DOI: 10.16236/j.cnki.nrjxb.202503030

氢发动机机油乳化规律研究

李东升[1]，周洪利[1]，靳晓妍[1]，袁　波[2]，段少远[1]，王兆文[2]
（1. 东风汽车公司技术中心，武汉 430058；2. 华中科技大学能源与动力工程学院，武汉 430074）

摘要：氢发动机在低温工况下，氢燃料燃烧产生的水蒸汽会进入曲轴箱并冷凝成水，造成机油乳化，严重影响氢发动机的可靠性．为此，提出了一种机油含水量快速检测方法，随后研究了常温中长距离和低温短距离间歇行驶工况下氢发动机机油乳化程度，以及不同含水量下乳化机油的润滑性能，最后探究了机油温度和通风程度对机油乳化的影响．结果表明：放油称重法可以满足氢发动机机油含水量检测需求；中长距离行驶工况不会发生机油乳化，机油乳化主要发生在低温短距离间歇行驶工况；乳化机油含水量为 25%时机油仍能满足氢发动机的润滑需求；机油加热至 60 ℃以上，能很好改善氢发动机机油乳化发生；通过将机油混合液加热至 93 ℃以上，能快速将水分从混合液中分离出来；从发动机本体外补常温新鲜空气，加强曲轴箱通风量会加剧机油乳化的发生．

关键词：氢发动机；机油乳化；检测方法；机油加热；主动通风
中图分类号：TK421　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000-0909(2025)03-0262-08

Research on oil emulsification of hydrogen engine

Li Dongsheng[1]，Zhou Hongli[1]，Jin Xiaoyan[1]，Yuan Bo[2]，Duan Shaoyuan[1]，Wang Zhaowen[2]
（1. Technical Center，Dongfeng Motor Corporation，Wuhan 430058，China；2. School of Energy and Power Engineering，Huazhong University of Science and Technology，Wuhan 430074，China）

Abstract：The hydrogen fueled internal combustion engine is an important technical route to promote the green and low-carbon transformation of the automotive industry and achieve the "dual carbon" strategic goal. However，during low-temperature cold start of a hydrogen engine，the water vapor generated by combustion can enter the crankcase and condense into water，causing oil emulsification and seriously affecting the reliability of the hydrogen engine. This study firstly proposed a rapid detection method for oil emulsification of the hydrogen engine. Then，the degrees of oil emulsification under driving conditions of medium and long distance at room temperature and of intermittent and short distance at low temperature，as well as the performance of the emulsified oil at different water contents were investigated. Finally，the effects of oil temperature and ventilation degree on oil emulsification were explored. The results show that the oil discharge weighing method can meet the need of hydrogen engine oil emulsification detection. Oil emulsification does not occur under the medium and long distance driving condition，but mainly occurs under the low-temperature，short and intermittent distance driving conditions. Although the water content of the emulsified oil reaches 25%，it still meets the lubrication need. It is also found that heating the engine oil to above 60 ℃ can effectively avoid the oil emulsification of the hydrogen engine. By heating the oil mixture to above 93 ℃，water can be quickly separated from the emulsion. Supplying fresh air at room temperature outside the engine body to enhance crankcase ventilation will accelerate the occurrence of oil emulsification.

Keywords：hydrogen engine；oil emulsification；detection method；oil heating；active ventilation

随着全球能源需求的不断增长和环保意识的提高，氢能作为一种清洁能源正逐渐成为研究的热点[1-2]．在全球范围内，氢能源产业已经取得了一定进展，发达国家日本、德国和美国等已经建立了较为

收稿日期：2024-09-27；**修回日期**：2025-03-29.
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51176136).
作者简介：李东升，高级工程师，lids@dfmc.com.cn.
通信作者：王兆文，教授，博士生导师，wangzhaowen@hust.edu.cn.

完善的氢能源产业体系和技术创新平台，不仅进行氢燃料电池研究[3-4]，同时也不断地进行氢内燃机研究[5-8]. 与传统的燃料车相比，氢内燃机有近零排放[9]. 与氢燃料电池相比，氢内燃机初始成本远低于燃料电池，而且传统原始制造厂家（OEM）不需要像燃料电池一样重新大规模产业投资. 因此，氢内燃机是推动汽车行业绿色低碳转型，实现“双碳”战略目标的重要技术路线.

内燃机活塞组件与缸套之间有配缸间隙，内燃机工作过程中燃烧室内的气体会通过这些配缸间隙进入到曲轴箱. 对于氢发动机而言，当其在低温工况下运行时，由于机体温度较低，窜入曲轴箱内的燃烧产物水蒸汽会冷凝成为液态水，并与发动机内的机油不断搅拌混合. 当机油中含水量超过一定限值时（一般为 0.4%），会导致机油发生乳化，造成机油润滑功能失效，从而导致发动机运行时运动副发生损坏，影响发动机寿命[10-13]. 目前已有研究学者针对机油乳化开展了相关研究. 文献[14-18]主要对空压机润滑油乳化进行研究，通过优化控制策略、优化参数设置和部件设计等措施来改善乳化. 文献[19-22]研究了机油稀释的问题，提出了判定方法及解决方案.

