

双储液器环路热管工作不稳定性实验分析

凤健婷*, 林贵平, 柏立战

北京航空航天大学航空科学与工程学院, 北京 100083

* E-mail: tingcrystal@qq.com

收稿日期: 2007-09-19; 接受日期: 2008-06-07

国家自然科学基金(批准号: 50676006)、航空科学基金(批准号: 2007ZC51)和新世纪优秀人才支持计划资助项目

摘要 对双储液器环路热管运行中出现的温度迟滞、倒流及温度波动等不稳定现象进行了描述和解释. 实验发现, 在热载荷递增和递减循环实验中, 双储液器环路热管在可变热导区内的工作温度并不一致, 功率递减时的工作温度偏低; 姿态对出现温度迟滞现象的热载荷范围有一定影响; 热载荷变化幅度对温度迟滞的影响并不大. 倒流现象不仅发生在蒸气槽道充满液体的小热载荷启动过程, 蒸气槽道存在蒸气的小热载荷启动过程中也可能发生工质倒流; 工质倒流的原因主要是芯内蒸发或者蒸气瞬间穿透毛细芯, 使得芯内压力高于芯外压力. 温度波动现象可能发生在小热载荷启动或者较大热载荷的亚稳态运行过程中, 尤其当有液体引管穿过的储液器位于蒸发器上方时, 温度波动发生的几率较大.

关键词

环路热管
双储液器
温度迟滞
工质倒流
温度波动

环路热管(loop heat pipe, LHP)技术是目前航天器热控领域最前沿的热控技术之一, 它具有传输热量大、输送距离远、传热温差小、反重力能力强以及无需外加动力、安装灵活方便等诸多优点. 双储液器环路热管(dual compensation chamber loop heat pipe, DCC-LHP)是在常规单储液器LHP蒸发器的另一端增加了一个储液器, 其设计目的是为了解决单储液器LHP在重力场中运行姿态受限的问题, 它的特殊结构决定了其运行特性和单储液器LHP会有所区别. DCC-LHP的运行原理与单储液器LHP运行原理^[1]基本相似, 双储液器的作用是保证任何姿态下对蒸发器内毛细芯的供液. 研究表明^[2~5], LHP在某些条件下运行时会出现亚稳态, 出现温度迟滞、倒流或温度波动等现象, 但目前对于这些现象的描述和研究还并不够充分和详细. 由于环路热管的不稳定现象会给工程应用带来消极影响, 尤其与单储液器LHP相比, DCC-LHP的相关文献还比较少, 因此, 有必要对其进行深入细致的实验研究. 本文将针对DCC-LHP运行中可能会出

现的温度迟滞、倒流和温度波动等不稳定现象进行详细的描述和解释.

1 实验台搭建

本文实验采用的实验件为一套氨-不锈钢双储液器环路热管. 蒸发器和储液器部分由中国空间技术研究院研制, 其结构如图 1 所示, 毛细芯材料为镍粉; 其中的液体引管引入到毛细芯内液体干道的中间位置, 为便于叙述, 无液体引管穿过的储液器为储液器 1, 有液体引管穿过的储液器为储液器 2; 由于只进行地面重力场实验, 储液器和液体干道内未安装副芯. 蒸气、液体管线均为柔韧的不锈钢圆管. 冷凝器为嵌在铝制散热器上的蛇形不锈钢管道, 冷却方式采用风冷冷却. 该套 DCC-LHP 的具体结构参数如表 1 所示.

