



中华人民共和国国家军用标准

FL 6113

GJB 11698-2024

空间四结太阳能电池规范

Specification for four-junction space solar cells

2025-01-07 发布

2025-03-01 实施



中央军委装备发展部 颁布

目 次

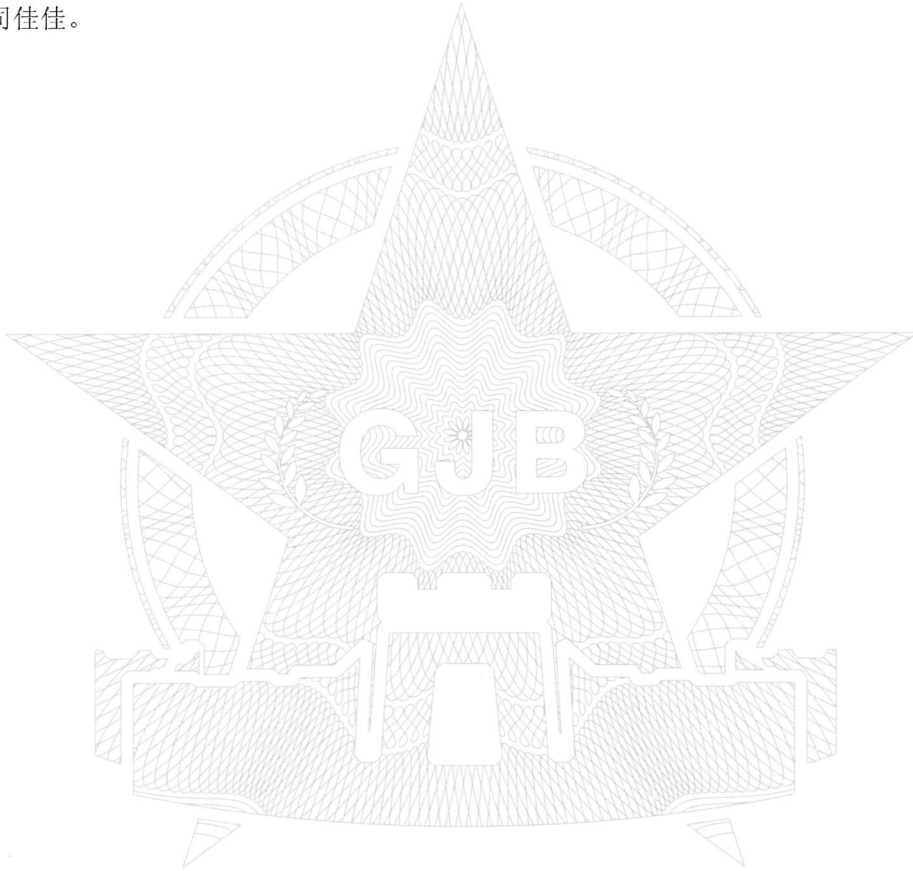
前言	II
1 范围	1
2 引用文件	1
3 要求	1
3.1 材料	1
3.2 结构	1
3.3 尺寸	1
3.4 面密度	1
3.5 外观和机械缺陷	2
3.6 产品标志	3
3.7 性能	3
3.8 电极可焊性和焊点抗拉强度	3
3.9 电极牢固性	3
3.10 减反射膜牢固性和缺陷	3
3.11 环境适应性	4
4 质量保证规定	4
4.1 检验分类	4
4.2 检验条件	4
4.3 鉴定检验	4
4.4 质量一致性检验	7
4.5 试验方法	9
5 交货准备	13
5.1 单元包装要求	13
5.2 装箱	13
5.3 标志	14
5.4 贮存	14
5.5 运输	14
6 说明事项	14
6.1 预定用途	14
6.2 分类	14
6.3 订购文件中应明确的内容	14
6.4 术语和定义	14

前 言

本规范由中国电子科技集团有限公司提出。

本规范起草单位：中国电子科技集团公司第十八研究所、天津恒电空间电源有限公司、中国空间技术研究院通信与导航卫星总体部。

本规范主要起草人：肖志斌、刘汉英、孙 强、欧 伟、铁剑锐、许 军、许 峰、孙希鹏、杜永超、司佳佳。



空间四结太阳能电池规范

1 范围

本规范规定了空间四结太阳能电池的要求、质量保证规定和交货准备等内容。

本规范适用于正向生长、晶格失配(UMM)技术制备的 $\text{AlGaInP}/\text{GaInP}/\text{InGaAs}/\text{Ge}$ 或反向生长、晶格失配(IMM)技术制备的 $\text{GaInP}/\text{GaAs}/\text{GaInAs}/\text{GaInAs}$ 刚性空间四结太阳能电池(以下简称“电池”)。

2 引用文件

下列文件中的有关条款通过引用而成为本规范的条款。凡注日期或版次的引用文件,其后的任何修改单(不包括勘误的内容)或修订版本都不适用于本规范,但提倡使用本规范的各方探讨使用其最新版本的可能性。凡不注日期或版次的引用文件,其最新版本适用于本规范。

