

高原环境对车辆动力与油品的影响

董沛¹, 郭小川¹, 李刚林², 李霞³

(1. 后勤工程学院, 重庆 401331; 2. 西藏军区后勤部, 拉萨 850000;
3. 成都军区联勤部 78300 部队, 成都 610000)

摘要:通过对高原地区车辆使用情况的调研,分析高原车辆装备不适应环境的因素,总结了国内外对车辆动力和油品的高原环境适应性研究现状,以及高原地区温度、气压、风沙等环境因素对车辆动力与油品的影响。介绍了高原环境模拟实验的主要方法。认为高原环境下目前发动机功率恢复的措施,会进一步提高发动热负荷并加速油品的氧化变质。因此对油品性能尤其是高温抗氧化性能提出了更高的要求。

关键词:高原;动力恢复;润滑油

本文引用格式:董沛,郭小川,李刚林,等.高原环境对车辆动力与油品的影响[J].兵器装备工程学报,2016(1):92-96.

Citation format: DONG Pei, GUO Xiao-chuan, LI Gang-lin, et al. Influence of Plateau Environment on the Vehicle Power and Oil[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016(1):92-96.

中图分类号:TK421

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2016)01-0092-05

Influence of Plateau Environment on the Vehicle Power and Oil

DONG Pei¹, GUO Xiao-chuan¹, LI Gang-lin², LI Xia³

(1. Logistics Engineering University, Chongqing 401331, China;

2. Logistics Department of Tibet Military Command, Lhasa 850000, China;

3. The No. 78300th Troop, Logistics Department of Chengdu Military Command, Chengdu 610000, China)

Abstract: Through the using of vehicles in the plateau and analysis of the reason that plateau vehicle equipment does not meet the environment, the research status that vehicle and oil adaptability to highland environment at home and abroad and the influence of temperature, air pressure and wind on them were summarized. The main method of plateau environment simulation was introduced. The measures of engine power recovery in the plateau environment will further improve the engine temperature and speed up the oxidation deterioration of oil. So properties of oil especially high temperature oxidation performance need higher requirements.

Key words: plateau; engine power recover; oil

我国国土面积约960万平方公里,其中海拔2 km以上的地区占全国陆地总面积的33%^[1],而全球海拔2 km以上的地域占全球陆地总面积的13.2%,我国是世界上高原面积最大的国家,高原边境线约5 000多公里,地缘政治复杂,军事地位突出,因此武器装备与油品在高原环境下能否发挥作战性能具有十分重要的意义。青藏高原是我国典型的高原地区,平均海拔约4 km,海拔每升高1 km,大气压力平均下

降9.5 kPa,空气密度与空气含氧量分别下降0.092 kg/m³、30.8 g/m³,大气温度下降约4℃,水沸点平均降低2.7℃,紫外线辐射强度平均增加3.4 w/m²。青藏高原环境参数如表1所示^[2],由表可见大气压力比大气温度随海拔的变化较为迅速。

高原地区昼夜温差大且年低温期长,冰雪冻土层厚,冻土地带面积大,同时气候干燥风沙尘土大。由于地理环境的

限制,高原地区道路条件差,品质等级低,其中四级和等级外公路占80%左右^[3]。苛刻的自然环境使柴油机与平原地区相比更容易出现故障,刘冰等^[4]收集高原地区94起车辆柴油机故障,并做如下统计如图1所示。可见高原环境下柴油机润滑系统和冷却系统故障所占的比值较大,主要故障模式为泄露和烧蚀。

表1 青藏高原环境参数

海拔高度/m	大气压力/kPa	大气温度/℃	水沸点/℃	相对空气密度/%
0	101.3	15	100	0.99
1 000	89.7	8.5	96.8	0.89
2 000	79.2	2	93.8	0.80
3 000	70.1	-4.5	91.2	0.72
4 000	61.6	-11	88.8	0.66
5 000	54.0	-17.5	86.7	0.58

