

相关技术

引射比对生物柴油斯特林发动机
喷雾特性影响的仿真研究袁 雄¹, 王林涛², 虞翔宇²

(1. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 七一一研究所, 上海 201203)

摘 要: 基于斯特林发动机的喷雾特性, 建立了某斯特林发动机旋流引射、喷雾的数学物理模型, 模拟了高背压下生物柴油斯特林发动机在不同引射比下的喷雾过程。研究发现: 生物柴油喷雾锥角随引射比的增大而增大, 大引射比下的喷雾油束前端出现了明显的凹型回缩锋面; 引射比越大, 喷雾贯穿距越小; 增大引射比, 液滴速度增大, 索特平均直径减小, 粒径方差减小。高背压下, 增大引射比能增大燃油混合气的空间分布, 提高喷雾雾化效果。

关键词: 斯特林发动机; 生物柴油; 引射比; 喷雾特性

中图分类号: U664.124 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2020)03-0056-05

Simulation Study of Ejection Ratio on Spray Characteristics of
a Stirling Engine by Using BiodieselYuan Xiong¹, Wang Lintao², Yu Xiangyu²(1. School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240;
2. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201203)

Abstract: Based on the spray characteristics of the Stirling engine, the mathematical physics model of the swirl injection and spray of a Stirling engine was established, and the spray process of the biodiesel Stirling engine at different ejection ratios was simulated. The results show that the spray cone angle increases with the increase of the ejection ratio, and the front end of the spray oil bundle has a large concave retraction front at the large ejection ratio; the larger the ejection ratio, the smaller the spray penetration distance; increasing the ejection ratio, the droplet velocity is increased, the Sauter mean diameter is reduced, and the particle size variance of spray droplets is reduced. Under high back pressure, increasing the ejection ratio can increase the spatial distribution of the fuel mixture and improve the spray atomization.

Key words: Stirling engine; biodiesel; ejection ratio; spray characteristic

0 引言

斯特林发动机是一种外燃、活塞式发动机, 以闭式回热循环的方式进行工作; 其热效率很高, 理论上等于同温限下的概括性卡诺循环效率^[1]。斯特林发动机因其能源适应性广、运行噪声低、热效率高等优点, 在民用以及军用都日益受到重视。斯特林发动机形式的水下动力系统应用尤为广泛^[2]。

生物柴油作为一种可再生能源, 因其本身含氧, 相对柴油, 产生同样的热值氧气消耗率下降^[3]。而水下动力系统的供氧系统重量一般占水下动力系统总重的 80%, 提高氧气利用率, 意味着在相同氧气携带量的情况下, 水下动力系统能做的总功增加, 续航能力提高。因此生物柴油是符合水下热动力系统工作要求的非常有前景的替代能源。

收稿日期: 2019-04-18; 修回日期: 2019-12-15

作者简介: 袁雄(1993—), 硕士研究生, 主要研究方向为发动机喷雾、燃烧与排放控制, yxpandaer@126.com。

目前国内外关于斯特林发动机喷雾特性方面的研究报道较少^[4-8], 尤其是关于高背压下引射旋流喷雾特性的相关报道几乎没有。本文采用计算流体力学的方法模拟研究生物柴油在斯特林发动机不同引射比下的喷雾特性, 为进一步优化作为水下动力的斯特林发动机的外燃系统的结构和性能提供依据。

1 几何模型

斯特林发动机燃烧室主要包括: 气体引射器、压力涡流雾化喷嘴、旋流室、点火器、换热管、挡焰板等; 燃烧室外面包有一层绝热层。烟气经燃烧室内壁面回流至引射器, 然后与氧气混合经径向旋流室进入燃烧室内; 燃油则通过压力涡流雾化喷嘴进入燃烧室内, 在引射气体作用下发生破碎并雾化混合。

