

环境试验与观测

极低温环境适应性试验方法研究进展

滕俊鹏^{1,2}, 苏艳^{1,2*}, 金一鸣^{1,2}, 王辉^{1,2}

(1.西南技术工程研究所, 重庆 400039; 2.黑龙江漠河大气环境材料腐蚀国家
野外科学观测研究站, 黑龙江 漠河 165303)

摘要: 针对当前装备在极地使用过程中可能面临的极低温环境适应性问题, 分析总结了南北两极温度、风、太阳辐射、盐雾等环境特征以及温度等环境因素变化规律, 阐述了低温对金属、高分子材料强度、塑性、韧性等基本力学性能的影响及影响机理, 概括总结了国内外极低温自然环境试验技术和实验室低温试验技术及标准发展现状, 分析了现有极地低温试验方法存在的问题, 并从多因素环境综合加速试验、低温-力学耦合试验、计算机仿真分析等三个方面对未来极低温环境适应性试验研究发展进行了展望。

关键词: 极地; 极低温; 环境适应性; 环境因素; 性能; 试验方法

中图分类号: TB302 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9242(2024)12-0155-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.12.019

Research Progress on Environmental Worthiness Testing Methods for Extremely Low Temperature Environment

TENG Junpeng^{1,2}, SU Yan^{1,2*}, JIN Yiming^{1,2}, WANG Hui^{1,2}

(1. Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China; 2. National Field Scientific Observation and Research Station for Atmospheric Environmental Corrosion in Mohe, Heilongjiang Mohe 165303, China)

ABSTRACT: Aiming at the worthiness of equipment in extremely low temperature environment in the process of polar use at present, the environmental characteristics of the North and South Poles, such as temperature, wind, salt spray, solar radiation, and the change law of environmental factors such as temperature are analyzed and summarized. The effect and mechanism of low temperature on the basic mechanical properties of metals and polymer materials, such as strength, plasticity and toughness are expounded. The development status of ultra-low temperature natural environment test technology and laboratory low-temperature test technology and standards in China and abroad is summarized, the existing problems of the existing polar low temperature testing methods are analyzed, and the future research and development of extremely low temperature environment worthiness test is put forward from three aspects of multi-factor comprehensive acceleration test, low-temperature-mechanical coupling test and computer simulation analysis.

KEY WORDS: polar region; extremely low temperature; environmental worthiness; environmental factors; performance; testing methods

收稿日期: 2024-11-07; 修订日期: 2024-12-09

Received: 2024-11-07; Revised: 2024-12-09

基金项目: 国防科技工业技术基础科研项目 (JSHS2020206B001)

Fund: The Nation Defense Technology Foundation Project (JSHS2020206B001)

引文格式: 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 Junpeng, SU Yan, JIN Yiming, et al. Research Progress on Environmental Worthiness Testing Methods for Extremely Low Temperature Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(12): 155-162.

*通信作者 (Corresponding author)

当前,南北极因其丰富的自然资源、重要的地缘战略地位而受到国际社会越来越多的关注^[1-3],美俄等国家均大力发展极地装备与试验评价技术。美国着重强调建设一支可用、高效的破冰船舰队,为极区活动提供保障^[4-5]。俄罗斯计划将北极发展成为战略资源基地,大力研究激光破冰技术,扩展舰船冰区通行能力,保障社会经济发展^[6-7]。我国在两极相继建立了长城站、中山站、昆仑站、泰山站、秦岭站、黄河站,科考破冰船“雪龙”号远不能满足极地活动任务,未来我国极地装备需求势必会大幅提升^[8-9]。然而,装备在极低温环境下面临着严峻挑战^[10-12],低温和复杂载荷作用会引起金属材料冷脆、高分子材料硬化开裂,进而导致装备故障时有发生。如俄军轮式突击炮承力金属结构在低温下易变脆断裂,造成装备损坏、失灵。因此,针对极地恶劣使用环境,研究结构/材料极低温环境适应性及试验方法对极地装备的设计与考核评价具有重要意义。

相比常温和高温,针对低温环境适应性的研究相对较少。张伟等^[13]通过脆性温度、 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷冻1 h后的硬度增长、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷冻168 h后的硬度增长对比分析了天然橡胶、丁苯橡胶等7种橡胶的耐寒性。孙琳等^[14]针对高寒地区气候特征,将低温和高温交变设为主要环境参数因素,通过高低温力学测试和交变温度试验,比对轨道车辆材料的力学特性判断其耐寒性。王源清等^[15]对Q235、Q460、Q960碳钢进行了低温冲击韧性实验,基于Botlzmann函数和冲击功随温度变化曲线,确定了碳钢的低温韧脆转变温度,从而对比碳钢的耐寒性。张玉玲^[16]研究了不同厚度桥梁钢16Mnq和14MnNbq在系列低温下的CTOD断裂韧性指标 δ_m ,分别给出了4种厚度的16Mnq钢和14MnNbq钢的断裂韧性指标随温度的变化规律,并确定其韧脆转变温度均低于 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。目前,这些研究主要集中于单纯低温环境对材料拉伸、疲劳等力学性能的影响研究,对承力结构的极低温和载荷耦合试验方法的研究文献仍然鲜有报道。

基于此,本文通过分析总结南北两极环境特征,阐述了单纯低温对金属、高分子材料基本力学性能的影响及影响机理,概括总结了国内外极低温自然环境试验技术和实验室低温试验技术及标准发展现状,分析指出现有极地低温试验方法存在的问题,并对未来极低温环境适应性试验研究发展进行了展望,对极地装备产品环境适应性设计与试验考核提供指导。

