



中国航空学会  
《航空科学技术丛书》

# 航空燃气轮机 燃油喷嘴技术



Aero Gas Turbine Engine  
Fuel Nozzle Technology

甘晓华 著



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

中国航空学会  
《航空科学技术丛书》

# 航空燃气轮机燃油喷嘴技术

## Aero Gas Turbine Engine Fuel Nozzle Technology

甘晓华 著

国防工业出版社

·北京·

**图书在版编目(CIP)数据**

航空燃气轮机燃油喷嘴技术 / 甘晓华著. —北京: 国防工业出版社, 2006. 4

(航空科学技术丛书)

ISBN 7-118-04153-X

I. 航... II. 甘... III. 航空发动机: 燃气轮机—燃油喷嘴 IV. V235.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 106012 号

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850 × 1168 1/32 印张 6 $\frac{1}{4}$  字数 198 千字

2006 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 28.00 元

---

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

## 致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

**国防科技图书出版基金资助的对象是:**

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金  
评审委员会**

# 国防科技图书出版基金 第五届评审委员会组成人员

主任委员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 张又栋

秘 书 长 张又栋

副 秘 书 长 彭华良 蔡 镛

委 员 (按姓名笔画排序)

于景元 王小谟 甘茂治 刘世参

杨星豪 李德毅 吴有生 何新贵

佟玉民 宋家树 张立同 张鸿元

陈冀胜 周一宇 赵凤起 侯正明

常显奇 崔尔杰 韩祖南 傅惠民

舒长胜

# 《航空科学技术丛书》 编审委员会

**主任** 刘高倬

**副主任** (以姓氏笔画排序)

马恒儒 王欣 丛日刚 刘国华 杨国庆 杨育中  
姜澄宇 胡海岩 魏钢

**编委会顾问** (以姓氏笔画排序)

王中 刘大响 李明 宋文骢 张福泽 陈一坚  
陈懋章 贲德 钟群鹏 徐建中 曹春晓 管德

**编委会委员** (以姓氏笔画排序)

王立新 甘晓华 伍贻兆 刘行伟 孙先仿 孙健国  
朱自强 严传俊 吴学仁 张靖周 张聚恩 李玉龙  
李志强 杨伟 沈士团 沙长安 苏恩泽 周德云  
孟光 武哲 胡子建 荣毅超 费斌军 夏品奇  
徐肖蒙 桂幸民 高正 高正红 高德远 梁德旺  
崔德刚 康锐 梅文华 程洪彬

**编委会编辑部**

吴松 王晓舟 郝刚 唐应恒

**编委会办公室**

汪淳 赵霜红 欧阳黎明

## 总 序

航空器的诞生和发展,不仅极大地改变了人类的生活方式,促进了社会经济繁荣,而且成为决定现代战争胜负的重要因素和国家综合实力的集中体现。建国以来,我国航空工业经历了维修、仿制、自主研发、试验、生产、装备使用等过程,取得了丰硕成果。尤其是近20年来,航空技术研究有不少突破性科技成果,涌现出一大批有突出贡献和学术成就斐然的技术专家、学科带头人,他们的科技成就和丰富经验,是我国航空事业的宝贵财富。以图书为载体,记录这些成就,传播这些经验,可以扩大航空领域科学技术的交流,促进航空科技事业的继承与发展,加快航空科技人才的培养和提高。

21世纪是科技迅猛发展的时代,国民经济的发展必须依靠高科技,武器装备和军事技术的发展更要依靠高科技。航空科技图书出版工作是航空科技和军队航空武器建设事业的一个组成部分,优秀的航空科技图书既是航空科技工作的一种成果,也是科技水平的重要标志,是国家的重要财富。出版《航空科学技术丛书》,不仅是从总体上对我国航空科技发展的总结,而且是为今后航空科技加强自主创新、实现持续快速发展奠定了良好的技术基础。

这套丛书将按照飞机、发动机、材料工艺、综合航电、机载设备和武器等领域来分类和组成,在每一类中可进一步细分为设计、气动、强度、原理、燃烧、控制、实验与测试技术、工艺、材料、信息技术等学科。其中部分著作是由航空领域的院士、著名专家等牵头组织编撰或修订的学术专著;部分著作是目前处于科研生产一线的学科带头人结合科研课题和科研成果的有较高学术价值的专著;另有一些是偏重工程应用的、有推广价值的技术著作。具体分列



如下:

(1) 在航空科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论著作;学术思想新颖,内容具体、实用,对航空科技发展有较大推动作用的专著。

