

2011 年大功率柴油机国际技术交流研讨会专题报道

做好自主品牌的发动机

孙良艳, 蔡为道, 宁 宁, 李 宁, 罗爱强, 霍荣康

(广州柴油机厂股份有限公司, 广东广州 510371)

摘 要: 简要介绍了广州柴油机厂股份有限公司一直以来所走的致力于开发自主知识产权的中速柴油机之路; 着重介绍了自主品牌 G32 柴油机的结构特点和先进的技术性能, 以及降低 NO_x 排放的技术措施和试验情况; 并对天然气发动机和某新系列柴油机的开发情况作了简单介绍, 由此, 对开发实现节能、环保、可靠的新一代中速柴油机的技术途径进行了探讨。

关键词: 柴油机; 设计; 性能; 节能减排

中图分类号: TK422 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2011)04-0006-05

Make the Best Self-owned Brand Engine

Sun Liangyan, Cai Weidao, Ning Ning, Li Ning, Luo Aiqiang, Huo Rongkang

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

Abstract: Guangzhou Diesel Engine Factory Co., Ltd has been devoted to the development of medium-speed diesel engines which have self-owned intellectual property rights. The construction characteristics and advanced technical performances of G32 diesel engine are introduced emphatically, as well as the technical measures for the reduction of NO_x emissions and the test conditions. Moreover, the development of natural gas engine and a new series diesel engines are presented, and thereafter the technical solutions for the development and realization of the new generation of medium-speed diesel engines with the characteristics of energy-saving, eco-friendly and high-reliability are discussed.

Keywords: diesel engine; design; performance; energy-saving and emissions reduction

1 广州柴油机厂股份有限公司简介

建于 1911 年, 前身为协同和机器厂, 1915 年制造出中国第一台船用柴油机(图 1), 2010 年改制, 更名为广州柴油机厂股份有限公司(GDF)。

二十世纪七十年代与华南工学院、广东工学院合作, 成功开发 6320ZCd 柴油机, 并在 1977 年荣获国家科学奖; 之后陆续开发 6320ZCd-2/-4/-6、8320ZCd-4/-6/-8、12V320ZCd 型柴油机。

二十世纪九十年代和七一一研究所合作开发 6230ZC 柴油机, 并陆续开发 6230ZC-4、8230ZC、8230ZC-4 等型柴油机。

2 自主品牌 G32 柴油机介绍

2007 年, 与七一一研究所共同研制、开发成

功目前国内强化度最高、整体性能优越的 6G32 柴油机(图 2), 在此基础上公司又陆续开发了 6G32A、8G32、8G32A、9G32 等型柴油机。目前已有 100 多台投入使用。

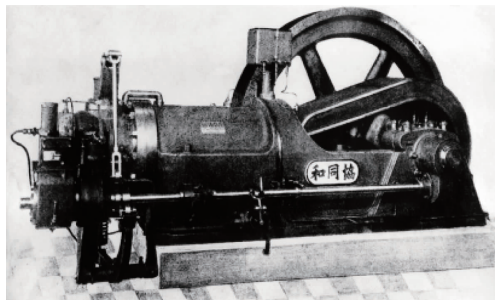


图 1 中国第一台船用柴油机

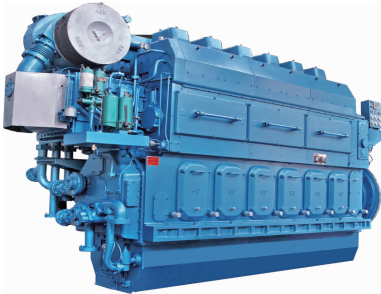


图 2 6G32 型船用柴油机

2.1 G32 柴油机主要技术特点

- (1) 性能可靠；
- (2) 燃油耗率低；
- (3) 在整个运行转速范围内实现无可见烟色；
- (4) 采用机内净化控制，柴油机 NO_x 排放达到 IMO Tier-II，实现低碳环保；
- (5) 可燃用 380cSt/50 ℃ 重油。

2.2 G32 型船用柴油机主要技术参数

G32 型船用柴油机主要技术参数见表 1。

表 1 G32 型船用柴油机主要技术参数

型号	6G32		6G32A		8G32		8G32A		9G32	
型式	直列、四冲程、直接喷射、增压、中冷、不可逆转									
气缸数	6				8				9	
气缸直径 D/mm	320									
活塞行程 S/mm	480									
持续功率 MCR/kW	2 665		2 930		3 552		3 906		4 400	
转速 $n/(\text{r}/\text{min})$	600									
平均有效压力 p_{me}/MPa	2. 30		2. 53		2. 30		2. 53		2. 53	
最高燃烧压力 $p_{\text{max}}/\text{MPa}$	≤ 19									
活塞平均速度 $C_{\text{m}}/(\text{m}/\text{s})$	9. 6									
活塞排量 $V/(\text{L}/\text{cyl.})$	38. 6									
燃油消耗率 $b/\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$	185									
滑油消耗率 $C/\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$	0. 8									
主要尺寸 $(L\times B\times H)/\text{mm}$	5 580×1 970×3 805				6 727×2 058×3 770				7 257×2 000×4 060	
重量 W_0/kg	39 000				49 500				56 000	