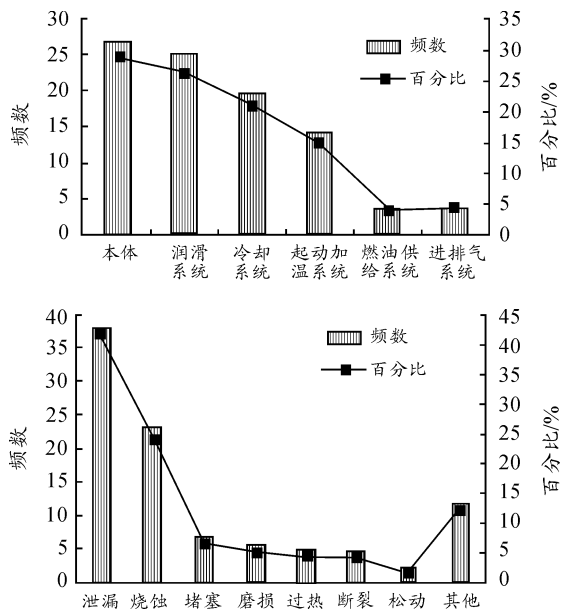


图1 高原地区柴油机故障分布图

1 国内外研究现状

1.1 国外

世界上的发达的国家,地理环境多处于平原地区,因此开展这方面的研究并不是很早,20世纪50年代末、60年代初,主要以实验室模拟为主,即人工控制实验室内的大气压力和温度,模拟出高原低温低气压的环境条件。美国NASA在20世纪60年开始了高原地区柴油机性能指标的大气修正工作,利用高原环境模拟实验设备进行了航空发动机高海拔性能模拟试验。1976年美国学者研究了高原地区采矿提高挖掘机效率的方法,认为额定功率随海拔每升高1 km,将减小0.4%~1.0%,同时对电机绝缘、冷却通风、空气过滤

等都作了相关研究^[5]。20世纪70年代,随着涡轮增压技术的快速发展,运载车辆广泛使用了涡轮增压柴油机,至20世纪80年代美国康明斯发动机研制的Cummins C 8.3车用柴油机达到了海拔能力为2 500 m这一指标^[6]。近年来,国外汽车制造公司如美国的卡特彼勒、德国的奔驰等开始研发高原产品,并陆续到我国和南美的高原地域进行试验^[7]。国外对柴油机高原适应性研究主要是基于严格的排放标准,例如美国的大气净化法案、NTE排放标准等均对车辆高原排放做出了规定^[8]。国外研究侧重于高原排放方面,较少研究苛刻的环境条件下发动机的动力性能,而且对相关油料研究较少。西方国家在发动机制造方面有技术上的优势,但由于其车辆行驶的海拔较低,先进技术在高原环境条件下的应用研究较少^[9]。

1.2 国内

国内对高原柴油机动力恢复的研究始于20世纪70年代青藏铁路建设时期,最初只是对工程机械等进行简单的改装,随着研究进一步深入,逐步以机械增压、进气旁通、调整供油提前角等手段有针对性的开展了解决发动机燃烧、排放、拉缸问题的试验。20世纪90年代我国上海柴油机厂研制的D6114车用柴油机,实现了海拔能力为2 500 m。我国研究主要集中在涡轮增压器的高原匹配方面,然而尽管废气涡轮增压技术能够部分恢复高原动力,但实际使用中仍然存在4 km以上动力不足、热负荷大等问题,因此国内部分高校正在开展对先进的增压技术如可变截面涡轮增压技术(VGT)、二级增压技术(TST)的研究^[10]如西安交通大学、清华大学、华中科技大学等单位分别进行了这方面的研究。但对高原功率恢复的研究偏重于小功率的乘用车柴油机,对海拔4 000 m以上大功率柴油机研究较少^[11]。随着先进的电子控制技术在柴油机上不断得到应用,柴油机在高原的燃烧状况进一步得到优化。高压共轨技术克服了机械式供油系统转速对喷油的影响,全面改善柴油机的高原动力性能^[12]。与国外相比,我国高原地区车辆排放标准尚不完善,研究侧重于动力恢复,对环保的考虑较少。目前对发动机高原功率恢复的研究较多,技术上多采用废气涡轮增压电子控油技术等,这些技术措施在恢复功率的同时也对设备的润滑、冷却与密封提出了更加严格的要求,而现阶段对油品的高原适应研究较少。

