

基于液体燃料的多孔介质燃烧技术研究现状

叶拥拥¹, 吕 田², 梁鹏飞², 金永星²

(1. 海军驻七一一研究所军事代表室, 上海 201108; 2. 七一一研究所, 上海 201203)

摘 要: 对国内外近年来关于多孔介质燃烧技术在液体燃料燃烧领域的实验及数值模拟研究做了较为全面的综述和分析。分析表明: 多孔介质燃烧技术为液体燃料提供了一种可能的先进燃烧方式。相较于传统自由空间内的火焰燃烧, 多孔介质燃烧技术可改善液体燃料的雾化、蒸发, 获得低排放、高稳定性、宽负荷比的燃烧表现。该技术在燃油锅炉、燃气轮机、斯特林发动机等领域拥有广阔的应用前景。

关键词: 多孔介质; 液体燃料; 燃烧器; 数值模拟

中图分类号: TQ038.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2014)01-0015-06

A Review of Liquid Fuel Combustion in Porous Media

Ye Yongyong¹, Lv Tian², Liang Pengfei², Jin Yongxing²

(1. Naval Deputy Office of Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108;

2. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201203)

Abstract: A comprehensive picture is given on the research and developments on combustion of liquid fuels in a porous media, including experimental and numerical research. The analysis results show that the technology of combustion in porous media is an advanced and possible combustion approach for liquid fuel. Compared with the conventional combustion in free space, the porous media combustion could improve the liquid fuel's atomization and evaporation, and features low emissions, strong flame stabilization and wide turn-down ratio. This technology could be widely applied in related fields, including oil boilers, gas turbines and Stirling engines.

Keywords: porous media; liquid fuel; burner; numerical simulation

0 引 言

多孔介质燃烧技术是指用多孔介质材料取代自由空间, 利用其相对于气体而言强大得多的蓄热功能和辐射特性, 实现热反馈, 即将燃烧产生的热量及尾气中的余热用于加热反应区上游的预混合气, 加强火焰中的传热传质过程, 从而使燃烧反应大大增强的新型燃烧技术。在忽略对外热损失的情况下, 多孔介质燃烧火焰温度可超过未预热可燃混合气的绝热火焰温度, 因此也称为超绝热燃烧^[1]。与传统的自由空间燃烧相比, 多孔介质燃烧具有燃

烧效率高, 燃料适应性广, 火焰稳定性强, 负荷比宽, 排放低, 燃烧装置结构紧凑等诸多优点, 引起了人们的重视, 已应用在民用加热器、干燥器、燃气轮机燃烧室、汽车加热系统等众多领域, 是一种极具前途的燃烧技术。目前在多孔介质中使用气体燃料的预混合燃烧技术已比较成熟, 而使用液体燃料的多孔介质燃烧相关研究还很不充分。液体燃料喷射在多孔介质表面可引起液滴的二次雾化, 同时多孔介质高的热辐射能力亦可促进液滴的蒸发^[1], 使得多孔介质燃烧技术在液体燃料燃烧领域的应用亦极具潜力。

收稿日期: 2013-07-30; 修回日期: 2013-10-18

作者简介: 叶拥拥(1968-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为特种发动机燃烧技术, E-mail: lutian5201@163.com。

本文对近年来国内外使用液体燃料的多孔介质燃烧相关实验及数值模拟研究进行了综述, 希望引起更多同行对该技术的兴趣, 促进其在燃油锅炉、燃气轮机、斯特林发动机等相关领域的应用。

1 液体燃料多孔介质燃烧技术的实验研究

液体燃料多孔介质燃烧可分为蒸发雾化型和喷射雾化型两类。一般而言, 喷射雾化型多孔介质燃烧在大负荷条件下难以获得良好的均质燃烧, 这主要是由于在大负荷条件下火焰尺度相对较大, 火焰稳定性受空气与燃油液滴间的动力学作用较大。相比喷射雾化型多孔介质燃烧, 蒸发雾化型具有负荷调节比更宽, 燃烧室更紧凑等优点, 其燃烧更接近于均质燃烧, 火焰尺度更小, 污染物排放更低。但其主要缺点是在起动阶段需要消耗额外的能量对液体燃料进行加热蒸发, 降低了系统的整体热效率。