综上可知，以往的研究主要集中在空压机的机油乳化问题解析和改善措施效果验证，而不同工况下发动机的机油乳化研究比较缺乏，尤其是氢发动机的机油乳化研究鲜见报道. 为此，笔者针对氢发动机中存在的容易产生机油乳化这一问题，进行了详细研究. 首先针对氢发动机性能试验，提出一种机油含水量快速检测方法，随后研究了常温中长距离和低温短距离间歇行驶工况下氢发动机的机油乳化程度，以及不同含水量下乳化机油的润滑性能，最后探究了不同因素对机油乳化的影响并提出改善措施. 该研究可以为氢发动机的开发以及氢发动机专用机油的开发提供指引，并为内燃机工业的双碳战略提供助力，具有极大的现实意义.

1　试验装置

试验装置由供氢系统和氢发动机台架测试系统组成. 氢气是易燃、易爆气体，因而供氢系统设计除了满足氢发动机运行所需的供氢压力和流量需求外，供氢系统和涉氢区的安全监控也是设计要点，整个供氢及安全监控系统的构造如图 1 所示. 供氢站与试验间分别处在两个建筑体内，供氢站中采用常见的多个气瓶串联供气方式，供氢压力约为 12 MPa. 采用耐氢脆的不锈钢管道将氢气供给到试验间，在试验间内设计减压阀，可以根据试验需求调整到氢发动机所需目标压力.

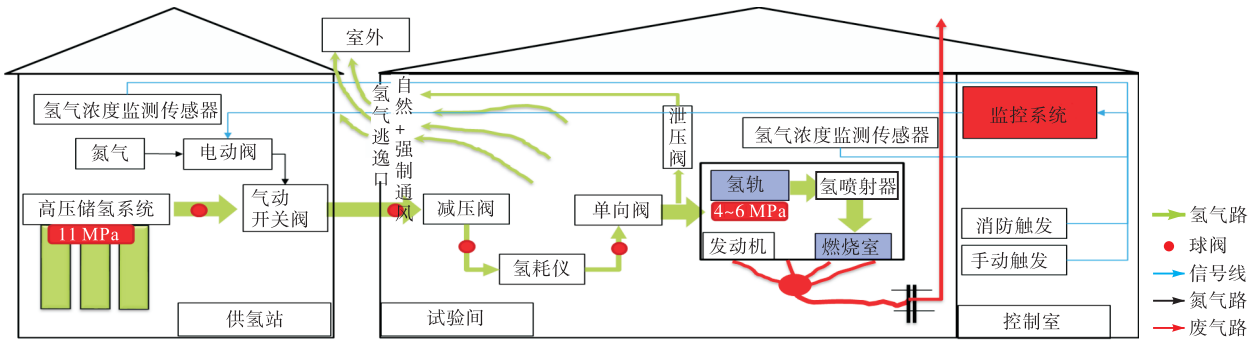


图 1　供氢及安全监控系统构造

Fig.1　Structure of hydrogen supply and safety monitoring system

为了提高测试精度，防止氢气压力波动而产生的反向流动，在氢耗仪后端设计单向阀. 为了方便排出发动机氢轨内的残余氢气，在单向阀和氢轨之间安装泄压阀，并在管道必要位置设计球阀. 由于发动机运行过程中可能存在失火或喷氢器密封不好等情况，为保证安全，发动机尾气与试验室排气系统采用闭式连接，使得未燃烧的氢气可以通过排气系统直接排到室外，避免试验间内氢气浓度过高. 同时在涉氢所有区域均布置了氢气浓度监测传感器，并将浓度信息实时传递到控制室的监控系统，如氢气浓度超标，监控系统会自动达到指令关闭氢气站供氢. 采用惰性气体氮气作为动力源关闭供氢管道上的启动开关阀. 同时，供氢系统与试验室内消防系统和台架急停系统联动，消防系统触发报警或台架急停触发时，也能实现自动关闭气源. 另外，还进行了冗余设计，如试验室内发现了局部小范围明火，但是消防系统还未检测到，那么可以手动触发关闭气源. 最后，从建筑方面设计了氢气逃逸口，氢气密度小，泄漏后会向建筑高处移动，因此，要建筑物高点设计自然通风口和强制通风（防爆设计），保证氢气能快速逃逸室外，避免了

氢气聚集.

试验用发动机型号为某款 1.5 L 氢发动机，表 1 为详细的发动机参数，喷氢器采用缸内直喷技术，喷氢压力范围为 4 ~ 6 MPa，轨压为 1.5 、4.4、4.8、5.3 和 6.0 MPa 时喷氢器流量为 2.0、5.3、5.7、6.8 和 7.0 kg/h. 喷氢器喷孔为单孔喷射，具体采用侧置式布置，并采用导向帽结构以实现氢燃料的快速混合. 导向帽喷孔设计基本思路是：在火花塞周围形成稍浓混合气保证燃烧前期速率，在大部分区域实现超稀薄燃烧，以拟制爆震. 图 2 为喷氢器具体结构.