将电阻加热片贴在蒸发器外壳上, 通过改变加在其上的电压值来模拟不同热载荷的热源; 冷凝器管线嵌在铝制散热器的槽道里, 并使用导热硅脂减少

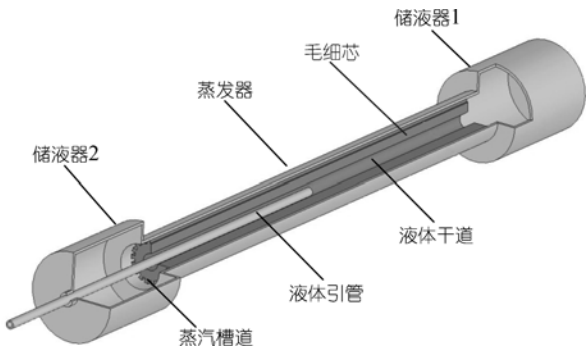


图 1 DCC-LHP 蒸发器和储液器的内部结构

表 1 DCC-LHP 的基本参数

基本部件	参数
蒸发器外径/内径×长度/mm	Φ18/16×190
冷凝器管线外径/内径×长度/mm	Φ3/2×1800
蒸气管线外径/内径×长度/mm	Φ3/2×2500
液体管线外径/内径×长度/mm	Φ3/2×2500
储液器体积/ml	24.7×2
工质充装量/g	42±1
毛细芯最大孔径/μm	1.1
毛细芯孔隙率	58.7%
毛细芯渗透率/m ²	>5×10 ⁻¹⁴
毛细芯外径/内径×长度/mm	16/6×180

接触热阻, 散热器的另一侧装有风扇, 以环境为热沉对冷凝器内工质进行冷却, 风扇用来加强对流换热; 通过方位调节机构来调节 DCC-LHP 的姿态, 由于 DCC-LHP 有 2 个储液器, 因此根据蒸发器、冷凝器和储液器的相对位置关系, DCC-LHP 共有 9 种典型姿态, 如图 2 所示. 各系统部件均用海绵包裹, 以减少和环境的换热. 实验使用铜-康铜(T 型)热电偶温度采集系统记录 DCC-LHP 上特征点的温度变化, 其中在 DCC-LHP 上布置 18 个测点, 第 19 个测点用来采集环境温度, 即本文实验中的热沉温度, 热电偶测点分布见图 3, 以 TC 表示热电偶.

2 实验结果及分析

2.1 温度迟滞现象

温度迟滞是指工况相同的热载荷循环实验中, 环路热管在某一特定热载荷下的工作温度随热载荷递增和递减时不一致的现象. Cheung 等人^[3]曾在一套

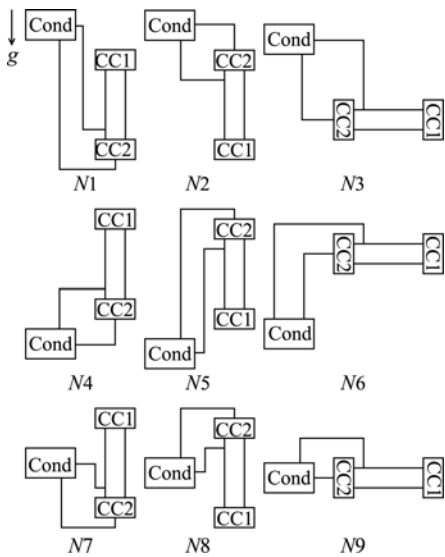


图 2 蒸发器、储液器和冷凝器的位置关系

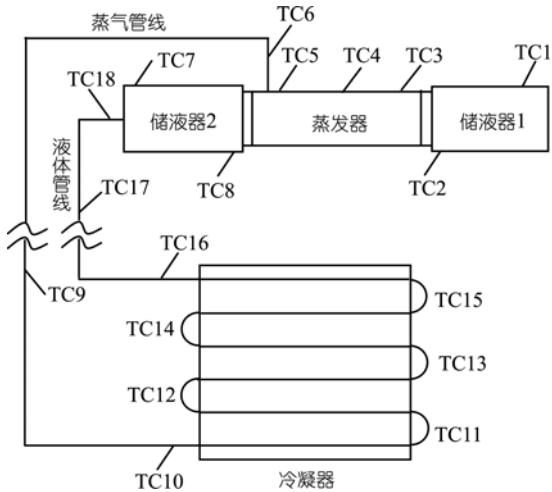


图 3 热电偶测点分布图

单储液器 LHP 的实验中观察到了温度迟滞现象, 发现当热载荷以较小幅度(≤ 100 W)递增和递减时 LHP 的工作温度基本一致, 但热载荷以较大幅度变化时, LHP 在热载荷递减时的工作温度会偏高, Cheung 认为温度偏高的原因是液体回流时携带了一部分蒸气进入液体干道从而导致蒸发器向储液器的漏热增加. 但本文实验发现, DCC-LHP 的温度迟滞现象与单储液器 LHP 的有所区别.