本文根据实际情况并考虑计算复杂程度, 对斯特林发动机的燃烧室结构进行了简化。计算域上部为旋流氧引射器, 以引射器混合管等压力出口面为计算域进口; 忽略再循环燃气连接燃烧室外直到回到引射器的流道以及换热器。燃烧室网格见图 1。经模拟结果对比, 最终使用 30 万网格进行本次模拟研究。该数量的网格既能保证计算精度, 又能平衡计算速度; 网格有较好独立性。

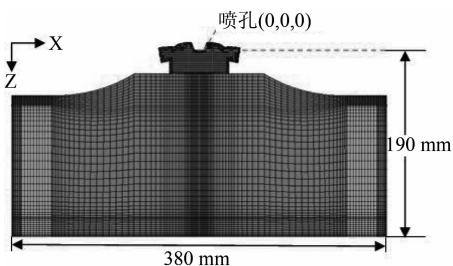


图 1 燃烧室网格

2 计算模型及验证

2.1 计算模型

本文采用离散相模型 (DPM) 对斯特林发动机冷态喷雾进行研究。在建立气相-液滴两相流动的耦合模型时, 将气相作为连续相, 液滴作为离散相, 采用欧拉-拉格朗日方法对气液两相运动进行描述。采用标准 $k-\varepsilon$ 模型和标准壁面函数模拟湍流流动; 采用随机轨道模型模拟连续相的湍流效应对颗粒轨迹的影响; 二次雾化模型采用 TAB 模型。基于 SIMPLE 算法进行压力校正。采用二阶离散格式进行网格离散。

斯特林发动机采用压力涡旋雾化喷嘴。本文采用线性不稳定薄膜雾化 (LISA) 模型^[9]模拟压力

涡旋雾化喷嘴燃料喷雾的形成。该模型理论为: 燃油经过旋流室后, 形成空心柱并由喷口喷出; 而空气动力学不稳定性导致空心油膜破裂。Kelvin-Helmholtz 波在薄膜片上生长并最终将液体破碎成韧带状, 随后韧带状由于静脉曲张不稳定破裂成液滴。一旦形成液滴, 喷雾的状态就由拖曳、碰撞、聚结和二次破碎决定。燃油从喷嘴内部喷出到充分雾化的过程可以分为油膜形成、油膜破碎及雾滴形成三个过程。

2.2 模型验证

为验证模型的可靠性, 将模拟结果与喷雾试验结果进行对比。自由喷雾试验燃油流量 16 kg/h、背压 2 MPa、喷射压力 6 MPa。由图 2 和图 3 可知: 该工况下斯特林发动机燃用柴油时喷雾形态与数值模拟情况相似, 喷雾贯穿距试验值与数值计算值近乎一致。

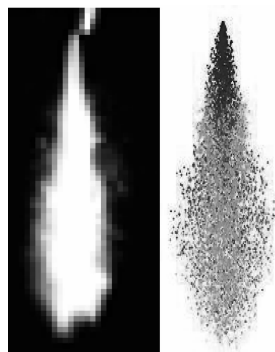


图 2 15 ms 喷雾形态对比

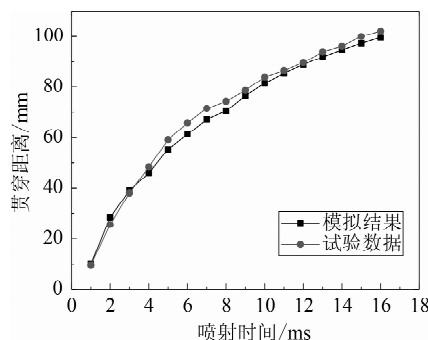


图 3 柴油喷雾模拟验证

3 模拟结果与分析

斯特林发动机旋流喷射的燃油在引射气体作用下发生破碎并雾化混合, 引射比差异直接改变进入燃烧室的氧气量和再循环废气量, 从而影响流场并对燃油喷雾液滴的运动、碰撞、蒸发产生显著影响。引射比 η 定义为:

