

# 热管真空管 十载话春秋

## ——回顾热管式真空管太阳集热器研究发展过程——

江希年 何梓年

自 80 年代中期开始，以平板型太阳集热器为主要部件的太阳热水器在我国已初步形成行业，这对于节约常规能源，保护自然环境和改善人民生活都发挥了积极的作用。然而，由于平板型太阳集热器只能提供低温热水，而且一般不能全年运行，其应用范围受到了许多限制。为了进一步提高集热器工作温度，拓宽太阳能应用领域，研究开发新型真空管太阳集热器已成为摆在我国科技人员面前的新课题。1986 年，北京市太阳能研究所着手研制真空管太阳集热器。我们当时的指导思想是：选题立足高起点，跟踪国际新技术。经过国内外认真调研，反复论证，我们终于选定性能优越、技术先进，目前世界上只有少数几个发达国家能够制造的热管式真空管太阳集热器作为自己的研究对象。

十年来，热管式真空管太阳集热器的发展走过了十分艰巨而又不平凡的历程，先后经历了实验室研究、中试研究、中试生产和规模化生产等几个阶段。它曾被列为联合国开发计划署（UNDP）支持下的国际科技合作项目和中德两国政府间科技合作项目；它自始至终得到北京市科委和北京市科技研究院的直接指导，被列为市科研项目 and 市科研中试基地项目；它还多次得到国家科委和国家经贸委的大力支持，被列为国家新能源工程技术研究中心的研究开发项目和国家“双加”工程项目。在十年间，我们攻克了一个又一个技术难关，取得了多项国家发明专利和实用新型专利，并先后荣获北京市科技进步一等奖和国家技术发明四等奖。在技术不断完善和提高的基础上，我们将科技成果迅速转化为生产力，还成功地引进外资，建立了中德合资北京桑达太阳能技术有限公司。目前，“桑普”热管式真空管集热器已是我国太阳能行业中的一支新秀，成为深受广大用户欢迎的高科技产品；并以“戴姆勒·奔驰宇航”（Daimler-Benz Aerospace）的品牌迅速打开国外市场，成为国际太阳能市场竞争中的一支劲旅。

纵观热管式真空管太阳集热器十年的发展历史，

大致可以分为三个阶段：

### 第一阶段（1986-1989）

本项目一开始就得到联合国开发计划署的大力支持。当时，中国太阳能学会理事长、北京市太阳能研究所原所长龚堡研究员率团先后到美国和欧洲许多太阳能公司进行了考察，全面了解国际真空管太阳集热器的发展现状和技术水平。我们在型式众多的产品中，确定首先研制热管式真空管太阳集热器，它具有热效率高、抗冰冻、启动快、保温好、承压大、耐热冲击、运行安全可靠及易于安装维修等许多优点。与此同时，我们还选择在太阳能和热管技术研究方面都具有丰富经验的德国道尼尔（Dornier）公司作为科技合作的伙伴。

据调查，荷兰飞利浦（Philips）公司生产过世界一流的热管式真空管集热器。当时，该公司已将真空管集热器技术和生产线都转让给加拿大的富耐尔（Fournelle）公司。鉴于首次涉足这种新型真空管集热器，我们以飞利浦产品作为自己研究的主要目标。在北京市太阳能研究所原总工程师熊尚义研究员的带领下，一批科技人员投入了艰苦而有意义的研究工作。

这一阶段研制的热管式真空管外形尺寸为直径 65mm、长度 1.5m，采用铜吸热板和电镀黑钻选择性吸收涂层，玻璃与金属之间的封接采用火封技术。

我们采用的铜-水热管区别于其它各国的热管。为了保证热管的抗冻性能而又降低造价，我们以相对廉价的紫铜替代国外常用的昂贵的白铜，并根据“顺序冻结”的原理，对热管的结构、形状及工质成分等进行了一系列改进。实验证明，这种热管在 -50 的自然环境下都不会冻裂。这也是为什么现在的热管式真空管集热器在我国东北、西藏、新疆等严寒地区都能完全过冬的奥秘所在。

