

低速二冲程双燃料船用主机气缸润滑油 自燃引发不正常燃烧问题的研究

冯立岩, 刘 超, 吴 瑶

(大连理工大学能源与动力学院, 辽宁 大连 116023)

摘 要: 介绍了低速二冲程双燃料船用主机的发展现状, 指出气缸润滑油自燃引发不正常燃烧是限制其平均有效压力 p_{me} 提高的关键因素。研究表明: 双燃料主机气缸油自燃引发不正常燃烧的内因有两方面: 主机结构特征及工作特性, 气缸油破碎、蒸发及自燃特性; 而主机工况条件、引燃喷射正时等控制参数、过量空气系数、预混合气均匀度、气缸油消耗率、气缸套表面状况等外因, 则是气缸油自燃的触发条件。建议在此基础上开展低速二冲程双燃料船用主机的研发工作。

关键词: 低速二冲程双燃料船用主机; 气缸润滑油; 不正常燃烧

中图分类号: TK 431; TK421⁺.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2017)01-0001-05

Study on Abnormal Combustion Caused by Cylinder Oil Auto-ignition in Low-Speed Two-Stroke Dual-Fuel Marine Main Engine

Feng Liyan, Liu Chao, Wu Yao

(School of Energy and Power, Dalian University of Technology, Liaoning Dalian 116023)

Abstract: The development status of low-speed two-stroke dual-fuel marine main engines is introduced. It is pointed out that the abnormal combustion caused by cylinder oil auto-ignition is the key problem to impede the increase of mean effective pressure of the engine. Research results show that abnormal combustion caused by cylinder oil auto-ignition of dual-fuel main engine has two internal causes, which are construction and operation characteristics of main engine, as well as cylinder oil crush, evaporation and auto-ignition characteristics; several external causes, including control parameters such as main engine operation condition and pilot injection timing, excess air coefficient, uniformity of pre-mixtures, consumption rate of cylinder oil, as well as surface condition of cylinder liner, which are the trigger conditions of cylinder oil auto-ignition. It is suggested that the development of low-speed two-stroke dual-fuel marine main engine should be carried out based on the these research results.

Key words: low-speed two-stroke dual-fuel marine main engine; cylinder oil; abnormal combustion

1 低速二冲程双燃料船用主机发展现状

气体燃料船用主机是新一代绿色节能船舶动力装置, 是满足国际海事组织 (IMO) Tier III 排放法规要求的最具发展前景的船用主机之一。这种清

洁能源船舶动力装置的发展对于我国节能减排、保障能源安全、保护环境具有重要意义。低速二冲程双燃料船用主机的应用直接关系到气体燃料船用主机的大型化、远洋化, 其研发、应用与推广是保证我国气体燃料船用主机行业型号完整的必要环节, 是实现我国海洋强国梦想的重要基石。

目前低速二冲程双燃料船用主机的技术路线有两条：分别为低压燃气喷射预混合稀薄燃烧方式（Otto 循环），和燃气高压喷射扩散燃烧方式（Diesel 循环）。采用 Otto 循环的双燃料机的氮氧化物（ NO_x ）排放，不需后处理就能够满足 IMO Tier III 法规限制要求；而采用 Diesel 循环的双燃料机则只能满足 IMO Tier II 排放限值要求。由于 Otto 循环双燃料船用主机在控制排放方面优势明显，本文仅探讨这种双燃料机的相关技术问题，文中出现的双燃料机均指 Otto 循环双燃料船用主机。这种双燃料机以微喷柴油引燃天然气与空气的稀薄混合气，如图 1 所示^[1]。该种双燃料机在具备高效稀薄燃烧、高平均有效压力（ p_{me} ）、高效率（ η_{et} ）、低 NO_x 排放等气体燃料船用主机的基本特征的同时，又在换气、燃空混合气形成、点火及燃烧等核心过程有极强的特殊性。这些特殊性导致了高 p_{me} 低速二冲程双燃料船用主机的研究与开发面临诸多难点，在客观上也使得其发展历程比四冲程气体燃料船用主机更加艰难。