2 高原环境对车辆动力的影响

高原环境特殊的温度、气压、风沙等都影响着发动机的性能^[13]。高原环境会对动力系统产生影响:进入气缸的氧气量减少,可燃混合气体过浓,后燃现象严重,燃烧不完全,动力和经济性变差,同时燃烧室由于燃烧不完全,柴油在高温下发生裂解聚合等反应形成积碳,产生非正常磨损,可靠性和寿命大大降低。高原环境对散热系统产生影响:通过冷却风扇的单位体积空气质量相对平原地区低,冷却水的沸点低,导致发动机散热性能下降,热负荷进一步增加。高原环境对启动系统产生影响:启动气温低,机油黏度大启动力矩

增加蓄电池容量降低,导致内燃机启动困难。高原环境对柴油机的润滑系统产生影响:对于高原车辆出现的机油压力过低的情况,张长岭等^[14]通过理论分析与计算,认为随着海拔的升高,油泵前压力降低,导致泵前机油气化出现了空吸现象,使得主油道压力明显降低甚至油压不够产生报警。

2.1 温度的影响

温度主要影响着内燃机的启动性能。高原地区年平均气温低,昼夜温差大,有些地区可达 -50°C ,对发动机的启动带来了很大困难。蓄电池在高原低温的环境下内部化学反应变慢,内阻增大端电压下降,进而放电率降低,使启动力矩减小。并且低温会导致燃油的黏度增加,形成的混合气体不均匀,柴油燃烧不完全,积碳严重^[15]。同时低温下润滑油的黏度大,启动力矩增大,启动时不能在机械磨损部位形成有效的润滑油膜,使磨损增大,可靠性和使用寿命降低。

温度还影响着内燃机系统内热平衡。尽管环境温度随海拔的上升而降低,表面上看来有利于发动机的散热,但实验结果证明,缸内最高燃烧温度和涡轮前排气温度随海拔高度的上升而提高,这主要是由两个原因导致:①随着海拔高度的升高,压比代偿性上升,使得压气机出口温度提高;②在同等燃油量的前提下,参与燃烧的空气减少,因此,在放热量变化不大的情况下,被加热的气体质量大幅减少,所以燃烧温度和涡轮前排气温度都会上升^[16]。

2.2 气压的影响

高原气压对发动机动力的影响是非常显著的。研究表明,海拔每升高1 km,非增压柴油机的功率下降约8%~13%,增压柴油机功率下降约1%~8%^[17]。王利贤等^[18]认为:由于大气压力和空气中的含氧量减小,过量空气系数 α 下降,混合可燃气体浓度上升,气缸压缩终了的温度和压力降低,气缸内可燃气体燃烧不完全,使发动机功率下降,燃油消耗量急剧增加,燃料参与燃烧量减少,自由基之间的聚合反应增加,产生大量积碳,使活塞、活塞环、气缸内壁磨损加剧,发动机使用寿命受到影响。王宪成等^[19]认为:燃料在高原环境下急燃期和缓燃期阶段内无法完全燃烧,后燃加重导致柴油机缸内燃烧温度峰值和排气温度升高,同时柴油机冷却系统的散热能力也不及平原地区,综合导致柴油机热负荷随海拔高度的升高而上升。可见柴油机的热负荷主要决定于燃烧过程进行的好坏,所以大气压力对柴油机的影响远比大气温度的影响大。

