



中华人民共和国国家标准

GB/T 44319—2024

月球与深空探测用同位素温差电池

Radioisotope thermoelectric generator of lunar and deep space probe

2024-08-23 发布

2025-03-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 技术要求	1
4.1 功能要求	1
4.2 产品组成	2
4.3 电性能要求	2
4.4 质量要求	3
4.5 外观要求	3
4.6 材料要求	3
4.7 机械接口	3
4.8 热接口	3
4.9 电接口	3
4.10 漏率要求	3
4.11 辐射剂量当量率要求	3
4.12 核防护要求	4
4.13 寿命要求	4
4.14 可靠性要求	4
4.15 环境适应性要求	4
4.16 紧急事故适应性要求	4
5 试验方法	4
5.1 通则	4
5.2 电性能	5
5.3 质量	5
5.4 外观	5
5.5 材料	5
5.6 机械接口	5
5.7 热接口	5
5.8 电接口	5
5.9 漏率	5
5.10 辐射剂量当量率	6
5.11 核防护	6
5.12 寿命	6

5.13	可靠性	6
5.14	环境适应性	6
5.15	紧急事故适应性	6
6	检验规则	7
6.1	检验分类	7
6.2	检验条件	7
6.3	检验的项目、要求和方法	7
6.4	鉴定与交收检验要求	8
6.5	判定规则	8
7	标志、标签和随行文件	8
8	包装、运输和贮存	9
9	安装和使用要求	9
9.1	上器安装	9
9.2	预定用途和使用要求	9

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。

本文件由全国宇航技术及其应用标准化技术委员会（SAC/TC 425）提出并归口。

本文件起草单位：北京空间飞行器总体设计部、中国电子科技集团公司第十八研究所、中国原子能科学研究院、中国航天标准化研究所。

本文件主要起草人：陈建新、张焯、陈阳、雷英俊、侯旭峰、唐显、陈向东、马巨印、李海飞、泉浩芳、张有为、吕冬翔、秦少鹏、刘自军、斯东波、王雪、李轩、张宁康。

月球与深空探测用同位素温差电池

1 范围

本文件规定了月球与深空探测用同位素温差电池的技术要求、试验方法、检验规则、标志、标签和随行文件、包装、运输和贮存、安装和使用要求。

本文件适用于月球与深空探测用同位素温差电池的设计、生产、试验和验收。

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 191 包装储运图示标志
- GB/T 2423.22 环境试验 第2部分：试验方法 试验N：温度变化
- GB/T 3190 变形铝及铝合金化学成分
- GB/T 4960.4 核科学技术术语 放射性核素
- GB 11806 放射性物品安全运输规程
- GB/T 34516 航天器振动试验方法
- GB/T 34522 航天器热真空试验方法
- GB/T 35049—2018 真空技术 四极质谱检漏方法
- GB/T 36176 真空技术 氦质谱真空检漏方法
- GB/T 37750 稳定同位素应用术语及产品命名规则
- GB/T 37963 电子设备可靠性预计模型及数据手册

