

学校编码: 10384

分类号__密级__

学号: 32020131152872

UDC__

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

基于 XFlow 软件的离心式喷嘴
雾化特性分析

Study of the Swirl Atomizer Performance
Based on the XFlow

宋 歌

指导教师姓名: 吴榕副教授 邢菲副教授

专业名称: 航空宇航推进理论与工程

论文提交日期: 2017 年 月

论文答辩日期: 2017 年 月

学位授予日期: 2017 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2017 年 4 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘要

离心式喷嘴在各类发动机之中有着大量的应用，究其原因，是由于其具有优良的雾化性能且容易制造、价格低廉，在航空领域应用甚广。为了使航空发动机燃烧质量更高，离心式喷嘴需要被严格地设计以达到所需要的雾化效果。因此，我们需要深入地研究喷嘴几何结构对于雾化性能的影响，从而为喷嘴的制造提供指导性的意见。

在本篇论文中，通过对数值计算软件 XFlow 的应用，可以得到离心式雾化喷嘴内部的流场运动分析。这款软件的理论基础是格子波尔兹曼方法，而该方法是利用介观理论来描述流体的运行状况，通过这种介于宏观和微观的研究方法，从另外一个角度来描述所要解决的问题。通过与辛辛那提大学所制作并进行实验的大尺寸离心式喷嘴模型的实验数据进行对比，本篇论文中所使用的数值计算方法得到了有效验证。利用 XFlow 软件模拟所得到的喷嘴出口处的液膜厚度、雾化锥角以及其他雾化特性参数均与实验数据吻合良好，误差可以控制在 10% 以内，这一误差小于理论方法所推导的计算结果。

通过这一验证过的数值计算方法，进一步可以计算离心式喷嘴几何结构对于喷嘴雾化特性参数的影响。在本篇论文第四章中，关于离心式喷嘴主要研究的几何变量有：离心式喷嘴中旋流室柱段的长径比 (L_s/D_s)、喷嘴出口段的长径比 (l_o/d_o) 以及旋流室直径与喷嘴出口直径之比 (D_s/d_o)。其中旋流室直径与喷嘴出口直径之比对雾化效果的影响最大。本文所讨论的几何模型，其入口状态均保持恒定质量流量。论文中所获取的喷嘴雾化特性参数主要包括喷嘴出口处的液膜厚度 t 和雾化半角 θ 。根据所获取的数值结果计算离心式喷嘴的索太尔平均直径，通过这一参数可以较好地分析并判断喷嘴的雾化性能。

关键字：离心式喷嘴；格子波尔兹曼方法；XFlow；数值模拟

Abstract

Swirl atomizers have a great use in air-breathing gas turbine engines, especially in aerospace propulsion area, as they have excellent atomization features. Meanwhile, it is cheaper to manufacture swirl atomizers than other atomizers. To control emissions, it is essential to design some swirl atomizers that can produce spray with a particular droplet size distribution. Thus, the influence caused by different atomizer geometries should be well explored.

In this dissertation, a new CFD software, XFlow, is utilized to predict the flow in swirl atomizers. This software is based on the Lattice Boltzmann method which is a mesoscopic way to describe the behavior of liquid and gas. This CFD code is validated with experimental data from the University of Cincinnati. The data agree well with experimental data for the film thickness at the exit, spray cone angle, and some other parameters. The numerical results are better than the results of empirical equations and theoretical methods.

Using this software, XFlow, a particular study on swirl atomizer performance is proceeded. Different geometric parameters have been studied in this dissertation, such as the ratio of length to diameter in the swirl chamber (L_s/D_s), the ratio of length to diameter in orifice (l_o/d_o) and the swirl chamber to orifice diameter ratio (D_s/d_o). The swirl chamber to orifice diameter ratio D_s/d_o has the greatest impact on atomization characteristics. The atomizer performance is detailed in term of film thickness at the exit (t), spray cone half angle (θ) and Sauter Mean Diameter (SMD). By analyzing these atomization characteristics, we can provide some suggestions on manufacturing swirl atomizers.