图 4 显示的是 N9 姿态下、环境即热沉温度为 22℃ 时, DCC-LHP 在 20~350 W 的热载荷循环实验中的工作温度随功率递增和递减的变化情况. 为更

为详细的分析问题, 实验共分为 3 组, 分别在不同的启动热载荷和热载荷变化幅度下对 DCC-LHP 的温度迟滞现象进行考察, 每组实验的具体参数总结于表 2.

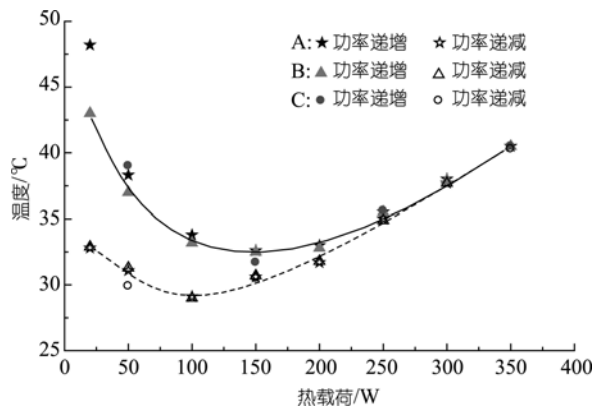


图 4 N9 姿态下 DCC-LHP 的温度迟滞现象

根据图 4 得到的实验结果可以分析出 DCC-LHP 温度迟滞现象的一些特点. 从 A 组和 B 组数据来看, 即使热载荷变化幅度较小(50 W), DCC-LHP 在一定热载荷范围内仍然会出现温度迟滞现象. 如图 4 在热载荷为 20~250 W 范围内, DCC-LHP 随热载荷递减时的工作温度要明显低于随热载荷递增时的温度, 其中 20 W 时的温差达到最大, 约为 10℃; 而当热载荷大于 250 W 时, 温差已变得不明显, DCC-LHP 工作温度的一致性很好. 同时, C 组数据说明当热载荷变化幅度增加到 100 W 时, 实验结果与 A, B 相似, 即热载荷变化幅度对温度迟滞现象的影响并不大. 而 A 组数据中热载荷递增时 20 W 的工作温度明显高于其它两组, 可能是由 5 W 时的启动过热度引起的.

为进一步研究, 调整蒸发器、储液器及冷凝器间

的相互位置, 如图 2 中的 N1, N2, N3 和 N5 所示, 分别进行热载荷范围为 20~350 W、热载荷变化幅度为 50 W 的功率循环测试, 测试结果为图 5~8. 从 4 个实验结果来看, DCC-LHP 在重力辅助姿态(N1, N2, N3)和反重力姿态(N5)下均出现了不同程度的温度迟滞现象, 但出现温度迟滞现象的热载荷范围有所不同, 其中 N2 和 N3 两种姿态仅为 50~250 W, 并且热载荷递减时的工作温度偏低.

