

天然气发动机 EGR 混合器加热仿真与试验研究

刘志治, 黄林*, 韦钻国

广西玉柴机器股份有限公司, 广西 玉林 537005

摘要:为解决天然气发动机的废气再循环(exhaust gas re-circulation, EGR)混合器结冰问题,以 K13N 天然气发动机的 EGR 混合器为研究对象,利用 ANSYS Fluent 软件计算增加水循环加热结构后 EGR 混合器出口气体的温度、速度及压力分布情况;根据仿真计算结果制作 EGR 混合器样件,并搭载车辆进行低温环境试验。结果表明:天然气发动机 EGR 混合器增加水循环加热结构后,发动机在环境温度为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、怠速工况运行时,天然气发动机 EGR 混合器出口的气体温度可以升高 $6.5\text{ }^{\circ}\text{C}$;使用带水循环加热结构 EGR 混合器的车辆,在温度为 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温环境中进行长怠速工况、长下坡工况、综合工况试验后,天然气发动机 EGR 混合器均未结冰,发动机工作正常;仿真计算结果与试验结果基本吻合,带水循环加热结构的天然气发动机 EGR 混合器可有效解决国六天然气发动机 EGR 混合器结冰问题。该研究对解决天然气发动机 EGR 混合器结冰问题具有一定的参考价值。

关键词:天然气发动机;EGR;EGR 混合器;结冰;混合气温度

中图分类号:TK432

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2022)03-0022-07

引用格式:刘志治,黄林,韦钻国.天然气发动机 EGR 混合器加热仿真与试验研究[J].内燃机与动力装置,2022,39(3):22-28.

LIU Zhizhi, HUANG Lin, WEI Zuanguo. Simulation and experimental study on heating of EGR mixer of natural gas engine[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2022,39(3):22-28.

0 引言

天然气是我国当前重型载货车市场中最主要的柴油替代燃料,天然气的开采、运输和存储技术成熟,配套产业链完善^[1-2];同时天然气热值高,辛烷值高,抗爆性好,碳、氢元素的质量比为 $3:1$,而柴油的碳、氢元素质量比接近 $7:1$,尽管天然气发动机的热效率比柴油机低,但同等功率下天然气发动机的碳排放仅为柴油机的 80% ,天然气发动机技术是内燃机实现“碳中和”的重要技术路线之一^[3-4]。

当量燃烧、废气再循环(exhaust gas re-circulation, EGR)、三效催化是当前满足国六排放标准的重型载货车天然气发动机普遍采用的技术路线^[5-7]。我国从 2019 年 7 月 1 日起针对重型天然气载货车实施国六排放标准^[8],之后绝大部分新生产销售的天然气重型载货车搭载的发动机都带有 EGR 系统^[9]。由于天然气燃烧产物中含有大量的水,发动机采用 EGR 技术方案后,EGR 气体内的水会流入进气系统内,当车辆运行在高寒环境时,受到外界低温的影响,进气系统内的气态水会冷凝成液态水,进而冻结为冰,并附着在进气管道内,使得发动机进气不足、性能恶化,严重时导致发动机熄火及无法启动^[10-12]。

本文中依托 ANSYS Fluent 软件,基于 K13N 发动机建立天然气发动机的 EGR 混合器仿真模型,分析

收稿日期:2022-03-21

基金项目:广西重点研发计划项目(桂科 AB21220015)

第一作者简介:刘志治(1978—),男,江西宜春人,工程师,主要研究方向为天然气发动机的电控技术,E-mail:liu_zhizhi@163.com。

*通信作者简介:黄林(1988—),男,浙江宁波人,工程师,主要研究方向为天然气发动机的电控技术,E-mail:huanglin410@yuchai.com。

带加热水流道的 EGR 混合器结构对天然气发动机 EGR 混合气体的温度以及均匀度的影响,通过台架试验测试相同环境条件和发动机运行工况下有、无加热水流道的 EGR 混合器使用情况。

1 EGR 混合器模型建立及研究

1.1 EGR 混合器模型建立

基于 K13N 当量燃烧天然气发动机的 EGR 混合器实物 UG 模型,增加一套水循环加热结构,将 EGR 混合器气体出口管道延长 80 mm、EGR 气体入口管道延长 60 mm,以获得最佳计算收敛速度和求解精度。