$$\eta = \dot{m}_e / \dot{m}_o \quad (1)$$

式中： $\dot{m}_e$ 为被引射的气流质量流量， $\dot{m}_o$ 为入射氧气质量流量。

斯特林发动机气体引射器为多喷嘴旋流式同轴气体引射器。氧气从氧喷嘴以较高的压力喷入接收室并在喷口附近形成负压，燃烧室中的燃气被卷吸进入接收室，两股气流在混合室混合后，从旋流导向气道喷出，与从压力涡流喷嘴喷出的燃油混合并形成可燃混合气。引射比主要由氧喷嘴以及燃气再循环流道截面决定。过高的引射比对引射器的加工提出了很高要求。以下为斯特林发动机在生物柴油喷射流量为16.53 kg/h；引射比为4.7、7.4、11；喷射背压为2 MPa；喷射压力为6 MPa时的数值模拟结果。

图4给出不同引射比下，喷雾形态随时间的发展对比。结果表明：不同引射比下，喷雾形态随时间的发展规律相似，喷雾液束距喷嘴越远，粒径越大；距中心轴线越远，喷雾液滴数量越少。引射比对喷雾形态的最大影响表现在喷雾锥角，引射比越大，燃烧室内气流速度特别是周向和径向速度越大，促进喷雾液滴向周向和径向扩散，从而增大喷雾锥角，增大燃油混合气的空间分布，提高油气混合质量。从结果中可以看到，较大引射比下的喷雾油束前端形态出现了明显的凹型回缩锋面，见图标记所示。

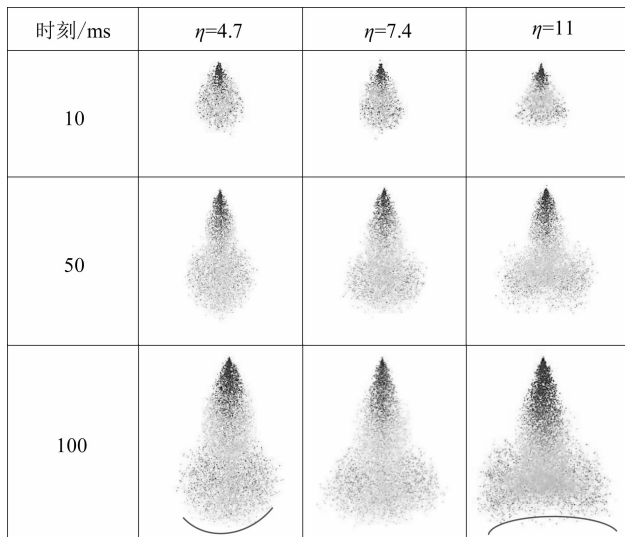


图4 引射比对喷雾油束形态发展的影响

图5直观给出了喷雾场两个不同轴向（ $Z=25$ mm、 $Z=95$ mm）截面处，引射比对截面上喷雾液滴数量的影响。可见：较远轴向位置处喷雾液滴轮廓所反映的液滴尺寸远大于较近轴向位置处的喷雾液滴尺寸；且近轴向位置处喷雾液滴呈现中心轴线中间（ $X, Y=0$ ）液滴尺寸大，周围液滴尺寸小的特点。