3 术语和定义

GB/T 4960.4 和 GB/T 37750 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

同位素温差电池 radioisotope thermoelectric generator; RTG

利用半导体材料的塞贝克效应，将放射性同位素的衰变热直接转换成电能的一种设备。

3.2

同位素热源 radioisotope heat unit; RHU

一种利用放射性同位素的衰变产生热量的组件。

4 技术要求

4.1 功能要求

RTG 的功能是将同位素衰变产生的热能部分转化为电能，为航天器或者器上设备提供电能，同时为航天器或者器上设备提供热能，用于维持设备温度。

4.2 产品组成

RTG 在结构上包括同位素热源、温差发电模块、隔热材料、金属壳体、热控涂层、电缆及接插件，见图 1。

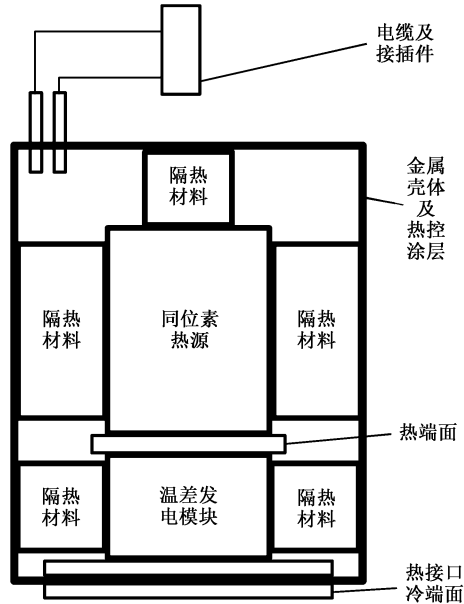


图 1 同位素温差电池组成结构示意图

4.3 电性能要求

在正常工作温度（指 RTG 壳体外表面温度，宜为 0℃~120℃）范围内，输出电缆末端电连接器处测得的输出电性能要求如下。

- a) 最大功率点处输出效率（输出电功率占RHU热功率比例）见表1。

表 1 最大功率点处输出效率

序号	RHU热功率/W	输出电功率/W	输出效率/%
1	≤50	≤1.0	≥2.0
2	50<RHU热功率≤200	1.0<输出电功率≤6.0	≥3.0
3	200<RHU热功率≤500	6.0<输出电功率≤20.0	≥4.0
4	500<RHU热功率≤1 000	20.0<输出电功率≤50.0	≥5.0
5	>1 000	>50.0	≥6.0

- b) 输出电压：应根据温差发电模块中单组器件的电流—电压特性，选取单组器件最大功率点附近电压作为工作电压，通过温差发电模块中器件串并设计，确保电池输出电压满足专用技术文件规定要求。
- c) 输出内阻：应远小于负载阻值，具体输出内阻应满足专用技术文件规定要求。
- d) 短路电流：应小于电路中器件限流要求，具体短路电流满足专用技术文件规定要求。
- e) 衰减率：RTG在轨运行的第一年输出电功率年衰减率不大于8%，第二年开始至寿命末期，输出电功率年衰减率不大于4%。

4.4 质量要求

在满足深空探测航天器的力学环境条件基础上，RTG 质量宜采用轻量化设计，RTG 质量应满足专用技术文件的要求。

4.5 外观要求

RTG 应表面光滑，无裂纹、毛刺等表面缺陷。

4.6 材料要求

RTG 原材料的选用及执行标准见表 2。

表 2 RTG 原材料的选用及执行标准

部件名称	原材料	执行标准
金属壳体	铝合金	GB/T 3190
温差发电模块	半导体温差电材料	专用技术文件
隔热材料	气凝胶	专用技术文件

4.7 机械接口

RTG 应带有安装支架，支架末端设计防脱落螺钉或者快速安装接口，接口尺寸满足专用技术文件规定要求。

4.8 热接口

RTG 冷端面一般设计为换热接触面，RTG 在冷端面上提供平面区域，用于安装取热装置的换热器。具体热接口要求如下：

- a) 相对 RTG 供热功率，平面区域面积应不小于 $1 \text{ cm}^2/\text{W}$ ；
- b) 平面区域平面度应优于 $0.1 \text{ mm}/100 \text{ mm}$ ；
- c) 连接接口等应满足专用技术文件规定要求。

4.9 电接口

电接口要求如下：

- a) RTG 提供电能输出端口，并用耐高温线引出壳体外，引线末端带通用接插件，接插件接口满足专用技术文件规定要求；
- b) RTG 提供电能输出端口与 RTG 外壳的绝缘阻值应大于 $20 \text{ M}\Omega$ ；
- c) 金属壳体上任意两点间的直流电阻应不大于 $10 \text{ m}\Omega$ （在 1A 或 500 mA 电流下测试）。

4.10 漏率要求

RTG 外壳漏率不大于 $3 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ，并根据产品初始充气量和地面存储时间适当调整，确保存储期产品内部处于正压状态。

4.11 辐射剂量当量率要求

每 1 W 的 RHU 热功率，距 RTG 中心 1 m 处的辐射剂量当量率不大于 $6.7 \times 10^{-4} \text{ mSv/h}$ ，随着 RHU 热功率增加辐射剂量当量率正比例增加。

注：如 RHU 热功率 1 000 W 时，距 RTG 中心 1 m 处的辐射剂量当量率不大于 0.67 mSv/h。

4.12 核防护要求

核防护要求如下。

- a) RHU 的包壳应设有透氦、但又能阻止放射性活性物质排散到环境中的装置。为保证同位素衰变产生的氦气能及时排出，应根据内部同位素产气量，确定透氦阻钷装置最小漏率。每 1 W 的 RHU 热功率，透氦阻钷装置最小漏率应不小于 $5.5 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ；为确保阻钷功能，在非紧急事故的产品使用条件下该装置阻止放射性物质同周围环境相互接触的包壳漏气率应不大于 $1.6 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。
- b) RHU 表面放射性物质污染不超过环境本底水平。