建模完成后,使用 Hypermesh 软件建立面网格和体网格,再将带有网格的模型导入 ANSYS Fluent 软件进行仿真^[13]。计算过程中,采用多重网格加速收敛技术,同步计算循环水、空气、EGR 气体、天然气 4 种流体。计算模型如图 1 所示。

模型采用不可压缩稳态耦合隐式压力基求解器,忽略重力影响,采用标准 $k-\epsilon$ 模型作为湍流模型,Courant number(库朗数)取 1^[14],输运项选择 methane/air(甲烷和空气),EGR 入口气体设为纯二氧化碳(CO₂),燃气入口组分设为纯甲烷(CH₄),其余边界条件设定如表 1 所示。

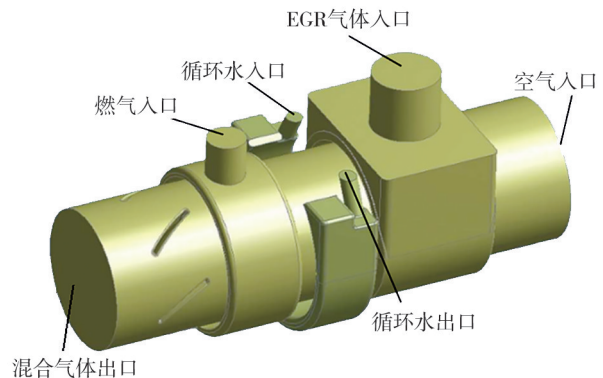


图 1 计算用混合器内流道模型

表 1 模型计算边界条件

空气进气温度/ ℃	空气质量流量/ (g·s ⁻¹)	燃气进气温度/ ℃	燃气质量流量/ (g·s ⁻¹)	入口水体积流量/ (L·min ⁻¹)	入口水温度/ ℃	湍流动力系数/ (m ² ·s ⁻²)	耗散系数/ (m ² ·s ⁻³)
-40	5	-40	0.312 5	2.839	70	1	1

1.2 计算结果

设置好边界条件后,软件即可自动求解,输出温度、压力、速度的计算结果。温度场计算结果如图 2 所示。

由图 2 可知:温度约为-40℃的空气与 70℃的 EGR 混合器加热水道充分换热后,空气温度可升高到 30℃,EGR 混合器加热水道的温度由 70℃下降到 60℃,之后空气依次和温度为-40℃的 EGR 气体和天然气接触并充分混合,最终 EGR 混合器出口气体的温度保持在 6.5℃左右,该温度能够保证 EGR 混合器在最恶劣工况下不结冰。

EGR 混合器的压力云图如图 3 所示,速度云图如图 4 所示。

由图 3、4 可知:气体通过 EGR 混合器内的混合器芯和扰流板后,压力和速度都会下降,这是因为混合器芯和扰流板会对气流形成阻力和扰流,使得气体压力和流速均下降,扰流的加强使得空气和 EGR 气体的混合均匀度得到提升^[15-16]。