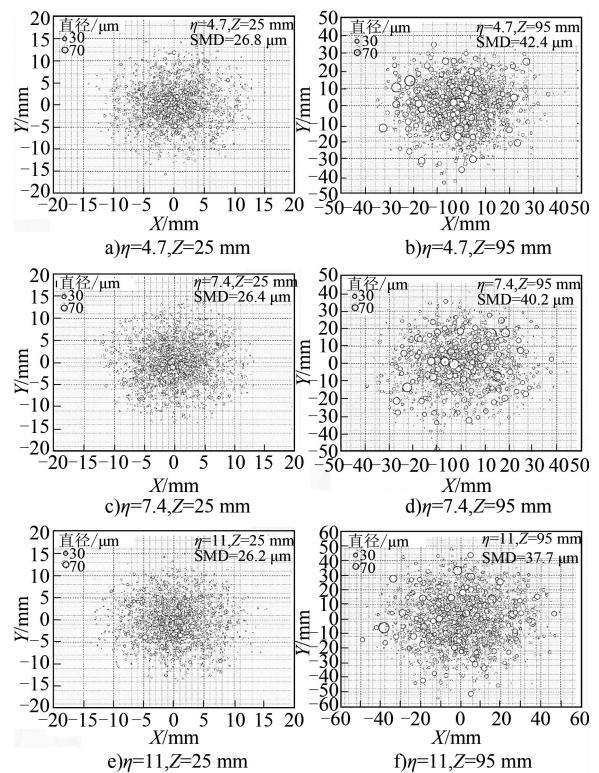


图5 不同引射比在 $z=25$ mm、 $z=95$ mm截面上喷雾液滴数量及尺寸分布

对比不同引射比对喷雾场不同轴向位置处喷雾液滴的数量和粒径分布的影响，可以发现：引射比增大，液滴分布范围明显增大，且距喷嘴越远越明显；较大引射比所对应的喷雾液滴粒径相对较小，且喷雾液滴之间的粒径差异也相对较小。表明引射比对液滴整体尺寸减小以及液滴一次、二次雾化后的均匀性具有促进作用。

图6定量给出了不同引射比时，喷雾贯穿距随时间的变化规律。结果表明：不同引射比下，喷雾贯穿距随时间均以先快后慢的速度变大。引射比越大，引射气流作用于喷雾液束的径向和周向作用力越大，喷雾液束向外扩散加剧，导致向前贯穿的喷雾液滴动量减小，喷雾贯穿距减小；另在较大引射气流作用下，喷雾液滴的蒸发较好，在贯穿过程中，细小喷雾液滴的蒸发也进一步减小了喷雾液滴贯穿动量。综合，引射比越大，喷雾贯穿距越小。

图7定量给出了引射比对喷雾场液滴粒径随轴向距离变化的影响规律。总的来说，引射比越大，喷雾索特平均直径越小；引射气流对喷雾液滴粒径的影响主要表现在远离喷孔处，且距喷孔越远，影响越明显。可以明显看到：大引射比下，射流喷雾在挡焰板处的索特平均直径明显减小；且受限喷雾的影响，这种影响在引射扩散作用下变弱，液滴的碰撞、聚并频率变低。

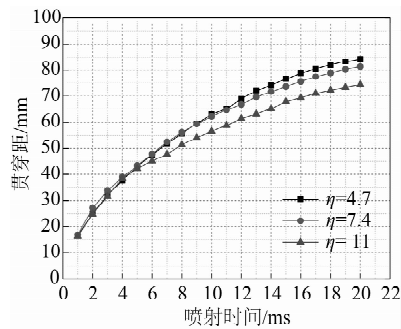


图6 引射比对喷雾贯穿距的影响

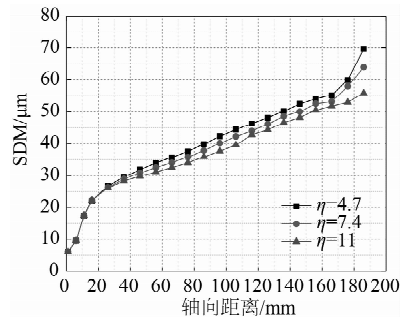


图7 引射比对喷雾索特平均直径的影响

图8进一步给出了在轴向 $Z = 25 \text{ mm}$ 处, 不同径向位置, 引射比对喷雾液滴速度及其方差的影响。结果表明: 随着径向距离增大, 喷雾液滴速度及其方差均减小; 引射比越大, 不同径向位置的喷雾液滴速度及其方差也越大。表明: 引射比的增大, 直接加强了燃烧室内气流对喷雾液滴的作用, 一方面可增大喷雾液滴运动速度, 促进液滴在燃烧室内均匀; 另一方面喷雾液滴速度越大, 液滴越易蒸发。

