

全玻璃真空太阳集热管关键技术参数研究进展

丁祥^{1,2} 高文峰^{1,2*} 张有刚^{1,2} 李琼¹

(1. 云南师范大学太阳能研究所 昆明 650500; 2. 国家太阳能热水器质量检验检测中心(昆明) 昆明 650500)

Research Progress on Key Technical Parameters of All-Glass Evacuated Solar Collector Tubes

DING Xiang^{1,2}, GAO Wenfeng^{1,2*}, ZHANG Yougang^{1,2}, LI Qiong¹

(1. Solar Energy Research Institute, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China; 2. National Quality Inspection and Testing Center for Solar Water Heating Systems (Kunming), Kunming 650500, China)

Abstract All-glass evacuated solar collector tubes are an important component of solar thermal utilization systems, and their performance parameters directly affect the thermal performance, durability, reliability, and energy-saving effect of solar thermal utilization systems. Based on the introduction of the basic structure and working principle of evacuated tubes, this article provides a detailed analysis of the research progress on key technical parameters, such as optical and thermal properties that affect the performance of evacuated tubes, as well as other technical requirements, such as glass tube materials and vacuum properties. On the basis of long-term scientific and testing work, suggestions were proposed to improve the product performance of evacuated tubes, including optimizing glass tube production, developing new coatings, enhancing vacuum performance, innovating technology, developing advanced equipment, and revising standards.

Keywords All-glass evacuated solar collector tubes, Solar selective absorbing coating, Optical property, Thermal performance

摘要 全玻璃真空太阳集热管是太阳能热利用系统的重要组成部分,其性能参数的优劣直接影响到太阳能热利用系统的热性能、耐久可靠性和节能效果。文章从真空管基本结构和工作原理的介绍出发,对影响真空管性能的光学性能、热性能等关键技术参数及玻璃管材料、真空性能等其他技术要求的研究进展做了详细分析,并在长期从事科研和检测工作的基础上,给出了提升真空管的产品性能可从玻璃管生产优化、新涂层开发、真空性能加强、技术创新、先进设备开发、标准修订等方面的建议。

关键词 全玻璃真空太阳集热管 太阳选择性吸收涂层 光学性能 热性能

中图分类号: TK513

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202308002

全玻璃真空太阳集热管(以下简称为真空管)是家用太阳能热水系统及太阳能热水、供暖、空调、制冷等工程系统的重要组成部分^[1-3],其材料特性、集热效果、真空性能、耐久特性直接影响太阳能热利用系统的质量、运行及节能效果。国家标准 GB/T 17049—2005《全玻璃真空太阳集热管》^[4](以下简称为 GB/T 17049 标准)是目前国内最常用的真空管产品性能检验和判定标准,内容涵盖产品分类、

技术要求、检测方法等,该标准主要适用于太阳能热利用低温领域,在民众、企业、政府机构中的接受程度较高,是各级别真空管产品质量市场监督抽查工作的主要依据。国家太阳能热水器质量检验检测中心(昆明)是较有影响力的国家级太阳能产品第三方检验检测实验室之一,近年来针对真空管的生产优化、性能检测和技术应用做了大量研究工作。本文首先对真空管的基本结构和工作原理进行简

要介绍,然后对影响真空管性能的关键技术参数和其他技术要求的研究进展进行详细分析,最后为真空管性能的提升提供参考建议。

1 真空管的基本结构及工作原理

1.1 真空管的基本结构

真空管是由具有太阳选择性吸收涂层的内玻璃管和同轴的罩玻璃管为主要部件构成的用于收集太阳能辐射能量以加热管内流体介质(通常为水)的装置。内玻璃管一端为封闭的圆顶形状,由罩玻璃管封离端内带吸气剂的支承件支撑,另一端与罩玻璃管熔封成为环状的开口端,内、外管夹层之间抽成高真空。真空管的形状像一个细长的暖水瓶胆,采用单端开口,其结构及组成部件的名称如图1所示。如果将若干支真空管按照一定规则排成阵列,并与联集管、支架等可组装成太阳能集热器;再加上储水箱、循环管路、控制系统等可组装成太阳能热水系统。

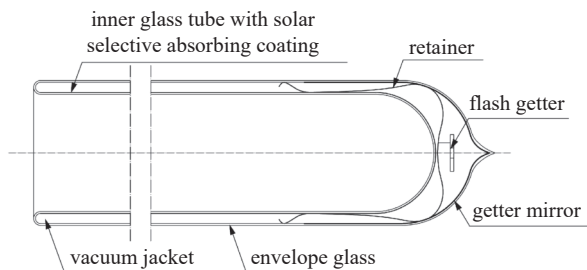


图1 真空管的结构及组成部件

Fig. 1 Structure and components of evacuated tubes

1.2 真空管的工作原理

真空管的工作原理为: 太阳辐射透过罩玻璃管照射到内玻璃管外表面的太阳选择性吸收涂层上, 太阳辐射能转换为热能, 加热内玻璃管内的流体介质, 流体通过热虹吸现象将热量传递到管口的联集管或水箱中, 由于内、外管夹层之间被抽为高真空, 能有效降低向周围环境的热损失, 使集热效率和保温性能得以提高。云南师范大学高文峰研究团队^[5-10]通过实验和计算流体力学数值模拟方法对真空管内部的流场分布、温度场分布、循环流量等换热特性进行了系统研究, 从微观上验证了真空管的工作原理, 如图2所示为真空管在接受太阳辐射1 h后, 管内某横截面处水的温度和速度分布云图, 管内呈现出明显的温度分层和热虹吸现象。

