

热管失效机理研究进展

Research Progress on Heat Pipe Failure Mechanism

供稿|李长银 / LI Chang-yin

内容导读

热管是一种高效传热元件，在石油、冶金、电厂和余热回收等领域广泛应用于电子器件冷却、空间飞行器、节能和能源高效管理等方面。由于热管常常工作在高温、高压和强腐蚀环境下，因而使热管出现了各种失效情况。文章阐述了热管管内失效和管外失效的原因和失效机理。总结了热管管内失效的预防和保护措施为：在管内壁上裸露基体；增加热管的真空度；在管内壁进行镀铬或者铝膜；在热管冷凝段装吸氢剂以解决不凝性气体对热管的影响，而定期排放氢气是从根本上解决问题的一个很好的方法。指出对于热管管外失效更换热管钢管材料是较好的选择。提出建立热管失效的优化管理系统，更加全面和科学地进行热管失效的预防保护和管理，充分发挥热管的优势，提高热管的安全运行寿命。

1944年，R. S. Gaugler首次在美国专利中提出了热管的概念。1963年，美国Los Alamos国家实验室G. M. Gover在美国“应用物理”杂志上发表了文章，给出了以钠为工作液体，不锈钢为壳体，内部装有丝网吸液芯的传热元件的实验结果，显示其导热率远超过任何一种金属，并命名其为热管(Heat Pipe)。1965年，Cotter首次提出了完整的热管理论。1967年，一根不锈钢-水热管首次应用于卫星轨道并运行成功。从此，国内外科技工作者对热管进行了大量的研究工作。近30年来，我国热管技术的工业化应用研究发展迅速，热管因其高效的传热性能、结构简单、无机械结构等优点，已广泛应用在电子器件冷却、空间飞行器、节能和能源高效管理等方面，

并随着科学技术的不断发展，其应用领域不断拓宽，进一步促进了热管的发展。

热管工作原理及应用

热管由管壳、吸液芯和端盖组成，管内抽成 $(1.3 \times 10^{-1} \sim 1.3 \times 10^{-4})$ Pa负压后充入适量的工作液体，在紧贴管内壁的吸液芯充满液体后密封。热管结构如图1所示，一端为蒸发段，另一端为冷凝段，中间可布置绝热段。工作原理为：当热管的蒸发段受热时毛细芯中的液体蒸发汽化，蒸汽在压差下流向冷凝段放出热量凝结成液体，液体在毛细力的作用下回流到蒸发段。如此循环，热量从热管的一端流向另一端，实现了热量的传递。热管的工作机理使热

作者单位：福建泉州闽光钢铁有限责任公司，福建 泉州 362411

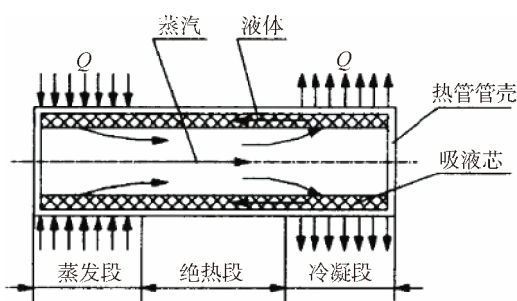


图1 热管工作原理图

管具备了高导热性、优良的等温性、热流密度可变性、热流方向可逆性、热开关性和环境的适用性。

热管的种类因结构、材质、工作液体和工作温度的不同,分类很多。按温度区间可分为低温热管(-273~0℃)、常温热管(0~250℃)、中温热管(250~450℃)和高温热管(450~1000℃)。按回流动力分为有芯热管、重力热管、旋转热管等。按结构分为普通热管、分离热管、脉动热管、毛细泵回路热管、微型热管、平板热管、径向热管等。按用途分为传热热管、热二级管、热开关、热控制热管、制冷热管等。目前,普通热管中的碳钢-水重力热管因结构简单、价格低廉、制造方便,在工业生产中应用十分广泛。

热管的相容性在应用中意义重大。相容性是指管内工作液体同管壳不发生显著的化学反应或物理变化,不足以影响热管的工作性能。热管的不相容体现在三个方面:产生不凝性气体、工作液体热物性恶化、管壳材料的腐蚀和溶解等。只有相容性良好的热管,才能保证热管的稳定传热性能、长期的工作寿命以及工业应用的可能性。

工业应用中,热管常工作在高温、高压和带腐蚀性的环境中,会导致热管失效,无法保持运行安全和使用寿命。本文针对热管在不同外部环境下的失效原因、失效种类和失效机理进行分析和综述,为热管失效的预防和保护提供借鉴。

热管的失效机理

热管失效主要分为管内失效和管外失效。管内失效主要有三种情况:不凝性气体的产生^[1]、真空度不达标、管内防腐蚀剂数量不达标。管外失效可分为:热管因腐蚀或磨损导致穿孔使热管泄漏、热管

