

蒸发冷却技术应用于大型电子设备冷却中的材料相容性研究

张 鹏<sup>1,2</sup>, 阮 琳<sup>2</sup>, 熊 斌<sup>2</sup>

(1. 中国科学院大学, 北京 100190; 2. 中国科学院电工研究所, 北京 100190)

**摘要:** 随着电子芯片功耗不断增大, 散热问题已经成为电子设备, 特别是大型高密度电子设备发展的瓶颈问题。中国科学院电工研究所自主研发的蒸发冷却技术, 其利用冷却介质的相变潜热带走热量, 冷却能力较传统风冷等冷却技术有很大优势。其在电子设备上的应用首要问题之一是冷却介质与电力电子器件材料之间的相容性问题。本文详细介绍了蒸发冷却介质与电子设备材料相容性实验研究情况, 并对实验结果进行了分析, 为蒸发冷却介质与 IT 设备材料的相容性筛选提供了指导, 这将为未来蒸发冷却技术应用于大型电子设备的冷却提供重要技术支撑。

**关键词:** 材料相容性; 蒸发冷却; 电子设备

中图分类号: TM214      文献标识码: A      文章编号: 1003-3076(2014)04-0076-05

1 引言

随着云时代的来临, 大数据 (Big Data) 及其管理和处理能力的发展, 已经成为影响国家科技进步和社会发展不容忽视的挑战。然而随着数据中心和计算中心规模的扩大, 系统的稳定性、可靠性、噪音, 特别是能耗问题日显突出, 传统的冷却方式遇到了前所未有的发展瓶颈。电子元器件的发热功率越来越大, 以 CPU 为例, 目前的 CPU 发热功率密度已经高达  $10^4 \sim 10^5 \text{ W/m}^2$ <sup>[1]</sup>, 并还有继续增加的趋势, 而且大多数电子设备故障也都是由于芯片过热烧毁引起的<sup>[2]</sup>。电子设备的冷却越来越成为制约其发展的瓶颈问题, 电子设备小型化、高密度化的发展趋势也进一步加剧了这个问题<sup>[3]</sup>。在一些大型的服务器集群、超级计算机等设备中, 传统的风冷已经暴露出不可逾越的弊端: 如大噪音、高能耗、冷却不均匀等问题<sup>[4]</sup>。这就为高效安全的冷却技术应用于大型电子设备的冷却提供了契机。

相比于传统的冷却技术, 蒸发冷却技术利用冷却介质的相变潜热带走更多热量, 具有很大的换热优势, 同时将蒸发冷却技术应用于大型电子设备的冷却具有重大的战略意义和创新性<sup>[5]</sup>。

蒸发冷却技术根据不同的应用场合有多种具体

的应用形式, 如管内冷、全浸式、喷淋式、贴壁式等等<sup>[5-7]</sup>。中国科学院电工研究所从 1958 年开始蒸发冷却技术的研究与推广应用, 已经成功将其应用在水力发电和火力发电的工业运行设备中, 积累了大量的工业应用经验。在多数应用形式中, 冷却介质都需直接与冷却对象接触, 即冷却介质直接从发热体表面吸热气化带走热量, 此类换热环节最少、换热最为高效。但是由于直接接触, 冷却介质与冷却对象材料之间的长期共存, 并保证各自的应用性能基本不变就显得尤为重要。这里将冷却介质与冷却对象材料之间的共存性称为材料的相容性。

除了冷却介质本身的物理化学稳定性、环保特性、换热性能、绝缘性能等等之外, 冷却介质与各种电子材料会否发生物理或化学反应是相容性问题的关键。经过多年的工程实践, 蒸发冷却技术在电工装备上应用, 已经形成了完备的介质筛选技术路线, 但随着技术拓展应用于电子设备, 加之电力电子器件及电子线路板的材料种类众多, 制作工艺特殊, 更有别于大型电工装备, 故作者所在科研团队针对这一特殊应用领域的关键性问题设计了多种实验装置并进行了专题研究, 实验研究和介质筛选历经近三年的时间, 探索出了一条合理的 IT 设备蒸发冷却技术应用介质筛选技术路线。本文将详细介绍实验装

收稿日期: 2013-03-14  
基金项目: 中国科学院重大科研装备研制项目《超级计算机蒸发冷却系统研制》  
作者简介: 张 鹏 (1985-), 男, 河南籍, 博士研究生, 研究方向为大型电子设备冷却;  
阮 琳 (1976-), 女, 甘肃籍, 研究员, 博士, 研究方向为大型电气与电子设备冷却。

置的设计、实验过程、实验结果以及分析结论。实验结论为蒸发冷却介质与IT设备材料的相容性筛选提供了指导,这将为未来蒸发冷却技术在超级计算中心或大型数据中心的安全应用提供重要技术支持。

