

空间高轨高压太阳能电池阵静电防护技术研究

张帆, 葛圣胤, 刘智

(上海空间电源研究所, 上海 200245)

摘要: **目的** 提高太阳能电池阵的可靠性。**方法** 对空间用高轨高压太阳能电池阵的静电防护技术进行试验研究, 通过外加电弧的方式对太阳能电池试验件进行一次放电模拟试验, 通过电子注入模拟高轨等离子体环境, 采用单一电子能量模拟多能谱能量的环境, 对太阳能电池阵二次放电进行摸底试验。**结果** 一次放电对太阳能电池试验件无影响, 二次放电发生时, 太阳能电池串之间电压的阈值为 80 V, 二次放电会对太阳能电池串输出功率造成一定影响。**结论** 在太阳能电池阵设计过程中, 控制太阳能电池串之间的并联间隙为 1 mm, 相邻太阳能电池串之间电压差不大于 80 V、在相邻太阳能电池串之间涂敷硅橡胶等方法能有效控制太阳能电池阵二次放电的发生, 大大提高了太阳能电池阵的可靠性。

关键词: 太阳能电池阵; 静电防护; 高轨; 高压

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.07.012

中图分类号: V19 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2018)07-0055-06

ESD Protection of GEO/MEO Orbit High-voltage Solar Cell Arrays

ZHANG Fan, GE Sheng-yin, LIU Zhi

(Shanghai Institute of Space Power Sources, Shanghai 200245, China)

ABSTRACT: Objective To improve the reliability of the solar cell arrays. **Methods** The electrostatic protection technology of GEO/MEO orbit solar cell arrays was studied. Primary arc simulation test was carried out on the solar cells by an external arc. The secondary arc of solar arrays was tested in the environment of quasi multispectral energy. **Results** The primary arc had no influence on the solar cells. The threshold of the voltage between the series of solar cells was 80 V when the secondary arc occurred. Secondary arc affected the output power of the solar cells to a certain extent. **Conclusion** During the design of solar cell arrays, the solar cell arrays can be effectively controlled if the parallel gap between the solar cell strings is controlled at 1 mm, the voltage difference between the adjacent solar strings is not more than 80 V, and the silicon rubber is applied between the adjacent solar strings. It can improve the reliability of the solar cell arrays greatly.

KEY WORDS: solar cell arrays; ESD protection; GEO/MEO orbit; high-voltage

自从 1957 年 10 月 4 日人类第一个人造地球卫星进入太空开始, 地球空间环境对航天器太阳能电池阵影响的问题受到极大关注^[1]。太阳能电池阵在轨工作时, 经常会遭遇到来自空间包括压力、温度、微重力、原子氧、微流星体和空间垃圾、紫外辐射及粒子辐射环境等自然辐射环境的影响^[2-3]。几十年来人们对地球空间环境的研究不断深入, 也认识到地球空间环境对

航天器太阳能电池阵有极为重要的影响。

当航天器需要很大的电源功率的时候, 为了减少输电过程中的损耗, 也为了减少供电电流和地磁场的相互作用, 通常采用高电压供电, 工作电压一般为几百伏到数千伏^[4], 工作在 100 V 以上的太阳能电池阵被称为高压太阳能电池阵^[5]。如果太阳能电池串之间的电势差高于某一阈值电压, 在相邻两串电池的串间通过高

浓度等离子体形成的通路产生电流。该通路能够产生足够的能量导致太阳电池之间或太阳电池与太阳阵基板之间材料发生热解,并在太阳电池之间产生一个异常的低电阻通路,导致太阳电池阵永久性短路,甚至使卫星失去供电。

文中主要是对高轨高压太阳电池阵静电防护技术进行研究,通过太阳电池阵静电放电阈值摸底试验,获得太阳电池串发生静电放电故障时太阳电池串之间电压阈值,为后续高轨高压太阳电池阵设计提供技术支持,提高太阳电池阵在轨运行可靠性。

