

环境及其效应

浅析低气压对装备及元器件的影响

赵斌, 郭赞洪, 唐其环, 刘聪

(西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: 总结了低气压对装备及元器件的影响研究情况, 低气压对装备及元器件的影响主要分为五个方面, 低气压对装备及元器件密封性能、散热性能、电性能、力学性能的影响, 进而使得装备及元器件的整体使用效果受到影响, 以及与其他环境因素综合作用对装备及元器件的影响。低气压环境因素降低了装备及元器件的使用效能, 无法发挥应有的效能。研究分析结果将为相关论证、研制、生产、使用部门提供借鉴。

关键词: 低气压; 密封性能; 散热性能; 电性能; 力学性能; 元器件

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2016.05.030

中图分类号: TJ07

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2016)05-0180-07

Effects of the Low Air Pressure Environment on Equipment and Component

ZHAO Bin, GUO Zan-hong, TANG Qi-huan, LIU Cong
(Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: The influence of low pressure on the equipment and components was briefly summarized. The influence of low pressure on the equipment and components was mainly divided into five parts. The low pressure effected the sealing performance, thermal performance, electrical performance and mechanical properties of the equipment or components, and then even affected equipment and components. The effects of the combined effects of the environmental factors and other environmental factors on equipment or components were also studied. The low atmospheric pressure environment factor debased the usage effect of equipment and components, and could not bring into play all effects. The research result will provide reference for the related departments for reasoning, development, production and operation.

KEY WORDS: low air pressure; sealing performance; thermal performance; electrical performance; mechanical properties; component

大气压力直接受海拔高度的变化而变化, 随高度的增加, 大气逐渐变得稀薄, 大气压力逐渐降低。我国海拔超过 3000 m 的占 26%。全世界高海拔地区也占了一定的比例。因此, 我国乃至世界都有大量的军品和民品会在高海拔低气压地区使用, 必然

受到气压降低所带来的影响, 特别是对在高原作战中武器装备使用效能的影响。此外, 在高空作业的航空飞机以及其他航空装备, 由于气压相对标准大气压降低较多, 受到低气压的影响更加严重。因此, 低气压对装备或器件的影响非常重要。

收稿日期: 2016-04-15; 修订日期: 2016-05-24

Received: 2016-04-15; Revised: 2016-05-24

作者简介: 赵斌(1961—), 男, 重庆人, 高级工程师, 主要研究方向为环境试验。

Biography: ZHAO Bin(1961—), Male, from Chongqing, Senior engineer, Research focus: environmental test.

到目前为止,国内外对低气压对军品和民品做了大量的研究,关于低气压试验国内外都形成了相关标准,总结了低气压对装备及元器件的影响^[2-7]。其中,在 GJB 150.2A—2009^[4]给出的低气压环境可能导致军用装备产生下列物理、化学效应:密封垫密封的壳体漏气、漏液体;密封容器变形、破损或破裂;低密度材料的物理和化学性能发生变化;装备因热传导降低而发生过热;润滑剂蒸发;发动机的启动和工作不稳定;真空密封失效;由于电弧或电晕放电造成装备失灵或工作不稳定。

凌宗欣等人^[8]对常用的军用低气压试验方法标准进行了分析,认为 GJB 150 主要是军用装备实验室环境试验方法, GJB 360B 主要是电子及电气元件试验方法, GJB 548B 主要是适用于军用及空间应用的微电子器件。于洋^[9]也对低气压环境对产品的影响和相关低气压的试验标准做了简要叙述。史光梅等人^[10]分析了低气压对军工产品的影响,并比较了 GJB 150.2A—2009 和 HB 5830.14—1996 两个标准的差别。