气压对发动机的低温启动性能也有影响。随着海拔的升高,气压降低,空气密度降低,导致发动机有效充气量减少,使得压缩终点压力和温度降低,发动机着火延迟,与低海拔相同温度下相比启动更为困难。试验表明,海拔每升高1 km启动温度与平原地区相比大约需要提高3~4 $^{\circ}\text{C}$ ^[20]。这就意味着发动机高原低温启动时不能仅仅考虑低温的影响,否则就不能实现可靠的启动,必须采取相应的辅助措施。

气压对冷却系统热平衡产生的影响。许翔等^[21]研究了不同海拔高度条件下柴油机燃烧放热量的分配比例和冷却液温度,随着海拔的升高,排气散热量比值下降20.6个百分点,冷却液散热量所占比值变化不大。

2.3 沙尘和日照的影响

高原环境恶劣,降水量低,气候干燥,日照强度大,风沙尘土多,同时道路条件远不及平原地区,因此对空滤、燃油和机油滤清器的过滤均提出了更高的要求。平原地区,干净的空气含尘密度小于 $0.0019/\text{m}^3$,多尘的空气含尘密度为 $1\sim39/\text{m}^3$,而高原作业环境现场含尘密度可达 $159/\text{m}^3$ 以上^[22]。高原环境下沙尘等颗粒物更为容易进入油路润滑系统,造成磨粒磨损,使润滑油寿命缩短,换油期缩短,最终导致发动机的寿命减少。因此为更好地适应高原地区,车辆装备的空气滤清器必须重新设计,最大限度地减少沙尘进入发动机内部,同时尽量减小进气阻力。

3 高原环境对油品的影响

3.1 直接影响

高原环境的温度、气压、沙尘等会对柴油机机油产生直接影响。温度直接影响机油的黏度,液体黏度随温度变化的性质称为黏温特性,黏温关系符合 Arrhenius(阿仑尼乌斯)方程:

$$\eta = Ae^{E_a/(RT)} \quad (1)$$

式中: η 为表观黏度($\text{Pa}\cdot\text{s}$); A 为指前因子或称频率因子($\text{Pa}\cdot\text{s}$); E_a 为黏度活化能(J/mol); R 为气体常数, $R=8.314\text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$; T 为绝对温度(K)。

对式(1)两边同时取对数得:

$$\ln\eta = \ln A + E_a/(RT) \quad (2)$$

从 Arrhenius(阿仑尼乌斯)方程可以看出:当温度 T 减小时, η 增大。 η 在对数项中可见温度变化对矿物油黏度变化影响很大^[23]。环境温度对油品的影响,在低温启动时比较明显。冷车启动时,车辆油路中的润滑油与外界的环境温度相当,低温下油品的黏度增加,机械的启动力矩增加,造成启动困难,不能形成有效润滑膜,使冷启动摩擦磨损加剧。

压力变化也会影响油品的黏度。当 $P=0\sim50\text{ MPa}$ 时常采用下式计算液体的运动黏度^[24]:

$$V_p = V_0(1 + 0.003p) \quad (3)$$

式中: V_p 为压力为 P 时液体的运动黏度; V_0 为压力为一个大气压时液体的运动黏度。以上提到气压降低会使机油泵前压力降低,导致部分机油气化,使主油路压力降低,甚至报警。机油不能形成有效的压力,就不能充分在摩擦部位产生润滑作用,造成非正常磨损,机件寿命大大降低。温度和压力影响油品的黏度,黏度过大或过小都会给发动机油的正常的润滑、冷却与密封造成不良影响^[25]。

高原环境风沙较大,道路条件差,即使有空气滤清器的过滤,也难免有沙尘进入到发动机内部,并最终进入油路系统,磨粒磨损加剧,降低润滑油的润滑性能,缩短换油周期。

3.2 间接影响

高原环境还会通过发动机对油品产生间接影响。以上提到由于高原低气压的影响,会使发动机内部的温度较平原地区高很多。温度升高必然使有机烃类化合物氧化速度加快。温度每升高 10°C ,反应速度提高一倍,润滑油的氧化速

