

ICS 73.100.01

CCS D 10



团 体 标 准

T/CEATEC XXX—2025

深海多金属结核采集设备可靠性要求 及试验方法

Reliability requirements and test methods for deep-sea polymetallic nodule
collecting equipment

2025-X-XX 发布

2025-X-XX 实施

中国欧洲经济技术合作协会 发布

目 次

| | |
|---------------------|----|
| 前言 | II |
| 1 范围 | 1 |
| 2 规范性引用文件 | 1 |
| 3 术语和定义 | 1 |
| 4 可靠性要求 | 1 |
| 4.1 整机可靠性要求 | 1 |
| 4.2 关键单元可靠性要求 | 2 |
| 4.3 寿命要求 | 2 |
| 4.4 维修性要求 | 2 |
| 4.5 故障后恢复要求 | 3 |
| 4.6 环境适应性要求 | 3 |
| 5 试验条件 | 3 |
| 5.1 试验环境条件 | 3 |
| 5.2 试验设备及仪器 | 3 |
| 5.3 试验样品要求 | 4 |
| 6 试验方法 | 4 |
| 6.1 整机可靠性试验 | 4 |
| 6.2 关键单元可靠性试验 | 4 |
| 6.3 寿命试验 | 5 |
| 6.4 维修性试验 | 5 |
| 6.5 故障后恢复试验 | 5 |
| 6.6 环境适应性试验 | 5 |
| 7 数据处理 | 5 |
| 7.1 数据采集 | 5 |
| 7.2 指标计算 | 6 |
| 8 可靠性评定 | 6 |
| 8.1 评定指标 | 6 |
| 8.2 评定规则 | 6 |
| 8.3 评定报告 | 6 |

前言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国欧洲经济技术合作协会提出并归口。

本文件主要起草单位：。

本文件主要起草人：。

本文件为首次编制。

深海多金属结核采集设备可靠性要求及试验方法

1 范围

本文件规定了深海多金属结核采集设备的可靠性要求、试验条件、试验方法、数据处理及可靠性评定。

本文件适用于作业深度不小于4500m的深海多金属结核采集设备在研发、试验、验证及验收过程中的可靠性评价与验证。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 2423.1 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 2423.57 电工电子产品环境试验 第2-81部分：试验方法 试验Ei：冲击 冲击响应谱合成
- GB/T 2689.1 恒定应力寿命试验和加速寿命试验方法 总则
- GB/T 5080.1 可靠性试验 第1部分：试验条件和统计检验原理
- GB/T 5080.5 设备可靠性试验成功率的验证试验方案
- GB/T 5080.7 设备可靠性试验 恒定失效率假设下的失效率与平均无故障时间的验证试验方案
- GB/T 5170.14 环境试验设备检验方法 第14部分：振动（正弦）试验用电动式振动系统
- GB/T 32065.15 海洋仪器环境试验方法 第15部分：水压试验
- GB/T 35571 大洋多金属结核资源勘查规范
- GB/T 42904 金属和合金的腐蚀 海水管路动水腐蚀试验
- CB 20476 舰船钢质紧固件防腐涂层规范

3 术语和定义

GB/T 35571界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

可靠性 reliability

设备在规定条件下、规定时间或规定作业周期内完成预定功能而不发生失效的能力。

3.2

失效率 failure rate

单位时间或单位作业循环内设备发生失效的频率。

3.3

平均无故障时间 mean time between failures, MTBF

设备在无需维护或重大维修情况下，平均能够连续正常工作的时间。

4 可靠性要求

4.1 整机可靠性要求

4.1.1 平均无故障时间 (MTBF)

整机连续正常工作时间应 $\geq 5000\text{h}$ 或 ≥ 200 次作业循环。

4.1.2 作业循环成功率

作业循环成功率要求如下：

- a) 完整采集-提升-回收作业循环成功率应 $\geq 99\%$ ；
- b) 系统关键功能发生异常时，健康监测系統应及时报警并记录事件。

4.1.3 系统失效率

单位作业循环内系统失效率应 $\leq 2 \times 10^{-3}$ 。

4.2 关键单元可靠性要求

关键单元可靠性要求如下：

- a) 关键单元应具备可替换性及便于维护的接口设计，保证快速更换或修复；
- b) 关键单元失效不应导致整机作业循环中断超过一次连续作业；
- c) 不同单元可靠性应满足表1的要求。