Key Words: Swirl Atomizers; LBM; XFlow; Numerical Simulation

目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
第一章 绪论	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 离心式雾化喷嘴简介.....	1
1.3 离心式喷嘴国内外研究现状.....	5
1.3.1 国外研究现状	5
1.3.2 国内研究现状	7
1.4 本文研究内容.....	9
第二章 基于格子玻尔兹曼方法的 XFlow 简介.....	11
2.1 格子玻尔兹曼方法.....	11
2.1.1 格子气自动机	11
2.1.2 格子玻尔兹曼方法	13
2.2 流体力学分析工具 XFlow.....	15
2.2.1 XFlow 优点	17
2.2.2 关键技术与特点	19
第三章 离心式喷嘴的数值计算方法	21
3.1 喷嘴物理模型.....	21
3.2 XFlow 计算设置	24
3.2.1 几何模型的设置	24

3.2.2 边界和计算条件的设置	25
3.3 喷嘴雾化计算验证.....	26
3.3.1 数值计算方法结果	26
3.3.2 喷嘴出口雾化特性参数获取	33
3.3.3 实验与数值方法雾化效果对比	36
3.4 本章小结.....	38
第四章 离心式喷嘴的雾化特性分析.....	39
4.1 离心式喷嘴重要参数分析.....	39
4.2 离心式喷嘴几何参数对于雾化特性的影响	41
4.2.1 旋流室长径比对雾化效果的影响	41
4.2.2 喷嘴出口长径比对雾化效果的影响	45
4.2.3 旋流室直径与喷嘴出口直径之比对雾化效果的影响	47
4.3 离心式喷嘴液滴直径的研究.....	50
4.3.1 液滴直径	50
4.3.2 索太尔平均直径	52
4.4 本章小结.....	58
第五章 结论与展望	60
5.1 工作总结.....	60
5.2 工作展望.....	60
参考文献	62
攻读硕士期间发表的论文	65
致谢.....	66

Table of Contents

Chiese Abstract	I
English Abstract.....	II
Chinese Content	III
English Content.....	V
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Background and Significance.....	1
1.2 Brief Introduction of Simplex Atomizers.....	1
1.3 Overseas and Domestic Research Status.....	5
1.3.1 Overseas Research Status of Swirl Atomizers	5
1.3.2 Domestic Research Status of Swirl Atomizers.....	7
1.4 Main Tasks of the Thesis	9
Chapter 2 Lattice-Boltzmann Code XFlow.....	11
2.1 Lattice Boltzmann Method.....	11
2.1.1 Lattice Gas Automata	11
2.1.2 Lattice Boltzmann Method	13
2.2 XFlow.....	15
2.2.1 Advantages	17
2.2.2 Key Techniques	19
Chapter 3 Numerical Calculation of Pressure-swirl Atomizer	21
3.1 Physical Model.....	21
3.2 Preprocessing.....	24
3.2.1 Geometry Parameters	24

3.2.2 Simulation Parameters	25
3.3 Comparison.....	26
3.3.1 Results for Constant Mass Flow Rate through the Atomizer	26
3.3.2 Atomizer Performance	33
3.3.3 Comparison with Experimental Data and Numerical Results	36
3.4 Chapter Summary	38
Chapter 4 Comprehensive Study of Atomizer Performance.....	39
4.1 Key Parameters	39
4.2 Effects of Geometric Parameters on Atomizer Performance.....	41
4.2.1 Effect of Variation in L_s/D_s	41
4.2.2 Effect of Variation in l_o/d_o	45
4.2.3 Effect of Variation in D_s/d_o	47
4.3 Research of Droplet from Pressure-swirl Atomizer.....	50
4.3.1 Droplet Diameter	50
4.3.2 Sauter Mean Diameter	52
4.4 Chapter Summary	58
Chapter 5 Conclusion and Future Work.....	60
5.1 Conclusion.....	60
5.2 Future Work	60
References.....	62
Appendix.....	65
Acknowledgement	66

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

在整个航空工业的发展历史当中，飞机性能的巨大提升从来都是伴随着航空发动机的技术革新，因此，航空发动机对于飞机整体而言，正如心脏之于人体。而燃烧室作为航空发动机中最为重要的组成部分之一，其燃烧性能的优良与否，对于航空发动机的燃烧效率产生至关重要的影响^[1]。燃油通常经过雾化喷嘴进入燃烧室，在燃烧室中形成雾化液滴，其目的便是使燃油能够在较短的时间内与空气进行掺混并燃烧，进而达到能够高效利用燃料的目的^[2]。因此，如何能够提高喷嘴的雾化质量，进而提高燃烧室的燃烧质量，一直以来，对于航空发动机的研究而言，都显得尤为重要。