表 1 氢气发动机参数

Tab.1 Parameters of hydrogen engine

参数	数值
型式	直列 4 缸四冲程，水冷 16 气阀双顶置凸轮轴双 VVT，增压缸内直喷
压缩比	12
最大爆压/MPa	10.8
排量/L	1.5
工作顺序	1—3—4—2
标定功率/kW	80（4 500 r/min）
最大转矩/(N · m)	170（4 500 r/min）



图 2 喷氢器结构示意

Fig.2 Structure of hydrogen injector

由于氢气发动机排气能量较低，不足以推动传统汽油机大尺寸增压器，故而采用了氢发动机专用增压器. 专用增压器选用轮径相对更小的涡轮，提升做功能力. 图 3 为氢发动机专用增压器(内部)与常规汽油机增压器的比较.

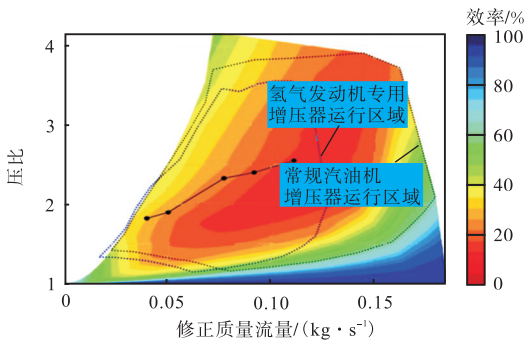


图 3 氢气发动机专用增压器与常规汽油机增压器的比较

Fig.3 Comparison of special turbocharger for hydrogen engine with conventional turbocharger for gasoline engine

采用 AVL APA 202 电力测功机，测功机上配置 HBM 的 T40 转矩传感器，并采用 AVL 492 GAS PEMS IS 排放分析仪. 同时还配置冷却液温控系统、中冷器温控系统等，以保证氢发动机正常运行. 图 4 为整体氢发动机台架，表 2 为主要设备的精度.



图 4 氢发动机试验台架

Fig.4 Experimental setup for hydrogen engine

表 2 主要试验仪器设备精度

Tab.2 Accuracy of main test equipment

设备名称	品牌	型号	量程	精度
测功机	AVL	APA202	525 N · m/200 kW	± 0.5 N · m
冷却液温控	AVL	CON-SYSCOOL_200	40 ~ 120 ℃	± 2 ℃
机油温控	EME	EME343	40 ~ 135 ℃	± 2 ℃

2 分析与讨论

2.1 机油含水量快速检测方法

氢发动机机油乳化规律试验所用机油为东风嘉实多 SN 0W-20 通用机油，内含复合添加剂包. 判断机油乳化是否发生的方法有：(1)通过油品颜色进行定性分析；(2)将油品按照 GB/T 6283 化工产品中水分含量的测定卡尔 · 费休法和 GB/T 260—2016 石油产品水含量的测定蒸馏法进行水成分检测，前者无法知道具体含水量，后者虽然结果精确高但实效性差. 在具体试验中，为了能够快速掌握氢发动机试验过程中机油含水量，提出了放油称重法，即将试验后机油重量减去试验前机油重量，得到的差值近似为增加的水重量，并转换成单位质量占比(g/kg).

表 3 为分别采用放油称重法和油品检测法下的 3 种乳化机油样品结果对比情况，两种方法最大误差

表 3 不同机油含水量检测方法结果对比

Tab.3 Comparison of results of different oil water content testing methods

检测方法	检测结果		
	样品 1	样品 2	样品 3
放油称重法/(g · kg^{-1})	52.6	508	730
油品检测法/(g · kg^{-1})	52.4	506	746
与油品检测法误差/%	0.38	0.39	2.14

在 3% 以内，这表明放油称重法精度可以满足要求，能实现机油含水量的快速检测.

2.2　常用行驶工况下机油乳化程度

2.2.1　中长距离行驶工况下机油乳化程度

为了定量研究不同行驶工况下的机油乳化特性，氢发动机台架试验工况借鉴了某款轻型乘用车运行在全球统一轻型车辆测试循环（WLTC）试验循环工况下发动机的试验测试结果. 图 5 为 WLTC 试验循环工况，图 6 为该款轻型乘用车运行 WLTC 试验循环工况时对应发动机冷却液温度变化.