2.3 实现性能指标的主要技术途径

(1) 高的 $p_{\text{max}}/p_{\text{me}}$

G32 柴油机的最高燃烧压力 p_{max} 为 19 MPa，平均有效压力 p_{me} 为 2. 3 ~ 2. 53 MPa， $p_{\text{max}}/p_{\text{me}} = 7. 5 \sim 8. 26$ ，该值一般为 7. 0 ~ 8. 5。选择合适的 $p_{\text{max}}/p_{\text{me}}$ 比值，保证了在适当制造成本前提下获得良好的发动机经济性、可靠性和寿命。

(2) 等压燃烧

为了控制排放指标，采取了提高压缩压力、减小高负荷工况喷油提前角、缩短喷油持续期、控制最高燃烧压力等技术措施。

选用 ABB 公司 TPS 或 TPL 系列高效率增压器（图 3），采用较大的压缩比，使额定工况下的压缩压力 p_c 达到 17 MPa，压力升高比 λ 为 1. 1，从而有效地控制了最高燃烧温度，以实现近似于等压燃烧的缸内过程，达到高效、清洁燃烧的效果。

(3) 高压喷射

G32 系列选用工作压力为 150 MPa 的高压油泵（图 4）。燃油凸轮型线经过优化设计，以提高燃油喷射速率和实现高压喷油，对于保证油粒的微细

度，更好地和增压空气充分混合与蒸发，缩短滞燃期，改善燃烧性能十分有利，从而获得较低的燃油消耗率，较低的气阀和活塞工作温度。



图 3 ABB 公司增压器



图 4 G32 高压油泵和喷油器

(4) 燃烧室

为了有效地控制 G32 柴油机的排放特性，采用均质预混合燃烧。考虑到燃烧室形状对组织混合气形成和燃烧质量有重要影响，所以对行程缸径比、压缩比、增压比等与燃烧室造型相关的因素作了具体分析，进而确定其设计值。



图 5 G32 柴油机活塞

(5) 高增压比

高增压比对降低 NO_x 的排放有利。随着压缩比的提高，燃烧室里参加燃烧的空气密度也提高。高增压比提供了适宜的过量空气系数，使燃烧室的峰值温度较低和持续时间较短，有利于减少 NO_x 排放。

(6) 高压缩比

与燃烧室造型有关的另一要素是压缩比。从热力参数设计考虑，随燃烧压力的上升，压缩比也应适当提高。采用高的压缩比使燃烧压力增长梯度缓和，以适当控制机械负荷并获得较为满意的燃油消耗率。压缩比高的重要优点是燃料着火性能良好，高的压缩终点温度和压力使滞燃期缩短。在高压压缩比条件下，实现软压力分布和软燃烧分布，实现较低 NO_x 生成。

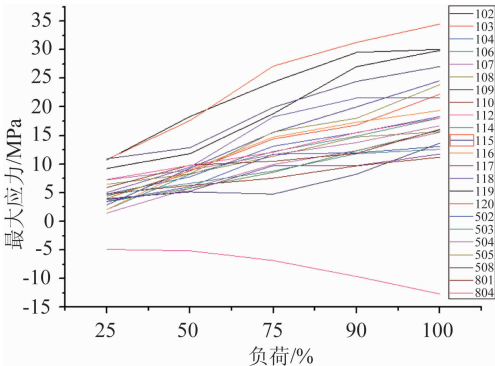


图 7 G32 柴油机动态应力测试现场

2.5 轴瓦使用情况

- (1) 2000 年以来，薄壁轴瓦材料的国际标准 ISO4383 先后删除全部含镉(Cd)的铝合金牌号和对环境危害大的铅基巴氏合金牌号。
- (2) 通过与国内专业厂的合作，用钢背中锡铝

(7) 大行程缸径比(S/D)

