

船舶及海洋工程装备

船用铅酸蓄电池低温环境下的 适应性试验研究

杨宗豫¹, 王迎晖¹, 路慧杰², 王探靖¹

(1.中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082; 2.北京航空航天大学, 北京 100191)

摘要: **目的** 验证某船用铅酸蓄电池在低温环境下的功能特性, 探讨低温环境因素与铅酸蓄电池功能丧失、性能下降的关系。**方法** 基于环境模拟试验, 分析在-30~0 °C固定温度量值下铅酸蓄电池的低温贮存、低温放电特性规律。**结果** 贮存试验结果表明, 随温度降低, 蓄电池内阻升高、启动电流降低, 至-30 °C时, 蓄电池启动电流已降至冷启动电流值280 A。放电试验结果表明, 放电温度越低, 电压下降速率越高, 其放电曲线呈现初期速降-略有回升-缓慢下降-接近截止电压后期快速降低的态势。**结论** 低温引起的电解质黏度增大、浓度降低、内阻增加, 影响到铅酸蓄电池的贮存及放电性能, 铅酸蓄电池的低温适应及使用能力大幅下降。

关键词: 船用设备; 铅酸蓄电池; 环境适应性; 低温贮存; 低温放电; 启动电流

中图分类号: TM912.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2025)04-0099-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.04.013

Experimental Study on the Adaptability of Marine Lead-acid Batteries in Low-temperature Environment

YANG Zongyu¹, WANG Yinghui¹, LU Huijie², WANG Tanjing¹

(1. China Ship Scientific Research Center, Jiangsu Wuxi 214082, China; 2. Beihang University, Beijing 100191, China)

ABSTRACT: The work aims to verify the functional performance of lead-acid batteries in the low-temperature environment of the polar region and investigate the relationship between the low-temperature environmental factors and the loss of function and performance degradation of lead-acid batteries. Based on the environmental simulation test, the low-temperature storage and low-temperature discharge characteristics of lead-acid batteries were analyzed under the fixed temperature values from -30 °C to 0 °C. In the storage test, as the temperature decreased, the internal resistance of the battery increased and the starting current decreased, and the changes of internal resistance and starting current had a tendency to accelerate. By -30 °C, the starting current of the battery had dropped to the cold cranking ampere value of 280 A. In the low-temperature discharge tests, as the temperature decreased, the voltage rate drop went higher. The discharge curve showed a tendency of rapid decline in the initial stage-slight rebound-slow decline-steep decline towards the late cut-off voltage. The low temperature induces the increase in electrolyte viscosity, decrease in concentration, and increase in internal resistance, which affects the storage and discharge performance of lead-acid batteries. As a result, the low-temperature adaptability and usage ability of lead-acid batteries are signifi-

收稿日期: 2025-02-20; 修订日期: 2025-03-20

Received: 2025-02-20; Revised: 2025-03-20

基金项目: 水动力学全国重点实验室基金

Fund: National key laboratory of hydrodynamics

引文格式: 杨宗豫, 王迎晖, 路慧杰, 等. 船用铅酸蓄电池低温环境下的适应性试验研究[J]. 装备环境工程, 2025, 22(4): 99-105.

YANG Zongyu, WANG Yinghui, LU Huijie, et al. Experimental Study on the Adaptability of Marine Lead-acid Batteries in Low-temperature Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(4): 99-105.

cantly reduced.

KEY WORDS: marine equipment; lead-acid battery; environmental adaptability; low-temperature storage; low-temperature discharge; starting current

电子设备作为船舶平台感知和控制功能的核心,在低温、浮冰、高纬度等恶劣的极端环境下,极易发生冷收缩、脆化、短路、航行信号缺失或不稳等失效现象^[1-4]。蓄电池作为一种广泛应用的电子储能、蓄能装置,是船用电子设备的重要组成部分。针对蓄电池在低温环境下的工作特性开展测试验证,可为船用电子设备低温适应性研究提供重要的技术支持。