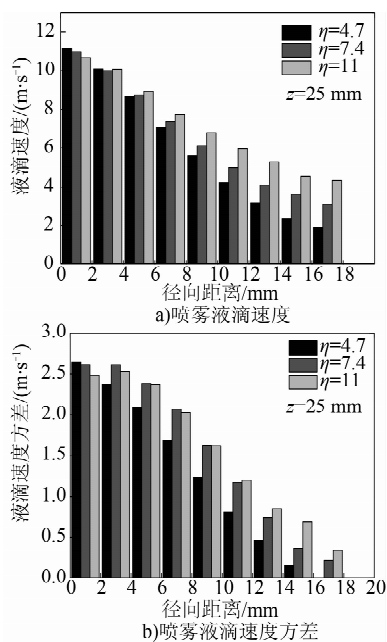
图8 $Z = 25 \text{ mm}$, 引射比对径向喷雾液滴速度以及其标准方差的影响

图9则给出了在轴向 $Z = 25 \text{ mm}$ 处, 不同径向位置, 引射比对喷雾液滴粒径及其方差的影响。结果表明: 与喷雾液滴速度径向分布不同, 随着径向距离的增大, 喷雾液滴粒径先减小后增大, 其方差则趋于减小。这是因为, 旋流引射器出来的混合气的径向旋流作用, 在同一高度截面造成了较大的速度梯度; 在 $z = 25 \text{ mm}$ 处, 最大周向速度出现在距喷射轴线 9 mm 处, 导致此处液滴碰撞破碎更为频繁, 故而此处液滴粒径更小。不同径向位置, 引射比越大, 喷雾液滴粒径及其方差也越小; 意味着, 增大引射比在促进液滴雾化的同时, 也可促进燃烧室燃油液滴的均匀分布。

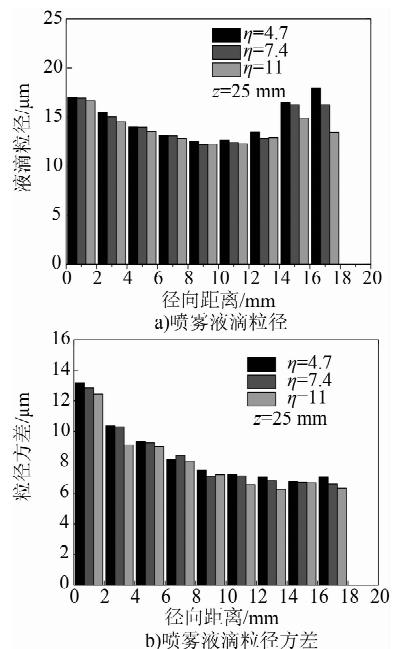
图9 $Z = 25 \text{ mm}$, 引射比对径向喷雾液滴粒径以及其标准方差的影响

图10给出了在轴向 $Z = 95 \text{ mm}$ 处, 不同径向位置, 引射比对喷雾液滴速度及其方差的影响。结果表明: 相比轴向 $Z = 25 \text{ mm}$ 处, 距喷孔位置较远的 $Z = 95 \text{ mm}$ 处, 引射比对喷雾液滴速度的影响更为明显。值得注意的是, 在较大径向位置 ($R > 45 \text{ mm}$), 引射比较小 (仅为 4.7) 时, 引射气流强度不足以将喷雾液滴输运至该位置。

图11给出了在轴向 $Z = 95 \text{ mm}$ 处, 不同径向位置, 引射比对喷雾液滴粒径及其方差的影响。结果表明: 与喷雾液滴速度分布一样, 只有较大的引射比才可以将喷雾液滴输运至径向距离较大位置。表明: 增大引射比可增大燃油混合气的空间分布, 提高喷雾雾化效果。

