



槽式太阳能集热管寿命评价分析

北京天瑞星光热技术有限公司 ■ 张磊* 刘雪莲 王静 崔孟龙
中国科学院电工研究所 ■ 雷东强

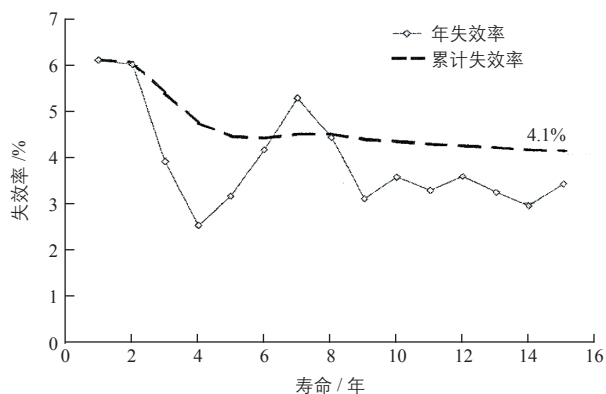
摘要：阐述了集热管的失效主要与集热管部件的耐久性和结构的可靠性相关，并指出国内亟需出台关于集热管失效的测试评价方法及解决措施，以提高集热管的产品性能和质量，为确保国内太阳能热发电站安全可靠运行提供理论和实验依据。

关键词：太阳能热发电；槽式太阳能集热管；集热管共性；失效机理；寿命预测

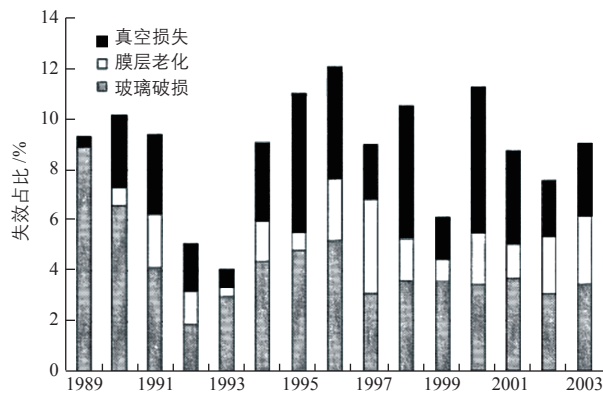
0 引言

太阳能集热管是槽式太阳能热发电站中将太阳能转化为热能的关键部件，其耐久性直接影响了整个槽式热发电系统的效率和运行经济性。现有数据表明，集热管失效一直是槽式热发电站中存在的主要问题，如图 1a 所示，美国加州的 SEGS 太阳能热发电站集热管累计失效率超过 4%；而据统计，2006 年后新建的槽式太阳能热发电站累计失效率超过 3.4%。集热管失效主要包括玻璃破损、真空损失和膜层老化，图 1b 列举了 1989~2003 年 SEGS 太阳能热发电站不同失效类型的占比情况。集热管失效，一方面会造成集热管热损急剧上升，显著降低系统的发电效率；另一方面，为了更换单个集热管，整个回路必须停止运行，也降低了电站的经济性。

集热管的失效主要与集热管部件的耐久性和结构的可靠性相关。其中，耐久性主要涉及到选择性吸收膜层的老化问题。结构的可靠性主要包



a. 不同寿命期内的失效率情况

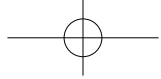


b. 1989~2003 年 SEGS 太阳能热发电站不同失效类型的占比情况
图 1 SEGW 太阳能热发电站集热管失效率统计

收稿日期：2017-12-17

基金项目：国家自然科学基金面上项目 (51476165)