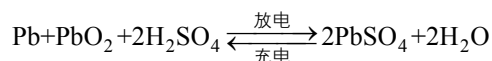
普通铅酸蓄电池在低温下会出现电解液低温黏度增大,充电、放电能力降低,电池容量下降等情形。Bauknecht 等^[5]测试了 2 块铅酸蓄电池在不同温度下的容量和不同低温下的冷启动能力,结果证实,铅酸蓄电池在 0、-10、-18 °C 下通过考核测试,而在 -30 °C 下蓄电池已不能正常工作。项孙建等^[6]进行了铅酸蓄电池低温环境满电状态下的放电试验,试验结果表明,蓄电池低温放电后内阻升高 2~3 倍,放电容量不足原始的 1/3。郑昆等^[7]针对军用车辆使用的铅酸蓄电池,探究了低温 -40 °C 的环境下的放电容量情况。在该温度下,电池放电容量仅达到额定容量的 11.11%,测试前后蓄电池内阻的增加和质量降低明显。太原理工大学窦银科教授团队通过低温实验装置模拟南极低温环境,对铅酸蓄电池在不同的低温环境下进行了放电实验^[8-10]。结果表明,随环境温度的降低,铅酸蓄电池的容量会随之减小,在 -10、-20、-30 °C 以 7.5 A 电流放电,放出的电量分别占常温下

的 80%、64.1%、46%。

本文将开展环境模拟试验,分析在 -30~0 °C 固定温度量值下铅酸蓄电池的低温贮存、低温放电特性,探究可能发生的失效机理,以及低温环境对铅酸蓄电池性能参数的影响,为低温下船用铅酸蓄电池的选型、考核、验证提供有效的试验方法参考。

1 试验对象与测量仪器

铅酸蓄电池的正极使用的是 PbO_2 , 负极使用的是 Pb , 电解质是稀 H_2SO_4 。当铅酸蓄电池进行放电反应时,阴极板上的 Pb 、阳极板上的 PbO_2 与在阴阳极板四周的稀 H_2SO_4 产生化学反应,该过程会消耗稀 H_2SO_4 , 同时生成化合物 PbSO_4 和 H_2O 。经过放电行为,电解液中的 H_2SO_4 从电解液中逐渐被消耗,蓄电池放电时间越长,电解液中的 H_2SO_4 浓度就会越低^[11-12]。



本研究选择的是风帆品牌的某型号铅酸蓄电池,蓄电池外形尺寸为 197 mm×129 mm×203 mm,额定电压为 12 V,冷启动电流为 280 CCA,电池容量为 36 A·h,该型蓄电池可在寒冷的气候下仍保持强劲的启动性能。开展试验选择的是同型号的 4 个产品,被试品具体说明见表 1。

表 1 铅酸蓄电池被试品说明
Tab.1 Description of lead-acid battery specimen

序号	名称	标识码	编号	试验内容
1	铅酸蓄电池	3C031604347S	1#	低温贮存、常温及 0 °C 定时恒流放电、-20 °C 恒流放电
2	铅酸蓄电池	3C03160439LD	2#	低温贮存、-10 °C 定时恒流放电
3	铅酸蓄电池	3C031604374P	3#	低温贮存、-20 °C 定时恒流放电、-10 °C 恒流放电
4	铅酸蓄电池	3C0316043978	4#	低温贮存、-30 °C 定时恒流放电、-30 °C 恒流放电

试验在高低温试验箱中进行,试验箱可控温度范围为 -60~100 °C。采用艾德克斯 IT8513C 型电子负载对铅酸蓄电池进行放电。主要试验设备及仪器如图 1、表 2 所示。

2 试验方法

本文参考 GJB 150.4A—2009《军用装备实验室环境试验方法第 4 部分:低温试验》^[13]、CB 1146—1985《舰船设备环境试验方法》^[14]、GB/T 5008.1—2023《起动用铅酸蓄电池第 1 部分:技术条件和试验方法》^[15]以及其他标准规范要求^[16-17],确定了铅酸蓄电池低温贮存、低温放电的试验方法。



图 1 试验对象及测试设备
Fig.1 Test objects and test equipment

蓄电池的容量特性、内阻数值是反映电池基本性能的重要特性指标。其中,启动电流是衡量电池启动

表 2 试验设备及仪器清单
Tab.2 List of test equipment and instruments

序号	名称	型号	性能参数	备注
1	高低温试验箱	Q1D800-JB	-60~100 ℃	用于产生规定的低温条件
2	蓄电池充电器	C90pro	12~24 V，3~200 A·h	用于铅酸蓄电池充电
3	电子负载	IT8513C	恒压、恒电流、恒功率	用于铅酸蓄电池放电
4	电池测试仪	专用	可测试容量、内阻、电流	专用测试仪器