(2) 航空工程技术理论方面有突破的应用科学专著、应用技术著作。

(3) 密切结合军用、民用航空装备现代化需要的高新技术内容的专著。

(4) 有重大发展前景和重大开拓使用价值,密切结合军用、民用航空装备现代化需要的新思想、新概念、新工艺、新材料内容的专著。

(5) 填补目前我国航空科技领域空白并具有应用价值的前沿学科和边缘学科的科技图书。

这套丛书从组织策划到付诸实施,得到了业界的热烈响应,得到了各领导机关的重视与支持,得到中国人民解放军总装备部、空军装备部和国防科工委、中国一航、中航二集团、北京航空航天大学、南京航空航天大学、西北工业大学、中国民航学院以及一些航空科研院所、国防工业出版社等单位有关领导和专家的大力支持与协助,得到国防工业出版社的鼎力资助。在此,特向上述单位的领导和专家们致以热忱的谢意。

相信这套丛书的出版将对我国航空事业的发展起到承前启后、继往开来的重要作用,将是一件具有里程碑意义的工作。期望这套丛书能够有益于高技术领域人才的培养,有益于国防科研事业的发展,有益于航空科学技术的进步。

中国航空学会

《航空科学技术丛书》编审委员会

2005年12月

# 《航空科学技术丛书》 已出版书目

001 航空燃气轮机燃油喷嘴技术

甘晓华 著 2006 年

002 飞行器结构优化设计

李为吉 宋笔锋 孙侠生 张勇 编著 2006 年

## 前 言

燃油喷嘴是燃气轮机的关键部件,对燃气轮机性能有着重要的作用。现代燃气轮机对燃油喷嘴技术要求愈来愈高,而目前在设计研究部门、大专院校的科研和教学中尚缺少此类技术参考书。此外,喷嘴雾化技术还在能源利用,在工业、农业和医药卫生等方面得到广泛应用。

本书取材有几点考虑:其一,以空气雾化喷嘴为重点,系统地探讨了燃气轮机常用燃油喷嘴的工作原理、雾化性能、检测方法及燃烧特性;其二,力求有较强的理论性和实用性,除了介绍燃油喷嘴的基本工作原理外,注重工程实际应用技术;其三,本书的大部分内容取材于作者多年来在燃油喷嘴技术领域的科研成果及学术论文。

本书共6章。第1章介绍了燃气轮机燃油喷嘴的工作原理和评估指标。第2章介绍了燃气轮机几种常用燃油喷嘴的雾化特性及其燃烧特性。第3章重点阐述了空气雾化喷嘴的雾化机理。作者认为,在有限的篇幅中深入探讨空气雾化喷嘴的雾化技术是必要的。除了其技术先进而被广泛应用于现代燃气轮机之外,主要是其雾化机理具有代表性。一旦对空气雾化喷嘴的雾化机理掌握透彻,则对其他类型喷嘴的雾化特性就不难理解。第4章主要从工程应用的角度介绍了航空燃料及其雾化质量,以及液雾质量对燃烧性能的影响。第5章对喷嘴在工程使用中不可避免会遇到的积炭及防护问题进行了探讨。第6章介绍了燃油喷嘴的喷雾检测技术。作者希望通过以上内容的探讨,使读者能够对燃气轮机燃油喷嘴技术有一个基本掌握。

本书是供从事喷嘴技术的人员,尤其是从事燃气轮机的燃油

喷嘴设计、研制、生产部门的工程技术人员和管理人员使用的技术参考书,也可作为高等院校研究生、本科生的教学参考书。

在本书涉及的由作者完成的有关燃油喷嘴技术研究内容中或在完成本书撰著的过程中,承蒙空军装备研究院王宏明、苏中高、关莹、薛洪涛、何峻、钱长龄、夏春友等同仁的技术帮助;尤其是北京航空航天大学赵其寿教授在喷嘴技术研究中给予了作者多年悉心指导和帮助;在此谨表致谢。最后感谢刘大响院士、刘高恩教授对此书的鼎力推荐和指导。

作者

2005年夏于北京

# 目 录

<b>第 1 章</b>	<b>喷嘴工作原理及评估指标</b> .....	1
1.1	雾化的基本原理.....	1
1.2	性能评估指标及相互关系.....	7
1.3	工程检测指标及意义 .....	17
<b>第 2 章</b>	<b>喷嘴类型及其特点</b> .....	20
2.1	喷嘴类型概述 .....	20
2.2	直射式喷嘴 .....	30
2.3	离心式喷嘴 .....	36
2.4	空气雾化喷嘴 .....	50
2.5	气动辅助雾化喷嘴 .....	60
2.6	喷嘴类型的燃烧性能特点 .....	65
<b>第 3 章</b>	<b>空气雾化喷嘴的雾化机理及性能</b> .....	73
3.1	液膜厚度对雾化性能的影响 .....	73
3.2	液膜平均厚度 .....	76
3.3	液膜脉动厚度 .....	90
3.4	喷嘴几何参数对雾化的影响.....	101
3.5	气液相互作用的动态特性.....	105
3.6	液体旋流量对雾化的影响.....	118
3.7	液膜的破碎准则及雾化模型.....	125
<b>第 4 章</b>	<b>液体燃料及其对雾化燃烧的影响</b> .....	138
4.1	航空燃料概述.....	138
4.2	液体燃料对雾化的影响.....	146
4.3	液雾质量对燃烧室性能的影响.....	150
<b>第 5 章</b>	<b>喷嘴积炭与防护</b> .....	156

