

## 船用低速二冲程柴油机燃烧与排放数值模拟研究

张俊军<sup>1</sup>, 吴朝晖<sup>1</sup>, 胡朝霞<sup>1</sup>, 周涌明<sup>1</sup>, 李大保<sup>1</sup>, 杨志村<sup>2</sup>, Yun Kang<sup>2</sup>, Daniel Lee<sup>3</sup>(1. 沪东重机有限公司, 上海 200129; 2. 北京腾越飞扬科技有限公司, 北京 100083;  
3. Convergent Science Incorporation, USA)

**摘要:** 使用 CFD 软件对一台船用低速二冲程柴油机额定工况点缸内喷雾、燃料着火和燃烧过程、排放物  $\text{NO}_x$  浓度分布及生成总量进行了数值模拟研究。模拟所得压缩压力和最高燃烧压力与实测值基本一致。在额定工况点运行时, 柴油机预混合燃烧比例很小, 基本呈现单峰状的扩散燃烧特征; 燃烧放热初始时刻在上止点附近, 整个燃烧持续期约为  $45^\circ\text{CA}$ 。同时, 计算所得的  $\text{NO}_x$  生成总量与实测值存在 19.15 % 的偏差。

**关键词:** 船用低速二冲程柴油机; 燃烧; 排放; 数值模拟

**中图分类号:** TK4214.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-4357(2012)02-0020-06

Simulation Research on the Combustion and Emissions  
of Marine Low-speed Two Stroke Diesel EngineZhang Junjun<sup>1</sup>, Wu Zhaohui<sup>1</sup>, Hu Zhaoxia<sup>1</sup>, Zhou Yongming<sup>1</sup>,  
Li Dabao<sup>1</sup>, Yang Zhicun, Yun Kang<sup>2</sup>, Daniel Lee<sup>3</sup>(1. Hudong Heavy Machinery Co., Ltd., Shanghai 200129;  
2. Flyond Technology Co., Ltd, Beijing 100083; 3. Convergent Science Incorporation, USA)

**Abstract:** CFD software was used to carry out simulation research on a marine low-speed two stroke diesel engine about its in cylinder spray, ignition and combustion process,  $\text{NO}_x$  emission concentration distribution and total amount under the rated operating mode. The simulated compression pressure and maximum combustion pressure are basically the same with measured results. The pre-mixing combustion occupies very small percentage, and basically show the unimodal diffusion combustion characteristics. The initial combustion exothermic takes place around the TDC, and the whole combustion duration lasts for  $45^\circ\text{CA}$ . The calculated total amount of  $\text{NO}_x$  emission is 19.15 % deviate from the measured value.

**Keywords:** marine low-speed two-stroke diesel engine; combustion; emission; numerical simulation

## 0 引言

为了限制船舶柴油机排放对环境的污染, 各国政府和国际组织相继制定了相关的船舶柴油机排放限制法规。1997 年 9 月 27 日, IMO 通过国际防止船舶造成大气污染公约, 并作为 MARPOL 73/78 公约的附则 VI 颁布<sup>[1]</sup>。MARPOL 附则 VI 中对船用

柴油机的  $\text{NO}_x$  排放作了明确规定, 该附则的规定已于 2005 年 5 月 19 日对所有协议签署国的船舶正式生效。

国际海事组织 IMO 规定<sup>[2]</sup>: 从 2000 年起, 对于速度低于  $130(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$  的低速柴油机  $\text{NO}_x$  的排放限值为  $17(\text{g}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1})$  (Tier I), 适用于 2000.1.1 ~ 2010.12 建造的船舶。此值已经十分容

易达到了。第二阶段(Tier II)的  $\text{NO}_x$  排放限值于 2011 年 1 月 1 日实施, 其与第一阶段相比在低速段  $\text{NO}_x$  排放降低了  $2.6(\text{g}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1})$ , 相当于降低 15%。而第三阶段(Tier III)的  $\text{NO}_x$  排放限值将于 2016 年 1 月 1 日实施, 其仅对近海区域的排放进行了限制, 与第一阶段相比, 在整个转速范围内  $\text{NO}_x$  排放降低了 80%。