研究喷射雾化型多孔介质燃烧的关键在于液体燃料喷雾与多孔介质间的作用。Weclas^[2]等人的实验表明, 喷雾空间内布置多孔介质可有效缩短油束的贯穿距离, 促进燃油破碎, 使燃油在空间内分布得更加均匀, 更易获得类似均质燃烧的效果(图1)。实验同时表明, 随着多孔介质材料温度的升高, 燃油雾化效果也有了明显的优化(图2)。

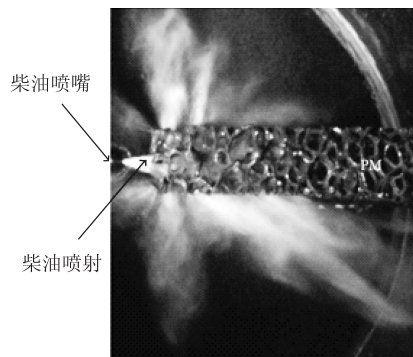


图1 燃油喷射与多孔介质的作用效果^[2]

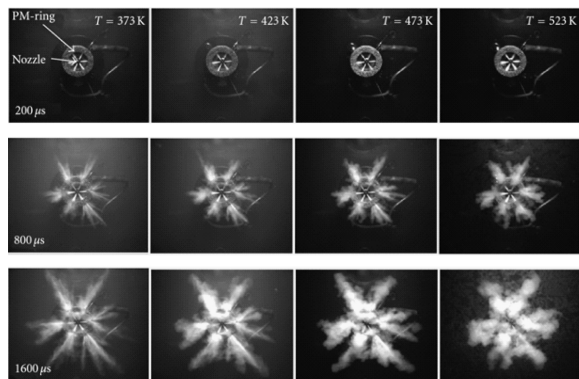


图2 多孔介质预热温度对燃油喷射雾化效果的影响^[2]

Kaplan 等人^[3]较早对喷射雾化型多孔介质燃烧做了实验研究, 实验建立了燃用正庚烷的多孔介质燃烧器(图3)。实验结果表明在燃烧室出口处温度不均匀度仅为 50 °C, 获得了较好的均质燃烧效果。燃烧均匀度的提高导致非常低的污染物排放, 实验中 CO 和 NO_x 排放浓度范围仅分别为 $3 \times 10^{-6} \sim 7 \times 10^{-6}$ 和 $15 \times 10^{-6} \sim 20 \times 10^{-6}$ 。实验还比较了正庚烷燃料在喷入燃烧室前有无预先蒸发两种条件下的排放结果, 获得了类似的良好排放效果。该结果表明, 喷射雾化型多孔介质燃烧也可获得类似使用气体燃料的良好混合效果。Tseng 等人^[4]使用了双层 ZrO₂ 多孔介质材料做了类似的正庚烷燃料的燃烧研究, 实验在燃料液滴平均直径约 10 μm 的情况下, 获得了当量比 0.3 条件下的稳定燃烧。研究认为液体燃料雾化效果的好坏是能否获得稳定高效多孔介质燃烧的关键, 尤其是燃料汽化潜热较高的情况下, 雾化液滴的大小对燃烧效果有着显著的影响。Tseng 等人亦认为燃料液滴在喷雾过程中与多孔介质材料的碰撞可造成液滴的二次破碎, 有助于燃料进一步雾化。

