

冷却液温度对天然气发动机性能影响试验*

邓义斌^{1,2} 黄荣华¹ 王兆文¹ 程伟³

(1. 华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430074; 2. 武汉理工大学能源与动力工程学院, 武汉 430063;
3. 东风汽车有限公司商用车技术中心, 武汉 430056)

【摘要】 在一台液化天然气(LNG)发动机上进行60、70、80、90℃4个不同冷却液温度水平的发动机全工况性能试验,结果表明冷却液温度影响LNG发动机的性能;冷却液温度升高,燃料经济性增加,但同时NO_x排放量也普遍增加;冷却液温度对HC和CO排放量有不同程度的影响。根据试验结果进行优化设计,得到该型LNG发动机的最佳冷却液温度MAP。

关键词: 发动机 液化天然气 冷却液温度 工作性能 优化设计 试验

中图分类号: TK46⁺4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)03-0011-04

Coolant Temperature Effect on LNG Engine

Deng Yibin^{1,2} Huang Ronghua¹ Wang Zhaowen¹ Cheng Wei³

(1. School of Energy & Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China
2. School of Energy & Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China
3. Commercial Vehicle Technical Center, Dongfeng Motor Co., Ltd., Wuhan 430056, China)

Abstract

Performance of the LNG (liquefied natural gas) engine was tested on overall conditions at four different coolant temperatures, the temperatures were set at 60℃, 70℃, 80℃ and 90℃ in the tests. The testing results showed that coolant temperature influenced on performance of the LNG engine, the higher coolant temperature was, the better fuel economy would be, but NO_x emission would be more. The coolant temperature also influenced on HC and CO emissions, but the influence was not obvious. By doing the tests, the optimum coolant temperature MAP of the engine was obtained.

Key words Engine, Liquefied natural gas, Coolant temperature, Work performance, Optimal design, Experiment

引言

发动机冷却液工作温度是发动机运行的重要参数,其值过高或过低都会使发动机不能正常工作。即使在发动机适宜的冷却液工作温度范围内,不同的冷却液工作温度也会使发动机各方面的性能产生差异。2002年马维忍等对军用车辆柴油机进行了高温冷却试验和试车试验研究,结果表明较高的冷却水温度可改善燃烧过程,减少摩擦功耗,降低热损失,能充分发挥整机的动力性和经济性^[1]。同年张铁柱等提出了水冷柴油机最佳冷却液工作温度的概念,建立了旨在改善柴油机经济性、动力性并降低噪

音的柴油机最佳冷却液工作温度的数学模型,通过试验找到了WD615167型柴油机的最佳冷却液工作温度^[2]。2007年纪光霁以491Q型发动机为试验对象,设计了发动机冷却水温控系统,通过试验寻找基于经济性、动力性和排放性的最佳工作温度点^[3]。2009年胡君等利用深度冷热冲击试验台控制冷却液温度,进行了冷却液温度对柴油机性能影响的测试,结果表明,柴油机冷却液温度对发动机燃油消耗量以及有效功率有着较大的影响,随着冷却液温度的逐渐升高,柴油机CO和HC的排放量都随之降低并趋于稳定,在低温状态下冷却液温度对NO的影响较为明显,在高温且当缸内温度达到平衡后,冷却

收稿日期: 2010-06-04 修回日期: 2010-06-30

* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2008AA11A121)

作者简介: 邓义斌,博士生,武汉理工大学讲师,主要从事热流控制与管理研究, E-mail: dengyb@qq.com

液温度对 NO 的影响比较微弱^[4]。在国外,2002 年 Srithar A/L Rajoo 等研究了冷却液温度对某型汽油机燃油经济性的影响,结果表明在所研究机型上随着冷却液温度的升高,燃油经济性得到改善;在发动机的速度区间内,冷却液温度从 75℃ 升到 85℃ 时,燃油消耗率降幅明显;但升到 90℃ 或更高温度时,燃油消耗率变化不大;在该机型预设的冷却液温度值 88℃ 时,燃油经济性最好^[5]。2009 年 Kumar P 研究了排气温度和冷却液温度的比值对柴油机的影响,试验结果表明该比值影响冷却效率、排放、润滑油性能等^[6]。目前,尚未查阅到以天然气发动机为研究对象的相关试验研究。