2 实验设计

2.1 实验目的与要求

为了考察冷却介质与电子材料之间会发生物理化学反应,实验设计的基本要求如下:

- (1)材料种类完备:未来冷却中可能与冷却介质接触的所有材料均需作为实验对象进行验证。
- (2)冷却介质的纯净与实验材料与实验装置的洁净:待检验的介质应保证成分纯净。实验器件材料自身洁净。实验装置一般采用带有观察窗的不锈钢腔体,其密闭腔体及附属器件内保证洁净。若装置重复使用,在重新使用前需进行全面的清洁。
- (3)高温环境:营造一个适当的高温恶劣环境,以便加快可能发生的物理化学变化。
- (4)带电工作:未来无论采用喷淋方案或其他接触冷却的方案,介质冷却的都是正在工作的电子元器件。所以实验中的电子元器件在这个实验过程中应保证带电工作状态,以模拟未来真实的工作情况。
- (5)考核周期:需要经过一定时间的考核验证才能够体现出材料间的相容性能。

2.2 电子材料的分析与分类

电子设备中需要冷却的部分主要是各种封装的电子芯片,然而与冷却介质接触的却不只芯片本身。除芯片外,一般还包括印刷电路板(PCB)、电阻、电解电容、存储设备、焊锡、助焊剂以及其他一些金属接头和线缆等等多种材料。材料种类非常庞杂,各种材料都需进行相容性验证。

值得一提的是,电子设备的外存储器一般选用传统的机械硬盘,如图1所示。机械硬盘主要由磁盘、主轴马达、磁头以及背面的控制电路板组成。内部结构精密复杂,并且其内部对外并非密封,而是通过所谓呼吸孔来维持内外的压力平衡。这样的结构下,液态的冷却介质很容易通过呼吸孔进入其内部,极有可能导致原本工作在空气中的马达和磁头无法正常工作。

幸运的是,随着电子技术的发展,目前已经可以使用外部接口相同、读写速度更快的固态硬盘

(SSD)代替传统的机械硬盘,如图2所示。与机械硬盘相比,固态硬盘结构非常简洁,其内部只有一块印刷电路板及其上面集成的存储芯片,仅从材料组成上看与普通的电路板没有区别。



图1 传统机械硬盘结构

Fig. 1 Structure of traditional mechanical hard disk drive

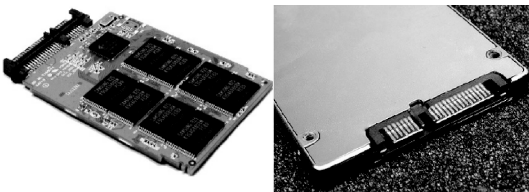


图2 固态硬盘结构

Fig. 2 Structure of solid state drive (SSD)

2.3 实验装置设计

图3所示为实验装置的结构示意图。

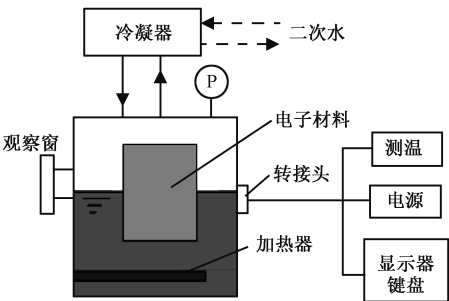


图3 实验装置结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of experimental device

介质在加热器的加热下处于沸腾状态,以营造高温环境,加速可能发生的各种相容性问题。气化的介质到达上端的冷凝器后冷凝回流,完成循环。

为了全面地包括上述所有待检验的电子材料,本实验采用台式机的主机作为实验对象。具体地讲,实验材料包括台式机主板、CPU、内存、硬盘、系统引导U盘以及必要的连接线缆。并通过真空转

接头将主板电源引入、测温线和显示器数据线以及 USB 线引出,这样便可使实验过程中台式机电脑主板 24h 带电运行。此外其一直运行有测试程序,以便使 CPU、内存处于满负荷工作状态。检测软件本身也可实时监控硬件状态,及时发现硬件上出现的相容性问题。

实验装置是带有观察窗的全密封不锈钢腔体。通过观察窗也可以直观地看到可能出现的变化。如图 4 所示。

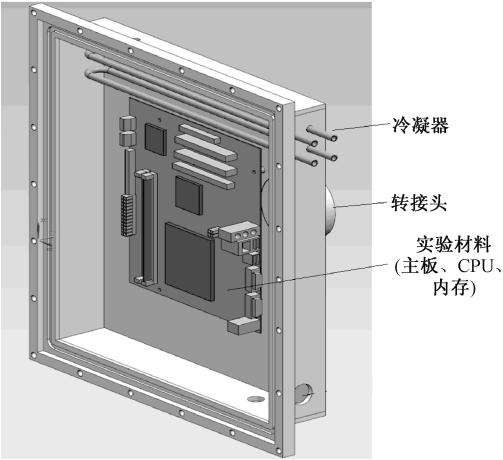


图 4 实验装置设计 3D 图

Fig. 4 3D design drawings of experimental device

3 实验过程

实验共进行了七轮、历时近三年(第七轮仍在进行中)。每轮实验选用不同种类不同参数的冷却介质。每轮实验的时间均超过 2000h。每轮实验还记录了在这种高温环境中,主板上 CPU 的工作温度。表 1 列出了到目前为止的实验情况。CPU 正常的工作温度也从侧面证明了蒸发冷却技术良好的冷却效果。