1 极地气候环境特征

1.1 北极

北极地区是指北极点以南和北极圈($66^{\circ}34'$)以北的广大区域,主要由冰川和冰盖构成,夏季短暂而凉爽,冬季漫长而严寒。夏季时间一般在7月底—9

月初,夏季温度可达 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在最寒冷的月份,平均气温为 $-29\sim-34\text{ }^{\circ}\text{C}$,2月份最低气温可达 $-53\text{ }^{\circ}\text{C}$,北极有记录的最低气温于1991年12月22日在格陵兰岛冰盖上的一个偏远气象站测得,约 $-69.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。北极湿度较大,同时由于北冰洋中盐雾含量相对较高,使得北极空气中盐分较大^[17]。北极有长时间的极昼极夜现象,极夜现象甚至可长达5~6个月。例如,在加拿大的埃尔斯米尔岛,每年的10月22日到次年的3月1日都是24 h不见太阳的极夜,而在夏天则是24 h太阳普照的极昼。

1.2 南极

南极较北极大陆面积更大,几乎全被冰川覆盖,占全球现代冰被面积的80%以上。南极与北极部分气候特征相似,但南极气温更低,环境相对更为恶劣。南极沿海地区冬季平均气温为 $-30\sim-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,内陆冰盖气温更低,冬季平均气温低于 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$,俄罗斯东方站历史监测最低气温达到 $-89.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。长时间低温导致其年降水量较低,南极大陆年降水量仅30~50 mm,沿海地区也仅有200~500 mm^[18]。

南极中山站位于南极大陆沿海,是我国各科考站中最能综合反映南极气候特点的科考站,根据中山站2011—2015年环境因素数据分析结果,发现其月平均、月最高、月最低温度均大致呈现正弦变化规律(见图1),月最低温度均低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度高于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时间占总时间比例低于10%。中山站风速较大,最高风速可达30 m/s以上。在夏季,中山站太阳辐射偏高。同时由于臭氧层的破坏,大气层稀薄,紫外线辐射强度远高于其他地区^[19]。中山站还存在极夜现象,极夜期间,其太阳辐射几乎为0。由于中山站濒临海边,大气中充满海洋气溶胶^[20], Cl^- 浓度相对较高,Huang等^[21]统计的中山站表层雪中氯离子质量浓度约为 $1\ 600\ \mu\text{g/L}$,Xu等^[22]采集了中山站附近气溶胶样品, Cl^- 平均质量浓度约 $1\ 000\ \text{ng/m}^3$,最高含量大

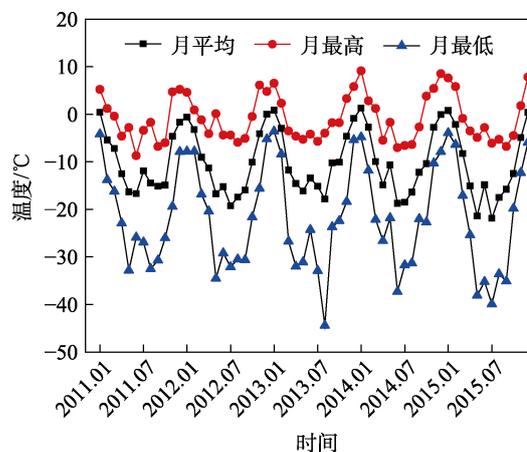


图1 南极中山站环境温度变化曲线
Fig.1 Environmental temperature change curve of Zhongshan Station in the South Pole

于 3 000 ng/m³。南极中山站现场暴露的金属材料腐蚀程度远超预期, 暴露仅 2 个月, 45A 和 7A52 发生腐蚀, 其中 45A 碳钢红褐色锈点遍布整个表面。

2 极地低温对材料基本力学性能的影响

2.1 金属材料

大量研究表明, 低温会对金属材料力学性能产生较大影响, 从而发生由韧变脆的现象, 然而并非所有的金属都会发生低温脆性断裂, 金属的冷脆性与其晶格类型有关。如面心立方结构的金属延展性在低温下基本不改变, 而体心立方晶格的金属则随着温度下降, 其强度增加, 韧性与塑性降低。当温度降至一定程度时, 体心立方晶格金属材料韧性急剧下降, 在很小的温度范围内, 金属的破坏形式由韧性破坏向脆性破坏转变^[23-27]。

苏艳团队针对钢、铝合金、铜合金、钛合金等金属材料开展了系列低温下冲击韧性、拉伸性能试验。结果表明, 采用 Boltzmann 函数拟合, Q235、08F、20、25、35、45 等 6 种碳钢的冲击吸收能量-温度变化曲线均表现出明显的韧-脆转变特征, 以冲击吸收能量达到常温能量的 50% 时对应的温度记为韧脆转

变温度, 6 种碳钢的韧脆转变温度在 -26~12 °C。由于铝合金和铜合金具有面心立方结构, 通过试验发现, 2A12、7A52、ZL205A 这 3 种铝合金在 -90 °C 下仍可保持其韧性, 冲击吸收能量变化在 10% 以内; T2 和 H62 这 2 种铜合金随温度降低冲击吸收能量略有增高, 如图 2 所示。

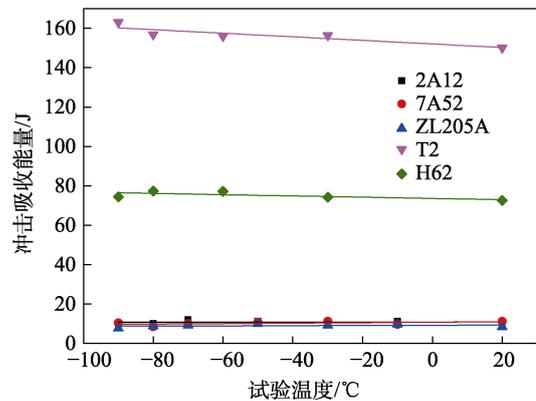


图 2 铝合金/铜合金冲击吸收能量-温度变化曲线
Fig.2 Impact absorption energy-temperature variation curve of aluminum alloy/copper alloy