根据天然气发动机的优化性能目标,在某一工况下,天然气发动机存在一个能尽可能接近或达到发动机所要求的各项性能指标的最适宜冷却液温度,这个温度即发动机当前工况的最佳冷却液温度。各种工况的最佳冷却液温度就是天然气发动机综合性能目标的最佳冷却液温度 MAP。到目前为止,针对冷却液温度对发动机性能影响的试验,都是以柴油机或汽油机为研究对象,并且大多是考虑一种或几种发动机运行工况,主要是考察发动机冷却液温度对燃料经济性的影响。本文以 LNG 发动机为研究对象,进行不同冷却液温度对发动机性能影响的全工况试验,考察冷却液温度对燃料经济性、排放的影响,选取发动机冷却液温度作为边界条件,进行天然气发动机性能优化试验。

1 试验装置及试验方案

1.1 试验对象

试验对象为由柴油机改装的液化天然气发动机,主要技术参数如表 1 所示。

表 1 发动机的主要技术参数

Tab.1 Specifications of LNG engine

参数	数值
发动机型式	四冲程、四气门、直列六缸、共轨直喷
发动机排量/L	11.12
进气方式	增压中冷
缸径×行程/mm×mm	123×156
压缩比	10.5
额定功率/kW	275
额定转速/r·min ⁻¹	1 900
最大扭矩(转速)/N·m(r/min)	1 380(1 300)

1.2 试验装置

试验装置示意图如图 1 所示。发动机台架上配置的是普通的管壳式水-水换热器。试验室的外部冷却水循环通过换热器冷却发动机冷却液,外部冷

却水在换热器被发动机冷却液加热后,经过回水管流经冷却塔冷却,再泵送到水塔,然后通过供水管路流向换热器。主要试验仪器设备如表 2 所示。

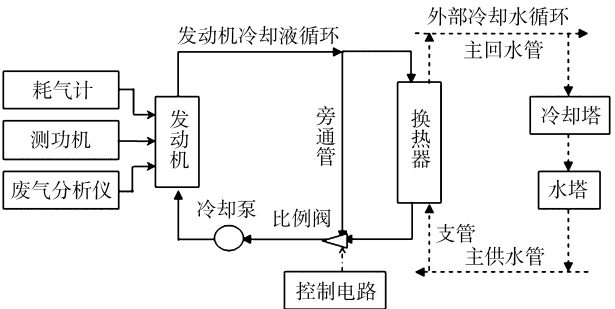


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Diagram of the experimental apparatus

表 2 主要仪器设备

Tab.2 Experimental equipment

名称	型号
奥地利 AVL 测功机	ALPHA500
美国 MICRO MOTION 天然气流量计	CFM025
奥地利 AVL 废气分析仪	CEB II
自制发动机台架	EME2000
奥地利 AVL 控制系统	BME300
自制水温控制系统	EME302

发动机的冷却液介质是清水,发动机主要能耗部件有冷却水泵和机油泵。为了能准确调节发动机冷却液温度,在发动机冷却液循环中,需要强制顶开节温器,堵死小循环;发动机冷却液从发动机吸热后,一路流向换热器被外部水循环冷却,然后流向比例调节阀,另一路由旁通管直接流向比例调节阀。发动机冷却液出口温度的调节首先需要获取该型发动机全工况热平衡试验数据,根据全工况冷却液吸热量 MAP 插值计算出当前试验工况下冷却液带走的热量;再由当前试验工况下的冷却液流量计算出发动机冷却液进、出口温差;根据所需要设定的发动机冷却液出口温度,可求出需要调节的发动机冷却液进口温度,最后根据实时测量到的旁通管冷却液温度和冷却液换热器出口温度,由控制电路来及时控制调整比例阀开度,从而达到控制发动机冷却液出口温度的目的。