表 1 实验过程列表  
Tab. 1 Experimental process

	介质编号	实验时间/h	CPU 核心温度/℃
1	F-A	2084	65
2	F-B	2009	60
3	F-C	2244	48
4	F-D	2616	58
5	F-D	2160	58
6	F-D	2643	58
7	F-E	正在进行中	—

4 实验现象与分析

在数轮的实验过程中,不同介质也出现了各种相容性问题。下文依次归类说明实验现象及其初步分析。

4.1 塑料制品相容性问题

实验材料中有很多地方是塑料制品,如多数线缆的外皮、大量固定件(内存插座、CPU 插座)、U 盘和硬盘的外壳等等。每轮实验中几乎所有塑料制品都出现了相容性问题(老化、变质)。特别是线缆的塑料外皮,普遍出现了变脆变硬的现象,也有被漂白或分解变细的情况。图 5 是某个品牌 U 盘的塑料外壳,在第二轮实验过程中其与 F-B 介质发生明显反应,本来坚硬的外壳变得非常柔软,这也是实验至今最严重的相容性问题。此外,在第二轮实验中也出现了一些固定件变脆、易折断的现象。



图 5 U 盘塑料外壳与介质发生明显反应

Fig. 5 Experimental phenomena of U disk plastic shell

从塑料制品出现的相容性问题来看,有以下三点分析说明:

(1) 各种塑料制品在介质中的老化现象不同,有些甚至没有明显的老化。这说明塑料材质多种多样,质量参差不齐。

(2) 除了介质 F-B 与塑料有明显的反应外,其他介质也有使塑料制品老化现象,但情况不明显。

(3) 实际上,即使在空气中运行,塑料制品这样长时间受热也会出现老化现象,但不可否认介质确实加速了塑料的老化。

总的来说,冷却介质与一般塑料制品都存在老化(变脆变硬)等相容性问题。但是塑料本身不承担实际的电子功能,往往只是起固定、保护、绝缘作用,即使其老化也基本不影响这些功能,也就是说,这对于蒸发冷却技术应用于电子设备的冷却不起关键性影响。在实验中并不是所有塑料制品出现老化现象,在未来成熟的应用中,完全可以定制使用相容性较好的塑料品种规避这一问题。



4.2 硬盘相容性问题

正如在上述材料分析中所述,传统硬盘内部机械结构精密复杂,而且对外不密封,不论是气态介质还是液态介质极易进入,导致其无法正常工作。第一轮实验仅采用U盘引导系统,没有检验这一问题,而是在第二轮实验中做了检验。第二轮实验开始的当天处于气态和液态的上下两块机械硬盘均被损坏而无法工作,换上固态硬盘(SSD)后问题得以解决。

显然,如果电子设备的冷却采用蒸发冷却技术时,其外存储系统便不能采用传统的机械硬盘,而必须使用SSD。虽然SSD目前容量不大而且价格不菲,但其拥有更快的读写速度,是未来硬盘的趋势。可以预见其容量和价格随着量产和推广将会逐渐得到市场的认可,最终也必然会淘汰传统的机械硬盘。

4.3 介质F-C锡焊点不相容

第三轮实验结束后,开腔发现主板上所有锡焊点失去原有金属光泽,变灰变白,有些还覆盖有棕黄色物质,如图6所示。现象说明介质F-C极有可能腐蚀焊锡。然而电子元器件与电路板电气连接时,一般都采用锡焊,若介质与焊锡不相容,就不能应用于直接与电子元器件接触的场所。

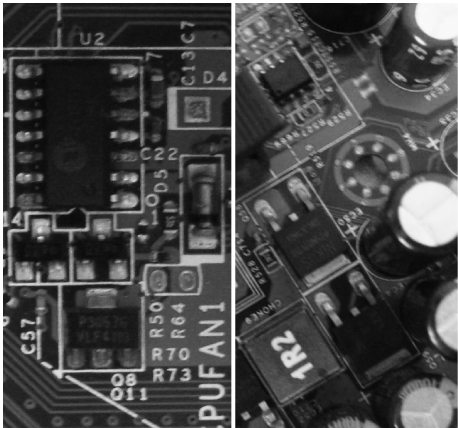


图6 主板上锡焊点被腐蚀

Fig.6 Eroded solder of main board

5 结论

经过近三年七轮的实验研究,一共完成了5种备选冷却介质的筛选工作。虽然其中某些介质被认定与电子材料存在严重的相容性问题,但值得庆幸的是已经确定了3种沸点各不相同的冷却介质可以用于电子设备的冷却,充实了电子设备蒸发冷却技术应用的介质选型库。而且筛选出的介质也分别在