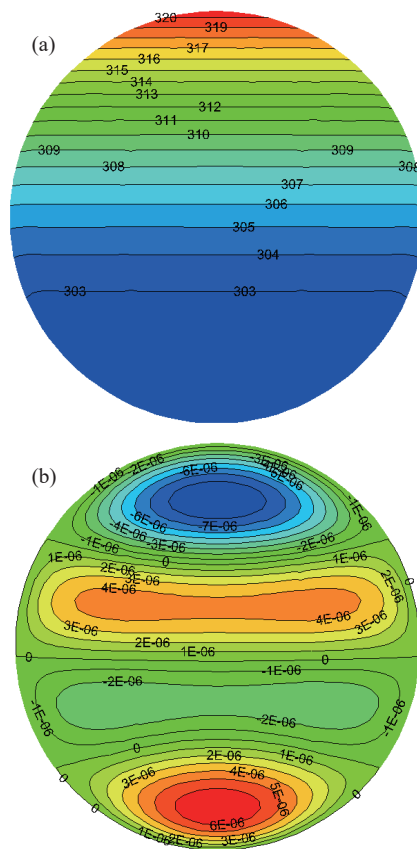


图2 真空管内部温度和速度分布云图^[7]。(a)温度云图, (b)速度云图

Fig. 2 Cloud diagram of temperature and velocity distribution inside the evacuated tube^[7]. (a) Cloud diagram of temperature, (b) cloud diagram of velocity

2 真空管关键技术参数分类与指标要求

由 GB/T 17049 标准可知, 真空管的技术参数包括材料、空晒性能参数、闷晒太阳辐照量、平均热损系数、真空性能、耐热冲击、耐压、抗机械冲击、外观与尺寸等, 其中最关键可定量的参数可分为光学性能和热性能两大类。

光学性能参数主要包括罩玻璃管的太阳透射比 τ 、内玻璃管上附着太阳选择性吸收涂层的太阳吸收比 α 以及半球发射比 ε_h 等; 热性能参数主要包括空晒性能参数 Y 、闷晒太阳辐照量 H 、平均热损系数 U_{LT} 等。以上所述关键技术参数的指标要求及本实验室所采用的测试设备见表1。

2.1 真空管光学性能参数分析

通过表1可知, 罩玻璃管的太阳透射比 τ 越高, 则太阳辐射透过罩玻璃管、穿过真空夹层后, 到达内玻璃管外表面太阳选择性吸收涂层上的辐照量越多, 真空管吸收的能量则越多。提高玻璃管的太

表 1 GB/T 17049—2005 中真空管关键技术参数指标要求

Tab. 1 GB/T 17049—2005 requirements for key technical parameters of evacuated tubes

	技术参数	指标要求	实验设备
光学性能参数	罩玻璃管的太阳透射比 τ (AM1.5)	≥ 0.89	Agilent Cary 5000 型分光光度计
	太阳选择性吸收涂层的太阳吸收比 α (AM1.5)	≥ 0.86	
	太阳选择性吸收涂层的半球发射比 ε_h (80±5℃)	≤ 0.080	TYD-FS1 型真空管半球发射比测试仪
热性能参数	空晒性能参数 Y ($\text{m}^2 \cdot \text{℃}/\text{kW}$)	≥ 190	TYD-2C 型真空管热性能测试系统
	罩玻璃管外径 $\Phi=47 \text{ mm}$	≤ 3.7	
	罩玻璃管外径 $\Phi=58 \text{ mm}$	≤ 4.7	TRM-2 型太阳能测试系统数据采集仪
	平均热损系数 U_{LT} ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{℃})$)	≤ 0.85	

阳透射比 τ , 需在玻璃生产过程中尽量减少 Cr、Mn、Co、Cu 等有色成分及 Fe 离子的含量^[11], 这就对玻璃生产原料的来源及提纯提出了高要求, 部分真空管产品的太阳透射比 τ 偏低就是受玻璃生产原材料(主要原料为石英砂、硼砂及主要伴生物 Fe_2O_3)的影响。

内玻璃管外表面上附着的太阳选择性吸收涂层对真空管光热转换效率起关键作用, 要求其具有高的太阳吸收比 α 和低的半球发射比 ε_h , 同时具有良好的真空性能、耐热性能和耐候性能^[12-13]。目前多采用磁控溅射技术的单靶、三靶及自动连续多靶镀膜工艺^[14]生产的氮化铝/铝-氮复合材料/铝($\text{AlN}/\text{Al-N}/\text{Al}$)渐变膜涂层^[15-17]及氮化铝/不锈钢-氮化铝复合材料/铜($\text{AlN}/\text{SS-AlN}_x/\text{Cu}$)干涉膜涂层^[18-23], 涂层从外到里依次均为减反层、吸收层和金属反射层, 最大的区别是吸收层的结构、成分和层数。图 3 为两种常见类型涂层的结构示意图, 其中渐变膜涂层的三层吸收层所含金属成分由内向外逐渐降低, 而干涉膜涂层的两层吸收层由靠内的高含量