1.3 试验方案和试验步骤

发动机冷却液出口温度分别控制在 60、70、80、90℃ 4 种温度水平,进行 100%、75%、50%、25% 4 种负荷水平的速度特性发动机性能试验,试验分别测取 1 900、1 600、1 300、1 000 r/min 转速下的发动机的性能数据。试验步骤为:①调节发动机转速至相应的试验转速。②调节发动机负荷至相应的试验负荷。③根据全工况冷却液吸热量 MAP 插值计

算进出口温差;按进出口温差调节发动机冷却液进口温度,发动机工况稳定后,再根据发动机冷却液出口温度与试验温度之差,微调发动机冷却液进口温度,使发动机冷却液出口温度稳定在试验温度。

④发动机工况稳定后记录耗气量、功率和排放等性能参数。

⑤该工况所有温度水平试验已完成,进入第⑥步,否则转向第③步进行该工况下一温度水平试验。

⑥该转速所有负荷试验已完成,进入第⑦步,否则转向第②步进行该转速下一负荷试验。

⑦所有工况各种温度水平试验已完成,停机,否则转向第①步进行下一转速试验。

2 试验结果分析

2.1 冷却液温度对经济性的影响

取有效燃料消耗率 b_e 考察不同冷却液温度对经济性的影响。有效燃料消耗率为发动机在 1 h 内发出 1 kW 有效功率所消耗的燃料量。

各试验工况下不同冷却液温度对有效燃料消耗率的影响如表 3 所示。由表 3 可知,除 1 000 r/min、50% 负荷,1 300 r/min、75% 负荷,1 600 r/min、50% 负荷和 1 900 r/min、100% 负荷 4 个工况点 80℃ 时有有效燃料消耗率比 90℃ 略低外,其他工况随冷却液温度降低,有效燃料消耗率普遍增加,经济性变差。在同一转速下,随着负荷增大,冷却液温度对有效燃料消耗率的影响程度逐渐减弱。冷却液温度 90℃ 与 60℃ 相比,各转速点 25% 负荷工况点,有效燃料消耗降低 5% ~ 10%;随着负荷增大,有效燃料消耗率降低 1% ~ 5%。

表 3 不同冷却液温度下发动机有效燃料消耗率

Tab.3 Effective specific fuel consumption at different coolant temperatures kg/(kW·h)

转速 /r·min ⁻¹	负荷 /%	冷却液温度/℃			
		90	80	70	60
1 000	100	0.202	0.205	0.206	0.206
	75	0.204	0.204	0.206	0.206
	50	0.212	0.208	0.216	0.217
	25	0.240	0.245	0.250	0.255
1 300	100	0.194	0.195	0.196	0.197
	75	0.198	0.198	0.200	0.201
	50	0.205	0.206	0.209	0.212
	25	0.239	0.242	0.248	0.250
1 600	100	0.201	0.204	0.205	0.206
	75	0.216	0.217	0.220	0.223
	50	0.229	0.227	0.239	0.240
	25	0.277	0.277	0.294	0.298
1 900	100	0.215	0.214	0.215	0.219
	75	0.233	0.235	0.236	0.240
	50	0.271	0.277	0.291	0.300
	25	0.366	0.374	0.375	0.406

提高冷却液温度有助于提高发动机的运行温度和机油温度,减少发动机的散热量和摩擦损失,从而改善发动机的燃料经济性。根据对流换热牛顿冷却公式

$$q = h \Delta t$$

式中 q ——面积热流量
 h ——表面传热系数 Δt ——温差

在相同 h 条件下, Δt 越大,冷却液从发动机带走的热量就越多。从发动机热平衡数据看来,冷却液温度的改变对冷却液带走的热量影响较大。较低的冷却液温度会导致冷却液带走的热量在燃料燃烧总热量中的百分比增大,使燃料经济性变差。以 1 900 r/min 转速为例,冷却液带走热量占燃料燃烧总热量的百分比随冷却液温度变化如图 2 所示。