众多学者^[11-14]对低气压的试验标准和对装备的影响做了一定的研究,总结了低气压对相关产品的影响。宋小燕等人^[11]对低气压的试验标准和试验技术进行了分析,研究分了低气压对装备及元器件产品的各种影响。孙立军等人^[12]研究了高原环境对电工电子产品的影响,介绍了低气压对绝缘介质强度的影响、对电气间隙击穿电压的影响、对电晕及放电电压的影响、对开关电器灭弧性能的影响、对介质冷却的影响以及对密封等结构的影响。赵世宜等人^[13]分析了低气压对军用电工电子产品的影响,介绍了由于低气压导致散热产品的温升增加,使产品外壳变形、密封件破坏,造成密封产品失效,加速挥发性物质的挥发,降低产品电气性能等。刘奎芳等人^[14]也在分析高原环境条件对机电产品的影响中给出了低气压对机电产品的机电影响:内燃机的燃烧恶化、功率显著下降,油耗增加;内燃机冷却系统工作条件恶化;空气压缩机排气温度增高;影响低压电器的分断能力;高压电机电晕起始电压降低。此外,低气压会使高压电瓷外绝缘强度降低;影响蓄电池的使用寿命;对直流电机换向和电刷磨损造成影响。

在前人的工作积累以及 GJB 150.2A—2009 关于低气压试验的标准基础上,文中分别从以下四个方面简述低气压对装备及元器件的影响:对装备及

元器件密封性能的影响;对装备及元器件的散热性能的影响;对装备及元器件电性能的影响;对装备及元器件力学性能的影响。此外,也分析了低气压与其他环境因素共同作用对装备及元器件的影响。

1 对密封性能的影响

低气压对密封产品最直接的影响是压力降低产生的压力差,使得密封产品的内外压力不同,产生压力差,在这个压力作用下会使密封破坏,造成密封产品结构的损坏或密封失效,致使潮湿气体或液体进入产品内部而使设备失效,或者导致气体或液体流出,例如润滑剂流出,致使摩擦力增大,加速仪器的损坏。主要是针对于一些在标准低气压条件下制作的产品,而在低气压环境下使用,可能由于产品内外的压力差致使产品密封破坏。

庚桂平^[15]在《机载设备环境条件与试验方法——低气压(高度)》简介中就介绍了因低气压导致的密封破坏,致使潮湿气体或液体进入。宋钊等人^[16-17]研究了低气压、振动对包装件密封性和连续螺纹盖密封性的影响,分析了塑料软包装袋和连续螺纹盖容器在运输中的受力作用使密封失效,有必要对在高海拔低气压地区运输的包装件进行低气压的试验。

吴艳叶等人^[18]研究了气压变化对充气包装的影响,主要影响有包装袋内外压力差、气压变化对包装材料性能的影响以及对包装内部物品的影响。因此,对包装的密封性有较大的影响。

2 对散热性能的影响

军用或民用的一部分装备及元器件是散热产品,如电机、变压器、计算机主机等,这些产品在使用过程中都要产生热能,会使产品或器件本身的温度升高。此外,由于大气压力降低,空气的导热系数也随之降低,对于以空气或自然对流为主要散热介质的装备或器件,热量难以传递出去,致使产品的温度升高,产生过热现象。因此,散热产品的温升随大气压力的降低而增加,温升与大气压力大致成线性关系,其斜率的大小取决于装置本身结构、散热情况和所在环境温度等因素。

刘宁宁等人^[19]分析讨论了高海拔低气压地区对电子产品绝缘性能和温升的影响,比较了不同气

压条件下对电子产品温升的影响。通过以适配器和显示器为研究对象,研究得出温升随着大气压力的降低而升高,散热越困难。

黄璐^[20]分析了低气压对电子元器件散热性能和电性能的影响,指出低气压对电子元器件的性能有影响,严重时导致电子元器件损坏。梁斌等人^[21]研究了低气压环境对换热器显热换热系数的影响,得出显热换热系数随气压的降低而减小。