金属吸收层和靠外的低含量金属吸收层组成。不同生产厂家的镀膜设备、镀膜时间、膜系设计、膜层厚度及层数、原材料质量及配比等客观条件均有所不同, 再加上不同生产目的及成本控制等主观原因, 导致目前市场上不同品牌及不同批次产品的性能差异较大。严格控制并稳定镀膜工艺, 同时加强在线实时监测和适时工艺调整, 可有效提高太阳吸收比 α 并降低半球发射比 ε_h 。

2.2 真空管热性能参数分析

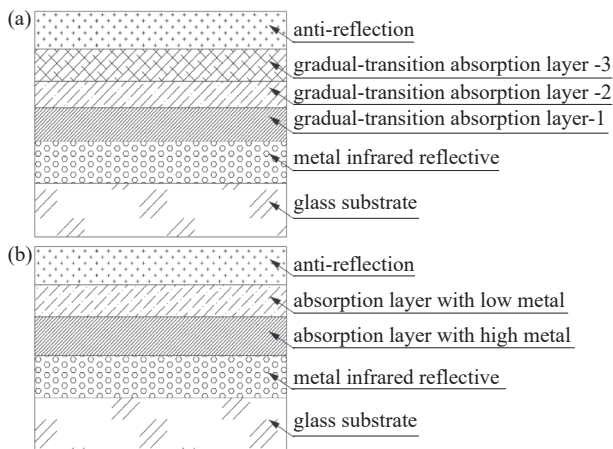
从真空管基本能量平衡方程可知, 真空管的热性能参数与上述太阳透射比 τ 、太阳吸收比 α 及半球发射比 ε_h 等光学性能参数的关系较为紧密^[24-30]。

空晒性能参数 Y 综合反映了真空管在不同环境温度和太阳辐照度下的集热性能, Y 值越高越好。在良好的真空性能条件下, 半球发射比 ε_h 越小, 太阳吸收比 α 越大, 则空晒性能参数 Y 越高, 其中半球发射比 ε_h 的影响占主要因素。

闷晒太阳辐照量 H 综合反映了真空管在有效得热相同时的累计太阳辐照量, 间接表示了真空管的升温性能, H 值越低越好。半球发射比 ε_h 越小, 太阳吸收比 α 越大, 则闷晒太阳辐照量 H 越低, 其中太阳吸收比 α 的影响占主要因素。

平均热损系数 U_{LT} 综合反映了真空管的保温性能, U_{LT} 值越低越好。半球发射比 ε_h 越小, 同时真空性能越好, 则平均热损系数 U_{LT} 越低, 真空管的集热效果和防寒抗冻能力越好。真空管热损主要受辐射热损和边端效应热损的影响^[31]。

由以上分析可知, 真空管的半球发射比 ε_h 越小越好, 空晒性能参数 Y 和平均热损系数 U_{LT} 受半球发射比 ε_h 的影响较大, 两者通常呈现一定的反比例函数关系, 即当空晒性能参数 Y 增大时, 平均热损系数 U_{LT} 也相应减小。

图3 涂层结构示意图^[14]。(a)渐变膜, (b)干涉膜Fig. 3 Schematic diagrams of coating structures^[14]. (a) Gradient film, (b) interference film

3 真空管其他技术要求分析

3.1 玻璃管材料

真空管的玻璃管材料应采用硼硅玻璃 3.3, 除前文所述对太阳透射比 τ 的指标要求外, 其理化性能及所含结石、节瘤的大小数量也均有相应要求。需注意的是玻璃管在生产过程中会产生永久性的热应力和结构应力^[32-33], 易导致玻璃内部的不均匀性, 改变光学性质, 降低机械强度和热稳定性, 从而易引起真空管破碎, 甚至“炸管”现象, 直接影响真空管的耐热冲击、耐压、抗机械冲击等性能。通常可利用正交三目偏光显微镜对玻璃管切环的均匀性进行图像定性分析, 然后确定环切等级^[34], 从而正确评价玻璃管质量, 但目前 GB/T 17049 标准中未提及对环切等级的要求。

3.2 真空性能

真空性能包含真空度及真空品质。真空度要求真空夹层内的气体压强 $p \leq 5.0 \times 10^{-2}$ Pa, 但 p 值很难直接测量, 目前一般通过火花检漏仪进行粗略定性分析。真空品质即要求内玻璃管置于 350℃ 下, 保持 48 h, 吸气镜面轴向长度消失率不大于 50%, 消失率越低, 则真空性能越好, 因此真空品质实验更为关键^[35]。真空品质主要影响空晒性能参数 Y 和平均热损系数 U_{LT} , 反映了真空管的真空寿命, 真空寿命越长, 则产品寿命越长。