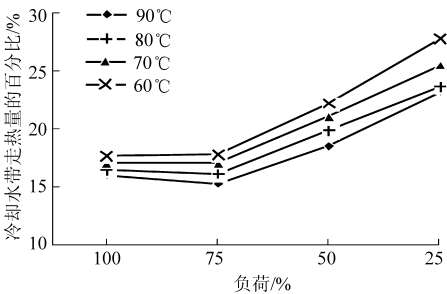


图 2 1 900 r/min 工况下冷却液带走热量的百分比

Fig.2 Proportion of heat losses by coolant at 1 900 r/min

2.2 冷却液温度对稳态排放的影响

试验主要考虑发动机的稳态排放,评价不同冷却液温度对排气中 NO_x、CO 和 HC 浓度的影响。

各试验工况下冷却液温度对稳态 NO_x 排放的影响如表 4 所示。由表 4 可以看出,随冷却液温度的降低,NO_x 排放量略有降低。NO 主要生成条件是较高的缸内温度、富氧和燃烧产物较长的滞留时间^[7]。由于冷却液温度对缸内温度影响作用并不大,所以冷却液温度对 NO_x 排放的影响远比发动机工况要小得多。由表 4 可见,随负荷增加,缸内温度变高,NO_x 排放量逐渐增大。NO_x 排放量峰值点出现在最大扭矩转速点 1 300 r/min、100% 负荷处。另外,低转速时 NO_x 的排放量比高转速时要高,因为低转速时,着火时刻较早,而且主燃期更短,导致缸内最高燃烧温度更高^[8]。

各试验工况下不同的冷却液温度对稳态 HC 和 CO 排放的结果如图 3 所示。由图 3 可看出,冷却液温度对 HC 和 CO 排放量有影响,但规律并不明显。

2.3 最佳冷却液温度

对于不同的应用场合和具体的需求,内燃机的性能目标会有所侧重。对发动机经济性、动力性和排放性能等各项分性能指标分配权重,以线性加权

表 4 不同冷却液温度下 NO_x 排放量

Tab.4 Static NO_x emissions at different coolant temperatures

转速 /r·min ⁻¹	负荷 /%	冷却液温度/℃			
		90	80	70	60
1 000	100	3 161	3 226	3 093	3 046
	75	3 778	3 671	3 673	3 655
	50	3 347	3 251	3 066	3 015
	25	1 170	1 059	1 028	929
1 300	100	4 436	4 209	4 241	4 223
	75	2 813	2 688	2 688	2 499
	50	1 212	1 087	1 073	1 076
	25	247	218	202	236
1 600	100	915	788	558	591
	75	245	194	170	141
	50	134	126	109	95
	25	62	60	55	56
1 900	100	418	394	339	267
	75	71	57	61	54
	50	37	32	27.5	23.5
	25	11.5	12	11.5	7

