

学校编码: 10384

分类号 _____ 密级 _____

学号: 32020121152690

UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

谐振腔式声能雾化喷嘴的研究

Research of Resonator-sound-generator Atomizing Nozzle

邢 盼

指导教师姓名: 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: 2015 年 4 月

论文答辩时间: 2015 年 5 月

学位授予日期: 2015 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2015 年 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

摘 要

喷嘴技术的应用范围几乎包含所有工业领域、农业生产、交通运输以及人们的日常生活。作为必备组件在燃烧装置上的应用尤为重要。以往对于新型的流体动力式超声波雾化喷嘴研究表明：这类喷嘴的雾化粒径小（小于 $50\mu\text{m}$ ）且分布均匀性好，对实现低氧燃烧、减少烟气中烟尘和氮氧化物排放有实质性的意义。因此本文以谐振腔式声能雾化喷嘴为研究对象，通过设计结构，利用 FLUENT 软件对其流场、声场以及雾化性能进行多参数的数值模拟，通过雾化性能的变化规律分析了其雾化机理。

研究首先基于哈特曼发声哨的原理设计了谐振腔式声能雾化喷嘴。通过对喷嘴高速射流流场和声场模拟，分析了谐振腔式声能雾化喷嘴的流场特性和发声机理。计算结果表明：将谐振腔放置于“不稳定区间”时会产生强声波；压比和冲击距离是影响强声波产生的主要因素。本文的计算在冲击距离为 7.5mm ，压比为 3.5 时产生了 10kHz 左右的声波，达到了利用高速气流激发腔体振动而产生声波频率在 10kHz 左右的设计要求。

在流场和声场模拟结果的基础上，本文又进行了谐振腔式声能雾化喷嘴的雾化模拟，并通过雾化粒径分布情况及液滴 SMD 分析了喷嘴的雾化性能。结果表明：谐振腔的存在大大提高了喷嘴的雾化效果；液体入射角、冲击距离、谐振腔的深度以及气液比对喷嘴的雾化效果有着不同程度的影响，其中液体入射角、冲击距离产生的影响尤为明显。本文计算在入射角为 35.26° 、冲击距离为 7.5mm 时达到了最好的雾化效果，得到的液滴 SMD 为 $10\mu\text{m}$ 左右。

最后基于喷嘴流场的振荡特性和液滴的振荡特性对喷嘴进行了雾化机理的探究，在本文的喷嘴和计算条件下，得出液滴的振荡频率与气流的振荡频率达不到共振的条件，在气液共振这方面雾化机理的研究还需要更多的研究和试验进行探究和验证。

关键词：喷嘴；超声波雾化；谐振腔；振荡；数值模拟

Abstract

The applications of nozzle technology almost include all the industrial sectors, transportation, agricultural production and people's daily lives. Among which the application to combustion devices is particularly important. The previous studies on the new hydrodynamic ultrasonic atomizing nozzle have shown that: the nozzle decrease the particle size (smaller than $50\mu\text{m}$) and meliorate the distribution, which are substantive significance to the realization of low-oxygen combustion and reducing the emission of smoke soot and nitrogen oxide pollutants. Therefore, this paper use resonator-sound-generator atomizing nozzle as the research object. Design its structure and do multi-parameter numerical simulations of its flow field, sound field and atomization performance by the use of FLUENT. And analyze the atomization mechanism though the atomization performance variation.

Firstly, designing a resonator-sound-generator atomizing nozzle based on the principle of the Hartmann acoustic generator. Then analyze the flow field characteristics and the vocal mechanism of the nozzle by the numerical simulation of flow field and sound field of the high-speed jet. The results show that: the nozzle will produce strong acoustic wave when the resonator is placed in the "instability zone". The pressure ratio and impinging distance are the key factors to generate the strong acoustic wave. In the calculation of this paper, the nozzle produce a sound wave of about 10kHz when the impinging distance is 7.5mm and the pressure ratio is 3.5, which meet the design requirement that generate sound wave of about 10kHz by using the high-speed jet to excite vibration of the resonator.

