

# 太阳能槽式吸热管的可靠性分析

■ 刘元元<sup>1\*</sup> 陈洪晶<sup>2</sup> 刘春喜<sup>1</sup>

(1. 皇明太阳能股份有限公司技术中心; 2. 山东胜宁电器有限公司研发部)

**摘要:** 近年来,国内槽式太阳能热发电技术发展迅速,国家首批示范项目正在开工建设,其核心部件槽式吸热管的热性能和结构的可靠性将直接决定整个槽式热发电站的热效率和经济成本。提高槽式吸热管的可靠性至关重要。该文从槽式吸热管的质量控制、直线度变化规律、焊接应力等多方面对其可靠性进行了分析。

**关键词:** 太阳能; 槽式吸热管; 可靠性

## 0 引言

全球范围来看,从美国到欧洲,太阳能热发电技术的发展迅速,很多大型电站已实现商业化运行,而国内太阳能热发电起步较晚。近几年,国家对太阳能热发电技术越来越重视,《能源发展“十三五”规划》明确指出,要积极推动太阳能热发电产业化发展,2020年,太阳能热发电规模要达到500万kW<sup>[1]</sup>;2016年9月14日,国家能源局正式发布了《国家能源局关于建设太阳能热发电示范项目的通知》<sup>[2]</sup>,共20个项目入选我国首批太阳能热发电示范项目名单,总装机量约为1.35GW,包括9个塔式热发电站、7个槽式热发电站和4个菲涅尔热发电站,其中,槽式热发电站占很大比重。

槽式太阳能热发电是利用槽式聚光镜将太阳光聚在一条线上,在这条线上安装吸热管,吸收太阳能并对传热工质进行加热,再借助蒸汽的动力循环发电。槽式吸热管是将太阳能转变为热能的核心部件,其热性能和结构可靠性将直接决定

整个槽式热发电站的热效率和经济成本。从国际商业化的槽式太阳能热发电站运行和维护的统计数据来看,吸热管真空失效和破损是造成太阳能热发电站经济损失的最主要因素。吸热管真空失效和破损需要及时更换,以免影响电站运行,会大幅提高电站的维护成本,降低整个电站的经济性。因此,从太阳能热发电站的经济性考虑,提高吸热管的可靠性至关重要,本文对槽式吸热管的质量控制、直线度变化规律、焊接应力等多方面进行了分析。

## 1 槽式吸热管的质量控制

对于槽式吸热管的质量控制,主要检测吸热管外玻璃管与内金属管的同轴度及其随温度变化的情况,如图1所示。将吸热管水平放置在测试台架上,两端用滚轮支撑吸热管端部漏出的钢管部分,借用高度尺、激光笔和激光接收靶测试外玻璃管与内金属管之间的间隙大小,在常温和加热到400℃后分别进行测试。外玻璃管与内金属

收稿日期: 2018-02-06

通信作者: 刘元元(1987—),女,中级机械电气工程师,主要从事太阳能中高温集热技术及太阳能热发电方面的研究。18613603575@163.com

管之间间隙的理论值为 20 mm，实测间隙值的变化代表同轴度偏差值，用  $\Delta L$  表示。加热前后外玻璃管与内金属管之间间隙的数值变化规律如图 2 所示。