赵磊等人^[22]研究了低气压环境对计算机芯片散热性能的影响,经过实验表明,计算机芯片和散热片表面的温度随气压的降低而升高。胡松涛等人^[23]通过实验测试了在低气压和常压条件下电加热器的表面传热系数变化情况,得出气压降低而电加热器表面传热系数也降低,导致电加热器的表面温度升高。赵建民等人^[24]研究了高原高寒环境对工程车辆的影响,指出低气压主要造成柴油燃烧效率降低,从而致使工程车辆的动力性和加速性下降。因此,低气压对于具有散热性能的装备及元器件有着非常重要的影响,严重时会使装备及元器件损坏。

3 对电性能的影响

在标准大气压条件下,空气是较好的绝缘介质,许多电气设备都采用空气作为绝缘介质。当这些装备及元器件用于高海拔低气压地区使用时,由于大气压力降低,导致在电场强度较强的电极附近产生局部放电现象,严重时会发生空气间隙击穿,使得设备不能正常工作,或者使空气介质灭弧的开关电器灭弧性能降低。因此,低气压环境对电工电子产品的电气性能也会产生影响,特别是以空气作为绝缘介质的设备,低气压对其影响更明显。

刘宁宁等人^[19]分析讨论了高海拔低气压地区对电气间隙击穿电压的影响,得出大气压力降低,绝缘材料的击穿电压越容易发生,同时给出了不同气压下击穿电压的修正值以及不同气压条件下电气间隙的修正值。曹寅等人^[25]研究了高海拔地区低气压对电子产品间隙击穿电压的影响,并在低气压试验箱及高海拔地区进行了试验验证。徐健等人^[26]在研究低气压环境对大功率滤波器设计的影响中给出“在低气压环境下滤波器极易打火,且一旦打火,滤波器不能正常工作,严重时烧毁相关部件”。

司马文霞等人^[27]研究了气压对放电脉冲的影

响,得出大气压力的降低导致覆冰空气间隙起晕,电压呈幂函数或指数函数降低。葛景滂、田志海等人^[28—29]研究了低气压环境下聚合物绝缘材料内部放电能量特性,得出低气压使得绝缘材料内部放电更加容易发生,使得在消耗相同的放电量下产生了更多的电荷,加剧了绝缘材料的老化,危害性增大。

关志成等人^[30]研究了低气压条件下绝缘子的污闪电压,研究得出,气压越低,对污闪电压的影响越明显,且对直流电压下的影响小于交流电压下的影响。张志劲等人^[31]研究了低气压条件绝缘子直流电压下的污闪放电情况,揭示了低气压环境下造成局部电弧发展为飘弧现象的主要原因是由低气压造成的静电力和热浮力的变化差异。王向朋等人^[32]研究了高海拔特高压直流绝缘子的污闪特性,研究得出随着海拔高度的升高,污秽绝缘子的闪络电压会有规律地降低。

4 低气压对装备力学性能的影响

大气压力的降低会影响装备力学性能,例如压力降低会使润滑油(或润滑脂)加速挥发,造成部件之间磨擦加剧,使活动部件的表面加快磨损;或者油耗增加,效率降低;还有直接影响发动机轴承问题和降低发动机的功率等。

魏伟等人^[33]研究了高原低气压对列车制动能力的影响,分别对不同长短的列车进行研究,得出气压的变化主要影响制动缸平衡压力,进而影响列车制动能力,同时,低气压环境下,列车紧急制动距离缩短。

刘瑞林等人^[34—36]研究了高海拔低气压对涡轮增压柴油机的影响,研究得出,随着气压的降低,涡轮增压柴油机的动力性和经济性都有影响。随着气压的降低,燃油消耗率逐渐增加,对于转速高的影响较小,对于转速低的影响较大。此外,陈贵升^[37]、申立中^[38]、郭猛超^[39]等人也分别探讨了高海拔低气压环境下对柴油机的影响,都指出随着气压的降低,柴油机的整体动力性能下降。

冯凯等人^[40—41]研究了低气压对发动机轴承性能的影响,得出了随着环境气压的降低,发动机的主轴承和连杆大端轴承载荷减小;在低气压环境下,发动机转速与轴承的工作稳定性成反比。此外,在研究沙尘和低气压共同作用于发动机轴承时,会加重发动机的工作不稳定性。

