

热管腐蚀的研究进展与展望

陶锦燃, 程为铮, 张万里, 郑飞宇, 付本威, 邓 涛

(上海交通大学材料科学与工程学院, 上海 200240)

摘 要: 随着电子器件向着高集成度、大功率迅速发展, 散热已经成为制约其发展的关键问题。热管通过气液相变模式进行散热, 是最高效的传热方式之一, 被广泛应用于航天、航空、电力电子等重要应用领域。这些应用要求热管在具有高传热性能的同时还能长期服役, 而热管腐蚀是影响热管寿命的关键。造成热管腐蚀的原因很多, 主要包括热管材料与工质相容性较差、热管内发生的气泡破裂和流体冲刷等。详细介绍了热管存在的腐蚀类型、重要影响因素(工质、温度、气体等), 探讨了其相应腐蚀机理和腐蚀防护方法, 并列举了典型的热管腐蚀实例。同时指出现有的热管腐蚀研究存在的问题, 对该领域以后的发展方向作了展望。

关键词: 热管; 气液相变; 服役寿命; 腐蚀; 传热; 工质

中图分类号: TK172.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2022)02-0140-08

引用格式: 陶锦燃, 程为铮, 张万里, 等. 热管腐蚀的研究进展与展望[J]. 中国材料进展, 2022, 41(2): 140-147.

TAO J R, CHENG W Z, ZHANG W L, *et al.* Research Progress and Outlook of Corrosion inside Heat Pipes[J]. Materials China, 2022, 41(2): 140-147.

Research Progress and Outlook of Corrosion inside Heat Pipes

TAO Jinran, CHENG Weizheng, ZHANG Wanli, ZHENG Feiyu, FU Benwei, DENG Tao
(School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: With the rapid development of electronic devices towards high level of integration and high power, heat dissipation has become a key problem restricting their further development. Heat pipe, benefiting from vapor-liquid phase change, has become one of the most efficient methods for heat transfer, and has been widely used in many different fields, including aerospace, aviation, and power electronics. All these applications call for both high performance of heat transfer and long service life for heat pipes. Corrosion plays a critical role in affecting the service life of heat pipe. There are many factors contributing to corrosion inside heat pipes, including poor compatibility between heat pipe material and working medium, bubble fracture and fluid erosion in heat pipe, *etc.*, and the study of corrosion inside heat pipe shows increased importance. In this paper, different types of corrosion existed in heat pipe, and the important influencing factors (working medium, temperature, gas or vapor, *etc.*) are discussed in detail. The corresponding corrosion mechanisms and corrosion protection methods are presented, and the typical examples of heat pipe corrosion are described. In the end, the future development direction of heat pipe corrosion is also discussed.

Key words: heat pipe; vapor-liquid phase change; service life; corrosion; heat transfer; working fluid

1 前 言

当前电子器件向着大功率和高集成度快速发展, 工作时产生大量的热量, 其有效散热效率已成为影响器件可靠运行的关键^[1]。根据寿命模型进行预测^[2], 半导体芯片的寿命会随着温度升高而大幅度降低, 每升高 10 °C 会导致器件寿命减少 1/2^[3]。因此, 开发高效散热方式、解决大功率、高集成度电子器件的热控问题变得非常迫切。其中, 基于气液相变的热管具有高导热特性, 被认为是最有效的传热技术之一^[4]。经过长期研究和开发,

收稿日期: 2021-04-25 修回日期: 2021-06-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0406100); 上海交通大学“新进教师启动计划”项目资助(20X100040048)

第一作者: 陶锦燃, 男, 1999 年生, 硕士研究生

通讯作者: 付本威, 男, 1988 年生, 助理研究员,

Email: fuwei880603@sjtu.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202104036

热管已成为一种成熟的热控技术,与传统散热材料(铜、铝等)相比,热管具有导热高、能耗低、传输距离长、稳定性强等优点^[5],被广泛应用于航天、航空、电子电气等国家重要领域。

在这些领域中,除了要求所使用的器件和设备能长期服役,其热控采用的热管也需要在长周期下高效稳定运行^[6],而热管的服役寿命与热管腐蚀息息相关。热管材料与工质的相容性问题、热管内气液相变过程中流体运动导致的破坏等都是造成腐蚀发生的原因。其中腐蚀的反应产物往往会提高热管热阻和降低传热效率^[7],腐蚀还会造成热管材料表面局部开裂或形成凹坑,导致热管服役寿命大幅度降低。尽管腐蚀会影响热管的寿命,但合适地设计腐蚀也可对传热有促进作用^[8],比如通过氧化法对热管表面进行腐蚀处理,可制备润湿性梯度的表面,提高毛细芯的驱动力,从而有效提升热管的传热性能^[9,10];将金属铜置于大气环境中,通过控制温度梯度制备具有梯度的 Cu_2O 纳米结构,来实现润湿梯度表面,强化冷凝速率^[11];也可采用 NaOH 溶液对铝槽上的毛细芯进行腐蚀,从而提高毛细芯的润湿性^[12];还可通过化学腐蚀法来制备具有润湿梯度的铜网毛细芯^[13]。因此,在热管运行时,腐蚀反应对热管性能的影响具有多重性,需进一步进行机理探索 and 性能整体评估。