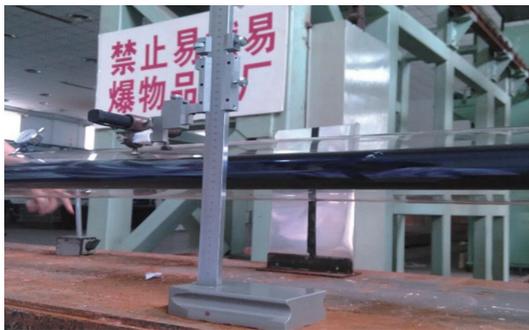


图 1 吸热管同轴度测试

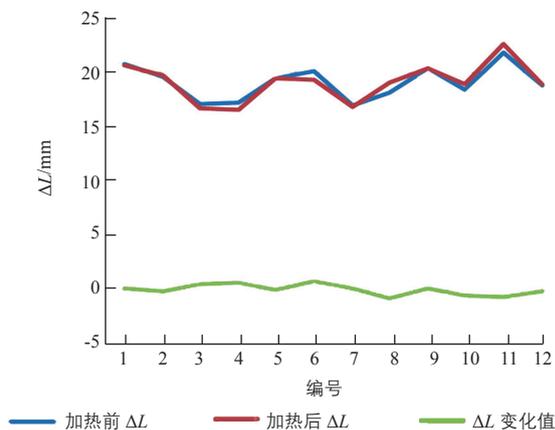


图 2 吸热管加热前后间隙变化规律

从图 2 可以看出，吸热管外玻璃管与内金属管的  $\Delta L \leq 5$  mm。此外，吸热管在经过 400 °C 的高温加热后， $\Delta L$  变化值有正有负且绝对值很小，最大仅为 0.9 mm。因此可以认为，400 °C 以内，不同温度对吸热管同轴度的影响可忽略不计。

## 2 吸热管直线度的变化规律

吸热管直线度是指吸热管水平放置时，吸热管轴线水平方向的偏移量。每根吸热管长度约 4 m，一组集热器阵列需要多根吸热管焊接。理论上，吸热管需安装在一条直线上；但在实际运行过程中，因吸热管随温度变化轴向伸缩，单根吸热管升温 400 °C 后伸长量为 26 mm，每根吸热管焊接处通过吸热管支撑固定。吸热管轴向伸缩引起吸

热管支撑位置的变化如图 3 所示，吸热管常温安装时，吸热管支撑摆动一定角度  $c$ ，支撑中心点高度为  $b_1$ ；吸热管升温至 200 °C，吸热管支撑摆动至竖直位置，支撑中心点高度为  $b_2$ ；吸热管升温至 400 °C 时，吸热管支撑向反方向摆动角度  $c$ ，支撑中心点高度为  $b_3$ 。吸热管支撑位置变化规律如表 1 所示，吸热管轴向伸缩造成吸热管支撑随固定点摆动，吸热管支撑中心点高度也发生变化，从 1561.0 降至 1553.2 mm，高差约为 8 mm。所以，同一阵列吸热管直线度变化为 8 mm。

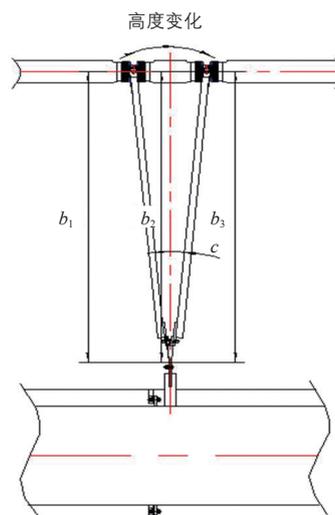


图 3 吸热管支撑位置变化示意图

## 3 吸热管焊接应力的变形分析

一组集热器阵列需要多根吸热管“管管”对焊，为分析焊接残余应力对吸热管变形的影响，选用不同方式焊接样管并进行应力检测，得出测试数据如表 2 所示。

由测试数据得出结论，手工焊管一端自由的焊接方式，因为有变形空间，所以焊接残余应力值较低；两端约束的焊接方式，因为变形空间减少，所以焊接残余应力值较高。自动焊管精度高，残余应力值较小。手工焊管经焊接应力消除后，残余拉应力均变成残余压应力。未处理的工件焊缝的残余应力为拉应力，而拉应力是个不稳定的应力状态，在工件受到荷载时，如果荷载与残余应力叠加超过材料屈服极限，就会造成残余应力释放而变形。

