

船用低速柴油机喷孔方向对缸内燃烧影响的仿真研究

刘辰朋, 桂 勇, 刘 腾, 文李明

(中船动力研究院有限公司, 上海 200129)

摘 要: 在某船用低速柴油机燃烧系统开发中, 为设置合理的喷孔方向, 应用流体动力学软件 STAR-CD 对不同喷孔方向的缸内燃烧情况进行仿真分析。分析结果表明: 喷孔方向对柴油机缸内燃烧的影响较大; 喷孔方向顺着缸内涡流方向时可促进喷射燃油的传播及混合, 改善缸内燃烧; 但喷孔方向顺着涡流朝向缸套壁面喷射时, 油气混合主要发生在燃烧室缸套壁面附近, 增大了缸套壁面的传热, 且不利于燃烧室中心区域空气的利用; 本文研究中, 原喷油器的喷孔绕喷油器轴线朝缸内涡流方向旋转 30° 或 35° 时, 缸内燃烧情况明显改善。

关键词: 船用低速柴油机; 喷孔; 缸内燃烧; 仿真

中图分类号: TK423.8⁺4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2019)01-0022-05

Simulation Research on the Effect of the Injector Nozzle Hole Direction on the In-Cylinder Combustion of Marine Low Speed Diesel Engines

Liu Chenpeng, Gui Yong, Liu Teng, Wen Liming

(China Shipbuilding Power Engineering Institute Co., Ltd., Shanghai 200129)

Abstract: In the development of the combustion system of a certain type of marine low speed diesel engine, to get an appropriate injector nozzle hole direction, in-cylinder combustion with different injector nozzle hole directions was simulated with STAR-CD software. The analysis result shows that the injector nozzle hole directions have big effect on the in-cylinder combustion of diesel engines, they will prompt the propagation of the injected fuel and the mixing process and improve the combustion quality while the injector direction is the same with the swirl direction; but the fuel and gas mixing mainly occurred near the cylinder liner wall, if the injector nozzle hole direction is along with the swirl direction, toward the cylinder liner wall, which would increase the heat transfer of liner wall and the air in the center chamber would not be utilized. When the original injector nozzle hole direction was turned 30° or 35° along injector's axis to the swirl direction in the cylinder, the combustion quality in the cylinder could be improved significantly.

Key words: marine low-speed diesel engine; injector nozzle hole; in-cylinder combustion; simulation

0 引 言

降低燃油消耗率及满足日益严苛的排放法规是推动船舶动力系统开发的重要因素; 而燃烧系统的开发对于上述两个目标的实现至关重要。在燃烧系

统开发过程中, 喷油器喷孔方向直接影响燃油在燃烧室内与空气的混合及燃烧, 是燃烧系统设计及优化的重要参数之一。KIM C S 等对船用柴油机 HSD-MAN B&W S70MC 喷孔方向的研究表明^[1]: 喷孔方向影响燃烧过程及排放物的生成, 如两个喷孔

收稿日期: 2018-06-20; 修回日期: 2018-07-13

基金项目: 工信部高技术船舶科研计划-船用低速机工程(一期)研制经费资助。

作者简介: 刘辰朋(1987-), 男, 工程师, 主要研究方向为发动机性能与排放, lcp@cspi.net.cn。

方向过于接近，使缸内产生局部富油区域导致 SOOT 排放增加；此外喷孔显著逆着缸内气流运动方向喷射也会导正 SOOT 排放恶化；喷油器喷孔方向过于发散使稀薄混合气增加，促进缸内燃烧，但 NO_x 排放相应增大。Hiroyuki Endo 等人对船用低速柴油机 MHI UEC85LS II 的三维仿真研究表明^[2]：随着燃油喷射方向向外增大，缸盖和活塞表面的传热率增大。本文通过对标分析，在原始设计的喷油器喷孔方向的基础上，通过绕喷油器轴线旋转，改变喷油器喷孔在燃烧室内的喷射方向，来研究喷孔方向对船用低速柴油机缸内燃烧的影响。