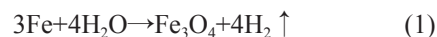
因高温高压发生变形、锅炉设计参数不符合标准而使热管失效三种情况。其中,管内失效是主要失效形式,主要由管内腐蚀和不凝性气体的产生导致热管传热性能的下降。

管内失效

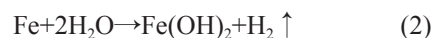
影响管内失效的三种因素中,管壁腐蚀和不凝性气体的产生是热管失效的最主要原因,其产生机理与热管工作液体的稳定性及工作介质与管壳的相容性等有关。热管按管壳与工作液体的组合方式可分为铜-水热管、铜钢复合-水热管、铝-丙酮热管、碳钢-萘热管和不锈钢-钠热管。热管常用工质有水、有机工质、萘和钠等。

段松屏等^[2]研究了钢-水热管不凝性气体的产生机理,主要原因是管内的工作液体水与热管管壳材料的相容性较差,导致管内水蒸汽与管壳材料发生化学反应,从而产生不凝性气体。

其中,碳钢-水热管中水蒸汽与碳钢管壳的化学反应式为:



钢-水热管也会发生化学反应,其化学反应式为:



当热管工作温度在120℃以上时,产生的Fe(OH)₂会分解生成氢气,其化学反应式为:



热管在工作时产生的氢气本身不会影响热管的传热性能^[3],但由于产生的氢气不断地在冷凝段聚集形成堵塞,导致冷凝段有效换热面积不断减少,热阻增大,传热性能下降,致使热管失效。

管内腐蚀也是导致热管失效的另一主要因素。管内腐蚀常发生在采用有机工质作为工作介质的热管。因为有机工质的不稳定性,当充有有机工质的热管在高温、高压的环境下长时间工作时,管内有有机工质会发生逐渐分解,分解物质与管壳材料发生化学反应而导致管内腐蚀,所以,通常在管内加入防腐蚀剂,来控制 and 预防有机工质的分解及与管壁反应产生的腐蚀。但由于防腐蚀剂数量不达标或者防腐蚀条件不达标,仍会使管壁发生腐蚀,从而导致热管失效。

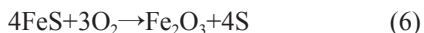
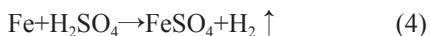
管外失效

管外失效主要是指热管外壁发生磨损、腐蚀或

高温高压变形而导致的热管失效,失效的原因与热管的工作环境有关,如飞灰磨损,低温腐蚀,高温烟气腐蚀^[4],热管积灰垢和气蚀等问题,这些现象的产生都与热管蒸发端所处的工作环境因素有关,致使热管失效。

王锦麟等^[5]进行了锅炉飞灰磨损的特性的研究,发现锅炉运行中有大量含有飞灰颗粒和未燃尽的碳粒的烟气,而如今锅炉中余热回收过程中大量使用热管。当热管的蒸发段处于烟气中时,由于锅炉中含飞灰颗粒和碳粒的烟气,再加上烟气对管束的长时间冲刷,导致管壁变薄或者穿孔,致使热管内部工质泄漏和热管失效。

郭赞扬等^[4]进行了热管的低温腐蚀失效研究。指出当热管蒸发端与含硫燃料燃烧生成的烟气进行换热时,因硫燃烧生成 SO_2 ,进一步氧化成 SO_3 , SO_3 与烟气中的水蒸气进而反应生成硫酸蒸汽,故烟气中含有硫酸蒸汽。当热管外壁温低于烟气的酸露点温度时,硫酸蒸汽在管壁上凝结,对管壁产生腐蚀作用,导致热管外壁面凹凸不平,严重的部位导致穿孔,最终致使热管失效。低温腐蚀的化学反应式为:



高温烟气腐蚀机理:带有腐蚀性质的熔融状态的油灰附着在热管外壁面上,使热管外表面的氧化保护层融化,加速热管管壁的腐蚀,最终导致热管在高温条件下难以承担锅炉的高压力,管壁发生破裂,使得热管失效。

热管在换热器中的应用比较多,热管换热器使用过程中因积灰垢对热管的使用会产生影响。烟气中一般都含有硫物质和较多的机械杂质,在减压加热条件下,这些杂质会结合在一起形成坚硬的沉积物,沉积在热管换热器壁面和热管翅片上,由于积灰垢的导热性能与碳钢相比要相差几十倍,积灰垢严重阻碍了热管传热,导致热管管壁温度升高,最终导致热管失效。

李斌东等^[6]研究了汽蚀对热管失效的作用机理。提出了当热管冷侧有换热套管(水夹套)时,套管中的吸热介质(水)由于受热不均加之存在局部压降极易引起汽蚀,汽蚀造成热管放热段腐蚀严重,形成鼠