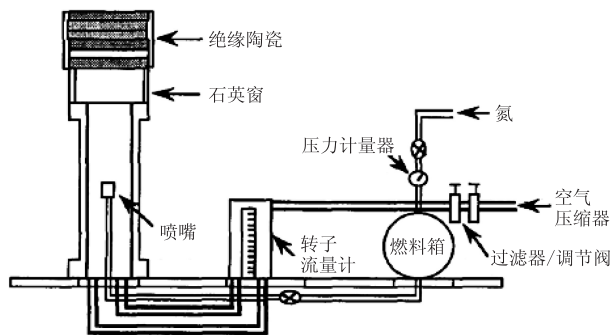


图3 Kaplan 等人所建立的多孔介质燃烧装置^[3]

Vijaykant 等人^[5]对 Kaplan 等人^[3]的研究做了扩展, 为获得较高的结构强度, 实验使用了涂覆有 SiC 的碳泡沫多孔介质, 设计了一个带有预热段和燃烧段的双层多孔介质液体燃料燃烧器, 燃烧器结构如图4所示。实验使用煤油作为燃料, 获得了稳定的、温度均匀的多孔介质燃烧火焰。研究表明, 燃油喷嘴的位置对燃烧排放情况有着很大的影响, 当喷嘴距多孔介质的距离足够远时, 油滴得到充分蒸发, 并与空气得到较好的混合效果, 排放得到充分抑制, 反之则有所上升。同时, 文章中还比较了使用气体旋流辅助雾化的喷嘴和无旋流的气体辅助雾化喷嘴的燃烧情况(图5), 结果表明有旋流喷嘴良好的雾化效果对多孔介质燃烧的排放情况有明显的改善。作者认为使用液体燃料的多孔燃烧技术在燃气轮机燃烧室或类似条件下有着极大的应用潜力。

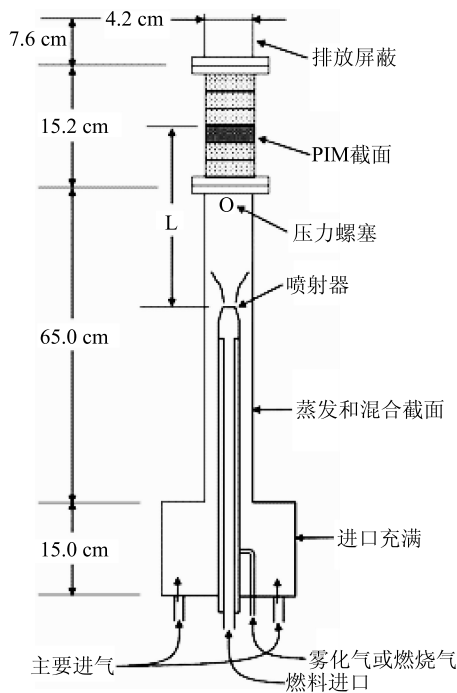


图4 Vijaykant 等人^[5]设计的多孔介质燃烧器

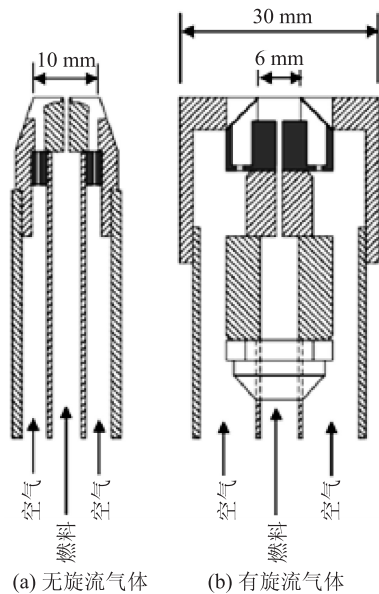


图5 两种辅助雾化喷嘴

蒸发雾化型多孔介质燃烧一般采用逐滴供给的方式供给燃料，液体燃料在接触到多孔介质主燃烧区域前已蒸发为气态，与氧化剂混合后进入主燃烧区燃烧，其燃烧方式类似预混合燃烧。Takami 等人^[6]开发的无燃油喷射装置的多孔介质燃烧器以煤油为燃料，在燃烧器上游设置金属网格和多孔陶瓷作为燃料的分布器和蒸发器，通过逐滴供给方式进行燃料供给，其实验装置如图6所示，旋流空气在多孔介质下游进入燃烧室，点火位置在燃烧室下游。实验结果指出，煤油的贫燃极限当量比可拓宽到0.1，负荷变化比可达7.2。Jugjai 等人^[7]对