4.13 寿命要求

基于月球基地和远日探测应用需求，寿命要求为：

- a) 地面存储及测试：不少于 12 个月；
- b) 在轨飞行：不少于 8 年。

具体 RTG 地面存储和在轨工作的时间应满足专用技术文件规定要求。

4.14 可靠性要求

RTG 的可靠性指标应不低于 0.99。

4.15 环境适应性要求

RTG 应根据专用技术文件规定要求开展环境适应性设计和验证，包括力学环境、热环境、空间辐照等环境。验证 RTG 性能应满足 4.3~4.12 的要求。

4.16 紧急事故适应性要求

为了确保 RTG 及内部 RHU 在意外紧急事故情况下的安全性，应开展紧急事故影响设计和验证，RHU 通过包壳设计，在紧急事故影响试验作用后，应确保 RHU 的安全，RHU 包壳应保持密封状态，即不准许放射性活性物质泄漏到周围环境中。设计覆盖项目应包括：

- a) 适应发射事故后，RHU 再入空气动力学过热持续高温过程；
- b) 适应发射事故后，RHU 以高温、高速、不同角度再入撞击障碍物过程；
- c) 适应发射事故后，RHU 经历再入高温后落入水中的热冲击过程；
- d) 适应发射事故后，RHU 落入深海沟里的耐高压情况；
- e) 适应发射场火灾中，RHU 经历的燃烧高温过程；
- f) 适应存储、运输和操作故障状态下，RHU 经历的高温情况；
- g) 适应存储、运输和操作故障状态下，RHU 经历的自由落体撞击情况；
- h) 适应存储、运输和操作故障状态下，RHU 经历的外物撞击情况。

具体温度、速度、角度、压力、高度、撞击物质量等条件应满足专用技术文件规定要求。

5 试验方法

5.1 通则

在航天器总装、测试阶段，应采用无辐射的 RTG 测试模拟器替代 RTG 飞行件测试和试验。RTG 测试模拟器中除 RHU 采用电模拟件及供电输入接口替代外，其他部分结构与 RTG 飞行一致。对

RTG 测试模拟器的要求如下：

- a) RTG测试模拟器的电性能要求、外观及标识要求、机械接口、热接口、漏率要求、环境适应性要求与RTG飞行件一致；
- b) 对RTG测试模拟器无辐射剂量当量率要求、核防护要求、紧急事故适应性要求；
- c) RTG测试模拟器的质量、寿命、可靠性应满足专用技术文件规定要求；
- d) RTG测试模拟器根据5.2~5.9、5.11~5.14方法进行检验。

5.2 电性能

将RTG置于高低温试验箱，控制RTG处于在轨飞行的温度水平，每间隔0.5个月~1个月设置一个测试点，在工作温度范围内，测试RTG发电性能，测试点应至少覆盖工作温度最高温、最低温和常温。采用专用设备从输出接插件处测试RTG的输出电性能，最大功率点处的输出效率、电压、内阻、短路电流应满足4.3的要求。

通过不同测试点的多次电性能数据判断衰减率趋势，测试持续至每个间隔的衰减率趋于稳定，分析计算全寿命周期内的衰减率。

5.3 质量

用电子天平称量。

5.4 外观

用目视方法检查。

5.5 材料

检查原材料清单，如存在目录外选用、代料等情况则检查审批手续或其他过程性记录的完整性。

5.6 机械接口

用游标卡尺对RTG外形尺寸和安装孔距、孔径等进行检查，采用塞尺、刀口尺对安装面的平面度进行检查。

5.7 热接口

热接口试验方法如下：

- a) 用游标卡尺对RTG热接口表面的轮廓尺寸进行检查，计算确定换热面积；
- b) 采用塞尺、刀口尺对换热平面区域的平面度进行检查；
- c) 用游标卡尺对RTG热接口孔距和孔径等进行检查。

5.8 电接口

电接口试验方法如下：

- a) 采用数字万用表从RTG接插件处测量各节点与RTG外壳的阻值；
- b) 采用毫欧计从金属壳体上随机挑选若干点，测量任意两点间的直流电阻（在1 A或500 mA电流下测试）。