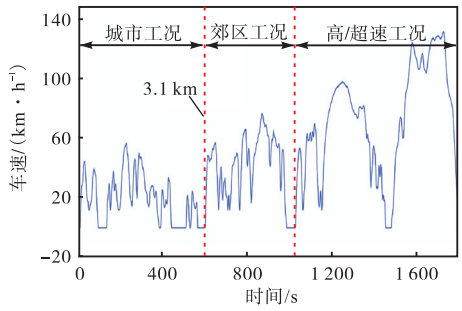


图 5　WLTC循环工况

Fig.5　WLTC cycle conditions

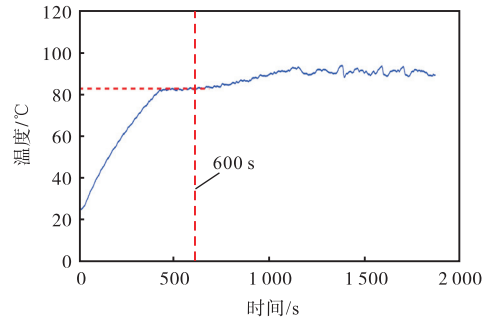


图 6　发动机冷却液温度变化

Fig.6　Change of engine coolant temperature

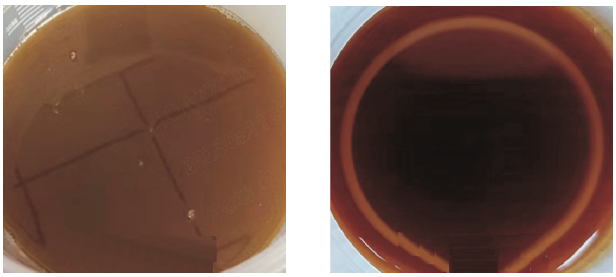
由图 6 可知，冷却液温度达到 80 ℃时，对应时间约为 600 s，此阶段为车辆暖机过程，超过 600 s 之后，冷却液温度高于 80 ℃，暖机基本完成. 结合图 5 中 WLTC 试验循环工况中的车辆速度曲线可知，从 0 至 600 s 这段时间内，车辆累计行驶里程约为 3.1 km，对应 WLTC 循环中的城市工况. 因此，研究中定义车辆行驶里程大于 3.1 km 时为中长距离行驶工况，此时车辆行驶里程较长，发动机冷却液温度大于 80 ℃，为车辆正常行程工况.

在氢发动机台架上，先按照表 4 台架试验工况开展试验，模拟常温冷启动暖机过程，当冷却液温度上升至 80 ℃后，暖机结束，此时将发动机负荷增加到 90 N · m（3 000 r/min）（根据车速为 120 km/h 时对应的发动机负荷和转速定义），直至冷却液达到车辆许用最高水温 115 ℃后并稳定运行 1 h. 试验结束后，采用放油称重法，试验前、后机油重量基本一致，这表明中长距离行驶工况下，机油内含水量不明显. 图 7 为试验前、后机油颜色对比，试验前机油为暗褐色，试验后机油略微透明化，但未出现因机油乳化而变为乳白色情况. 因此，从机油重量变化和机油颜色变化结果综合可知，中长距离行驶工况下，机油乳化情况不明显. 该研究表明，车辆在室温启动后并进行中长距离行驶，冷却液温度大于 80 ℃时氢发动机不会产生机油乳化现象.

表 4　台架试验工况

Tab.4　Bench test conditions

序号	转矩/(N · m)	运行时间/s	试验条件
1	怠速	150	
2	20（1 200 r/min）	150	水温不高于 50 ℃，
3	40（1 600 r/min）	150	机油温度不控制
4	60（2 000 r/min）	150	



（a）试验前　　（b）试验后

图 7　试验前、后机油颜色对比

Fig.7　Comparison of oil color before and after test

2.2.2　短距离间歇行驶工况下机油乳化程度

图 8 为私家车辆年平均行驶里程分布统计，约有 3% 车辆年平均行驶里程低于 3 000 km（约平均每天行驶里程不超过 10 km）. 对这些车辆使用情况调查分析，车辆行驶车速和里程与 WLTC 中城市工况类似，主要为短距离间歇行驶工况. 为提高氢发动机运行可靠性，对此 3% 车辆特殊行驶工况发生机油乳化

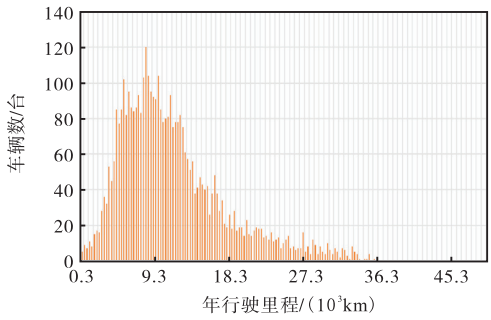


图 8　私家车辆年行驶里程分布统计

Fig.8　Statistics on the distribution of annual mileage traveled by private vehicles

的特性有必要进行研究.