1 静电放电原理

空间中存在着大量质子和电子,由于电子轰击以及太阳光照产生二次发射电子,太阳电池玻璃盖片表面发射电子,使太阳电池玻璃盖片相对于卫星结构充电到一个正电荷,此时基板的电势相对变化较小。当太阳电池玻璃盖片与基板之间的电位差超过一定电压时,在空间真空环境中,真空、介质和金属界面结合部会导致静电放电,放电时间为微秒级,称为一次放电(Primary Arc, PA),这种放电对太阳电池阵没有影响。

一次放电会在太阳电池玻璃盖片和太阳电池的互连片之间、太阳电池玻璃盖片和基板之间发生放电的地点出现一个高浓度的等离子体,密度约为 $10^6 \sim 10^7 \text{ m}^{-3}$ 。当电池串之间的电势差高于阈值电压时,在太阳电池电路高电位和低电位之间的电流通过高浓度的等离子体通路,一般能够维持毫秒级的时间,称为二次放电(Secondary Arc, SA)。根据放电持续时间不同还可分为“非持续性放电”(Non-sustained Arc, NSA)、“暂时持续性放电”(Temporary Sustained Arc, TSA)、“长期持续性放电”(Permanent Sustained Arc, PSA)^[6],长期持续性放电发生概率较低,太阳电池静电放电及其分类如图1所示。

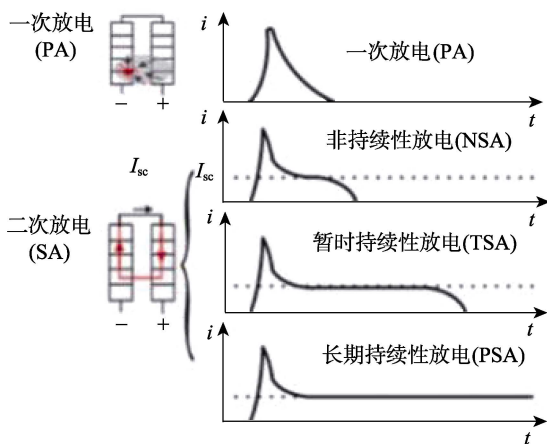


图1 太阳电池静电放电及其分类

持续的二次放电会引起太阳电池串的短路,造成太阳电池阵输出功率的下降^[7-8],严重时会导致卫星任务失败^[9]。因此对于高轨高压太阳阵而言,应该重视二次放电对太阳电池阵的影响。

2 静电放电试验研究

在高轨道环境中,组成等离子体的物质主要是质子和电子,电子和质子以不同的速度(能量不同)作自由运动,粒子的机械能可以用 $E = 1/2 \cdot m \cdot V^2$ 进行计算。由于质子质量约为电子的1800倍,因此处于平衡状态的等离子体中,同等能量电子的运动速度是质子的42倍。当等离子体与太阳电池阵作用时,主要是电子对太阳电池阵表面充电,充电过程导致高压太阳电池阵表面相对于空间等离子体呈负电位,并在高压太阳电池阵光照面和基板间形成反向电场梯度,即基板和金属互连片的充电电位比太阳电池玻璃盖片上的充电电位更低。这种电场分布会使高压太阳电池阵表面产生静电放电。太阳电池阵静电放电模型详见图2所示。