目前, MAN B&W 和瓦锡兰等公司正在研发船舶柴油机燃烧与排放控制技术, 如: 滑阀型喷油器<sup>[3]</sup>、ME 智能柴油机电子一液压控制系统<sup>[4]</sup>、高压共轨燃油喷射<sup>[5-6]</sup>等。这几类技术措施的应用, 改善了燃料雾化和油气混合, 减少了燃料在化学计量比附近燃烧的区域, 从而降低了  $\text{NO}_x$  排放。缸内直接喷水(DWI)、进气加湿(SAM)<sup>[7]</sup>以及废气再循环(EGR)<sup>[8]</sup>等技术措施的采用, 可降低柴油机缸内燃烧火焰温度, 从而抑制  $\text{NO}_x$  排放生成。选择性催化还原(SCR)技术<sup>[9]</sup>是一种尾气后处理方法, 在排气管中安装尿素喷射装置等其它辅助设备, 通过  $\text{NH}_3$  还原废气中的  $\text{NO}_x$ , 从而大幅度降低其排放水平。

以往传统的以大量试验为手段的研究方法已不适用于低速二冲程柴油机性能、燃烧与排放的研究。这主要是由于涉及性能与排放各零部件研制、生产制造成本较高, 尤其在平台上的安装调试费用非常昂贵。鉴于此, 可利用数值模拟的方法, 探讨柴油机机性能改进与排放控制的各种技术措施, 为柴油机新产品开发提供技术支撑。

本文应用 CFD 软件, 选择 6S70MC 型机的额定工况点来计算其燃烧与排放, 主要内容包括缸内喷雾、燃料着火和燃烧过程、排放物  $\text{NO}_x$  浓度分布及生成总量。

### 1 几何造型及计算网格

图 1、2 分别示出了计算域 UG 三维几何造型和计算网格, 计算域包括扫气口、整个气缸以及排气道。在网格处理方面, 对与扫排气口相连的气缸部分和喷雾区域的网格进行了加密, 以确保计算精度。

### 2 主要计算模型及初始边界条件

表 1 示出了主要计算模型。需说明的是: 柴油为多组分物质, 模拟计算时往往用燃料物性参数接近柴油的单一组分代替柴油。本文用  $\text{C}_{14}\text{H}_{30}$  代替柴油, 进行单步反应。

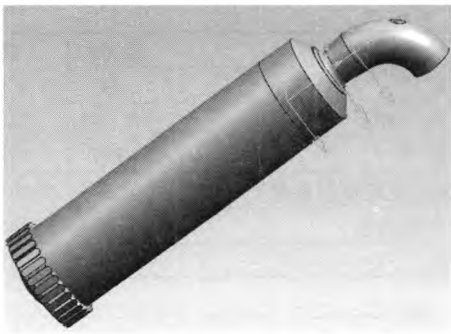


图 1 计算域三维几何造型

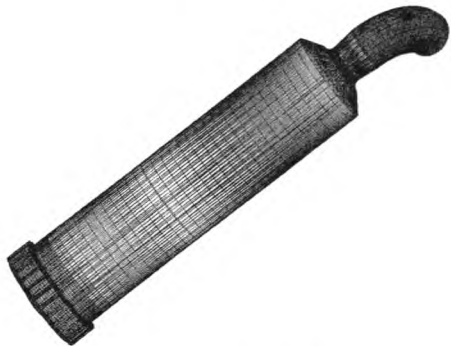


图 2 计算网格

表 1 主要计算模型

|                    |                                                                                                                                            |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 湍流模型               | 快速畸变 RNG $k-\varepsilon$ 模型                                                                                                                |
| 射流雾化模型             | KH/RT 组合模型 <sup>[10-11]</sup>                                                                                                              |
| 油滴蒸发模型             | 标准 Spalding 模型                                                                                                                             |
| 油滴碰撞和聚结模型          | NTC 模型                                                                                                                                     |
| 着火模型               | Shell 模型                                                                                                                                   |
| 燃烧模型               | CTC (characteristic time combustion model) 特征时间燃烧模型                                                                                        |
| $\text{NO}_x$ 生成模型 | 扩展的 Zeldovich 模型                                                                                                                           |
| 燃料化学反应动力学反应机理      | 采用 $\text{C}_{14}\text{H}_{30}$ 代替柴油, 进行单步反应, 反应机理: $\text{C}_{14}\text{H}_{30} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ |

表 2 示出了主要计算初始边界条件。本文选择 6S70MC 型机的额定工况点来计算其燃烧与排放, 该柴油机功率和转速分别为 16 844 kW、91 (r·min<sup>-1</sup>)。图 3、4 分别示出了计算所需的喷油规律和排气门升程曲线, 其均为经验估算值, 以后的研究过程中, 可通过实测或数值模拟获得。

表 2 主要计算初始边界条件

| 参数名称                               | 参数值    | 备注   |
|------------------------------------|--------|------|
| 柴油机功率/转速/kW/(r·min <sup>-1</sup> ) | 16 844 | 设计参数 |
| 冲程/m                               | 2.674  | 设计参数 |
| 连杆长度/m                             | 3.066  | 设计参数 |
| 扫气流量/(kg·s <sup>-1</sup> )         | 40.52  | 设计参数 |
| 燃油消耗率/(g·(kW·h) <sup>-1</sup> )    | 172    | 实测值  |
| 扫气压力/MPa                           | 0.368  | 实测值  |

(续表)

| 参数名称         | 参数值   | 备注    |
|--------------|-------|-------|
| 扫气温度/℃       | 31    | 实测值   |
| 排气压力/ MPa    | 0.346 | 实测值   |
| 排气温度/℃       | 330   | 实测值   |
| 喷油规律(燃料喷射速度) | 见图 3  | 经验估算值 |
| 排气门升程曲线      | 见图 4  | 经验估算值 |
| 喷雾锥角/(°)     | 15    | 经验估算值 |

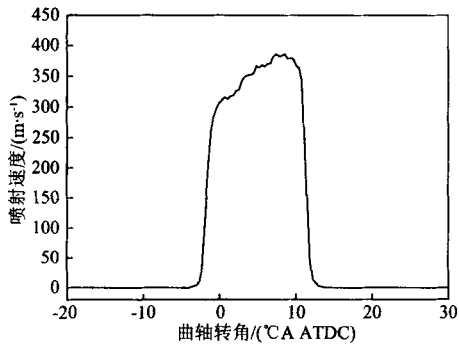


图 3 喷油规律

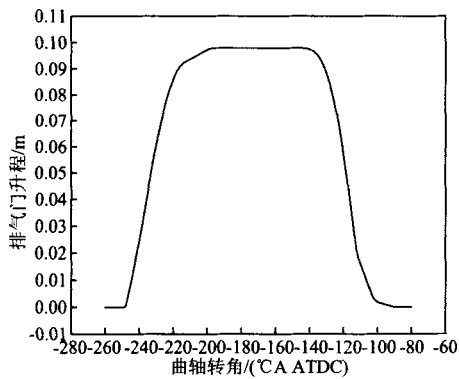


图 4 气门升程曲线

3 气缸压力与燃烧放热率计算分析

图 5 ~ 8 分别示出了计算所得的气缸压力、燃烧放热率、缸内燃烧平均温度和累计放热率。由图 5 可知, 计算得到的压缩压力为 12.1 MPa, 最高燃烧压力为 14.1 MPa, 与实测值基本一致。