5 低气压与其他环境因素的综合影响

对于装备及元器件所处的环境,是各种环境因素共同作用而成。低气压环境主要在高海拔地区或是高空地区,在这些地区,除了低气压较为明显,还有相应的低温、太阳辐射强等。因此,低气压往往是与其他环境因素共同作用的。

赵世宜等人^[13]介绍了低气压与低温、高温的共同作用对装备及元器件的影响,低温可以减小由于低气压引起的温升升高和补偿由于低气压造成的液体沸点降低,同时,低温可能导致液体冻结、材料收缩、变脆,使产品损坏的危险性增加;也会使燃烧速率降低。高温和低气压共同作用会加速液体和润滑油的挥发,降低空气热传导,使温升升高或产品过热,加速塑料产品的老化,使电晕起始电压和击穿电压明显降低,使表面放电或电晕放电的危险性增加。

冯凯等人^[40]研究了沙尘和低气压共同作用下对发动机轴承性能的影响,得出了在低气压环境下,发动机转速与轴承的工作稳定性成反比。沙尘和低气压共同作用于发动机轴承时,会使发动机的工作更加不稳定^[41]。

宋钊等人^[16-17]研究了低气压和振动共同作用时对包装件密封性和连续螺纹盖密封性的影响,得出在低气压和振动同时对包装和连续螺纹盖容器的密封性作用时,会加快包装件破损以及使连续螺纹盖产生缝隙,致使密封失效。

赵建民等人^[24]研究了高原高寒环境对工程车辆的影响,指出低气压同温度、日照时数、温度差等环境因素共同影响工程车辆,致使工程车辆的整体性能下降,特别是对发动机的影响严重。宣卫芳等人^[42]研究了高分子塑料材料在拉萨、海南、重庆、敦煌和漠河地区的老化程度,对比分析得知,在拉萨试验的高分子试验老化程度大于其他地区,主要是由于拉萨地处高原高寒地带,低气压、低温等加速了高分子材料的老化。高强、庞志斌等人^[43]研究得出低气压与其他环境因素对武器装备的性能、电子设备、机动能力、维修保养等方面产生了较大的影响,降低了武器装备的整体作战能力。此外庞志斌等人^[44]从理论上进行了提高武器装备环境适应性对策研究,使得武器装备发挥其应有的作战效能。俞一鸣等人^[45]研究了高原环境对防空武器的影响,指出低气压、低温以及其他环境因素造成车辆

发动机过热、功率下降等,当气压每下降12%时,车辆发动机功率下降1%~7%;雷达设备容易产生电晕甚至放电现象,当气压每下降12%时,雷达设备电晕电压下降8%~12%。周广猛等人^[46]研究了高原低气压环境对车辆动力性的影响及动力提升措施,指出了高原低气压环境对车辆的有效热效率、循环喷油量、滚动阻力系数、空气密度对空气阻力的影响等,进而影响车辆的整体性能。

综上所述,在低气压环境中除了低气压对装备及元器件主要的影响以外,往往会同其他环境因素共同作用影响,在高海拔或高空地区,低气压往往同低温、太阳辐射等共同作用,在沙漠环境中与沙尘共同影响。

6 结语

对于电工电子类产品,产品生产时产品内部的绝缘性材料在低气压环境下绝缘性能下降,会导致电泄露、电击穿。对于具有散热性的产品,在低气压环境空气的导热系数下降,致使温升升高,散热困难。对于密封性能的产品,在气压较高的地方生产,而在气压较低的环境下使用,就会产生气压差,对产品造成一个气压力冲击,此外对于内部具有液态物质的,容易致使液态流失。因此,对于在低气压环境中使用的装备及元器件,应该在产品制造生产时考虑这些关键因素,避免装备及元器件在低气压环境中使用出现问题。低气压往往不是单因素影响装备及元器件,加强研究低气压与其他环境因素共同对装备及元器件的影响;同时也希望随着低气压试验的进一步研究,继续完善低气压对各类产品的影响情况。