GB/T 6494 航天用太阳能电池电性能测试方法

GJB 1976 空间用抗辐照玻璃盖片规范

3 要求

3.1 材料

电池的主体材料为 AlGaInP 、 GaInP 、 InGaAs 、 GaAs 、 Ge 等半导体材料,选择电池电极材料时应考虑其与衬底的热膨胀特性以及可焊性,选择减反射膜材料时应考虑其折射率与玻璃盖片的光学匹配性。

3.2 结构

电池结构如图 1 所示,从上至下四个 pn 结按半导体材料禁带宽度由大到小排列,上、下表面均有金属电极,用于收集电流,上表面还有减反射膜,目的是减小半导体表面对光的反射。

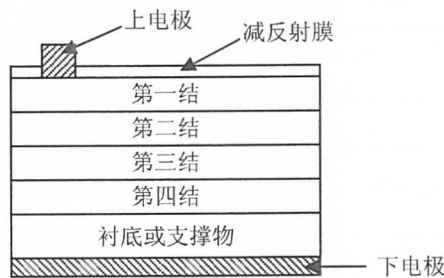


图 1 四结太阳能电池结构示意图

3.3 尺寸

典型电池尺寸应符合表 1 要求。

3.4 面密度

典型的 IMM-4J 电池面密度为 $0.06\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0.01\text{g}/\text{cm}^2$, 典型的 UMM-4J 电池面密度为 $0.10\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0.01\text{g}/\text{cm}^2$ 。

表 1 典型四结太阳电池电池尺寸

单位为毫米

编号	长	宽	缺角
1	40.3 ± 0.1	30.6 ± 0.1	$(3.4 \pm 0.5) \times (4.3 \pm 0.5)$
2	60.4 ± 0.1	39.8 ± 0.1	$(4.0 \pm 0.5) \times (4.0 \pm 0.5)$
3	80 ± 0.1	40 ± 0.1	$(13.5 \pm 0.5) \times (13.5 \pm 0.5)$

3.5 外观和机械缺陷

3.5.1 外观

电池上表面的颜色应均匀一致，无明显花纹和目视可见裂纹。

3.5.2 机械缺陷

电池的机械缺陷大小和数量应符合如下规定：

- 电池表面缺损、崩边、缺口(如图 2)缺口不应在焊接区域，最大尺寸应不超过表 2 所示最大允许尺寸；当电池面积未在表 2 中列出时，按表 2 中小于且最接近电池面积的栏执行；
- 电池表面缺损、崩边、缺口的数量不限，累计面积应不超过电池总面积的 5%。

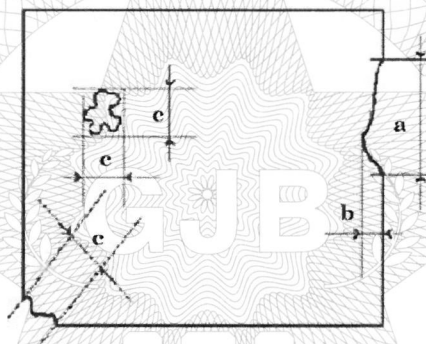


图 2 电池表面机械缺陷示意

表 2 电池表面机械缺陷最大允许尺寸

电池面积 cm^2	缺陷尺寸 mm		
	a	b	c
4	1	0.7	1.0
8	2	0.8	1.5
12	3	0.9	2.0
25	4	1.0	2.5
32	5	1.1	3.0

3.5.3 电极外观

电极上不应有穿透电极、露出里层金属或半导体的直径大于 0.3mm 的针孔，电极上不应有脱皮或分层的痕迹。

3.5.4 电极缺陷

电池上电极主栅线不允许中断。电池细栅线缺损最大长度应不大于总长度的 5%，缺损数量不限。栅线缺损长度小于 0.25mm 可忽略不计。

电池下电极缺损面积应不大于总面积的 10%。

3.6 产品标志

电池上标识的标志应位于电池背面不影响焊接的区域，且经有机溶剂浸泡后仍应清晰可见。

3.7 性能

3.7.1 电性能

电池在 AM0、一个太阳常数、25℃下的电性能应符合表 3 中的要求。

表 3 空间四结太阳电池电性能要求

电池类型	最小开路电压 V	最小短路电流密度 mA/cm ²	最小转换效率 %	平均转换效率 %	定点电压 V
IMM-4J-A	3.16	16.1	33.0	≥34.0	2.60
IMM-4J-B	3.12	16.0	32.0	≥33.0	2.60
UMM-4J-A	3.20	15.5	33.0	≥34.0	2.65
UMM-4J-B	3.25	14.9	30.5	≥31.5	2.70
UMM-4J-C	3.60	11.5	29.0	≥30.0	3.00