采用面积加权的气体体积分数分布均匀度(以下简称均匀度)作为评价标准,设定气体与气体之间完全混合的均匀度为 1。

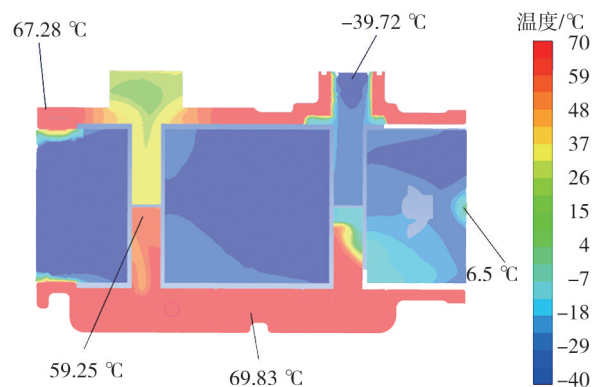


图 2 温度场计算结果

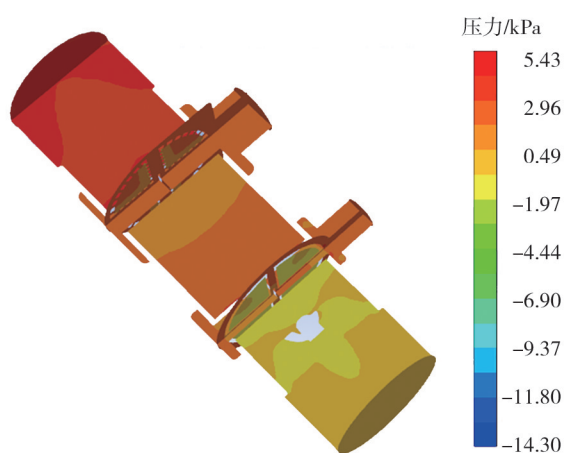


图3 压力云图

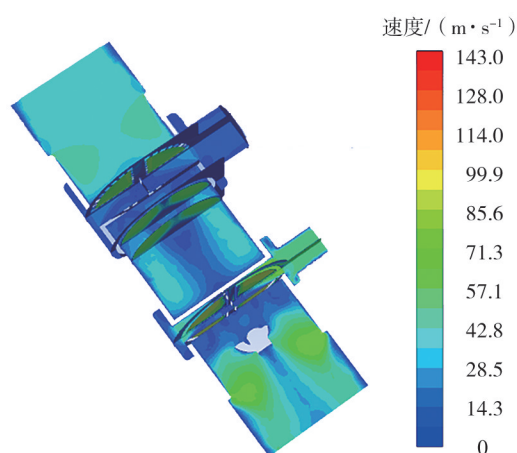


图4 速度云图

均匀度

$$b = 1 - 0.5 \frac{\sum \left[\left(\frac{a_i}{\frac{\sum (a_i S_i)}{\sum S_i} - 1} \right) S_i \right]}{\sum S_i},$$

式中: i 为截面上的某小块区域编号, $i=1,2,\dots,n$; S_i 为截面上第 i 块区域的面积, mm^2 ; a_i 为截面上第 i 块区域上的气体体积分数。

计算时通过统计各截面不同区域的均匀度,得到天然气和EGR的整体均匀度。天然气和EGR的均匀度计算结果如图5所示。

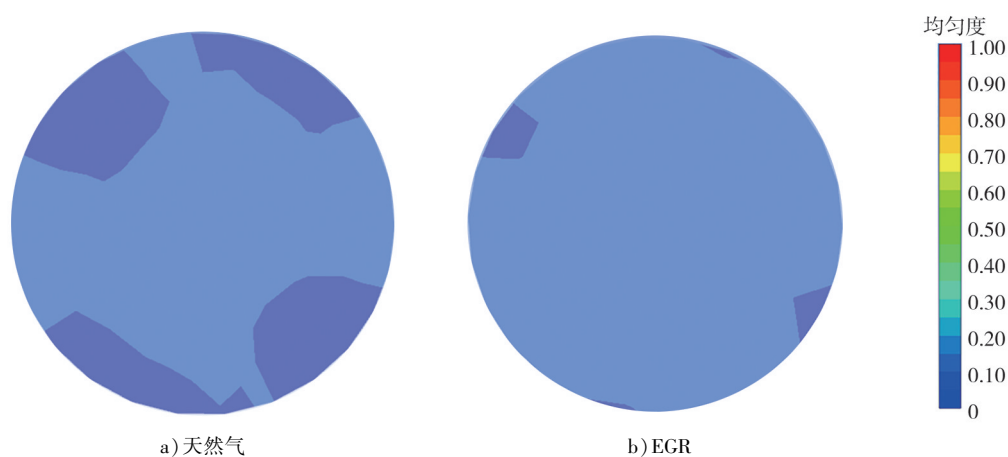


图5 天然气和EGR均匀度计算结果

由图5可知:EGR混合器出口的天然气混合均匀度为0.985,EGR气体混合均匀度为0.992,EGR气体混合均匀性比天然气混合均匀性提高了0.007。这是因为EGR气体在流出EGR混合器时经过了EGR和天然气2级扰流,天然气在流出EGR混合器时只经过了天然气1级扰流,因此EGR气体的均匀度优于天然气气体。