能力的关键参数之一；放电内阻常用以评价蓄电池性能的变化；电池容量是一项评价电池健康状态及供电可靠性及的重要指标^[18-19]。因此，本试验考核功能性指标涵盖启动电流、电池容量、电池内阻、电池电压，具体检测内容见表 3。

表 3 铅酸蓄电池功能性能检测表
Tab.3 Functional performance test sheet of lead-acid battery
检测时机：□试验前 □试验中 □试验后

序号	检测项目	检测内容	检测结果
1	启动电流	≥280 A	
2	电池容量 (试验中)	记录电池经历 低温后剩余电量	
3	电池内阻	记录内阻值 (与试验前对比)	
4	电池电压	记录电压值	

铅酸蓄电池低温贮存试验是将 4 个被试品一同放入试验箱中，其具体试验步骤见表 4。低温放电试验是将铅酸蓄电池在常温下充满电，在重复低温贮存试验步骤的基础上，根据设置的不同温度点，将被试品逐一投入试验。研究共进行了 2 类低温放电试验，一是当达到规定的 2 h 暴露持续时间后，以 2 A 恒定电流放电 1 h，再进行相应的功能/性能检测。另一种是当达到规定的 2 h 暴露持续时间后，以 10 A 恒定电流放电直至电压达到截止电压 10.8 V，过程中监测放电电压变化，试后再进行相应的功能/性能检测^[20]。

3 结果与分析

3.1 低温贮存试验结果分析

将 4 个被试品放置在试验箱内的指定位置，被试品主体部分完全暴露于周围环境，布置位置如图 2 所示。1#~4#铅酸蓄电池电量均保持初始值 100%。在试验过程中，4 个试件在各温度下，电压变化极小，均值约 12.8 V，最大变化量不超过 0.06 V。启动电流和内阻的量值随温度变化显著，见表 5。

在常温（15.3 ℃）下，1#~4#铅酸蓄电池初始启动电流分别为 370、395、390、385 A，内阻分别为 8.00、7.54、7.63、7.73 mΩ。随试验温度的下降，铅

表 4 铅酸蓄电池低温贮存试验方法
Tab.4 Test method of low-temperature storage of lead-acid batteries

试验顺序	试验内容
1	在试验的标准大气条件下，将充电 100%的铅酸蓄电池放置于试验箱内的指定位置
2	试验箱开机，设定试验温度为 25 ℃，待设备到达设定值后，使用专用测试工具对铅酸蓄电池指标进行测试，并按照功能性能表要求记录相关数据
3	完成步骤 2 规定的试验内容后，以不超过 3 ℃/min 的速率将试验箱温度调节至 0 ℃，被试品在非工作状态下达到温度稳定后再保持 2 h，然后对被试品进行检测，并按功能性能表的要求记录相关数据
4	按照步骤 3 的方法，分别对-10、-20、-30 ℃这 3 个试验条件进行试验
5	检测结束后，以不超过 3 ℃/min 的速率将试验箱温度调节至 25 ℃，被试品在该温度下使其达到温度稳定
6	恢复处理结束后，在试验的标准大气条件下，按附表的要求对被试品进行外观检查和功能/性能检测，记录检测结果



图 2 铅酸蓄电池整体布置及试前检查
Fig.2 Overall arrangement and pre-test inspection of lead-acid battery

酸蓄电池 1#~4#虽存在个体差异，但启动电流和内阻随温度的变化趋势一致，即温度越低，启动电流越小，

表 5 铅酸蓄电池 1#~4#启动电流和内阻的变化情况
Tab.5 Changes in starting current and internal resistance of lead-acid batteries 1#~4#

检测条 件/℃	启动电流/A				内阻/mΩ			
	1#	2#	3#	4#	1#	2#	3#	4#
15.3	370	395	390	385	8.00	7.54	7.63	7.73
0	360	385	380	375	8.22	7.77	7.83	7.93
-10.0	340	360	355	350	8.78	8.26	8.34	8.45
-20.0	305	330	325	320	9.72	9.09	9.22	9.27
-30.0	260	280	275	280	11.43	10.63	10.88	10.69
恢复 常温后	370	395	385	375	8.00	7.54	7.70	7.93