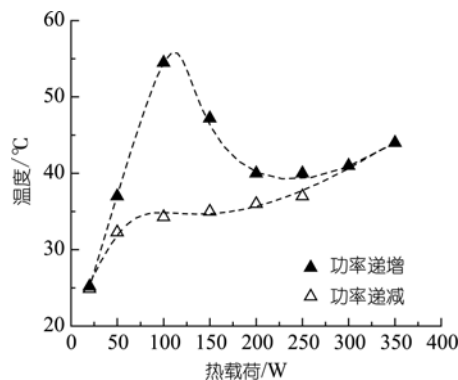


图 5 N1 姿态的温度迟滞

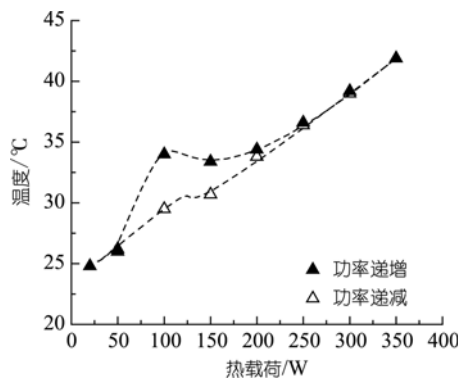


图 6 N2 姿态的温度迟滞

表 2 N9 姿态温度迟滞实验分组

循环序号	启动热载荷/W	热载荷变化幅度/W	热载荷递增或递减	热载荷循环曲线/W
A	5	50	递增	20-50-100-150-200-250-300-350
			递减	(350)-300-250-200-150-100-50-20
B	20	50	递增	20-50-100-150-200-250-300-350
			递减	(350)-300-250-200-150-100-50-20
C	20	100	递增	50-150-250-350
			递减	(350)-250-150-50

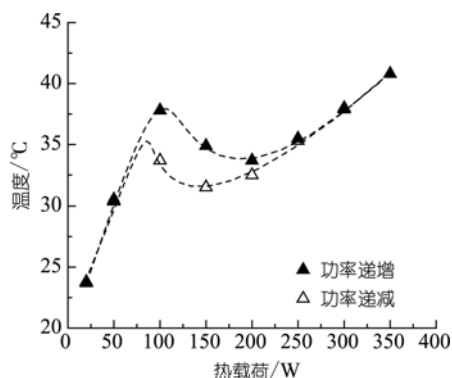


图 7 N3 姿态的温度迟滞

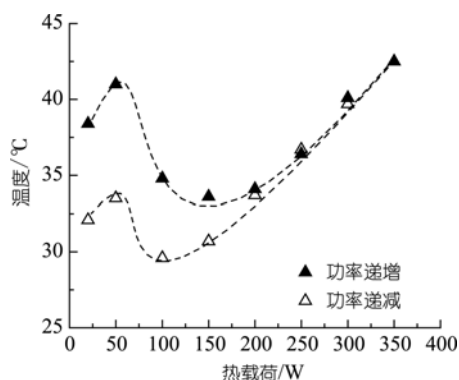


图 8 N5 姿态的温度迟滞

总结以上所有实验结果可以认为: DCC-LHP 在热载荷循环实验中会出现温度迟滞现象, 而且与单储液器 LHP 的现象有所区别. 实验结果同时可以证明 DCC-LHP 所处姿态并不是温度迟滞现象产生的原因, 但可能会导致出现温度迟滞现象的热载荷范围的不同; 而热载荷的变化幅度对工作温度和出现温度迟滞现象的热载荷范围的影响并不大. 出现温度迟滞现象的热载荷区域主要集中在 20~250 W, 并且热载荷递减时的工作温度会低于热载荷递增时的温度. 这主要是因为 DCC-LHP 在小热载荷范围内运行时工作在可变热导区, 其工作温度取决于控温储液器内的能量平衡, 因此, 温度迟滞现象的产生应与 DCC-LHP 控温储液器的能量平衡密切相关. 而热载荷递减时工作温度会偏低的原因还需深入研究, 目前不能确定是否与双储液器的设置有关, 但其中一个原因可能是, 当 DCC-LHP 的热载荷较大时, 其质量流量相应较大, 回流液体对液体干道具有良好的冷却效果, 将使得毛细芯内表面产生蒸气的范围