2 整车台架试验

计算结果表明,EGR混合器增加水循环加热结构后可有效提升出口的混合气体温度。基于计算结果制作带水循环加热结构的EGR混合器样件,安装到搭载K13N天然气发动机的重型牵引车进行整车

环境舱台架试验,设定环境温度为 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2.1 试验方案

在 EGR 混合器增加加热水道的目的是提高 EGR 混合器出口气体的温度,解决天然气发动机在冬季使用时遇到的 EGR 混合器结冰问题,因此试验工况应尽量模拟车辆在正常使用过程中可能遇到的极端条件。根据分析,发动机 EGR 混合器结冰通常出现在长怠速、长下坡间歇工作工况。

2.1.1 长怠速工况

低温环境下,车辆冷机起动后,如果长期运行在怠速工况,此时发动机循环水温度低,机体热辐射小,EGR 混合器主要受外部环境温度的影响,当 EGR 阀有轻微泄漏时,泄漏的 EGR 气体含有大量水分,气态水在较低的环境温度下极易冷凝成冰。

2.1.2 长下坡间歇工作工况

车辆正常行驶过程中,当遇到长下坡路段时,驾驶员往往会松开油门让发动机进入减速停喷工况(fuel shut-off, FSO),即燃料供给装置停止供气,同时开启节气门,保证发动机具有较好的燃料经济性和制动功能,驾驶员踩下油门踏板时控制系统立刻恢复喷射天然气。车辆在低温地区频繁在减速停喷和驾驶工况切换时,EGR 混合器得不到充分辐射加热升温,EGR 气体与低温空气混合后其内部的气态水析出,在 EGR 混合器内部表面迅速冷凝、结冰。

2.1.3 综合工况

充分模拟车辆从起动到上路行驶,直到最终进站停车的完整驾驶循环。综合工况包含长怠速工况、长下坡工况以及常用转速和负荷区间的自由加速工况。

2.2 整车长怠速试验

2.2.1 原 EGR 混合器

首先使用原机的 EGR 混合器进行低温环境测试,在温度为 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境舱内起动发动机,发动机冷机怠速转速为 750 r/min ,发动机怠速转速会随水温的上升而缓慢下降;固定 EGR 阀开度为 3% ,用于模拟 EGR 发生轻微泄漏的状态。试验中,发动机成功起动并在怠速转速稳定运行,约 300 s 后发动机自动熄火。此时立即拆开进气管路取出 EGR 混合器,检查 EGR 混合器状态,如图 6 所示。由图 6 可知,EGR 混合器芯的扰流板叶片已经附着大量的冰,严重影响气体流通能力。

可见原机 EGR 混合器在环境温度极低、并引入 EGR 气体的工况下,EGR 气体内的气态水会迅速结冰并附着在 EGR 混合器内壁。EGR 混合器的主流道流通截面积随着结冰体积的增大而减小,通过的可燃混合气体流量也相应减小,最终因为进入缸内可供燃烧的混合气不足而导致发动机熄火^[17]。

2.2.2 带加热水流道的 EGR 混合器

在同一台发动机上安装带有加热水流道的 EGR 混合器,并在 EGR 混合器的入口、出口、EGR 阀出口、EGR 孔板处安装温度传感器,与原 EGR 混合器进行相同工况的长怠速试验。长怠速工况下试验采集到的加热水流道 EGR 混合器各位置温度变化如图 7 所示。

由图 7 可知:发动机各位置采集的温度随时间逐渐上升;当怠速运行 700 s 左右时,EGR 混合器出口温度即可达到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上;当怠速运行 2000 s 时,EGR 混合器前的温度也达到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上;此时发动机机体已经充分加热,EGR 混合器不再出现结冰现象。最终通过主动关停发动机结束试验。