实验室的TC3600喷淋蒸发冷却超级计算机样机上(如图7所示)进行了实际应用考验,没有出现任何问题。更重要的是本文研究成果形成了行之有效的电子材料与冷却介质的相容性规范,为今后进一步的筛选工作提供依据。这些都为不久的将来,蒸发冷却技术应用于电子设备的冷却提供了重要支持,特别是为在大型数据中心和超级计算中心的IT设备上应用提供了强有力的技术保障。



图7 TC3600 喷淋式蒸发冷却超级计算机

Fig.7 TC3600 spray evaporative cooling supercomputer

参考文献 (References):

[1] 李庆友, 王文, 周根明 (Li Qingyou, Wang Wen, Zhou Genming). 电子元器件散热方法研究 (Status of techniques on heat dissipation in electronic components) [J]. 电子器件 (Electron Devices), 2005, 28 (4): 937-941.

[2] 雷俊禧, 朱东生, 王长宏, 等 (Lei Junxi, Zhu Dongsheng, Wang Changhong, et al.). 电子芯片液体冷却技术研究进展 (Research progress on chip liquid cooling technology) [J]. 科学技术与工程 (Science Technology and Engineering), 2008, 8 (15): 4256-4263.

[3] Richard C Chu. A review of IBM sponsored research and development projects for computer cooling [A]. Fifteenth IEEE SEMI-THERM Symposium [C]. 1999. 151-165.

[4] Ruan Lin, Li Zhenguo. The discussion of energy conservation of data center from the evaporative cooling technology of HPC [A]. PDPTA 2012 [C]. Las Vegas, USA,

2012.

[ 5 ] 阮琳 (Ruan Lin). 大型水轮发电机蒸发冷却内冷系统的基础理论研究及自循环系统的仿真计算 (The basic theory research of the inner evaporative cooling system for large hydro-generator and the simulation of the CLSC system) [ D]. 北京: 中国科学院研究生院 (Beijing: GUCAS), 2004.

[ 6 ] 郭永献 (Guo Yongxian). 喷淋液膜流动理论及电子

器件喷淋冷却实验研究 (Spray liquid-film flow theory and experimental study of spray cooling of electronic devices) [ D]. 西安: 西安电子科技大学 (Xi' an: Xidian University), 2009.

[ 7 ] Zhang Peng, Ruan Lin, Gu Guobiao. Experimental study on two-phase spray cooling for the cooling of high-heat-flux electronic chip [ A]. ICEMS2011 [ C]. Beijing, China, 2011.

Material compatibility research of evaporative cooling technology applied to large electronic equipment cooling

ZHANG Peng<sup>1,2</sup>, RUAN Lin<sup>2</sup>, XIONG Bin<sup>2</sup>

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
2. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** With the development of the electronics and information technology, the heat dissipation problem has become the development bottleneck of electronic equipment, especially large-scale high-density electronic devices. Evaporative cooling technology of the Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, utilizing phase change latent of cooling medium, cooling capacity has the great advantage than traditional air-cooled cooling technology. When it is applied to large electronic equipment cooling, material compatibility is an important problem, which requires the first study. This paper describes materials compatibility experimental research and analysis between cooling media and electronic equipment. And the experimental results provide cooling media screening guidance for electronic equipment, which provide important technical support for evaporative cooling technology applying to large-scale electronic equipment, in future.

**Key words:** material compatibility; evaporative cooling; electronic equipment

(上接第 70 页, cont. from p. 70)

Research of over-current protection based on HCPL-316J

SU Wei<sup>1,2</sup>, ZHONG Yu-lin<sup>1,2</sup>, LIU Jun<sup>1,2</sup>, WEN Xu-hui<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
2. Key Laboratory of Power Electronics and Electric Drive, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** The IGBT module will be damaged when the current is beyond the limit of safe operation area. This paper designed a low cost and high reliability driving circuit based on the HCPL-316J driving chip. The detailed driving circuit and working process were analyzed considering the over-current protection feature first. Then the simulation circuit of the drive circuit was established using the simulation software. The simulation result verified the theoretical analysis. Finally the experimental results also verified the validity of the analysis of the IGBT drive circuit.

**Key words:** IGBT drive circuit; HCPL-316J; over-current protection