、黄镇宇教授、赵翔教授、周志军副教授、程军副教授等老师给予的指导和组里的岑师傅、童师傅、李师傅、熊师傅在实验期间的辛苦劳动，使实验得以及时顺利的完成。感谢同组的李冬青硕士、张国平硕士、郝勇硕士、刘彩芳硕士、彭娜硕士、叶琳硕士对我的支持和热心帮助。也非常感谢林俊光师弟、禹立坚师弟在实验时给予的热心帮忙。

特别要感谢父母、哥哥在我外出求学的这些年里对我毫无怨言的支持和鼓励。也感谢我生命里的所有亲人和朋友，是你们成就了今天的我。

周林华

2007年6月于浙大求是园