此时使用内窥镜观测 EGR 混合器,如图 8 所示。由图 8 可知:EGR 混合器的扰流板叶片表面附着有少量液态水,未发现结冰现象。



图 6 原机自动熄火后 EGR 混合器状态

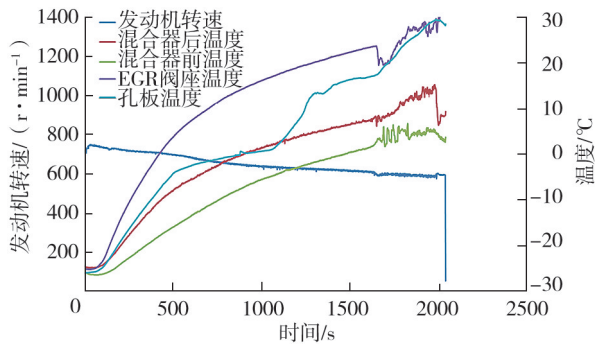


图7 加热水水道 EGR 混合器各位置温度变化曲线

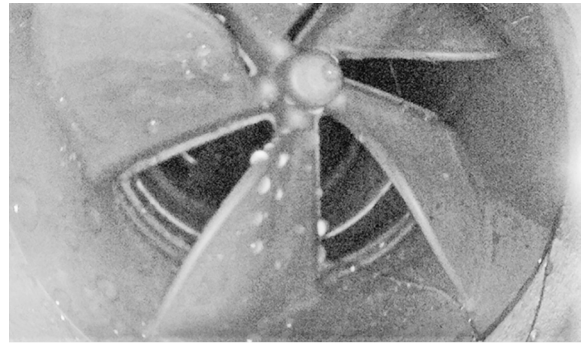


图8 长怠速工况后带加热水水道的混合器外观

2.3 长下坡间歇工况试验

由于原机 EGR 混合器在长怠速工况会存在结冰问题,因此只在长下坡间歇工况对带加热水水道的 EGR 混合器进行试验。

长下坡时发动机转速相比怠速转速更高,并且为了保证燃料经济性,在 FSO 状态下发动机将停止燃料喷射和各缸点火,同时增大节气门开度。和长怠速工况相比,此时流经 EGR 混合器的冷空气流量更大,对 EGR 混合器本体和 EGR 气体的冷却效应更快、更强。试验中,在 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境舱内起动发动机,之后发动机转速固定为 1200 r/min ,同时通过更改发动机电控程序反复进入和退出 FSO 状态,研究车辆在常规行驶以及长下坡间歇工作时 EGR 混合器前、后温度的变化规律。试验采集到的 EGR 混合器前后、温度变化曲线如图 9 所示。

由图 9 可知:当进入长下坡工况时,发动机的节气门开度较大,此时引入了大量和外部环境温度相同的空气,EGR 混合器前的温度迅速下降到 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右;EGR 混合器后的温度下降速度相对较慢,经过多次试验确认,在发动机进入长下坡工况 10 s 后,EGR 混合器后的温度下降到 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右;当退出长下坡工况后,发动机燃烧室内恢复点火燃烧,中冷器后的空气温度以及 EGR 气体温度上升,此时 EGR 混合器前后的温度会迅速上升到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,EGR 混合器结冰的风险消除。

长怠速工况试验进行约 4000 s,试验结束后使用内窥镜观测 EGR 混合器,EGR 混合器状态如图 10 所示。由图 10 可知:长怠速工况下 EGR 混合器无结冰现象。但分析 EGR 混合器后的温度变化趋势,环境温度为 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,车辆进入长下坡工况的时间超过 10 s 后,EGR 混合器后的温度已经接近 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$,此时 EGR 混合器结冰的风险较高。可见在 EGR 混合器加装循环水加热结构以后,虽然能有效降低 EGR 混合器结冰的风险,但是其加热能力有限,无法应对非常极端的工作环境。