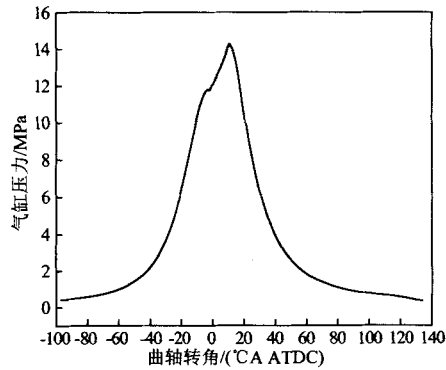


图 5 气缸压力

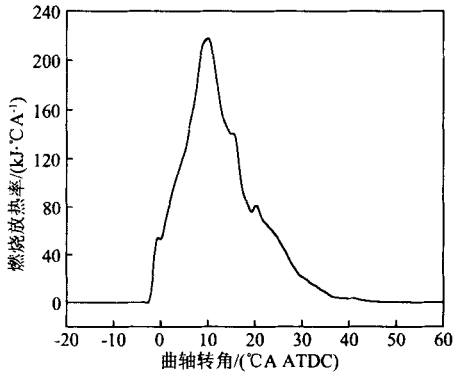


图 6 燃烧放热率

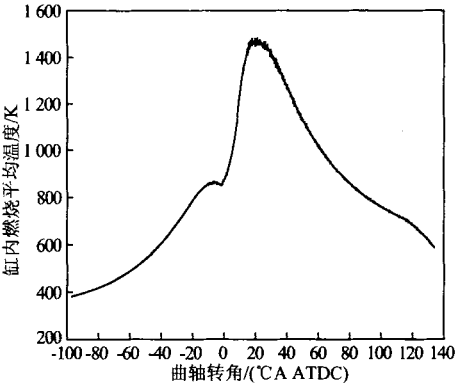


图 7 缸内燃烧平均温度

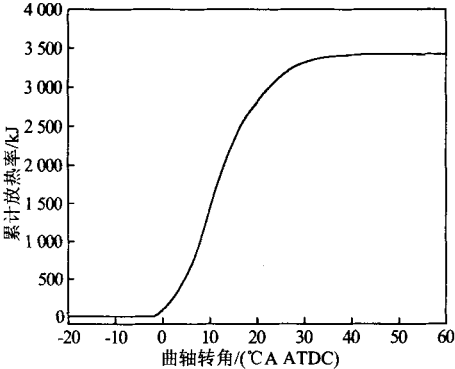


图 8 累计放热率

由图 6 知, 6S70MC 型机在额定工况点运行时, 其预混合燃烧比例很小, 基本呈现单峰状的扩散燃烧特征, 放热峰值出现在 11.38 °CA ATDC, 为 202 (kJ·°CA<sup>-1</sup>)。

由图 7 知, 缸内燃烧平均温度峰值出现在 20.7 °CA ATDC 左右, 约为 1 468 K 左右。

由图 8 知, 累计放热率在 45 °CA ATDC 后不再增加, 为 3 421 kJ; 又燃烧放热初始时刻在上止点附近, 故整个燃烧持续期约为 45 °CA。

4 缸内喷雾和燃烧温度分布计算分析

图 9 示出了缸内喷雾和燃烧计算分析剖面位置。需说明的是:  $Z = -0.09$  m 为燃油喷雾

处，故选择此处分析缸内喷雾、燃烧与  $\text{NO}_x$  排放。



图9 计算分析剖面位置( $Z = -0.09 \text{ m}$ )

#### 4.1 缸内喷雾过程及燃烧温度分布计算

图 10、图 11 分别为 6S70MC 型机在额定工况下运行时缸内喷雾过程和燃烧温度场分布。燃油在上止点前  $2.5^\circ\text{CA}$  开始喷射，由上止点前  $1^\circ\text{CA}$  时刻的图可知，喷雾基本上以液核形式存在，喷束

周围燃油蒸气浓度低。从相应的温度分布图来看，由于燃油喷射时刻较晚，此时缸内温度和压力较高，燃油喷入缸内后迅速蒸发，并与周围的空气快速发生氧化反应，体现在温度场上，在上止点前  $1^\circ\text{CA}$  时，在射流周围温度已有较大的升高。至上止点时刻，在油束周围，已形成包围油束的高温火焰区域。随着油束向前运动，由于在喷孔轴线附近油滴速度较大，受周围气流速度的影响较小，故油滴基本上分布在各喷孔的轴线附近。随着油滴的运动，在油滴相互之间以及周围湍流的作用下，油滴不断的分裂、破碎，同时缸内温度不断增加，使油滴蒸发速度远大于燃烧速度，从而形成大量可燃混合气，表现在图上，在喷束前端可见较大的燃油蒸气浓度。在上止点后  $14^\circ\text{CA}$  时刻左右，喷雾碰到壁面。此后，随着燃烧进行，以及气缸内的空气的流动，缸内高温区域不断扩大，燃烧速度不断增加，缸内的燃油蒸汽逐渐减少。