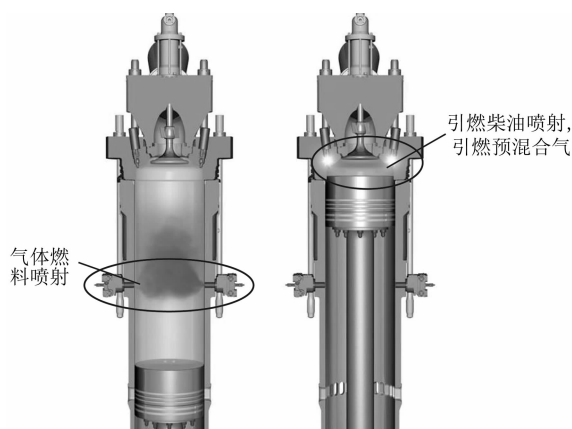


图 1 低速二冲程双燃料船用主机燃料喷射及点燃过程^[1]

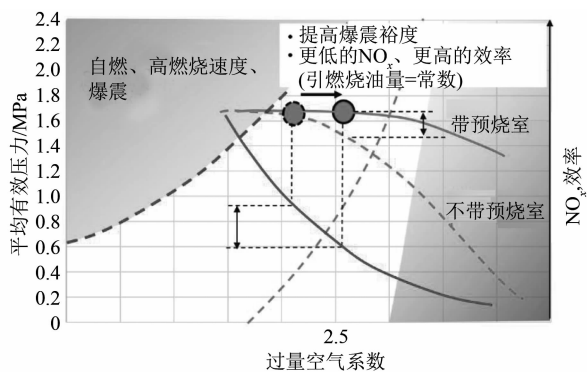
尽管国外气体燃料船用主机已经历经十几年的发展，然而目前投入运营的主机产品均为四冲程机^[2~7]，双燃料低速二冲程船用主机发展缓慢。虽然电站用大功率二冲程双燃料发动机早在 1987 年就已经进行了测试并陆续投入运行^[8]，但是直至 2011 年和 2012 年，世界两大船用主机巨头才陆续完成高 p_{me} 低速二冲程双燃料船用主机的测试。2011 年 9 月 Wartsila-Sulzer 公司的 RT5 低速二冲程双燃料船用主机试验样机在意大利完成测试^[9]；2016 年 5 月 Wartsila-Sulzer 重组后的 WinGD 公司研发的低压燃气喷射双燃料二冲程发动机完成海试^[10]。2012 年 11 月 MAN 公司许可证 ME-GI 低速二冲程双燃料船用主机在韩国现代公司制造并完成测试^[11]；2015 年 11 月安装有两台 MAN7S70ME-C-

7-GI 双燃料低速主机的 Rasheeda 号 LNG 运输船完成海试^[12]。

在低速二冲程双燃料船用主机的研发中，要面临如何提高扫气效率，形成高质量混合气，保证稳定点火，实现高效率燃烧，降低有害排放，保障部件及整机可靠性等难点问题，所有这些理论和技术问题的解析都围绕一个核心目标：在高效率的前提下，保证在高 p_{me} 条件下主机的可靠燃烧。