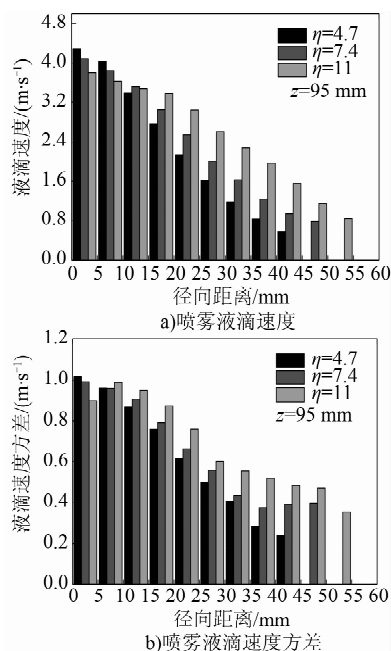


图 10 $Z=95$ mm, 引射比对径向喷雾液滴速度
以及其标准方差的影响

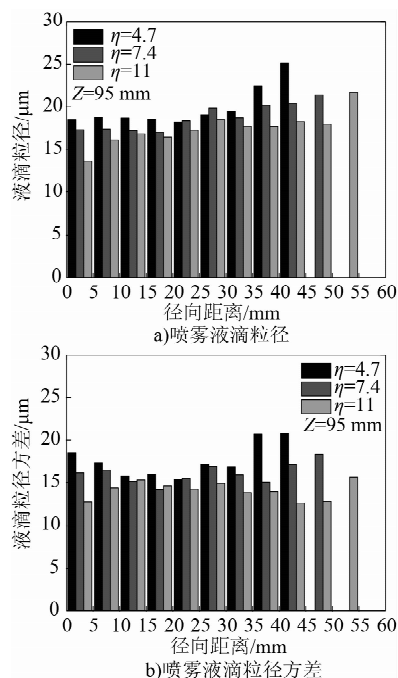


图 11 $Z=95$ mm, 引射比对径向喷雾液滴粒径
以及其标准方差的影响

4 结论

本文采用欧拉方法和拉格朗日方法分别对流场中的气相和喷雾液滴的运动进行描述, 模拟研究了高背压下引射比对生物柴油喷雾特性的影响。研究发现: 引射比增大可加强燃烧室内径向和周向的气流组织, 使得喷雾锥角增大, 贯穿距减小; 引射比越大, 喷雾场气流运动越强, 液滴速度越大, 索特平均直径越小; 引射比越大, 整个燃烧室喷雾液滴的粒径方差减小, 喷雾液滴空间分布越大, 有利于促进油气混合。

参考文献

- [1] 金东寒. 斯特林发动机技术 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2009.
- [2] 周小力. 斯特林发动机燃烧与排放特性试验研究 [D]. 上海: 上海交通大学 2013.
- [3] MURUGESAN A, UMARANI C, SUBRAMANIAN R, et al. Bio-diesel as an alternative fuel for diesel engines—a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13 (3): 653-662.
- [4] 胡怀礼, 张武高, 金永星, 等. 斯特林发动机喷雾特性试验研究 [J]. 农业机械学报, 2010, 41 (2): 10-16.
- [5] 喻超, 张武高, 朱光沸, 等. 燃料物性对斯特林发动机喷雾特性的影响 [C]. 中国内燃机学会燃烧节能净化分会学术年会, 2011.
- [6] 刘涛涛, 张武高, 陈晓玲, 等. 燃烧室背压对压力涡流喷嘴喷雾特性的影响 [J]. 农业机械学报, 2011, 42 (3): 21-25.
- [7] 朱光沸, 陈晓玲, 张武高, 等. 斯特林发动机低硫柴油和二甲醚冷态喷雾 [J]. 上海交通大学学报 (自然版), 2013, 47 (03): 341-345.
- [8] 张武高, 陈晓玲, 刘涛涛, 等. 引射空气对压力旋流喷嘴喷雾特性的影响 [J]. 上海交通大学学报 (自然版), 2013, 47 (11): 1723-1727.
- [9] SENECA P K, SCHMIDT D P, NOUAR I, et al. Modeling high-speed viscous liquid sheet atomization [J]. Int. J. Multiphase Flow, 1999, 25 (6-7): 1073-1097.