

机型与综述

G26 系列船用中速柴油机设计开发

孙良艳, 霍荣康, 胡 升, 江秋红, 徐赛军, 钱 旭, 李 宁

(广州柴油机厂股份有限公司, 广东 广州 510371)

摘 要: 介绍了自主开发的 G26 系列船用中速柴油机的设计原理和设计指标; 重点介绍了为实现节能减排目标而采取的一系列技术措施, 以及主要件的结构特点。性能试验表明: 该机的技术指标和设计指标均达到设计要求。并取得中国船级社颁发的柴油机国际防止空气污染证书和船用产品型式认可证书。该机目前已投放市场, 进入实船应用阶段。

关键词: 船用中速柴油机; 设计; 结构; 试验

中图分类号: TK422 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2016)02-0001-04

Design and Development of Series G26 Marine Medium Speed Diesel Engine

Sun Liangyan, Huo Rongkang, Hu Sheng, Jiang Qiuhong, Xu Saijun, Qian Xu, Li Ning

(Guangzhou Diesel Engine Factory Co., Ltd., Guangdong Guangzhou 510371)

Abstract: The design principle and specification of self-developed series G26 marine medium-speed diesel engine were introduced. The measures for achieving the goal of energy saving and emission reduction, and the structure of major parts were particularly emphasized. The performance tests showed that the specifications in both technical and design aspects had met the design requirements. G26 has obtained the International Air Pollution Prevention Certificate and the Certificate of Marine Product Type Approval that issued by China Classification Society. Currently, G26 is available on the market, and has already been used on ships.

Key words: marine medium speed diesel engine; design; structure; test

0 引 言

2007 年至 2009 年, 广州柴油机厂股份有限公司与中国船舶重工集团公司第七一一研究所合作, 研究开发了国内新一代 G32 系列(6、8、9 缸, 2 665 ~ 4 400 kW) 船用中速大功率柴油机。180 多台 G32 柴油机成功应用于推进、发电、工程船舶等领域, 产品的可靠性得以充分验证。

2010 年, 为适应市场发展需要并结合产品结构的调整, 广州柴油机厂股份有限公司以“继承与创新相结合”的方针, 自主研发 G26 系列船用中速柴油机。

强化系数是表征柴油机技术水平的重要指标。

G26 系列机的强化系数: $p_{me} \cdot C_m = 25.1$ (MPa · (m · s⁻¹))。G26 系列柴油机强化度高, 要获得良好的综合性能, 优化其燃烧过程是关键。

G26 系列柴油机总体设计以及样机性能调试阶段所采取的技术措施, 保证了设计指标的有效实现。

1 设计指标及原则

G26 系列柴油机设计指标见表 1。

以结构紧凑、外形简洁、维护方便为总体设计原则^[1], 研究开发可靠性高、节能减排、性能好的 G26 系列船用中速柴油机。G26 机横剖面见图 1。

收稿日期: 2015-07-23

作者简介: 孙良艳(1977-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为柴油机性能研究和新产品开发, E-mail: sj-sly@gdiesel.com.cn。

表 1 G26 系列柴油机设计指标

型号	6G26	8G26	9G26
型式	直列、四冲程、直喷、增压中冷、不可逆转		
气缸数	6	8	9
气缸直径/mm	260		
活塞行程/mm	390		
持续功率/kW	1 998	2 664	3 000
持续功率转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	750		
平均有效压力/MPa	2.57		
压缩比	17: 1		
活塞平均速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	9.75		
最高燃烧压力/MPa	21.0		
燃油消耗率/ ($g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$)	183		