3.3 外观与尺寸

外观项目包括对罩玻璃管表面、涂层、支承件、开口端等部件的检查, 尺寸项目要求开口端涂层颜色变浅区长度、管长、弯曲度、径向比、封离端长度等符合相应偏差要求。外观与尺寸项目的检测结果通常为合格, 但部分细节内容较易忽视。例如, 一些生产厂家为了降低成本和出厂价格, 采用较薄的玻璃毛坯管来制作真空管, 不仅使单管壁厚变薄、重量减轻, 更降低了产品的机械强度, 但目前 GB/T 17049 标准未提及对真空管壁厚或重量的要求。另外, 标准对真空管弯曲度和径向比的要求偏低, 弯曲度和径向比偏大易导致真空管与联接管或水箱的连接处发生漏水故障, 更容易产生“炸管”现象。

从以上关于真空管技术要求的归纳总结可知, 对产品性能起最关键核心作用的是太阳选择性吸收涂层的太阳吸收比 α 和半球发射比 ε_h 、玻璃管材料以及真空性能, 因此太阳选择性吸收涂层及玻璃

管材料的生产工艺和抽真空及真空保持技术还需要作进一步研究和发展。

4 真空管性能提升建议

近年来, 国内外仅有李郁武等^[36]对真空管产品性能及质量进行了全面的针对性研究, 发现有 94% 比例所测样品的太阳透射比 τ 大于 0.91、太阳吸收比 α 大于 0.88、半球发射比 ε_h 小于 0.070, 有 92% 比例所测样品的空晒性能参数 Y 大于 $220 \text{ m}^2 \cdot \text{℃} / \text{kW}$, 81% 比例所测样品的平均热损系数小于 $0.65 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{℃})$, 闷晒太阳辐照量多数集中在 $4.3 \sim 4.6 \text{ MJ} / \text{m}^2$ 之间, 另外有 91% 比例所测样品在真空品质测试时, 吸气镜面轴向长度消失率低于 20%, 所有结果数据表明目前真空管的实际性能指标已远远优于现行 GB/T 17049 标准的要求。但是, 据本实验室的测试数据分析, 目前在市场上的真空管产品质量仍然参差不齐, 特别是存在关键技术参数水平不高、生产工艺水平落后等问题。因此, 继续提升真空管的相关性能, 需要从原料、生产、研发等方面进行改进, 同时还需对最常用的 GB/T 17049 标准部分技术要求和实验方法等内容进行修订, 以满足产品性能提升的发展需要, 以及政府监管和市场竞争的需求。建议可从以下几个方面开展工作:

4.1 注重玻璃管的生产原料和生产质量

首先应进行玻璃管生产所使用石英砂、硼砂等原材料的产地、质量和纯度筛选, 提升原材料中硅和硼的元素含量, 降低有色金属和铁离子的含量, 增强添加剂的均匀性和稳定性, 从而提高玻璃在可见光及近红外部分波段的太阳透射比 τ 。其次应重视玻璃管的生产过程, 采用更先进的玻璃加工工艺, 降低圆管的弯曲度和径向比, 特别是需要提升退火处理能力, 避免玻璃中气泡、结石、条纹、节瘤和划痕的产生, 降低不稳定应力的影响, 不断提高玻璃管的透明度和耐热性能。另外, 应制定温度、湿度、压强、浓度、流量、时间等生产要素的标准质量控制程序, 可增加智能感应和自动调节控制模块, 同时应加强玻璃管的抗机械冲击及环切等级等在线监测。

4.2 开发新型太阳选择性吸收涂层

优化吸收涂层的材料选择和设计, 以提高其吸热效率、稳定性和长期性能。不断研究开发新型涂层, 在不增加或略微增加生产成本的前提下, 以传

统“渐变膜”、“干涉膜”工艺为基础,关注各吸收层因金属填充因子差异而扩散导致的性能下降问题,开发适应性强且适合民用的能耐中、高温涂层,研究真空管运行在 150℃~250℃ 温度范围内的性能,进一步提高太阳吸收比 α ,降低半球发射比 ε_b ,提高产品的关键热性能参数。可考虑采用金属氧化物或氟化物等抗反射膜层、纳米级金属陶瓷膜层、光催化膜层等多种先进复合结构涂层材料,同时可应用涂层表面微不平化镀膜处理等先进技术。

4.3 加强管内真空性能

随着真空管的长期使用,管内吸附和溶解的部分 H_2O 、 CO_2 、 N_2 、 CH_4 、Ar、油蒸气等气体会通过脱附和扩散进入真空夹层,且空气中的惰性气体如 He 气,也会通过玻璃渗透进入真空夹层,从而导致管内真空度下降^[37-38]。建议首先应采用先进的抽真空工艺来提高管内真空度,尽可能去除管内原始残余气体,避免对涂层和玻璃的吸附,同时应提升镀膜和烘烤排气操作水平,降低镀膜过程中保护气体的渗透和排气过程中油的扩散影响。其次,应根据具体使用的玻璃管材料特性,合理设置烘烤排气的温度和时间,充分排除玻璃内的结晶水,在抽真空的同时,降低对涂层的影响^[39]。另外,由于常用的蒸散型吸气剂对惰性气体基本没有吸收能力,因此需开发新型吸气剂,如环形和非蒸散型吸气剂,确保真空性能的长期稳定性,从而不断降低辐射热损失,提高热效率,同时增强真空管的保温性能。