度加快,缩短了换油周期^[26]。

王宪成等^[27]建立了气缸套-活塞环磨损仿真模型,认为随着海拔高度上升,气缸套-活塞环环境的油膜厚度逐渐变薄。其原因在于气缸热负荷增大,使各部件的温度升高,润滑油的黏度降低,间接导致油膜厚度随气压而发生变化。

李富香等^[28]对高原客运车辆柴油发动机油进行取样检测并对主要理化指标进行分析。参照国家标准 GB/T 7607—2010《柴油机油换油指标》,多数车辆润滑油质量指标都没有超过换油标准,只有碱值与运动黏度变化率超标,造成提前换油。

4 高原环境模拟与仿真

对车辆的研发和设计大多在平原地区进行,因此为了节约成本,更好地在平原地区研究高原问题,研究人员多采用建立高原环境模拟实验室和利用计算机试验仿真技术模拟高原环境。

国外有美国福特汽车公司全天候汽车性能实验室、德国大众公司汽车低温和气候实验中心等环境模拟实验室,可模拟海拔 0~4 km,温度 -40~150℃。国内有中国一汽技术中心汽车环境实验室、中国汽车技术研究中心汽车环境实验室等,可模拟海拔 0~5.2 km,温度 -40~60℃。高原环境模拟系统一般包括低气压模拟系统、温度模拟系统、湿度模拟系统、日照模拟系统等^[29]。实验室高原环境模拟实验具有可复现自然条件、不受时间地点季节天气限制、节省时间等优点,但也存在造价昂贵、没有实地行车实验准确等缺点。

利用计算机技术建立虚拟的试验仿真平台,通过建立数学模型,使用时仅改变一些简单的参数即可,不受试验场地,时间和次数的限制,具有成本低、周期短、重复性好、获取信息多样等优点。陈渝光等^[30]通过二级涡轮可调增压柴油机稳态工况的仿真模型,探讨高海拔工作环境下柴油机进气压力控制方法。路锋等^[31]根据 Hiroyasu 燃烧模型和 Woschni 传热模型建立高原环境下增压柴油机工作过程模型,对额定功率点缸压曲线的试验值和计算结果进行对比,证明有很好的相关性并在此基础上模拟某型坦克柴油机高原燃烧特性。

5 高原油品的选用

以润滑油为例,研究表明润滑油的寿命主要取决于润滑油被氧化的速度^[33]。一般情况下润滑油的寿命主要取决于以下因素:温度、内燃机的工作状态、低黏度组分^[34]。在不同温度下,润滑油的降解形式是有差别的。250℃以上润滑油发生剧烈的氧化反应和裂解反应,严重时导致黏环现象;100~140℃时,发生中度氧化反应,反应生成的酸性物质以及外界因素引入的腐蚀性物质会加剧润滑油的氧化;50℃以下,润滑油的降解主要源于低温油泥的形成。内燃机的高原工作状态是十分复杂的,主要是高温高负荷的极端情况。高温高负荷的工作状态下,润滑油抗氧化剂降解,储备碱度下降,酸值升高,黏度增加,抗氧化剂降解必然导致内燃机部件

磨损加剧,严重情况下甚至导致拉缸。当前,经济型润滑油的主要配方是采用低黏度组分和减摩剂,因此低黏度组分对润滑油的抗氧化性有着较大影响^[35]。在实际的故障案例中,润滑油除了被氧化外,燃油稀释也是造成失效很重要的原因。燃油经过气缸内高温产生的自由基,会对机油的氧化产生催化作用,加快了机油的氧化速度,同时机油黏度变小,不能形成有效的润滑膜,换油期达不到要求。在机油的选择上,首先应该根据柴油机工作环境温度选择适宜的黏度等级,兼顾低温启动性能与高温抗氧化性能^[36-37]。其次根据高原地区柴油机机械负荷和热负荷大的特点,可以按照柴油机的强化系数选择机油的品质等级。强化系数是反映内燃机热负荷和机械负荷的指标,可用下式计算

$$K = P_e \cdot C_m \cdot Z$$

式中: P_e 为平均有效压力(kPa); C_m 为活塞平均速度(m/s); Z 为冲程系数(四冲程 $Z=0.5$;二冲程 $Z=1.0$)。

当 $K < 50$ 时应选用 CC 级柴油机机油,当 $K = 50 \sim 80$ 时应选用 CD 级柴油机机油,当 $K > 80$ 时应选用 CF-4 级或更高级别的机油^[38-40]。