经测试，作为阶段成果研制成功的热管式真空管的热性能已接近飞利浦产品的水平。这一阶段工作的完成，使我们在热管、涂层、封接、真空、测试等各

个技术环节积累了正反两方面经验，从而为瞄准更高目标、研制更先进的热管式真空管打下了技术基础。

## 第二阶段（1990-1995）

我们根据在研制工作中取得的经验和教训，以及国外真空管集热器的发展趋势，经过反复、认真比较，决定对研制的热管式真空管作几项重大改进。这些改进主要是：

——增大真空管外形尺寸，选用直径 100mm、长度 2m 的玻璃管，使相同采光面积的集热器所需要的真空管数量减少，有利于集热器的安装、维护；

——在玻璃与金属之间封接工艺方面，用热压封技术替代火封技术；

——以铜铝复合太阳条为吸热板，用磁控溅射工艺替代化学电镀工艺来制备选择性吸收涂层。

热压封技术是国际上先进的玻璃—金属封接技术，它在机理和工艺上完全不同于传统的火封技术。目前，世界上只有德国的普林兹（Prinz）公司用于直流式真空管的小批量生产，其技术工艺处于完全保密状态。热压封跟火封相比较具有以下优点：（1）低温封接。由于玻璃管与金属端盖之间热压封的整个过程是在玻璃应变点温度以下进行的，这样就可以避免封接后必须通过退火来消除玻璃应力的麻烦；

（2）快速封接。由于热压封过程是在很短时间内完成的，所以大大提高了生产效率；（3）不匹配封接。由于热压封对被封接材料膨胀系数之间的差异不甚敏感，因而降低了对硬质玻璃和膨胀金属端盖的苛刻要求。经过多年深入的研究，我们已在热压封技术的材料、结构、工艺等各个方面取得了创造性的成绩，并获得了国家发明专利“玻璃—金属热压封接工艺”。在工艺研究获得成功之后，我们又研制出国际上独一无二的多工位、全新加热方式的热压封生产设备，既保证了良好的封接气密性，又大幅度提高了成品率和劳动生产率。1993 年，德国普林兹公司总裁胡萨（Huser）先生在参观了我們设计的热压封设备后，不得不承认中国科技人员在此项技术上取得的突破性成就，并当即向我们订购了一批真空管产品。事实证明，我国在真空管集热器上应用的玻璃—金属热压封技术已居世界领先水平。

为了使金属吸热板涂层不仅具有卓越的光学性能（太阳吸收率高，红外发射率低），而且具有良好的化学稳定性和抗紫外老化性能，我们采用国际上先进的磁控溅射选择性吸收涂层技术：用单靶铝，在氩气及反应气体氮和氧的气氛下，严格控制各种气体的流量变化；在具有负偏压及烘烤加热装置的磁控溅射镀膜机中，在经过光亮处理的铝基体上，溅射沉积铝-氮-氧选择性吸收涂层。经国外测试，涂层的太阳

吸收率为 0.929，红外发射率为 0.08。另外，由于吸热板基体事先经过严格的清洗，使膜层与基体之间有很强的结合力；再加上吸收膜表面又沉积一层氧化铝保护膜，进一步提高了膜层的抗磨性能和抗腐性能。磁控溅射铝-氮-氧选择性吸收涂层技术是热管式真空管研制过程中的又一重要成果，“太阳能选择性吸收膜及制备方法”已获得国家发明专利。

在这一阶段中，我们成功地解决或改进了玻璃—金属热压封接技术、磁控溅射选择性吸收涂层技术、大直径玻璃管深加工技术、抗冻型热管制造技术、金属吸热体真空排气技术等一系列关键技术，从实验室研究到中试研究，进而建成北京市第一个科研中试基地。在此期间，我们还十分注意与市场相结合，把产品及时推向国际国内两个市场，接受国内外用户的严格检验，不断完善和提高产品的质量和性能，并在实践中逐步掌握规模化生产的成套工艺技术。

## 第三阶段（1996 至今）

在短短几年中，热管式真空管产品在全国各地安装了许许多多大中型太阳能热水系统和一大批家用太阳能热水器，还相继出口欧洲和东南亚，成为极具市场竞争力的太阳能新产品。卓越的产品性能和广阔的市场潜力显示了诱人的发展前景。国家经贸委选中热管式真空管项目作为技术改造“双加”工程重点支持，于 1996 年建成了 50 万支真空管规模生产线。在欧洲和世界享有盛誉的德国戴姆勒-奔驰宇航公司与中方经历了长达十年的科技合作后，下决心与北京市桑普技术公司合资经营，就热管真空管项目成立了中德合资企业北京桑达太阳能技术有限公司，使热管真空管实现了规模化生产，迅速实现与国际接轨。