On the basis of the simulation results of the flow field and sound field, the paper conducts atomization simulation of the resonator-sound-generator atomizing nozzle. And analyze its atomization performance though the particle distribution and droplets SMD. The results show that: the presence of the resonator greatly improve the atomization performance of the nozzle. The incident angle of liquid、the impinging distance、the depth of resonator and the gas-liquid ratio have different degree influences on the atomization performance of the nozzle. Among them the effects of the liquid incident angle and the impinging distance are particularly evident. In this paper, the atomization performance achieves the best of which the droplets SMD is

about $10\mu\text{m}$ when the incident angle is 35.26° and the impinging distance is 7.5mm .

Finally, the paper explore the atomization mechanism of the nozzle based on the oscillatory characteristics of the flow field and the droplets. Under the conditions of the nozzle and calculation of this paper, the result turns out that the oscillation frequency of droplets and airflow cannot reach the resonance conditions. And the atomization mechanism in the area of resonance still needs more researches and tests to explore and verify.

Keywords: nozzle; ultrasonic atomization; resonator; oscillation; numerical simulation

厦门大学博硕士学位论文摘要库

符号说明

ρ : 密度

u 、 v 、 w : 速度矢量

μ : 动力粘度

p : 静压

F_i : 模型源项或自定义源项

τ_{ij} : 应力张量

j' : 组分

J_j : 组分扩散通量

S_h : 包含化学反应热和其他体积热源的源项

m_j : 质量分数

h_j : 焓

k : 湍动能

ε : 耗散率

G_k : 平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项

G_b : 浮力引起的产生项

Y_M : 可压湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响

μ_t : 湍流粘性系数

$C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$: 经验常数

σ_k : 与 k 对应的 Prandtl 数

σ_ε : 与 ε 对应的 Prandtl 数

S_k 、 S_ε : 用户定义的源项

η : 平均流时间尺度和湍流时间尺度的比值

C_μ : 经验常数

d 、 D : 喷头直径; 液滴直径

l : 喷嘴长度

r : 喷头内部倒角

p_1 、 p_2 : 喷嘴上下游压力

ρ_l : 液体密度

p_v : 液体饱和蒸汽压

Re_h 、 Re_l : 雷诺数

K : 空穴数

C_c : 收缩系数

C_{ct} : 理论常数

C_d : 流量系数

C_{du} : 不考虑粘度影响的流量系数

\dot{m} : 质量流量

θ : 喷射角

d_{32} : 索太尔平均直径

λ : 湍流长度标尺、表面波长

σ : 表面张力系数

C_p : 冲击平板上的压强

P_∞ : 环境压强

P_0 : 来流总压

Δ : 区间长度

N : 压比

L : 冲击距离

H : 谐振腔深度

α : 液体入射角

ALR : 气液比

D_n 、 D_y : 液滴直径

P_n 、 P_w : 液滴内部压力和外部压力

P_σ : 表面张力压力

符号说明

We : 韦伯数

U_d : 两相流速度差

σ_l : 表面张力系数

ρ_g : 气体密度

Oh_l : 欧尼索数

We_b : 临界韦伯数

D_{\max} : 液滴最大稳定直径

E : 湍流动能

ω : 液滴振动圆频率

T : 振动周期

f : 振动频率

厦门大学博硕士学位论文摘要库

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
符号说明.....	IV
目 录.....	VII
Table of Contents.....	X
第一章 绪论	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 液体喷雾技术研究.....	2
1.2.1 喷雾技术的发展与应用.....	2
1.2.2 雾化机理的研究.....	4
1.2.3 雾化数值模拟的研究.....	5
1.3 超声波雾化喷嘴研究现状.....	6
1.3.1 超声波雾化喷嘴分类.....	6
1.3.2 流体动力式超声波雾化喷嘴的研究.....	8
1.4 本文研究内容.....	10
1.4.1 研究现状小结.....	10
1.4.2 研究内容.....	11
第二章 谐振腔式声能雾化喷嘴理论及设计	13
2.1 谐振腔式声能雾化喷嘴工作原理.....	13
2.2 谐振腔式声能雾化喷嘴的设计.....	15
2.2.1 气体喷嘴的设计.....	15
2.2.2 谐振腔的设计.....	17
2.2.3 液体喷嘴的设计.....	18