短距离间歇行驶工况下，发动机处于暖机期间，冷却水温度较低并且变化较明显. 研究中，选取 WLTC 循环 0 ~ 600 s 内车辆行驶工况作为制定氢发动机台架试验工况的依据. 具体地，按照上述轻型乘用车动力学模型，将 WLTC 启动暖机阶段(0 ~ 600 s)车速换算为对应的发动机转速、负荷，再在发动机台架上按照该转速和负荷运行氢发动机. 根据发动机测试经验，试验在发动机转速、负荷范围内，等距选取 4 个工况点近似模拟上述路况下的发动机试验. 另外，发动机冷却液温度也选取暖机段温度近似中间值(50 ℃). 单个循环累计试验时长为 600 s，具体工况如表 4 所示. 采用该循环反复进行多次低温短距离间歇行驶工况的机油乳化性能试验，便于研究不同暖机次数下机油乳化特性.

低温短距离行驶工况机油乳化摸底试验基于表 4 工况进行，总共运行了 20 个循环工况，每运行 2 个循环工况进行一次放油称重，图 9 为机油中含水量变化结果. 机油中含水量分数为质量占比，具体公式为

$$K=\frac{M_n-M_0}{M_n}\times 100\% \tag{1}$$

式中：K 为含水量质量占比；M_n 为第 n 次循环放油质量；M_0 为加入的新鲜机油质量.

由图 9 可知，随着循环工况次数的增加，放出机油质量基本上呈线性增加趋势：第 0 个循环为加入的新鲜机油质量，从第 1 ~ 20 个循环内，机油总共增加了 0.81 kg，每 2 个循环平均增加 810 g 左右，第 20 个循环时，含水量质量占比已经高达 25%.

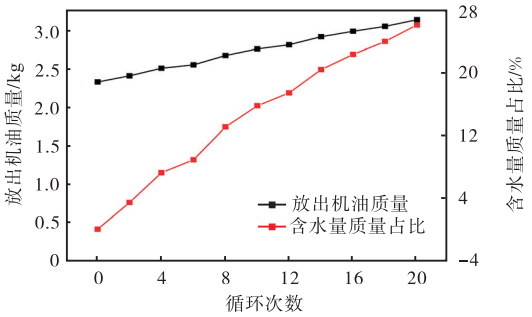
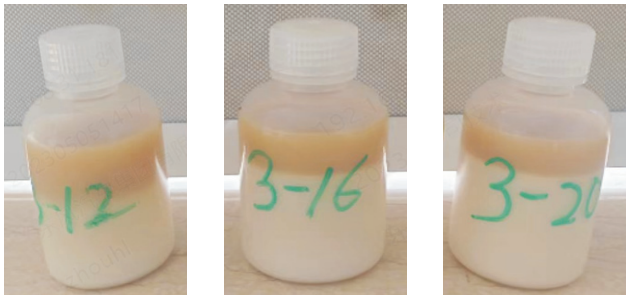


图 9 机油中含水量变化

Fig.9 Variation of water content in oil

对第 12、第 16 和第 20 循环取样进行定性观察，油品静置 24 h 后状态见图 10，从油品颜色上判断，机油乳化非常严重，机油出现分层，上层为油层，下层为乳化层(油、水混合).

基于上述氢发动机机油乳化试验结果可知，在车辆频繁冷机启动或短距离间歇行驶工况容易发生机油乳化现象.



(a) 第 12 循环 (b) 第 16 循环 (c) 第 20 循环

图 10 不同循环工况次数后的机油油品状态

Fig.10 Oil condition of engine oil after different number of cycle conditions

2.3 不同含水量下乳化机油的润滑性能

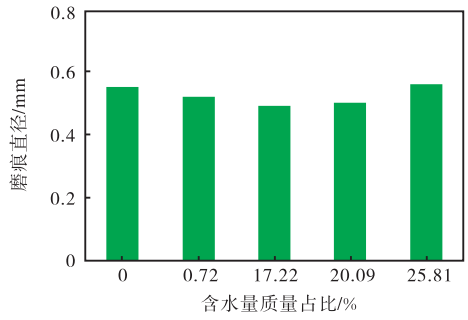
根据传统经验，机油发生乳化判断为机油失效. 为了验证机油乳化后的润滑性能，使用乳化机油，进行发动机运动幅磨损试验表明，含水 25% 的机油混合液下，发动机运动幅磨损试验并未发现严重磨损，仍具备较好的润滑能力.

为了准确判断乳化机油混合液是否仍具备润滑性能，在磨损机上采用 SRV(SRV 来自于德语 Schwingung、Reibung 和 Verschleiß 的第一个字母，意思是往复式、摩擦及磨损)方法进行了磨损试验，以实现不同含水量机油混合液摩擦系数和磨痕直径等关键磨损参数的定量分析，同时也分析了不同机油混合液中金属成分含量，进一步验证机油乳化液润滑性能. 图 11 为不同含水量机油混合液的磨痕直径和摩擦系数对比. 相对于含水量为 0% 的纯机油，含水量小于 25% 的机油混合液的磨痕直径和摩擦系数没有明显的恶化，仍能满足发动机润滑需求.

