

邵毅明 黄震·著

# 溶气燃油喷射雾化机理与 燃烧仿真研究

RONGQI RANYOU PENSHE WUHUA JILI YU  
RANSHAO FANGZHEN YANJIU



西南交通大学出版社  
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

# 溶气燃油喷射雾化机理与 燃烧仿真研究

Rongqi Ranyou Penshe Wuhua Jili yu Ransao Fangzhen Yanjiu

邵毅明 黄 震 著



西南交通大学出版社

· 成 都 ·

## 内 容 简 介

本书较为系统地介绍了液体微粒化基本理论、溶气柴油喷射微粒化实验研究方法、溶气柴油喷射微粒化影响因素和微粒化机理、内燃机溶气燃油喷射燃烧的数值模拟基础以及柴油机溶气柴油喷射燃烧数值模拟的结果与分析。

本书主要供内燃机专业的学生、研究内燃机燃烧和排放以及新技术开发的技术人员参考使用。

---

### 图书在版编目 ( C I P ) 数据

溶气燃油喷射雾化机理与燃烧仿真研究 / 邵毅明, 黄震著. —成都: 西南交通大学出版社, 2007.12  
ISBN 978-7-81104-808-7

I. 溶… II. ①邵…②黄… III. ①燃油喷嘴—雾化—研究②燃油喷嘴—燃烧系统—数值模拟 IV. TK413.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 199697 号

---

### 溶气燃油喷射雾化机理与燃烧仿真研究

邵毅明 黄 震 著

\*

责任编辑 李晓辉

封面设计 本格设计

西南交通大学出版社出版发行

(成都市二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话:  
028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

四川森林印务有限责任公司印刷

\*

成品尺寸: 170 mm × 230 mm 印张: 10

字数: 165 千字

2007 年 12 月第 1 版 2007 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-81104-808-7

定价: 28.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换  
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

# 前 言

随着全球汽车保有量的快速增长以及社会经济的迅速发展,石油资源供不应求的形势越来越严峻;同时,机动车尾气污染物的排放对环境的污染程度日趋严重。实现发动机的高效节能和低排放控制,是世界能源与环境保护的一个重大课题,具有重要的理论与现实意义。

在一系列研究中,基于溶气燃油喷射雾化的技术具有很大的优越性。研究表明,CO<sub>2</sub> 溶气燃油喷雾利用闪急沸腾效应,能在较低的喷射压力下获得较理想的喷射雾化质量;同时,CO<sub>2</sub> 在喷雾燃烧过程的不同燃烧阶段,能表现出或抑制或促进燃烧的特性。因此,该项技术具有控制燃烧过程,实现降低柴油机氮氧化物和碳烟排放的潜力,是最具实现发动机燃烧与排放控制的新技术之一。

本书针对溶气柴油喷射的雾化特性和机理、溶气柴油发动机喷射燃烧数值模拟等进行了研究。利用由激光相位多普勒技术的 PDPA、LDSA 仪器、可视化技术设备等构成的溶气燃油喷射雾化及测试、观测试验研究系统,对溶有 CO<sub>2</sub> 柴油喷射雾化过程、喷雾特性进行了测试;研究了溶气量、喷孔尺度、喷射压力、喷孔形状、喷雾环境、溶气性质等参数对溶气燃油喷射雾化特性的影响以及对溶气燃油喷雾的结构、喷雾锥角、喷孔流量系数、喷雾粒径、喷孔内流态和压力分布等的影响,揭示了溶气燃油喷射雾化的复杂雾化特性和机理。

研究表明,对于不同燃油和不同的溶气气体,存在一个临界溶气量,其值受喷射环境条件的影响,喷射雾化环境的压力与温度升高,该临界溶气量值增大。喷孔入口形状对溶气喷雾有重要影响,S 型喷孔内容易出现缩流,R 型喷孔内不容易出现缩流。喷孔内的缩流状态、孔内压力分布方式对喷射雾化质量有重要的影响。对于不同溶气燃油喷射,存在一个最佳的  $L/D$  值,