1 模型标定

某船用低速二冲程柴油机的基本参数如表 1 所示。原机缸盖上相对布置两个相同的喷油器，喷油器喷孔外形如图 1 所示，4 个同直径的喷孔在喷嘴上层布置。在进行喷油器自主设计过程中，为检验仿真计算模型及参数设置的合理性，首先应用 STAR-CD 软件对原机喷油器的缸内燃烧过程进行仿真和试验标定。各工况 3D CFD 仿真所得缸压曲线与主机试验缸压曲线对比如图 2 所示， NO_x 排放仿真与试验对比如图 3 所示。从图 2、图 3 可知：缸压仿真计算与试验结果基本一致， NO_x 排放预测值与试验值变化趋势一致；原机 100% 工况试验油耗为 $182 (\text{g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$ ，对应的仿真结果为 $177.7 (\text{g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$ ，油耗预测结果小于 5%。相关计算模型可用于后续喷孔方向的计算研究。

表 1 某船用柴油机的基本参数

缸径/mm	340
行程/mm	1 600
连杆长度/mm	1 600
压缩比	19.8
转速/ $(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	157

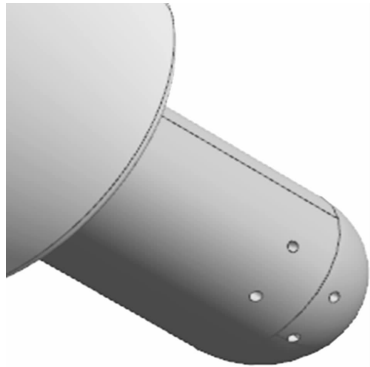


图 1 原机喷油器喷孔外形图

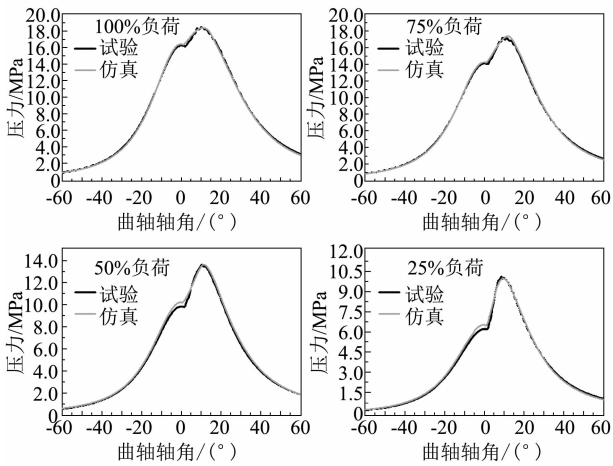


图 2 不同工况下的缸压曲线标定

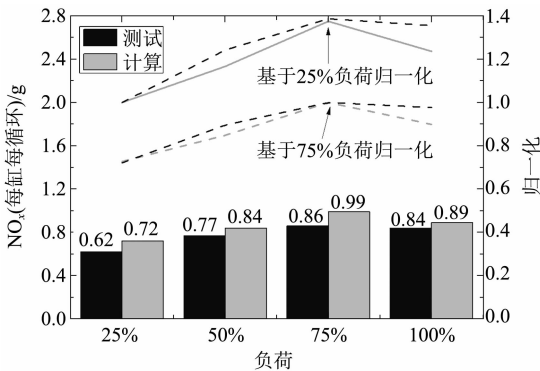


图 3 各工况 NO_x 排放仿真与试验对比

2 喷孔参数设计

2.1 喷油器喷孔参数原始设计

借鉴主流喷油器喷孔设置，自主设计了如图 4 所示的喷油器喷孔方向。喷孔方向设计主要根据主机燃油能量需求，以及各喷孔喷射雾束在燃烧室内的空间位置分布进行。单个喷油器设置 5 个喷孔，喷孔 1 和喷孔 5 孔径相等，其他喷孔孔径各不相同。通过供油系统仿真计算得到 100% 负荷不同喷孔的喷油规律，如图 5 所示。