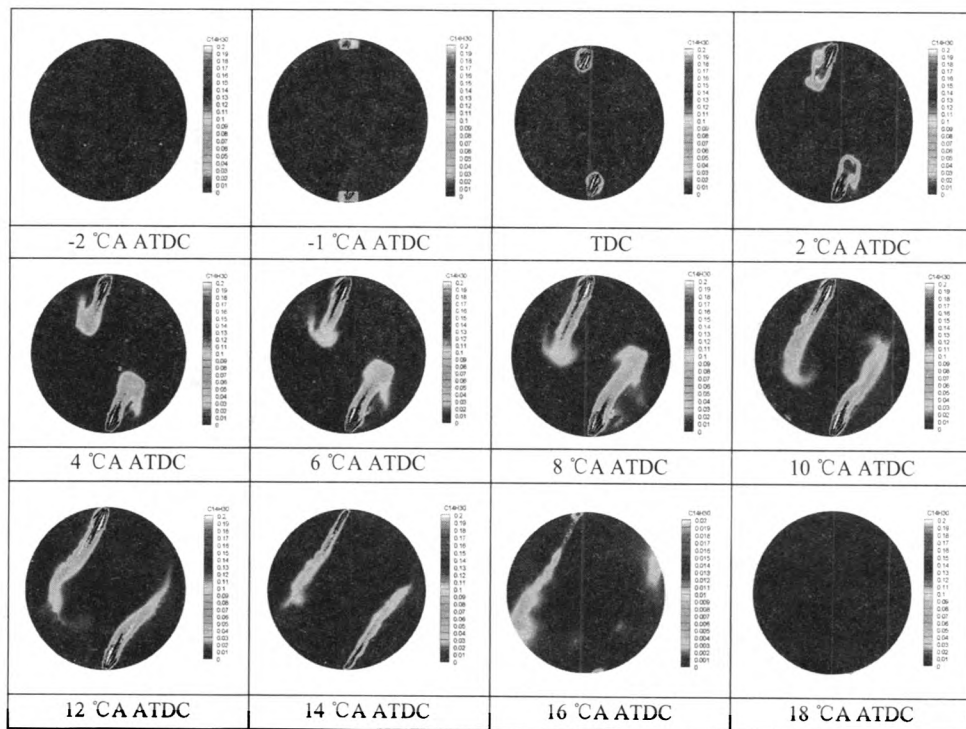


图 10 缸内喷雾计算结果( $Z = -0.09 \text{ m}$ , 浓度单位:  $\text{kg/m}^3$ )

#### 4.2 缸内 $\text{NO}_x$ 分布计算

图 12 和图 13 分别示出了缸内  $\text{NO}_x$  分布计算结果和每循环单缸  $\text{NO}_x$  生成总量随曲轴转角变化曲线。 $\text{NO}_x$  主要在缸内高温、富氧区域产生，当处于扩散燃烧后期，缸内温度降低时， $\text{NO}_x$  生成总量“冻结”在高温时刻的高值。由图可见，6S70MC 机额定工况下运行时每循环单缸  $\text{NO}_x$  生成总量为  $5.99 \text{ g}$ ，由功率和转速知，额定工况下

的  $\text{NO}_x$  生成总量为  $11.651 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$ ，与实测的  $14.41 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$  相比，存在 19.15% 的偏差。存在偏差主要原因是：喷油规律、喷油正时、气门升程曲线、喷雾主要参数(包括喷雾锥角、气液贯穿距离、肖特平均直径)、计算初始时刻缸盖、缸套、活塞头表面温度、射流雾化模型破碎常数等均为经验估算值。