通信作者：张磊 (1985—)，男，硕士，主要从事太阳能热发电用高温集热管方面的研究。zhanglei@spaceman.com.cn



括金属内管弯曲问题、玻璃与金属封接失效问题和波纹管热—机械疲劳失效问题。

1 研究内容

对于选择性吸收膜层高温老化寿命的研究,国际上,国际能源署在 1994 年曾针对平板集热器膜层耐久性测试方法制定了标准初稿,并于 2014 年最终颁布了 ISO 22975-3-2014《太阳能收集器的部件和材料 第 3 部分:吸收表面的耐用性》。国际标准中提到的测试方法是基于温度引起的膜层光学性能衰减可以采用 Arrhenius 方程而进行描述定义的,但该方法限定范围为太阳能平板集热器的膜层老化寿命评价,最高闷晒温度约为 280 °C。而对于槽式太阳能集热管中高温选择性吸收膜层的老化寿命评价,目前尚无测试标准。一些大学及研究机构都相继开展了膜层高温老化的相关研究,特别是意大利 ENEA 研究机构,对 5 MW 槽式熔盐系统的集热管膜层高温老化和集热管结构可靠性等当前的研究热点问题进行了较多研究。

对于太阳能热发电集热管可靠性能的评价手段,国内外不少电站项目和研究机构已经开展了一些研究,比如国外的德国宇航中心 DLR、西班牙 PSA 实验室及德国的 CSP Services,以及国内的中国科学院电工研究所、中国国家太阳能光热产业技术创新战略联盟等。他们都提出了关于集热管的产品检测方法和检测标准,但目前国际上尚未形成统一定论的相关标准,这也是当前亟需解决的共性问题。

以真空失效为例,国内用户对真空失效的标准尚存争议。对此,S 公司对判断集热管在调试运行之前是否发生真空泄露提出了判断依据:集热管调试运行之前发生真空泄露,真空指示斑就会和进入的空气(氧气)反应,颜色变白,如图 2 所示。

除此之外,S 公司的集热管产品手册中也明确表示,在集热管的使用过程中,真空指示斑除

了通常的银色镜面外,还有很多的外观,如彩虹色或黑色,如图 3 所示,这也代表真空良好。

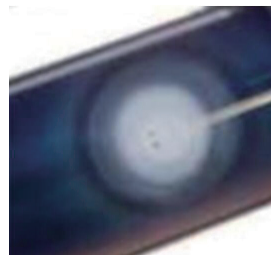
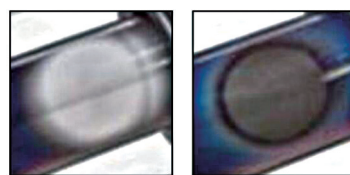
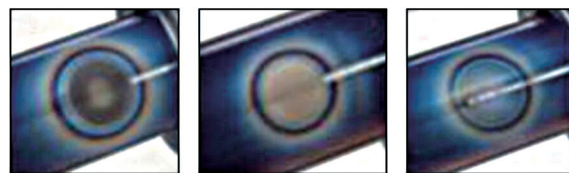


图 2 真空指示斑变白



a. 整体呈银色

b. 整体呈黑色



c. 中心呈黑色,
边缘呈彩色

d. 中心呈银色,
边缘呈黑色

e. 中心透明状,
边缘呈黑色

图 3 真空良好的几种真空指示斑的颜色

2 结果及分析

真空指示斑出现的黑色和彩虹色,主要是由于蒸散型吸气剂形成的钡膜和吸附的杂质气体反应后生成的化合物所呈现的颜色。

在集热管生产过程中(排气之后),真空指示环的材料被加热,通常用感应加热的方式加热并蒸发,沉积在玻璃管上形成涂层,而所看到的的就是银色镜面状态的真空指示斑。

真空指示环的原材料的主要成分是金属钡,蒸发之后在玻璃管内壁形成一层钡膜,从外表面看就是银色镜面。但在集热管的运行过程中,因为长期处于高温状态下,玻璃管及金属管会释放出吸附 H_2 、 CO 、 CO_2 等化合物气体,在高温下,钡膜吸气剂与 CO 、 CO_2 、 H_2 等杂质气体反应,形成碳化钡、碳酸钡、氢化钡等,其中碳化钡是黑色,其他化合物颜色多样,也即是彩虹色指示