图 3 反映了 6 种碳钢拉伸性能随温度下降的变化规律, 可以看出, 6 种碳钢的强度均显著提高, 其中抗拉强度增大 18.7%~22.3%, 屈服强度增大更明显,

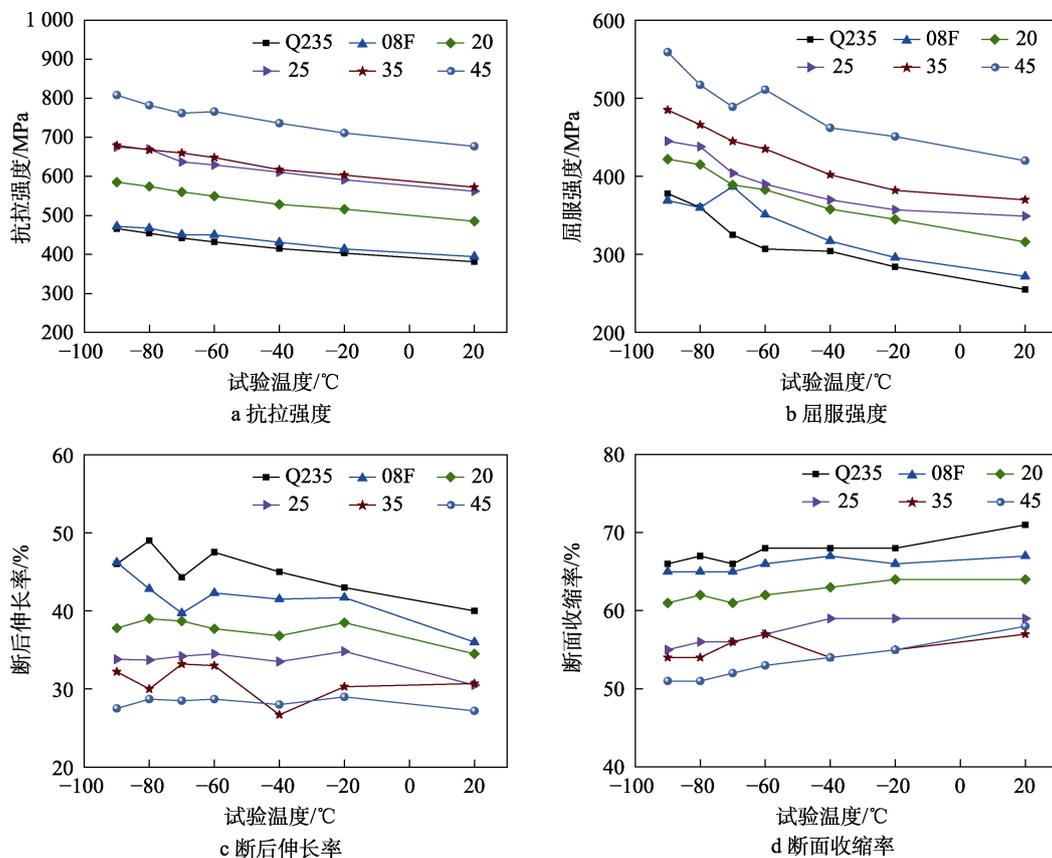


图 3 6 种碳钢低温拉伸性能变化规律

Fig.3 Variation law of low-temperature tensile properties of 6 types of carbon steel: a) tensile strength; b) yield strength; c) elongation at break; d) cross-sectional shrinkage rate

达到 27.5%~48.2%，弹性模量增加幅度与抗拉强度相近，断后伸长率呈上升趋势，最大增加 28.3%，断面收缩率则呈下降趋势，最大减小 12.1%。采用扫描电镜观察 35#碳钢的常温和低温断口形貌，发现常温宏观断口存在轻微缩颈现象，断口边缘剪切唇和芯部区域微观形貌均表现为撕裂韧窝的韧性断裂特征。-20℃断口宏观形貌与常温类似。当温度降至-70、-90℃时，出现河流状解理脆性形貌，并伴有较多微小二次裂纹，表现为脆性形貌特征。

Stephens 等^[28]分析总结了大量光滑和缺口试样金属材料的恒幅疲劳试验结果，发现对于光滑试样，其长寿命区 (>10⁴) 的低温疲劳性能要好于室温疲劳性能；对于缺口试样，其长寿命区 (>10⁶) 的低温疲劳性能要略微好于或者与常温疲劳性能相近。对于短寿命区的光滑试样和缺口试样，低温的影响可能有利或者不利。张玉玲^[16]进行了常温和-50℃时，24 mm 厚 14MnNbq 桥梁用钢母材的高周应力疲劳试验，结果表明，-50℃下的低温疲劳强度比常温提高了 24%。

2.2 高分子材料

热塑性高分子材料在低温下的性能与其玻璃化

转变温度密切相关，当环境温度高于玻璃化转变温度，分子链容易运动，解除缠绕，材料呈现出软、韧的特点；低于玻璃化转变温度，分子链运动变缓，呈现硬脆的特点，容易发生脆性断裂。对于热固性高分子材料，主要靠化学键连接形成三维空间网络，当温度降低时，分子结构中自由链段的运动能力下降，局部会形成物理交联，可有效增加加载过程中承载外力的有效网链数，使材料低温拉伸强度出现增大。伸长率是整个材料完整破坏的性能值，随着低温下承受外力的有效网链数增加，有效弥补了分子内缺陷引起的材料破坏，使材料伸长率出现增大^[23,29]。