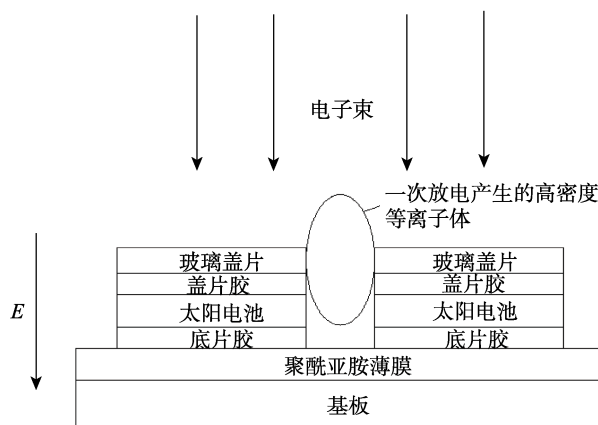


图2 高轨高压太阳电池阵静电放电模型

由于太阳电池阵的二次放电可使太阳电池PN结击穿,造成太阳电池输出功率的下降,因此需对太阳电池阵的静电放电问题进行防护研究。本试验研究了一次放电、二次放电对在轨太阳电池阵的影响;通过外加电弧的方式对太阳电池试验件进行一次放电模拟试验,研究一次放电对太阳电池试验件性能的影响;通过电子注入模拟高轨等离子体环境,采用单一电子能量模拟多能谱能量的环境,对太阳电池阵二次放电阈值进行摸底试验。获得了二次放电发生时太阳电池串之间电压的阈值,为后续太阳电池串之间的电压差设计提供依据,从而避免太阳电池阵发生二次放电而造成功率下降问题。

2.1 太阳电池试验件制作

为了模拟太阳电池阵一次放电试验和二次放电试验,选择如下方式制作太阳电池试验件。

1) 单组太阳电池试验件选择在基板上布贴 3 串 2 并的三结砷化镓 (GaInP₂/InGaAs/Ge) 太阳电池组件。

2) 单片太阳电池尺寸选择为 60.5 mm×40.0 mm, 单组太阳电池试验件尺寸为 150 mm×150 mm。

3) 参考汉斯·S·劳申巴赫《太阳电池阵设计手册》，太阳电池串联方向上相邻电池间最小间隙为 0.5 mm, 太阳电池并联方向上相邻电池间最小间隙为 0.5~1 mm。考虑太阳电池串在实际贴片中工艺过程的控制 (采用工装控制太阳电池串联、并联之间的间隙), 以及最大化提高太阳帆板上太阳电池贴片率, 太阳电池组件串联、并联间隙均设计为 1 mm。

4) 单组太阳电池试验件输出 4 根导线, 分别为 2 条太阳电池组件的正、负极输出引线。

单组太阳电池试验件布局如图 3 所示。

2.2 一次放电试验研究

按照图 2 中试验件制作方式制作一组太阳电池

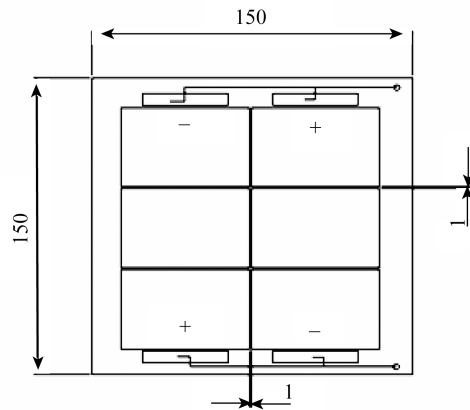


图 3 试验件 (尺寸单位: mm)

试验件 TG01, 通过外加电弧方式, 对试验件进行 100 次一次放电模拟试验, 试验件状态见表 1。

通过试验前以及每 20 次一次放电后对太阳电池试验件进行 $I-V$ 特性测试, 对比分析试验件工作点电压 (V_m)、工作点电流 (I_m) 输出能力, 对比情况见表 2。

表 1 一次放电试验件状态

| 试验件号 | 试验件组成 | | | | |
|------|--------|--------|--------|-----------------|------|
| | 电池组件编号 | 串、并联间隙 | 一次放电方式 | 并联间隙是否涂 RTV 硅橡胶 | 组件形式 |
| 1 | TG01 | 1 mm | 外加电弧 | 否 | 3s2p |

表 2 TG01 试验件 V_m, I_m 输出能力对比

| 试验件 | 测试实机 | 工作点电压/V | 衰减情况/% | 工作点电流/A | 衰减情况/% |
|------|------------|---------|--------|---------|--------|
| TG01 | 试验前 | 6.891 | / | 0.3824 | / |
| | 20 次一次放电后 | 6.884 | -0.102 | 0.3812 | -0.314 |
| | 40 次一次放电后 | 6.883 | -0.116 | 0.3814 | -0.262 |
| | 60 次一次放电后 | 6.842 | -0.711 | 0.3809 | -0.392 |
| | 80 次一次放电后 | 6.893 | 0.029 | 0.3828 | 0.104 |
| | 100 次一次放电后 | 6.894 | 0.043 | 0.3830 | 0.157 |