5.9 漏率

按GB/T 35049—2018中5.3的规定进行漏率测试。

5.10 辐射剂量当量率

采用辐射强度专用仪器测试距 RTG 中心 1 m 处的辐射剂量当量率。

5.11 核防护

依据 GB/T 36176, 采用氦质谱仪对 RTG 的热源部件 RHU 在零件状态进行漏率检测。采用专用设备对热源成品状态表面进行放射性活性物质检测。

5.12 寿命

产品鉴定研制过程中, 通过寿命试验结合外推分析评估产品寿命末期性能, 寿命试验要求模拟地面存储和在轨飞行的环境条件; 交付件应进行寿命分析评估。

5.13 可靠性

依据 GB/T 37963, 进行 RTG 可靠性预计, 检查可靠性指标符合性。

5.14 环境适应性

RTG 应按规定开展力学正弦振动试验、随机振动试验、冲击试验、热循环试验、热真空试验, 具体试验方法如下:

- a) RTG 如采用未经飞行验证的新材料应进行空间辐照试验, 试验条件依据相关航天器环境试验规范;
- b) 力学振动试验方法按 GB/T 34516 的规定执行;
- c) 热循环试验方法按 GB/T 2423.22 的规定执行;
- d) 热真空试验方法按 GB/T 34522 的规定执行;
- e) 其他试验依据行业相关标准或者专用技术文件规定执行。

5.15 紧急事故适应性

紧急事故影响试验在鉴定件中开展, 采用包壳结构与正样产品一致的 RHU 鉴定件参与试验, 其内部源芯采用物理、化学性质相近的非放射性模拟源芯。具体试验方法如下。

- a) 模拟空气动力学过热试验。宜采用高温炉对鉴定件进行有氧加热, 模拟飞行产品所经历的高温环境, 保温一段时间, 然后随炉冷却。
- b) 高速撞击试验。宜采用空气炮加速鉴定件撞击固定的刚性靶件; 撞击前, 鉴定件由内置加热丝的保温弹托在炮室内加热; 鉴定件撞击速度通过空气炮管内的激光测速仪采集, 撞击角度通过高速摄像机拍摄图像测量确定。
- c) 热冲击试验。宜在高温炉和水箱容器之间进行。先由高温炉对鉴定件进行加热, 完成保温后, 将鉴定件快速转移至室温水。
- d) 压力试验。宜在压力箱内给鉴定件施加高压, 持续一定时间。
- e) 模拟发射场火灾试验。宜采用电弧加热自由射流试验技术以及轨道模拟试验技术, 用台阶式变化过程来近似模拟燃烧带来的温度变化曲线, 通过控制进气流量和电弧功率来模拟发射场火灾条件下热源所受的温度影响。
- f) 耐热试验。宜采用高温炉对鉴定件进行有氧加热, 模拟飞行产品所经历的高温环境, 保温一段时间, 然后随炉冷却。
- g) 自由落体掉落试验。鉴定件从一定高度处, 自由落体到刚性表面。
- h) 重锤撞击试验。用一定质量的钢棒从一定高度冲击鉴定件。

RHU 在紧急事故影响试验作用后，应确保 RHU 的安全，其包壳应保持密封状态，不允许放射性活性物质泄漏到周围环境中。

6 检验规则

6.1 检验分类

本文件规定的检验分为：

- a) 鉴定检验；
- b) 交收检验。

6.2 检验条件

6.2.1 检验环境条件

除电性能检测、环境适应性检测等另有规定外，应在下列环境条件下进行检验：

- a) 温度：10℃~35℃；
- b) 相对湿度：不大于80%；
- c) 气压：试验室大气压；
- d) 光照度：不小于300 lx。

6.2.2 检验仪器及设备

检验用的仪器、设备应经有资质的计量部门检验计量检查合格，并在有效期内使用。检验用的仪器、设备的测量范围和准确度应满足测试要求。

6.3 检验的项目、要求和方法

鉴定检验和交收检验的项目、要求和方法按表3的规定执行。

表3 检验项目表

序号	项目	鉴定检验	交收检验	要求	检验方法	
1	电性能要求	工作温度	●	●	4.3	5.2
2		最大功率点	●	●	4.3	5.2
3		输出电压	●	●	4.3	5.2
4		输出内阻	●	●	4.3	5.2
5		短路电流	●	●	4.3	5.2
6		衰减率	●	●	4.3	5.2
7	质量要求	●	●	4.4	5.3	
8	外观要求	●	●	4.5	5.4	
9	材料要求	●	●	4.6	5.5	
10	机械接口	●	●	4.7	5.6	
11	热接口	●	●	4.8	5.7	
12	电接口	●	●	4.9	5.8	