因此,在高原地区机油的选择上应注意以下几点:① 适宜的低温启动性能。② 优良的黏温性能。③ 耐高温抗氧化性能。④ 较强的清净分散能力。选择合适的黏度等级,经济条件允许的前提下,尽量使用质量等级较高的产品。

6 结论

高原的地理环境气候,对车辆装备的动力和油品都有着特殊的影响。从功率上看,环境对发动机的影响较大,对机油的影响相对来说较小,但又通过影响发动机内部的燃烧状况,间接决定了机油的使用寿命。机油润滑情况的好坏又直接影响到发动机的磨损,对发动机的稳定性和寿命产生影响。车辆装备与油料相互作用,决定着整机效能的发挥。

为了提高发动机的高原适应性,采用了涡轮增压技术、高压共轨燃油喷射技术、高原环境标定技术等措施^[32],但是采用这些措施之后,对油品的选择还采用平原地区的标准是达不到要求的。现代发动机制造技术越来越发达,压缩比越来越大,质量越来越轻,同时采用高原改进措施之后,发动机内部环境温度更高,对油品高温抗氧化性能等提出了更高的要求。在机油的选择上,应该充分考虑高原环境的特殊性,在选择适当粘度等级的前提下,尽量选择品质等级高的产品,避免造成因润滑油提前失效,使发动机产生非正常磨损甚至损坏。

参考文献:

- [1] 靳嵘,张俊跃,胡力峰,等.高原自适应柴油机涡轮增压技术研究[J].内燃机工程,2011,32(4):27-31.
- [2] 宣兆龙.装备环境工程[M].北京:国防工业出版社,2008.
- [3] 刘瑞林,董素荣,许翔,等.柴油机高原环境适应性研究