表1 关键单元可靠性要求

| 关键单元 | 技术要求 |
|---------|-------------------------------------------------------|
| 水力提升系统 | 输送流量 $\geq 400\text{ m}^3/\text{h}$ ；矿浆浓度波动 $\pm 2\%$ |
| 定位导航系统 | 水平定位误差 $\leq 1\text{ m}$ ，垂直定位误差 $\leq 1\text{ m}$ |
| 健康监测系統 | 关键参数异常时 $\leq 1\text{ s}$ 内报警并记录 |
| 泵站与管道 | 压力波动 $\pm 5\%$ |
| 控制与电气单元 | 响应时间 $\leq 1\text{ s}$ ，控制指令执行准确率 $\geq 99\%$ |

4.3 寿命要求

4.3.1 整机设计寿命

整机设计寿命要求如下：

- a) 整机设计寿命应 ≥ 10 年或 ≥ 2000 次作业循环；
- b) 设计寿命内设备应保持关键性能指标稳定，包括流量、压力、定位精度等。

4.3.2 功能模块与关键部件寿命

功能模块与关键部件寿命要求如下：

- a) 水力提升泵站：连续运行寿命应 $\geq 5000\text{h}$ ；
- b) 关键传感器（如压力、流量、定位传感器）：连续测量寿命应 $\geq 3000\text{h}$ 或 ≥ 1000 次作业循环；
- c) 控制与电气单元：连续运行寿命应 $\geq 5000\text{h}$ ，在深海环境下应能保持稳定；
- d) 管道及连接件：耐压和耐腐蚀寿命应 ≥ 10 年。

4.3.3 寿命预警要求

关键部件寿命到达80%时，应提供预警信息。

4.4 维修性要求

4.4.1 维修可达性

维修可达性应符合以下要求：

- a) 关键部件应可在船上或作业平台快速更换，单个关键部件更换时间 $\leq 8\text{h}$ ；
- b) 关键单元的维修接口应易于操作，避免对其他部件造成干扰。

4.4.2 故障诊断能力

故障诊断能力应符合以下要求：

- a) 健康监测系統应具备故障诊断功能，能够实时识别关键部件的故障类型及位置；
- b) 系统应在故障发生 $\leq 1\text{ s}$ 内发出报警并记录相关数据，便于快速维修。

4.4.3 维护周期

常规检查周期应 ≥ 100 次作业循环或 ≥ 6 个月一次；

4.4.4 易操作性要求

易操作性要求如下：

- a) 维修操作应不依赖特种设备或复杂工具，普通技术人员在经过标准培训后即可完成；
- b) 所有维修操作步骤应明确标识，并提供详细操作说明书和维护手册支持。

4.5 故障后恢复要求

4.5.1 整机故障恢复

整机故障恢复应满足以下要求：

- a) 在单次作业循环中发生非关键故障时，整机应能在 $\leq 4\text{h}$ 内恢复正常作业，关键性能指标应保持不低于95%设计值；
- b) 在关键故障发生后，整机应能在 $\leq 8\text{h}$ 内恢复作业，或通过备用系统继续完成作业循环。

4.5.2 关键单元故障恢复

关键单元故障恢复时间应满足表2的要求。

表2 关键单元故障恢复时间

| 关键单元 | 故障类型 | 恢复要求 |
|----------|-------------|----------------------------------------------------|
| 水力提升泵站 | 泵站堵塞或局部故障 | $\leq 6\text{h}$ 更换或清理完成；泵流量恢复 $\geq 95\%$ |
| 控制与电气单元 | 控制单元失效或通信异常 | $\leq 4\text{h}$ 修复或切换备用系统；响应时间恢复 $\leq 1\text{s}$ |
| 传感器与监测系统 | 数据异常或传感器失效 | $\leq 2\text{h}$ 更换或修复；测量误差恢复 $\leq \pm 2\%$ |
| 管道及连接件 | 泄漏或密封失效 | $\leq 8\text{h}$ 更换或修复，压力恢复 $\pm 5\%$ |

4.6 环境适应性要求

4.6.1 水压适应性

设备及关键部件应能承受作业水深 $\pm 5\%$ 的静水压力，并保证连续工作不出现泄漏或功能异常。

4.6.2 温度适应性

整机及关键部件应能在水温 $0^\circ\text{C} \sim 10^\circ\text{C}$ 条件下连续作业，关键性能指标保持不低于设计要求。

4.6.3 振动与冲击适应性

振动与冲击适应性要求如下：

- a) 振动：模拟海底流体作用，频率 $1\text{Hz} \sim 50\text{Hz}$ ，峰值加速度 $\leq 0.5\text{g}$ ，连续运行应不影响设备功能；
- b) 冲击：模拟操作或碰撞冲击，峰值加速度 $\leq 3\text{g}$ ，持续时间 $\leq 10\text{ms}$ ，关键部件不应发生失效。