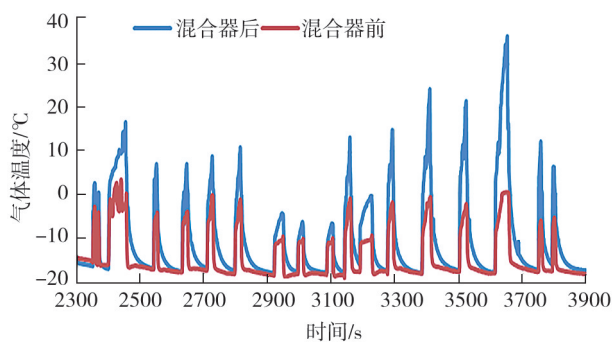


图9 带加热水水道的 EGR 混合器长下坡工况试验数据

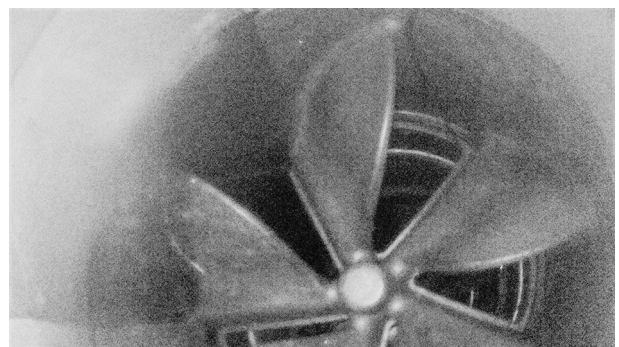


图10 长下坡工况带加热水水道的混合器外观

2.4 综合工况试验

由于原机 EGR 混合器在长怠速工况会存在结冰问题,因此只进行带加热水水道的 EGR 混合器的综

合工况试验,环境温度设定为 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。综合工况持续 3600 s ,前 800 s 为长怠速工况, $800\sim 2600\text{ s}$ 为自由加速工况, $2600\sim 3600\text{ s}$ 为长下坡工况。采集到的 EGR 混合器前后温度曲线如图 11 所示。

由图 11 可知:怠速热机运行($0\sim 800\text{ s}$)时,由于发动机水温上升较慢,混合器出口的气体温度缓慢上升;自由加速驾驶工况时,混合器出口气体温度随发动机进气流量的变化发生显著的交变,运行 1000 s 后,气体温度维持在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上;进入长下坡工况,模拟驾驶员间歇性踩油门动作,由于发动机进气流量变化幅度较大,而且发动机燃烧的工作时间变短,混合器出口气体温度在 $-15\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内随进气流量的变化而波动。

试验结束后使用内窥镜观测 EGR 混合器,外观如图 12 所示。由图 12 可知,EGR 混合器无结冰迹象。

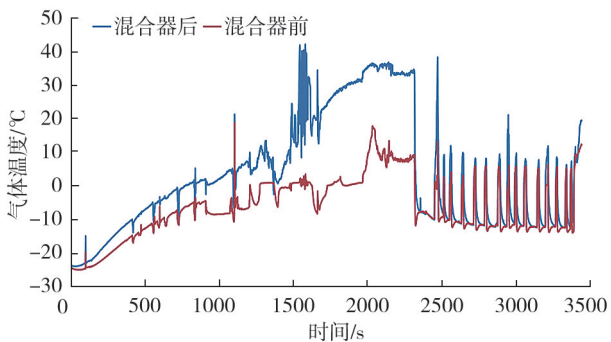


图 11 带加热水道的 EGR 混合器综合工况试验数据



图 12 综合工况带加热水道的 EGR 混合器外观

综合以上分析,安装水循环加热流道的 EGR 混合器能有效提高出口的气体温度,大幅降低结冰风险。

3 结论

基于 ANSYS Fluent 软件搭建带加热水流道的天然气发动机 EGR 混合器三维模型,进行了 EGR 混合器内混合气体的温度场、压力和混合均匀性等仿真,根据仿真结果制作了带有水循环加热的混合样件并进行整车对比试验。

1) 仿真计算结果表明,带有水循环加热结构的 EGR 混合器可以在环境温度为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、加热水温为 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,保持发动机怠速工况 EGR 混合器出口的气体温度为 $6.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,大幅降低 EGR 混合器结冰的风险;经过 2 级扰流的 EGR 气体均匀性比只经过 1 级扰流的天然气气体混合均匀性提高了 0.7% ,更有利于天然气发动机的燃烧。

2) 环境温度为 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,不带水循环加热结构的 EGR 混合器在发动机怠速运行 300 s 就会大量结冰,并导致发动机熄火。