2 Otto 循环气体燃料船用主机的不正常燃烧问题

在船用主机研发过程中，尽可能提高主机的 p_{me} 以提高主机的强化程度，是研发人员永恒的追求。在传统船用柴油机上， p_{me} 的提高主要受限于结构强度对缸内最高燃烧压力（ p_{max} ）的承受能力；而在 Otto 循环双燃料机上，又增加了一个限项：不正常燃烧。不正常燃烧主要有三种形式：气缸油自燃引发早火爆燃、普通爆燃和热表面点火。在采用高增压提高 p_{me} 后，缸内压缩终点压力和温度升高，不正常燃烧倾向性骤然增强。一旦不正常燃烧发生且没有得到及时控制和消除，局部快速放热和强烈的压力冲击波会破坏主机活塞、缸盖等受热、受力零部件，造成主机故障，威胁全船安全。因此，Otto 循环气体燃料船用主机 p_{me} 的提高必须建立在妥善解决不正常燃烧问题的基础上。每一次气体燃料船用主机 p_{me} 的大幅提高都是在成功跨越不正常燃烧障碍基础上的理论和技术飞跃。近二十年来，在历经 p_{me} 以每十年 0.5 MPa、热效率以每十年 5% 的速率迅速增长后^[13]，高水平气体燃料船用主机的 p_{me} 已达到 2.0 ~ 2.2 MPa，有效热效率接近 50%。在高负荷工况运行时，高水平气体燃料船用主机的预混合气浓度控制窗口非常狭窄，如图 2 所示^[14]。为了保证高效率并避免不正常燃烧和失火，缸内预混合气的过量空气系数必须控制在这狭窄的范围内，同时须对配气正时、点火正时等参数做迅速精确的调节。目前，不正常燃烧已经成为限制气体燃料船用主机 p_{me} 进一步提高的首要因素，在其限制下，中速气体燃料发动机的 p_{me} 已接近极限^[15]。而在低速机上，由于缸径大、转速低，正常火焰传播距离长， p_{me} 提高与不正常燃烧控制的矛盾更加突出。低速二冲程双燃料船用主机的不正常燃烧问题也就理所当然地成为限制其 p_{me} 提高的首要问题。因此，不正常燃烧机理及控制研究是低速二冲程双燃料船用主机研究与开发的核心工作之一。

图2 低速二冲程气体燃料船用主机的工作窗口^[14]

对低速二冲程双燃料船用主机而言, 发生不正常燃烧的诱因有很多: 如高压压缩比、受热零部件表面温度过热、燃空混合气不均匀、燃气甲烷值过低、积炭、气缸润滑油自燃等。在诸多诱发因素中, 气缸润滑油自燃是最复杂的因素。

3 气缸润滑油自燃引发不正常燃烧问题的特点

气缸润滑油自燃的发生过程和作用过程复杂, 导致其具有极高的不确定性和极大的危害性。由于气缸润滑油注入时产生油雾、扫气吹拂、气体卷吸等作用, 少量气缸润滑油会游离于缸内, 形成潜在的自燃点, 一旦缸内温度达到气缸润滑油自燃温度, 这些游离的气缸润滑油就会自燃。对于采用扩散燃烧的 Diesel 循环发动机 (如常规柴油机) 来说, 气缸润滑油自燃不会影响正常燃烧; 但对采用预混合燃烧的 Otto 循环发动机, 气缸润滑油自燃很有可能造成不正常燃烧。如果气缸润滑油自燃发生在正常火焰传播到来之前, 就会引发爆燃; 而一旦气缸润滑油自燃发生在引燃柴油喷射 (即正常点火) 之前, 则有可能引发危害更大的早火爆燃。近年来, 随着中、低速气体机的强化度日益提高, 该问题更加突出。尤其在低速二冲程双燃料船用主机上, 气缸润滑油直接注入气缸, 其消耗率比四冲程机高, 缸内气缸润滑油游离量较多。气缸润滑油注入时产生少量油雾形成缸内游离液滴; 另外, 活塞下行时少量气缸润滑油被活塞环刮到扫气口后 (图3显示了扫气口表面分布的气缸润滑油情况), 受到进气的吹拂作用, 这部分气缸润滑油也易于游离到燃空混合气中, 形成潜在自燃点。加之低速机缸径大、转速低, 火焰传播时间较长, 在火焰传播到来之前发生气缸润滑油自燃的可能性更大。因而低速二冲程双燃料船用主机气缸润滑油自燃引发不正常燃烧的问题尤为突出。