苏艳团队研究了单纯低温环境对 WSPS-3004 聚氨酯和 S-111 三聚氰胺甲醛工程塑料力学性能的影响。从图 4、图 5 中可以看出，低温使 WSPS-3004 聚氨酯工程塑料塑性、韧性明显降低，-90℃时热塑性工程塑料断裂应变较室温降低 68.6%，冲击强度较室温下降 19.4%；而低温使 S-111 三聚氰胺甲醛工程塑料强度、韧性提高，-90℃时热固性工程塑料拉伸强度、断裂应变较室温分别上升 48.8%、160.6%。

综上所述，体心立方金属材料 and 热塑性高分子材料在低温环境下表现出明显的低温脆性，当温度低于

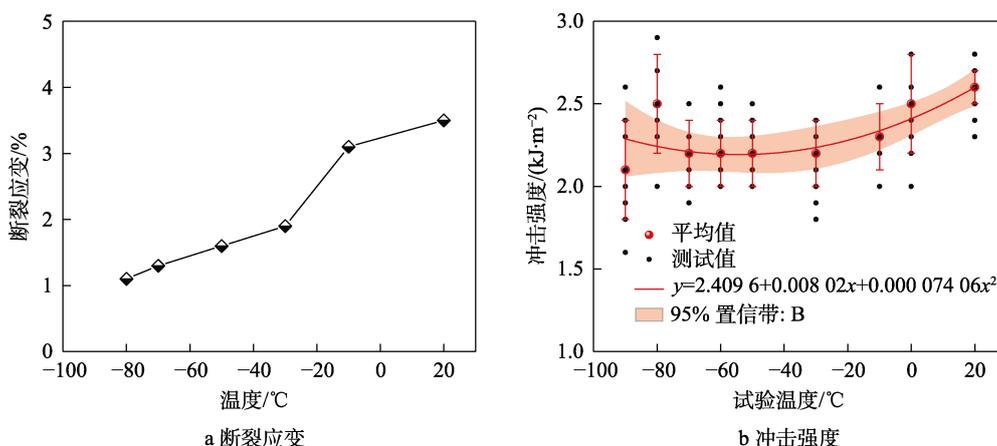


图 4 WSPS-3004 聚氨酯工程塑料力学性能-温度曲线

Fig.4 Mechanical properties-temperature curve of WSPS-3004 polyurethane engineering plastic: a) fracture strain' b) impact strength

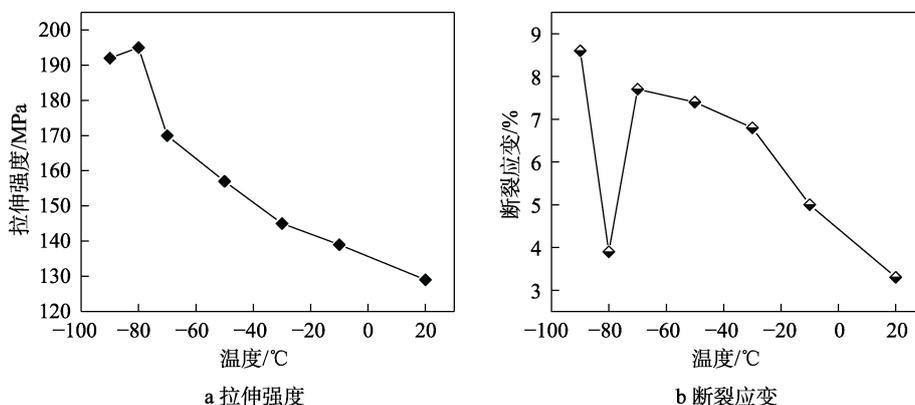


图 5 S-111 三聚氰胺甲醛工程塑料力学性能-温度曲线

Fig.5 Mechanical properties-temperature curve of S-111 melamine formaldehyde engineering plastic: a) tensile strength; b) fracture strain

韧脆转变温度/玻璃化转变温度后, 材料韧性明显降低, 脆性断裂风险升高。针对需在极低温环境下应用的材料, 需充分关注其在极低温环境下韧性的变化, 防止由于材料低温脆断而导致的装备破坏。

3 国内外极低温环境适应性试验技术及展望

3.1 极低温环境适应性试验技术现状

1) 极低温自然环境试验技术。国外通过科考站、科考船或极地实地演练的方式进行极地自然环境试验, 同时, 也在本国严寒地区开展大量极低温自然环境试验, 以充分考核装备或材料在极低温地区的环境适应性。欧洲航天局在南极洲康科迪亚站进行了长达 20 年的极地科学研究, 该研究关注于极端环境下人类的生存和适应能力。美国、俄罗斯分别通过“帕尔默号”破冰船和“50 年胜利号”核动力破冰船在南极和北极进行科学考察和环境适应性试验^[30]。法国正建设“塔拉极地站”漂流实验室, 可进行持续性的跨极地航行, 较破冰船大大降低运营成本, 研究人员可全年在极地开展环境适应性研究。俄罗斯在北极地区进行实地演练, 要求武器装备在超过 2 000 km 的行军中接受测试, 能正常运转不少于 3 d, 检验装备对低温环境的适应能力, 探索北极极寒特殊环境对实施作战的影响。美国在阿拉斯加建立了低温试验场, 冬季气温可降至 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下, 具备极寒条件下武器装备试验研究能力, 可为美军装备提供低温试验研究及测试服务。俄罗斯 MC-21-300 飞机在雅库茨克进行了低温环境适应性试验, 确保装备能够在极低温条件下可靠运行。