- [M]. 北京:北京理工大学出版社,2013.
- [4] 刘冰,王宪成. 高原地区车辆柴油机故障分析[J]. 柴油机,2014,36(3):31-32.
- [5] 王军. WD615 系列高原柴油机的开发[D]. 天津:天津大学,2003:2-3.
- [6] 张均享. 装甲车辆发动机高原功率的下降和补偿[J]. 国外坦克,2014(8):42-43.
- [7] TATUR M, LAERMANN M, KOEHLER E, et al. Development of an emission controls concept for an IDI heavy-duty diesel engine meeting 2007 phase-in emission standards [C]//SAE Paper 2007-01-0235. [S.l.]:[s.n.],2007.
- [8] CHAFFIN C A, ULLMAN T L. Effects of increased altitude on heavy-duty diesel engine emissions [C]//SAE Paper 940669. [S.l.]:[s.n.],1994.
- [9] 周广猛,刘瑞林,董素荣,等. 柴油机高原环境适应性综述[J]. 车用发动机,2013,207(4):2-3.
- [10] 董素荣,刘瑞林,许翔,等. 军车柴油机高原性能提升技术[J]. 车辆工程,2013(3):43-45.
- [11] 张志强,何勇灵,韩志强,等. 高原环境对车用柴油机的影响分析及对策[J]. 装备环境工程,2009,6(2):27-28.
- [12] 沈颖刚. 高原环境下内燃机工作过程应用基础研究[D]. 天津:天津大学,2003:3-10.
- [13] 朱玉侠. 6102QA 型柴油机高原增压的研究[J]. 车用发动机,1989(2):30-38.
- [14] 张长岭,刘福水. 高原地区柴油机机油流动损失仿真与试验研究[J]. 兵工学报,2015,36(2):193-194.
- [15] 李晓然,许世海. 高原环境对柴油机性能的影响及解决措施[J]. 内燃机,2014(3):15-16.
- [16] 高荣刚. 高原环境下大功率柴油机燃烧性能分析及功率恢复研究[D]. 北京:北京交通大学,2012:5-6.
- [17] 刘爱斌,邓细波. 高原柴油发动机动力不足的原因分析及对策[J]. 大观周刊,2009,598(38):124.
- [18] 王利贤,王宏儒. 高原发动机燃油供给系统的调整[J]. 建设机械技术与管理,2007(9):93-94.
- [19] 王宪成,郭猛超,张晶,等. 高原环境重型车用柴油机热负荷性能分析[J]. 内燃机工程,2012,33(1):50-52.
- [20] 周广猛,刘瑞林,许翔,等. 高原环境对车辆动力性的影响及动力提升措施[J]. 装备环境工程,2014,11(3):46-47.
- [21] 许翔,刘瑞林,刘刚,等. 大气压力对柴油机冷却系统热平衡影响的研究[J]. 汽车工程,2012,34(7):592-593.
- [22] 孙崎,张云飞. 工程机械用柴油机高原运行性能的研究[J]. 内燃机工程,2001,22(2):34-39.
- [23] 白桦树,张强. 高原寒区柴油动力车辆用油选择[J]. 公路与汽运,2014,162(3):32-33.
- [24] 于衍华. 武器装备与环境适应性论证[M]. 北京:兵器工业出版社,2007.
- [25] 郭猛超,王宪成,胡俊彪,等. 环境对大功率柴油机缸内喷雾、燃烧与传热的影响[J]. 车用发动机,2012,202(5):50-52.
- [26] 刘峰壁. 设备润滑技术基础[M]. 广州:华南理工大学出版社,2012.
- [27] 王宪成,和穆,张晶,等. 高原柴油机气缸套-活塞环磨损计算研究[J]. 润滑与密封,2011,36(1):14-16.
- [28] 李富香,任庆平. 客运柴油发动机在高原环境的换油周期研究[J]. 青海大学学报,2013,31(6):25-27.
- [29] 许翔,刘瑞林,董素荣,等. 车辆高原环境模拟试验技术发展现状综述[J]. 装备环境工程,2012,9(6):63-66.
- [30] 陈渝光,吕红梅,钱微,等. 变海拔环境下的车用柴油机进气压力控制仿真研究[J]. 车用发动机,2010,191(6):64-65.
- [31] 路峰,郭猛超. 特殊环境增压柴油机燃烧特性计算[J]. 机床与液压,2011,23(39):68-67.
- [32] 王宪成,姜力,和穆. 基于燃烧状况的高原大功率柴油机燃油供给系统状态评价[J]. 车用发动机,2012,203(6):52-53.
- [33] 熊云,许世海. 油品应用及管理[M]. 北京:中国石化出版社,2008.
- [34] 史永刚,薛燕,朱永利,等. 内燃机油与喷气燃料的电化学分析[M]. 北京:中国石化出版社,2009.
- [35] 史永刚,冯新沪. 基础油氧化安定性与化学组成关系的研究[J]. 抚顺石油学院学报,1999,19(2):3-5.
- [36] 吴艳波,李彦生. 油品化学及应用[M]. 北京:中国石化出版社,2011.
- [37] 董元虎,尹兴林. 汽车油料选用手册[M]. 北京:化学工业出版社,2007.
- [38] 宋世远,李子存. 油料模拟台架试验[M]. 北京:中国石化出版社,2012.
- [39] 许汉立. 内燃机润滑油产品与应用[M]. 北京:中国石化出版社,2005.
- [40] 郑训. 正确选择柴油机油[J]. 山东交通学院学报,2011,19(4):63-64.

(责任编辑 唐定国)