良好状态, 刮到扫气口处的气缸润滑油量很少



不良状态 (气缸润滑油注入过多, 大量未用气缸润滑油刮到扫气口处)

图3 二冲程船用主机扫气口处气缸润滑油状态^[15]

气缸润滑油自燃现象在船用主机上普遍存在, 但是在传统船用柴油机上气缸润滑油自燃对燃烧性能的影响微乎其微, 这种现象从未引起注意。直到气体燃料船用主机兴起后, 气缸润滑油自燃对该类主机动力性和安全性的影响突显, 该现象才开始为人们所关注。

与其他不正常燃烧诱因不同, 气缸润滑油自燃引发不正常燃烧的不确定性极高, 主要表现为: 气缸润滑油在缸内游离量难以确定, 油滴在缸内的时空分布随机性大, 油滴在缸内的运动和蒸发过程复杂, 气缸润滑油状态受主机工况、运转周期、滑动部件表面条件等多种因素影响。这种不正常燃烧的控制和预防非常困难, 常规的爆燃控制方法 (如推迟引燃柴油喷射时间) 对气缸润滑油自燃引发的早火爆燃完全不起作用^[16-17]。气缸润滑油自燃引发不正常燃烧问题是气体燃料发动机研发面临的关键问题^[18]。

低速二冲程双燃料船用主机的预混合燃烧特点, 主机的扫气过程、扫气对气缸润滑油的吹拂作用, 以及气缸润滑油的注入方式决定了气缸润滑油自燃引发不正常燃烧的存在基础和威胁程度。这种不正常燃烧受到主机工况条件, 控制参数, 预混合

气形成状况、气缸润滑油消耗率、气缸套表面状况等多种因素影响。缸内压力、温度高,混合气均匀性差,气缸润滑油消耗率高,气缸套表面油膜分布不均等都是诱发气缸润滑油自燃引发不正常燃烧的外部因素。比如当预混合气过量空气系数较小时就容易发生气缸油自燃引发的早火爆燃^[19]。图4为不同过量空气系数条件下气缸润滑油自燃引发不正常燃烧的对比。过量空气系数 $\lambda = 1.9$ 条件下发生了早火爆燃,而 $\lambda = 2.3$ 条件下没有出现早火爆燃^[20]。图中以圆圈标记的位置是气缸润滑油自燃的位置;左侧为引燃柴油扩散燃烧影像。

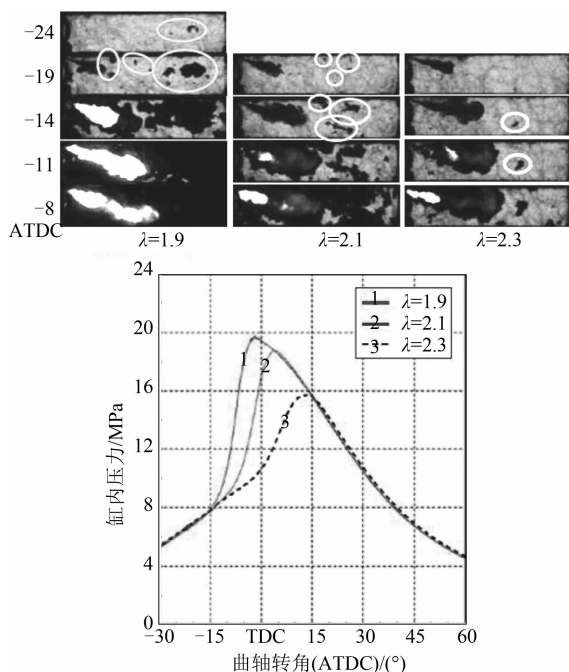


图4 预混合气过量空气系数与气缸油自燃引发早火爆燃的关系^[20]