2.2 喷孔参数优化方案

自主设计的喷油器喷孔的喷射方向与缸内涡流方向相对，这与传统商品机喷油器喷孔方向相悖，为合理优化喷孔方向，将自主设计的喷油器绕其轴线逆时针分别旋转 20° 、 25° 、 30° 、 35° 、 40° 、 50° 、 60° ，使喷孔方向逐步与缸内涡流方向一致（图 6 中缸内涡流为逆时针方向）；对喷孔方向不同改变状态下的缸内燃烧情况进行仿真分析研究。喷油器绕其轴线旋转后气缸水平面内喷孔轴线朝向气缸中心的位置如图 6 所示。

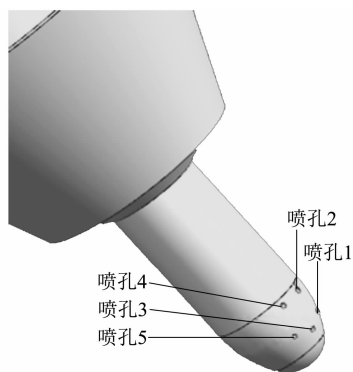


图4 自主设计的喷油器喷孔方向

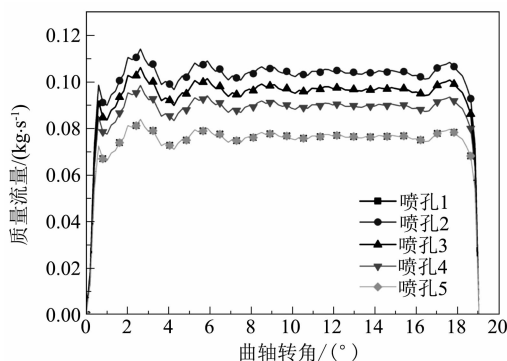


图5 100%负荷不同喷孔的喷油规律曲线

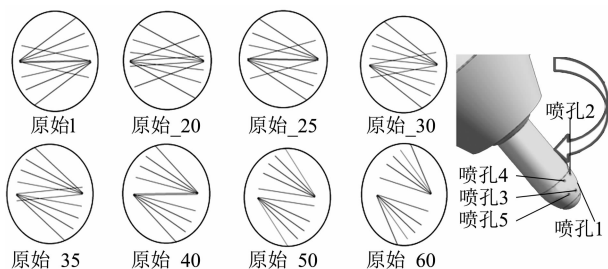


图6 气缸水平面内喷孔轴线朝向气缸中心的位置

3 仿真结果分析

3.1 空气利用情况分析

定义燃烧室内的空气利用率为 AU_n :

$$AU_n = AU(\lambda < n) = \frac{V_{(\lambda < n)}}{V} \quad (1)$$

式中: V 为燃烧室内网格的总体积, λ 为过量空气系数, $V_{(\lambda < n)}$ 为燃烧室内过量空气系数小于 n 的网格的总体积。当 $\lambda < 0.5$ 时, 燃油所在区域浓度过高, 空气量少, 易形成碳烟; 当 $\lambda > 2.5$ 时, 燃烧室内对应区域燃油浓度过小, 不能有效燃烧, 燃油利用经济性较差。船用低速柴油机采用喷射燃油的方式进行油气混合燃烧, 燃烧过程以扩散燃烧为主, 燃烧不均匀的现象难以完全避免, 因此在柴油机开发过程中, 须要通过改善燃烧系统的油气室匹

配, 尽可能地提高燃烧室内油气混合的均匀性, 即尽可能减小 $\lambda < 0.5$ 以及 $\lambda > 2.5$ 的区域。

自主喷油器的空气利用率随曲轴转角的变化趋势如图7所示。从图中可知: 随着缸内油束扩散及燃烧的进行, 缸内燃油分布越来越均匀, 表现为 $AU2$ 和 $AU2.5$ 逐渐增大, $AU0.5$ 和 $AU1$ 先增大后逐渐减小。