内阻越大。当试验温度低于 0℃ 时,启动电流的降低速率以及内阻的增长速率均呈现变大的趋势,例如 2# 铅酸蓄电池启动电流的降低速率由 1.5 A/℃ (0~10℃) 增至 5 A/℃ (-20~-30℃),内阻的增长速率由 0.049 mΩ/℃ (0~10℃) 增至 0.154 mΩ/℃ (-20~-30℃)。直至温度到达-30℃,所有电池的启动电流已降至冷启动电流 280 A,启动电流较常温降低约 29%,内阻升高约 41%,严重制约了蓄电池供电能力。从蓄电池工作原理角度,可解释上述现象,这是因为低温环境下铅酸蓄电池电解质由于低温黏度增大、离子迁移速率及电化学反应速率缓慢,使得正负极板硫化严重,进而使得电池内阻增大,内阻的增大又导致启动电流减小^[21-22]。在低温贮存试验中,蓄电池电量和电压的变化幅度极小,表明低温对这 2 个参数的影响较小,而低温下电解液的变化是影响铅酸蓄电池启动电流和内阻的主要因素。

试验结束后,将蓄电池在常温环境下放置 1 d,使其整体温度完全恢复至常温。试后第二天进行了蓄电池的试后检测,发现蓄电池的启动电流基本能恢复到试前的水平,但部分蓄电池启动电流减小了 5~10 A。内阻基本能恢复到试验前的水平,即使略有增大,增加量也很小。

3.2 低温定时恒流放电试验结果分析

将被试品逐一放置在试验箱内的指定位置,被试品主体部分完全暴露于周围环境,被试品安装图及试验前外观如图 3 所示。与低温贮存试验不同,低温放电试验重点关注蓄电池放电容量和放电后电压降低情况,启动电流以及内阻的变化趋势不再重复分析。

从不同温度放电后电量和电压的降低值(表 6)可以看出,在常温下,1#蓄电池以 2 A 恒定电流满电放电 1 h,电池放电消耗 90% 的容量,电压降低 0.29 V。4#蓄电池在-30℃ 温度以同样电流、时间放电,电量消耗了 31%,电池电压降低 0.67 V。放电温度越低,铅酸蓄电池电压降低越快,输出电量越少。经比较,在 2 A·h 同一放电时间下,铅酸蓄电池在 0、-10、-20、-30℃ 放电容量分别仅为常温的 94.4%、77.8%、67.8%、34.4%。



图 3 铅酸蓄电池恒流放电试验
Fig.3 Constant current discharge test of lead-acid battery

表 6 铅酸蓄电池不同温度下放电后容量/电压降低量
Tab.6 Discharge capacity/voltage reduction of lead-acid batteries at different temperatures

放电温度/℃	放电后容量/%	电压降低量/V
15.9	10	0.29
0	15	0.32
-10.0	30	0.44
-20.0	39	0.43
-30.0	69	0.67

Ebner 等^[23]的研究结果指出,低温会加重蓄电池中的电解液分层现象,电解液分层会使得电解质浓度下降。Gandhi 等^[24]研究了-20、-40℃ 环境下电解液与电池放电时间的关系,提出了低温下电荷转移是整个电池反应的速控步骤,电解液会随着放电进行浓度降低。经分析,铅酸蓄电池低温放电开始时,正极 PbO₂、负极 Pb 表面的 H₂SO₄ 电解液浓度会发生下降,其导致放电初始阶段电解液向正负电极表面扩散的速度变得缓慢。因不能及时补充两极表面的 H₂SO₄ 浓度,所以铅酸蓄电池的电压会发生快速下降。到了深度放电阶段,放电反应不断形成难溶物质 PbSO₄ 及水,其附着在正负电极表面,使得蓄电池内阻增大,进而影响到电池的容量^[10, 25]。

此外,还有学者提出电池低温放电过程中会引起电解液结冰,细小的冰块会堵塞电极的孔结构,降低活性物质利用率,该原因同样会导致铅酸电池放电容量降低^[26]。张德银等^[27]的研究指出,铅酸蓄电池电解质的结冰点非常低,一般铅酸蓄电池浓度在 1.275~1.285,1.275 对应的结冰点为-58.6℃、1.285 对应结冰点为-65.5℃。本试验采用的是低温适用型电池,其在试验的-40~0℃ 的环境下不会结冰,因此电解液低温冻结并非影响蓄电池性能的主要因素。低温放电试验后,对 4 个试品进行充电,因铅酸蓄电池中的活性物质已经恢复活性,电解液浓度重新上升至放电前