Takami 等人^[6]的燃烧器做了改进，强化了空气进气涡流，液体燃料在通过燃烧室上游作为蒸发器的多孔介质时完成蒸发，随后进入旋流室与空气混合，最后在下流主燃烧区多孔介质中燃烧(图7)。

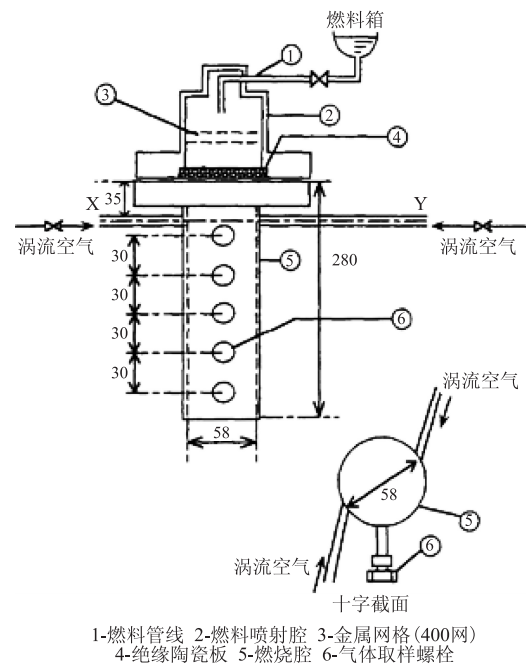


图6 Takami 等人设计的多孔介质燃烧器^[6]

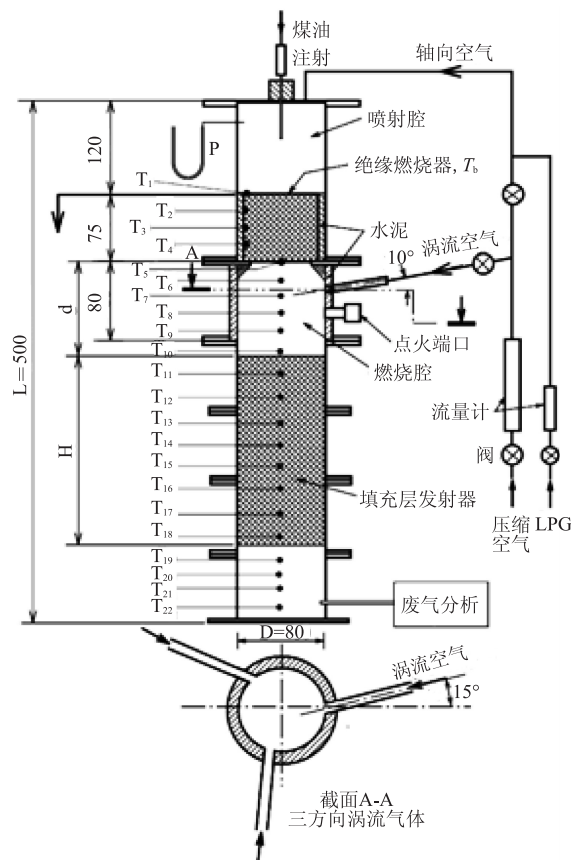


图7 Jugjai 等人设计的多孔介质燃烧器^[7]

通过对比自由空间燃烧(主燃区无多孔介质)

与不同厚度多孔介质燃烧发现,主燃烧区的多孔介质使得燃烧室空腔内温度分布更均匀,排气温度更低,多孔介质厚度越大,该效果也越明显。此外,实验还研究了旋流室高度、输入热值、当量比等因素对燃烧效果的影响。值得注意的是,在燃烧器的点火阶段,实验仍采用了 LPG 与空气的预混合火焰对多孔介质蒸发器进行了预热,用于启动阶段煤油燃料的蒸发。

