

# 小型 CPL 启动与运行特性的实验研究\*

李 强 陈小波 钱吉裕 宣益民

南京理工大学动力工程学院, 南京 210094

**摘要** 研制了蒸发器外径为 11 mm 的小型 CPL, 实验测试了系统的启动性能与稳态运行特征. 实验结果显示, 小型 CPL 在不同加热功率条件下均可正常启动, 可在加热负荷突然变化的条件下正常运行, 显示出小型 CPL 具有优良的运行特征. 另外, 实验表明储液器设定温度的突然改变、工质充灌量的不足对小型 CPL 的正常启动有不利影响.

**关键词** CPL 毛细蒸发器 启动

两相毛细泵抽吸回路 (capillary pumped loop, 简称 CPL) 是一种新型的热控元件, 其利用工质在蒸发器的毛细芯内部形成的汽液分界弯月面, 产生毛细抽吸力, 推动工质在整个环路中的循环, 实现热量传输的目的. 与传统的热控制系统相比, 具有不需附加动力、传输距离远、传热功率大、高传导性、高等温性等优点, 可广泛应用于卫星、航天器热控及电子元件冷却领域, 应用前景极为广阔.

早期研制的 CPL 主要应用于千瓦级的高传热功率场合, 蒸发器尺寸一般在 20 mm 以上 (圆柱型蒸发器), 但随着微小型航天器的研制需求的日益增长和 CPL 向电子器件冷却领域的拓展, 研制蒸发器外径在 12 mm 以内的小型 CPL 已成为 CPL 技术的研究趋势与热点<sup>[1,2]</sup>. 虽然与常规尺寸 CPL 相比, 小型 CPL 的工作原理、结构等没有大的差别, 但由于小型 CPL 的部件尺寸降低, 还存在许多技术问题需要去研究解决. 例如: (1) 小型 CPL 蒸发器内毛细芯的尺寸小, 厚度薄, 由于 CPL 启动时蒸发器的蒸气侧压力较大, 极易压迫蒸气穿过毛细芯到达液体通道内, 阻碍液体正常充灌毛细芯, 引起系统启动失败. 因此, 研究小型 CPL 启动特性非常关键; (2) 与传统大尺寸的 CPL 系统相比, 由于小型 CPL 系统的尺寸显著降低, 工质在系统内的流动、传热

性能可能发生较大改变, 特别是在小型 CPL 的薄层毛细芯内维持正常的蒸发相变过程将变得困难, 这些问题将严重影响小型 CPL 系统的稳态运行特性, 需要进一步深入研究; (3) 研制高性能的小尺寸烧结毛细芯、毛细芯与小尺寸壳体装配、系统焊接等微小型 CPL 系统研制工艺将是另一个有难度的技术问题. 因此, 需要进一步深入开展小型 CPL 启动与运行特性的研究.

基于以上分析, 本文的目的在于研制小型 CPL, 实验测试小型 CPL 的运行性能, 分析不同加热功率、储液器温度变化、工质充灌量以及加热功率变化等因素对小型 CPL 启动性能与稳态运行特征的影响.

## 1 小型 CPL 及其测试系统

### 1.1 小型 CPL 研制

表 1 给出了小型 CPL 的结构尺寸特征, 具体描述如下:

(1) 圆柱形蒸发器的外径为 11 mm, 12 个轴向蒸气槽道采用线切割加工在蒸发器不锈钢壳体上, 蒸发器内径指壳体上两个相对的不锈钢齿顶的间距, 其与烧结毛细芯的外径相匹配 (蒸发器截面结

2006-01-13 收稿, 2006-03-02 收修改稿

\* 国家自然科学基金 (批准号: 50576038) 和南京理工大学青年学者基金 (批准号: Njust200402) 资助项目

E-mail: liqiang@mail.njust.edu.cn

构如图1所示)。

表1 小型CPL的结构特征

蒸发器		液体、蒸汽管路	
长度/mm	92	外径/内径/mm	3.0/2.0
有效长度/mm	72	长度/mm	3000
外径/内径/mm	11.0/6.6	材料	不锈钢(316 L)
蒸气槽道数/个	12	储液器	
槽道高/宽	1.2/(1.5/1.0)	外径/内径/mm	26/24
(上/下)/mm		容积/cm <sup>3</sup>	40
材料	不锈钢(316 L)	材料	不锈钢(316 L)
毛细芯		冷凝器	
平均孔径/ $\mu\text{m}$	3.8	外径/内径/mm	3.0/2.0
渗透率/ $\text{m}^2$	$10^{-13}$	长度/mm	1671
孔隙率/%	68	材料	不锈钢(316 L)
外径/内径/mm	6.6/3.0		
材料	镍粉		

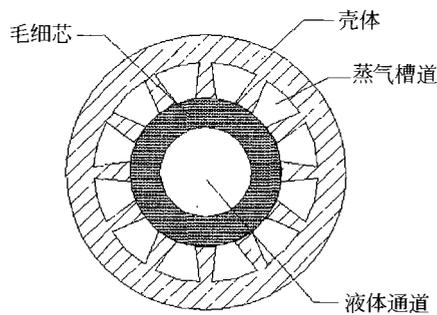


图1 蒸发器截面图

(2) 小型CPL的毛细芯由粒径 $2.6\ \mu\text{m}$ 的碳基镍粉烧结而成<sup>[3]</sup>, 经过简单的机加工处理后采用热胀法装配于蒸发器壳体内。

