

膜辅助相变散热器MHS的低压压力和温度精密控制解决方案

Solution of Precise Control of Low Pressure and Temperature for Membrane Assisted Phase Change Heat Sink

摘要：膜辅助相变散热器（MHS）作为一种新型高效冷却技术正逐渐成为研究热点，其中的真空压力和温度控制是有效实施MHS技术的关键因素，为此本文提出了相应的解决方案。解决方案的核心内容是同时为MHS工作液体提供准确的高压压力控制和为MHS沸腾蒸发提供低压真空度控制，另外解决方案还包含了MHS隔膜的渗透性测试方法和测试装置结构，包含了MHS冷却能力和传热系数测量装置。

1. 项目背景

高功率密度电子设备的激增催生了高性能计算及其数据中心的发展，由此带来的需求是开发高性能的散热器。目前，普遍都采用比空气冷却效果更好的水冷和浸没式液冷的单相散热技术，而随着功率密度的快速增加和电子设备的小型化要求更高的冷却效率。当前高效冷却的研究领域之一是具有更高传热系数的相变散热，这样每单位工作流体质量流量可移除更多热量，且可以提高散热面积上的温度均匀性。

目前出现一种膜辅助相变散热器（MHS）技术，其沸腾冷却工作原理如图1所示，水作为冷却过程的工作流体，采用薄膜将液体和蒸汽分离。蒸汽空间压力（ $P_{\text{蒸汽}}$ ）为16kPa，对应于饱和温度55°C。此冷却技术的临界热流极限（CHF）随着传热面积比和液体空间压力（ $P_{\text{水压}}$ ）的增加而增加，据报道在具有3.45的增大面积比的表面上的最大CHF为670W/cm²，获得的传热系数高达1MW/m²K。

如图1所示，与具有液体入口和两相流出口的传统散热器不同，MHS仅包含一个液体入口，工作液体通过该入口以压力 $P_{\text{水压}}$ 供应到散热面。放置在散热面上方的疏水蒸汽渗透膜允许蒸汽从液体池中排出。

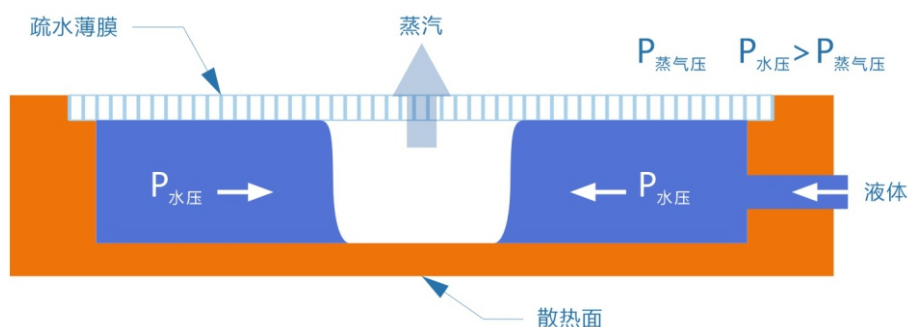


图1 膜辅助散热器压差下渗透膜蒸汽排出冷却原理图

MHS这种独特的设计将沸腾的液体限制在散热器内表面，并对气泡产生全方位的压力。随着气泡的足够生长，在加热器内表面和膜之间建立了蒸汽桥，导致膜上的液体接触线减少（由于膜的疏水性），将气泡从加热器表面拉出和排出。由此可见，膜的渗透性和压差决定了蒸汽流过膜的速率，而压差太大则会导致膜破裂，这样使得MHS工作机理及其散热能力的研究评价主要内容是膜渗透性测量装置和膜辅助散热器装置的搭建，其中关键涉及到真空压力和温度的精密控制技术。为此本文针对压力和温度的准确控制提出了完整的解决方案。

2. 解决方案

2.1 膜渗透性测量装置

薄膜渗透性测量装置如图2所示，测量装置包括测试腔室、调压器、质量流量控制器、压力计、真空计、电动针阀、双通道真空压力控制器和真空泵。测试腔室由不锈钢制成，由上腔室、下腔室和观察窗组成。被测薄膜固定在下室上，测试流体进入上腔室，穿过隔膜流入下部腔室，通过真空泵抽气流出下腔室。

在每次测试中，通过双通道真空压力控制器，并结合相应的压力传感器和真空度传感器，自动调节腔室入口处的调压器使上腔室恒定在设定压力，自动调节下腔室出口处的电动针阀使下腔室恒定在设定真空度，由此使得被测隔膜两侧达到所需的测试压差，根据压力、真空度、压差和流速可计算得到薄膜的渗透率。