气缸润滑油消耗率越高其自燃可能性越高,相应的气缸润滑油自燃所引发的早火爆燃也趋于严重^[21]。图5为缸内可视化系统拍摄到的气缸润滑油自燃现象。图中显示:气缸润滑油供给量为 $1 \text{ (g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$ 时,气缸润滑油自燃现象明显,且发生时间早,比引燃喷射时间早 2° 曲轴转角。

气缸润滑油自燃的客观存在限制了双燃料机平均有效压力的提高,还使得双燃料机工作窗口收窄^[22]。工作窗口即包括过量空气系数的控制范围,还包括引燃柴油喷射定时的控制范围。当平均有效压力提高时,控制普通爆燃要求延迟引燃柴油喷射,而控制气缸润滑油自燃引发早火爆燃又要求引燃柴油喷射时间不能过晚,这对矛盾使得引燃柴油喷射定时的选择余地非常小。可见,在低速二冲程

双燃料机上气缸润滑油自燃引发不正常燃烧的控制难度非常高,须要在主机结构、参数、控制策略、气缸润滑油性质、气缸润滑油供给及布油等多个方面做大量的优化工作。

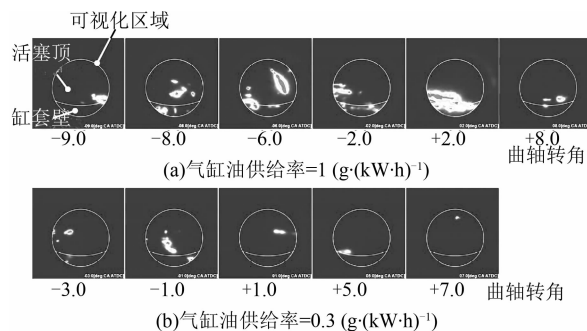


图5 气缸润滑油自燃与气缸润滑油消耗率之间的关系^[21]

4 结 论

低速二冲程双燃料船用主机气缸油自燃引发不正常燃烧的内因有两方面:①低速二冲程双燃料船用主机结构特征及工作特性;②气缸油破碎、蒸发及自燃特性。采用Otto循环的低速二冲程双燃料船用主机的预混合燃烧特点,主机的扫气过程、扫气对气缸油的吹拂作用,以及气缸油注入方式决定了气缸油自燃引发爆燃问题的存在基础和威胁程度;气缸油的物理、化学特性决定了气缸油油滴的运动、破碎、蒸发和自燃过程。主机工况条件、引燃喷射正时等控制参数、过量空气系数、预混合气均匀度、气缸油消耗率、气缸套表面状况等外部因素是气缸油自燃引发不正常燃烧的触发条件。解决低速二冲程双燃料船用主机气缸油自燃引发不正常燃烧问题,须在充分理解和掌握该种船用主机的结构特征及工作特性,气缸油破碎、蒸发及自燃特性的基础上,研究掌握这种不正常燃烧的影响因素及控制规律。

参考文献

- [1] NYIUND I, OTT M. Development of a dual fuel technology for slow-speed engines [C]. Proceedings of the 27th CIMAC Congress. Shanghai, 2013; Paper No. 284.
- [2] Wärtsilä Corporation, Wärtsilä annual report 2008.
- [3] MAN Diesel Group, MAN Diesel annual report 2008. .
- [4] TROBERG M, PORTIN K, JARVI A. Update on Wärtsilä 4-stroke gas product development [C]. Proceedings of the 25th CIMAC Congress. Shanghai, 2013; Paper No. 406.
- [5] BOECKHOFF N, MOEGELE H. Improvements and new applications of the MAN51/60 gas engine for marine and power plant [C]. Proceedings of the 27th CIMAC Con-