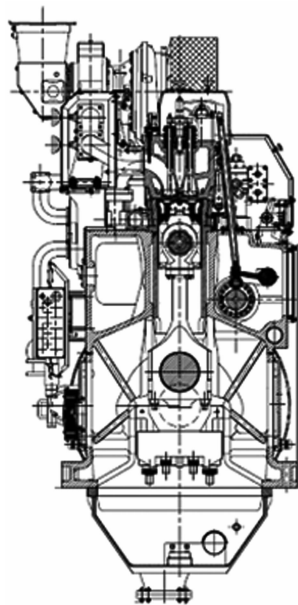


图 1 G26 横剖面

2 节能减排措施

2.1 燃烧室设计

燃烧室设计对混合气的形成和燃烧品质有重要影响。为了实现节能减排的目标,经过充分论证确定以下相关因素:行程-缸径比(S/D)、压缩比、最高燃烧压力和燃烧模式等;增压器选型则根据配机的性能测试结果进行对比和评估。

(1) 行程-缸径比

G26 柴油机 $S/D = 390/260 = 1.5$,长行程与高效率增压器的相互配合,实现了较高的燃烧室造型(图 2),有利于燃烧过程的组织。较宽敞的燃烧室使喷入的燃油与增压空气能够均匀地混合,

使燃烧更充分。



图 2 燃烧室造型

(2) 压缩比

$\varepsilon = 17:1$,高压压缩比使压缩冲程终点的温度和压力足够高,燃油着火性能良好,燃烧压力增长梯度缓和,软压力分布和软燃烧分布方式有利于抑制 NO_x 的生成。

(3) 最高燃烧压力

最高燃烧压力为 21.0 MPa, $p_{max}/p_{me} = 21.0/2.57 = 8.2 < [8.5]$ 。合适的最高燃烧压力可以在控制发动机制造成本的前提下,获得良好的燃油经济性、较高可靠性和使用寿命。

(4) 燃烧模式

额定工况的压缩压力 $p_c = 19.2$ MPa,压力升高比 $\lambda = 21.0/19.2 = 1.09$,实现接近于等压燃烧的缸内过程,从而有效地控制最高燃烧温度,达到高效、清洁燃烧的目标。

(5) 增压器

高效率增压器能提供足够的新鲜空气量,与高压压缩比协同作用,提高燃烧室内的空气密度,配合米勒定时,使燃烧的峰值温度较低和持续时间较短,有利于降低 NO_x 的生成;高效率增压器能保持缸内一定的过量空气系数,利于充分燃烧,获得较好的燃油经济性^[2]。

2.2 燃油喷射压力

高压泵后燃油压力为 152.0 MPa(见图 3)。经过优化的供油凸轮型线使燃油喷射速率较高,保证了油粒的微细度,从而使其更好地与增压空气混合并蒸发,缩短滞燃期,提高燃烧热效率。

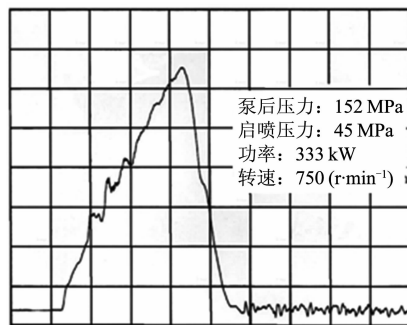


图 3 高压泵后燃油压力

2.3 提高机械效率

(1) G26 活塞环为两道气环、一道油环,可减少环与气缸壁间摩擦功的损失;

(2) 控制机带泵(润滑油泵、水泵和燃油输送泵)的流量,减少辅助设备的功率消耗;

(3) 活塞、活塞环和气缸套,滚轮和凸轮等重要摩擦副的零件表面做特殊工艺处理,降低其摩擦系数,提高发动机的机械效率。

3 主要件结构特点

3.1 无水机体

G26 机机体为呈方箱形的球墨铸铁机体,进气箱、主润滑油道集成在其中,发动机外表十分简洁。倒挂式主轴承盖通过主轴承螺栓和横向拉紧螺栓与机体联成一个整体,进一步提高了机体的结构刚度;同时也为主轴承提供了极好的工作条件。机体曲轴箱门盖大,方便检修和维护。机体和气缸套之间无冷却水腔,以避免机体受腐蚀,也可防止冷却水掺入润滑油中。机体自由端与前端盖板之间构成一个宽敞的空间,可以轻松地布置各种类型的扭转振动阻尼器^[3]。