对于相同的  $L/D$  喷孔, 当喷孔直径增加, 在相同的喷射条件时, 溶气喷射雾化的质量下降。这些都为实际应用提供了依据。

在理论分析和实验研究的基础上, 本书对溶气柴油喷射雾化粒径与喷射压力的关系进行了研究, 并建立了在给定条件下的、定量规律清晰的溶气柴油喷射雾化粒径与喷射压力的经验公式, 为实际应用提供了理论计算方法。

作者根据对溶气柴油喷射雾化机理的研究和溶气柴油喷射雾化发动机燃烧试验研究的成果, 进一步完善了溶气燃油射流气爆雾化初始阶段的雾化模型、喷雾形状模型和粒径分布模型以及与 KIVA 程序的耦合工作。利用建立的溶气柴油喷射柴油机燃烧数值模拟平台进行了相应的模拟计算, 并分析了不同溶气量柴油喷射的柴油机燃烧过程。计算与分析的结果表明, 该数值模拟计算分析方法具有较好的效果。

本书还利用新建立的溶气柴油喷射柴油机燃烧计算方法深入地分析了溶气  $\text{CO}_2$  柴油喷射发动机燃烧着火时刻,  $\text{NO}_x$ 、soot、CO、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_2$  等主要组分数量随柴油中  $\text{CO}_2$  溶气量大小变化的复杂关系。揭示了在柴油中溶入  $\text{CO}_2$  后, 燃烧过程中, 可以实现在抑制  $\text{NO}_x$  排放的同时也抑制碳烟生成的机理, 并提出了  $\text{CO}_2$  溶气燃油喷射燃烧可能带来的 CO 排放增加的新问题以及相应的控制方法, 为实际开发溶气燃油喷射技术提供了理论依据。

感谢肖进博士在溶气燃油燃烧数值计算方面给予的帮助, 感谢为本研究给予帮助的同仁和参考文献的作者。

由于本书研究内容涉及的理论深、实验测试和试验研究的难度大, 加之作者理论知识、实践经验不足和研究条件有限, 书中或许存在不完善甚至错误的地方, 盼望读者不吝指正。

作者

2007 年 12 月



# 目 录

|                                   |        |
|-----------------------------------|--------|
| 第 1 章 绪 论 .....                   | ( 1 )  |
| 1.1 引 言 .....                     | ( 1 )  |
| 1.2 溶气燃油喷射微粒化和燃烧研究现状 .....        | ( 3 )  |
| 1.2.1 溶气燃油喷射微粒化研究现状 .....         | ( 3 )  |
| 1.2.2 溶气燃油喷射燃烧研究现状 .....          | ( 5 )  |
| 第 2 章 液体微粒化理论与溶气柴油喷射微粒化实验研究 ..... | ( 6 )  |
| 2.1 液体微粒化理论研究概述 .....             | ( 6 )  |
| 2.1.1 液滴的分裂 .....                 | ( 7 )  |
| 2.1.2 喷射液柱的分裂 .....               | ( 8 )  |
| 2.1.3 液体喷射微粒化稳定性曲线 .....          | ( 9 )  |
| 2.1.4 影响液体喷射雾化的主要因素 .....         | ( 13 ) |
| 2.1.5 喷雾特性的评价指标 .....             | ( 15 ) |
| 2.2 液体喷射微粒化粒子、雾场测量方法 .....        | ( 20 ) |
| 2.2.1 影响测定的主要因素 .....             | ( 20 ) |
| 2.2.2 接触测量法 .....                 | ( 21 ) |
| 2.2.3 非接触测量法 .....                | ( 22 ) |
| 2.2.4 激光相位多普勒技术粒径测试原理 .....       | ( 28 ) |
| 2.3 溶气柴油喷射微粒化研究实验与测试系统 .....      | ( 29 ) |
| 2.3.1 溶气柴油喷射微粒化实验装置 .....         | ( 29 ) |
| 2.3.2 溶气柴油喷射微粒化实验测量装置 .....       | ( 32 ) |