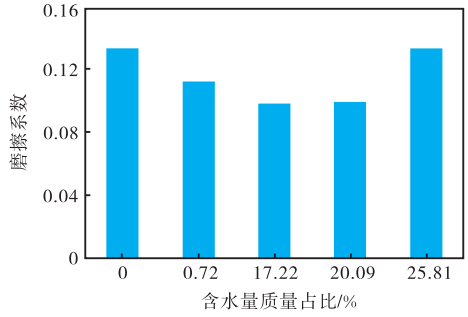
图 12 为采用含水量为 0.5% 和 21.0% 的含水机油混合液铁元素对比. 氢发动机运行 100 min 过程中铁元素含量变化情况，两种含水量机油混合液中铁元素含量基本上在一个水平上，均小于 7×10^{-6}. 即使含水量为 21.0% 的机油混合液运行 100 min，铁元素含量也未出现异常增加，这间接佐证乳化后的机油润滑性能未发生明显变化.

根据石油化工经验可知，通过加热方法可以将机油混合液中水去除. 具体研究了含水量分别为 1%、15% 和 25% 的乳化机油混合液和新鲜机油在不同温度下的还原过程，其质量变化率结果如图 13 所示. 油、水分离过程中的质量变化非常缓慢，只有少数机油蒸发产生. 在环境温度小于 93 ℃时，不同含水量的机油混合物质量变化非常缓慢，表示机油温度在 93 ℃以下，水分挥发较少；但当环境温度上升到

93 ℃时，含水量为 15% 和 25% 的机油混合液总体质量快速减少，表明温度在 93 ℃之上时，乳化油混合液中的水分能快速蒸发分离；当环境温度进一步上升到 138 ℃之后，乳化油混合液的质量变化率与新鲜机油相当，这表明机油温度达到 138 ℃之前，乳化油混合液中水分已被完全蒸发分离. 上述研究表明，当机油温度达到 93 ℃以上，可将机油混合液中的水分快速分离出来，还原机油的润滑性能.



（a）磨痕直径



（b）摩擦系数

图 11　不同含水量机油混合液磨痕直径和摩擦系数对比

Fig.11　Comparison of abrasion mark diameters and friction coefficients of oil mixtures with different water contents

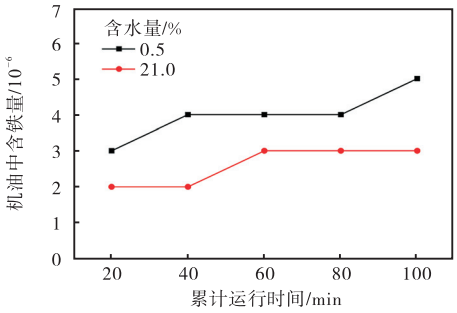


图 12　不同含水量机油混合液中铁元素对比

Fig.12　Comparison of elemental iron in oil mixtures with different water contents

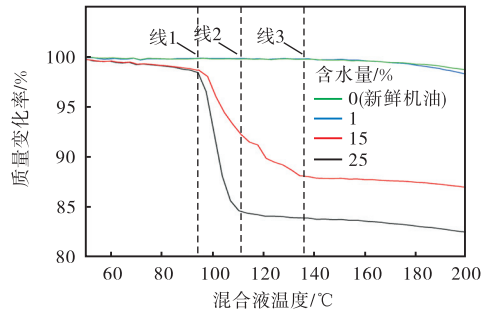


图 13　混合液中水分分离曲线

Fig.13　Separation curve of water in mixture

氢发动机燃烧产物中包含 NO_x 和水，NO_x 和水的结合会产生酸性物质硝酸盐. 通常机油呈碱性，可以中和发动机燃烧之后产生的酸性物质，从而避免酸性物质对发动机的腐蚀，保护发动机并保障发动机正常工作. 图 14 为氢发动机试验后获得的不同含水量机油混合液内的酸碱值变化，图中含水量为 0% 是新鲜机油. 与新鲜机油相比，随着机油中含水量的增加，机油混合液的碱值逐步变小，这主要是机油被水分不断稀释，以及新增酸性物质硝酸盐共同影响的结果. 试验结果表明，含水量小于 26% 的乳化机油，其酸值没有明显增加，对发动机的腐蚀能力也并没有明显变化.

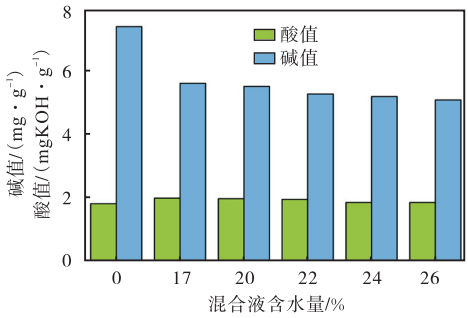


图 14　不同含水量混合液的酸碱值影响分析

Fig.14　Analysis of the effect of pH values of mixtures with different water contents

2.4　不同因素对机油乳化的影响

虽然含水量为 25% 对混合液磨损性能影响不大，但根据经验预测，含水量较高时，在冬天低温情况下混合液中的水会结冰，影响发动机的低温冷启动性能，因而有必要进行降低水含量措施探索研究.