参考文献:

- [1] 孙健. 基于大气压力的高度测量模型研究[J]. 科学与生活, 2009(1): 62.
SUN Jian. Research on Model of Altitude Measurement Based on Atmospheric Pressure[J]. Science and Life, 2009(1): 62.
- [2] MIL-STD-202F—1998, 电子及电气元件试验方法[S].
MIL-STD-202F—1998, Test Methods for Electronic and Electrical Components[S].
- [3] MIL-STD-883D—2005, 微电子器件试验方法和程序[S].
MIL-STD-883D—2005, Microelectronic Device test Method and Program[S].

- [4] GJB 150A, 军用装备实验室环境试验方法[S].
GJB 150A, Laboratory Environmental test Methods for Military Equipment[S].
- [5] GJB 360B—2009, 电子及电气元件试验方法[S].
GJB 360B—2009, Test Methods for Electronic and Electrical Components[S].
- [6] GJB 548B—2005, 微电子器件试验方法和程序[S].
GJB 548B—2005, Microelectronic Device Test Method and Program[S].
- [7] GB2421—1989, 电工电子产品基本环境试验规程总则[S].
GB2421—1989, Basic Environmental Testing Procedures for Electric and Electronic Products[S].
- [8] 凌宗欣, 黄菊芹. 常用低气压试验方法的标准依据的解析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2015, 33(1): 54—56.
NING Zong-xin, HUANG Ju-qin. Analysis of Standard Basis of Commonly used Low Pressure Test Method[J]. Reliability and Environmental Testing of Electronic Products, 2015, 33(1): 54—56.
- [9] 于洋. 简谈低气压环境对产品的影响及低气压试验方法标准的应用[J]. 环境技术, 1999, 17(4): 24—25.
YU Yang. A Brief Discussion on the Influence of Low Pressure Environment on Products and the Application of Low Pressure Test Method Standard[J]. Environmental Technology, 1999, 17(4): 24—25.
- [10] 史光梅, 王易君, 罗群生, 等. 浅析我国军工产品低气压(高度)试验方法标准[J]. 装备环境工程, 2013, 10(1): 91—94.
SHI Guang-mei, WANG Yi-jun, LUO Qun-sheng, et al. Standard Test Method for Low Pressure (altitude) of Military Products in China[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(1): 9—94.
- [11] 宋小燕, 翟波. 低气压试验标准及试验技术分析[J]. 环境技术, 2014(6): 94—97.
SONG Xiao-yan, ZHAI Bo. Analysis of Low Pressure Test Standard and Test Technology[J]. Environmental Technology, 2014(6): 94—97.
- [12] 孙立军, 蔡汝山. 高原环境对电工电子产品的影响及防护[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2010, 28(4): 15—18.
SUN Li-jun, CAI Ru-shan. Influence of Plateau Environment on Electrical and Electronic Products and Protection[J]. Reliability and Environmental Testing of Electronic Products, 2010, 28(4): 15—18.
- [13] 赵世宜, 胡立成, 吴娟, 等. 低气压环境对军用电工电子产品的影响[J]. 装备环境工程, 2009, 6(5): 100—102.
ZHAO Shi-yi, HU Li-cheng, WU Juan, et al. Influence of Low Pressure Environment on Military Electrical and Electronic Products[J]. Equipment Environmental Engineering, 2009, 6(5): 100—102.