|            |                     |             |
|------------|---------------------|-------------|
| 2.3.3      | 溶气柴油喷射微粒化实验、测量系统    | (33)        |
| 2.4        | 溶气柴油喷射微粒化实验研究方法     | (34)        |
| 2.4.1      | 均匀溶气燃油的制取方法         | (34)        |
| 2.4.2      | 溶气量的测定              | (35)        |
| 2.4.3      | 流量系数的测定             | (36)        |
| 2.4.4      | 喷雾构造与喷孔内流态的拍摄       | (36)        |
| 2.4.5      | 喷射雾化粒径测量点位置         | (36)        |
| <b>第3章</b> | <b>溶气柴油喷射雾化机理研究</b> | <b>(38)</b> |
| 3.1        | 溶气浓度对溶气柴油喷射雾化的影响    | (38)        |
| 3.1.1      | 燃油溶气规律              | (38)        |
| 3.1.2      | 喷雾锥角的变化             | (41)        |
| 3.1.3      | 溶气量对喷雾结构特征的影响       | (42)        |
| 3.1.4      | 溶气量对喷孔流量系数的影响       | (43)        |
| 3.1.5      | 溶气量对喷雾粒径的影响         | (44)        |
| 3.2        | 喷孔尺度对溶气柴油喷射雾化的影响    | (46)        |
| 3.2.1      | 喷孔尺度对溶气柴油喷雾结构特征的影响  | (46)        |
| 3.2.2      | 喷孔尺度对溶气柴油喷雾锥角的影响    | (48)        |
| 3.2.3      | 喷孔尺度对溶气柴油喷射流量系数的影响  | (49)        |
| 3.2.4      | 喷孔尺度对溶气柴油喷雾粒径的影响    | (50)        |
| 3.3        | 喷射压力对溶气柴油喷射雾化的影响    | (52)        |
| 3.3.1      | 喷射压力对溶气柴油喷雾结构特征的影响  | (52)        |
| 3.3.2      | 喷射压力对溶气柴油喷雾锥角的影响    | (53)        |
| 3.3.3      | 喷射压力对溶气柴油喷射流量系数的影响  | (54)        |
| 3.3.4      | 喷射压力对溶气柴油喷雾粒径的影响    | (55)        |
| 3.4        | 喷孔形状对溶气柴油喷射雾化的影响    | (57)        |
| 3.4.1      | 喷孔形状对喷射雾化的影响        | (57)        |
| 3.4.2      | 喷孔孔内的流态与压力分布        | (60)        |
| 3.4.3      | R型喷孔孔内流态            | (64)        |

|              |                                       |                |
|--------------|---------------------------------------|----------------|
| 3.5          | 喷雾环境压力、温度对溶气柴油喷射雾化的影响 .....           | ( 65 )         |
| 3.6          | 溶气性质对溶气柴油喷射雾化的影响 .....                | ( 66 )         |
| 3.6.1        | 空气对溶气柴油喷射雾化的影响 .....                  | ( 66 )         |
| 3.6.2        | LPG 对溶气柴油喷射微粒化的影响 .....               | ( 74 )         |
| 3.6.3        | 甲烷对煤油和柴油稳态喷雾特性的影响 .....               | ( 76 )         |
| 3.6.4        | 含甲缩醛柴油喷雾和燃烧排放特性 .....                 | ( 77 )         |
| 3.7          | 溶气柴油喷射微粒化计算 .....                     | ( 77 )         |
| 3.8          | 溶气柴油喷射雾化理论分析 .....                    | ( 80 )         |
| 3.8.1        | 喷孔内的流态 .....                          | ( 81 )         |
| 3.8.2        | 溶气柴油喷射雾化的相变特性 .....                   | ( 85 )         |
| 3.8.3        | 溶气柴油喷射雾化的微观分析 .....                   | ( 88 )         |
| <b>第 4 章</b> | <b>内燃机溶气燃油喷射燃烧数值模拟基础 .....</b>        | <b>( 93 )</b>  |
| 4.1          | 燃油喷射燃烧数值模型概述 .....                    | ( 93 )         |
| 4.1.1        | 燃烧模型的基本原理及特点 .....                    | ( 93 )         |
| 4.1.2        | 燃烧模型的分类 .....                         | ( 94 )         |
| 4.2          | 燃油喷射燃烧数值模拟模型基础 .....                  | ( 97 )         |
| 4.2.1        | KIVA 的基本控制方程 .....                    | ( 98 )         |
| 4.2.2        | KIVA 程序应用的主要子模型 .....                 | ( 99 )         |
| <b>第 5 章</b> | <b>溶气燃油喷射燃烧数值模拟 .....</b>             | <b>( 114 )</b> |
| 5.1          | 国内外溶气燃油喷射燃烧试验研究 .....                 | ( 114 )        |
| 5.1.1        | 国内研究情况 .....                          | ( 114 )        |
| 5.1.2        | 国外研究情况 .....                          | ( 115 )        |
| 5.2          | 溶气燃油喷射燃烧数值模型 .....                    | ( 117 )        |
| 5.2.1        | 喷雾模型的修改及 CO <sub>2</sub> 扩散量的确定 ..... | ( 118 )        |
| 5.2.2        | 混合燃烧模型 .....                          | ( 120 )        |
| 5.2.3        | 溶气量变化模型 .....                         | ( 121 )        |
| 5.3          | 溶气燃油喷射燃烧数值模拟分析 .....                  | ( 122 )        |
| 5.3.1        | 数值模拟计算的参数与网格 .....                    | ( 122 )        |