3.7.2 反向特性

3.7.2.1 反向偏置

电池的电性能应满足表 3 中最小开路电压、最小短路电流密度、最小转换效率的要求。

3.7.2.2 恒压反向偏置

电池在表 3 规定的定点电压下的输出电流衰降的平均值应不大于 2%。

3.7.2.3 反向偏置交变

电池在表 3 规定的定点电压下的输出电流衰降的平均值应不大于 2%。

3.7.3 盖片增益

电池粘接盖片前后的平均短路电流变化应不大于 ±3%。

3.7.4 太阳吸收率和半球向辐射率

3.7.4.1 太阳吸收率

电池粘接盖片后，平均太阳吸收率(α_s)应不大于 0.92。

3.7.4.2 半球向辐射率

电池粘接盖片后，平均半球向辐射率(ϵ_H)应为 0.82 ± 0.03 。

3.7.5 翘曲

电池翘曲度与电池长边之比应不大于 0.02。

3.7.6 抗弯强度

电池的抗弯强度应不小于 80MPa。

3.8 电极可焊性和焊点抗拉强度

3.8.1 焊接后电性能衰降

焊接前、后任意一个电池在表 3 规定的定点电压下的输出电流衰降应不大于 2.5%，输出电流衰降的平均值应不大于 2.0%。

3.8.2 焊点抗拉强度

焊点的抗拉强度应不小于 0.83N/mm^2 。

3.9 电极牢固性

进行电极牢固性试验后电极缺陷应符合 3.5.4 的要求。

3.10 减反射膜牢固性和缺陷

电池的减反射膜不应有直径大于 1.8mm 的空白；直径 0.6mm~1.8mm 的空白在每平方厘米内不应

多于 5 个；直径小于 0.6mm 的空白可以忽略不计。允许存在镀膜夹具造成的空白，但空白面积不应大于电池总面积的 1%。

3.11 环境适应性

3.11.1 温度冲击

3.11.1.1 温度冲击后外观和机械缺陷

电池的外观和机械缺陷应符合 3.5.1 和 3.5.2 的规定。

3.11.1.2 温度冲击后电性能

任意一个电池在表 3 规定的定点电压下的输出电流衰减应不大于 3.5%，电池在定点电压下输出电流衰减的平均值应不大于 2.5%。

3.11.1.3 温度冲击后焊点抗拉强度

电池的焊点抗拉强度应不小于 0.83N/mm^2 。

3.11.2 稳态湿热

3.11.2.1 稳态湿热后外观和机械缺陷

电池的外观和机械缺陷应符合 3.5.1 和 3.5.2 的要求。

3.11.2.2 稳态湿热后电性能

任意一个电池在表 3 规定定点电压下的输出电流衰减应不大于 3.5%，电池定点电压输出电流衰减的平均值应不大于 2.5%。

3.11.2.3 稳态湿热后电极牢固性

上电极被剥去的部分应不大于上电极总面积的 5%，下电极被剥去的部分应不大于下电极总面积的 10%。

3.11.3 带电粒子辐照

辐照后电池 IMM-4J-A、IMM-4J-B、UMM-4J-A 的最大输出功率衰减的平均值应不大于 18%，UMM-4J-B、UMM-4J-C 的最大输出功率衰减的平均值应不大于 15%。

4 质量保证规定

4.1 检验分类

本规范规定的检验分类如下：

- a) 鉴定检验(见 4.3)；
- b) 质量一致性检验(见 4.4)。

4.2 检验条件

除另有规定外，应在下列条件下进行检验：

- a) 温度： $15^{\circ}\text{C}\sim 35^{\circ}\text{C}$ ；
- b) 相对湿度： $20\%\sim 80\%$ ；
- c) 气压：检验现场大气压力。

4.3 鉴定检验

4.3.1 检验时机

出现下列情况之一时，应进行鉴定检验：

- a) 新研制产品；
- b) 主要结构、材料或关键工艺有重大变化。

4.3.2 鉴定检验项目、分组及顺序

鉴定检验按表 4 规定分为 5 组，所有的检验应按表 4 规定的顺序进行。

表4 鉴定检验

检验项目	要求章条号	试验方法章条号	试验顺序(分组)				
			1组	2组	3组	4组	5组
尺寸	3.3	4.5.1	①				
面密度	3.4	4.5.2	②				
外观	3.5.1	4.5.3.1	③	①	①	①	①
机械缺陷	3.5.2	4.5.3.2	④	②	②	②	②
电极外观	3.5.3	4.5.3.3	⑤				
电性能	3.7.1	4.5.5.1	⑥	③	③	③	③
焊接后电性能衰减	3.8.1	4.5.6.1	⑦				
温度冲击	3.11.1	4.5.9.1	⑧				
温度冲击后外观和机械缺陷	3.11.1.1	4.5.9.1	⑨				
温度冲击后电性能	3.11.1.2	4.5.9.1	⑩				
温度冲击后焊点抗拉强度	3.11.1.3	4.5.9.1	⑪				
恒压反向偏置	3.7.2.2	4.5.5.2.2			④		
反向偏置交变	3.7.2.3	4.5.5.2.3			⑤		
带电粒子辐照	3.11.3	4.5.9.3		④			
稳态湿热	3.11.2	4.5.9.2				④	
稳态湿热后外观和机械缺陷	3.11.2.1	4.5.9.2				⑤	
稳态湿热后电性能	3.11.2.2	4.5.9.2				⑥	
稳态湿热后电极牢固性	3.11.2.3	4.5.9.2				⑦	
减反射膜牢固性和缺陷	3.10	4.5.8			⑥		
盖片增益 ^a	3.7.3	4.5.5.3					④
产品标志	3.6	4.5.4					⑤
太阳吸收率和半球向辐射率 ^a	3.7.4	4.5.5.4					⑥
翘曲	3.7.5	4.5.5.5		⑤			
抗弯强度	3.7.6	4.5.5.6		⑥			
^a 带玻璃盖片电池。							