蒸发雾化型多孔介质燃烧的主燃烧过程更接近于预混合均质燃烧,拓展了喷射雾化型多孔空介质燃烧的贫燃极限,但由于蒸发预热装置的存在,增加了系统的复杂度,降低了系统整体热效率。Fuse

等人^[8]通过对多孔介质材料的优化选择认为,使用大孔隙率的多孔介质材料可在没有任何外部热源促使煤油蒸发的条件下实现煤油蒸汽的稳定燃烧。实验采用孔隙率为 0.85 的氧化铝泡沫陶瓷板,泡沫陶瓷的大孔隙可使得火焰与燃烧室壁面的辐射热量较容易通过,在辐射热量不小于燃料燃烧释放热 2% 的前提下,可以不用原有的电预热装置,就可以实现燃油的稳定燃烧。在随后的研究中, Fuse 等人^[9]在氧化铝泡沫陶瓷多孔介质燃烧器中加入了 1.7 MHz 的超声震荡源辅助燃油蒸发,其工作原理如图 8 所示。实验在当量比 0.63 ~ 0.8 的范围内实现了乙醇燃料的完全燃烧。

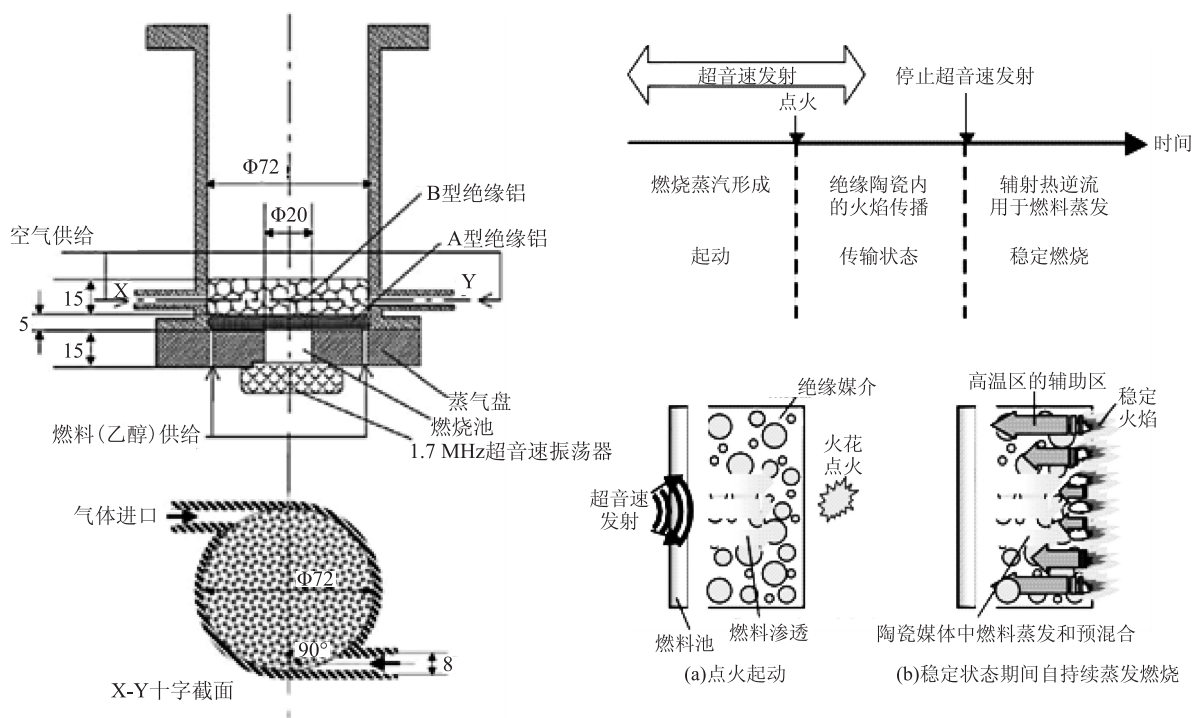


图 8 超声震荡多孔介质燃烧器实验装置(左)及工作原理图(右)^[9]