|       |                                                         |            |
|-------|---------------------------------------------------------|------------|
| 5.3.2 | CO <sub>2</sub> 浓度对溶气柴油喷射燃烧组分 NO <sub>x</sub> 、soot 的影响 | … (123)    |
| 5.3.3 | CO <sub>2</sub> 溶气浓度对溶气柴油喷射燃烧温度的影响                      | ………… (125) |
| 5.3.4 | CO <sub>2</sub> 溶气浓度对燃烧放热率的影响                           | ………… (126) |
| 5.3.5 | CO <sub>2</sub> 溶气浓度对燃烧过程的影响                            | ………… (127) |
| 5.3.6 | 不同溶气量对燃烧空间分布的影响情况                                       | ………… (132) |
| 5.3.7 | 溶气 CO <sub>2</sub> 在燃烧过程中的变化                            | ………… (135) |
| 结束语   |                                                         | ………… (138) |
| 参考文献  |                                                         | ………… (141) |

# 第1章 绪 论

## 1.1 引 言

众所周知,汽车是人类目前最重要的交通工具之一,汽车工业也是最重要的一项国民经济支柱产业。同时,汽车也是一个消耗石油能源的“大户”,其用油约占石油总消耗量的20%~40%。随着汽车工业的迅速发展以及汽车保有量的迅速增加,石油能源短缺的问题必然会越来越突出。相关资料表明,2005年我国的汽车产量为570万辆,摩托车产量约1500万辆,预计我国汽车保有量在2010年将翻一番,达到5500万辆。随着机动车的增多,机动车排放污染物的总量不断增加,并已成为城市大气污染的主要来源,直接危害着人体健康。同时,我国燃油供给愈来愈依赖进口,我国的能源危机问题业已突显。近年来,国民的环保和节能意识也在强化,国家也要求发动机应具有良好的动力性、经济性和低污染性。

人类文明发展到今天,石油所起的作用功不可没。但石油是一种不可再生的能源,其储量有限,终有穷尽之日。因此,节约能源,特别是节约石油能源,是摆在现代人类面前的一个有待解决的重要研究课题,已引起世界各国尤其是发达国家的广泛重视。汽车作为石油燃料的消耗大户,更是人们关注的重点。许多国家都制定了严格的汽车油耗标准,我国也颁布了这方面的强制执行标准,但与发达国家相比,仍有较大差距,我国汽车节能市场的潜力巨大,节能降耗还有很长的路要走。