从表 2 中可以看出, 试验件 TG01 在经过 100 次一次放电试验后, 试验件的 $I-V$ 特性无明显变化, 其中工作点电压 V_m 在试验前后变化为 -0.102%~0.043%, 工作点电流 I_m 在试验前后变化 -0.392%~0.157%, 考虑到 $I-V$ 特性的测试误差为 $\pm 1\%$, V_m 和 I_m 输出能力属于正常波动范围, 对太阳电池整体电性能输出无影响。因此, 一次放电不会对太阳电池阵电性能输出造成影响。

2.3 二次放电试验研究

2.3.1 二次放电试验件状态

依据 GJB 7363—2011《空间等离子体环境效应动态试验方法》中的相关规定, 高压太阳电池阵串间电路的工作电压由太阳阵模拟器提供, 太阳阵模拟器即为太阳电池阵样品串间电路提供工作电压和工作

电流的设备。根据样品类型及样品中电池片的数量调整输出电压, 一般为 0~200 V, 限制电流一般为 2~3 A。文中二次放电试验按照图 2 制作太阳电池试验件 TG11—TG18, 采用恒流源对太阳电池试验件两端通电加压, 可以给试验件串间电路提供工作电压和工作电流, 该试验方法可以有效模拟太阳电池阵在轨真实工作状态。试验件状态见表 3, 试验件用途均为进行二次放电阈值摸底试验。太阳电池组件恒流源通电方式如图 4 所示。

2.3.2 二次放电试验条件

二次放电试验过程中相关参数如下: 试验真空度为 $1.7 \times 10^{-4} \sim 7.3 \times 10^{-4}$ Pa; 电子能量为 14 keV; 束流为 0.5, 1.0, 1.5, 2 nA/cm²; 相邻电池串间电压差为 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180, 190, 200 V; 限定电流为 2.1 A; 环

境温度为(30±5) °C。

表 3 二次放电试验件状态

| 试验件号 | 试验件组成 | | | | 组件形式 |
|------|--------------|-------------------|------------------------------|------------------------|------|
| | 电池组件编号 | 串、并联 间隙/ mm | 电流方向(通过 恒流源对太阳电 池两端通电) | 并联间隙是 否涂 RTV 硅橡胶 | |
| 1 | TG11 TG12 | 1 | 反向 | 否 | 3s2p |
| 2 | TG13 TG14 | 1 | 正向 | 否 | 3s2p |
| 3 | TG15 TG16 | 1 | 反向 | 是 | 3s2p |
| 4 | TG17 TG18 | 1 | 正向 | 是 | 3s2p |