近年来, 中国依托极地科考活动和科考站开展了材料、构件、电子产品等极低温环境适应性试验研究。国家极地研究中心等单位在南极对具有我国自主知识产权的“低空飞行机器人”和“冰雪面移动机器人”进行了试验, 以验证其极地环境适应能力。中国海洋大学、中国兵器装备集团西南技术工程研究所、中国船舶七二五所等单位还先后多次在南北极投试样, 充分考核材料极低温环境适应性^[31-32]。同时, 自“十五”以来, 中国兵器装备集团西南技术工程研究所在我国的极寒地区漠河相继开展了大量材料、构件、整机的低温环境适应性试验(见图 6), 获取的宝贵试验数据对装备产品极低温环境适应性评估具有重要指导意义。

2) 实验室低温试验技术及标准。国内外通过开展实验室低温试验, 以求在更短时间内掌握装备低温环境适应性。美国麦金利气候实验室不仅可以模拟高低温、高低湿、太阳辐射、雨、雪、沙尘暴等复杂极端环境, 还可提供最低温度约 $-53\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温试验和冰



图 6 漠河低温环境适应性试验

Fig.6 Low-temperature environmental worthiness test in Mohe

冻试验。英国在博纳科姆镇建成的大型气候实验室也包含一个低温实验室, 可开展相应的低温环境考核试验。俄罗斯中央精密机械研究所重启北极军事实验室, 可模拟最低 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的极端温度, 以及雾霾、雨水等严苛条件。瑞典在基律纳建成大型整机气候实验室, 是仅有的位于北极圈内的气候实验室, 可进行最低 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的飞机全机低温试验。我国飞机强度研究所在西安建立的大型气候环境实验室, 可实现 24 h 内将实验室温度从室温降到 $-54\text{ }^{\circ}\text{C}$, 具有低温、降雪、积冰、冻雨等试验能力。目前, 由中国船舶七〇八所牵头建设的“远东防寒实验室”也已完成, 建有国内首个可模拟低至 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 极地环境的试验系统, 为装备极地环境适应性考核验证构造了逼真的试验条件。

随着实验室低温试验技术的发展, 国内外相继制定了相关低温试验方法标准。美国制定的 MIL-STD-810H^[33]《环境工程考虑和实验室试验》中对低温环境试验规定了贮存、工作和拆装操作 3 个试验程序, 对全球低温极值出现概率进行了统计, -51 、 -54 、 -57 、 $-61\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的出现概率分别为 20%、10%、5%、1%。多数研究过程中采用 20% 出现概率对应的温度进行低温试验, 同时规定对于在极低温地区长期使用或贮存的装备, 其经受很低温度的机会将增大。例如, 在西伯利亚东北部或格陵兰岛的中心的“冷极”, 装备经受很低的温度(接近 $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$)的机会会增大, 为满足特定应用和试验要求, 可选择最严酷的值进行试验。英国出版的 DEF STAN 00-35^[34]《国防装备环境手册》的低温试验包括恒定低温试验和低温日循环试验, 针对最严酷的极寒地区(C4 气候区), 其恒定低温试验推荐温度为 $-57\text{ }^{\circ}\text{C}$, 低温日循环试验也与恒定低温试验一致, 24 h 温度均维持在 $-57\text{ }^{\circ}\text{C}$ 不变, 如图 7 所示。我国参照 MIL-STD-810G 制定了 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》, 试验条件与 MIL-STD-810G 基本一致。GJB 282.1—1987《装甲车辆环境条件 工作环境温度》、GJB 282.2—1987《装甲车辆环境条件 贮存环境温度》给出了我国装甲车辆不同风险率等级、不失效的工作/贮存环境温度极值指标, 规定低温工作环境温度采用 $-43\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

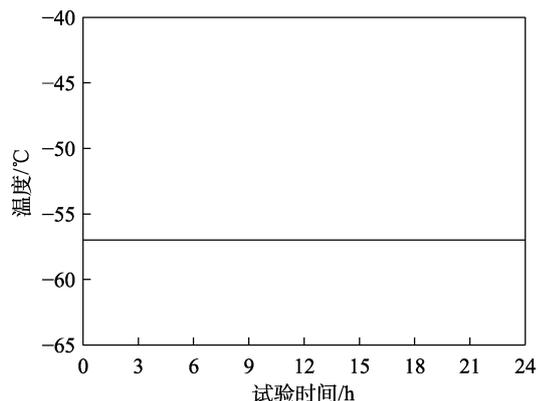


图7 DEF STAN 00-35 气候区 C4 温度日循环试验
Fig.7 Daily cycle test of DEF STAN 00-35 in climatic region C4

3.2 现有极地低温试验方法存在的问题

从上述分析可知,极地气候环境具有极低温且持续时间长的特点,会改变金属材料、高分子材料等的物理和(或)化学特性,导致材料硬化、脆化、弹性降低,进而造成装备结构暂时或永久性损伤,而极地的强紫外辐射、较大湿度、沿海空气中的盐分对材料的腐蚀老化作用同样不可忽视。然而,现有的模拟极地气候的试验方法大多为单纯的低温暴露试验,未考虑低温与紫外辐射、Cl⁻的交互作用,加之对多因素耦合效应缺乏深刻的认识,在设计多因素试验谱块、量值、顺序方面存在一定挑战,导致对极地环境下材料,尤其是高分子材料的考核验证存在较大偏差。