3.2 全平衡曲轴

G26 机曲轴采用优质合金钢全纤维锻造。主轴颈 $\Phi 250$ mm,曲柄销 $\Phi 220$ mm,轴颈重叠量为 40 mm。合理加大轴径和重叠度,可降低轴承比压并有效提高曲轴的刚度(图 4)。



图 4 单位曲拐

所有曲臂都设置有大尺寸平衡块,100% 平衡曲拐的离心力,使主轴承获得合适的润滑油膜厚度,这是提高曲轴和轴瓦可靠性和耐用度的有力保障。

3.3 气缸套

气缸套上部为高凸缘钻孔结构,径向厚度较大,具有足够的机械强度以承受很高的燃烧压力。钻孔冷却解决高 p_{me} 带来的气缸套颈部热应力过大的问题。气缸套下方无水冷却,最大限度地降低燃用重油时发生低温腐蚀的可能性。气缸套顶部内壁设置抗磨环,避免气缸套偏磨并降低润滑油消耗。气缸套内孔珩磨平台网纹,以改善磨合性能和润滑条件。

3.4 大刚度气缸盖

G26 机气缸盖采用球墨铸铁铸造,高度 $H = 1.4 D$,保证气缸盖具有足够大的刚度。为降低气缸盖热应力和机械应力,采用薄燃烧室底板、中隔板加强的结构形式。薄燃烧室底板能改善冷却效果,降低热应力,减小热变形;而中隔板则可加强气缸盖的整体刚度,降低机械应力^[4]。排气阀座采用强制冷却方式,以防止燃用重油时发生高温腐蚀。气缸盖用四根螺柱紧固。

3.5 双支承活塞

G26 机活塞比功率较大: $N_F = N_{cyl} / [F \cdot (S/D)^{1/2}] = 0.51$ ($\text{kW} \cdot \text{cm}^{-2}$)。活塞由钢顶、球墨铸铁裙部和四根双头螺柱组合而成,采用振荡冷却方式^[5]。活塞头布置了高且当量直径大的环形冷却腔,以降低活塞头火力岸以及环槽区的工作温度。活塞头、裙之间采用双支承结构(图 5),既可减小环槽的变形和磨损,又能降低活塞的热应力和机械应力。

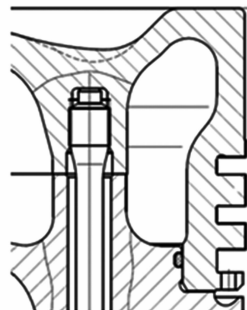


图 5 活塞

3.6 小吊缸高度连杆

G26 机连杆由合金结构钢锻造而成。三段式设计能实现较大的曲柄销直径并降低轴承比压;吊活塞时不需拆开大端轴承,而检查大端轴承时,又不必吊出活塞。杆身的剖分面紧靠小头(图 6),既保证大端轴承的结构刚度,减小连杆质量,又使吊缸高度大大减小。通过改变剖分面中间的垫片,可以较方便地调整几何压缩比。



图 6 连杆

4 性能调试

首制机为 6G26 型,性能调试阶段以降低燃油

消耗率为核心,围绕增压器选型、喷油嘴筛选、燃烧室优化三个专题开展。

4.1 增压器选型

从 ABB 公司 A140-M 型和 TPS57-F 型增压器中选优。根据配机测取的燃油消耗率、排气温度、最高燃烧压力、 NO_x 、烟度等性能参数所作的对比分析,确定 6G26 型柴油机选配 TPS57-F 型增压器。

4.2 喷油嘴筛选

为了使燃油喷雾与燃烧室形状达到较好匹配,按照以下基本原则设计多款几何参数喷孔的油嘴进行对比试验,从中挑选出性能最佳的结构(图 7)。

(1) 较多的喷孔数目,既改善燃油在燃烧室内的宏观分布,又不至于出现过多的油束重叠;