缩小, 蒸发器同储液器之间的漏热热导减小. 因此, 在相同热载荷条件下, 热载荷由大到小变化过程中蒸发器向储液器的漏热要小于热载荷递增过程中的漏热, 导致了热载荷递减时工作温度的偏低, 即温度迟滞现象的产生与蒸发器向储液器的漏热变化紧密相关, 根本原因在于蒸发器向储液器的漏热迟滞所致. 当热载荷大于 300 W 时温度迟滞现象就会消失, 这是因为热载荷较大时 DCC-LHP 工作在固定热导区, 其工作温度不再取决于储液器内的能量平衡, 而是与冷凝器的有效冷凝面积有关. 由于实际应用中设备的热载荷变化往往是一个交变过程, 有时还具有随机性的特点, 因此温度迟滞现象的研究对于工程应用具有重要的指导意义和参考价值.

2.2 倒流现象

从目前已公开发表的文献来看, 描述 LHP 倒流现象的文章还比较少.

图 9 为 DCC-LHP 在 N5 姿态下某次 5 W 启动实验的温度变化曲线, 启动过程中出现了倒流现象. 如图 9 所示, 蒸发器受热后, 蒸发器出口 TC6 点和储液器 2 上的 TC7, TC8 点温度都并没有马上随着蒸发器上 TC4 点温度的上升而升高, 说明启动前蒸气槽道和液体干道均被液体充满. 约 1 min 后, TC6 点温度仍基本保持不变, 但 TC7 和 TC8 点温度突然开始上升, 说明毛细芯内侧的工质先于外侧工质发生了蒸发, 此时芯内压力高于芯外压力, 这个压差推动液体干道内的工质经由液体引管进入了液体管线逆向运行, 倒流现象开始发生, 表现为储液器 2 入口 TC18 点温度的升高. 一段时间后, 蒸气槽道内的液体达到一定过热度发生核态沸腾产生蒸气, TC6 点温度突然升高, 此时芯外压力瞬间上升, 将储液器 2 入口处的工质压回液体干道, TC18 点温度开始下降, 这时说明系统工质停止倒流并转为正向循环.

文献[2,5]都认为倒流现象产生的前提是蒸气槽道充满液体的小热载荷启动过程, 但本文实验却发现, 在蒸气槽道存在蒸气的小热载荷启动过程中也可能出现倒流现象, 如图 10 所示. 图 10 同样为 N5 姿态下某次 5 W 启动实验的温度变化曲线, 与图 9 所不同的是, 蒸发器受热后, 蒸发器出口 TC6 点温度紧随蒸发器上 TC4 点温度的上升而升高, 这说明启动前