极地服役的装备结构,不仅会遭遇长期低温累积作用,还会经受各种各样工况载荷的交互或协同作用,使得装备结构产生更为严重的损伤。传统的静态低温试验只考核了低温对装备结构及构成材料的影响,未考虑低温和载荷的耦合作用,不能全面反映装备结构的真实环境损伤历程。Shul 等^[35]在-60℃低温下对低合金钢和焊接接头进行了冲击和正弦波反复载荷的疲劳性能试验,试验结果表明,承受正弦波载荷的试件疲劳寿命大于承受冲击载荷的试件疲劳寿命,低温-载荷的协同试验将逐渐成为未来发展趋势。

计算机仿真已被逐步应用于材料或结构性能预测,冯然等^[36]发明了一种金属材料腐蚀后疲劳有限元数值模拟与参数分析方法,研究了腐蚀与疲劳性能之间的关系。唐建鹏等^[37]针对 LNG 船在严重搁浅事故下存在破舱泄漏导致的低温会使船体结构发生脆性破坏的可能性,通过运用 PCL 语言对有限元软件 Patran 进行二次开发,自动迭代求解破舱后的结构温度场。结合船用钢低温下的材料特性,得出泄漏情况下的脆性影响范围。基于非线性有限元软件 ABAQUS,假定脆性影响下的结构失去承载能力,计算了 LNG 船的剩余极限强度,研究了低温脆性对

LNG 船搁浅破舱情况下剩余极限强度的作用。但现阶段研究多集中于单应力场对材料或结构性能的作用,与现实中多应力场环境共同作用仍存在差距。

4 结语

极地环境具有长时间低温、夏季太阳辐射较强、濒海地区盐分含量较高的特点,其中南极气温更是低至-89.2℃。超低温会造成金属材料强度上升、塑性降低,发生韧脆转变现象,引起高分子材料硬化开裂,同时极地对材料的腐蚀老化作用也不容忽视。目前对于结构材料的低温性能研究系统性不足,缺乏对微观劣变机制的深刻认识,还不能全面支撑极地装备的环境适应性设计。另一方面,针对极地装备结构/材料的环境适应性试验考核体系尚未建立,现有低温性能试验考核主要按照 GJB 150.4A 开展,未贴近实际服役环境条件,对多种环境因素或环境和载荷的耦合作用考虑不足,未来主要发展方向如下:

1)由传统组合试验向多因素综合加速试验发展。极地环境对材料的腐蚀老化作用远超预期,材料将遭受腐蚀环境和低温环境的共同影响,针对极地腐蚀环境,冷文俊等^[38]研究了低合金高强钢极地环境加速腐蚀试验谱,根据中山站大气环境数据,将南极环境分为潮湿空气、冻融循环、低温冰冻 3 个阶段。但组合试验仍存在弊端,组合试验无法体现多种环境因素协同作用的影响,需进一步考虑多环境因素综合试验的研究,杨晓然等^[39]研究了一种多因素综合高原高寒气候环境模拟加速试验装置,该装置可进行光照-气压-温度-湿度-风速的五因素综合环境试验。该装置的成功研发为研究温度-湿度-风-太阳辐射-盐雾离子的五因素综合极地大气模拟加速试验装置提供了参考。

2)由单纯低温试验向低温-力学载荷耦合试验发展。通过低温-力学耦合试验可进一步验证材料或构件使用过程中受力状态下的可靠性,低温-力学耦合试验主要依赖耦合试验装置,现阶段普遍采用低温箱和力学试验装置配合构成,现阶段低温试验温度普遍在-70℃以上,未完全覆盖极地最极端温度。当试验温度低于-70℃时,低温箱需采用液氮/液氦制冷,消耗极大,难以将温度长期维持在-70℃以下。如何将低温箱尺寸增大、-70℃以下长时间温度保持、试验样品更换方便 3 个问题同时兼容是未来低温-力学耦合试验装置亟需解决的难题。

3)由传统实物试验向计算机仿真分析发展。计算机仿真相较真实试验具有节约成本、方便快捷、高效灵活等特点,计算机仿真在腐蚀、低温等单因素对材料的影响分析方面均已得到应用。未来,可将腐蚀和低温相结合,通过有限元等计算机仿真分析手段,分析研究极地大气环境对材料性能可能产生的影响。

参考文献:

- [1] 匿名. 未来战略重要地带——北极(上)[J]. 世界知识, 2024(12): 74-76.
Anonymous. An Important Zone of Future Strategy—Arctic (I)[J]. World Affairs, 2024(12): 74-76.
- [2] 匿名. 未来战略重要地带——北极(下)[J]. 世界知识, 2024(13): 74-76.
Anonymous. An Important Zone of Future Strategy—Arctic (II)[J]. World Affairs, 2024(13): 74-76.
- [3] 杨剑. 中国发展极地事业的战略思考[J]. 人民论坛·学术前沿, 2017(11): 6-15.
YANG J. Strategic Thinking on the Development of China's Polar Cause[J]. Frontiers, 2017(11): 6-15.
- [4] 杜晓杰, 谢晓光. 美国北极政策的变化及其动力[J]. 战略决策研究, 2023, 14(1): 81-97.
DU X J, XIE X G. Evolution in U.S. Arctic Policy and Its Dynamics[J]. Journal of Strategy and Decision-Making, 2023, 14(1): 81-97.
- [5] 刘莹, 胡瑞. 美国北极安全战略体系的演变、运行及启示[J]. 情报杂志, 2023, 42(10): 27-32.
LIU Y, HU R. Evolution, Operation and Enlightenment of the U.S. Arctic Security Strategy[J]. Journal of Intelligence, 2023, 42(10): 27-32.
- [6] 郭珂珂. 普京执政期俄罗斯北极政策研究[D]. 北京: 外交学院, 2022.
GUO K K. Research on Russian Arctic Policy during Putin's Administration[D]. Beijing: China Foreign Affairs University, 2022.
- [7] 谭畅. 俄罗斯“2035 体系”下的北极安全战略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
TAN C. Research on Arctic Security Strategy under Russia's 2035 System[D]. Changchun: Jilin University, 2023.
- [8] 于立伟, 王俊荣, 王树青, 等. 我国极地装备技术发展策略研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(6): 84-93.
YU L W, WANG J R, WANG S Q, et al. Development Strategy for Polar Equipment in China[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(6): 84-93.
- [9] 刘顺林. 中国极地考察 40 年进展与展望[J]. 极地研究, 2024, 36(3): 317-328.
LIU S L. The Progress and Prospect on the 40th Anniversary of Chinese Arctic and Antarctic Scientific Expeditions[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2024, 36(3): 317-328.
- [10] 屈少鹏, 赵行娅, 轩星雨. 极地钢铁材料的腐蚀与防护面临新挑战[J]. 材料科学与工艺, 2023, 31(6): 19-28.
QU S P, ZHAO X Y, XUAN X Y. New Challenges on Corrosion and Protection of Polar Steel[J]. Materials Science and Technology, 2023, 31(6): 19-28.
- [11] 满成, 国景一, 孙议祥, 等. 典型防护涂层体系在南极大气环境中的失效行为研究[J]. 表面技术, 2022, 51(6): 27-35.
MAN C, GUO J Y, SUN Y X, et al. Failure Behaviour of Some Classical Protective Coatings in Antarctic Environments[J]. Surface Technology, 2022, 51(6): 27-35.
- [12] 薛敏, 夏晨曦, 权红英. 极地海洋环境下复合材料的失效机制研究进展[J]. 失效分析与预防, 2023, 18(6): 417-424.
XUE M, XIA C X, QUAN H Y. Research Progress on Failure Mechanism of Composite Materials in Polar Marine Environment[J]. Failure Analysis and Prevention, 2023, 18(6): 417-424.
- [13] 张伟, 张培亭, 肖建斌. 常用橡胶的低温性能研究[J]. 特种橡胶制品, 2019, 40(4): 27-29.
ZHANG W, ZHANG P T, XIAO J B. Study on Low Temperature Performance of Common Rubbers[J]. Special Purpose Rubber Products, 2019, 40(4): 27-29.
- [14] 孙琳, 林化强, 林鹏, 等. 北方高寒地区轨道车辆橡胶材料的力学特性分析[J]. 材料开发与应用, 2016, 31(6): 88-92.
SUN L, LIN H Q, LIN P, et al. Mechanical Properties Analysis of Rubber Materials for Rail Vehicles in the North China[J]. Development and Application of Materials, 2016, 31(6): 88-92.
- [15] 王元清, 廖小伟, 贾单锋, 等. 钢结构的低温疲劳性能研究进展综述[J]. 建筑钢结构进展, 2018, 20(1): 1-11.
WANG Y Q, LIAO X W, JIA D F, et al. Overview of Research Progress for the Low-Temperature Fatigue Performance of Steel Structures[J]. Progress in Steel Building Structures, 2018, 20(1): 1-11.
- [16] 张玉玲. 大型铁路焊接钢桥疲劳断裂性能与安全设计[D]. 北京: 清华大学, 2005.
ZHANG Y L. Fatigue Fracture Performance and Safety Design of Large Railway Welded Steel Bridge[D]. Beijing: Tsinghua University, 2005.
- [17] 王树杰, 丁明虎, 孙维君, 等. 北极 Ny-? lesund 地区气候特征初步研究[J]. 冰川冻土, 2017, 39(3): 479-489.
WANG S J, DING M H, SUN W J, et al. Climate Characteristics in Ny-? lesund, Arctic[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(3): 479-489.
- [18] 徐子英. 神秘的南极[J]. 科技风, 2019(22): 125-126.
XU Z Y. The Mysterious Antarctic[J]. Technology Wind, 2019(22): 125-126.
- [19] 武维刚, 武麦凤. 1990—2020 年南极中山站气候特征及趋势分析[J]. 内蒙古气象, 2021(4): 3-9.
WU W G, WU M F. Climatic Characteristics and Trends Analysis of Zhongshan Station in Antarctica from 1990 to 2020[J]. Meteorology Journal of Inner Mongolia, 2021(4): 3-9.
- [20] 冷文俊, 石西召, 辛永磊, 等. 极地低温海洋大气环境下 Ni-Cr-Mo-V 钢腐蚀行为与室内外相关性研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2024, 44(1): 91-99.
LENG W J, SHI X Z, XIN Y L, et al. Correlation of Corrosion Information Acquired by Indoor Acceleration Testing and by Real Low Temperature Marine Atmosphere Exposure in Polar Region for Ni-Cr-Mo-V Steel[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2024, 44(1): 91-99.
- [21] HUANG W L, YAN M, MULVANEY R, et al. Spatial Variability of Glaciochemistry along a Transect from