时的浓度, 蓄电池的电压、内阻基本恢复至试前状态。

3.3 低温恒流放电试验结果分析

从表 7 可以看出, 伴随着环境温度的下降, 蓄电池以 10 A 电流恒流放电到截止电压 10.8 V 的时间变短, 从 129 min (−10 ℃) 缩短至 69 min (−30 ℃), 放电消耗容量从 74% (−10 ℃) 显著下降缩短至 30% (−30 ℃)。恢复到标准大气条件后, 放电时环境温度越低的电池, 放电容量越低。产生原因与前文一致, 低温环境导致电解液黏度增大, 浓度减小, 阻碍离子运动, 使铅酸电池更快达到放电截止电压, 实际放出的电量相比高温下是减少的。在环境恢复后, 这些影响消失, 可以从剩余电量上直观看出, 排除了低温影响后电化学反应进行的程度。

表 7 10 A 恒流放电试验数据
Tab.7 10 A constant current discharge test data

电池 编号	放电时环 境温度/℃	放电所用 时间/min	初始电量 (标准大气 条件) /%	剩余电量 (标准大气 条件) /%
3#	−10	129	100	26
1#	−20	93	100	51
4#	−30	69	100	70

根据试验中记录的放电工作电压-时间数据, 绘制了如图 4 所示的蓄电池在 3 个温度下的恒流放电图。该曲线的变化趋势与裴玉晶等^[8-9]、李继红等^[28]开展的电池在 0~30 ℃ 放电曲线较为一致。该曲线表明, 在蓄电池刚开始放电后, 因电子负载显示的电压变成了工作电压, 迅速下降到一定值, 数分钟内略有回升。随后蓄电池进入工作电压缓慢下降的工作状态, 在接近放电截止电压时, 工作电压开始迅速下降。经分析, 将蓄电池的放电过程分为以下 4 个阶段: 阶段 1, 工作电压随温度降低而降低; 阶段 2, 低温下电压在初期的回升变小, 这是由于铅酸电池开始放电

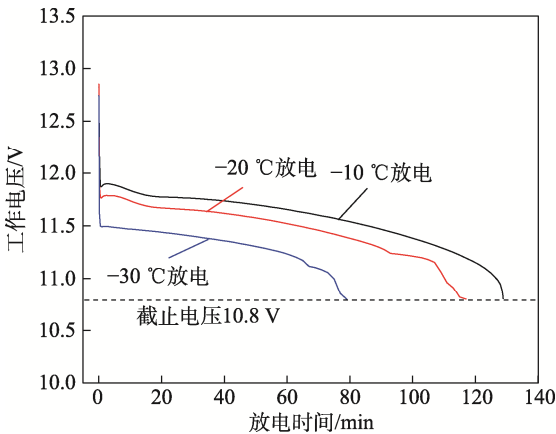


图 4 铅酸电池在 3 个温度下的恒流放电图
Fig.4 Constant current discharge diagram of lead-acid batteries at three temperatures

时, 正负极活性物质表面电解液的浓度迅速降低, 附近的电解液会缓慢补充, 使得电池电压发生回升, 而在 −30 ℃ 时, 电解液的补充量较少、能补充的程度较慢, 所以工作电压回升变得不明显; 阶段 3 为正常的放电阶段, 电解液浓度持续下降导致电压缓慢下降; 阶段 4 为放电后期, 由于极化效应增强、活性物质耗尽等原因, 电池电压迅速下降。

4 结论

本文针对船用铅酸蓄电池开展了 −30~0 ℃ 固定温度量值下的低温贮存、低温放电试验, 分析了铅酸蓄电池在低温环境下的适应性试验结果, 得出的主要结论如下:

- 1) 在贮存试验中, 随温度降低, 蓄电池内阻升高, 启动电流降低, 且内阻和启动电流的变化有加大的趋势, 至 −30 ℃ 时, 蓄电池启动电流已降至冷启动电流值 280 A。
- 2) 在放电试验中, 放电温度越低, 电压下降速率越高, 放电至截止电压 10.8 V 的时间从 −10 ℃ 下的 129 min 缩短至 −30 ℃ 下的 69 min。同时, 电池完成指定工况恒流放电后的容量损失越小。低温放电曲线表明, 放电初期, 电压下降迅速, 数分钟内略有回升, 随后蓄电池进入工作电压缓慢下降的工作状态, 在接近放电截止电压时, 工作电压继续呈现快速降低的态势。
- 3) 低温引起的电解质黏度增大、浓度降低、内阻增加, 影响到铅酸蓄电池的贮存及放电性能, 铅酸蓄电池的低温适应及使用能力大幅下降。

参考文献:

[1] 李振鸣. 船舶低温航行风险研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
LI Z M. Study on the Risk of Low-Temperature Navigation of Ships[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.

[2] RYERSON C C. Ice Protection of Offshore Platforms[J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 65(1): 97-110.

[3] GAUTHIER G P, COURTAY A, REBEIZ G M. Microstrip Antennas on Synthesized Low Dielectric-Constant Substrates[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1997, 45(8): 1310-1314.

[4] 滕俊鹏, 苏艳, 金一鸣, 等. 极低温环境适应性试验方法研究进展[J]. 装备环境工程, 2024, 21(12): 155-162.
TENG J P, SU Y, JIN Y M, et al. Research Progress on Environmental Worthiness Testing Methods for Extremely Low Temperature Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(12): 155-162.

[5] BAUKNECHT S, WÄTZOLD F, SCHLÖSSER A, et al.