国内关于液体燃料多孔介质燃烧的研究主要集中在理论及仿真方面,从目前的文献报道来看,仅有大连理工大学的刘宏升^[10]等人做了相关的实验研究,其实验装置如图 9 所示。实验采用丙烷与空气的预混燃烧为多孔介质的预热,当多孔介质预热温度高于 550 ℃ 时喷入柴油,此时柴油在多孔介质上迅速气化、燃烧,无需进行二次点火。实验研究了不同预热温度、不同喷油量、不同空气流量等因素对多孔介质燃烧的影响。与国外的相关研究对比,刘等人的实验是基于多孔介质燃烧在往复式内燃机上应用的基础研究,故实验采用了与内燃机类似的脉冲式喷油方式,在该种喷油方式下,多孔介质燃烧器亦可实现无需多次点火的持续燃烧,燃烧器中稳定火焰区域与闪烁式火焰同时存在。

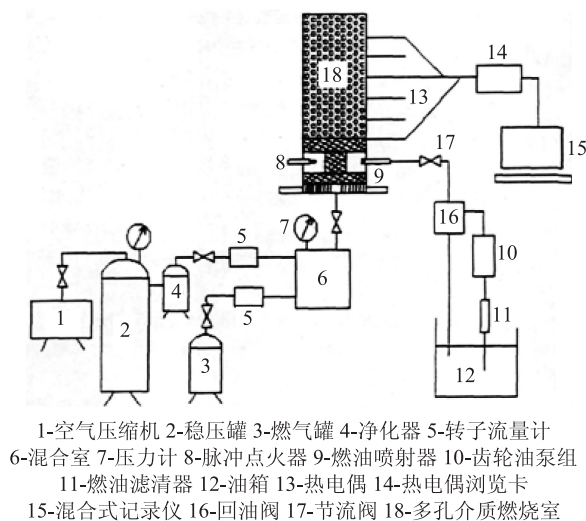


图 9 刘宏升等人的实验装置图

2 液体燃料多孔介质燃烧技术的数值模拟

液体燃料在多孔介质燃烧器内雾化、混合是研究液体燃料多孔介质燃烧的关键, 由于多孔介质的不透明特性, 很难通过传统的实验手段对这一过程进行深入考察, 因此, 相关研究多求助于数值模拟的方法。相比气体燃料的多孔介质燃烧, 液体燃料在多孔介质中的燃烧过程更加复杂, 涉及到气、液、固三相之间的换热, 油滴在多孔介质中的运动, 并与多孔介质壁面碰撞乃至发生二次雾化, 及在微小尺度下湍流脉动对油滴运动和混合气形成的影响等复杂问题^[10]。因此大多数相关研究都是假设液体燃料在进入多孔介质前就已经完全蒸发, 液体燃料呈气态与空气一起进入到多孔介质区域中。如 Haack^[12] 等人基于癸烷的折射率和射线追踪方法确定油滴的辐射吸收系数, 把油滴的蒸发过程模拟为处在辐射场和被对流加热的空气环境下的蒸发, 油滴温度与周围环境迅速达到平衡, 选用双步燃烧反应模型模拟了癸烷油蒸气在多孔介质中的预混合燃烧。模拟结果表明火焰区后多孔介质的长度对火焰速度有很大的影响。Tseng 和 Howell^[4] 亦进行了类似仿真研究, 假设庚烷油滴蒸发后油蒸气与空气迅速掺混, 按照预混燃烧反应模拟庚烷蒸气与空气的反应, 计算采用了 Chemkin2.0 中的庚烷详细燃烧反应基理, 包括 17 种组分 26 个反应。