现代汽车必须要求其发动机具有节能与降污兼优的性能。混合气的质量与发动机的油耗和排放有着密切关系。改善燃油喷射雾化质量,采用控制燃

烧过程的技术,可以提高混合气质量和燃烧质量,最终使发动机的燃油经济性、功率和排放等综合性能得到提高。

目前我国关于液体喷射雾化的技术与理论研究还很少,即使是在柴油机喷射雾化研究方面,也仍集中在较传统的领域,对于汽油喷射雾化的研究还未真正起步。而国外发达国家无论在汽油机还是柴油机乃至其他热机的燃油喷射雾化研究上都投入了大量的人力和物力。仅日本就有几十个研究室和上百名教授或研究员的研究涉及燃油雾化及低污染燃烧领域。现在他们不仅在喷雾机理的试验研究方面取得了不少成果,英国还开发出燃油、空气相对喷射雾化形成可燃混合气的新型发动机,日本的三菱和日产公司也分别开发出汽油缸内喷射燃烧的新型发动机,它们都获得了较好的经济性和低污染性。

人类目前在燃油喷雾方面的研究可以分为两大类:一类是根据流体力学、工程热力学等理论,利用计算机对喷雾场进行数值计算。如缸内流动燃烧过程的数值模型程序 KIVA、FIRE、STAR-CD 等。其喷雾模型采用离散型油滴模型,即把燃油看成由若干离散的具有代表性的计算质点组成,在欧拉坐标下描述气相运动,在拉格朗日坐标下描述油滴的运动。在喷雾混合过程中,油滴穿过气场,与之进行质量、动量和能量交换。由此可以计算出喷雾粒子在气场中不同时刻的位置、速度以及运动轨迹,也可以绘出气场中的燃油浓度分布。然而这种方法的计算工作量过于复杂,模拟计算结果精度与实际状态还有较大的差异,正在不断地探索和发展之中。

另一类则以实验研究为基础,利用各种先进的激光测粒径、流速的设备,以及计算机图像处理和进行可视化研究的技术与设备,深入研究喷雾机理及其影响因素,探索各种改进液体雾化的效果的新方法和新技术。

溶气燃油喷射雾化是一种新兴的喷射技术。它通过在加压的条件下使气体溶解在柴油中,在喷射过程中,由于环境压力的降低,溶气会从柴油中析出,且形成大量的气泡,产生闪急沸腾效应,使得喷雾效果得到改善。

在柴油机中,碳烟的生成和  $\text{NO}_x$  的生成成反比关系。换句话说,要想同时降低碳烟和  $\text{NO}_x$  的排放非常困难。例如,提高喷射压力和延长喷油延迟时间可以降低碳烟的排放量,但  $\text{NO}_x$  的排放量却会增加。缸内稀薄燃烧可以显著降低  $\text{NO}_x$  的排放量,但碳烟的排放量的减少却有限。因此完全靠现有的燃烧系统本身来降低碳烟和  $\text{NO}_x$  的排放量非常有限。我们希望在燃油中加入一定物质,可以实现在各种不同的工况条件下都能很好地控制碳烟和  $\text{NO}_x$  的排

放的效果。研究溶气喷射雾化技术就是基于这一目的产生的。

如果溶入柴油的物质是  $\text{CO}_2$ ，那么在  $\text{CO}_2$  析出的过程中，不仅能改善燃油的雾化，提高燃油的蒸发率，而且喷入缸内的  $\text{CO}_2$  可以获得废气再循环的效果，即降低最高燃烧温度从而降低  $\text{NO}_x$  的排放。同时， $\text{CO}_2$  在高温下分解生成的氧可以促进燃油中的固体颗粒进一步燃烧，减少碳烟的排放。

## 1.2 溶气燃油喷射微粒化和燃烧研究现状

### 1.2.1 溶气燃油喷射微粒化研究现状

混合几种不同的燃料可以改变燃料的物理性质。由沸点不同的两种或多种物质混合的燃油，由于蒸发速率不同及燃油内部传质速度有限，射流内可能形成内部为低沸点组分的汽核，而外层由高沸点组分包围的气泡。当燃油内的气泡不断长大、气泡内的压力足以克服燃油的表面张力和环境压力时，将发生闪急沸腾现象。溶气燃油喷射雾化完全不同于目前在柴油机和燃气轮机上广泛采用的压力雾化和介质雾化等方法。溶气燃油喷射雾化的原理是事先在燃油中溶入在常温常压下为气体的物质，利用闪急沸腾效应，使燃油中溶解的低沸点成分急骤汽化、析出，发生气爆雾化，产生的气态膨胀力克服燃油的内聚力和表面张力，在较低喷射压力下获得理想的雾化质量。