热管内部存在复杂的相变传热过程,这使得腐蚀产生的原因也错综复杂,探究腐蚀机理对于制备高性能、长寿命的热管尤为重要。热管的运行原理如图1所示:外界热量由热管蒸发端输入,液态工质吸收热量,通过相变生成气态工质,气态工质在压力差的驱动下,迅速流动至冷凝端,在冷凝端冷凝、对外放热,冷凝后的工质再经由热管表面的毛细芯,在毛细力的驱动下回流到蒸发端,进入下一个蒸发-传递-冷凝-回流的循环。从热管的工作原理中可以发现,热管工作时,既存在流体流动的冲刷作用,又存在相变时气泡破裂的冲击作用;同时还存在温度、应力、工质等因素影响热管材料的腐蚀。

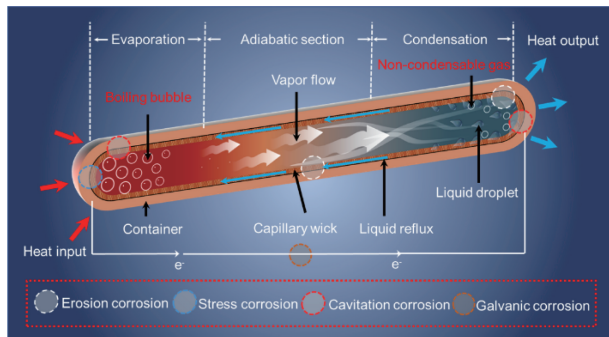


图1 热管传热原理和主要腐蚀类型

Fig. 1 The mechanism of heat and mass transfer inside heat pipe and the main types of corrosion

其中,温度是一个重要影响因素:温度的升高与降低会影响液态工质中溶解氧的浓度、工质的粘度、工质与管材反应活性、反应物扩散速率、反应产物溶解度等^[14],因此管材和工质相容性的选择通常需要考虑温度的影响。

热管腐蚀一般分为内部腐蚀和外部腐蚀,其中内部腐蚀包括流动冲击腐蚀、气蚀、应力腐蚀、电偶腐蚀等,外部腐蚀则因外界的环境变化而发生变化。本文详细介绍了热管内存在的腐蚀类型及其重要影响因素(工质、温度、气体等),探究其相应的腐蚀机理,并阐述了典型的热管腐蚀实例。针对热管腐蚀研究较少的现状,提出了研究中存在的问题,并对该领域以后的发展方向做出了展望。

2 热管腐蚀的研究现状

2.1 工质对热管腐蚀的影响

工质是热管稳定运行过程中的重要环节,对它的选择应进行综合判定,需要考虑与热管材料的相容性、自身的热稳定性、对管壁的润湿性、工作温度下的热导率等,其中工质与热管材料的相容性通常是科研人员关注的要点^[15]。对于铜热管, Rodbumrung 等^[6]在对去离子水和乙醇与铜管的相容性研究中发现:乙醇比去离子水对铜的腐蚀更严重,并且水的潜热与热导率更好,因此铜热管适合使用去离子水作为相变工质。对于铝热管,由于铝具有较高的反应活性,与水的相容性不好,导致其工质的选择较为困难。一般使用氨等作为铝管工质,但氨的工作温度范围相较于水并不理想,因此人们尝试采用水基流体作为铝热管的工质^[16]。Catton 等^[17]研制了一种新型的无机盐水溶液工质用于铝热管,其可在 $-25 \sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内运行,具有长期的稳定性。Stubblebine 等^[18]发现在铝平板热管中使用无机盐水溶液工质比水有更好的相容性,且与铜-水热管的热阻相差不大,然而该研究采用的最高温度为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此还需要对更高温度下的相容性进行研究。不锈钢热管一般在高温环境下使用,工质采用的是钠和钾等碱金属工质。尽管钠与不锈钢相容性较好,但钠工质都会包含一定的杂质,在制备热管过程中低含量的氧会与钠、铬反应生成三元化合物,导致不锈钢中 Cr 的析出,而杂质碳也会导致不锈钢中碳的选择性析出^[19],严重影响热管性能。

常用的工质已逐渐满足不了日益增长的散热需求,为了使工质具有更好的传热性能,通常会向工质里添加分散的纳米颗粒,形成悬浮液(即纳米流体)^[20],从而有效提升热管的传热性能。纳米流体会在弯液面的薄液膜区形成长程结构,起到分离压力的作用,分离压使得纳米颗粒在表面沉积,形成多孔涂层,这种涂层既可以增

强流体的扩散能力,也可以改善表面的润湿性^[21, 22]。同时,由于纳米颗粒的布朗运动和微对流效应,纳米流体的热导率也能得到有效的提高^[23]。Daghigh 等^[24]在真空太阳能集热管中对 CuO、TiO₂、碳纳米管纳米流体的性能进行了比较,研究发现基于碳纳米管纳米流体的传热性能最好。此外,纳米流体的颗粒尺寸和体积分数对其传热性能的提高也有影响^[23]。Kim 等^[25]对氧化石墨烯体积分数为 0.01% 与 0.03% 的纳米流体在不锈钢热管中的性能进行了比较,发现氧化石墨烯含量为 0.01% 的纳米流体的沸腾传热效率更高。但目前对于纳米流体的研究多停留在其对散热性能的提升,而缺少对热管耐腐蚀性的研究。

2.2 温度对热管腐蚀的影响

温度是影响材料腐蚀速率的重要因素,其微小的升高就会促进腐蚀速率成倍增加,而热管的温度分布存在复杂变化,因此温度是影响热管腐蚀的主要因素之一。根据应用温度范围可将热管分为低温热管(-60~100℃)、中温热管(100~600℃)、高温热管(>600℃),热管制备需依据应用温度选择合适的材料和工质。常用的热管材料包括铜、铝、不锈钢等,其中低、中温热管常使用铜材料,高温热管一般采用不锈钢材料,同时热管的工质则是根据热管的工作温度范围和热管材料来进行筛选。