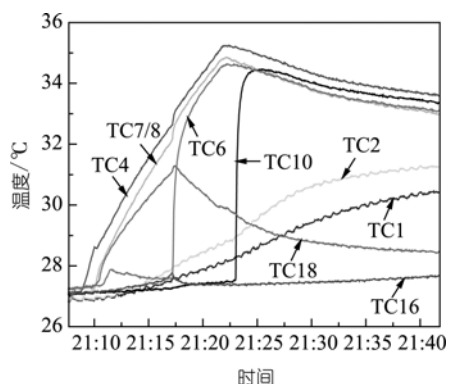


图9 蒸气槽道充满液体时的倒流现象

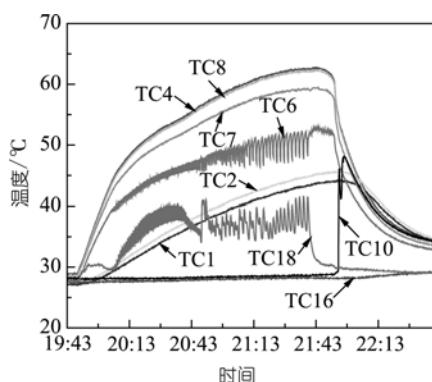


图10 蒸气槽道存在蒸气时的倒流现象

蒸气槽道里已经存在蒸气, 蒸发器一旦受热, 蒸气槽道内的蒸气就会就冲进蒸气管线向冷凝器移动. 但蒸气产生后并没有马上被推入冷凝器, 冷凝器入口 TC10 点温度没有上升, 而储液器 2 入口 TC18 点的温度却突然升高, 而且在很长时间内持续上升并出现波动现象, 这说明液体干道中的工质发生了倒流. 分析储液器 2 的温度变化可以发现, TC7 和 TC8 点的温度紧随蒸发器上 TC4 点温度的上升而升高, 说明启动前液体干道内可能存在蒸气或者毛细芯内附有气泡, 导致蒸发器受热后发生了芯内蒸发. 由于工质的倒流与蒸气的产生几乎同时发生, 因此引起倒流的原因可能是蒸气产生的瞬间穿透了毛细芯或者是启动前液体干道内的气液分布引起的芯内蒸发, 致使毛细芯内侧压力大于外侧压力, 这个压差将液体干道内的工质经由液体引管压入液体管线从而发生倒流. 实际上, 在这种姿态下所做的十几次启动实验中, 有 3 次曾观察到启动前蒸气槽道存在蒸气却出现工质倒流的现象.

2.3 温度波动现象

由于两相流体流动的复杂性和不稳定性, 环路热管在某些条件下运行时会出现温度波动现象, 文献[4,5]曾对单储液器 LHP 冷凝器入口和出口处的温度波动进行了描述和解释, Gluck 等人^[2]也在 DCC-LHP 的实验中观察到了温度波动现象, 但并未进行详细阐述. 本文将针对 DCC-LHP 在启动和运行过程中出现的温度波动现象进行分析.

2.3.1 启动过程中的温度波动

图 11 为 DCC-LHP 处于 N8 姿态下某次 5 W 启动实验的温度变化曲线, 启动过程中蒸发器出口 TC6 点和储液器 2 入口 TC18 点均出现了近 40 min 的较小幅度的温度波动, 图 12 则为温度波动产生前的启动温度曲线.

分析温度波动产生前的启动温度曲线, 如图 12 所示, 蒸发器受热后, 蒸发器出口 TC6 点温度并没有

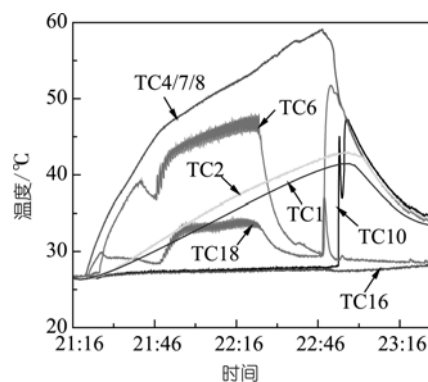


图11 启动过程中的温度波动

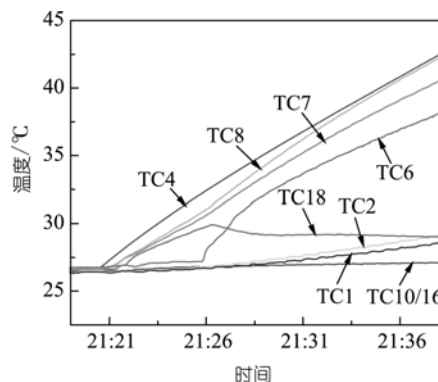


图12 产生温度波动前的温度曲线

马上升高,说明启动前蒸气槽道里充满液体,液体发生核态沸腾需要一定的过热度;而储液器 2 上的 TC7 和 TC8 点温度却紧随蒸发器上 TC4 点温度的上升而升高,这说明液体干道内有工质蒸发,虽然储液器 2 置于蒸发器上方,启动前液体干道应被液体充满,但也可能还存留一些蒸气或者毛细芯内附有气泡,导致蒸发器受热后发生了芯内蒸发,蒸发器向储液器 2 的漏热较大.芯内蒸发使得毛细芯内侧压力升高,芯内压力高于芯外压力,这个压差将液体干道内部分工质经液体引管推入液体管线,TC18 点温度升高出现倒流现象.