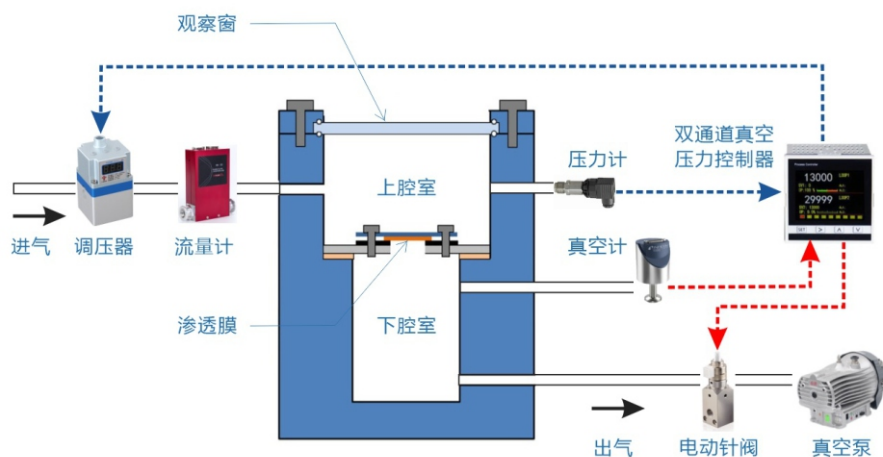


图2 薄膜渗透性测量装置结构示意图

2.2 膜辅助相变散热器试验装置

膜辅助相变散热器试验装置的作用是用来研究不同散热器微结构、薄膜特性和真空压力等条件下的散热能力以及对传热系数进行测量，整个装置的结构如图3所示。MHS放置在一个不锈钢耐压腔室内，腔室两侧相对的法兰上安装有光学观察窗。

MHS结构与图1近似，只是在散热面处布置了薄膜加热器和温度传感器，加热器和温度传感器引线连接到腔室外的温度控制器上以控制散热面温度和热流密度。

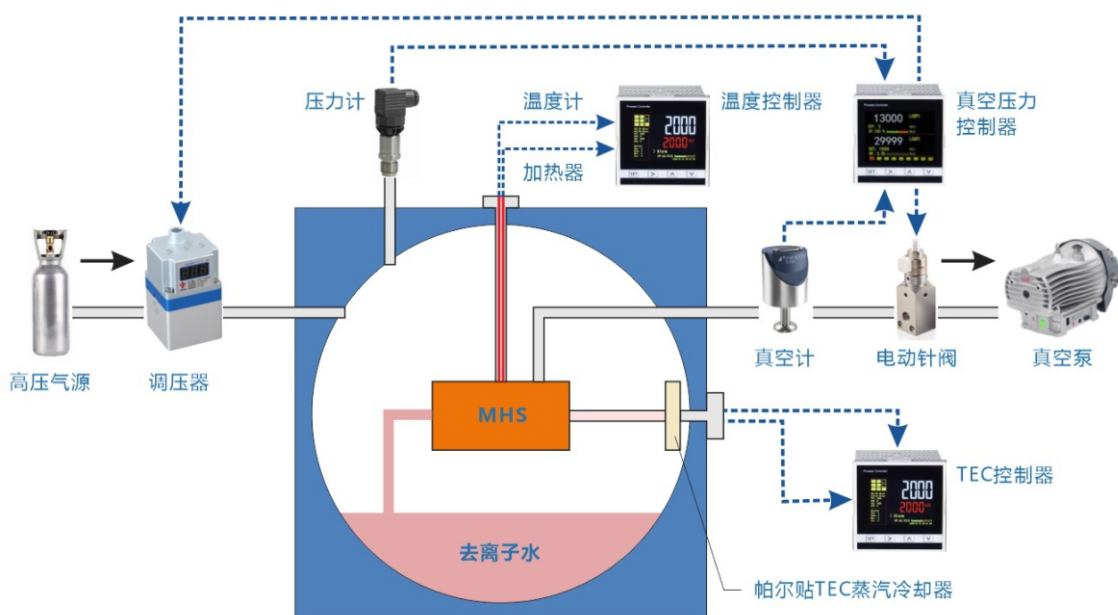


图3 膜辅助相变散热器试验装置结构示意图

真空压力控制原理和结构与图2近似，即往腔室内通入高压气体使腔内压力按照设定值进行控制，MHS内的真空度也同样进行自动控制以使内部液体处于饱和条件（如16kPa绝对压力）。

冷却过程中采用去离子水作为工作液体，液体通过腔室内的压力被压入MHS中，从MHS排出的蒸汽流经帕尔贴TEC蒸汽冷却器成为液体后再流回腔室，由此形成工作液体的循环。此蒸汽冷却器采用了专用的TEC控制器进行温度控制。

在实验过程中，首先对MHS内的真空度进行控制，然后通过加热器向MHS散热面供热，同时将腔室内部的工作压力保持恒定，在此压差恒定条件下测量得到相应的冷却温度和热流密度。如果施加的热流以步进或线性方式逐渐增加，直到观察到温度突然升高，那么该温度点时的热流就是此特定压差下的临界热流极限CHF（critical heat flux limit）。

3. 总结

膜辅助相变散热器（MHS）作为一种新型高效冷却技术正逐渐成为研究热点，本文提出的解决方案为MHS的研究提供了宽范围真空压力和控温精密控制的可能性，为MHS的深入研究和冷却性能考核评价提供了有效的技术支撑。