4.4 推进全面技术创新

积极开展技术研发和创新,不断改进真空管产品设计和制造工艺。在产品的设计方面,除了传统的玻璃材料,可以考虑使用陶瓷、塑料、金属等新型复合材料,以提供更好的热性能、机械性能和耐候性能;扩宽真空管结构尺寸选择范围,在目前最常用的“罩玻璃管外径 $\Phi 58$ mm/内玻璃管外径 $\Phi 47$ mm×管长 1800 mm”真空管尺寸基础上,对内、外管径、管间距以及管长等尺寸进行合理化设计,优化内管腔容积(即内管容水量)与吸热体有效外表面积、真空夹层容积之间的配比,并注意避免不合理的管径、管长易导致的流动换热缓滞区^[40-41],在提高管内升温性能的同时,尽量节约成本;进行管内结构优化设计,可通过光学设计,应用光子晶体技术,引入渐变折射率、反射镜、光栅等光学元件,以改善光的收

集和传递,减少热量损失和热桥效应,优化太阳辐射的收集和利用;选择具有良好热传导性和流动性的工作流体,优化流体的热导率、黏度和比热容,增强换热,提高热能传输效率,可采用铜—水、 TiO_2 水基等纳米流体和相变材料。在制造工艺方面,引入人工智能物联网 AIoT 技术,实现真空管生产的远程监控、智能控制和数据分析;将生产用能与其他光伏发电、风力发电等可再生能源技术进行集成,结合储能技术,实现综合能源管理和优化,提高能源总体利用效率;进行定制化设计和可持续制造,根据具体用途和要求来设计和生产不同类型的真空管产品,同时考虑环保和可持续性发展因素,如使用可再生材料、减少废弃物产生、降低能耗等。

4.5 提高生产及测试设备的先进性

开发新型真空管自动化生产线,使用经过严格测试和校准的设备,确保高精度、高质量进行生产,提高生产效率和产品质量,减少人工操作带来的误差,从而增强产品的稳定性和一致性。引进或自主开发先进的测试设备,如高精度的真空计、光学测试、耐久可靠性测试、热性能测试等专用设备。另外,还需建立完善的质量检测程序,对每个生产批次的产品进行在线及出厂前的全面检测,内容包括外观检查、性能测试等。

4.6 修订 GB/T 17049 标准中部分技术参数指标要求

目前国内常用的涉及真空管性能检验标准中规定的部分技术参数指标要求见表 2,其中 GB/T 35606—2017《绿色产品评价 太阳能热水系统》^[42]绿色产品评价国家标准及 NB/T 34070—2018《全玻璃真空太阳集热管技术规范》^[43]国家能源行业标准明显提升了对部分关键技术参数指标的要求,还增加了如玻璃管环切等级、壁厚等其他技术参数要求。

由于 GB/T 17049 标准在国内的宣贯、推广以及政府和市场的认可程度较高,但是久未修订,因此建议应适时对该标准的部分技术要求和实验方法等内容进行修订。本实验室大量实测数据结果表明大多数技术参数指标要求有提升的必要,具体修订建议如表 2 所示,但是建议暂时不要变动空晒性能参数 Y 及闷晒太阳辐照量 H 的指标要求,因为这两个参数受测试地点、环境和实验设备等外在不确定因素的影响较大,实验结果的稳定性较差。针

表 2 不同真空管产品标准中技术参数指标要求对比及修订建议

Tab. 2 Comparison of technical parameters in different evacuated tube product standards and suggestions for revision

技术参数		GB/T 17049—2005 指标要求	GB/T 35606—2017 指标要求	NB/T 34070—2018 指标要求	GB/T 17049—2005 修订建议指标要求
光学性能参数	τ (AM1.5)	≥ 0.89		≥ 0.90	≥ 0.90
	α (AM1.5)	≥ 0.86	≥ 0.92	≥ 0.90	≥ 0.90
	ϵ_h (80±5℃)	≤ 0.080		≤ 0.070	≤ 0.070
热性能参数	Y (m ² ·℃/kW)	≥ 190	≥ 190	≥ 200	≥ 190
	H (MJ/m ²) 外径 $\Phi=47$ mm	≤ 3.7	≤ 3.7	≤ 3.5	≤ 3.7
	外径 $\Phi=58$ mm	≤ 4.7	≤ 4.7	≤ 4.5	≤ 4.7
	U_{LT} (W/(m ² ·℃))	≤ 0.85	≤ 0.85	≤ 0.80	≤ 0.80
	玻璃管环切等级	/	不大于 HQ-8		增加同前列相同内容
其他参数	玻璃管壁厚/mm	/	1.60±0.10 (外径 $\Phi=37$ mm); 1.75±0.10 (外径 $\Phi=47$ mm); 1.80±0.10 (外径 $\Phi=58$ mm)		增加同前列相同内容

对其他不在表 2 中的技术参数,建议将真空品质测试时吸气镜面轴向长度消失率提高到不大于 30% (现为 50%),同时将测试时的加热温度提高到 400℃ (现为 350℃);将玻璃管的弯曲度要求提高到不大于 0.1% (现为 0.2%);将径向最大尺寸与最小尺寸之比的要求提高到不大于 1.01 (现为 1.02)。