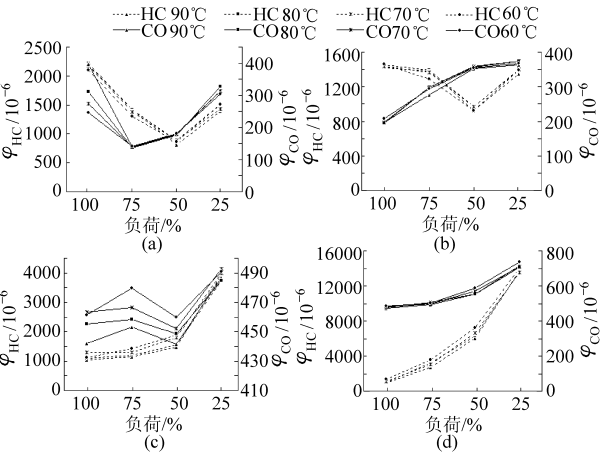


图 3 不同冷却液温度下 HC、CO 排放量对比

Fig.3 Static HC, CO emissions at different coolant temperatures

(a) 1 000 r/min (b) 1 300 r/min (c) 1 600 r/min (d) 1 900 r/min

方式可以确定发动机的综合性能指标,根据试验确定的发动机冷却液温度对各项性能指标的影响关系,进行归一化处理,通过优化设计可得该型发动机的最佳冷却液温度 MAP。以仅考虑经济性和 NO_x 排放为例,归一化处理后,根据各试验工况点的数据,获取综合性能最优点,进行拟合,可得最佳冷却液温度 MAP 如图 4 所示。设计可控式的冷却系统,根据发动机的运行工况,按最佳冷却液 MAP 进行动态调整冷却液温度将能获得较好的整机性能^[9]。

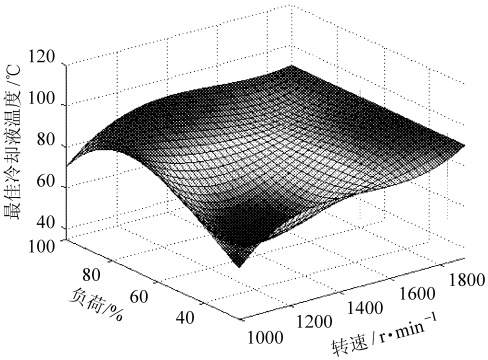


图 4 指定要求下的最佳冷却液 MAP

Fig.4 MAP of engine's optimum coolant temperature

3 结论

(1) 试验结果表明,冷却液温度对 LNG 发动机的各项性能有不同程度的影响。其中对经济性的影响与柴油机相似,体现在提高冷却液温度能提高发动机的经济性,主要原因是提高冷却液温度导致冷却系统带走的热量减小;对 NO_x 排放量的影响主要体现在降低冷却液温度,NO_x 排放量略有降低;对 HC 和 CO 排放量有影响但规律不明显。

(2) 根据该型 LNG 发动机不同冷却液温度下的性能试验结果,可以得到该型 LNG 发动机的最佳冷却液 MAP。根据发动机的运行工况动态调整冷却液温度将有助于提高发动机的性能。

参 考 文 献

1 马维忍,薛晨,杨圣东,等. 冷却水温度对柴油机性能的影响[C]//中国内燃机学会大功率柴油机分会五届一次学术年会论文集,2002:1~5.

2 张铁柱,张洪信. 水冷柴油机最佳冷却液工作温度的试验研究[J]. 内燃机学报,2002,20(4):377~380.
Zhang T Z, Zhang H X. Test research on water cooled diesel engine's optimum work temperature [J]. Transactions of CSICE, 2002,20(4): 377~380. (in Chinese)

3 纪光霁. 发动机温度精确控制的研究[D]. 南京:南京林业大学,2007.

4 胡君,蒋习军,朱红国,等. 冷却液温度对柴油机性能影响研究[J]. 汽车技术,2009(1):45~48.
Hu J, Jiang X J, Zhu H G, et al. Study on effect of coolant temperature on diesel performance [J]. Automobile Technology, 2009(1): 45~48. (in Chinese)

5 Srithar A/L Rajoo, Noor A M, Bakar R A. Coolant temperature effect on gasoline engine fuel consumption [C]//3rd Pacific-Asia Conference on Mechanical Engineering, Manila, Philippines,2002: 1~8.