希望利用溶入液体的气体改善液体喷射微粒化的效果的早期研究是 Kanasawa 等人水中溶入  $\text{N}_2$  的溶气喷射微粒化实验。由于  $\text{N}_2$  在水中的溶解浓度低，且水的黏度较大，所以，未能获得溶气有利于液体喷射微粒化的效果。

1965 年，V. M. Ivanov 等人首次提出了油包水乳化液在燃烧时能发生一种特殊的闪急沸腾现象，也称二次雾化现象。以后又历经众多学者的研究，对闪急沸腾的理论解释取得了一致看法。认为闪急沸腾的发生是由于挥发性（沸点）不同的两种或多种混合液滴（相溶与不相溶均可）在高温环境下开始蒸发，由于蒸发速率不同及液滴内部传质速度有限，当满足一定条件时，可能在液滴表面形成由高沸点组分包围的外壳（对乳化油滴而言为无水边界层），此时液滴的温度便会迅速上升。如果温度达到了低沸点易挥发组分的过热极限，就会导致该组分均匀核化，同时有大量的汽核产生并长大，形成高

压汽团而发生较为强烈的闪急沸腾。由于在柴油中掺水曾被广泛地视为一种改善排放、降低油耗的有效方法，所以对闪急沸腾现象的研究大都是针对柴油掺水的乳化油。

溶气燃油喷射雾化的概念最早于 1990 年由本书的作者黄震提出，1991 年以来他一直在开展燃油溶气喷射微粒化机理的研究。我们提出了一种高效、快速制备溶气燃油的方法——气体喷射溶气法和测定燃油溶气浓度的喷射法，并采用瞬间高速摄影方法和采用 PDPA、LDSA（激光粒度分析仪）对溶气燃油喷射雾化的喷注构造、喷雾锥角、油粒粒度分布、喷孔内流态等进行了研究。研究表明，溶气燃油喷注呈抛物线形状，雾化角大，油粒细小，可大大提高雾化质量。后来，作者黄震等人又采用高速摄影技术，在一个定容器内对溶有  $\text{CO}_2$  的柴油在常温常压、常温高压、高温高压 3 种环境条件下的闪急沸腾喷射过程进行了观测和测量，进一步对溶气燃油喷射雾化过程进行了研究，发现溶有  $\text{CO}_2$  的燃油喷射雾化特性的主要影响因素是环境压力和温度。

1995 年，Fujimoto 等人对溶气燃油喷射雾化相变过程进行了理论上的探讨。获得了溶气燃油由喷嘴喷出后，从喷嘴状态到越过饱和液相线之前，保持液相不变；溶气燃油越过饱和液相线，但在越过饱和气相线之前，液态  $\text{CO}_2$  发生相变，燃油仍为液态，此时发生闪急沸腾；溶气燃油越过饱和气相线时，所有燃油全部汽化。

此后，Senda 等人采用高速摄影方法研究了溶气燃油瞬态喷雾的宏观特性。1999 年，Senda 等人采用激光衍射法对溶气燃油射流雾化的一些微观特性进行了研究。

祁东辉、边耀璋等人利用数码相机拍摄了溶入 LPG 的柴油在大气环境中的喷射雾化现象。研究表明，LPG 溶气柴油喷射可以改善雾化质量，随着 LPG 溶气质量比的增加，柴油喷射微粒化的效果也随之变好。