对于部分技术参数的实验方法,首先建议制定更加详细的空晒性能参数 Y 和闷晒太阳辐照量 H 的测试方法,缩小测试期间太阳辐照度、环境温度、风速等气象条件范围,并对测试具体时间、实验台是否跟踪或固定角度、周边散射条件控制等外在因素做到统一;其次,建议研发新型真空性能测试设备和方法,选用更加适合圆管尺寸测量的专用设备;另外,可考虑增加例如真空老化、中高温老化、空晒老化、积尘、单管称重等实验及相应的技术要求等新内容。

5 结论与展望

本文首先阐述了真空管的基本结构和工作原理,继而详细分析了影响真空管性能的光学性能、热性能等关键技术参数以及玻璃管材料、真空性能等其他技术要求,结果表明:

(1)提高玻璃管的太阳透射比 τ ,需改进玻璃加工工艺,并加强生产原料的来源筛选和提纯,玻璃生产过程中产生的不稳定应力易影响耐久可靠性,应加强抗机械冲击及环切等级测试等在线监测。

(2)太阳选择性吸收涂层需具有高的太阳吸收比 α 和低的半球发射比 ϵ_h ,目前主要采用磁控溅射技术生产的渐变膜涂层和干涉膜涂层,涂层性能是导致真空管性能差异较大的主要原因。

(3)空晒性能参数 Y 和平均热损系数 U_{LT} 主要受半球发射比 ϵ_h 的影响;闷晒太阳辐照量 H 受太阳吸收比 α 的影响较大;真空性能会影响所有的热性能参数,并能影响真空管的使用寿命。

(4)目前真空管的实际性能指标大多优于现行 GB/T 17049 标准要求,产品标准的更新和普及仍有发展空间。

为了真空管性能提升的发展需要,建议从优化玻璃管生产、开发新涂层、加强真空性能、推进技术创新、提高设备先进性、修订 GB/T 17049 标准等方面开展工作。除此以外,真空管的长期发展仍存在成本控制、维护保养、破碎防护、防尘除雪、老化衰退、过热保护等方面的问题。

参 考 文 献

- [1] Qiu S, Ruth M, Ghosh S. Evacuated tube collectors: A notable driver behind the solar water heater industry in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015(47): 580–588
- [2] Sabiha M A, Saidur R, Mekhilef S, et al. Progress and latest developments of evacuated tube solar collectors[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015(51): 1038–1054
- [3] Tabarhoseini S M, Sheikholeslami M, Said Z. Recent advances on the evacuated tube solar collector scrutinizing latest innovations in thermal performance improvement involving economic and environmental analysis[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2022(241): 111733
- [4] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC, Standardization Administration of the PRC. GB/T 17049—2005 All-glass evacu-