2.3 本章小结.....	23
第三章 数值模拟理论及方法.....	24
3.1 流体力学控制理论	24
3.1.1 质量守恒方程.....	24
3.1.2 动量守恒方程.....	24
3.1.3 能量方程	25
3.2 湍流模型.....	25
3.2.1 湍流模型基本方程.....	25
3.2.2 标准 k- ϵ 模型.....	27
3.2.3 RNG k- ϵ 模型	27
3.2.4 Realizable k- ϵ 模型.....	28
3.3 气动噪声模型.....	29
3.4 离散相模型.....	30
3.4.1 喷嘴模型选择.....	31
3.4.3 液滴破碎模型的选择.....	33
3.5 本章小结.....	34
第四章 谐振腔式声能雾化喷嘴流场和声场的数值模拟.....	35
4.1 湍流模型验证.....	35
4.2 高速自由射流流场的数值模拟.....	37
4.2.1 模型建立	38
4.2.2 边界条件设置.....	38
4.2.3 结果与分析	39
4.3 谐振腔式声能雾化喷嘴流场的数值模拟与分析.....	44
4.3.1 模型建立	44
4.3.2 边界条件设置.....	45
4.3.3 压比对流场的影响.....	45
4.3.4 冲击距离对流场的影响	47
4.4 谐振腔式声能雾化喷嘴的声场模拟	50
4.5 本章小结.....	52

第五章 谐振腔式声能雾化喷嘴的雾化模拟与分析	53
5.1 模型建立.....	53
5.2 边界条件设置.....	54
5.3 带谐振腔与不带腔对雾化效果的影响.....	55
5.4 液体入射角 (α) 对雾化效果的影响.....	58
5.5 冲击距离 (L)对雾化效果的影响.....	63
5.6 谐振腔深度(H)对雾化效果的影响.....	67
5.7 气液比 (ALR) 对雾化效果的影响.....	70
5.8 本章小结.....	73
第六章 谐振腔式声能雾化喷嘴雾化机理的探究	75
6.1 液滴在气流中的破碎.....	76
6.1.1 液滴在稳定气流中的破碎.....	76
6.1.2 液滴在湍流中的破碎.....	78
6.2 雾化机理的初探.....	79
6.2.1 气体振动特性.....	79
6.2.2 液滴振动特性.....	79
6.3 本章小结.....	83
第七章 总结和展望	84
7.1 总结.....	84
7.2 展望.....	85
参考文献	86
硕士期间发表的学术论文和申请的专利	89
致 谢	90

Table of Contents

Chinese Abstract	I
English Abstract	II
Nomenclature.....	IV
Table of Contents.....	VII
Chapter1 Introduction.....	1
1.1 Research background and significance.....	1
1.2 Liquid spray technology.....	2
1.2.1 Development and application of spray technology.....	2
1.2.2 Research of atomization mechanism.....	4
1.2.3 Numerical simulation study if atomization.....	4
1.3 Research status of ultrasonic atomizing nozzle.....	6
1.3.1 Classification of ultrasonic atomizing nozzle.....	6
1.3.2 Study of fluid-power ultrasonic atomizing nozzle.....	7
1.4 Content of this paper.....	9
1.4.1 Research summary.....	9
1.4.2 Research content.....	10
Chapter 2 Theory and design of resonator-sound-generator atomizing nozzle.....	12
2.1 Working mechanism of resonator-sound-generator atomizing nozzle... 12	
2.2 Design of resonator-sound-generator atomizing nozzle..... 14	
2.2.1 Design of gas nozzle.....	14
2.2.2 Design of reaonator	16
2.2.3 Design of liquid nozzle.....	16
2.3 Chapter summary	21
Chapter3 Numerical simulation theory and method.....	22
3.1 Control theory of fluid dynamics.....	22
3.1.1 Mass conservation equation.....	22
3.1.2 Momentum conservation equation	22
3.1.3 Energy conservation equation.....	22