高温下材料腐蚀速率快,因此高温对热管是一种考验,这也一直是高温热管需要重点解决的一大难题。热管通过气液相变的模式进行传热,管体会因流体流动而发生破坏。如图 2 所示,流体回流到蒸发端的过程中,流体冲击毛细芯的表面,由于物理作用导致毛细芯表面发生破坏,同时在高温下非冷凝性气体(如 O₂ 等)进入破损处发生化学反应,导致腐蚀加速。Hao 等^[26]发现铝在去离子水的流动冲击下会发生腐蚀,并且这种腐蚀在较高温度下更严重,这表明较高温度会导致热管内的流动冲击腐蚀更容易发生。Toor 等^[27]研究发现,API 5L-X65 碳钢表面的流动冲刷存在一定的冲击角时,金属表面氧化层的破坏会更加严重。而热管两端的 U 型几何形

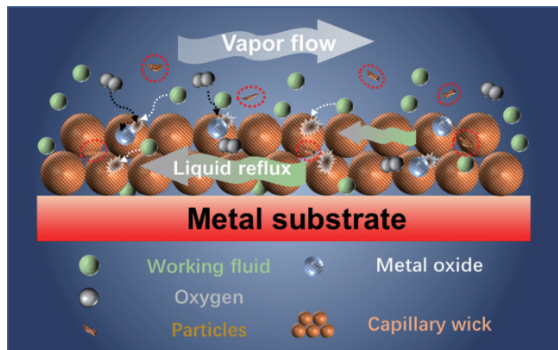


图 2 热管内工质流动的冲刷腐蚀示意图

Fig. 2 Erosion corrosion schematic of working medium in heat pipe

状会导致该处流体冲刷情况复杂,因此在热管两端腐蚀会更加严重。热管处于高温时,各种类型腐蚀加剧发生,协同作用导致腐蚀速率急剧增加。如图 3 所示,在蒸发端由于热输入不均匀导致局部温度过高,产生热应力,在热应力的作用下,热管表面出现裂纹,局部材料的氧化膜发生破裂,氧气进入发生腐蚀反应,生成金属氧化物,并且基体为不锈钢或铝时,可能会生成非冷凝性气体 H₂。因此,热管在高温下可能会因流动冲击、应力等的协同作用而腐蚀严重,但目前这些方面都缺少研究。

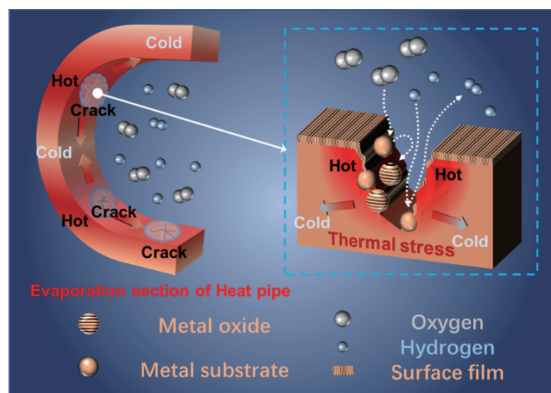


图 3 热管蒸发端存在的应力腐蚀

Fig. 3 Stress corrosion at evaporation section of heat pipe

当热管热负荷增加时,热管两端温差也会随之升高,如图 4 所示,大温差会导致热管两端腐蚀电位差变大,以致发生电偶腐蚀,严重缩短热管服役寿命。发生电偶腐蚀时,蒸发端作为腐蚀阳极,冷凝端作为腐蚀阴极,蒸发端金属壳体材料失去电子,氧化生成氧化膜;电子从蒸发端由热管壳体向冷凝端运动,在冷凝端氢离子得电子生成氢气。其次,温度还会影响热管材料的元素在工质里的溶解度,研究表明:高温热管中,不锈钢中的 Cr 元素在熔融氟化物工质中溶解度会随温度的升高而大幅度增加,导致热管两端 Cr 溶解度的差异变大,两端电位差增加,蒸发端材料的腐蚀加快^[28]。因此,为了克服高温下工质对热管材料的腐蚀问题,人们研制出非金属陶瓷热管来解决高温工质高腐蚀性和高磨损性的难题^[29, 30]。

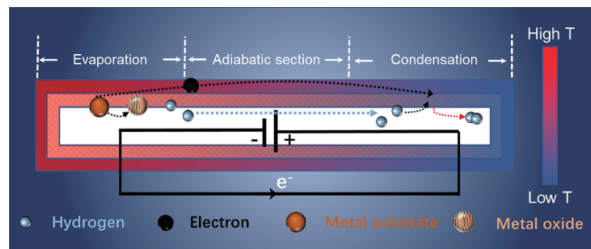


图 4 热管蒸发端和冷凝端的温度差导致的电偶腐蚀

Fig. 4 Galvanic corrosion caused by temperature difference between evaporation section and condensation section of heat pipe

然而, 非金属陶瓷热管存在着一些问题, 包括陶瓷的焊接、毛细芯的选择等, 还需要进一步研究。

2.3 气体对热管腐蚀的影响

热管通过气液相变进行高效传热, 其内部存在气体的对流, 气体包括可冷凝性气体与非冷凝性气体。其中, 可冷凝性气体是液体工质由蒸发端蒸发而生成, 经由蒸气腔流动到冷凝端; 而非冷凝性气体一般是在热管加工、清理、封装过程中引入的杂质气体, 通常是氮气等(主要来自于空气), 并且工质与热管材料管壁、毛细芯材料发生腐蚀反应也会产生非冷凝性气体^[31]。