4.3.3 鉴定检验抽样

4.3.3.1 样本大小

样本的大小按表5所示的批允许不合格品率(LTPD)方法确定,平均分成5组,余数分配到靠前的各组中,每组1片。鉴定检验的LTPD值为7%,合格判定数*c*选0或1。

表5 大于200片批的泊松抽样方案(置信度90%)

合格判定数(c)	最大允许百分比缺陷(LTPD)							
	50	30	20	15	10	7	5	3
	最小的样品量							
0	5	8	11	15	22	32	45	76
1	8	13	18	25	38	55	77	129
2	11	18	25	34	52	75	105	176
3	13	22	32	43	65	94	132	221
4	16	27	38	52	78	113	158	265
5	19	31	45	60	91	131	184	308
6	21	35	51	68	104	149	209	349
7	24	39	57	77	116	166	234	390

4.3.3.2 鉴定批选择

鉴定批应从按表6进行筛选后的生产批中选择。

表6 筛选项目及要求

序号	项目	要求条款号	试验方法条款号
1	外观	3.5.1	4.5.3.1
2	机械缺陷	3.5.2	4.5.3.2
3	电极缺陷	3.5.3	4.5.3.4
4	反向偏置 ^a	3.7.2.1	4.5.5.2.1
5	电性能(不含平均转换效率要求)	3.7.1	4.5.5.1
^a 检验时反向偏置中电性能测试和第5项电性能的测试合并进行。			

4.3.3.3 鉴定批大小

鉴定批至少应是鉴定检验样本大小的2倍,且不少于200片。

4.3.3.4 样本选择

全部样本从鉴定检验批中随机抽取。

4.3.3.5 替换

当电池样品在检验中发生与质量无关的损坏时,可以由同一检验批中随机抽样的新电池替代。新电池应经受该组检验的全部试验。已被替代的电池不计入失效判定数内。

4.3.4 合格判据

当鉴定检验的不合格数不大于合格判定数(c)时,判定此鉴定检验合格;否则为鉴定检验不合格。

4.3.5 结构相似电池的鉴定

对于除尺寸外材料、结构和工艺完全相同的电池,当其中一种电池通过鉴定后,其他尺寸的电池仅需按表7的规定项目和顺序进行鉴定。鉴定样品数量为7,合格判定数为0。

表 7 结构相似电池的鉴定

序号	项目	要求章条号	试验方法章条号
1	尺寸	3.3	4.5.1
2	面密度	3.4	4.5.2
3	外观	3.5.1	4.5.3.1
4	机械缺陷	3.5.2	4.5.3.2
5	电极外观	3.5.3	4.5.3.3
6	电性能	3.7.1	4.5.5.1
7	翘曲	3.7.5	4.5.5.5
8	抗弯强度	3.7.6	4.5.5.6

4.4 质量一致性检验

4.4.1 质量一致性检验项目

质量一致性检验包括 A 组、B 组和 C 组检验，试验顺序见表 8。

表 8 质量一致性检验及试验顺序表

检验项目	要求章条号	试验方法章条号	试验顺序				
			A 组		B 组		C 组
			A1 组	A2 组	B1 组	B2 组	
外观	3.5.1	4.5.3.1	①	①	①	①	①
机械缺陷	3.5.2	4.5.3.2	②	②	②	②	②
尺寸	3.3	4.5.1	③				
面密度	3.4	4.5.2	④				
电性能	3.7.1	4.5.5.1	⑤	③	③	③	③
焊接后电性能衰减	3.8.1	4.5.6.1	⑥				
电极焊点抗拉强度	3.8.2	4.5.6.2	⑦				
减反射膜牢固性和缺陷	3.10	4.5.8		④			
稳态湿热	3.11.2	4.5.9.2			④		
稳态湿热后外观和机械缺陷	3.11.2.1	4.5.9.2			⑤		
稳态湿热后电性能	3.11.2.2	4.5.9.2			⑥		
稳态湿热后电极牢固性	3.11.2.3	4.5.9.2			⑦		
抗弯强度	3.7.6	4.5.5.6				④	
盖片增益 ^a	3.7.3	4.5.5.3					④
太阳吸收率 ^a	3.7.4.1	4.5.5.4.1					⑤

^a 带玻璃盖片电池。

4.4.2 质量一致性检验抽样

检验的样本在提交前应按表 6 进行筛选。

当提交检验样本量大于 200 时, 根据表 5、LTPD 值为 10%、合格判定数 c 为 0 或 1 确定 A 组样本的大小, 平均分成 A1、A2 两组。B 组和 C 组样本的大小根据表 5 和 LTPD 值为 10%、合格判定数 c 为 0 或 1 确定, 其中 B 组平均分成 B1、B2 组。B 组和 C 组检验应从已经过筛选且 A 组检验合格的检验批中选取。

当提交检验样本量不大于 200 时, 根据表 9 以及 LTPD 值为 10% 确定样本大小, 合格判定数 c 应为 0 或 1, 样品平均分成 A 组、B 组、C 组共 3 组, 余数放在 A 组中。A 组的样品平均分成 A1 和 A2 组, 余数放入 A1 组。B 组平均分成 B1、B2 组, 余数放入 B1 组。