2.4.1　机油温度对机油乳化的影响

提高机油温度即可以减少燃烧生成水分的冷凝，也可以促进机油中水分的蒸发. 为了研究机油加热对机油乳化改善的实际效果，采用台架设备对机油进行加热，以达到控制机油温度的目标. 试验台架及机油加热设备连接油口位置见图 15. 机油加热设备从发动机油底壳抽油，经过加热器加热后，再将机油送回油底壳.

低温短距离行驶工况机油乳化摸底试验中，发动机工况基于表 4 工况进行，但主油道温度分别控制为

40、60 和 80 ℃. 上述工况各运行 10 个循环，每 2 个循环工况进行一次机油取样分析含水量. 图 16 为不同机油温度下的含水量对比，当机油温度加热到 60 ℃时，运行过程中，在机油中产生的含水量已经很低，第 10 个循环后含水量约为 0.72%，远低于 40 ℃时机油中含水量. 机油温度达到 80 ℃时，机油中含水量约为 0.03%，与传统汽油机水平相当.

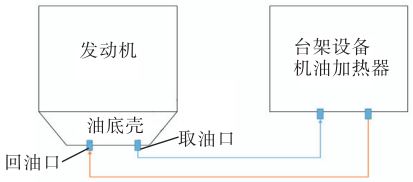


图 15 台架机油加热示意

Fig.15 Schematic of oil heating for bench machine

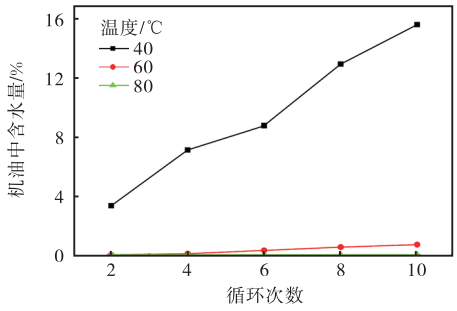


图 16 不同温度机油中含水量对比

Fig.16 Comparison of water content in motor oil at different temperatures

综上可知，进行机油加热，提高机油温度可以有效降低氢发动机机油中的含水量，尤其机油温度达到 80 ℃后，机油含水量明显减少，避免了机油乳化的发生. 这是因为机油加热后，机油内温度提高，减少了燃烧水分往机油中冷凝成液态水的可能. 同时使燃烧水蒸汽大部分通过曲轴箱通风系统重新回到发动机气缸内，再通过排气冲程排到大气中.

2.4.2 通风程度对机油乳化的影响

氢发动机机油乳化发生的主要原因是，低温下曲轴箱通风系统内的水蒸汽冷凝产生水与机油混合，因而研究了不同曲轴箱通风程度对机油乳化的影响. 为此，试验中设计了图 17 的电动曲通系统方案，通过电动油、气分离器不断从机油液面上方某处抽风，并送至增压器入口的进气管路内. 在下缸体某处设计补气口，室外空气通过补气口不断地进入发动机曲通内.

同样，基于表 4 工况，进行低温短距离行驶工况机油乳化摸底试验，电动泵工作转速为 35 000 r/min，曲轴箱通风量约为 165 L/min，为正常曲轴箱通风量的 16 倍. 图 18 为运行 2 个循环后机油中含水量对比，曲轴箱通风量为 165 L/min 时，机油中含水量为 8.00%，比正常曲轴通风量方案高一倍多，这是因为大量的新鲜空气进入曲轴箱通风系统后，降低了环境温度，加速了水蒸汽冷凝，从而导致了机油中含水量的增加. 这表明从发动机本体外补气加强曲轴箱通风会加速机油乳化的发生.

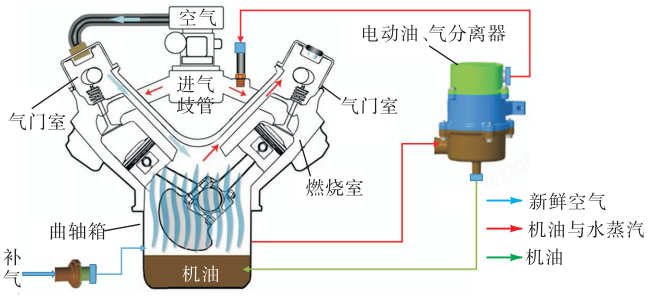


图 17 电动曲通系统示意

Fig.17 Schematic of the motorized crank system

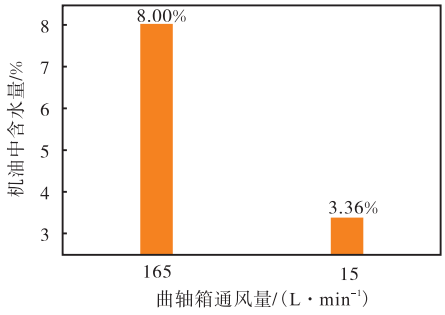


图 18 不同通风程度机油中含水量对比

Fig.18 Comparison of water content in oils with different levels of ventilation

3 结 论

提出了一种机油乳化快速检测方法，并研究了不同运行工况下氢发动机的机油乳化程度、不同含水量下乳化机油的润滑性能以及不同因素对机油乳化的影响，具体结论如下：

(1) 放油称重法可以满足氢发动机机油含水量快速检测需求；中长距离行驶工况下不会发生机油乳化现象，机油乳化现象主要发生在低温短距离间歇行驶工况.