如图5所示, 冷凝端的气泡一般是由非冷凝性气体形成, 而蒸发端的气泡是由工质吸热沸腾产生。其中冷凝端气泡由于蒸发端流体回流导致的挤压发生破裂, 而蒸发端气泡在生长过程中, 触碰到管壁的薄液面发生破裂, 破裂产生的冲击力会作用于材料表面, 引起气蚀。气蚀严重时, 材料表面会出现很多小凹坑, 造成破碎的小颗粒, 长时间积累会发展成凹坑。气蚀的影响因素包括流体中的含气量、材料的粘度、材料表面的性质等^[32]。气蚀过程一般是由多种机制共同作用的, 而不是单一机制控制, 主要涉及冲击波理论、化学腐蚀理论、电化学理论、热作用理论等^[33]。Cai等^[34]研究发现, 内径为1.8 mm的脉动热管持续工作200余小时后, 在其回收工作液中发现其中包含一些大小不同的不规则铜碎屑, 并且冷凝端有很多微坑。分析表明: 气液两相流体在峰值温差驱动下, 导致冷凝端气泡收缩而形成微射流冲击, 从而破坏热管表面; 通过控制蒸发端与冷凝端的温差、工质流体的体积分数等可以避免气蚀。然而, 目前对热管中的气蚀现象仅有少数报道, 缺乏更深入的研究。

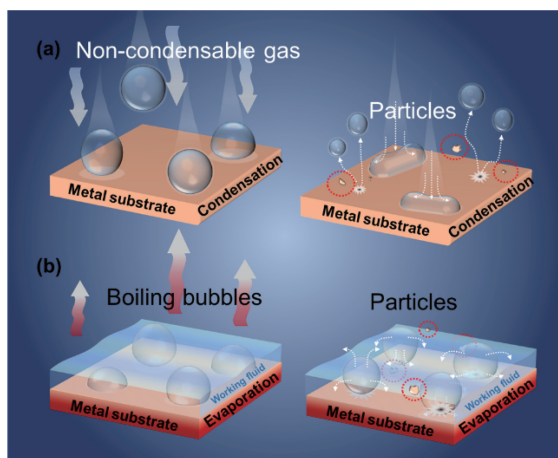


图5 热管内气蚀: (a)热管冷凝端的气蚀示意图, (b)热管蒸发端的气蚀示意图

Fig. 5 Cavitation in heat pipe: (a) cavitation corrosion of condensation section of heat pipe, (b) cavitation corrosion of evaporation section of heat pipe

非冷凝性气体也是导致热管性能下降的重要原因之一。热管长周期运行会因腐蚀积累一定量的非冷凝性气体, 影响热管散热性能^[35]。实验证明: 这类气体会导致热管的启动时间增长, 运行温度升高^[36]; 并且工作热负荷越小, 运行温度升高越显著^[31]; 同时热管中吸液芯的毛细力也会下降^[37], 最终导致热管传热性能降低^[38]。探究其机理发现: 宏观上, 非冷凝性气体会减小冷凝端的有效长度, 减小冷凝面积, 提升冷凝热阻; 微观上, 非冷凝性气体在液体与蒸气界面上聚集, 阻碍了蒸气扩散^[39]。因此, 对此类气体的检测显得尤为重要, 当前采用的检测手段是沿着热管冷凝端安装热传感器^[40]。

在制备热管过程中混入少量的非冷凝性气体也会对热管产生腐蚀。例如, 铜热管充装甲醇-水混合工质时, 铜与纯甲醇工质不会发生反应^[41], 然而少量的 O_2 会与工质中的水、甲醇结合形成羧酸, 羧酸会与铜管中的铜离子发生一系列化学反应, 导致铜管表面发生蚁巢腐蚀^[42]。

2.4 外部环境、焊接、新型管材对热管腐蚀的影响

热管从材料制备、热管封装到实际应用, 整个过程都会存在热管腐蚀, 引起腐蚀的因素包括外部环境、焊接、热管材料等。

当外部环境处于100~150℃的烟气或腐蚀性较为严峻的情况下, 尽管该温度下铜相较于不锈钢材质传热性能更好, 但通常仍会采用耐腐蚀能力更强的不锈钢热管^[43]。此外, 在航天领域中, 由于密度相较于散热性能更加重要, 因此常采用质量较轻的铝合金热管替代铜热管。

在热管封装焊接过程中, 热输入会导致材料的组织和相组成发生改变, 而不同的组织或相腐蚀电位有所差异, 若不能控制好焊接过程的热量, 使组织或相态的腐蚀电位差过大, 会产生电偶腐蚀, 导致局部区域严重破坏^[44]。同时环路热管由于是不同金属拼接制备而成, 常因金属之间腐蚀电位差异过大, 发生严重的电偶腐蚀。

随着电子器件的快速发展, 一些新型的金属基复合材料热管、柔性热管等也相继被开发出来以满足新的应用需求。金属基复合材料既具有高热导、低膨胀等优良性能, 又具有良好的塑性、易加工等特点, 同时与半导体芯片热膨胀系数匹配良好, 是当前芯片散热的研究重点^[45]。而对于这种新型金属基复合材料热管, 其腐蚀研究还处于萌芽状态。贺春林等^[46]研究了 $SiC_p/2024Al$ 腐蚀行为发现, SiC 颗粒会破坏氧化膜的均匀性与完整性, 使得通过阳极氧化法来提高耐腐蚀性变得困难。而 $W-Cu$ 合金在水中常因电偶腐蚀造成腐蚀破坏, 但腐蚀速率一直没有明确的报道^[47]。一般金属柔性热管是通过在绝热段使用柔性材料实现^[48], 但弯曲会导致在绝热端产生应