在表 9 中, 确定样品量用的 LTPD 栏应是数量上最接近实际提交批量的那个批量栏, 如果实际批量处于表中给出的两个批量中间, 则可自行采用相邻批量栏中的任一栏。在表 9 中, 如果适用的批量栏中没有不大于规定的 LTPD 值的 LTPD 值, 则应采用 100% 检验。在表 9 中, 应采用数值最接近规定的 LTPD 值的适用批量栏中的 LTPD 值确定样品量。

4.4.3 第一检验批 B 组和 C 组检验的取消

当承制方在第一个检验批生产之前, 已通过了鉴定检验, 应免做第一检验批的 B 组和 C 组检验。

4.4.4 替换

当电池样品在 A 组、B 组或 C 组检验中发生与质量无关的损坏时, 可以由同一检验批中随机抽样的新电池替代。新电池应经受该组检验的全部试验。已被替代的电池不计入失效判定数内。

4.4.5 合格判据

当质量一致性检验的 A 组、B 组和 C 组不合格数不大于合格判定数 (c) 时, 质量一致性检验合格; 否则为质量一致性检验不合格。

4.4.6 质量一致性检验样品处理

承受了电极可焊性和焊点抗拉强度、减反射膜的牢固性和缺陷、稳态湿热、带电粒子辐照、抗弯强度、温度冲击试验或在工艺过程检验失效、以及经过 A 组、B 组和 C 组检验的电池不应作为合格产品按合同发货。

表 9 批量不大于 200 的小批量超几何抽样方案

N =批量 n =样品量 c =合格判定数

N	10	20	30	40	50	60	80	100	120	150	160	200
$c=0$												
n	LTPD	LTPD	LTPD	LTPD	LTPD	LTPD	LTPD	LTPD	LTPD	LTPD	LTPD	LTPD
2	65	66	67	67	67	68	68	68	68	68	68	68
4	36	40	42	42	42	43	43	43	43	43	44	44
5	29	33	34	35	35	35	36	36	37	37	37	37
8	15	20	22	23	23	23	24	24	24	24	24	25
10		15	17	19	19	19	20	20	20	20	20	20
16		6.9	10	11	11	12	12	13	13	13	13	13
20			6.8	8.0	8.7	9.0	9.4	10	10	10	10	11
25			4.3	5.7	6.4	6.9	7.4	7.5	7.6	7.7	7.8	7.9
32				3.7	4.4	5.0	5.5	5.9	6.0	6.2	6.3	6.3
40					3.0	3.4	4.0	4.5	4.6	4.9	5.0	5.0
50						2.3	2.9	3.3	3.5	3.7	3.7	3.9
64							1.7	2.2	2.5	2.7	2.8	2.9
80								1.5	1.7	2.0	2.1	2.2
100									1.1	1.5	1.5	1.7
125										0.8	0.9	1.2
128										0.8	0.9	1.1
160												0.7

表 9(续)

N=批量 n=样品量 c=合格判定数

N	10	20	30	40	50	60	80	100	120	150	160	200
c=1												
n	LTPD	LTPD	LTPD	LTPD	LTPD	LTPD	LTPD	LTPD	LTPD	LTPD	LTPD	LTPD
2	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95
4	62	66	66	67	67	67	67	67	67	67	67	68
5	51	55	56	57	57	58	58	58	58	58	58	58
8	28	35	38	38	39	39	39	39	39	39	40	40
10		30	30	31	32	32	32	33	33	33	33	33
16		15	18	18	20	20	21	21	21	21	22	22
20			13	15	16	16	16	16	17	17	17	18
25			9.2	11	12	13	13	13	13	14	14	14
32				7.4	8.2	9.0	9.9	10	10.5	11	11	11
40					5.9	6.8	7.6	7.8	8.2	8.3	8.4	8.6
50						4.6	5.6	6.1	6.4	6.5	6.7	6.7
64							3.8	4.4	4.7	5.0	5.0	5.2
80								3.0	3.4	3.7	3.8	4.0
100									2.5	2.8	2.8	3.0
125										1.9	2.0	2.2
128										1.7	1.9	2.2
160												1.5

4.5 试验方法

4.5.1 尺寸

用准确度不低于 0.05mm 的量具测量电池的尺寸。

4.5.2 面密度

用感量不大于 10mg 的天平，称取整组电池的质量，然后用该质量除以电池数量和电池面积，得到电池面密度。

4.5.3 外观和机械缺陷

4.5.3.1 外观

电池的外观目视检查。

4.5.3.2 机械缺陷

电池机械缺陷采用光学比较仪或 5 倍~100 倍测量显微镜检查。

4.5.3.3 电极外观

电极的外观应用 5 倍~10 倍的显微镜或者相同放大倍率的光学比较仪进行目视检查。

4.5.3.4 电极缺陷

电极机械缺陷采用光学比较仪或 5 倍~100 倍测量显微镜检查。

4.5.4 产品标志

将电池置于样品架上，先将样品架浸没在丙酮中 4min，丙酮温度保持 $25^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ，然后将样品架浸没在无水乙醇中 4min，无水乙醇温度保持 $25^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ，取出后用去离子水清洗，并在室温下用洗耳球或氮气进行干燥，最后目视检查太阳电池上的标志。