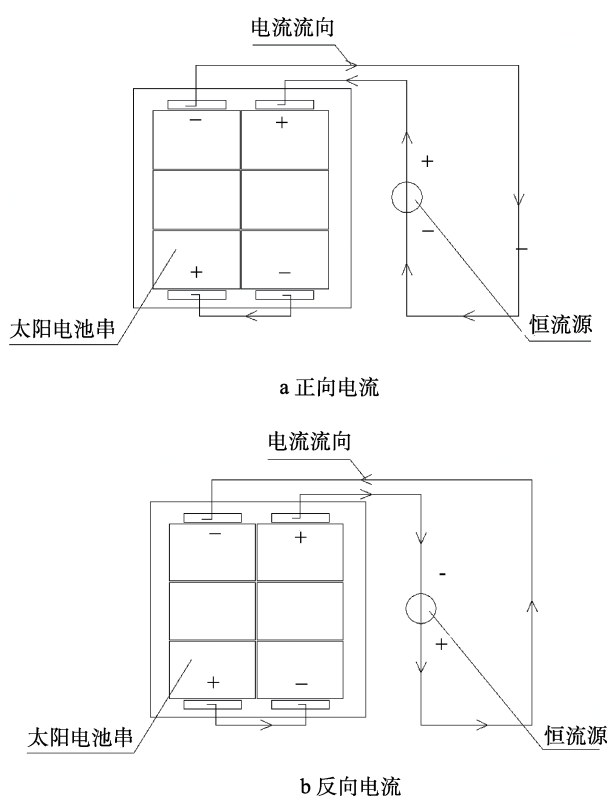


图 4 通电方式

2.3.3 二次放电试验分析

对试验件(TG11—TG18)进行了反向及正向电流的二次放电阈值摸底试验。整个试验过程中,束流密度从 0.5 nA/cm² 每隔 0.5 nA/cm² 升高至 2 nA/cm², 相邻电池串间电压在不同的束流密度条件下从 50 V 以 10 V/10 min 上升, 最终增大至 200 V。

1) 试验件 TG11、TG12 在 80 V 时出现二次放电现象, 放电频率为 10~15 次/10 min。二次放电位置照片和放电典型波形如图 5、图 6 所示, 从图 5 中可以看出, 在两串太阳能电池并联间隙之间发生二次放电现象。