力场,该应力场会与热管中的其他腐蚀因素产生协同作用,导致绝热端易发生应力腐蚀。

除了以上这些,还有很多因素影响热管腐蚀,包括制备过程中的残余机械应力引发的应力腐蚀、工质污染导致的微生物腐蚀等,而当前对这些方面的探索较少,因此热管腐蚀还需进一步研究。

3 热管腐蚀实例

随着人们在太空、极地等极端环境的探索,对热管服役周期要求更长,因此研究热管腐蚀已经迫在眉睫。热管腐蚀主要包括管材和毛细芯的腐蚀等。Rittidech 等^[49]将铜-水热管置于运行计算机内分别进行 500,

1000, 3000~5000 h 的长周期测试,并对多孔毛细芯和壳体铜材进行 SEM 和 EDX 表征(图 6a),发现:长时间运行后,多孔结构发生不均匀腐蚀,工质中铜含量提高到 6.2×10^{-8} ,蒸发端的铜含量逐渐减小。

Rodbumrung 等^[6]进一步比较研究铜热管在蒸馏水与乙醇工质的腐蚀情况,如图 6b 和 6c 可知,铜-水热管会出现腐蚀痕迹,而铜-乙醇热管产生了腐蚀产物。且通过 EDX 分析得知,水工质中存在铜元素主要是由于水中溶解的氧气与铜发生腐蚀反应,而乙醇工质中的铜是由于乙醇本身与铜发生腐蚀反应,并且发现乙醇工质中含铜量相较于水工质中的更高,说明铜热管在乙醇中的腐蚀比在水中的腐蚀更加严重。

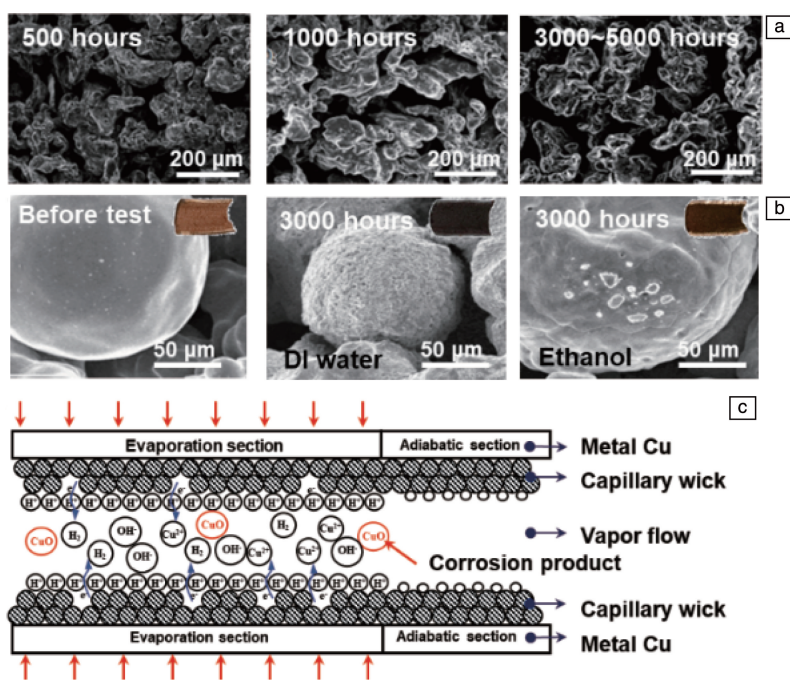


图 6 热管运行时,铜质多孔毛细芯在去离子水中的腐蚀形貌微观照片(a)^[49];烧结铜粉多孔毛细芯在去离子水和乙醇中运行 3000 h 后的微观组织照片(b)^[6],在热管蒸发端的毛细芯上的腐蚀反应示意图(c)^[6]

Fig. 6 Micrograph of the corrosion of copper-based capillary wick in deionized water when the heat pipe is working (a)^[49]; micrograph of sintered copper powder-based capillary wick in deionized water and ethanol for 3000 hours (b)^[6], corrosion mechanism of capillary wick at evaporation section of heat pipe (c)^[6]

Tu 等^[50]对比研究了不同合金钢热管的腐蚀类型,合金钢由于成分区别导致其腐蚀敏感性不同,使得不同合金钢具有不同的腐蚀类型,如图 7a 所示,12CrMoV 合金钢产生的是缝隙腐蚀,裂缝始于缺陷处;15CrMo 合金钢的腐蚀更加均匀、疏松。Cai^[34]将毛细脉动铜热管在除气蒸馏水中循环运行了 4 次 200 余小时后,将热管纵向切开,进行显微组织观察。如图 7b 和 7c 所示,在冷凝端发现很多直径为 20~300 μm 的腐蚀小凹坑,并且回收液中有很多不规则的金属碎片,而蒸发端表面却很光滑,说明非冷凝性气体在冷凝端发生气蚀,造成