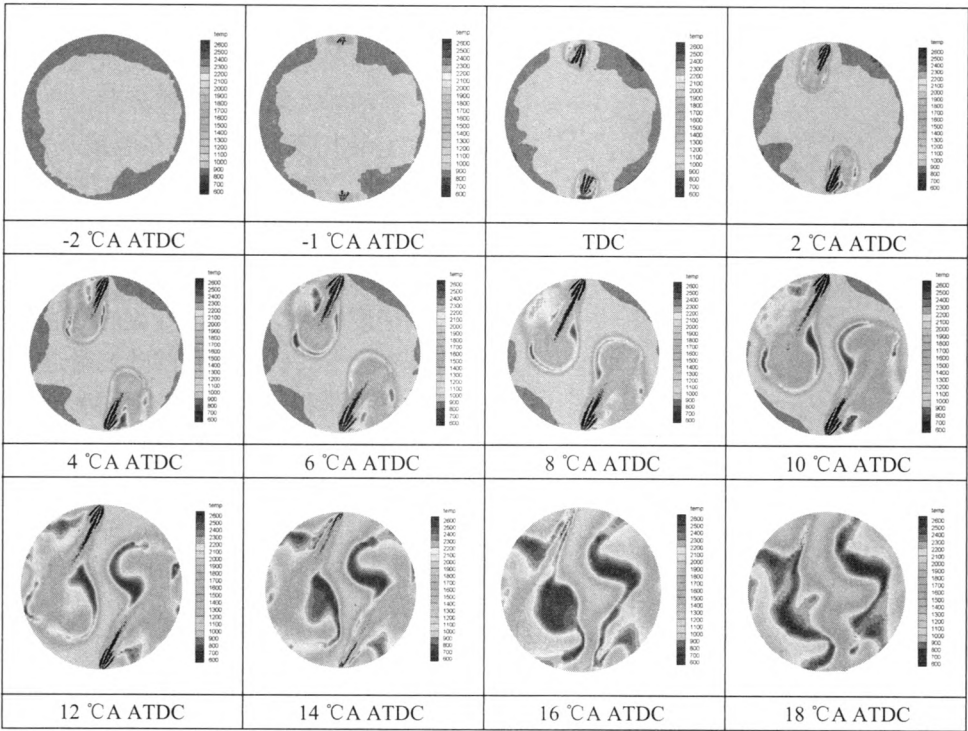


图 11 缸内温度分布计算结果 ( $Z = -0.09\text{ m}$ , 单位:  $\text{k}$ )

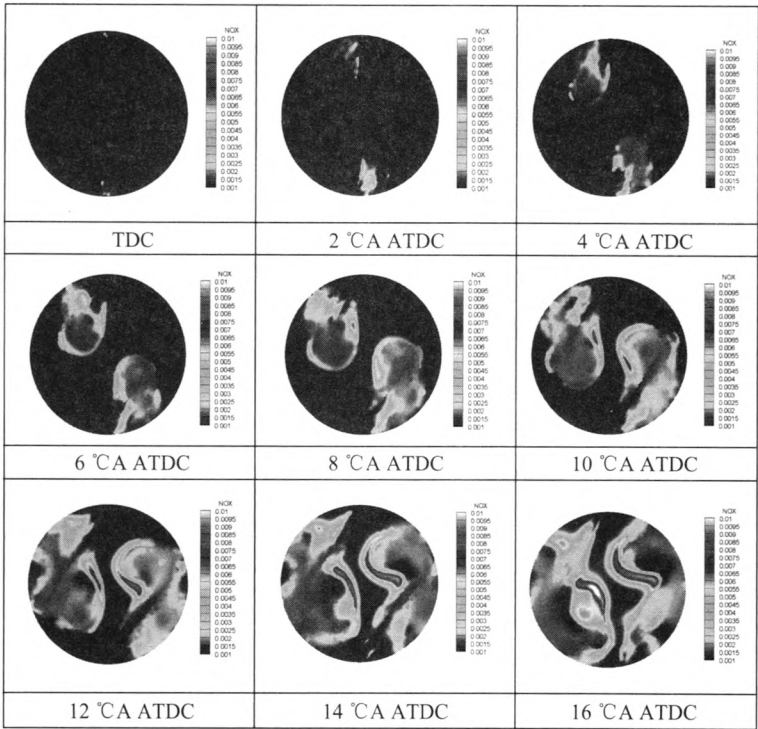


图 12 缸内  $\text{NO}_x$  分布计算结果 (浓度单位:  $\text{kg}/\text{m}^3$ )

5 结 论

- (1) 计算得到的压缩压力为  $12.1\text{ MPa}$ , 最高燃烧压力为  $14.1\text{ MPa}$ , 与实测值基本一致。
- (2) 在额定工况点运行时, 其预混合燃烧比例很小, 基本呈现单峰状的扩散燃烧特征, 放热峰值出现在  $11.38\text{ °CA ATDC}$ , 为  $202\text{ (kJ}\cdot\text{°CA}^{-1}\text{)}$ ; 缸

- 内燃烧平均温度峰值出现在  $20.7\text{ °CA ATDC}$  左右, 为  $1468\text{ K}$  左右; 计算所得累计放热率在  $45\text{ °CA ATDC}$  后不再增加, 为  $3421\text{ kJ}$ 。燃烧放热初始时刻在上止点附近, 故整个燃烧持续期约为  $45\text{ °CA}$ 。
- (3) 在上止点前  $1\text{ °CA}$  时刻, 喷雾基本上以液核形式存在, 喷束周围燃油蒸气浓度低, 在射流周围温度已有较大的升高。至上止点时刻, 在