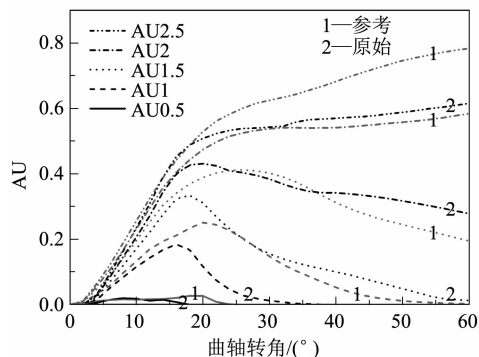


图7 空气利用率随曲轴转角变化曲线

根据文献[3], 船用低速柴油机的燃烧放热集中发生在燃烧后 30°CA 的范围内, 之后放热速率显著降低, 约在 60°CA , 燃烧放热过程结束。因此, 燃烧性能可以通过分析燃烧结束时刻缸内的空燃比分布情况得到。如图8中, X 轴表示燃油量很少的网格的体积占总网格的体积比, 表示为 $AU > 2.5$, 表明此处燃油量偏少, 不能有效燃烧, 燃油经济性差; Y 轴表示燃油量聚集的网格的体积占总网格的体积比, 由于 60°CA ATDC 时, 该比值极小, 为便于表示, 用喷雾燃烧过程中燃油浓度较高的网格占比之和, 即 $\sum AU0.5$ 表示燃油浓度较高的网格占比, 表明该处燃油聚集, 是 PM 产生的重要区域, 从而建立其燃油经济性和 PM 之间的关系。为使缸内燃油分布均匀, 即提高缸内空气利用率, 期望燃烧系统开发的目标方向为图8中左下方向。

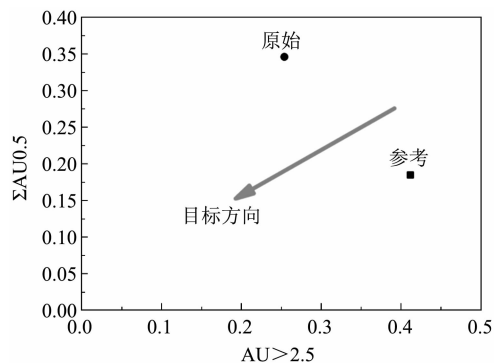


图8 燃油经济性和 PM 之间的关系

应用空气利用率分析方法对不同喷孔方向的缸内燃烧空气利用情况进行分析, 得到不同喷孔方向的燃油经济性和 PM 之间的关系如图 9 所示。从图中可知: 最靠近左下角的喷孔方向分别为原始_30、原始_35、原始_60, 这三个方案的空气利用率相对较高, 燃油在燃烧室内混合更充分。此三种喷孔方案的共同特征是: 其喷孔方向顺着缸内涡流方向, 燃油在涡流作用下可以传播到更远的区域。这种喷孔方向设置模式有利于燃油在缸内的充分混合, 有效促进缸内燃烧的进行。

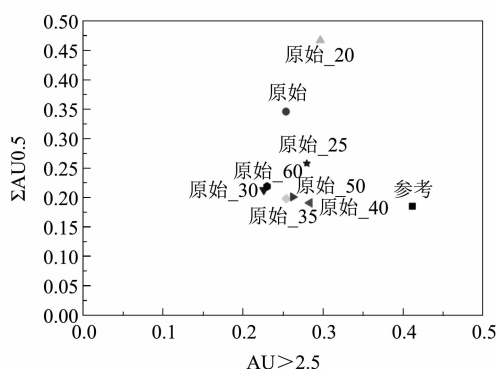


图 9 不同喷孔方向燃油经济性和 PM 之间的关系

3.2 油耗和 NO_x 排放情况分析

不同喷孔方向的油耗和 NO_x 排放情况如图 10 所示。从图中可知: 随着喷油器喷孔方向绕其轴线逆时针旋转, 主机的燃油消耗呈先增大后减小, 再继续缓慢增大的趋势; 原始_20 时的燃油消耗最大, 原始_30 时燃油消耗最小, 油耗差值在 $7 \sim 8 (\text{g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$; NO_x 排放随喷油器喷孔方向的旋转变化规律不明显; 原始_20 的 NO_x 排放最少, 这是由于该喷孔方案喷孔与涡流方向相对, 缸内涡流阻碍喷射燃油的传播, 缸内燃烧情况较差, 温度较低所致; 原始_30 和原始_40 的 NO_x 排放最多; 各喷孔方案 NO_x 排放的差值在 $3 (\text{g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$ 左右。从燃油经济性出发, 不建议选用原始_20 和原始_60 的喷孔方案。