一段时间后,如图 11 所示,蒸气槽道内开始有蒸气产生,TC6 温度升高,气液界面逐渐向冷凝器入口移动.但是,由于蒸发器向储液器 2 的漏热很大,蒸发器同储液器之间的温差逐渐减小,根据 Clausis-Clapeyron 方程,它们之间的压差也随之减小,当毛细芯外侧与储液器 2 间的压差不足以将蒸气推入冷凝器时,气液界面就会逆向移动,TC6 点温度降低而 TC18 点温度升高.但蒸气管线又不足以散去加在蒸发器上的热量,于是蒸发器饱和温度上升,蒸发器与储液器 2 间的压差增大,又推动气液界面向冷凝器移动,TC6 点温度升高而 TC18 点温度降低.如此循环,很长一段时间内工质在系统回路中不能建立正向循环而处于来回震荡的状态,表现为 TC6 点和 TC18 点的温度波动.最终,随着回流的过冷液体逐渐进入储液器 2,储液器 2 内工质温度降低,毛细芯两侧压差增大,工质开始正向循环,温度波动消失.

2.3.2 运行过程中的温度波动

实验发现, DCC-LHP 除了在启动过程中会出现温度波动外,在较大热载荷下稳态运行时也可能出现温度波动现象.图 13 为 DCC-LHP 在 N2 姿态下的热载荷递增循环实验时所得到的部分实验结果.其中,当热载荷小于 200 W 时,系统回路上所有测点均未出现温度波动现象;当热载荷增至 250~300 W 时,回路中部分测点出现了不同幅度的温度波动;而热载荷继续增大到 350 W 时,各测点的温度波动幅度逐渐减小或消失.

图 14 为 270 W 热载荷运行时几个测点详细的温度变化曲线,波动比较明显的测点是冷凝器出口

TC16 点和储液器入口 TC18 点,波动幅度均约为 2℃,而其它测点温度的波动幅度都比较小. TC16 点和 TC18 点的温度波动基本反映的是工质在系统回路中来回震荡的情况: TC16 点升至波峰的过程,说明系统内工质正向运行,气液界面不断向冷凝器出口推进,温度较高的工质逐渐占据冷凝器出口,由于正向循环, TC18 点温度在不断降低;而 TC16 点从波峰降至波谷的过程,说明工质开始由正向运行转为逆向运行,气液界面退回到冷凝器内部,过冷液逐渐占据冷凝器出口,而由于液体干道内轻微的倒流现象, TC18 点温度会稍微升高.

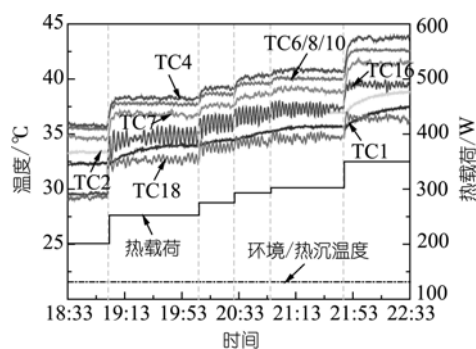


图 13 亚稳态运行过程中出现温度波动的区域

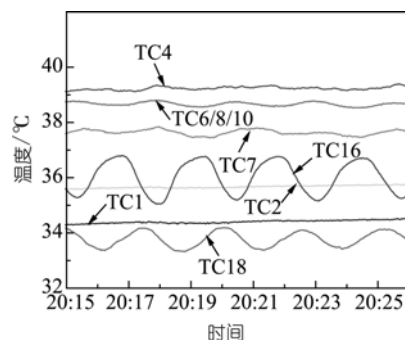


图 14 270 W 热载荷下的温度波动

值得注意的是,从已做过的如图 2 所示的全部 9 种姿态的热载荷循环实验来看,在环境/热沉温度一致的前提下,只有当有液体引管穿过的储液器位于蒸发器上方(图 2 中的 N2, N5 和 N8)时,才会在一定热载荷范围内观察到这种大热载荷下亚稳态运行时的温度波动现象,出现温度波动的热载荷范围约为 250~350 W,而其它姿态均未出现此现象.而且,与启动过程中观察到的温度波动现象所不同的是,启