- Zhongshan Station to LGB69[J]. *Atmosphere*, 2021(3): 393-411.
- [22] XU G J, CHEN L Q, ZHANG M M, et al. Year-round Records of Bulk Aerosol Composition over the Zhongshan Station, Coastal East Antarctica[J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2019, 12(3): 271-288.
- [23] 周俊键, 张学习, 钱明芳, 等. 常见结构材料低温性能研究进展[J]. *航空材料学报*, 2024, 44(2): 72-86.
- ZHOU J J, ZHANG X X, QIAN M F, et al. Research Progress on Low-Temperature Properties of Common Structural Materials[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2024, 44(2): 72-86.
- [24] 裴家明. 超低温环境下钢筋的力学性能试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- PEI J M. Experimental Study on Mechanical Properties of Steel Bars under Ultra-Low Temperature Environment[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [25] 艾峥嵘, 于凯, 吴红艳, 等. 超低温轧制 304 奥氏体不锈钢马氏体逆相变及组织表征[J]. *精密成形工程*, 2023, 15(12): 12-18.
- AI Z R, YU K, WU H Y, et al. Martensite Reverse Transformation and Microstructure Characterization of 304 Austenite Stainless Steel during Cryogenic Rolling[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2023, 15(12): 12-18.
- [26] 张玉玲, 潘际炎. 低温对钢材及其构件性能影响研究综述[J]. *中国铁道科学*, 2003, 24(2): 89-96.
- ZHANG Y L, PAN J Y. Study on Performance of Steel and the Components under Low Temperature[J]. *China Railway Science*, 2003, 24(2): 89-96.
- [27] 王元清, 王晓哲, 武延民. 结构钢材低温下主要力学性能指标的试验研究[J]. *工业建筑*, 2001, 31(12): 63-65.
- WANG Y Q, WANG X Z, WU Y M. The Experimental Study on the Main Mechanical Parameters of Structural Steel under Low Temperature[J]. *Industrial Construction*, 2001, 31(12): 63-65.
- [28] STEPHENS R, CHUNG J, GLINKA G. Low Temperature Fatigue Behavior of Steels—A Review[C]// *Proceedings of 39th Annual Earthmoving Industry Conference*. [s. l.]: SAE, 1979.
- [29] 阮裕尧. 低温对橡胶、工程塑料性能的影响[J]. *环境条件与试验*, 1991, 9(2): 19-27.
- RUAN Y Y. Effect of Low Temperature on Properties of Rubber and Engineering Plastics[J]. *Environmental Technology*, 1991, 9(2): 19-27.
- [30] 夏寅月, 陈清满, 蒋静俭. 目前我国极地考察破冰船综合保障能力分析评估[J]. *极地研究*, 2024, 36(2): 304-315.
- XIA Y Y, CHEN Q M, JIANG J J. Analysis and Evaluation of Current Chinese Polar Expedition Icebreaker Logistic Support Capability[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2024, 36(2): 304-315.
- [31] 彭文山, 辛永磊, 温杰平, 等. 极地冰覆盖下变温和恒温对高强钢腐蚀影响研究[J/OL]. *中国腐蚀与防护学报*, 2024: 1-10[2024-07-30]. <https://link.cnki.net/urlid/21.1474.tg.20240726.1530.018>.
- PENG W S, XIN Y L, WEN J P, et al. Effects of Temperature Change and Constant Temperature on Corrosion of High Strength Steel under Polar Ice Cover Conditions[J/OL]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2024: 1-10[2024-07-30]. <https://link.cnki.net/urlid/21.1474.tg.20240726.1530.018>.
- [32] 崔中雨, 葛峰, 王昕. 极地极寒环境下材料腐蚀/老化研究进展[C]// *中国腐蚀与防护学会第十一届全国腐蚀与防护大会论文摘要集*. 青岛: 中国海洋大学, 2021.
- CUI Z Y, GE F, WANG X. Research Progress on Material Corrosion/Aging in Extremely Cold Polar Environments[C]// *Chinese Society for Corrosion and Protection Abstract Collection of Papers from the 11th National Conference on Corrosion and Protection*. Qingdao: Ocean University of China, 2021.
- [33] MIL-STD-810H, *Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests*[S].
- [34] DEF STAN 00-35, *Environmental Handbook for Defence Materiel*[S].
- [35] SHULGINOV B, MATVEYEV V. Impact Fatigue of Low-Alloy Steels and Their Welded Joints at Low Temperature[J]. *International Journal of Fatigue*, 1997, 19(8/9): 621-627.
- [36] 冯然, 潘金蒂. 金属材料腐蚀后疲劳有限元数值模拟与参数分析方法: CN202110403095.1[P]. 2022-07-15.
- FENG R, PAN J D. Finite Element Numerical Simulation and Parameter Analysis Method for Fatigue of Metal Materials after Corrosion: CN202110403095.1[P]. 2022-07-15.
- [37] 唐建鹏, 刘俊, 庄志鹏. LNG 船疲劳强度评估及低温影响的讨论[J]. *船海工程*, 2009, 38(4): 20-23.
- TANG J P, LIU J, ZHUANG Z P. Fatigue Strength Assessment of LNG Vessel and Discussion on the Influence of Low Temperature[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2009, 38(4): 20-23.
- [38] 冷文俊, 崔中雨, 王昕, 等. 低合金高强钢极地环境加速腐蚀试验谱编制与研究[J]. *材料开发与应用*, 2023, 38(3): 31-36.
- LENG W J, CUI Z Y, WANG X, et al. Preparation and Study of Accelerated Corrosion Test Spectrum of Low Alloy High Strength Steel in Polar Environment[J]. *Development and Application of Materials*, 2023, 38(3): 31-36.
- [39] 杨晓然, 彭小明, 杨小奎, 等. 多因素综合高原高寒气候环境模拟加速试验箱研制[J]. *装备环境工程*, 2020, 17(7): 27-33.
- YANG X R, PENG X M, YANG X K, et al. Development of Multifactor Integrated Frigid Plateau Climate Simulation and Acceleration Test Chamber[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2020, 17(7): 27-33.