Kayal^[13-14] 等人首先在一维模型中假设油滴在进入火焰区域前已经完全蒸发, 考虑了多孔介质的吸收系数及其放射率、火焰位置对辐射能传输效率的影响, 并提出了保证油滴完全蒸发条件下入口处油滴的最大直径, 后来在二维模型中考虑了油滴在重力作用下流经多孔介质时, 油滴在多孔介质中的蒸发及燃烧过程。文章研究了多孔介质光学厚度、火焰位置和反应焓对辐射能传输效率的影响, 得出多孔介质的光学厚度和放射率越小越能保证有效的燃烧, 使得下游方向的辐射能传输量最大的结论。Martynenko 等人^[15] 则将多孔介质看成是能吸收能量和辐射能量的均匀分布的小球和孔穴, 其物理模型如图 10 所示。研究假设液滴的初始直径范围 10 ~ 50 μm , 呈单分散分布; 忽略液滴在蒸发时的相互作用, 液滴内部温度均一, 随时间变化。模型考虑了气、液、固三相间的热传递, 将液雾的换热分为两部分, 与多孔介质发生碰撞的只与固体换热, 其余的只与气体换热。液滴与多孔介质骨架发生碰撞的概率通过求解液滴绕过固体颗粒的运动学方程

得到, 计算结果与 Kaplan 等人^[3] 的实验结果吻合较好。

国内大连理工的赵治国^[11] 等人则针对喷雾油束碰热壁的 Leidenfrost 现象, 借鉴关于油滴与冷壁碰撞已有的研究成果, 发展油束碰撞热壁模型, 使之能预测油滴与热壁碰撞后油滴的运动规律及传热特性。研究详细考察了喷雾油束与热多孔介质的相互作用, 探讨了喷雾参数如喷射点位置、喷雾锥角及环境压力等对多孔介质中均匀混合气形成的影响, 结合燃油雾化的线性非稳定性理论, 对压力旋转雾化油束与多孔介质的相互作用进行数值模拟研究。中国科技大学的林博颖等人^[16] 将杂化混合物理论 (Hybrid mixture theory) 应用于多孔介质液雾燃烧, 将多相多组分体系的微观守恒方程、熵不等式、状态函数间的热力学关系等在表征体元 (Rev) 上体积平均, 得到宏观守恒方程。依据经典不可逆热力学建立热力学力和热力学流之间耦合关系的一般原则, 将热力学流表示成热力学力的函数式, 即找出本构关系, 完成方程组的封闭, 依据合理假定, 将模型具体化, 得到惰性多孔介质内的液雾燃烧的杂化混合物理论模型, 并将杂化混合物理论模型具体应用于正庚烷液雾在惰性多孔介质中的流动、蒸发、燃烧过程的数值模拟。

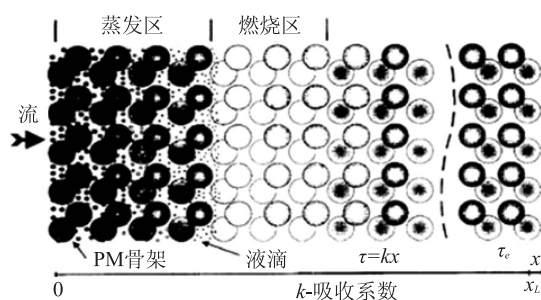


图 10 Martynenko 等人^[15] 建立的液体燃料多孔介质燃烧物理模型

3 总结与展望

基于液体燃料的多孔介质燃烧技术具有燃烧稳定、负荷范围大、燃烧效率高、污染排放低、能量密度高等诸多优点, 在燃油锅炉、燃气轮机燃烧室、斯特林发动机燃烧室等领域有着广阔的应用前景。从国内外的研究现状来看: 该技术尚处于起步阶段, 如何优化设计多孔介质燃烧器, 使液体燃料在多孔介质中快速雾化、蒸发, 加速油气混合进程, 在点火阶段减少或避免外部能量的依赖, 仍是多孔介质燃烧应用中需要进一步优化解决的问题。在数值模拟方面, 充分考虑液滴在多孔介质中三相