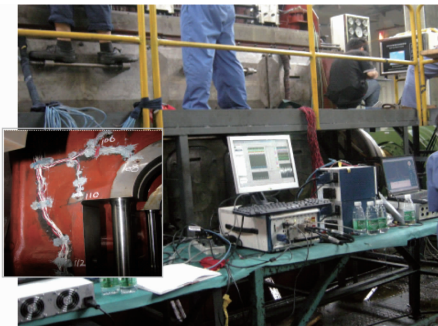
G32 柴油机选择 $S/D = 480/320 = 1.5$ ，长冲程与高压压缩比、高增压比相配合，实现了足够高的宽敞燃烧室造型，有利于燃烧过程的组织，使燃烧充分。宽敞燃烧室使喷入的燃油尽可能好地与压缩空气混合，且尽可能少地与低温燃烧室壁面接触。G32 柴油机采用双排结构的多孔式喷油嘴，双排孔使油束在燃烧室内分布均匀，较小的孔径保证了燃油雾化效果。



图 6 G32 柴油机气缸盖

2.4 特殊性能测试，掌握 G32 柴油机基础数据

- (1) 气缸压力波、供油压力波、进/排气压力波测试，为零部件的强度校核计算提供基础数据；
- (2) 动态应力测试(图 7)，掌握机体结构强度数据；
- (3) 热平衡测试，掌握热量分布及柴油机热效率数据；
- (4) 燃烧室温度场测试，掌握气缸盖、气缸套、活塞温度场及热应力数据。



- 合金轴瓦(图 8a)替代含铅高达 88% ~ 92% 的铜铅合金三元表面镀层轴瓦(图 8b)。这种轴瓦已在高强度度的 G32 柴油机上安全运行 12 000 h。
- (3) 通过全面测量、计算比较，证明两者的磨损状态和使用效果相当。

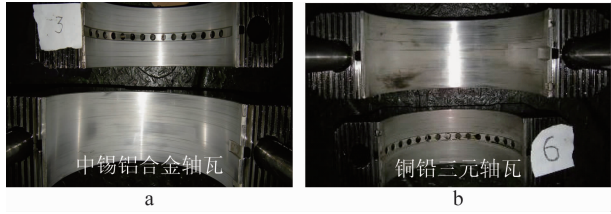


图 8

2.6 G32 柴油机获奖情况

(1) 2008 年 11 月 10 日，G32 系列柴油机通过由中国船舶重工集团公司主持的“G32 系列柴油机的研制”项目成果鉴定；

(2) “G32 系列柴油机的研制”还获得中国船舶重工集团公司 2009 年科学技术一等奖(图 9)。



图 9

2.7 G32 柴油机典型客户

- (1) 粤海铁路 3、4 号渡轮主机——4 台 8G32 柴油机；
- (2) 4500T 全回转起重船——3 台 CCFJ3380J-W 发电机组(原动机：8G32 柴油机)；
- (3) 华联盛 1 号挖泥船——配置 9G32 柴油机。

3 自主知识产权

目前公司已获得授权的国家专利 23 项(表 2)。

表 2 获得的有关国家专利 23 项

序号	项目	类型
01	气缸盖(G32)	外观
02	一种可调整相位角的大功率柴油机凸轮轴结构	实用新型
03	一种柴油机连杆油道结构	实用新型
04	一种用于大功率中速柴油机连杆齿形加工的专用刀具	实用新型
05	缸套(G32)	外观
06	一种柴油机船用式连杆大端上瓦拆装工具	实用新型
07	一种中速柴油机的进、排气装置	实用新型
08	一种柴油机喷油器冷却单元	实用新型

续表		
序号	项目	类型
09	一种柴油机用滑油滤器的低压安全供油装置	实用新型
10	一种机械孔成形抛光工具	实用新型
11	一种柴油机球墨铸铁曲轴及其无冒口铸造工艺	发明
12	一种组合阀芯的大功率柴油机起动阀	实用新型
13	一种分体式柴油机汽缸盖垫片	实用新型
14	一种滑油流量可调的大功率柴油机气门顶头的过油螺栓	实用新型
15	无液压冲击调压阀	实用新型
16	一种无 Y 轴大型曲轴数控深孔钻床	实用新型
17	一种大马力中速柴油机曲轴骨牌位的加工用锯切锯床	实用新型
18	一种数控机床用沉孔反刮刀具	实用新型
19	一种柴油机曲轴连杆轴颈车削用支承夹具	实用新型
20	重型曲轴车床刀架滑动结构	实用新型
21	柴油机机体凸轮轴孔加工设备	实用新型
22	一种用于检测曲轴曲颈的偏心距工具	实用新型
23	一种大功率曲轴各档曲柄销夹角的检测工具	实用新型

4 IMO II 排放技术介绍

国际海事组织最新的《船用柴油机氮氧化物排放控制技术规则 2008 -IMO Tier II 排放要求》于 2011 年 1 月 1 日全球强制实施，适用于该日期后建造或装船的发动机。对中速机，IMO Tier II NO_x 排放量规定值相对 Tier I 的约需降低 20%。如此，中速柴油机仅采用减小喷油提前角等传统方法是不够的，必须考虑采用新的降排技术或多种降排排放技术的组合方案。公司采用多种降低排放技术组合，NO_x 排放降低效果明显。