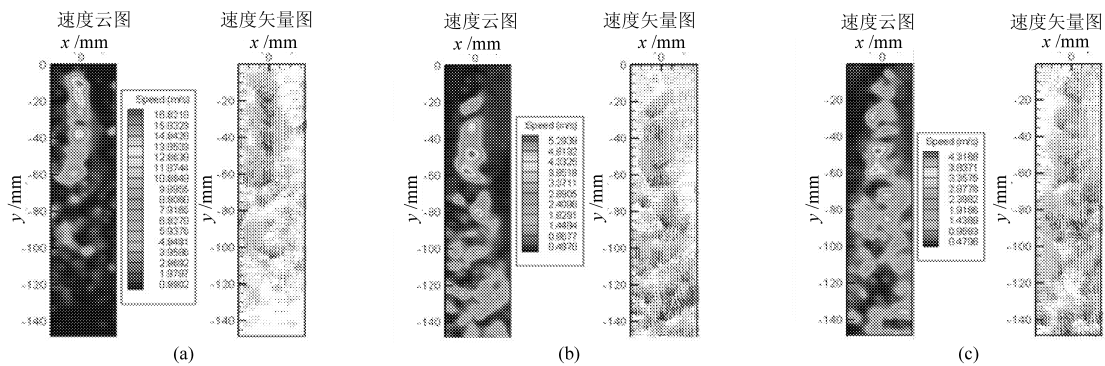


图 8 不同燃烧室背压喷雾微观流场图

Fig.8 Velocity field at different ambient pressures

(a) $p_a = 1.0 \text{ MPa}$ (b) $p_a = 2.2 \text{ MPa}$ (c) $p_a = 2.8 \text{ MPa}$

密集的地方)在较高背压的情况下出现在离喷嘴更远的地方。

3 结论

- (1) 在高燃烧室背压条件下,喷雾结构密集,初始液柱和随之而来的主喷没有明显的分离;在喷雾头部边缘有明显的漩涡;喷雾贯穿距离增长减缓。
- (2) 当燃烧室背压高于 1.0 ~ 1.5 MPa 之间的

某临界值时,燃烧室背压对喷雾锥角不再有影响,而在低于此临界值时,喷雾锥角随燃烧室背压的增大急剧减小。

- (3) 更高的喷射压力使得喷雾平均粒径变小,而索特平均直径会随着燃烧室背压的升高而减小。
- (4) 燃烧室背压的升高会使喷雾雾粒的运动速度减慢,喷雾中心湍流区的位置也会随着背压的升高向远离喷嘴的方向移动。

参 考 文 献

1 Guildenbecher D R, Rachedi R R, Sojka P E. Pressure-scaling of pressure-swirl atomizer cone angles[J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2008,130(6):061501.

2 Wang Xibin, Gao Jian, Jiang Deming, et al. Spray characteristics of high-pressure swirl injector fueled with methanol and ethanol[J]. Energy & Fuels, 2005, 19(6):2 394 ~ 2 401.

3 Young-Sam Shim, Gyung-Min Choi, Duck-Jool Kim. Numerical and experimental study on hollow-cone fuel spray of high-pressure swirl injector under high ambient pressure condition [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2008, 22(2):320 ~ 329.

4 王乃宁,虞先煌. 基于米氏散射及夫朗和费衍射的 FAM 激光测粒仪 [J]. 中国粉体技术,1996,2(1):1 ~ 6.

Wang Naining, Yu Xianhuang. Mraunhofer diffraction and Mie scattering based laser particle sizer [J]. China Powder Science and Technology, 1996, 2(1):1 ~ 6. (in Chinese)

5 胡怀礼,张武高,金永星,等. 斯特林发动机喷雾特性实验研究[J]. 农业机械学报,2010,41(2):10 ~ 16.

Hu Huaili, Zhang Wugao, Jin Yongxing, et al. An experimental study of Stirling engine's fuel spray characteristics [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2):10 ~ 16. (in Chinese)

(上接第 14 页)

6 Kumar P. Significance of the ratio of exhaust temperature to coolant temperature and its effect on various engine working parameters [C]//Proceedings of the Word Congress on Engineering, 2009.

7 刘永长. 内燃机原理[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2001.

8 马志超. 火花点火天然气发动机燃烧与排放特性研究[D]. 天津:天津大学, 2007.

9 邓义斌,黄荣华,王兆文,等. 发动机电控冷却系统建模设计与优化[J]. 农业机械学报,2011,42(1):31 ~ 34,38.

Deng Yibin, Huang Ronghua, Wang Zhaowen, et al. Modeling for electronic-control cooling system in engine and its optimization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(1):31 ~ 34,38. (in Chinese)