对于燃烧而言，将燃料进行雾化，其最主要的目的就是增大液体燃料的接触面积，从而能够获得较高速率的热量传递，从而使得燃料获得更好的蒸发并与空气进行混合，减少燃料液滴尺寸的同时也能够使得点火更加容易，从而有更大的燃烧区域以及较少的污染物排放^[3]。因此，这就要求我们对于雾化过程有足够的认识，同时，对于液体在整个雾化过程中的流场分布以及流体的运动有充分的了解。为此，我们需要对整个雾化的过程进行模拟，而模拟雾化过程是一项非常具有挑战性的工作，因为雾化过程受许多复杂因素的影响，且结果分析非常繁琐。目前所使用的方法除了理论计算和实验研究之外，最为广大科研学者所推崇的方法便是数值计算方法。本篇论文将利用数值计算方法着重分析单油路离心式喷嘴的雾化特性及其影响因素。

1.2 离心式雾化喷嘴简介

从广义上来说，喷嘴的分类可大致根据其用途、功能、材料等不同条件来进行^[4]，具体的分类情况可以通过下图 1.1 表示出来。

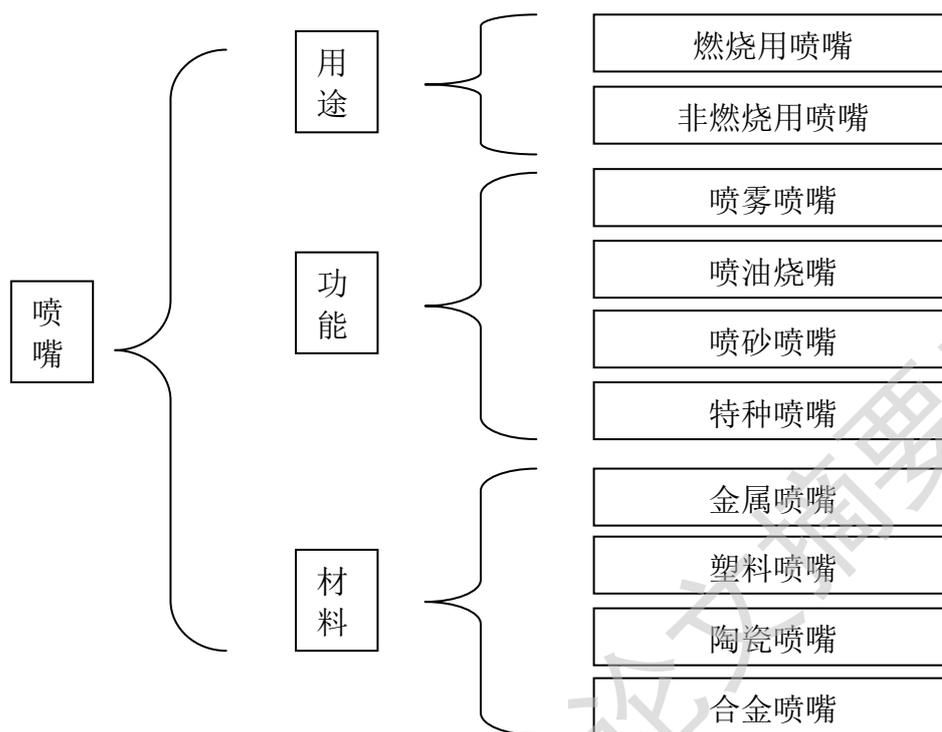


图 1.1 喷嘴分类简图

按照雾化所形成的不同原理，喷嘴主要可以分为直射式喷嘴、气动喷嘴、离心式喷嘴等，不同的工作机理导致各自具有不同的优缺点。

1、直射式喷嘴

直射式喷嘴被广泛用于液体入射气流的使用当中，其中最典型的应用莫过于柴油机的喷油器，其原理和结构是其他类型喷嘴的基础。

直射式喷嘴内部的液体在高压下以很高的初速度被喷入到空气环境当中，由于液体在喷射时受到的扰动以及与周围气体之间所发生的相互作用，入射流很快破碎行成细小的雾化液滴。由于直射式喷嘴的几何造型极其简单，同时制造成本比较低廉，能够被流水化生产，早期便被大量用于柴油机、液体火箭引擎以及喷射引擎的再燃装置^[5]。但是，它也有其自身的缺陷，比如较窄的雾化锥角，以及在低流量下有较差的雾化效果等缺点。