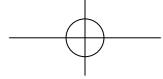


表 1 吸热管支撑位置变化规律

支撑序号	支撑点横向位置 $x/mm$	吸热管轴向偏移 $a/mm$	常温下, 支撑中心点高度 $b_1/mm$	升温至 200 °C, 支撑中心点高度 $b_2/mm$	升温至 400 °C, 支撑中心点高度 $b_3/mm$	支撑倾斜角度 $c/(^\circ)$
1	0	0	1561.0	1561	1561.0	0
2	4073	13	1560.9	1561	1560.9	0.4
3	8146	26	1560.8	1561	1560.8	0.8
4	12219	39	1560.5	1561	1560.5	1.3
5	16292	52	1560.1	1561	1560.1	1.7
6	20365	65	1559.6	1561	1559.6	2.1
7	24438	78	1559.1	1561	1559.1	2.5
8	28511	91	1558.3	1561	1558.3	2.9
9	32584	104	1557.5	1561	1557.5	3.3
10	36657	104	1556.6	1561	1556.6	3.8
11	40730	130	1555.6	1561	1555.6	4.2
12	44803	143	1554.5	1561	1554.5	4.6
13	48876	156	1553.2	1561	1553.2	5.0

表 2 吸热管焊接应力测试

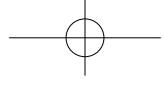
类型	测试状态	应变值			夹角 $\theta$	应力值 /Mpa		配图
		$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$		$\sigma_1$	$\sigma_2$	
手工焊管	母材 1	-4.34	-13.68	-5.04	43.89	15.63	3.14	
	母材 2	-52.78	-2.88	-10.80	27.01	88.39	38.78	
	焊道 1	-18.07	-28.08	-10.08	-37.04	38.26	18.03	
	焊道 2	-5.06	-22.32	-12.24	37.64	27.11	7.49	
自动焊管	母材 1	-34.75	-15.13	-3.59	7.28	49.52	27.17	
	母材 2	-27.47	-7.92	-6.48	20.39	43.57	24.32	
	焊道 1	-2.91	30.94	22.31	29.65	-2.26	-36.56	
成品管	焊道 1	-7.95	-50.40	-69.12	10.60	99.85	54.29	
	焊道 2	-7.95	-18.72	-66.25	-16.12	98.13	50.27	
	焊道 3	-12.29	-27.38	-67.69	-12.24	101.11	58.84	
去应力管	焊道 1	43.84	45.31	45.31	22.50	-88.44	-89.88	
	焊道 2	76.03	38.02	47.53	29.53	-104.32	-142.80	
	焊道 3	27.03	27.78	63.59	-21.90	-73.04	-108.21	

注: 1) 选用专用应变花, 该应变花包含 3 个应变计, 按 0°、45°、90° 方向分布, 测出各点的应变值  $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$ 、 $\epsilon_3$ , 然后计算出夹角  $\theta$  及主应力  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ ; 2) 母材、焊道编号为同一管上随机取点; 3) 应力值  $> 0$  为拉应力, 应力值  $< 0$  为压应力

#### 4 结论

太阳能槽式吸热管的可靠性受多种因素的影响: 1) 吸热管外玻璃管与内金属管的同轴度及其随温度变化情况的出厂质量控制; 2) 吸热管直线度变

化规律, 吸热管轴向伸缩造成吸热管支撑随固定点摆动, 吸热管支撑中心点高度也发生变化; 3) 一组集热器阵列的多根吸热管“管管”对焊后, 存在焊接残余应力, 在工件受到荷载时, (转第 8 页)



霜,减少了除霜时间。太阳能作为辅助热源提高了系统的蒸发温度,间接改善了压缩机工作环境,延长了机组寿命,从而提高了集热效率,增加了对太阳能的利用率,两者互为补充。国内研究者对温室太阳能热泵进行加温实验后发现,热泵系统的  $COP$  一般在 3 左右<sup>[12]</sup>。