张俊强、小保方富夫等人研究了当溶有甲烷的煤油稳态通过直圆孔喷嘴时，形成减压沸腾喷射的喷雾特性。试验使用了基于小角度向前散射理论的激光粒度分析仪和数码照相机。由溶解压力控制甲烷的溶解量，分析了不同的甲烷溶解量、测量位置、喷射压力和喷嘴长径比对流量系数、喷雾形状和锥角、索特平均直径的影响。张俊强、蒋德明研究了溶气对不同燃油喷雾特性的影响。即对溶有甲烷 ( $\text{CH}_4$ ) 的煤油和柴油稳态喷雾特性进行了试验研究，并对两者的试验结果进行了对比分析。

### 1.2.2 溶气燃油喷射燃烧研究现状

为改进柴油机的燃烧过程和节约燃油,日本栃木大学的教授进行了柴油溶氧气( $O_2$ )的柴油机性能试验研究,获得了节油的效果。由于在柴油机上解决实际供油中的均匀溶氧问题,以及氧气在供油管路流动时的析出造成的气阻问题等没有取得实质性突破,所以未能形成实际应用技术。

1996年,作者黄震等人在柴油机上进行的溶气燃油燃烧试验的研究,探讨了燃油溶解 $CO_2$ 或空气后对发动机燃烧特性和排放构成的影响。研究结果表明溶气燃油喷射可同时降低柴油机氮氧化物和碳烟的排放,有望发展成一种新的发动机燃烧和排放控制技术。

1997年,Senda等人在一台快速压缩膨胀机上采用直接摄影的方法拍摄了溶气燃油燃烧的照片,研究了溶气燃油燃烧对氮氧化物和碳烟排放的影响,采用激光阴影法和双色法研究了溶气燃油的燃烧,测量了氮氧化物和碳烟浓度,研究表明溶气燃油喷射燃烧可以同时降低氮氧化物和碳烟排放。

乔信起、陈剑等人应用激光相位多普勒技术测量了含甲缩醛柴油喷雾的速度场和粒径场,在直喷式柴油机上研究了该含氧混合燃油的燃烧排放特性。

王学台、杨莫等人研究了一种新型燃油喷射系统的研究设计方案,该燃油系统针对“溶气柴油”这种特殊燃料的需求而设计,目的在于同时降低柴油机排放中的 $NO_x$ 和碳烟微粒。喷油系统基于液压共轨式电控原理而设计,通过在共轨腔和喷油嘴之间安装液压活塞,既实现了工作油与燃油相分离,又实现了中、低压供油,高压喷射的目的,降低了加工的难度,同时解决了“溶气柴油”供油系统中气体易析出的难题。

肖进等人利用自己开发的溶气燃油射流燃烧火焰结构与温度测试系统,进行了不同 $CO_2$ 溶气量的溶气燃油射流燃烧特性研究。获得了两种喷射压力下,不同溶气量的燃烧照片、火焰结构特征、温度分布等实验研究成果。

综上所述,当前针对溶气燃油喷射流雾化和燃烧的研究工作主要集中在溶气燃油喷射雾化特性和燃烧排放特性的基础研究上,对燃油溶气喷射雾化和燃烧机理等还有待进一步广泛、深入地开展研究,以期获得可应用的技术,节约燃油,控制有害物质的排放。



## 第2章 液体微粒化理论与溶气 柴油喷射微粒化实验研究

### 2.1 液体微粒化理论研究概述

液体微粒化实际上就是使大片的液体破碎变成小液滴。一般认为它是内外力共同作用的表面张力所引起的液体破裂。在没有上述分裂外力作用时,表面张力总是使液体趋于球状,因为这样才能使液体表面具有最小能量。液体黏性阻止液体的几何形状发生变化,使其保持稳定状态。另一方面,作用在液体表面的空气动力对它施加外部扭曲力,促进了分裂过程。当破坏力大于表面张力时,液体就发生分裂。

很多在初始分裂过程中形成的大液滴是不稳定的,会进一步分裂成更小的液滴。因此,最终喷雾形成的液滴尺寸的范围不仅取决于一次微粒化形成的液滴,也取决于二次雾化时进一步分裂的程度。下面就几种不同的微粒化一般机理进行讨论,它们在整个微粒化过程中都是相当重要的。