4.6.4 耐腐蚀性

所有金属部件及管道应耐海水长期浸泡而不降低可靠性指标，表面防腐涂层应符合CB 20476的要求。

5 试验条件

5.1 试验环境条件

5.1.1 实验室试验环境

温度 $15^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$ ，相对湿度 $45\% \sim 75\%$ ，大气压力 $86\text{kPa} \sim 106\text{kPa}$ ，无强电磁干扰（电场强度 $\leq 10\text{V/m}$ ，磁场强度 $\leq 0.5\text{mT}$ ），符合GB/T 5080.1中实验室试验环境要求。

5.1.2 深海模拟试验环境

采用深海高压试验舱，压力可调节范围 $0\text{MPa} \sim 60\text{MPa}$ ，温度可调节范围 $0^\circ\text{C} \sim 10^\circ\text{C}$ ，可模拟海流流速 $0\text{m/s} \sim 0.5\text{m/s}$ ，海底沉积物采用粒径 $0.1\text{mm} \sim 5\text{cm}$ 的模拟结核及淤泥，铺设厚度 $0 \sim 50\text{cm}$ 。

5.1.3 现场试验环境

选择作业深度 $4500\text{m} \sim 5500\text{m}$ 的深海多金属结核矿区，海流流速 $\leq 0.5\text{m/s}$ ，海底沉积物厚度 $10\text{cm} \sim 30\text{cm}$ ，多金属结核密度 $\geq 10\text{kg/m}^3$ 。

5.2 试验设备及仪器

试验设备及仪器应满足下列要求：

- a) 深海压力模拟装置：压力控制精度 $\leq \pm 2\%$ ，具备连续稳压能力；
- b) 温控系统：应具备 $0^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$ 范围内的控温能力，温度控制精度 $\leq \pm 0.5^\circ\text{C}$ ；
- c) 振动试验台：应能输出 $1\text{Hz} \sim 50\text{Hz}$ 、峰值加速度 $\leq 0.5\text{g}$ 的振动条件；
- d) 冲击试验装置：应能输出峰值加速度 $\leq 3\text{g}$ 、持续时间 $\leq 10\text{ms}$ 的机械冲击；

- e) 流量与压力测试系统：流量测量误差 $\leq \pm 1\%$ ，压力测量误差 $\leq \pm 0.5\%$ ；
- f) 导航与定位精度测试设备：测量精度应优于 0.1m ；
- g) 数据采集与健康监测系统测试仪器：应具备 1kHz 以上的采样频率，数据记录分辨率应满足相关试验要求；
- h) 腐蚀试验设备：应包括海水浸泡槽、疲劳加载装置、表面腐蚀分析仪等，满足长期浸泡与表面特性检测要求。

5.3 试验样品要求

- 5.3.1 试验样品应与批量生产的产品一致，具备完整的结构和功能，配备齐全的附件、备件及专用工具。
- 5.3.2 试验前应对样品进行外观检查、功能调试，确保无制造缺陷，各项性能指标应符合设计要求，并记录样品编号、生产批号、出厂日期及初始状态参数。

6 试验方法

6.1 整机可靠性试验

- 6.1.1 平均无故障时间（MTBF）试验
应按照GB/T 5080.7的规定执行。
- 6.1.2 作业循环成功率试验
应按照GB/T 5080.5的规定执行。
- 6.1.3 系统失效率试验
应按照GB/T 5080.7的规定执行。

6.2 关键单元可靠性试验

- 6.2.1 水力提升系统试验
应按照以下步骤进行：
 - a) 按额定工作工况启泵并稳态运行至少 8h ；
 - b) 采用校准流量计连续记录流量；每 10min 记录一次，持续整个试验；
 - c) 在稳态运行期间每小时采集一次矿浆样品，测定矿浆质量浓度；
 - d) 在运行过程中人工引入短时扰动（如流量突降、阀门调节）并记录系统恢复情况。
- 6.2.2 定位导航系统试验
应按照以下步骤进行：
 - a) 在试验场布设不小于5个基准点并经高精度测定（作为真值）；
 - b) 在不同工况下至少采集50次定位数据，记录水平与垂直坐标；
 - c) 计算每次测量值与真值的误差。
- 6.2.3 健康监测系统试验
应按照以下步骤进行：
 - a) 在系统运行中，按计划依次注入代表性的异常信号（如压力突升、流量突降、振动异常、通信故障等），每类异常重复3次；
 - b) 数据采集系统记录异常发生时间与报警触发时间；
 - c) 检查报警记录与事件日志完整性。
- 6.2.4 泵站与管道试验
应按照以下步骤进行：
 - a) 在额定工况下运行并记录静态与动态压力，测试持续时间不少于 8h ；
 - b) 在运行期间人为引入压力扰动，控制系统使压力在额定压力上下波动，幅度为 $\pm 5\%$ 并持续指定周期（如 $10\text{min}/\text{次}$ ），重复10次；
 - c) 使用振动台或等效手段对管道进行模拟振动试验并记录泄漏与连接松脱情况。
- 6.2.5 控制与电气单元试验
应按照以下步骤进行：
 - a) 在正常运行工况下，连续发送不少于100次不同类型的控制指令（启停、工况切换、参数调整等）；