2) 试验件 TG13、TG14 在 110 V 时出现二次放电现象, 放电频率为 12~16 次/10 min, 二次放电位

置照片和放电典型波形如图 7、图 8 所示, 从图 7 中可以看出, 在两串太阳能电池并联间隙之间发生二次放电现象。

3) 试验件 TG15—TG18 外观无明显变化, 无二次放电现象发生。

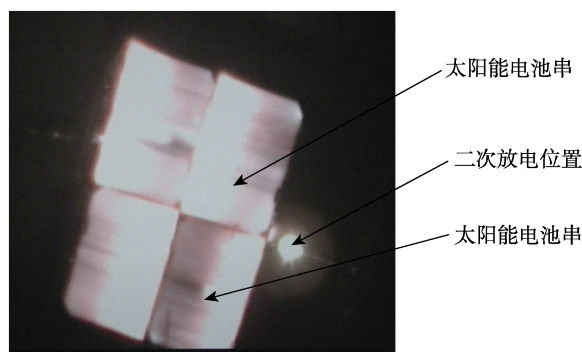


图 5 试验件 TG11、TG12 二次放电位置照片

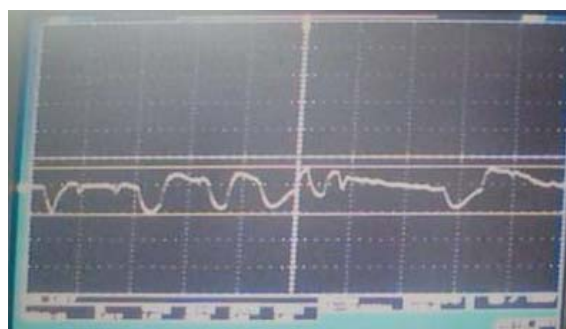


图 6 试验件 TG11、TG12 二次放电典型波形

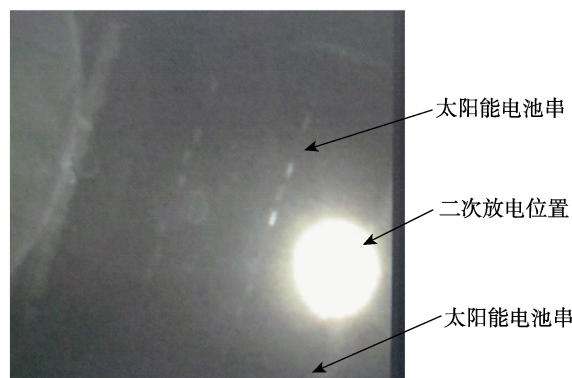


图 7 试验件 TG13、TG14 二次放电位置照片

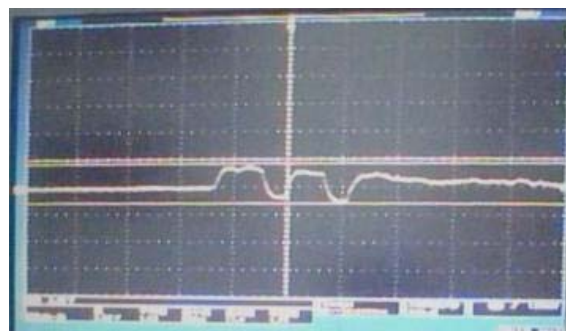


图 8 试验件 TG13、TG14 二次放电典型波形

试验完成后对太阳电池组件 TG11—TG18 进行了 $I-V$ 特性测试, 发生二次放电的太阳电池试验件 TG11—TG14 在试验后, 太阳电池试验件工作点电压和工作点电流相对于试验前均出现明显下降, 如图 9a—d 所示。可以看出, 由于太阳电池试验件 TG11—TG14 在试验过程中发生了放电频率为 10~16 次/10 min 的二次放电现象, 试验件在工作点电压输出能力相较于试验前下降了 2.0%~33.7%, 工作点电流输出能力相较于试验前下降了 2.8~9.5%, 工作点电压和电流下降程度已超出测试误差 $\pm 1\%$ 的范围。可以认为二次放电现象会对太阳电池造成不同程度的损伤, 直接降低太阳电池工作点电压和工作点电流电

性能输出。未出现二次放电的太阳电池试验件 TG15—TG18 在试验前后 $I-V$ 特性较为一致, 太阳电池试验件工作点电压和电流相对于试验前状态均无明显变化, 如图 9e—h 所示。

从图 9e—h 可以看出, 未发生二次放电的太阳电池试验件 TG15—TG18 在试验后, 试验件在工作点电压的输出能力相较于试验前变化范围为 -0.5% ~ 0.5% , 工作点电流输出能力相较于试验前变化范围为 -0.07% ~ -0.6% 。工作点电压和电流试验前后变化范围均在测试误差 $\pm 1\%$ 的范围之内, 太阳电池试验件 TG15—TG18 工作点电压和工作点电流性能输出未受二次放电摸底试验影响。通过上述二次放电试验研