了管壁的损伤。

热管的种类和工质繁多,腐蚀类型复杂。目前,大多是关于工质和材料相容性的研究和报道,缺少具体服役寿命的预测。并且当前对于热管腐蚀的研究仅停留在 SEM 组织分析上,缺少多途径的腐蚀表征,腐蚀寿命预测也是空白,需要投入更多精力,以填补热管服役寿命研究方面的空白。

4 热管腐蚀防护

由于热管工作环境的多样性,导致热管腐蚀的原因

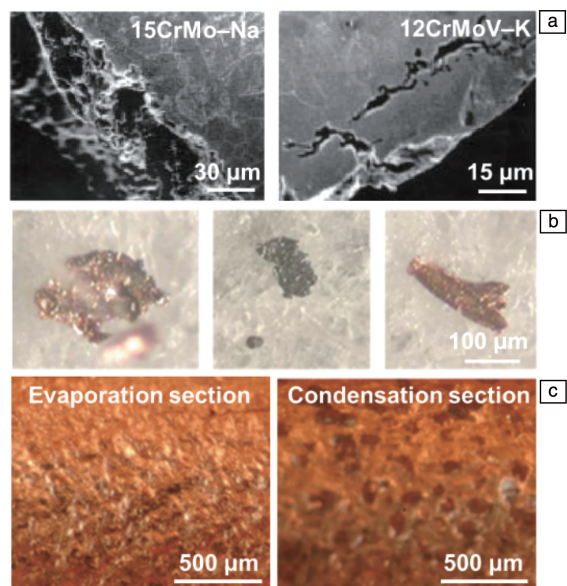


图7 高温不锈钢热管的均匀腐蚀和缝隙腐蚀(a)^[50]；铜热管回收液中的铜屑(b)^[34]，铜热管蒸发区光滑表面和冷凝区的腐蚀坑(c)^[34]

Fig. 7 Uniform corrosion and crevice corrosion of high-temperature stainless steel heat pipe (a)^[50]；copper debris in the liquid-state working medium of copper heat pipe (b)^[34]，smooth surface of evaporation section and cavitation corrosion at condensation section in copper heat pipe (c)^[34]

错综复杂，需根据其特定的腐蚀类型进行防护。常用的腐蚀防护措施主要包括：添加缓蚀剂、选用耐蚀材料、表面处理等。对热管进行腐蚀防护时，还需对其散热性能进行评估，保证耐腐蚀性能与散热性能同步提升。

工质是影响热管腐蚀的根本因素，应从工质本身对热管腐蚀进行防护。向工质中添加缓蚀剂是从工质方向进行腐蚀防护的有效方法，也是腐蚀防护的第一道防线。缓蚀剂防护机理主要为在材料表面成膜（或沉淀）阻碍腐蚀介质与材料的接触，从而达到延长热管腐蚀寿命的目的^[51]。而在热管气液相变的传热方式下，缓蚀剂防护程度可能会受到影响，同时，缓蚀剂形成的表面层会改变热管毛细芯的润湿性，从而影响热管的传热性能。因此，向热管工质中添加缓蚀剂的防护技术还需进一步探索。

热管常用的材料铜和不锈钢等在常温下都是耐蚀性高的材料，但在高温时腐蚀速率成倍增加，腐蚀寿命急剧下降，是热管腐蚀防护的一大难点。而使用陶瓷材料，例如碳化硅陶瓷，可有效地解决这个问题。陶瓷材料是一种新型的高温耐蚀热管材料，但其仍存在问题，包括热管封装不便、毛细芯的选择等等，因此还需进一步探究^[52, 53]。

气蚀是热管典型的腐蚀类型，采用表面处理技术可

有效解决这个问题，制备耐腐蚀性和散热性能优良的涂层是研究的关键。Zou 等^[54]采用等离子体电解氧化和后续电沉积方法在铝合金表面制备了具有高附着强度的超疏水 Al_2O_3 /十六烷酸铈复合涂层，同时提高了其耐腐蚀性能和散热性能。Hares 等^[55]使用电泳沉积技术在铜管表面沉积了氧化石墨烯纳米片，提高了铜管的耐蚀性，但缺少散热性能的特征。除此之外，热管中的表面涂层也可通过纳米流体工质的相变而形成。相比于基础工质，纳米流体大大提高了比热，具有优良的传热性能，并降低了功耗和成本^[56-58]，但对大多数纳米流体研究仅停留在散热性能上，缺少对腐蚀防护性能的特征与探索。总的来说，表面涂层技术在热管中的应用还尚未成熟，研发出满足热管工作环境的涂层可极大地提升热管耐腐蚀性能，促进热管的发展。

5 结 语

本文综述了热管腐蚀的形式和主要影响因素（包括气体、温度、工质等），探究了相应的腐蚀机理，并阐述了典型的热管腐蚀实例。热管具有热导率高、稳定性强等特点，具有广阔的应用前景和商业价值。但由于热管内部存在气体对流、液体回流、冷热循环等过程，多因素协同作用导致腐蚀速率加快，这是热管技术实际应用的关键难点，需要进行全面系统的研究。目前的热管腐蚀研究匮乏，腐蚀防护技术缺少，在实际应用中面临着诸多挑战，未来的研究应侧重以下几个方面：

(1) 热管腐蚀表征技术的创新。目前热管腐蚀研究中，仅通过离子浓度的检测、表面形貌的 SEM 观测、元素的 EDS 分析等进行腐蚀表征，严重缺少对腐蚀速率和热管服役周期的预测手段。因此亟需探索新的热管腐蚀表征技术、模型，对热管腐蚀速率、服役周期进行准确预测，为热管应用提供保障。