3) 环境温度为 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,带水循环加热结构的 EGR 混合器在发动机怠速工况、长下坡工况、综合工况下均不会结冰,相对不带水循环加热结构的 EGR 混合器,防结冰效果十分显著。

参考文献:

- [1] 赵江雄,邵毅明,赵静,等. 不同燃烧技术的天然气发动机技术性能分析[J]. 大众汽车,2014(9):10-12.
- [2] 夏少华. 重型车用天然气发动机技术分析[J]. 现代车用动力,2018(2):1-6.
- [3] 李力. 重型车用天然气发动机的开发[J]. 汽车实用技术,2020,44(15):253-256.
- [4] 一汽解放汽车有限公司. 一种天然气发动机燃料供给系统:CN201922164073.5[P]. 2020-09-11.
- [5] 李昂. 当量燃烧重型天然气发动机排放特性研究[D]. 长春:吉林大学,2020.
- [6] 王献泽. 基于当量燃烧的天然气发动机燃烧系统优化研究[D]. 天津:天津大学,2019.

- [7] 罗修超. 采用内置 EGR 的天然气发动机模拟及国 V 试验研究[D]. 成都: 西华大学, 2016.
- [8] 生态环境部. 重型柴油车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段): GB 17691—2018[S]. 北京: 中国环境出版社, 2018.
- [9] 李垂孝, 朱昌吉. 当量比下 EGR 对天然气发动机性能影响的研究[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2015, 44(2): 16-19.
- [10] 李垂孝, 朱昌吉, 李君. 基于 GT-Power 的 EGR 率对当量比燃烧的发动机性能影响研究[J]. 汽车技术, 2015(12): 25-28.
- [11] 张志军, 赵春生, 陈晋兵, 等. 天然气发动机 EGR 混合器结构设计研究[J]. 小型内燃机与摩托车, 2013, 42(6): 65-67.
- [12] 曹石, 刘鑫, 孙明峰, 等. 一种天然气发动机混合器防结冰控制方法、装置和系统: CN111396202A[P]. 2020-07-10.
- [13] 郭立新, 李康宁, 施东晓, 等. 天然气发动机 EGR 系统优化研究[J]. 车用发动机, 2019(6): 51-57.
- [14] 陈良才, 焦彦红, 冯志力, 等. 蒸发式冷凝器喷嘴流量均匀性数值研究[J]. 制冷与空调, 2011, 11(5): 67-71.
- [15] 刘忠长, 尤金文, 王忠恕, 等. 用于天然气发动机的天然气, EGR 和空气混合器: CN109441670A[P]. 2019-03-08.
- [16] 黄林, 刘志治, 宁德忠, 等. 一种电加热天然气发动机混合器结构: CN111237093A[P]. 2020-06-05.
- [17] 刘志治, 卢年红, 覃玉峰, 等. 一种带加热水腔的 EGR 阀及加热方法: CN111173656A[P]. 2020-03-09.

Simulation and experimental study on heating of EGR mixer of natural gas engine

LIU Zhizhi, HUANG Lin^{*}, WEI Zuanguo

Guangxi Yuchai Machinery Co., Ltd., Yulin 537005, China

Abstract: In order to solve the icing problem of exhaust gas re-circulation (EGR) mixer of a natural gas engine, based on the mixer of K13N natural gas engine, ANSYS Fluent software is used to calculate the temperature, velocity and pressure distribution of the mixer outlet after adding the water cycle heating system. According to the simulation results, a sample mixer is made and carried on the vehicle for cold storage test. The results show that the gas temperature at the engine EGR mixer outlet increases by 6.5 °C when the engine operates at -40 °C ambient temperature and idle speed after adding the water cycle heating system. The vehicle with water cycle heating mixer has been tested in the cold storage at -35 °C under the conditions of long idle speed, long downhill condition and comprehensive condition, and the EGR mixer does not freeze, and the engine works normally. The simulation results are basically consistent with the test results. The mixer with water circulation heating can effectively solve the icing problem of the EGR mixer in the CHINA VI natural gas engine. This study can provide a reference for solving the icing problem of EGR mixer of natural gas engine.

Keywords: natural gas engine; EGR; EGR mixer; ice; temperature of mixed gas

(责任编辑: 刘丽君)