斑的成因；而在这个过程中真空指示斑参与了反应，其面积也会逐渐减小。

如果集热管出现破损或外部泄露，空气中的氧气将大量进入，钼膜便与空气中的氧气反应，生成氧化钼，呈现完全的白色，因此只有真空指示斑呈现白色时，才可以初步判定集热管的真空失效。

S 公司也指出，一旦系统开始运行之后，此类依据就不够准确了。其运行后的真空失效的判断公式为：

$$T_{\text{thr}} = T_{\text{amb}} + 50 + (T_{\text{oil}} - 300) / 3 \quad (1)$$

式中， T_{amb} 为大气温度， $^{\circ}\text{C}$ ； T_{oil} 为导热油的温度， $^{\circ}\text{C}$ ； T_{thr} 为玻璃管温度理论值。

系统开始运行后，实际测量运行中的集热管（集热管在其回路运行时，将集热管对应的发射镜翻转，使集热管不处于太阳光聚焦位置）玻璃管的温度 T_g ，并将其与公式 (1) 中的 T_{thr} 进行对比，若 $T_g > T_{\text{thr}}$ ，则表示集热管内部真空失效。

对于 S 公司的关于集热管运行后的真空失效公式，行业内尚存些许争议，国内对此也无公认的判断标准。北京天瑞星光热技术有限公司（下文简称“天瑞星”）将与电工所及相关单位合作，在共性问题的研究基础上，推动此项国内标准的确立。

2017 年，国内 20 个太阳能热发电站示范项

目相继启动，其中槽式和菲涅尔式电站占了 11 个，高温太阳能集热管的可靠寿命及真空失效问题成为很多集热管厂家亟需破解的难题。也是电站业主单位、电站设计单位及 EPC 单位等最为关心的关键问题。天瑞星将与电工所和相关单位合作，共同研究出相应测试评价手段，群策群力，减少厂家各自重复、无效的研究，探索国内集热管产品存在的共性问题的测试评价方法及解决措施，提高集热管的产品性能和质量，为确保国内太阳能热发电站安全可靠运行提供理论和实验依据。

3 结论

国内的 S 公司对集热管的真空失效标准提出了判断依据，但其真空失效公式在行业内尚存些许争议。槽式和菲涅尔式太阳能热发电项目中使用的高温集热管，其表面的蒸散吸气剂镜面只能用于表征集热管正式运行之前的真空度。在集热管上系统运行之后除非其内部完全失真空，否则单纯通过蒸散吸气剂镜面不能完全判断集热管内部的实际真空情况。

参考文献

- [1] ISO 22975-3-2014, 太阳能收集器的部件和材料 第 3 部分：吸收表面的耐用性 [S]. 太阳能

(接第 42 页)

电池及组件有着相似的光谱响应曲线，使得该标准太阳电池能够用于各种类型的太阳电池及光伏组件的测量。当需要测量其他类型的光伏器件，如非晶硅、微晶硅、有机电池等具有不同光谱响应特性的光伏器件时，只需要在该设计基础上更换窗口层与晶体硅电池片的类型，使匹配后光谱响应特性与被测光伏器件相适应即可。

3 结论

本文介绍了一种便于实现的标准太阳电池的结构设计，并对该设计的选材及封装作了详细介绍。该设计符合标准 IEC 60904-2 中对于参考电

池结构的要求。通过该设计制作的标准太阳电池有不错的性能表现，能用于各种单、多晶硅电池及组件的测量，并且当更换电池与窗口玻璃的选材时，亦能用于对其他类型光伏器件的测量。

参考文献

- [1] Osterwald C R, Anevsky S, Barua A K, et al. The World Photovoltaic Scale: an international reference cell calibration program[A]. Conference Record of the Twenty-Sixth IEEE[C]. California, 1997:1209 – 1212.
[2] IEC 60904-2-2015, Photovoltaic devices-Part 2: Requirements for photovoltaic reference devices[S].
[3] 孙皓, 熊利民. 标准太阳电池的研制 [J]. 上海计量测试, 2010, 37(4):11 – 14. 太阳能