4.5.5 性能

4.5.5.1 电性能

按 GB/T 6494 规定的方法测量电池 I-V 曲线，测试条件：AM0 光谱， $135.3\text{mW}/\text{cm}^2$ 或 $136.7\text{mW}/\text{cm}^2$ ，环境温度 $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ，从测量数据中读出每个电池的转换效率、开路电压、短路电流、定点电压下的输出电流，计算出短路电流密度(短路电流除以电池面积设计值)和平均转换效率。

4.5.5.2 反向特性

4.5.5.2.1 反向偏置

将电池置于无光照环境中，在电池两端加与电池极性相反的电压 $2.00V \pm 0.02V$ ，保持 $10s \sim 12s$ ，然后按 4.5.5.1 的规定测试电性能。

4.5.5.2.2 恒压反向偏置

按以下顺序进行恒压反向偏置试验：

- a) 按 4.5.5.1 的规定测电性能；
- b) 将电池置于无光照环境中，在电池两端加与电池极性相反的电压 $2.00V \pm 0.02V$ ，保持 2h；
- c) 按 4.5.5.1 的规定测电性能，并按公式 (1) 计算每片电池试验前后在表 3 规定定点电压下输出电流的衰减，最后计算整组电池定点电压输出电流衰减的平均值。

$$\Delta_i = \frac{I_{op} - I'_{op}}{I_{op}} \times 100\% \dots\dots\dots (1)$$

式中：

- Δ_i —— 定点电压输出电流衰减；
- I_{op} —— 试验前的定点电压输出电流，mA；
- I'_{op} —— 试验后的定点电压输出电流，mA；

4.5.5.2.3 反向偏置交变

按以下顺序进行反向偏置交变试验：

- a) 按 4.5.5.1 的规定测电性能；
- b) 将电池置于无光照环境中，在电池两端交替加与电池极性相反的电压 $2.00V \pm 0.02V$ 和 $0.00V \pm 0.02V$ ，（因电池电容的充放电引起的电压变化可忽略，但充放电时间应不大于试验信号周期的 40%），变化频率 $100Hz \sim 500Hz$ ，保持 4h；
- c) 按 4.5.5.1 的规定测电性能，并按公式 (1) 计算每片电池试验前后在表 3 规定定点电压下输出电流的衰减，最后计算整组电池定点电压输出电流衰减的平均值。具体计算方法见公式 (1)。

4.5.5.3 盖片增益

盖片增益的测试应遵循如下要求：

- a) 电池上电极焊接互联片；
- b) 按 4.5.5.1 测量每片电池的短路电流 I_{0i} ；
- c) 粘贴盖片（盖片应符合 GJB 1976 的要求，同时表面有 MgF_2 减反射膜）；
- d) 按 4.5.5.1 测量每片电池的短路电流 I'_{0i} ；
- e) 计算每片电池的短路电流变化值 $\Delta_{0i} = |(I'_{0i} - I_{0i})| / I_{0i}$ ；
- f) 计算整组电池短路电流变化值的平均值。

4.5.5.4 太阳吸收率和半球向辐射率

4.5.5.4.1 太阳吸收率

电池粘贴盖片（盖片应符合 GJB 1976 的要求，同时表面有 MgF_2 减反射膜）并清洁处理，然后采用 Edwards 式积分球，测量电池前表面从 $0.28m \sim 2.5m$ 的反射率，并按下公式 (2) 计算。

$$\alpha_s = 1 - \int_{0.28}^{2.5} R(\lambda) \cdot E(\lambda) d\lambda \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- α_s —— 太阳吸收率；
- $R(\lambda)$ —— 电池的光谱反射率；
- $E(\lambda)$ —— AM0 条件下太阳光相对分光辐照度， $1/\mu m$ 。

4.5.5.4.2 半球向辐射率

电池粘贴盖片(盖片应符合 GJB 1976 的要求,同时表面有 MgF_2 减反射膜)并清洁处理,然后按照如下三种方法之一测量电池前表面的半球向辐射率:

- 从 $2.0\mu m \sim 26\mu m$ 的波长范围测量电池的光谱反射率,并对 300K 的普朗克(Plankian)辐射体函数进行积分。
- 电池放在一个液氮冷却的真空室内,测量电池保持在 300K 平衡温度下所需的能量密度。
- 在温度为 $15^\circ C \sim 25^\circ C$ 条件下准备参比试样,将高、低发射率参比试样置于热沉上,探测器分别放到高、低发射率参比试样上,通过微调使读数仪表上显示的数值等于它们各自的发射率值,此步骤重复一遍。将测试样置于热沉上,把探测器放到被测试样表面上约 90s,待读数稳定,该读数即为被测试样的发射率。此过程至少进行三次。

4.5.5.5 翘曲

将电池凸面朝上(如图 3 所示),用轮廓仪、翘曲度测试仪或塞尺测试其翘曲度,然后用翘曲度除以电池长边长度(按电池长边长度设计值)计算翘曲度与电池长边比。

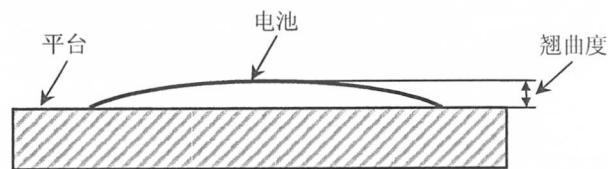


图 3 电池翘曲度示意图

4.5.5.6 抗弯强度

采用三点法测量。如图 4 所示,将电池放在支座上,伸出支座两端的距离应相等,支座间距为电池长度的三分之一至三分之二。以 5mm/min 的位移速度加荷,记录电池断裂时的最大负荷,按公式(3)计算电池的抗弯强度(电池宽度采用设计值)。