(2) 较小的喷孔直径,可提高燃油颗粒的微细度,以便和增压空气充分地混合与蒸发;

(3) 优化喷孔夹角,使油雾尽量少地与低温的燃烧室壁面接触。



图 7 喷油嘴

4.3 燃烧室优化

为了实现燃烧室形状与气流运动的良好匹配,采用三种浅 ω 形活塞顶进行对比试验。其中,增高火力岸,减小余隙高度,优化锥台轮廓线的方案使主要混合气生成区域产生显著的涡流运动(图 8),取得了加强油气混合,以及在凹坑向上部空间扩展燃烧阶段,提高对余隙中新鲜空气利用的明显效果。

经过增压器选型、喷油嘴筛选、燃烧室优化三个专题的性能调试,改善了混合气的形成和燃烧过程,使燃油消耗率、 NO_x 排放和排气烟度等性能参数达到了设计指标。

5 设计验证

首制机(图 9)按照中国船级社认可的

《6G26 柴油机型式试验大纲》,进行了安全保护装置试验、功能性试验、工作负荷点运行、应急工作运行、持续功率稳定性试验和全面的性能测试。测试结果显示:各项技术指标和性能指标满足项目设计任务书要求,详见表 2。

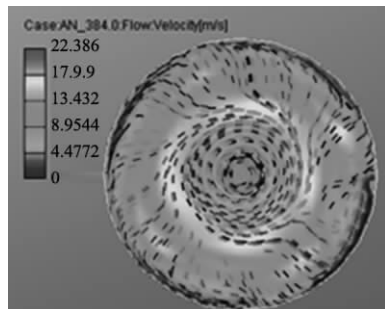


图 8 涡流运动

参照 CB / T. 3254.2 《船用柴油机台架试验方法》进行了 450 h 耐久性试验,在高负荷和超负荷下连续运行,发动机各零部件均保持良好的技术质量状况,表明 G26 柴油机结构可靠、性能稳定。

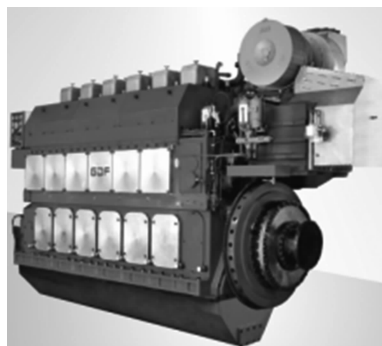


图 9 6G26 柴油机

表 2 性能测试结果及整机质量评级 (CB 3342)

测试项目	测试结果	质量评级
燃油消耗率/ ($\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$)	183	优等品
75% 负荷时燃油消耗率/ ($\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$)	181	优等品
NO_x 排放 (E3 循环) / ($\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$)	7.0	IMO Tier - II
排气烟度 R_B /Bosch	0.05	
噪声/dB (A)	103	一等品
润滑油消耗率/ ($\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$)	0.68	
扭转振动	CB3325 -A	最佳级
机械振动/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	8.57	一等品
调速性能	GB/T3475-3 级	优等品

(下转第 15 页)

高, 燃烧后期的温度也增高, 空燃比减小, 混合气体的氧气浓度降低, 燃烧条件恶化, 从而造成碳烟排放恶化。因此在低负荷工况下采用 EGR 技术, 可以忽略对碳烟排放的影响; 但是在中高负荷工况下, 采用废气再循环技术时, 必须考虑对碳烟排放的影响。