3.3 燃烧室内涡流及壁面传热情况分析

喷孔方向改变会引起缸内气流的变化。船用低速柴油机燃油的扩散传播主要受缸内涡流的影响。改变喷孔方向后不同喷孔方案的缸内涡流变化如图 11 所示。由图可知: 自主设计的原始喷孔由于逆缸内涡流进行喷射, 燃油射流与缸内空气相向运动, 油束与空气的碰撞使两者动能损失均较大, 喷射结束后, 缸内涡流比明显降低, 其值在 2.5 左右; 随着喷射方向与缸内涡流方向一致性增强, 燃烧室内的涡流逐渐增大, 约在喷油结束时刻, 燃烧

室内的涡流比达到最大值, 之后涡流比逐渐减小。活塞的膨胀做功和气流运动过程中的能量衰减是此阶段涡流比降低的主要原因。与对标喷油器的缸内涡流比数值相比, 原始_35 对缸内气流的影响与之基本一致。

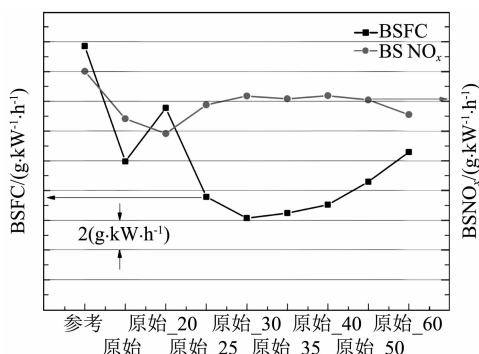


图 10 不同喷孔方向的油耗和排放对比

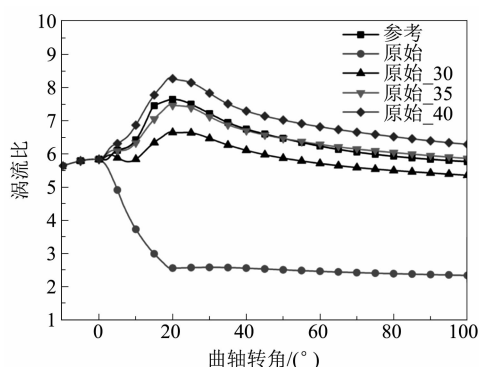


图 11 不同喷孔方案缸内涡流变化

喷孔方向改变后, 燃烧室内火焰的分布和传播路径都发生改变, 可能会发生燃烧室受热件的烧蚀破坏, 须要对喷孔方向改变后壁面传热情况进行分析。这里重点分析与对标喷油器涡流比接近的喷孔方案。改变喷孔方向后, 燃烧室区域 (缸盖、缸套、活塞、气阀底面) 传热情况如图 12 所示。从图中可知, 在喷油器由 30° 旋转至 40° 的过程中, 缸盖、缸套和活塞的壁面传热逐渐增加, 而气阀底面的传热却基本不变。这是由于喷油器在旋转方向的过程中, 燃油越来越容易到达缸套附近, 燃烧室中心区域燃油逐渐减少, 燃烧发生的位置在燃烧室内外移, 相应壁面传热增大; 气阀底部由于受喷油器旋转的影响小, 所以其壁面传热基本保持不变。

3.4 燃烧室内空燃比、温度空间分布

从燃烧室内重要参数的空间分布可以更直观地了解缸内燃烧情况, 验证宏观参数分析的结论。这里重点分析燃烧室内空燃比及温度的空间分布。原始_30 和原始_35 的空燃比分布如图 13 所示, 对应的温度分布如图 14 所示。