表3 检验项目表（续）

序号	项目	鉴定检验	交收检验	要求	检验方法
13	漏率要求	●	●	4.10	5.9
14	辐射剂量当量率要求	●	●	4.11	5.10
15	核防护要求	●	●	4.12	5.11
16	寿命要求	●	●	4.13	5.12
17	可靠性要求	●	●	4.14	5.13
18	环境适应性要求	●	●	4.15	5.14
19	紧急事故适应性要求	●	—	4.16	5.15

注：“●”表示必检项目；“—”表示不检项目。

6.4 鉴定与交收检验要求

6.4.1 需鉴定检验的情况

出现如下情况之一时，应进行鉴定检验：

- a) 新研制；
- b) 图样、材料、加工工艺和装配过程发生变化，并可能引起产品较大的状态或性能变化；
- c) 应用环境超出本文件规定的范围。

6.4.2 鉴定检验的数量

鉴定检验的数量应不少于1台。紧急事故适应性检验为破坏性试验，可研制多台鉴定件分别进行不同的试验验证。

6.4.3 交收检验的数量

交付的产品应100%进行交收检验。

6.5 判定规则

所有检验项目均符合要求判定为合格；若有一项不合格，在故障归零后，允许有一次对不合格项进行重检，重检仍未通过的，并确认属于产品自身质量的原因，则判定该产品不合格。

7 标志、标签和随行文件

RTG产品的标志、标签和随行文件符合如下要求。

- a) RTG标志应满足专用技术文件的要求，标志应置于表面显著、平坦的区域，醒目、清晰、牢固。标志内容包括：
 - 1) 产品代号；
 - 2) 编号；
 - 3) 研制阶段；
 - 4) 出厂日期；
 - 5) 研制单位。
- b) 包装箱内应有相关文件，包括产品证明书、装箱单和产品说明书；包装箱外应标明产品名称、

- 代号、编号、产品数量、箱体尺寸、总质量、制造厂家和包装日期等。
- c) 包装储运图示标志符合GB/T 191和GB 11806的规定。

8 包装、运输和贮存

RTG产品的包装、运输和贮存符合如下要求。

- a) 配有专用包装箱，包装箱应满足放射性物品运输标准要求，提供I类放射性物品运输容器制造许可证。
- b) 产品在包装箱内应按自然状态放置，具有较好的散热措施。
- c) 运输过程应满足GB 11806的有关规定，应避免受到机械撞击和雨雪淋袭，运输环境应无腐蚀性气体。
- d) RTG的贮存环境应满足以下条件：
 - 1) 无腐蚀性气体；
 - 2) 环境温度： $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；
 - 3) 环境相对湿度：不超过90%；
 - 4) 存储环境具有防辐射装置，并实时监测RTG温度和空气中气溶胶数值。

9 安装和使用要求

9.1 上器安装

9.1.1 上器前的接口验证要求

RTG上器前的接口验证需符合如下要求：

- a) 在RTG正式安装前，应进行真实RTG与真实航天器的机、电、热接口对接试验，验证接口匹配性；
- b) 接口对接试验应模拟RTG装器全过程；
- c) 接口对接试验不应离开RTG的贮存场所；
- d) 若RTG装器过程应使用专用工装，接口对接试验时应使用真实工装。

9.1.2 上器安装要求

RTG上器安装需符合如下要求。

- a) 同位素热源飞行件应取得空间使用许可证。
- b) RTG的安装时机宜在发射场完成。
- c) RTG安装前应进行模拟发射场安装环境的操作演练，验证安装工艺的正确性和场地适应性；RTG安装前，应对运输路线及安装所在场地采取安全管控措施，并制定故障预案，以应对可能的风险事件。
- d) RTG的安装应借助专用工装完成，安装工装应保证操作人员在较短的时间内完成安装工作，同时具有一定的轻便性。
- e) RTG安装后，应设置辐射警示标志。

9.2 预定用途和使用要求

9.2.1 预定用途

RTG可用于航天器仪器设备长期供电和供热，当航天器长时间运行于太阳能缺乏的轨道时，如远日

深空探测、适应月夜的月球全天候探测，宜使用同位素温差电池。

9.2.2 使用要求

RTG 不供电时，产品应处于输出短路保护状态或者带负载输出状态。

载人航天器的 RTG 应布置在非人员长期活动区域，并设立安全警示，并评估对航天器其他设备的辐照影响。