- b) 用数据采集系统记录每次指令发出时间与执行完成时间；
- c) 在发送指令过程中，随机插入通信扰动或短时电源波动以验证系统鲁棒性；
- d) 统计响应时间（执行完成时间-指令发出时间）和执行正确率。

6.3 寿命试验

6.3.1 使用寿命试验

应按照GB/T 2689.1的规定执行。

6.3.2 寿命预警试验

应按照以下步骤进行：

- a) 在寿命试验过程中，利用寿命模型（磨损/漂移/累计循环数）设定达到80%寿命的阈值；
- b) 人为模拟部件寿命衰减，观察系统是否自动触发寿命预警信号，检查预警日志、报警内容与状态标识是否正确。

6.4 维修性试验

6.4.1 维修可达性试验

应按照以下方法进行：

- a) 关键部件更换时间验证：将设备置于船上或作业平台模拟环境中，按照维护手册进行关键部件拆卸与更换操作，使用计时装置记录完整更换过程所需时间；
- b) 维修接口可操作性验证：对关键单元的维护接口执行开盖、连接、断开等操作，检查操作空间是否充足，工具是否能够自由进入，在操作过程中观察是否会触碰、干扰相邻部件。

6.4.2 故障诊断能力试验

应按照以下方法进行：

- a) 故障识别准确性验证：对关键部件模拟典型故障，启动健康监测系统，观察系统是否自动识别故障类型与位置，记录诊断结果并与预设故障进行比对；
- b) 报警响应时间验证：在系统正常运行状态下，施加故障触发信号或模拟故障条件，使用精密计时装置记录从故障发生到系统发出报警的时间。

6.4.3 维护周期验证方法

维护周期验证方法如下：

- a) 按照设备作业循环模拟系统运行 ≥ 100 次循环或进行相当于6个月的等效加速试验；
- b) 在试验过程中，不进行除规定检查外的额外维护操作；
- c) 到达维护周期节点时，依据维护手册进行检查，记录部件磨损、性能漂移及维护需求。

6.5 故障后恢复试验

依次模拟非关键故障、关键故障及关键单元的主要故障类型，在人工触发或系统自检判定故障后启动计时，在修复、切换备用系统或恢复正常运行状态后停止计时，计算故障恢复时间。

6.6 环境适应性试验

6.6.1 水压试验

应按照GB/T 32065.15的规定执行。

6.6.2 温度试验

应按照GB/T 2423.1的规定执行。

6.6.3 振动与冲击试验

振动试验应按照GB/T 5170.14的规定执行，冲击试验应按照GB/T 2423.57的规定执行。

6.6.4 耐腐蚀性试验

应按照GB/T 42904的规定执行。

7 数据处理

7.1 数据采集

试验过程中对整机及关键单元的性能参数、故障事件、维修时间和环境条件进行实时记录，确保数据完整可追溯。

7.2 指标计算

7.2.1 单位时间失效率

单位时间失效率按照式（1）计算。

$$\lambda = \frac{N_f}{T} \quad (1)$$

式中：

λ ——失效率，单位为次/h；

N_f ——故障次数；

T ——累计运行时间，单位为h。

7.2.2 平均无故障时间（MTBF）

平均无故障时间按照式（2）计算。

$$MTBF = \frac{T}{N_f} \quad (2)$$

式中：

λ ——失效率，单位为次/h；

N_f ——故障次数；

T ——累计运行时间，单位为h。

7.2.3 平均修复时间（MTTR）

平均修复时间按照式（3）计算。

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^{N_f} t_i}{N_f} \quad (3)$$

式中：

t_i ——第*i*次故障的修复时间。

8 可靠性评定

8.1 评定指标

8.1.1 定性指标

设备是否符合本标准第4章的要求。

8.1.2 定量指标

MTBF、MTTR、单位时间失效率等。

8.2 评定规则

8.2.1 所有试验项目完成后，依据试验数据计算各项可靠性指标，若所有指标均满足本标准第4章的要求，则评定该采集设备可靠性合格；若有一项及以上指标不满足要求，则评定为不合格。

8.2.2 对于不合格的设备，应分析故障原因，提出改进措施，对改进后的设备重新进行试验，直至所有指标满足要求。

8.3 评定报告

应包括试验样品信息、试验条件、试验方法、试验数据、数据处理过程、可靠性指标计算结果、评定结论及改进建议等内容。