动过程中的温度波动往往会随着系统逐渐过渡到稳定状态而消失,但在大热载荷情况下,只要不改变热载荷的大小,DCC-LHP 将会维持这种温度波动以亚稳定的状态一直运行下去。

这种温度波动现象产生的原因还并不十分明确,文献[5]认为与工质充装量和储液器的匹配有关,本文则认为也可能是由蒸发器内部气液两相流的不稳定性引起的。相关实验研究表明^[6,7],气液两相流的不稳定性与热载荷、系统压力、质量流速和过冷度等多种因素有关。对于DCC-LHP,工质在蒸发器和储液器内部以两相状态存在,随着热载荷、回流液体质量流速及过冷度的变化,工质受到扰动不断增强,逐渐会出现一定频率的振动。这种振动对管壁温度影响并不大,因此大多数测点并未出现温度波动或者波动很小;但这种振动会引起毛细芯两侧压力的剧烈脉动,使得冷凝器内的气液界面也随之产生大幅度脉动,因此,TC16 点和TC18 点会出现温度波动。至于只有当储液器 2 位于蒸发器上方时才会观察到温度波动,可能是因为这种姿态下重力场和液体回流的速度场一致从而强化了扰动效果所致。

在实际工程应用中,当某些设备要求精密控温时,温度波动的出现十分有害,因此,研究温度波动的产生机理是非常必要和有意义的。

3 结论

本文对双储液器环路热管在运行过程中可能出现的温度迟滞、倒流和温度波动现象分别进行了描述和分析。根据实验数据和理论分析可以得到以下结论。

(1) DCC-LHP 在不同姿态下均会出现温度迟滞现象,不同的姿态导致其出现温度迟滞现象的热载荷范围和程度有所不同。

(2) 温度迟滞现象出现的区域集中在较小热载荷,并且热载荷递减时的工作温度会低于热载荷递增时的值;当热载荷较大时,温度迟滞现象消失。当 DCC-LHP 以小热载荷启动,可能加剧温度迟滞现象;而热载荷递变幅度对温度迟滞现象不存在明显的影响。

(3) 倒流现象多发生在小热载荷的启动过程中。启动前蒸气槽道不一定要被液体充满,在蒸气槽道存在蒸气的小热载荷启动过程中也可能发生工质倒流。

(4) DCC-LHP 在启动或者亚稳态运行过程中均可能出现温度波动现象,实际上反映了工质在系统回路中的震荡过程,可能由气液两相传热与流动过程的不稳定性所致。

参考文献

- 1 Ku J. Operating characteristics of loop heat pipes. SAE Paper No. 1999-01-2007, 1999
- 2 Gluck D F, Gerhart C, Stanley S. Characterization of a high capacity, dual compensation chamber loop heat pipe. STAIF Paper, 1999
- 3 Cheung K H, Hoang T T, Ku J, et al. Thermal performance and operational characteristics of loop heat pipe (NRL LHP). SAE Paper NO.981813, 1998
- 4 Kaya T, Ku J. Performance characteristics of a terrestrial loop heat pipe. AIAA paper No.2000-0966, 2000
- 5 张红星. 环路热管两相传热技术的理论与实验研究. 博士学位论文. 北京: 北京航空航天大学航空科学与工程学院, 2006. 113—122
- 6 郑宗和, 翁志刚, 刘远军, 等. 汽液两相流不稳定性实验研究. 天津大学学报, 1999, 32(5): 625—628
- 7 李会雄, 汪斌, 陈听宽. 垂直并联多通道内高温高压汽-水两相流密度波形不稳定性的实验研究. 动力工程, 2005, 25(1): 55—59