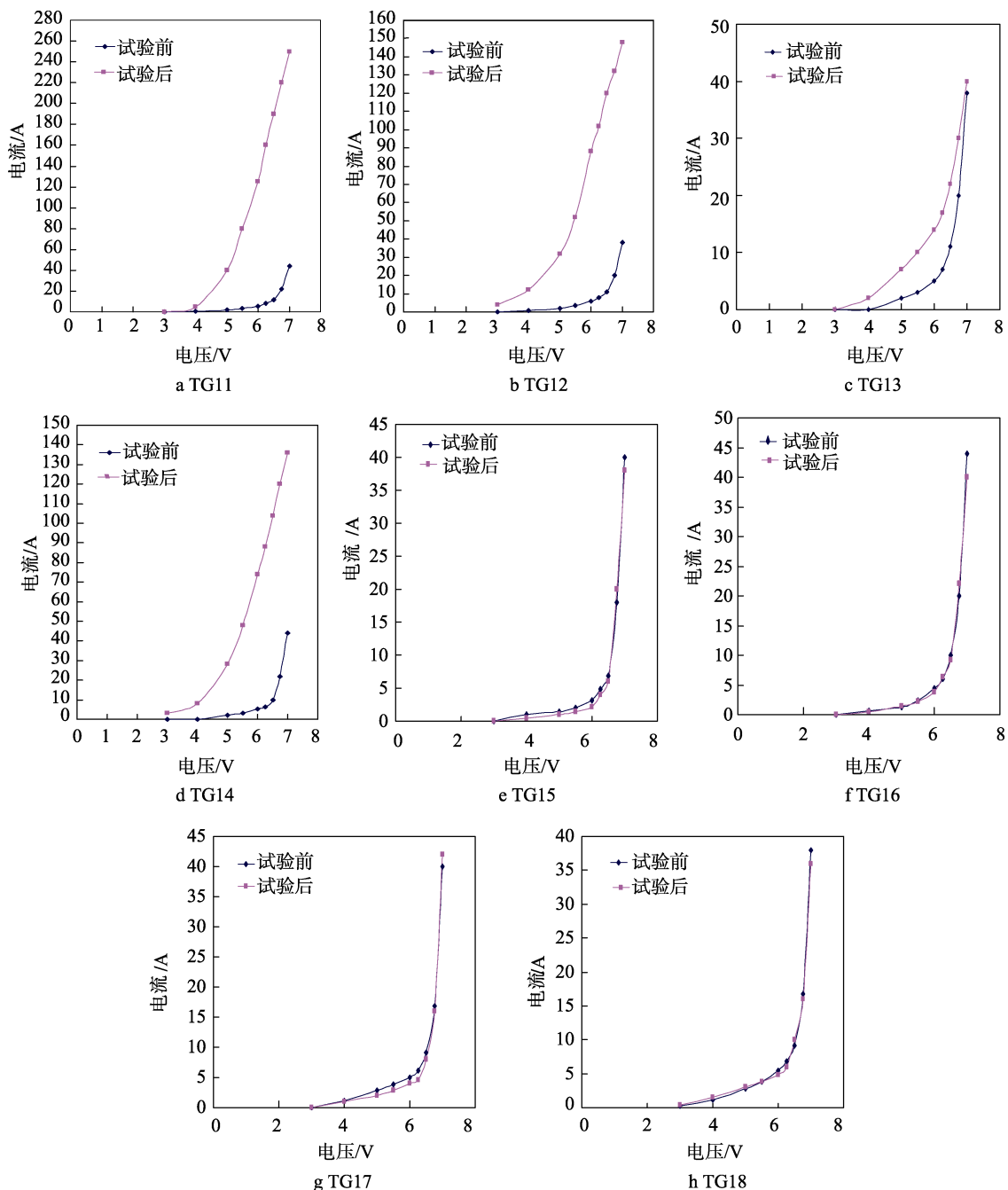


图 9 试验前后组件的 $I-V$ 特性比较

究可以得出以下结论。

1) 串并联间隙为 1 mm、并联间隙未涂敷 RTV 硅橡胶太阳能电池阵试验样件通正向电流, 二次放电阈值为 80 V; 通反向电流, 二次放电阈值为 110 V。

2) 二次放电会对太阳能电池本身造成一定损伤, 直接影响太阳能电池工作点电压和工作点电流电性能输出能力。

3) 通过高轨高压太阳能电池阵二次放电试验验证, 串并联间隙为 1 mm、并联间隙间涂敷 RTV 硅橡胶太阳能电池阵试验样件通正向电流或者反向电流, 相邻电池串之间压差 200 V 范围内均不会出现二次放电现象。

3 高轨高压太阳能电池阵防静电设计

为了防止高轨高压太阳能电池阵在轨运行时由于等离子体的静电放电引起二次放电, 对太阳能电池电路造成功率损失。参考上述试验结果, 以 100.3 V 母线高轨太阳能电池阵设计为例, 太阳能电池阵采用 60 片三结砷化镓太阳能电池进行串联设计, 太阳能电池尺寸为 60.5 mm×40.0 mm, 单片太阳能电池工作电压为 2430 mV, 单片太阳能电池工作电流为 0.4 A, 远小于试验中限定太阳能电池电流 2.1 A。太阳能电池阵可以采取如下防护设计。

1) 在太阳能电池电路布局时, 采用“S”型的布片方式, 在充分考虑功率输出的情况下, 对太阳能电池阵进行降压设计。从上述单片太阳能电池工作电压以及单串太阳能电池串联数可知: 单串太阳能电池串输出电压为 145.8 V。由于太阳能电池串输出电压被母线钳位, 则太阳能电池串输出电压为母线电压 100.3 V。考虑太阳能电池串之间二次放电阈值为 80 V, 太阳能电池串采用 6 折的降压设计, 每折太阳能电池串为 10 片太阳能电池, 将相邻太阳能电池串间的最大电压差控制在 33.44 V, 满足航天 I 级降额标准, 如图 10 所示。