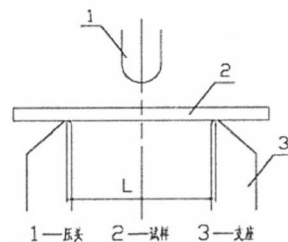


图 4 抗弯强度测量示意图

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \dots\dots\dots (3)$$

式中:

- σ —— 电池的抗弯强度, MPa;
- P —— 电池断裂时的最大负荷, N;
- L —— 支座接触点间的距离, mm;
- b —— 电池宽度, mm;
- h —— 电池厚度, mm。

4.5.6 电极可焊性和焊点抗拉强度

4.5.6.1 焊接后电性能衰减

按以下顺序测试焊接后电性能衰减:

- a) 按 4.5.5.1 的规定测电性能。
- b) 在电池的上、下电极分别焊接两个拉力试验片或互联片，拉力试验片的规格如图 5 所示，拉力试验片的材料为纯度不低于 99.9% 的银。
- c) 按 4.5.5.1 的规定测电性能，并计算焊接前后电池在表 3 规定定点电压下输出电流的衰减，最后计算整组电池定点电压输出电流衰减的平均值。具体计算方法见公式 (1)。

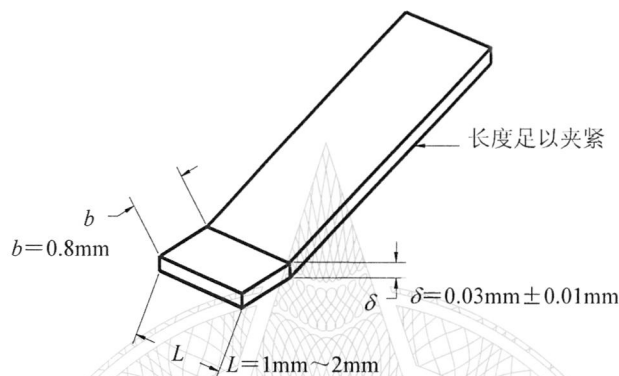


图 5 电极拉力试验片示意图

4.5.6.2 焊点抗拉强度

把已焊接拉力试验片或互联片的电池固定在试验器上，拉力试验片应向上弯成 45° 并用夹头夹紧，施力方向与电池成 135° 角。可采用以下两种方法确定焊点抗拉强度：对拉力试验片施力的速率不大于 1N/s ，在拉力片从电池上拉脱的瞬间，记录指示的拉力读数；也可以对拉力试验片施一固定的力（力的大小按焊点面积乘以 0.83N/mm^2 确定），保持 $2\text{s} \sim 4\text{s}$ ，然后检查拉力试验片是否脱落，如拉力试验片没有脱落，则焊点抗拉强度大于 0.83N/mm^2 。

4.5.7 电极牢固性

用剥离强度不小于 3.4N/cm 的胶带覆盖电池的两个表面，胶带应摩擦到胶带没有雾状空白、牢固地粘住电池，随后和电池表面成 $45^\circ \sim 90^\circ$ 把胶带从电池栅线末端向主栅线一端剥下来。随后按 4.5.3.4 检查电极的缺陷。

4.5.8 减反射膜牢固性和缺陷

用剥离强度不小于 3.4N/cm 的胶带覆盖电池的上表面，胶带应摩擦到胶带没有雾状空白、牢固地粘住电池，随后和电池表面成 180° 把胶带剥下来。随后用 5 倍 \sim 10 倍放大镜检查减反射膜的缺陷。

4.5.9 环境适应性

4.5.9.1 温度冲击

温度冲击按以下顺序进行：

- a) 按 4.5.5.1 的规定测电性能；
- b) 按 4.5.6.1 规定焊上拉力试验片或互联片后，在室温、常压下放入一导热容器中，然后把带有电池的容器迅速放到液氮表面，电池达到 -180°C 后取出，直接放入 100°C 的烘箱中，电池达到 100°C 后至少停留 2min ，然后移至室温 5min ，即完成一个循环，共做 6 个循环；
- c) 按 4.5.3.1 和 4.5.3.2 的规定检查电池外观和机械缺陷；
- d) 按 4.5.5.1 的规定测电性能，并计算焊接前后每片电池在表 3 规定定点电压下输出电流的衰减和整组电池定点电压输出电流衰减的平均值（计算方法见 4.5.5.2.2）；
- e) 按照 4.5.6.2 的规定进行焊点抗拉强度试验。

4.5.9.2 稳态湿热

稳态湿热按以下顺序进行：

- a) 试验前按 4.5.5.1 的规定测电性能。
- b) 电池放入样品架，然后将样品架放入湿热试验箱中，湿热试验箱的温度为 $60^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度不小于 90%，并保持 96h。样品架和湿热试验箱应符合如下要求：
 - 1) 电池样品和样品架材料在湿热条件下不起化学反应；
 - 2) 湿热试验箱的壁和顶部冷凝水不应落在电池上；
 - 3) 湿热试验箱的湿源用水为去离子水；
 - 4) 样品架和湿热试验箱不应给电池带来腐蚀污染物。
- c) 试验后首先按 4.5.3.1 和 4.5.3.2 的规定检查电池外观和机械缺陷。
- d) 按 4.5.5.1 的规定测电性能，并计算焊接前后电池在表 3 规定定点电压下输出电流的衰减和整组电池定点电压输出电流衰减的平均值(计算方法见 4.5.5.2.2)。
- e) 按 4.5.7 的规定进行电极牢固性试验并检查电极缺陷。