- Comparing the Cold-Cranking Performance of Lead-Acid and Lithium Iron Phosphate Batteries at Temperatures below 0 °C[J]. Batteries, 2023, 9(3): 176.
- [6] 项孙建, 侯卫国, 朱向冰, 等. 某 180 Ah 铅酸蓄电池低温失效机理分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2020, 38(3): 40-44.
XIANG S J, HOU W G, ZHU X B, et al. Analysis of the Low Temperature Failure Mechanism of a 180 Ah Lead Acid Storage Battery[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2020, 38(3): 40-44.
- [7] 郑昆, 侯卫国, 蒋华俭, 等. 低温-40 °C下铅酸蓄电池的放电特性[J]. 通信电源技术, 2020, 37(1): 81-82.
ZHENG K, HOU W G, JIANG H J, et al. Discharge Characteristics of Lead-Acid Battery at Low Temperature -40 °C[J]. Telecom Power Technology, 2020, 37(1): 81-82.
- [8] 裴玉晶, 窦银科, 赵嘉玉, 等. 南极低温环境下铅酸蓄电池充放电的研究[J]. 电源技术, 2018, 42(6): 871-873.
PEI Y J, DOU Y K, ZHAO J Y, et al. Charge and Discharge Performance of Lead-Acid Battery at Low Temperature in Antarctica[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2018, 42(6): 871-873.
- [9] 裴玉晶. 极地冰物质平衡监测站小型风光互补供电系统的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
PEI Y J. Research on Small Wind and Solar Hybrid Generation System Based on Polar Ice Material Balance Monitoring Station[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017.
- [10] 左广宇. 极区独立可再生能源供电系统关键技术研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2020.
ZUO G Y. Research on Key Technologies of Standalone Renewable Energy System in Polar Region[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2020.
- [11] HUNT G. Freedom Car Battery Test Manual For Power-Assist Hybrid Electric Vehicles[K]. Idaho Falls: INEEL, 2003.
- [12] (保)德切柯·巴普洛夫. 铅酸蓄电池科学与技术[M]. 段喜春, 苑松译. 北京: 机械工业出版社, 2015.
DECHKO P. Lead-Acid Batteries: Science and Technology[M]. DUAN X C, YUAN Stranlate. Beijing: China Machine Press, 2015.
- [13] 中国人民解放军总装备部. 军用装备实验室环境试验方法 第4部分: 低温试验: GJB 150.4A—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
Military Equipment Laboratory Environmental Test Methods Part 4: Low Temperature Test: GJB 150.4A—2009[S]. Beijing: China Standard Press, 2009.
- [14] 中国船舶工业总公司. 舰船设备环境试验方法: CB 1146—1985[S]. 上海: 中国船舶工业总公司, 1985.
China State Shipbuilding Corporation. Environmental Test Methods for Naval Equipment: CB 1146—1985[S]. Shanghai: China State Shipbuilding Corporation, 1985.
- [15] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 起动用铅酸蓄电池第1部分: 技术条件和试验方法: GB/T 5008.1—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Lead-Acid Starter Batteries: Part 1: Technical Conditions and Methods of Test: GB/T 5008.1—2023[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- [16] 国家质量监督检验检疫总局. 电工电子产品环境试验 第2部分: 试验方法 试验 A: 低温: GB/T 2423.1—2001[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Environmental Testing for Electric and Electronic and Electronic Products: Part 2: Test Methods—Tests A: Cold: GB/T 2423.1—2001[S]. Beijing: Standards Press of China, 2001.
- [17] 王连坡, 顾海峰. 电子设备环境适应性设计技术[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(12): 210-214.
WANG L P, GU H F. Environmental Adaptation Design for Electronic Equipment[J]. Ship Electronic Engineering, 2019, 39(12): 210-214.
- [18] 李哲, 韩雪冰, 卢兰光, 等. 动力型磷酸铁锂电池的温度特性[J]. 机械工程学报, 2011, 47(18): 115-120.
LI Z, HAN X B, LU L G, et al. Temperature Characteristics of Power LiFePO₄ Batteries[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(18): 115-120.
- [19] 牛腾腾. 铅酸蓄电池长循环寿命的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
NIU T T. Study on Long Life of Lead-Acid Battery[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015.
- [20] 陈杨飞. 基于铅酸蓄电池储能的光伏储能系统研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2016.
CHEN Y F. Research of Performance Test Method of Battery for Electric Vehicle and the Development of Experiment Platform[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2016.
- [21] 宋亚娟, 强力威, 许春祥, 等. 关于铅酸电池充电接受及低温容量问题的探讨[J]. 电源技术, 2017, 41(3): 457-459.
SONG Y J, QIANG L W, XU C X, et al. Discussion on Problem of Charging Acceptance and Low-Temperature Capacity of Lead-Acid Batteries[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2017, 41(3): 457-459.
- [22] 杨滔, 黄伟国, 唐胜群, 等. 动力铅酸电池循环过程性能研究[J]. 蓄电池, 2023, 60(6): 292-298.
YANG T, HUANG W G, TANG S Q, et al. Study on Cycle Performance of Power Lead-Acid Battery[J]. Chinese LABAT Man, 2023, 60(6): 292-298.
- [23] EBNER E, BÖRGER A, GELBKE M, et al. Temperature-Dependent Formation of Vertical Concentration Gradients in Lead-Acid Batteries under PSoC Operation – Part 1: Acid Stratification[J]. Electrochimica Acta, 2013, 90: 219-225.
- [24] GANDHI K S, SHUKLA A K, MARTHA S K, et al. Simplified Mathematical Model for Effects of Freezing on the

- Low-Temperature Performance of the Lead-Acid Battery[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2009, 156(3): A238.
- [25] 徐翠锋, 管芳. VRLA 蓄电池特性研究与容量估算[J]. 仪表技术, 2015(5): 15-18.
- XU C F, GUAN F. Characteristic Investigation and Capacity Estimation of VRLA Battery[J]. Instrumentation Technology, 2015(5): 15-18.
- [26] 高宏宇. 电解液添加剂对铅酸电池低温性能影响的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- GAO H Y. Study on the Influence of Electrolyte Additives on the Low Temperature Performance of Lead-Acid Batteries[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [27] 张德银, 罗英, 罗文田. 环境温度变化对航空铅酸蓄电池性能的影响[J]. 中国民航飞行学院学报, 2009, 20(2): 30-32.
- ZHANG D Y, LUO Y, LUO W T. The Influence of Environmental Temperature Changes on the Performance of Aviation Lead-Acid Batteries[J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2009, 20(2): 30-32.
- [28] 李继红, 何建新, 张先勇, 等. 某型军用锂离子电池低温环境适应性[J]. 装备环境工程, 2014, 11(1): 111-115.
- LI J H, HE J X, ZHANG X Y, et al. Environmental Worthiness Evaluation of a Certain Type of Military Lithium-Ion Battery at Low Temperature[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(1): 111-115.