油束周围, 已形成包围油束的高温火焰区域。随着油滴的运动, 在油滴相互之间以及周围湍流的作用下, 油滴不断的分裂、破碎, 同时缸内温度不断增加, 同时, 在喷束前端可见较大的燃油蒸气浓度。在上止点后  $14^{\circ}\text{CA}$  时刻左右, 喷雾碰到壁面。

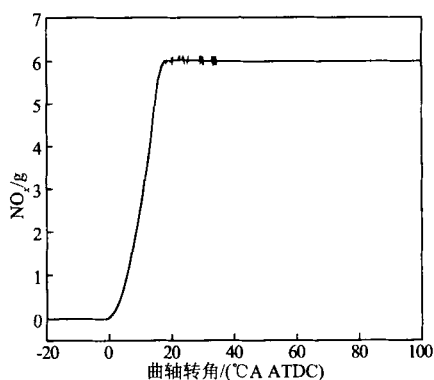


图 13 每循环单缸  $\text{NO}_x$  生成总量随曲轴转角变化曲线

(4) 模拟计算表明, 6S70MC 柴油机额定工况下运行时  $\text{NO}_x$  生成总量为  $11.651 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$ , 与实测的  $14.41 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$  相比, 存在 19.15% 的偏差。

## 参考文献

- [1] IMO. Prevention of Air Pollution from Ships. [http: Retrieved from http://www.imo.org](http://www.imo.org).
- [2] IMO. MARPOL 73/78. 2001: 4082410.
- [3] 刘宏斌.《MARPOL73/78》附则 VI 与柴油机  $\text{NO}_x$  排放控制技术[J]. 船海工程, 2006(5): 30-32.
- [4] The intelligent engine: development status and prospects [R]. MAN B&W Diesel A/S, April 2002.
- [5] Success of wartsila and sulzer common rail engine[J]. Marine News, 2004(4).
- [6] 孙培廷, 黄连中, 李斌. 国际海事组织《MARPOL》公约附则 VI 的实施要点研究[J]. 航海技术, 2000(1): 8-10.
- [7] HELL EN G. A brief guide to controlling marine diesel exhaust emissions[J]. Marine News, 2005(1): 16-20.
- [8] Woodyard D. Pounder's marine diesel engines and gas turbines[R]. Oxford: Elsevier Ltd, 2004: 64-87.
- [9] Hartmut Luders, Peter Srommel. Diesel exhaust treatment- new approaches to ultra low emission diesel vehicles[C]. SAE Paper 1999-01-01081.
- [10] R. D. Reitz, J. Diwakar. Structure of high-pressure fuel sprays[C]. SAE Paper 870598.
- [11] A. B. Liu, R. D. Reitz. Modeling the effects of drop drag and breakup on fuel sprays[C]. SAE Paper 930072.

## 信息动态

## 瓦锡兰推出首台电控 X35 低速机

瓦锡兰公司称, 该公司新设计的第一台电控 X35 系列低速机在中国广西玉柴机器集团旗下的玉柴船舶动力 (YCMP) 股份有限公司成功动车。

瓦锡兰公司称, X35 系列低速机采用全新的设计, 与瓦锡兰 X40 机一起覆盖了小缸径发动机市场, 这一市场是瓦锡兰多年未涉足的市场。

X 系列发动机是 2011 年 5 月推出的, 当时名为 RT-flex35 和 RT-flex40 机, 后其名称随瓦锡兰产品组合更改。X 系列发动机采用了共轨 RT-flex 技术, 为了提高燃油经济性和提高运行灵活性, 采用了超长冲程。据瓦锡兰公司介绍, 其功率覆盖范围可以满足最佳推进要求。

第一台瓦锡兰 X35 机是在玉柴船舶动力股份有限公司  $4.8 \text{万 m}^2$  的新厂生产的。自 2009 年 10 月开始, 玉柴船舶动力股份有限公司已经成为瓦锡兰低速机许可生产厂商。

公司董事长、总经理蒋世宏先生指出, 第一台 X35 新型机在玉柴船舶动力股份有限公司新厂的顺利组装和运行是瓦锡兰和玉柴船舶动力股份有限公司良好合作的结果。玉柴船舶动力股份有限公司已经接获了该系列新机大量订单, 并承诺成为该机的一个专业生产厂商。

(李积轩编译)