随着农业生产对能源的需求越来越强烈,节能降耗及环保方面的问题日益突出,太阳能集热与热泵的结合会越来越有市场,必将成为未来的主要供能手段。

## 2 技术发展的展望

万物生长靠太阳。温室是能够同时利用太阳光光合能量和光热转换的设施。其中,光热转换利用率能够达到 80%,光合利用率约为 5%,温室种植的产量可达到露天种植的产量的 5 倍左右。对于人均耕地面积只占世界人均水平 25% 的中国来说,其意义是巨大的。未来,太阳能热利用技术在温室中的应用应向以下几个方向发展。

1) 太阳能直接吸收技术。该技术是利用介质流体直接全部或部分吸收太阳辐射进行光热转换,温室最大的光接收面积是整个温室的外层薄膜,应着重研究对植物生长的光热两相性的薄膜集热技术及配套设施。

2) 温室内高效集热、储能、用能技术。采用“削峰填谷”的思路,进一步提高温室白天的太阳辐射收集效率,高效储能,研发适用于温室的加温方式,研制适用于温室的太阳能主动截获技术及装备。

3) 太阳能热泵能效的提升技术。针对温室作物需求的热环境要素,研究制定热泵运行机制,提高热泵在不同天气条件下的整体运行效率。

## 3 结论

本文梳理和总结了太阳能热利用技术在我国温室中的应用现状与主要形式,并对该技术的发展提出了展望。未来,资源节约型和环境友好型的温室生产方式将得到进一步的推广和应用。

### 参考文献

- [1] 张述英,王向东. 蔬菜保护地高产高效栽培技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997.
- [2] 农业部农业机械化管理司. 全国农业机械化统计年报[R]. 农业部农业机械化管理司, 2016.
- [3] 熊莉萍. 充分利用太阳能资源,加快宁夏光伏发电开发[J]. 科技与企业, 2011, (16): 83 - 85.
- [4] 王奉钦. 太阳能集热器辅助提高日光温室低温的应用研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- [5] 李文,杨其长,张义,等. 日光温室主动蓄放热系统应用效果研究[J]. 中国农业气象, 2013, 34(5): 557 - 562.
- [6] 马承伟,姜宜琛,程杰宇,等. 日光温室钢管屋架管网水循环放热系统的性能分析与实验[J]. 农业工程学报, 2016, 21(32): 209 - 216.
- [7] 陈紫光,陈超,凌浩怒,等. 日光温室专用多曲面槽式太阳能空气集热器热工性能实验研究[J]. 建筑科学, 2014, 8(30): 58 - 63.
- [8] 张新桥,陈文. 温室太阳能蓄热水池的节能分析[J]. 农机化研究, 2011, (8): 46 - 50.
- [9] 戴巧利,左然,李平,等. 主动式太阳能集热/土壤蓄热塑料大棚增温系统及效果[J]. 农业工程学报, 2009, 7(25): 164 - 168.
- [10] 于威,王铁良,刘文合,等. 太阳能土壤加温系统在日光温室土壤加温中的应用效果研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2010, 41(2): 190 - 194.
- [11] 李晓野. 温室太阳能空气集热相变蓄热装置设计及性能研究[D]. 杨陵区: 西北农林科技大学, 2012.
- [12] 周升. 大跨度主动蓄能型温室太阳能热泵增温试验研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016. **太阳能**

(接第 47 页)

如果荷载与残余应力叠加超过材料的屈服极限,就会造成残余应力释放而变形。

### 参考文献

- [1] 国家发展改革委 国家能源局关于印发能源发展“十三五”

规划的通知[EB/OL]. [http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201701/t20170117\\_835278.html](http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201701/t20170117_835278.html), 2016-12-26.

- [2] 国家能源局关于建设太阳能热发电示范项目的通知[EB/OL]. [http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201609/t20160914\\_2298.htm](http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201609/t20160914_2298.htm), 2016-9-13. **太阳能**