相互作用实际过程的计算模型仍有待进一步开发。

参考文献

- [1] 谢茂朝. 一种新概念内燃机——基于多孔介质燃烧技术的超绝热发动机[J]. 燃烧科学与技术, 2003(2): 189-194.
- [2] Weclas M. Potential of porous-media combustion technology as applied to internal combustion engines[J]. Journal of Thermodynamics, 2010, 789262.
- [3] Kaplan M., Hall M. J.. The combustion of liquid fuels within a porous media radiant burner[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1995(11): 113-120.
- [4] Tseng C. J., Howell J. R.. Combustion of liquid fuels in a porous radiant burner[J]. Combustion Science and Technology, 1996, 112: 141-161.
- [5] Vijaykant S., Agrawal A. K.. Liquid fuel combustion with silicon-carbide coated carbon foam[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2007(32): 117-125.
- [6] Takami H., Suzuki T., Itaya Y., et al. Performance of flammability of kerosene and NO_x emission in the porous burner[J]. Fuel, 1998, 77: 165-171.
- [7] Jugjai S., Polmart N.. Enhancement of evaporation and combustion of liquid fuels through porous media[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2003, 27: 901-909.
- [8] Fuse T., Araki Y., Kobayashi N., et al. Combustion characteristics in oil vaporizing sustained by radiant heat reflux enhanced with higher porous ceramics[J]. Fuel, 2003, 82: 1411-1417.
- [9] Fuse T., Kobayashi N., Hasatani M.. Combustion characteristics of ethanol in a porous ceramic burner and ignition improved by enhancement of liquid-fuel intrusion in the pore with ultrasonic irradiation[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2005, 29: 467-476.
- [10] 刘宏升. 基于多孔介质燃烧技术的超绝热发动机的基础研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [11] 赵治国. 燃油喷雾与多孔介质的相互作用及其在内燃机中应用的数值模拟研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [12] Haack D. P.. Mathematical analysis of radiatively enhanced liquid droplet vaporization and liquid fuel combustion within a porous inert medium[D]. The University of Texas at Austin, 1993.
- [13] Kayal T. K., Chakravarty M.. Modeling of trickle flow liquid fuel combustion in inert porous medium[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49: 975-983.
- [14] Kayal T. K., Chakravarty M. Combustion of liquid fuel inside inert porous media: an analytical approach[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48: 331-339.
- [15] Martynenko V. V., Eehigo R., Yoshida H. Mathematical model of self-sustaining combustion in inert porous medium with phase change under complex heat transfer[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1998, 41: 117-126.
- [16] 林博颖. 惰性多孔介质内的液雾燃烧[D]. 安徽: 中国科技大学, 2007.

(上接第 7 页)

4 结束语

满足 Tier II 标准要求的 N330 柴油机的成功开发, 使柴油机的性能得到了进一步提高, 各项技术参数优于原机型, 各项指标达到了设计要求。顺利完成了有专业检测机构和 CCS/BV 船级社参加的排放受审测试, 取得船级社颁发的 EIAPP 证书。目前已投放市场。

参考文献

- [1] 李翔, 任自中. 中速大功率柴油机应用米勒循环的仿真与试验研究[J]. 柴油机, 2010, 32(2): 21-24.
- [2] 陈大荣. 船舶柴油机设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1980.
- [3] 张怡军, 黄幼林. 东方红 LR4M3-24 柴油机满足非道路国 II 排放技术[J]. 柴油机, 2011, 33(6): 10-12.
- [4] 胡作武, 高茂静. 船用柴油机排放控制技术[J]. 江苏船舶, 2005(6): 20-21.
- [5] 李农. 减少船用柴油机 NO_x 排放的技术措施[J]. 世界海运, 2000(3): 4-51.
- [6] 瞿晓霞. 高速船用柴油机降低 NO_x 排放研究[J]. 中国水运, 2012(1): 58-59.