- [14] 刘奎芳, 毛海荣. 高原环境条件及其对机电产品的影响[J]. 环境技术, 1999(5): 18—22.
LIU Kui-fang, MAO Hai-rong. Environmental Conditions of High Altitude and Its Influence on Mechanical and Electrical Products[J]. Environmental Technology, 1999 (5): 18—22.
- [15] 庚桂平. HB 5830.14—96《机载设备环境条件与试验方法低气压(高度)》简介[J]. 航空标准化与质量, 1997(3): 16—18.
GENG Gui-ping. HB 5830.14—96 “Airborne Equipment Environmental Conditions and Test Methods of Low Pressure (altitude)” Profile[J]. Aviation Standardization and Quality, 1997(3): 16—18.
- [16] 宋钊, 郑全成. 低气压、振动对包装件密封性的影响[J]. 中国包装, 2013(11): 46—49.
SONG Zhao, ZHENG Quan-cheng. The Effect of Low Pressure and Vibration on The Sealing Performance of The Package[J]. China Packaging, 2013(11): 46—49.
- [17] 宋钊. 低气压和振动对连续螺纹盖密封性的影响[J]. 中国包装工业, 2013(16): 90—91.
SONG Zhao. Effects of Low Pressure and Vibration on The Sealing Performance of Continuous Thread Cap[J]. China Packaging Industry, 2013(16): 90—91.
- [18] 吴艳叶, 王小芳. 气压变化对充气包装影响分析[J]. 包装工程, 2007(1): 114—115.
WU Yan-ye, WANG Xiao-fang. Influence of Air Pressure on Change Packaging[J]. Packaging Engineering, 2007 (1): 114—115.
- [19] 刘宁宁, 李正. 海拔 2000 m 以上的低气压条件对电子产品安全性能的影响[J]. 安全与电磁兼容, 2008 (1): 77—79.
LIU Ning-ning, LI Zheng. Effects of Low Pressure Conditions Above Sea Level 2000m on the Safety Performance of Electronic Products[J]. Safety and Electromagnetic Compatibility, 2008(1): 77—79.
- [20] 黄璐. 低气压环境下的电子元器件可靠性[J]. 电子世界, 2013(15): 98.
HUANG Lu. Reliability of Electronic Components in Low Pressure Environment[J]. Electronic World, 2013 (15): 98.
- [21] 梁斌, 刘国丹, 胡松涛. 低气压环境对管翅式换热器换热能力影响的实验研究[J]. 山东暖通空调, 2007(2): 208—513.
LIANG Bin, LIU Guo-dan, HU Song-tao. Experimental Study on The Influence of Low Pressure Environment on The Heat Transfer Capability of Tube Fin Heat Exchanger [J]. Shandong Heating and Ventilating Air Conditioning, 2007(2): 208—513.
- [22] 赵磊, 刘叶弟, 臧建彬, 等. 低气压下计算机显卡芯片温升特性的试验研究[J]. 内燃机车, 2007(10): 5—8.
ZHAO Lei, LIU Ye-di, ZANG Jian-bin, et al. Experimental Study on The Temperature Rise Characteristic of Computer Graphics Chip under Low Pressure[J]. Internal Combustion Engine, 2007(10): 5—8.
- [23] 胡松涛, 朱春, 王东. 低气压条件下电加热器自然对流换热性能测试[J]. 暖通空调, 2006, 36(3): 22—25.
HU Song-tao, ZHU Chun, WANG Dong. Natural Convection Heat Transfer Performance Test of Electric Heater under Low Pressure Condition[J]. HVAC, 2006, 36(3):