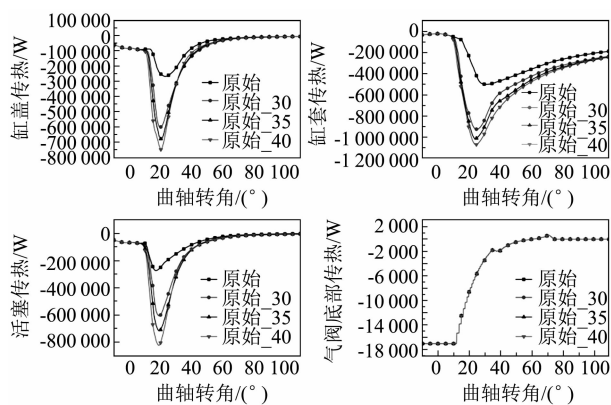


图12 喷孔方向对壁面传热的影响

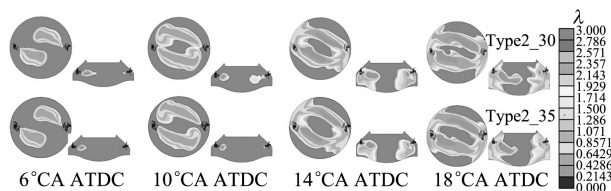


图13 原始_30和原始_35的空燃比分布

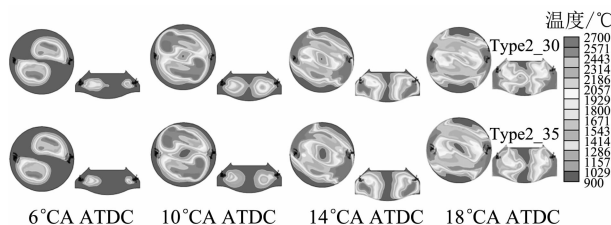


图14 原始_30和原始_35的温度分布

由图13可知,原始_30和原始_35的空燃比分布形态基本一致,原始_35更加偏向缸内涡流方向,对应的缸壁附近的油气混合气更多,气缸中心区域的油气混合气相对较少,燃烧发生区域更加接近缸壁,这是导致其缸套壁面传热较多的重要原因。由图14可知,两个喷孔方案燃烧室内温度的分布形态也基本一致。温度分布主要受缸内燃烧过程的影响,与空燃比分布密切相关,油气混合越充

分的区域燃烧发生得越均匀,燃烧室内对应区域的温度越高;同样由于原始_35更加偏向缸内涡流下游缸壁,燃烧室缸套壁面附近高温区域的温度明显大于原始_30,燃烧室中心区域的高温区域相对较小。

4 结论

通过对不同喷孔方向的缸内燃烧的数值研究,得到如下结论:

- (1) 对于船用低速二冲程柴油机,顺着缸内涡流方向设置喷孔方向可以促进喷射燃油的传播及混合,改善缸内燃烧。
- (2) 喷孔方向顺着涡流朝向缸套壁面喷射时,油气混合主要发生在燃烧室缸套壁面附近,增大了缸套壁面的传热,且不利于燃烧室中心区域空气的利用。
- (3) 对于本文的研究,原喷油器的喷孔绕喷油器轴线朝缸内涡流方向旋转30°或35°时,缸内燃烧情况明显改善。
- (4) 对于船用低速柴油机喷孔方向的设计,利用空气利用率指标评价燃烧情况具有可行性,能够甄选出相对优化的设计方案。

参考文献

- [1] KIM C S, LEE D H, CHO Y S. The comparison about CFD-simulation & measurement result of large two-stroke diesel engine [C]. CIMAC Congress, Hamburg 2001.
- [2] ENDO H, ODA Y, OKABE M, et al. The three dimensional combustion simulation for low speed two stroke diesel engine [C]. CIMAC Congress, Hamburg 2001.
- [3] KJEMTRUP N, AABO K, KNUDSENT S. Developments on exhaust emission modelling for large two-stroke diesel engines-some comparisons with measured data and update on the latest emission reduction techniques [C]. CIMAC Congress, Vienna, 2007, No. 230.