- ated solar collector tubes[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005: 1-15 (中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 17049—2005 全玻璃真空太阳集热管 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2005: 1-15(in Chinese))
- [5] Ma Fangfang, Gao Wenfeng, Liu Tao, et al. Experimental study on the influence of the absorptance of the selective absorbing coating on the thermal performance of all-glass evacuated tubes[J]. *Journal of Yunnan Normal University(Natural Sciences Edition)*, 2012, 32(4): 17-22 (马芳芳, 高文峰, 刘滔, 等. 真空管吸收涂层的吸收比对全玻璃真空管的热性能影响的试验分析 [J]. 云南师范大学学报 (自然科学版), 2012, 32(4): 17-22(in Chinese))
- [6] Ma F, Gao W, Liu T, et al. An experimental study on the impacts of key parameters of all-glass evacuated tubes on the thermal performances of all-glass evacuated tube solar water heaters[J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2013, 5(2): 23140
- [7] Ma Fangfang. Experimental study and CFD numerical simulation of all-glass evacuated solar collector tubes[D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2013 (马芳芳. 全玻璃真空太阳集热管的实验研究与 CFD 数值模拟 [D]. 昆明: 云南师范大学, 2013(in Chinese))
- [8] Liu Baihong, Gao Wenfeng, Liu Tao, et al. Numerical simulation and analysis on stagnation performance of all-glass evacuated collector tubes[J]. *Journal of Yunnan Normal University(Natural Sciences Edition)*, 2015, 35(4): 5-10 (刘佰红, 高文峰, 刘滔, 等. 全玻璃真空太阳集热管空晒性能的数值模拟分析 [J]. 云南师范大学学报 (自然科学版), 2015, 35(4): 5-10(in Chinese))
- [9] Liu Baihong, Gao Wenfeng, Liu Tao, et al. Numerical study on the stagnation parameter of all-glass evacuated solar collector tubes[J]. *Journal of Yunnan Normal University(Natural Sciences Edition)*, 2017, 37(1): 6-11 (刘佰红, 高文峰, 刘滔, 等. 全玻璃真空太阳集热管空晒状态下流动换热特性的数值模拟分析 [J]. 云南师范大学学报 (自然科学版), 2017, 37(1): 6-11(in Chinese))
- [10] Yang Jingyun, Gao Wenfeng, Liu Tao, et al. Numerical simulation and experimental verification of solar irradiation for temperature increase performance of three-chamber all-glass evacuated solar collector tubes[J]. *Solar Energy*, 2014(12): 55-60 (杨静芸, 高文峰, 刘滔, 等. 三腔式全玻璃真空管闷晒性能的数值模拟及实验验证 [J]. 太阳能, 2014(12): 55-60(in Chinese))
- [11] Zhu Mingxing. Borosilicate glass 3.3 for solar energy and its performance testing method[J]. *Solar Energy*, 2009(10): 33-35 (朱明星. 太阳能用硼硅玻璃 3.3 及其性能检测方法 [J]. 太阳能, 2009(10): 33-35(in Chinese))
- [12] Li Jianchang, Hou Xueyan, Wang Zixuan, et al. Latest development of vacuum tube solar collectors[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2012, 32(10): 943-950 (李建昌, 侯雪艳, 王紫瑄, 等. 真空管式太阳能集热器研究最新进展 [J]. 真空科学与技术学报, 2012, 32(10): 943-950(in Chinese))
- [13] Xiong Dehua, Chen Wei, Li Hong. Recent progress in solar-thermal selective absorber coatings[J]. *Science & Technology Review*, 2014, 32(9): 50-58 (熊德华, 陈炜, 李宏. 太阳能光热转化选择性吸收涂层研究进展 [J]. 科技导报, 2014, 32(9): 50-58(in Chinese))
- [14] Chen Zhitao. Development of all-glass vacuum heat collector coating equipment[J]. *Vacuum*, 2020, 57(1): 35-39 (陈志涛. 全玻璃真空集热管镀膜设备的发展 [J]. 真空, 2020, 57(1): 35-39(in Chinese))
- [15] Yin Zhiqiang, Xu Sheng, Shi Yueyan, et al. Graded Al-N/Al solar selective absorbing surface[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 1988, 8(3): 141-150 (殷志强, 徐晟, 史月艳, 等. 渐变 Al-N/Al 太阳选择性吸收表面 [J]. 真空科学与技术学报, 1988, 8(3): 141-150(in Chinese))
- [16] Zhang Q. High efficiency Al-N cermet solar coatings with double cermet layer film structures[J]. *Journal of Physics D:Applied Physics*, 1999, 32(15): 1938-1944
- [17] Zhang Q, Zhao K, Zhang B C, et al. High performance Al-N cermet solar coatings deposited by a cylindrical direct current magnetron sputter coater[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 1999, 17(5): 2885-2890
- [18] Zhang Q, Zhao K, Zhang B C, et al. A cylindrical magnetron sputtering system for depositing metal-aluminium nitride cermet solar coatings onto batches of tubes[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 1998, 16(2): 628-632
- [19] Zhang Q. Stainless-steel-AlN cermet selective surfaces deposited by direct current magnetron sputtering technology[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1998, 52(1-2): 95-106
- [20] Zhang Q. Recent progress in high-temperature solar selective coatings[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2000, 62(1-2): 63-74
- [21] Lee B. The progress and prospect of middle/high temper-