4.5.9.3 带电粒子辐照

带电粒子辐照按以下顺序进行：

- a) 按 4.5.5.1 的规定测电性能。
- b) 进行 1MeV 电子辐照，辐照瞬时注量： $5 \times 10^{10} \text{e}/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \sim 2 \times 10^{11} \text{e}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ，累计注量： $1 \times 10^{15} \text{e}/\text{cm}^2$ ，电池垂直入射电池前表面。辐照过程中电池温度应控制在 40°C 以下。
- c) 辐照试验后电池在太阳模拟器 AM0 光下照射 48h，照射期间电池处于开路状态，电池温度控制在 $25^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ，光强为 (1 ± 0.1) 个太阳常数。
- d) 将电池放置于 $60^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ 烘箱中 24h。
- e) 按照 4.5.5.1 的规定测试电性能，按公式 (4) 计算每片电池最大输出功率衰减，最后按公式 (4) 计算整组电池最大输出功率衰减的平均值。

$$\delta_i = \frac{P_{\max} - P'_{\max}}{P_{\max}} \times 100\% \dots\dots\dots (4)$$

式中：

- δ_i ——最大输出功率衰减；
- P_{\max} ——试验前电池最大输出功率；
- P'_{\max} ——试验后电池最大输出功率。

5 交货准备

5.1 单元包装要求

5.1.1 总则

电池单元包装容器设计应满足使用方要求。容器内应有充足的保护材料，防止电池受冲击或损坏。每个容器应热压焊在一个气密的、防湿气的袋内，袋内还应放有足够的袋装的活性干燥剂，以防止大气或其他物质对电池表面污染。

5.1.2 干燥剂

选用的干燥剂不应应对电池的机械、电性能产生有害影响，同时不能和电池直接接触。

5.1.3 湿度指示器

每个密封袋内应在显眼位置放入一个量程为 10%~80%的相对湿度指示器。

5.1.4 包装材料

全部包装材料不应应对电池的机械、电性能有损害，不应污染电池表面。

5.2 装箱

将包装完毕的电池放入专用包装箱内，包装箱内应采取充分的保护措施，以防电池受冲击或损坏。

包装箱外面应有符合 5.3 规定的标志，同时还应有“小心轻放”，“防湿”，“防雨”等标志。

5.3 标志

每个用于发货的容器应清楚标明如下内容：

- a) 承制方的名称；
- b) 产品的型号；
- c) 批号和电池数量；
- d) 制造的年和月。

5.4 贮存

电池应贮存在温度 10℃~40℃，相对湿度小于 50%的密封容器中。容器及容器内的气体应干净、无污染。

5.5 运输

电池在运输中应避免雨淋和机械冲击。

6 说明事项

6.1 预定用途

本规范所包括的电池预定用于空间飞行器的太阳电池板。

6.2 分类

空间四结太阳电池按结构和工艺分成正向生长晶格失配空间四结太阳电池(Upright Metamorphic four-junction space solar cell, 缩写: UMM-4J)和反向生长晶格失配空间四结太阳电池(Inverted Metamorphic four-junction space solar cell, 缩写: IMM-4J)两类。每一种电池根据其转换效率及电性能参数的差异,又分成 IMM-4J-A、IMM-4J-B、UMM-4J-A、UMM-4J-B、UMM-4J-C 五种,具体性能见表 3。

6.3 订购文件中应明确的内容

订购文件中应明确规定下列内容：

- a) 电池尺寸、面密度要求,规范的名称和编号；
- b) 电池型号；
- c) 电池数量；
- d) 封存、包装和装箱要求。

6.4 术语和定义

下列术语和定义适用于本规范。

6.4.1 崩边 chip

指电池沿着边沿或拐角局部缺少电池体材料,但没有穿透电池的整个厚度。

6.4.2 缺口 nicks

指电池沿着边沿或拐角局部缺少电池体材料,而且已穿透电池的整个厚度。

6.4.3 表面缺损 surface nicks

太阳电池上表面局部缺少电池体材料,但没有穿透电池的整个厚度。

6.4.4 针孔 pinholes

指穿过电池表面层(例如电极金属层或减反射膜)而露出的电池体材料的孔。

6.4.5 空白 voids

指任何直径大于 0.13mm,没有镀层材料(例如电极金属层或减反射膜)的空白点。

中华人民共和国
国家军用标准
空间四结太阳能电池规范
GJB 11698—2024

*

国家军用标准出版发行部出版
(北京东外京顺路7号)
国家军用标准出版发行部印刷车间印刷
国家军用标准出版发行部发行
版权专有 不得翻印

*

开本 880×1230 1/16 印张 1¼ 字数 38 千字
2025年2月第1版 2025年2月第1次印刷

*

军标出字第 16642 号