(2) 含水量小于 25% 的机油混合液中仍能满足发动机润滑需求.

(3) 通过将机油混合液加热至 60 ℃以上，能很好改善氢发动机机油乳化现象；通过将机油混合液加热至 93 ℃以上，能快速将水从混合液中分离出来，实现机油乳化的消除.

（4）从发动机本体外补充常温新鲜空气，加强曲轴箱通风量，会加剧机油乳化现象的发生.

参考文献：

［1］ Fayaz H，Saidur R，Razali N，et al. An overview of hydrogen as a vehicle fuel[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2012，16(8)：5511-5528.

［2］ Sridhar A，Ponnuchamy M，Kumar P S，et al. Progress in the production of hydrogen energy from food waste：A bibliom etric analysis[J]. International Journal of Hydrogen Energy，2022，47(62)：26326-26354.

［3］ Hames Y，Kaya K，Baltacioglu E，et al. Analysis of the control strategies for fuel saving in the hydrogen fuel cell vehicles[J]. International Journal of Hydrogen Energy，2018，43(23)：10810-10821.

［4］ Dodds P E，Staffell I，Hawkes A D，et al. Hydrogen and fuel cell technologies for heating：A review[J]. International Journal of Hydrogen Energy，2015，40(5)：2065-2083.

［5］ Verhelst S. Recent progress in the use of hydrogen as a fuel for internal combustion engines[J]. International Journal of Hydrogen Energy，2014，39(2)：1071-1085.

［6］ 包凌志，孙柏刚，罗庆贺. 高效增压直喷氢内燃机近零 NO_x 排放试验优化[J]. 内燃机学报，2023，41(5)：412-419.

［7］ 孙大伟，刘福水，孙柏刚，等. 热 EGR 对氢内燃机性能及排放影响的试验研究[J]. 内燃机学报，2009，27(2)：134-139.

［8］ White C M，Steeper R R，Lutz A E. The hydrogen-fueled internal combustion engine：A technical review[J]. International Journal of Hydrogen Energy，2006，31(10)：1292-1305.

［9］ Verhelst S，Wallner T. Hydrogen-fueled internal combustion engines[J]. Progress in Energy and Combustion Science，2009，35(6)：490-527.

［10］ 张腾，段继翔，刘冠麟，等. 天然气发动机曲轴箱通风系统应用研究[J]. 小型内燃机与车辆技术，2022，51(5)：55-58.

［11］ 张伟勋，于平安，王斌，等. 柴油机闭式曲轴箱通风系统设计及其对排放的影响[J]. 车用发动机，2022(2)：81-86.

［12］ 李文彬，李志宇，战麒羽. 合理设计排气系统避免机油乳化[J]. 内燃机与配件，2023(11)：99-101.

［13］ 历建宁. 浅析内燃机车机油乳化现象[J]. 黑龙江科技信息，2012(32)：33.

［14］ 王勇权. 东莞地铁 2 号线空压机机油乳化问题研究[J]. 铁道运营技术，2023，29(2)：40-42.

［15］ 杨曾虹，徐晓沁，胡云川，等. SDA4 型交流机车空气压缩机机油乳化现象的分析和处理[J]. 铁道交通装备和技术，2020(4)：40-42.

［16］ 何安琪. SL-22 型螺杆式空气压缩机机油乳化原因分析及预防措施[J]. 郑州铁路职业技术学院学报，2022，34(2)：18-20.

［17］ 刘洪春，刘丙林，马桂财，等. 电力蓄电池工程车空压机机油乳化原因及油温检测分析[J]. 铁路技术创新，2016(6)：118-120.

［18］ 何明洋，姜葛，张斌. 变频螺杆空压机内机油乳化原因分析与改进[J]. 装备机械，2022(1)：62-64，72.

［19］ 芦存树，王晨阳，梅娜. 某轻型商用车发动机机油稀释问题的分析及对策[J]. 专用汽车，2023(4)：18-20，24.

［20］ 周武明，刘东，孙萧，等. 汽车发动机机油稀释测试技术研究[J]. 小型内燃机与车辆技术，2021，50(6)：80-85.

［21］ 李锦，黄长征. 内燃机机油性能的综合评价研究[J]. 自动化仪表，2010，31(8)：27-29，32.

［22］ 王亚新，张聪慧. 内燃机车机油乳化的判定[J]. 铁道机车车辆工人，2008(6)：13-15.