- gress. Shanghai, 2013; Paper No. 294.
- [6] VAKTSKJOLD E, SKARBO L A, VALDE K, et al. The new bergen B35 :40 lean burn marine gas engine series and practical experiences of SI lean burn gas engines for marine mechanical drive [C]. Proceedings of the 27th CIMAC Congress. Shanghai, 2013; Paper No. 417.
- [7] OKA T, KONDO M, AIKO T. Development of large gas engine with high efficiency (MD36G) [C]. Proceedings of the 26th CIMAC Congress, Bergen, Norway, 2010. No. 115.
- [8] MAN Diesel Group. Stationary MAN B&W ME-GI-S engines for dual fuel applications. 2010.
- [9] <http://cdn.wartsila.com/docs/default-source/product-files/engines/ls-df-engine/new-2-stroke-gas-engine-sets-nox-emissions-benchmark.pdf?sfvrsn=0>
- [10] <https://www.wingd.com/en/media/press-releases/terntanks-first-15000dwt-chemical-tanker-with-wingd-x-df-engine-passed-sea-trials/>
- [11] <http://marine.man.eu/two-stroke/2-stroke-engines/me-gi-engines>.
- [12] JUIHUSSEN L R, KRYGEG M J, LEE H T, et al. Service experience with the first MAN B&W diesel ME-GI engines onboard LNG vessels [C]. Proceedings of the 28th CIMAC Congress. Helsinki, 2016; Paper No. 269.
- [13] CAHAHAN T J, HOAG K. An updated survey of gas engine performance development [C]. Proceedings of the 27th CIMAC Congress. Shanghai, 2013; Paper No. 277.
- [14] OTT M, NYLUND I, ALDER R, et al. The 2-stroke low-pressure dual-fuel technology: from concept to reality [C]. Proceedings of the 28th CIMAC Congress. Helsinki, 2016; Paper No. 233.
- [15] Cylinder lubrication of two-stroke crosshead marine diesel engines [R]. Wartsila Technical Journal. 2010, 02.
- [16] YASUEDA S, TAKASAKI K, TAIMA H. Abnormal combustion caused by lubricating oil in high BMEP gas engines [J]. MTZ. Special Edition, May 2013. p35-39.
- [17] TAKESHIMA S, ARIMOTO N. Development of cylinder lubricant for LNG fuelled 2-stroke engines [C]. Proceedings of the 28th CIMAC Congress. Helsinki, 2016; Paper No. 143.
- [18] HERDIN G. Lean burn gas engines are mature products which can beat allcomers on emissions [J]. MTZ. Special Edition, May 2013.
- [19] TAJIMA H, KUNIMITSU M, SUGIURE K, et al. Development of high-efficiency gas engine through observation and simulation of knocking phenomena [C]. Proceedings of the 26th CIMAC Congress, Bergen, Norway, 2010. No. 213.
- [20] YASUEDA S, TOZZI L, SOTIROPOULOU E. Predicting autoignition caused by lubricating oil in gas engines [C]. Proceedings of the 27th CIMAC Congress. Shanghai, 2013; Paper No. 37.
- [21] HIROSE T, MASUDA Y, YAMADA T. Technical challenge for the 2-stroke premixed combustion gas engine (pre-ignition behavior and overcoming technique) [C]. Proceedings of the 27th CIMAC Congress. Shanghai, 2013; Paper No. 185.
- [22] The examination on the main contributing factors of lube oil pre-ignition [C]. Proceedings of the 28th CIMAC Congress. Helsinki, 2016; Paper No. 147.

《柴油机》杂志官方网站启用公告

《柴油机》杂志从即日起正式启用官方网站, 网址为“<http://cyjzz.csic-711.com>”。该网站为我编辑部唯一官网, 请各位读者与作者通过该网站了解《柴油机》杂志相关信息, 并按其上联络方式进行日常联络。

如您在使用过程中遇到任何问题, 或对我刊有任何意见或建议, 请与我刊编辑部联系。具体联系方式见网页下方名址栏, 或网站首页“联系我们”。

感谢广大读者与作者对《柴油机》杂志的长期关注和支持。

《柴油机》编辑部
2016 年 12 月 1 日