- 22—25.
- [24] 赵建民, 赵永旺, 朱军. 高原高寒环境对工程车辆的影响及应对措施[C]// 中国工程机械工业协会施工机械化新技术交流会论文集. 福州: 中国工程机械工业协会, 2009: 212—214.
- ZHAO Jian-min, ZHAO Yong-wang, ZHU Jun. Influence of Plateau Cold Environment on Engineering Vehicles and Countermeasures[C]// China Construction Machinery Industry Association Construction Machinery Association new Technical Exchang Meeting. Fuzhou: China Construction Machinery Association, 2009: 212—214.
- [25] 曹寅, 孙建民, 谢磊雷. 高海拔地区对电子产品的使用安全性影响分析[J]. 质量与标准化, 2008(12): 31—35.
- CAO Yin, SUN Jian-min, XIE Lei-lei. Analysis of Safety Performance of Electronic Products in High Altitude Area[J]. Quality and Standardization, 2008(12): 31—35.
- [26] 徐健, 卫明. 高空低气压环境下大功率滤波器设计[J]. 通信对抗, 2014, 33(4): 50—52.
- XU Jian, WEI Ming. Design of High Power Filter in High Altitude and Low Pressure Environment[J]. Communication Countermeasure, 2014, 33(4): 50—52.
- [27] 司马文霞, 冯杰, 杨庆, 等. 低气压下直流正极性冰电极电晕特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(27): 13—18.
- SI MA Wen-xia, FENG Jie, YANG Qing, et al. Corona Characteristics of DC Positive Electrode under low Pressure, 2007, 27(27): 13—18.
- [28] 葛景滂, 田志海, 程锡圭. 内部气隙在低气压下局部放电的电脉冲频谱分析[J]. 电气应用, 1991(5): 7—9.
- GE Jing-pang, TIAN Zhi-hai, CHENG Qi-gui. Frequency Spectrum Analysis of Partial Discharge of Internal Air Gap at Low Pressure[J]. Electrical Applications, 1991(5): 7—9.
- [29] 田志海, 葛景滂, 程锡圭. 低气压下聚合物绝缘材料内部局部放电能量特性的研究[J]. 绝缘材料通讯, 1992(2): 1—4.
- TIAN Zhi-hai, GE Jing-pang, CHENG Qi-gui. Study on Energy Characteristics of Partial Discharge in Polymer Insulation Material under Low pressure[J]. Insulation Material Communication, 1992(2): 1—4.
- [30] 关志成, 张仁豫, 黄超峰. 低气压条件下绝缘子污闪特性的研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1995, 35(1): 17—24.
- GUAN Zhi-cheng, ZHANG Ren-yu, HUANG Chao-feng. Study on Pollution Flashover Performance of Insulators under Low Atmospheric Pressure[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 1995, 35(1): 17—24.
- [31] 张志劲, 蒋兴良, 孙才新, 等. 低气压下绝缘子串直流污闪放电模型及验证[J]. 高电压技术, 2010, 36(9): 2126—2131.
- ZHANG Zhi-jin, JIANG Xing-liang, SUN Cai-xin, et al. Model and Verification of DC Pollution Flashover of Insulator Strings under Low Air Pressure[J]. High Voltage Technology, 2010, 36(9): 2126—2131.
- [32] 王向朋, 周军, 王黎明, 等. 高海拔下特高压直流绝缘子的污闪特性[J]. 高电压技术, 2008, 34(9): 1869—1874.
- WANG Xiang-peng, ZHOU Jun, WANG Li-ming, et al. Pollution Flash over Performance of UHV DC Insulators at High Altitude[J]. High Voltage Technology, 2008, 34(9): 1869—1874.
- [33] 魏伟, 王培强. 高原低气压环境下列车制动能力预测[J]. 铁道车辆, 2005, 43(12): 8—12.
- WEI Wei, WANG Pei-qiang. Prediction of Train Braking Capacity in Plateau Low Pressure Environment[J]. Railway Vehicles, 2005, 43(12): 8—12.
- [34] 刘瑞林, 刘宏威. 内燃机高海拔(低气压) 模拟试验台研制[J]. 军事交通学院学报, 2003, 5(1): 43—46.
- LIU Rui-lin, LIU Hong-wei. Development of Gao Haiba (Low Pressure) Simulation Test Bench for Internal Combustion Engine[J]. Journal of Military Transportation College, 2003, 5(1): 43—46.
- [35] 刘瑞林, 刘宏威, 秦德. 涡轮增压柴油机高海拔(低气压) 性能试验研究[J]. 内燃机学报, 2003, 21(3): 213—216.
- LIU Rui-lin, LIU Hong-wei, QIN De. Experimental Study on Gao Haiba (Low Pressure) Performance of Turbocharged Diesel Engine[J]. Transactions of CSICE, 2003, 21(3): 213—216.
- [36] 刘瑞林, 孙武全, 岳新莉, 等. 不同海拔高度硅油离合器对发动机性能的影响研究[J]. 内燃机学报, 2004, 22(6): 510—513.
- LIU Rui-lin, SUN Wu-quan, YUE Xin-li, et al. Influence of Silicon-Oil Fan Clutch at Different High Altitudes on Engine Performance[J]. Transactions of CSICE, 2004, 22(6): 510—513.
- [37] 陈贵升, 沈颖刚, 兰阳, 等. 不同大气压条件下直喷式柴油机的性能研究[J]. 拖拉机与农用运输车, 2009, 36(1): 82—84.
- CHEN Gui-sheng, SHEN Yin-gang, LAN Yang, et al. Study on Performance of DI Diesel Engine at Different Atmospheric Pressure[J]. Tractor & Farm Transporter, 2009, 36(1): 82—84.
- [38] 申立中, 沈颖刚, 毕玉华, 等. 不同海拔高度下自然吸气和增压柴油机的燃烧过程[J]. 内燃机学报, 2002, 20(1): 49—52.
- SHEN Li-zhong, SHEN Ying-gang, BI Yu-hua, et al. Combustion Process of Naturally Aspirated and Supercharged Diesel Engines at Regions with Different Altitude[J]. Transactions of CSICE, 2002, 20(1): 49—52.
- [39] 郭猛超, 王宪成, 常强. 大气环境对增压柴油机缸内燃烧特性的影响[J]. 柴油机, 2011, 33(1): 9—13.
- GUO Meng-cai, WANG Xian-cheng, CHANG Qiang. Combustion Characteristics of Turbocharged Diesel in Different Atmosphere Environment[J]. Diesel Engine, 2011, 33(1): 9—13.
- [40] 冯凯, 张优云. 低气压对发动机轴承性能的影响[J]. 润滑与密封, 2007, 32(3): 12—17.
- FENG Kai, ZHANG You-yun. Effect of Low Pressure on