3.2 Turbulence model.....	23
3.3.1 The basic equations of the turbulence model.....	23
3.3.2 Standard k- ϵ model.....	25
3.3.3 RNG k- ϵ model	25
3.3.4 Realizable k- ϵ model	26
3.3 Acoustics model	27
3.4 Discrete phase model.....	28
3.4.1 Selection of nozzle model.....	29
3.4.2 Selection of breakup model.....	31
3.5 Chapter Summary.....	32
Chapter 4 Numerical simulation of flow and sound field of resonator-sound-generator atomizing nozzle.....	33
4.1 Verification of turbulence model	33
4.2 Numerical simulation of high-speed jet.....	35
4.2.1 Model creation	35
4.2.2 Setting up of boundary conditions	36
4.2.3 Results and analysis.....	37
4.3 Flow field simulation of resonator-sound-generator atomizing nozzle. .	41
4.3.1 Model creation.....	42
4.3.2 Setting up of boundary conditions.....	42
4.3.3 Affect to the flow field of pressure ratio.....	42
4.3.4 Affect to the flow field of impinging distance.....	45
4.4 Sound field simulation of resonator-sound-generator atomizing nozzle.	47
4.5 Chapter summary.....	49
Chapter 5 Atomization simulation and analysis of resonator-sound-generator atomizing nozzle	50
5.1 Model creation.....	50
5.2 Setting up of boundary conditions.....	51
5.3 Affect to the atomization with and without the resonator.....	52
5.4 Affect to the atomization of liquid incidence angle(α).....	55
5.5 Affect to the atomization of impinging distance(L).....	60
5.6 Affect to the atomization of resonator depth(H).....	63
5.7 Affect to the atomization of ALR.....	66

5.8 Chapter summary.....	73
Chapter 6 Study of the atomization mechanism of resonator-sound-generator atomizing nozzle.....	75
6.1 Breakup of droplet in the flow.....	76
6.1.1 Breakup of droplet in the steady flow.....	76
6.1.2 Breakup of droplet in the turbulence flow.....	78
6.2 Preliminary study of the atomization mechanism	79
6.2.1 Vibration characteristics of air.....	79
6.2.2 Vibration characteristics of liquid.....	79
6.3 Chapter summary.....	83
Chapter 7 Summary and prospects	84
7.1 Summary.....	84
7.2 Prospects.....	85
References.....	86
Publication.....	89
Acknowledgements.....	90

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

能源是整个人类社会发展和经济增长的最基本的驱动力,是人们赖以生存的基础,是很多国家的战略资源。作为世界上最大的发展中国家,中国是一个能源消费大国,持续高速的发展带动了能源消费量的急剧上升。如今,我国的基本能源消费已占世界总消费量的 1/10,仅次于美国,居世界第二位。从能源构架上,虽然我国在水力发电、风力发电、核能等方面有了很大的发展,但是矿物燃料仍是最主要的使用资源。在矿物燃料中,液体燃料因为其热量高、杂质少、方便运输和存储、燃烧效率高和燃烧后便于清洁等优点,成为现今工业和民用的主要能源之一。液体燃料主要是指石油产品,如汽油、柴油、煤油以及重油、渣油等精制后的残留物。然而在石化行业深加工的影响下,我国的重质燃料油存在高密度、高粘度、高胶质等品质问题,这些问题直接影响燃烧性能,突出表现在以下几方面^[1]:

- 1) 燃料消耗大,雾化颗粒粒径较大;
- 2) 液雾与助燃空气掺混不够;
- 3) 火焰中存在雪花火点;
- 4) 雾化介质消耗大而导致火焰温度低;
- 5) 局部高温区过热而造成烧嘴结焦、堵塞;
- 6) 燃烧过程中会产生大量黑烟,严重污染环境。

如果我国继续以这种传统的“两高一低”(高损耗、低产出、高污染)的生产方式来维持经济发展,那么将会使有限的资源加速耗竭。随着能源危机的加剧,世界各国都在探求解决办法,其中之一就是研究新的节能技术,降低能源的消耗,提高利用率。而对于液体燃料燃烧领域而言,如何提高雾化质量以提高燃烧效率成为了实现节能减排最为直接的途径。提高喷嘴的雾化质量能够提高燃料液滴的蒸发速度和与空气结合的速度,从而保证迅速而又可靠地点火,实现稳定而又完全的燃烧,控制燃烧装置要求的出口温度场的分布和燃烧产物的排放。

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts 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.