2、气动喷嘴

气动喷嘴的工作原理是外加一个高速气流与喷嘴中喷出的液体产生相互之间的剪切及挤压作用，从而使液体产生雾化。气动喷嘴所喷出的油雾，其雾化质

量好、液滴均匀、发动机的工况对其影响较小。但是这种喷嘴的缺点是雾化范围较小,气流对于雾化效果的影响比较大,当气流速度较小时会出现燃烧不充分的情况^[6]。该种喷嘴在重型工业、能源开采等行业中发挥了重要作用。气动喷嘴外形结构简图如图 1.2 所示。

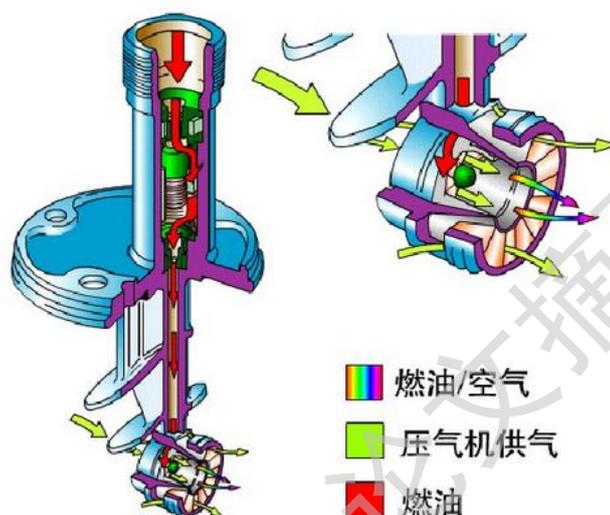


图 1.2 气动喷嘴外形结构图

3、离心式喷嘴

本文中所讨论的离心式喷嘴在实际使用中具有大量的应用,在燃油系统的喷射当中,它常常被用于航空发动机、船用发动机、燃气轮机以及工业锅炉等燃烧设备,在呼吸系统的治疗中用于给药作用,同时还可用于油漆的喷涂、加湿系统以及农业喷洒^[7]。离心式喷嘴之所以能够得到如此广泛的应用,其特点还是比较明显的,诸如构造简单,易于制造,甚至是较小尺寸的喷嘴也可以制造出来,同时它还具有足够的可靠性,良好的雾化性能,通道不易被阻塞等优点,离心式喷嘴跟其他种类的喷嘴比起来,可以产生直径更为细小的雾化液滴。正因为有了如此众多的优点,离心式喷嘴才能够得到如此大量的应用,成为一个在众多行业中都使用广泛的器件^[8]。



图 1.3 离心式喷嘴外形结构图

离心式喷嘴的外形结构简图如图 1.3 所示，通常我们所说的离心式喷嘴由入口部分、旋流室以及出口部分这三部分组成，在此基础之上，经常有一些改进结构，比如在出口处加增一个喇叭状扩张段，目的是为了能够按照扩张段的运行轨迹得到更为理想的雾化锥角，而某些切向旋流槽则设计成不垂直于旋流室轴线的方向，往往与轴线形成一定的角度，从而改变入射倾角。但无论喷嘴造型怎样千变万化，其基本的工作原理是将通过外部压力将液体经过切向槽压入旋流室，在旋流室内部液体沿喷嘴内壁面旋转，由于离心力的存在，沿旋流室中心线处会产生较低的气压，外部空气从而可以进入喷嘴内部产生空气柱漩涡，而液体经锥形收缩段收缩后，排出喷口。当液体排出喷口后会形成圆锥形的液膜，由于离心力的作用沿放射状方向发散，一旦液体离开并远离喷嘴后，液体薄膜逐渐变薄并且变得不再稳定，液膜之间的速度差以及周围空气所产生的气动力会使得液膜的振动幅度加大，而振动幅度逐渐变大直到达到临界值并产生破碎^[9]。目前能够表示喷嘴雾化效果的参数主要有雾化锥角、喷嘴出口处液膜厚度、雾化液滴的平均直

径等参数。喷嘴雾化液滴的直径直接影响着后期液体与空气的掺混过程，因此，为了能够使得燃油和空气混合良好，燃油喷嘴必须能够在燃烧室预定的位置雾化出满足要求的液滴形态^[10]。

虽然离心式喷嘴旋流室的结构非常简单，但是其内部的流场运动却极为复杂，流场内部是两相的不稳定湍流运动，内部区域有涡旋回流结构，而其中的空气柱又产生了气液两相交界面，这更增加了运动的不稳定性。实际当中所使用喷嘴的几何尺寸非常小，出口处的直径要小于 500 微米，这导致了直接测量流场运动会非常的困难，为了能够模拟其中的流体运动，追踪到气液两相交界面，通常会将离心式喷嘴模型进行等比例的放大。