(2) 加强对热管内腐蚀机制的探索。热管腐蚀并不是由单一机制决定，而是受多因素共同作用的。但目前热管腐蚀研究大多停留在表面腐蚀形貌的描述，缺少深入的探究。因此亟需对热管腐蚀机制作进一步探讨，才能找出有效的防腐方法，延长热管的服役寿命。

(3) 严格控制热管内的非冷凝性气体。热管中非冷凝性气体的存在不仅阻碍了气液界面中的蒸气扩散，还可能形成气泡，引起气泡破裂造成的气蚀，严重影响着热管性能与寿命。因此，热管内部非冷凝性气体的含量及温度等条件对于热管性能的影响还需进一步探索。

(4) 探究热管温度及温差对腐蚀性能的影响。温度是影响腐蚀速率的主要因素之一，热管工作温度升高会导致腐蚀速率成倍增加，并且温度会与其他影响因素协

同作用,加剧腐蚀的进行。同时,热管两端温差过大,造成各区域腐蚀倾向不同,会导致严重的电偶腐蚀。因此,探索热管温度及温度梯度对热管腐蚀的影响极其重要,并对高温热管服役寿命的提高具有重大影响。

(5)发展新型工质。工质的选择常常需要考虑其自身的稳定性、热导率、与热管材料的相容性等,其中相容性尤为重要。而导致相容性不好的原因大部分都是腐蚀,腐蚀会导致热管性能的下降。提升热管综合性能需要寻找新型工质,新型工质往往是在性能良好工质的基础上进行改良。因此,亟需探索可以延长热管服役寿命、提高热管性能的新型工质;或利用工质腐蚀改善毛细芯表面润湿性能,从而促进热管液体回流,在保证相容性情况下提高热管性能。

(6)探究外部环境、焊接、新型管材引起的热管腐蚀问题。外部环境会影响热管材料的选择,焊接工艺及组织引起的腐蚀问题会对热管寿命产生影响,而对新型管材的研发常忽视了腐蚀的问题。因此,热管腐蚀问题需在制备和实际应用过程中得到考虑。

(7)开发热管腐蚀防护新技术。腐蚀防护是腐蚀研究的一大重点,而热管腐蚀防护技术缺少,需借鉴常用的腐蚀防护技术进行改良,以及探索纳米流体新技术。发展热管缓蚀剂技术、表面处理技术等是一大趋势,并且需要注意的是,对热管进行腐蚀防护时,还要保证热管传热性能的稳定。

参考文献 References

- [1] YOU Y, ZHANG B, TAO S, *et al.* Micromachines[J], 2021, 12(3): 265.
- [2] LAI W, CHEN M, RAN L, *et al.* IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering[J], 2018, 13(4): 613–621.
- [3] LI G, ZHANG J, GAO J. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering[J], 2019, 14(10): 1524–1531.
- [4] JOUHARA H, CHAUHAN A, NANNOU T, *et al.* Energy[J], 2017, 128: 729–754.
- [5] NAKKAEW S, CHITIPALUNGSRI T, AHN H S, *et al.* Case Studies in Thermal Engineering[J], 2019, 15: 100531.
- [6] RODBUMRUNG A, RITTIDECH S, BUBPHACHOT B. Advances in Mechanical Engineering[J], 2016, 8(1): 1687814015625884.
- [7] FAES W, LECOMPTE S, AHMED Z Y, *et al.* Corrosion Reviews[J], 2019, 37(2): 131–155.
- [8] TANG H, WENG C, TANG Y, *et al.* International Communications in Heat and Mass Transfer[J], 2020, 118: 104908.
- [9] CHENG J, WANG G, ZHANG Y, *et al.* International Journal of Heat and Mass Transfer[J], 2017, 107: 586–591.
- [10] QU J, WU H, CHENG P. International Communications in Heat and Mass Transfer[J], 2008, 35(5): 523–528.
- [11] HUANG Z, LU Y, QIN H, *et al.* Advanced Engineering Materials[J], 2012, 14(7): 491–496.
- [12] TANG H, TANG Y, YUAN W, *et al.* Applied Thermal Engineering[J], 2018, 129: 907–915.
- [13] TANG Y, TANG H, LI J, *et al.* Applied Thermal Engineering[J], 2017, 115: 1020–1030.
- [14] MCNEILL L S, EDWARDS M. Environmental Monitoring and Assessment[J], 2002, 77(3): 229–242.
- [15] BABU N N, KAMATH H C. Materials Today: Proceedings[J], 2015, 2(4/5): 1469–1478.
- [16] REAY D, MCGLEN R, KEW P. Heat Pipes: Theory, Design and Applications[M]. United Kingdom: Butterworth-Heinemann, 2013.
- [17] CATTON I, TAO H T, REILLY S W, *et al.* Inorganic Aqueous Solution (IAS) for Phase-Change Heat Transfer Medium: US 8967236[P]. 2015–3.
- [18] STUBBLEBINE M J, CATTON I. Journal of Heat Transfer[J], 2015, 137(5): 052901.
- [19] GANESAN V, GANESAN V. Journal of Nuclear Materials[J], 1998, 256(1): 69–77.
- [20] YU Y, AN G, WANG L. Frontiers in Energy[J], 2019, 13(1): 172–184.
- [21] WEN D. Journal of Nanoparticle Research[J], 2008, 10(7): 1129–1140.
- [22] FU R, HU X, ZHANG H, *et al.* Applied Thermal Engineering[J], 2021, 182: 115899.
- [23] ZHAO J J, DUAN Y Y, WANG X D, *et al.* Journal of Nanoparticle Research[J], 2011, 13(10): 5033–5047.
- [24] DAGHIGH R, ZANDI P. Renewable Energy[J], 2019, 134: 888–901.
- [25] KIM K M, BANG I C. International Journal of Thermal Sciences[J], 2016, 100: 346–356.
- [26] HAO L, ZHENG F, CHEN X, *et al.* Materials[J], 2020, 13(3): 779.
- [27] TOOR I U H, IRSHAD H M, BADR H M, *et al.* Metals[J], 2018, 8(6): 402.
- [28] WANG Y, ZENG C, LI W. Corrosion Science[J], 2018, 136: 180–187.
- [29] MEISEL P, JOBST M, LIPPMANN W, *et al.* Applied Thermal Engineering[J], 2015, 75: 692–699.
- [30] MEISEL P, SCHÖNE S, LIPPMANN W, *et al.* Advanced Engineering Materials[J], 2014, 16(10): 1243–1251.
- [31] HE J, LIN G, BAI L, *et al.* International Journal of Heat and Mass Transfer[J], 2014, 70: 449–462.
- [32] 李根生, 沈晓明, 施立德, 等. 石油大学学报(自然科学版)[J], 1997, 21(1): 99–104.
- [33] LI G S, SHEN X M, SHI L D, *et al.* Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)[J], 1997, 21(1): 99–104.
- [33] 偶国富, 周永芳, 郑智剑, 等. 液压与气动[J], 2012(4): 3–8.
- OU G F, ZHOU Y F, ZHENG Z J, *et al.* Chinese Hydraulics & Pneu-