我们从不满足已经取得的成绩，也永不停止自己的研究开发工作。为了进一步提高热管式真空管集热器的热性能，在继续保持真空管与集管之间“干性连接”这一特点的前提下，将原先仿照飞利浦产品采用的“传热块”型式改进为“直接插入”型式，从而减小了热管冷凝段与集管的传导热阻，提高了集热器的整体热性能。经国际权威的瑞士 Rapperswil 检测中心测试，直接插入型集热器的热性能比传热块型集热器提高七个百分点，其瞬时效率方程的截距为 0.7607，达到国际同类产品的先进水平。在此期间，欧洲著名的 TÜV 机构还对热管式真空管集热器进行了产品质量认证。本产品优良的热性能，连同其它各项性能参数和质量指标均达到严格的德国工业标准 DIN4757，从而取得了在欧洲和世界各地销售的通行证。

热管式真空管集热器的热性能是否还有再提高的可能性？答案是肯定的。根据理论分析和实验结

# 金属吸热体真空管集热器的种类、特点及现状

何梓年

真空管太阳集热器是在平板型太阳集热器基础上发展起来的新型太阳能集热装置。构成这种集热器的核心部件是真空管，它主要由内部的吸热体和外层的玻璃管所组成。吸热体表面通过各种方式沉积有光谱选择性吸收涂层。由于吸热体与玻璃管之间的夹层保持高真空度，可有效地抑制真空管内空气的传导和对流热损失；再由于选择性吸收涂层具有低的红外发射率，可明显地降低吸热板的辐射热损失。这些都使真空管集热器可以最大限度地利用太阳能，即使在高温工作和低环境温度的条件下仍具有优良的热性能。

按吸热体的材料分类，有玻璃吸热体真空管（或称全玻璃真空管）和金属吸热体真空管（或称玻璃—金属真空管）两大类。

全玻璃真空管在国外发展得较早。1979年我国引进样品后，清华大学首先研制出我国的全玻璃真空管，并且逐步实现了产业化。目前，全国已有40—50家企业能够生产全玻璃真空管，这对于我国太阳能行业的发展起到了积极的推动作用。

金属吸热体真空管是国际上随后发展起来的新一代真空管，它又可划分为多种形式。热管式真空管就是其中一种，北京太阳能研究所自1986年起开始研

究开发。尽管金属吸热体真空管有各种不同的形式，但无论哪种形式，由于吸热体采用金属材料，而且真空管之间也都用金属件连接，所以用这些真空管组成的集热器具有以下共同的优点：

(1) 工作温度高。最高运行温度超过100℃，有的型式甚至可高达300—400℃，使之成为太阳能中、高温利用必不可少的集热部件。

(2) 承压能力大。真空管及其系统都能承受自来水或循环泵的压力，多数集热器还可用于产生10<sup>6</sup> Pa以上的水甚至高压蒸汽。

(3) 耐热冲击性能好。即使用户偶然误操作，对空晒的集热器系统立即注入冷水，真空管也不会因此而炸裂。

正由于金属吸热体真空管具有其它真空管无可比拟的诸多优点，世界各国科学家竞相研制出各种形式的真空管，如热管式、同心套管式、U型管式、储热式、直通式、内聚光式等等，以满足不同场合的需求，扩大了太阳能的应用范围，成为当今世界真空管集热器发展的重要方向。

下面，简要介绍一下各种金属吸热体真空管的主要结构、性能特点及发展现状。

果，若将现有的平面状吸热板改成半圆柱状弯曲吸热板，可进一步提高集热器全天的得热量，其年平均得热量提高的幅度约为10—15%。Rapperswil检测中心的测试结果也再次证实，弯曲吸热板的年平均热效率比平面吸热板高10%以上。至此，一种新型的热管式真空管集热器问世了，这对于那些热负荷要求高而集热器占地面积受到限制的用户尤为适合。

具有工作温度高、系统承压大和耐热冲击能力强等诸多优点的热管式真空管集热器扩大了太阳能的应用范围。我们的产品出口后，德国、奥地利等国已用于太阳能热水和住宅采暖，印度尼西亚已用于太阳能泵水，新加坡已用于太阳能空调，约旦已用于太阳能工业加热，澳大利亚正在研究太阳能消毒等等。我们

自己则在进一步完善和改进现有单循环太阳热水系统和整体式家用太阳热水器的同时，正在研究开发双循环热水系统和分体式家用热水器。我们还正在积极承担国家“九·五”科技攻关项目“太阳能吸收式空调及供热综合示范系统”，旨在将热管式真空管集热器与热水型溴化锂吸收式制冷机组相结合，研制一套夏天用于空调、冬天用于采暖、全年供应热水的综合系统。

科学技术是无止境的。我们要在继续提高热管式真空管集热器使用性能、产品质量、降低生产成本的同时，努力扩大应用领域，并进一步研究开发其它各种新型真空管集热器，为把太阳能热利用技术向着更高温度、更高光热效率的目标前进作出我们应有的贡献。