5.1	积炭机理	156
5.2	积炭防护方法	164
5.3	防护气流的影响	170
<b>第6章</b>	<b>喷嘴喷雾检测技术</b>	<b>173</b>
6.1	液雾的激光测量原理	173
6.2	喷雾角度及流量测量	177
6.3	燃油周向分布不均匀度测量	182
6.4	液膜脉动波测量	188
6.5	液膜厚度测量	193
	<b>参考文献</b>	<b>200</b>

# Contents

<b>Chapter 1</b>	<b>Operation Principle and Evaluation Parameters of Atomizers</b>	1
1.1	Basic Principle of Atomization	1
1.2	Performance Evaluation Parameters and Their Relationships	7
1.3	Engineering Measurement Parameters and Their Meanings	17
<b>Chapter 2</b>	<b>Atomizer Types and Their Features</b>	20
2.1	General Introduction to Atomizer Types	20
2.2	Jet Atomizer	30
2.3	Pressure – swirl Atomizer	36
2.4	Airblast Atomizer	50
2.5	Pneumatic Assist Atomizer	60
2.6	Combustion Features of Different Atomizers	65
<b>Chapter 3</b>	<b>Atomization Mechanism and Performance of Airblast Atomizer</b>	73
3.1	Effect of Liquid film Thickness Inner Atomizer on Atomization Performance	73
3.2	Mean Liquid Film Thickness	76
3.3	Liquid Film Wave Thickness	90
3.4	Effect of Atomizer Geometric Parameters on Atomization	101
3.5	Aynamic Characteristics of Air/Liquid Interaction	105

3.6	Effect of Liquid Swirl on Atomization .....	118
3.7	Criterion of Liquid Film Breakup and Atomization Model .....	125
<b>Chapter 4</b>	<b>Liquid fuels and Their Effect on Spray</b>	
	<b>Combustion</b> .....	138
4.1	General Introduction to Aero Fuels .....	138
4.2	Effect of Liquid Fuels on Atomization .....	146
4.3	Effect of Liquid Spray Quality on Combustor Performance .....	150
<b>Chapter 5</b>	<b>Carbon Deposit and Protection of Atomizer</b> ...	156
5.1	Mechanism of Carbon Deposit .....	156
5.2	Method of Carbon Deposit Protection .....	164
5.3	Effect of Protection Airflow .....	170
<b>Chapter 6</b>	<b>Measurement Technology of Atomizer</b>	
	<b>Spray</b> .....	173
6.1	Measurement Principle of Liquid Spray With Laser .....	173
6.2	Measurement of Spray Angle and Liquid Flow Rate .....	177
6.3	Measurement of Non – uniformity of Circumferential Distribution of Fuel flow .....	182
6.4	Measurement of Liquid Film Wave .....	188
6.5	Measurement of Liquid Film Thickness .....	193
<b>References</b>	.....	200



# 第 1 章 喷嘴工作原理及评估指标

燃油喷嘴的作用是将液体燃料雾化。雾化就是将燃料分解成小滴,以加大燃料的表面积,如此可提高燃烧时热和质的交换速率,加快燃烧过程,提高燃烧性能。直径为 1mm 的煤油滴,在空气中约需 1s 才能烧完;当液滴直径减小到 50 $\mu\text{m}$  时,只需 0.025s 就可烧完。在航空燃气轮机燃烧室内,液滴的停留时间仅有  $10^{-3}\text{s}$  的量级,而放热强度要求为  $(2 \sim 5) \times 10^7 \text{ kcal}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{at})$ <sup>①</sup>,这就对液雾的平均直径提出了严格的要求。目前的雾化技术已使燃油在正常工作压力范围内的液滴达到小于 50 $\mu\text{m}$  的水平。

如果雾化技术不良,燃烧室内的液滴直径过大,将会带来许多问题,会出现油滴碰壁、火焰后移,以及出口温度分布不均等。此外,液雾的最小点火能量,与液滴直径成 4.5 次方的关系,液雾直径越大,所需最小点火能量也越大。液雾群粒子尺寸大小,不仅影响发动机性能,且影响发动机工作可靠性,特别是对热部件的寿命有重要影响。

喷嘴雾化技术还在能源利用,在工业、农业、医药卫生方面,以及在制作粉剂,干燥、模拟环境制造云雾试验等方面都得到应用。

## 1.1 雾化的基本原理

燃气轮机的燃油雾化是采用燃油喷嘴来实现的。无论何种雾化方式,是液压的、气动的或机械的,都是使燃油形成良好的薄膜

---

①  $1\text{kcal} = 4.1868\text{kJ}; 1\text{at} \approx 10^5 \text{Pa}$ 。