- matcs[J], 2012(4): 3-8.
- [34] CAI S Q. Physics Letters A[J], 2019, 383(6): 509-513.
- [35] WANG H, LIN G, SHEN X, *et al.* Applied Thermal Engineering[J], 2020, 180: 115711.
- [36] WANG H, LIN G, SHEN X, *et al.* International Journal of Heat and Mass Transfer[J], 2019, 128: 1072-1080.
- [37] ANAND A R. International Journal of Heat and Mass Transfer[J], 2019, 143: 118531.
- [38] PRADO-MONTES P, MISHKINIS D, KULAKOV A, *et al.* Applied Thermal Engineering[J], 2014, 66(1/2): 474-484.
- [39] DAIMARU T, NAGAI H. Journal of Thermophysics and Heat Transfer[J], 2015, 29(3): 563-571.
- [40] ENKE C, JÚNIOR J B, VLASSOV V. Applied Thermal Engineering[J], 2021, 183: 116135.
- [41] WANG S P, ZHU J J. Test of Metal Corrosion by Methanol and Methanol-gasoline[C]//Proceedings of 2010 International Conference on Advances in Energy Engineering. Beijing: IEEE, 2010: 27-30.
- [42] COZZARINI L, MARSICH L, SCHMID C. Engineering Failure Analysis[J], 2020, 109: 104387.
- [43] LEE H M, TSAI M C, CHEN H L, *et al.* Energy Procedia[J], 2017, 105: 4745-4750.
- [44] YINGSAMPHANCHAROEN T, SRISUWAN N, RODCHANAROWAN A. Metals[J], 2016, 6(9): 207.
- [45] 李志强, 谭占秋, 范根莲, 等. 中国材料进展[J], 2013, 32(7): 431-440.
- LI Z Q, TAN Z Q, FAN G L, *et al.* Materials China[J], 2013, 32(7): 431-440.
- [46] 贺春林, 刘常升, 李凤琴, 等. 材料保护[J], 2001, 34(12): 8-10.
- HE C L, LIU C S, LI F Q, *et al.* Materials Protection[J], 2001, 34(12): 8-10.
- [47] GUO D, KWOK C T. Journal of Materials Science & Technology[J], 2021, 64: 38-56.
- [48] HUANG J, XIANG J, CHU X, *et al.* Applied Thermal Engineering[J], 2021, 186: 116532.
- [49] RITTIDECH S, RODBUMRUNG A. Engineering, Technology & Applied Science Research[J], 2017, 7(6): 2293-2295.
- [50] TU S T, ZHANG H, ZHOU W W. Engineering Failure Analysis[J], 1999, 6(6): 363-370.
- [51] TAGHAVIKISH M, DUTTA N K, ROY CHOUDHURY N. Coatings[J], 2017, 7(12): 217.
- [52] UNZ S, HACK N, BECKMANN M. ChemBioEng Reviews[J], 2018, 5(4): 270-280.
- [53] MEISEL P, LIPPMANN W, HURTADO A. Ceramic High-Temperature Heat-Pipes[C]//Proceedings of 22nd International Conference on Nuclear Engineering. Prague, Czech Republic: American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2014.
- [54] ZOU Y, WANG Y, XU S, *et al.* Chemical Engineering Journal[J], 2019, 362: 638-649.
- [55] HARES E, EL-SHAZLY A H, EL-KADY M F, *et al.* Arabian Journal for Science and Engineering[J], 2019, 44(6): 5559-5569.
- [56] FERNÁNDEZ A G, MUÑOZ-SÁNCHEZ B, NIETO-MAESTRE J, *et al.* Renewable Energy[J], 2019, 130: 902-909.
- [57] JO B, BANERJEE D. Acta Materialia[J], 2014, 75: 80-91.
- [58] LI X, CHEN Y, MO S, *et al.* Thermochimica Acta[J], 2014, 595: 6-10.

(编辑 惠 琼)