(1) 增压中冷技术

采用双室中冷器调节其冷却水量、水温，达到降低和控制增压中冷后的进气温度，可在一定程度上抑制 NO_x 排放的生成。

排放测试结果显示：平均进气每降低 10℃，NO_x 排放下降约 1.5% 左右，说明降低柴油机中冷后进气温度，是降低柴油机排放的有效措施之一。

(2) 雾化喷水技术

该技术主要采用雾化喷嘴将一定压力的水雾直接喷入进气总管或进气歧管，降低最高燃烧温度，从而降低 NO_x 的生成，达到降低排放的目的。

试验结果显示：在进气道适量雾化喷水，可明显地降低柴油机 NO_x 排放，雾化喷水后排放降幅约为 20% 左右，同时排气温度也有所降低，但燃

油耗率略有上升。至于雾化喷水对燃烧室相关零件是否存在负面影响,需进一步评估。

(3) 米勒定时(Miller Timing)技术

米勒定时是应用于内燃机上的能同时减少 NO_x 排放和燃油耗率的措施之一,在降低排放同时提高发动机效率。米勒定时通过适当改变进气阀的开启或关闭的时间及配置高增压系统等,在进气冲程活塞到达下止点前或下止点关闭进气阀,在下止点时气缸内增压空气会再膨胀吸热,因而可降低气缸内部的压力和温度,故有利于减小整个燃烧循环的温度,降低了 NO_x 排放。

在国内,GDF 首先将该技术应用于中速柴油机。

采用米勒定时等技术试验案例如图 10 所示。

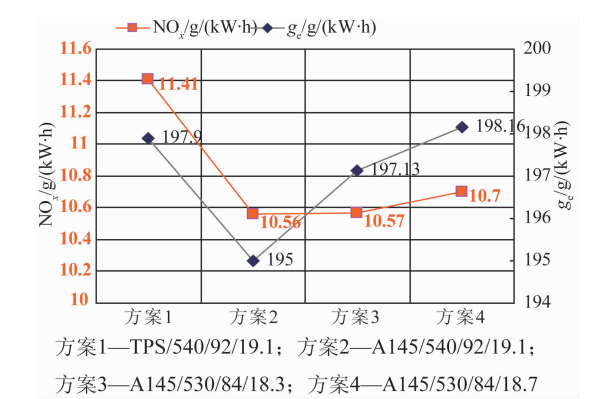


图 10 采用米勒定时等技术试验案例

(4) 多种技术组合方案

采用强米勒效应、增压中冷技术及结合优化燃油系统技术等多种技术组合,按照 IMO TierII 有关测量规定,由上海沪江排放检测公司进行排放测试。

测试结果显示:9G32 柴油机(作为 G32 母型机),NO_x 排放值:9.65 g/(kW·h)(E3 循环)、8.68 g/(kW·h)(D2 循环),完全符合 IMO-Tier II 排放要求。

230 系列、320 系列柴油机也相继获得排放证书。图 11 为中国船级社颁发的 G32 系列柴油机 IMO II 排放证书。

5 6230SG 天然气发动机介绍

6230SG 天然气发动机(图 12、13)是 GDF 与国外专业研究所合作研发的低碳环保型新产品。

其主要技术特点:功率与柴油机相当;NO_x 低(为 2 g/(kW·h));碳化物:为柴油机的 70%;颗粒:为柴油机的 3%;采用电子计算机控制系统等多项专有技术,可实时监控空燃比、排气温度和点火正时等。



图 11 IMO II 排放证书

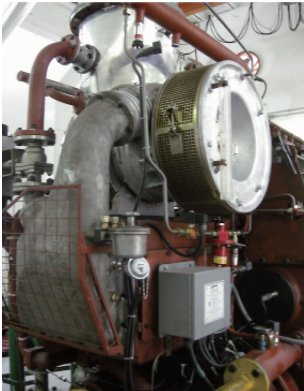


图 12 6230SG 天然气发动机



图 13 6230SG 天然气发动机试验台架

6230SG 天然气发动机主要技术参数,见表 3。

表 3 6230SG 天然气发动机主要技术参数

气缸数	6
气缸直径/mm	230
活塞行程/mm	300
功率/kW	810
转速/(r/min)	750
平均有效压力/MPa	1.73
最高燃烧压力/MPa	<13.5
活塞平均速度/(m/s)	7.5
燃气消耗率/kJ/(kW·h)	8 200
滑油消耗率/g/(kW·h)	0.8
NO _x 排放/g/(kW·h)	2.0
排气温度/℃	380