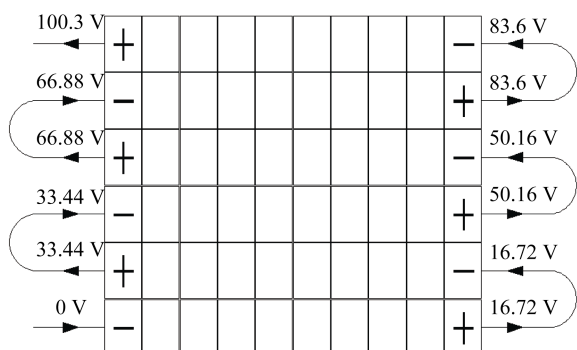


图 10 6折“S”型布片方式

2) 合理设计相邻太阳能电池串的并联间隙, 考虑太阳能电池串在实际贴片中工艺过程的控制, 设计太阳能电池组件串、并联间隙为 1 mm。

3) 在太阳能电池串的并联间隙中涂覆 RTV 硅橡胶以提高其二次放电阈值, 其二次放电阈值能够达到 200 V 以上。

上述 100.3 V 母线高轨太阳能电池阵静电防护设计, 目前已经经过某型号鉴定级热真空试验考核, 热真空试验过程中未发生二次静电放电现象, 试验前后太阳能电池阵工作点电压和工作点电流电性能输出较为一致, 静电防护设计合理有效。

4 结论

通过对高轨高压太阳能电池阵静电防护设计研究, 太阳能电池组件在经过 100 次一次放电试验后, 太阳能电池组件工作点电压和工作点电流电性能输出并未受到影响, 在太阳能电池阵静电防护设计时可以无需考虑一次放电的影响。通过通过高轨高压太阳能电池阵二次放电试验验证, 摸索出太阳能电池阵试验样件通正向电流, 二次放电阈值为 80 V; 通反向电流, 二次放电阈值为 110 V。

文中提供了一种有效针对 100.3 V 高压母线太阳能电池阵的静电防护设计方法: 考虑太阳能电池串在实际贴片中工艺过程的控制, 控制太阳能电池组件串、并联间隙为 1 mm; 设计过程中合理控制相邻太阳能电池串压差, 控制相邻太阳能电池串最大压差为 33.44 V; 太阳能电池组件并联间隙间涂敷 RTV 硅橡胶, 提高其二次放电阈值, 其二次放电阈值能够达到 200 V 以上。

参考文献:

- [1] DANIELS G E. Terrestrial Environment (Climatic) Criteria Guidelines for Use in Aerospace Vehicle Development[R]. NASA TM-78118, 1977.
- [2] 曹敏, 张利群. 高功率太阳阵空间静电环境适应性设计和试验技术[J]. 质量与可靠性, 2011(1): 17-19.
- [3] 张永泰, 秦玮, 杨艳斌, 等. 太阳能电池组件高能电子辐射效应研究[J]. 环境技术, 2017, 35(5): 31-35.
- [4] 崔新宇, 孙彦铮, 王远征, 等. 高压大功率电池阵防静电措施评价试验[J]. 电源技术, 2004, 28(10): 644-648.
- [5] 古士芬, 师立勤, 宋利, 等. 空间等离子体导致高压太阳阵的电流收集[J]. 空间科学学报, 1995, 15(1): 42.
- [6] 黄建国, 刘国青, 姜利祥, 等. 高压太阳能电池阵诱发的航天器充电及放电机理[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(1): 43-51.
- [7] 中科院空间科学与应用盐研究中心. 宇航空间环境手册[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2000.
- [8] 褚桂柏. 宇航技术概论[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002.
- [9] GRIER N T. Plasma Interaction Experiment II: Laboratory and Flight Results[C]// Spacecraft Environment Interactions Technology Conference. NASA CP-2359, 1983.