辛辛那提大学航空航天学院燃烧诊断实验室利用树脂玻璃制作了大尺寸的喷嘴模型^[11]，并通过先进的影像提取技术，获得了许多有用的实验信息。如今，工业方面的急切需求迫使研究者们利用先进的数值计算工具来对燃烧室进行设计，而数值计算方法的广泛使用也正源于当代科研设备运算能力的提高以及其计算的高准确性。现在依靠过去的半经验公式来对模型进行设计已变得不再现实，这是由于大多数的半经验公式只适用于某些情况下特定的几种喷油器，因此他们的应用范围非常的有限。

综上所述，建立一个理论与实验相统一的模型势在必行，这样才能通过联系离心式喷嘴内部流场的实际运动来更为准确地设计出所需的雾化效果，为航空发动机提供不竭的动力。

1.3 离心式喷嘴国内外研究现状

1.3.1 国外研究现状

关于离心式喷嘴的理论研究，早在二十世纪中期，Abromvich 便利用最大流量假设理论推导出了有关离心式喷嘴内部运动状况的几何特性参数，同时他还得到了有关流量系数、雾化锥角等参数与几何特性参数之间的关系，而该项研究成果一直为广大研究者们所利用^[12]。Novikov 则利用伯努利公式推导出了有关喷嘴出口液膜厚度的公式，从而判断液膜厚度是一个有关于喷嘴几何参数的函数^[13]。这些理论推导出的结果对后期的研究影响深远。

首先对于离心式喷嘴管内状况进行实验研究的是 Horvay 和 Leuckel 两位科学家，他们利用某种特殊材料作为折射介质，通过激光多普勒测速仪测量内部流场的轴向及切向速度，证明了其中的湍流状态^[14]。Holtzclaw 和 Jeng 按照一定的几何外形专门制作出离心式喷嘴模型，利用 PIV 技术测定喷嘴内部的速度场，证明喷嘴内部气流的运动方向是同向的，但在旋流室内，液体除了向喷嘴出口喷出之外，同时还存在大量的回流区域^[15-16]。塔考等人通过直接测量法获得喷嘴出口处的液膜厚度，证明了液膜厚度在整个垂直于喷嘴轴线的面上所产生的径向变化并不一致，只有当流量超过某一极限值时，径向方向的变化方才可以忽略^[17]。Cooper 则通过大量的实验研究发现，由于离心式喷嘴内部流场形成大量的小涡流结构，使得喷嘴内部的流动变得不再稳定^[18]。Taeock 利用光学诊断仪器以及 CCD 相机观察了离心式喷嘴内部的流动情况，研究了流场脉动对于喷嘴雾化锥角、液膜厚度等雾化特性的影响，发现其具有一定的相位差，且振幅不同，同时根据喷嘴出口的不稳定表现进一步证明喷嘴内部的脉动所导致的不稳定现象^[19]，最终得到如图 1.4 所示的液膜破碎截图，图中较为清晰地展现出了喷嘴出口液体薄膜由不稳定状态到破碎的整个发展过程。而这些通过实验手段所取得的研究成果，对于离心式喷嘴整体的理论结论起到了很好的佐证作用，从中还可以进一步提取所需的数据结论，对后期的探索与研究有着极大的帮助。

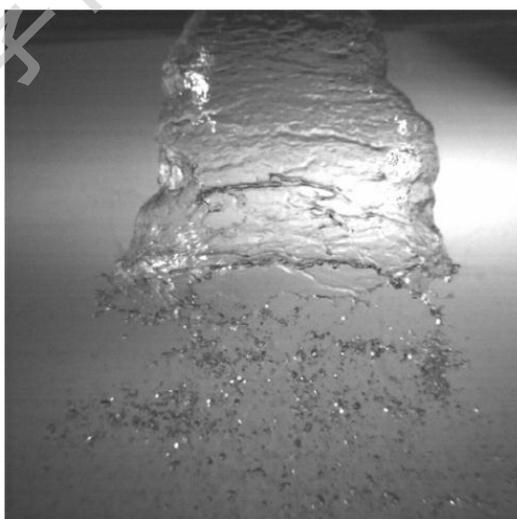


图 1.4 喷嘴出口液膜破碎图

在针对离心式喷嘴的研究当中，Lefebvre 所取得的成果颇丰，他对离心式喷

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库