咬状外表,严重时会产生沟槽状深痕,导致管壁破裂,致使热管失效。

除了上述各种导致热管失效的外部原因和失效机理外,对于使用热管换热器的锅炉设计是否符合标准,是决定锅炉能否长时间正常运行的一个重要环节,也对热管的使用寿命有着致命影响。在锅炉设计中,一般都是先选定锅炉的整体布置,然后进行燃料估算,再确定炉膛结构,进行炉膛传热计算,之后确定对流换热面的结构,进行对流传热计算。上述计算中需要对热管换热器的材料、管径壁厚进行预选,之后进行热管壁温计算,以及强度校核,确定是否符合标准。大量热管失效的例子显示,热管失效与锅炉设计参数选取和计算错误有关。当锅炉的运行条件与热管的运行条件不相符时,热管的管壁会因为压力或者温度过高导致破裂,致使热管失效。

热管的失效预防与保护

针对热管的失效原因及产生机理,采取必要的失效预防及保护措施是保证热管使用寿命、安全运行及传热性能的重要手段。

针对管内失效机理,采用提高热管内壁的处理技巧以及制造工艺的方法是防止热管管内失效的有效手段。常用方法有:(1)在管内壁上裸露基体。如今很多热管防腐是利用多孔氧化物薄膜,但裸露金属基体可能会有更好的耐磨性。(2)增加热管的真空度^[7]。即在热管抽真空时尽量延长排气时间,增大排气量,使热管内部的真空度尽量高,减少热管内部的气态类杂质。(3)在管内壁进行镀铬或者铝膜^[8],使金属基体表面形成一层致密的氧化物保护膜,这层氧化物薄膜会阻碍阳极区域的反应,减缓电化学腐蚀过程。(4)在热管冷凝段装吸氢剂以解决不凝性气体对热管的影响^[9]。陈恩鉴^[10]提出了一种渗透除氢热管,管内介质是水,在热管冷凝端装上透氢活化金属层和促氢脱附金属层而形成复合层,可以防止因氢气积聚而导致的热管失效,但不能从根本上解决问题。因此,定期排放氢气是一个很好的方法。

针对因管外腐蚀或者磨损而导致的热管失效,更换钢管材料是较好的选择。一般不锈钢可以很好

地解决管内外的腐蚀问题。也可以使用复合管,如碳钢管内衬铝管或不锈钢管,但是复合管的成本较高,且一定程度上会影响热管的传热性能。另外,在设计锅炉时要针对热管的工作环境对热管进行合理设计和强度计算,尽可能使热管的最低壁温高于露点温度,防止露点腐蚀。

针对热管的失效预防管理应建立锅炉热管失效的优化管理系统,将热管的设计、制造及应用统一起来,强化失效分析研究,提高热管的使用寿命,定期抽查热管,及时更换已经失效的热管,形成一系列完整的企业热管失效管理和预防保护措施。

结束语

热管由于具备结构简单、传热性能优良等特点,在工业领域得到了广泛的应用。但多年来,由于缺乏对热管失效机理的系统研究和对热管失效的有效防范,时常发生因各种原因导致的热管失效。因此,只有加强对热管失效的系统研究以及失效机理的本质研究,建立预防热管失效的优化管理系统,才能改变现阶段热管失效常采用的头痛医头、脚痛医脚的现状,更加全面和科学地进行热管失效的预防保护和管理,充分发挥热管的优势,提高热

管的安全运行寿命。

参考文献

- [1] 何江,林贵平,柏立战,等.不凝气体对环路热管工作性能的不利影响.航空动力学报,2014,29(10):2377
- [2] 段松屏,任青山.钢—水热管的失效与修复.华电技术,1999(2):38
- [3] 刘乃江.电站锅炉热管失效诊断与状态检验研究[学位论文].唐山:华北理工大学,2015
- [4] 郭赞扬,金大华.锅炉热管常见早期失效形式分析.热处理技术与装备,2017,38(4):53
- [5] 王锦麒,孙家庆.锅炉飞灰磨损特性的试验研究.上海理工大学学报,1987(2):102
- [6] 李斌东,魏保杨,廖礼平.热管锅炉热管爆管及失效原因分析.化工装备技术,2012,33(5):31
- [7] 于恒,刘丹,孙飞,等.热管抽真空灌注系统的研究.科技展望,2015(5):132
- [8] 段海龙.酸性化学镀Ni-P合金在铝热管表面的工艺研究及耐腐蚀性研究[学位论文].昆明:昆明理工大学,2013
- [9] 邓光霞.中高温太阳能真空集热管用吸氢材料的研究[学位论文].北京:北京有色金属研究总院,2013
- [10] 陈恩鉴,林伯川,郭振,等.渗透除氢热管:中国,94116382.2.1997-03-05

作者简介:李长银(1969—),男,机械工程师,毕业于福州大学自动化专业,本科,现从事设备采购及设备管理工作,E-mail:lcy6904@sina.com。



摄影 李孟超