- The Performance of Engine Bearing[J]. Lubrication and Seal, 2007, 32(3): 12—17.
- [41] 冯凯, 张优云, 朱永生. 沙尘和低气压对发动机轴承性能的耦合影响[J]. 润滑与密封, 2007, 32(4): 72—75.
FENG Kai, ZHANG You-yun, ZHU Yong-sheng. Coupling Effect of Sand Dust and Low Pressure on the Performance of Engine Bearing[J]. Lubrication and Seal, 2007, 32(4): 72—75.
- [42] 宣卫芳, 王一临, 胥泽奇. 弹药塑料包装材料自然环境老化现象研究[J]. 装备环境工程, 2006, 3(5): 26—30.
XUAN Wei-fang, WANG Yi-lin, XU Ze-qi. Study of Natural Weathering of Plastics Used in Ammunition Packaging[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(5): 26—30.
- [43] 高强, 庞志兵, 魏赫. 高原高寒环境对武器装备的影响[J]. 装备环境工程, 2013, 10(6): 118—122.
GAO Qiang, PANG Zhi-bing, WEI He. Performance of Weapon Equipment Influenced by Plateau and High Cold Environment and Its Study[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(6): 118—122.
- [44] 庞志兵, 高强, 魏赫. 提高武器装备环境适应性对策研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(1): 68—71.
PANG Zhi-bing, GAO Qiang, WEI He. Research on Environment Adaptive Countermeasures for Weapons and Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(1): 68—71.
- [45] 俞一鸣, 赵广彤. 高原环境对防空武器的影响及改进措施[J]. 现代防御技术, 2011, 39(2): 172—175.
YU Yi-ming, ZHAO Guang-tong. Performance of Anti-aircraft Weapon Equipment Influenced by Plateau Environment and its Improvement Measures[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 39(2): 172—175.
- [46] 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): 45—51.
ZHOU Guang-meng, LIU Rui-lin, XU Xiang, et al. Effects of Plateau Environment on Power Performance of Vehicles and Measures to Improve Power Performance in Plateau[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(3): 45—51.