从图 13 可以看出, 随着 EGR 率的增加, NO_x 排放呈单调递减趋势, 当柴油机负荷为 25% 时, NO_x 排放由最高的 907×10^{-6} 降低至 400×10^{-6} 左右。降低比例达到 55%; 当 EGR 率为 31% 左右时, NO_x 排放值维持在最低点。当柴油机负荷为 50% 时, NO_x 排放由最高的 $1\,308 \times 10^{-6}$ 降低至 700×10^{-6} 左右, 降低比例达 45%; NO_x 排放稳定时的 EGR 率为 19.5%。在每个工况下使用 EGR 技术, NO_x 的排放均有不同程度的下降。且随着 EGR 率逐渐升高, NO_x 排放逐渐降低。在低负荷工况下, 气缸内氧气含量高, 需要有相对多的废气才可以有效控制 NO_x 的排放; 在中高负荷工况下, 较少废气的引入便可以有效抑制 NO_x 的排放。

4 结 论

(1) 在船用柴油机上采用 EGR 系统能够有效降低 NO_x 排放。在低负荷工况下可以采用相对较大的 EGR 率以减少 NO_x 的排放; 在较高负荷时, 较小的 EGR 率便能较大程度地减少 NO_x 的排放。

(2) 在柴油机上采用 EGR 技术降低 NO_x 排放

的同时, 会使得碳烟排放增多, 特别是在 EGR 率较大的情况下, 碳烟排放急剧增大。当柴油机负荷增大时, 较大 EGR 率下碳烟排放恶化更加严重, 所以在中等负荷时要采用较小 EGR 率。

(3) 在船用柴油机上引入 EGR 系统对柴油机的有效功率和油耗有一定的影响。在中低负荷条件下, 采用 EGR 技术会降低燃烧过程的放热速率, 导致燃油利用率降低, 相对平缓的放热过程使缸内最大压力和温度减小, 做功能力减弱, 有效功率降低。

参考文献

- [1] 吴国凡, 刘喜元, 周红权. 国际防止船舶污染海洋公约现状及发展趋势 [J]. 船海工程, 2010 (6): 64-67.
- [2] 周龙保. 内燃机学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [3] 王许, 尧命发, 郑尊清, 等. 多次喷射与 EGR 耦合控制对柴油机性能和排放的试验研究 [J]. 内燃机学报, 2010, 28 (1): 26-32.
- [4] 陈贵升, 沈颖刚, 郑尊清, 等. 采用 EGR 的重型柴油机低速高负荷性能与排放特性 [J]. 内燃机学报, 2014 (2): 97-103.
- [5] 赵昌普, 李小毡, 张军, 等. EGR 的热效应和稀释效应对柴油机燃烧和排放的影响 [J]. 燃烧科学与技术, 2014, 20 (1): 31-37.

(上接第 4 页)

6 总 结

(1) 广州柴油机厂股份有限公司自主研发的 G26 船用中速柴油机, 技术指标和性能指标均满足项目设计任务书要求。强化系数 $p_{me} \cdot C_m = 25.1$ ($\text{MPa} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$), 在国内类似自主品牌产品中领先, 达到国际同类先进产品的水平。

(2) 6G26 柴油机取得了中国船级社颁发的柴油机国际防止空气污染证书和船用产品型式认可证书, 已经投放市场, 进入实船应用阶段。

(3) G26 系列柴油机以其可靠性高、外形简洁、维护方便和良好的经济性, 受到越来越多新老客户的欢迎, 具有广阔的市场前景。

参考文献

- [1] 高德明, 甘海燕, 王峰, 等. G32 系列柴油机的总体设计 [A]. 中国内燃机学会大功率柴油机分会成立二十周年特辑 [C], 2001. 10.
- [2] 顾宏中. 大功率柴油机的技术发展 [J]. 柴油机, 2005, 27 (1): 1-4.
- [3] 华中科技大学能源与动力工程学院. 广柴 G26 型柴油机气缸盖结构强度有限元计算分析报告 [R]. 2010.
- [4] 霍荣康, 孙良艳. G32 系列中速柴油机的设计特点 [A]. 中国造船工程学会优秀学术论文集 [C]. 2008. 1.
- [5] Stefan Lipp, Roland Schmidt. The new FERROCOMP-piston for high cylinder output [C]. The 23rd CIMAC Congress in Hamburg, 2001.