液体微粒化的基本原理是在许多研究者大量的实验研究基础上建立起来的,尽管这门学科的发展历史只有短短的几十年,但目前也形成了一个比较完善的体系。然而在我国尚无一本有关液体微粒化的专著,相关的资料也极为有限,在这方面的研究还有待加强。

### 2.1.1 液滴的分裂

雾化的过程即是大的液流变成小的液滴的过程。基本上可以把它看做是在内外力作用共同影响下的液流破裂。一方面,液体的表面张力迫使它形成一个小球体,因为这样才具有最小表面能量;液体的黏性力则试图保持液体原有的形状。另一方面,作用在液体表面的空气动力要促使它分裂。当空气动力之和大于表面张力与黏性力之和时,会发生液体的破裂。

静态液滴的质量和直径可由下式确定:

$$m_D = \frac{\pi d_0 \sigma}{g} \quad (2-1)$$

$$D = \left( \frac{6 d_0 \sigma}{\rho_L g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2-2)$$

其中,  $m_D$ ——液滴质量, kg;

$d_0$ ——小孔直径, mm;

$\sigma$ ——液滴表面张力, N/m;

$D$ ——液滴直径, mm;

$g$ ——重力加速度,  $\text{m/s}^2$ ;

$\rho_L$ ——液滴的密度,  $\text{kg/m}^3$ 。

液滴破裂的压力平衡方程式:

$$P_1 = P_A + P_\sigma = \text{constant} \quad (2-3)$$

其中,  $p_1$ ——液滴内部压力;

$p_A$ ——外部压力;

$p_\sigma$ ——液滴表面张力形成的压力。

对球型液滴:

$$p_\sigma = \frac{4\sigma}{D} \quad (2-4)$$

可见,液滴的直径  $D$  越小,其表面张力形成的压力  $p_\sigma$  就越大。随着外部空气压力  $p_A$  的减小,若  $p_\sigma$  的改变不够大,液滴只能破裂以增大  $p_\sigma$  来抵消  $p_A$  的减小,使  $p_1$  保持恒定。

### 2.1.2 喷射液柱的分裂

根据参考资料 [183, 184, 187] 等, 液体喷入大气条件下的喷射液柱分裂的有关基本概念简述如下。假如液体流量很小, 液滴将在管口处形成, 液滴的尺寸取决于液滴的表面张力跟它的重量平衡。当流量达到临界值, 就会有一股从管口喷出的液体射流。这股射流的长度取决于流量。起初射流长度随流量增大而增大, 直至达到最大长度。达到最大长度之后, 这个长度将随着流量增大而减小。在超过喷流长度的距离处, 液柱 (射流) 将分散成液滴。因此, 对于很大的流量, 液体将在管口处就分散, 这种情况就称之为液体的雾化。最简单的液柱的变形与分裂可以分为以下几种:

(1) 滴流 (Dripping)。

这种液柱的分裂是液体自重与表面张力不平衡的结果。

(2) 平滑流 (Smooth Jet)。

平滑流的液柱是平滑透明的。

(3) 波状流 (Wave Jet)。

波状流的液柱表面不规则, 透明度下降, 这种分裂称为一次分裂 (Primary disintegration)。

(4) 喷雾流 (Spray Jet)。

它是在一次喷雾的基础上, 由于喷射空间介质 (空气) 的作用, 使波状流变为微粒化效果更好的一种喷雾。

喷射空间的空气与喷注相互接触中有相对速度, 有摩擦, 液柱里面与表面之间有压差。在压差作用下, 液柱变形量增加, 出现分裂。这种分裂称为二次分裂 (Secondary Disintegration)。

液体喷射到空气流中, 液滴的破裂仍然取决于空气动力比率 ( $0.5\rho_A U_R^2$ )、表面张力 (与  $\sigma/D$  有关) 和黏性力。在黏性力较小的情况下, 则由前二者决定。

其中,  $\rho_A$  为介质密度;  $U_R$  为介质相对流速。

由此可得无量纲韦伯 (We) 数:

$$We = \frac{\rho_A U_R^2 D}{\sigma} \quad (2-5)$$