- ature evacuated tubular solar collector[J]. *Renewable Energy*, 2001, 24(3-4): 539-544
- [22] Zhang Qichu, Chen Ge, Wang Shuang, et al. All-glass vacuum solar collector tubes incorporating sputtered SS-AIN cermet solar coatings[J]. *Vacuum*, 2010, 47(4): 27-32 (章其初, 陈革, 王双, 等. 全玻璃 SS-AIN 金属陶瓷真空太阳集热管 [J]. *真空*, 2010, 47(4): 27-32(in Chinese))
- [23] Chi Huajing, Guo Shuai, Xiong Kai, et al. Preparation of high performance evacuated SS-AIN cermet solar collector tubes[J]. *Vacuum*, 2012, 49(2): 56-60 (池华敬, 郭帅, 熊凯, 等. 高性能 SS-AIN 金属陶瓷真空太阳集热管的制备 [J]. *真空*, 2012, 49(2): 56-60(in Chinese))
- [24] Yin Zhiqiang, Yan Xiyuan, Chen Tenghua, et al. The thermal performance of evacuated collector tubes with solar absorbing coatings[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 1996, 17(1): 50-56 (殷志强, 严习元, 陈腾华, 等. 太阳吸收涂层与真空集热管的热性能 [J]. *太阳能学报*, 1996, 17(1): 50-56(in Chinese))
- [25] Yang Xiaoji, Yin Zhiqiang, Shi Yueyan. The design on solar selective absorbing surface with interference effect[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 1997, 18(1): 8-13 (杨晓继, 殷志强, 史月艳. 干涉型太阳选择性吸收涂层的光学性能设计 [J]. *太阳能学报*, 1997, 18(1): 8-13(in Chinese))
- [26] Yang Xiaoji, Shi Yueyan, Yin Zhiqiang. Solar spectrally selective absorbing surfaces by interference and absorption[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 1997, 17(5): 315-320 (杨晓继, 史月艳, 殷志强. 干涉-吸收型太阳光谱选择性吸收表面 [J]. *真空科学与技术学报*, 1997, 17(5): 315-320(in Chinese))
- [27] Yin Zhiqiang. Testing for solar thermal performance of all-glass evacuated collector tubes[J]. *Solar Energy*, 1998(2): 2-4 (殷志强. 全玻璃真空太阳集热管光-热性能检测 [J]. *太阳能*, 1998(2): 2-4(in Chinese))
- [28] Yin Z, Xue Z, Zhang J, et al. Graded Al-N/Al absorbing surfaces for all-glass evacuated tubular collectors—R, D and production: Bridging the gap[J]. *Renewable Energy*, 1999, 16(1-4): 624-627
- [29] Shi Y, Yang X. Selective absorbing surface for evacuated solar collector tubes[J]. *Renewable Energy*, 1999, 16(1-4): 632-634
- [30] Yin Zhiqiang, Tang Xuan. Solar thermal performance of all-glass evacuated collector tubes[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2001, 22(1): 1-5 (殷志强, 唐轩. 全玻璃真空太阳集热管光-热性能 [J]. *太阳能学报*, 2001, 22(1): 1-5(in Chinese))
- [31] Meng Xiuqing, Miao Jianpeng, Lv Huimin, et al. Calculation and analysis of heat loss of all-glass evacuated solar collector tubes[J]. *Solar Energy*, 2013(1): 13-17 (孟秀清, 苗建朋, 吕会敏, 等. 全玻璃真空集热管热损计算与分析 [J]. *太阳能*, 2013(1): 13-17(in Chinese))
- [32] Zhang Yanli, Yu Hongwen, Tian Yingliang. The research on evaluation of quality levels of solar vacuum tube glass[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2013, 34(7): 1190-1196 (张艳丽, 于洪文, 田英良. 太阳能真空管玻璃质量等级评价研究 [J]. *太阳能学报*, 2013, 34(7): 1190-1196(in Chinese))
- [33] He Wen, Li Yan-e. Microstructure analysis on the cyclic glass cut out of solar heat tube of pyrex glass[J]. *Glass Enamel & Ophthalmic Optics*, 2000, 28(4): 22-25 (何文, 李彦娥. 高硼硅玻璃太阳能管环切显微结构分析 [J]. *玻璃与搪瓷*, 2000, 28(4): 22-25(in Chinese))
- [34] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC, Standardization Administration of the PRC. GB/T 29159—2012 The glass tube for all-glass evacuated solar collector tubes[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012: 1-16 (中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 29159—2012 全玻璃真空太阳集热管用玻璃管 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012: 1-16(in Chinese))
- [35] Song Caigong. How to judge the performance of all-glass evacuated solar collector tubes[J]. *Solar Energy*, 2007(3): 63-66 (宋彩功. 怎样判断全玻璃真空太阳集热管的性能好坏 [J]. *太阳能*, 2007(3): 63-66(in Chinese))
- [36] Li Yuwu, Liu Huakai, Liu Xueping, et al. Quality analysis of all-glass evacuated solar collector tubes and suggestions on current national standards[J]. *Building Science*, 2015, 31(12): 67-70 (李郁武, 刘华凯, 刘雪平, 等. 全玻璃真空太阳集热管的质量现状分析及其现行国家标准的几点思考 [J]. *建筑科学*, 2015, 31(12): 67-70(in Chinese))
- [37] Dong Guangjun, Zhu Xiuzhen, Zhou Xiaowen, et al. Pressure measurement and residual gas analysis of all-glass evacuated collector tube[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2006, 27(12): 1235-1240 (董光军, 朱秀珍, 周小雯, 等. 全玻璃真空太阳集热管真空度测量及残气分析 [J]. *太阳能学报*, 2006, 27(12): 1235-1240(in Chinese))
- [38] Zhou Xiaowen, Dong Guangjun, Zhu Xiuzhen, et al. Study on the residual gas in glass evacuated collector tubes with various[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2009,

- 30(1): 27–31 (周小雯, 董光军, 朱秀珍, 等. 真空太阳集热管在应用不同吸气剂时的残气分析 [J]. 太阳能学报, 2009, 30(1): 27–31(in Chinese))
- [39] Liu Jianming, Zhou Hengzhi. Compromised degassing process of all-glass solar collector tubes coated with sunlight concentration membrane[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2013, 33(8): 755–758 (刘建明, 周恒智. 内聚光膜式全玻璃真空太阳集热管烘烤排气工艺研究 [J]. 真空科学与技术学报, 2013, 33(8): 755–758(in Chinese))
- [40] Jowzi M, Veysi F, Sadeghi G. Experimental and numerical investigations on the thermal performance of a modified evacuated tube solar collector: Effect of the bypass tube[J]. Solar Energy, 2019(183): 725–737
- [41] Li Q, Gao W, Lin W, et al. Experiment and simulation study on convective heat transfer of all-glass evacuated tube solar collector[J]. Renewable Energy, 2020(152): 1129–1139
- [42] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC, Standardization Administration of the PRC. GB/T 35606—2017 Green product assessment-Solar water heating system[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017: 3 (中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 35606—2017 绿色产品评价 太阳能热水系统 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 3(in Chinese))
- [43] National Energy Administration of the PRC. NB/T 34070—2018 Specification for all-glass evacuated solar collector tube[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2018: 1–4 (国家能源局. NB/T 34070—2018 全玻璃真空太阳集热管技术规范 [S]. 北京: 中国农业出版社, 2018: 1–4(in Chinese))