(3) 为了满足小型CPL的灵活性(柔性)要求, 液体、蒸汽管路采用 $\phi 3\ \text{mm}$ 的不锈钢管。

(4) 储液器的功能在于设定CPL的运行温度以

及储存(或补充)CPL运行时多余(或额外)的工质。因此, 储液器的体积必须能够适应CPL工作状态变化时的工质体积变化。另外, 储液器出口衬有200目的不锈钢丝网, 以阻止汽泡进入环路。

(5) 冷凝器用 $\phi 3\ \text{mm}$ 的不锈钢管弯成蛇型, 钎焊于铝板上。

(6) 小型CPL的工质是纯度为99.99%的液氨, 整个系统除毛细芯外全部采用316 L不锈钢材料, 确保与氨工质相容。

小型CPL各部件加工完成后, 经过严格清洗后用微速等离子体焊接, 然后采用高真空机组将系统内压力抽至小于 $6 \times 10^{-3}\ \text{Pa}$ , 即可充灌工质, 完成小型CPL的研制。

## 1.2 小型CPL测试系统

图2给出了小型CPL测试系统中热电偶温度测点的布置图, 用于测量小型CPL运行时各部位温度变化, 测试前所有镍铬—镍硅热电偶通过二等精度温度计标定, 其不确定性小于 $0.5\ ^\circ\text{C}$ , 温度信号通过HP34970A型数据采集器自动采集。由于测量部件内工质温度存在困难, 所以热电偶均布置在小型CPL部件外壁上, 由于管壁很薄且包裹了绝热层, 将壁面温度视为工质温度不会影响进行定性的实验分析。

小型CPL的蒸发器、储液器外各贴覆 $30\ \Omega$ 的薄膜电阻, 外接直流稳压电源给部件加热。另外, 储液器采用XMT6000型温控仪进行控温, 控温误差为输入量程的 $\pm 1.0\%$ 。冷凝器放置在冷板上以冷凝气态工质。为了消除热量向环境散热, 小型CPL系统外包装橡塑NBR/PVC发泡保温材料。

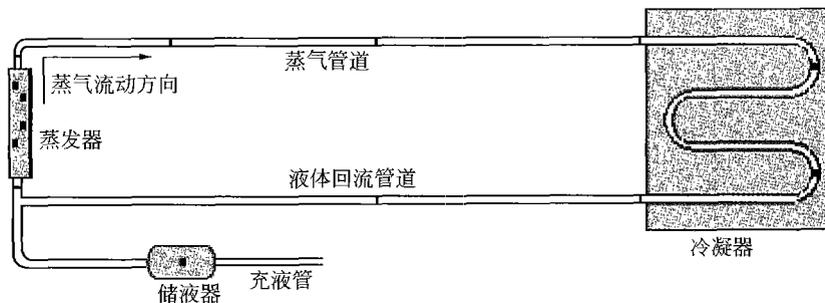


图2 小型CPL性能测试系统温度测点

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 不同加热功率条件下小型 CPL 的启动特性

快速、简单、可靠的启动性能是一个先进的小型 CPL 系统应具备的基本特性之一,对于小型 CPL 来说,要达到上述指标难度更大,其主要原因在于:为了确保 CPL 启动前毛细芯完全润湿,液态工质必须全部充满整个 CPL 系统,这就要求当启动 CPL 时蒸发器内的工质蒸发相变初期存在一定的过热度,一旦相变过程开始,蒸发器内过热的液态工质便迅速闪蒸为气体,同时引起蒸发器内气侧压力突然升高,大量的气体会堵塞毛细孔甚至由于气侧压力过高使得气体穿过芯层到达毛细芯的液体通道,阻碍液体正常灌注,无法保证蒸发过程的正常进行,导致 CPL 失效<sup>[4]</sup>. 由于小型 CPL 尺寸的限制,相比较常规尺寸的 CPL,小型 CPL 毛细芯的厚度薄,在启动时蒸发器突然升高的气侧压力更容易压迫气态工质穿过芯层到达毛细芯的液体通道,阻碍液体正常灌注,导致 CPL 启动失败. 因此,必须进行小型 CPL 启动性能的测试.

图 3 显示了蒸发器加热功率 20 W、储液器设定温度 318 K 条件下小型 CPL 启动过程特征部位温度随时间的变化过程. 试验结果显示,接通蒸发器上的加热电阻膜片后,蒸发器温度开始上升,由于热量沿管道轴向传导的作用以及蒸发器中液体工质受热后流向其入口和出口的原因,蒸发器入口和出口

的温度也随之上升. 约 6 min 后蒸发器和蒸发器出口处温度突然大幅度阶跃上升,表明有部分液体工质达到饱和温度开始发生相变产生蒸气. 11 min 时蒸发器温度达到储液器设定温度 318 K,蒸发器蒸气槽道内的液体工质全部变为蒸气,由于蒸发器出口处尚有部分液态工质,蒸发器出口处温度还未达到 318 K,此时蒸发器中的蒸气在蒸气槽道中继续受热,温度进一步升高. 当时间达到 14 min 时,蒸发器出口处被蒸气充满,蒸发器出口处温度达到储液器设定温度 318 K. 紧接着冷凝器入口温度也突然上升,说明蒸气开始流入冷凝器. 此后,蒸发器及其出口温度基本不变,蒸发器入口处温度也在很小的范围内略有脉动,这是由于轴向导热和其中不断流向蒸发器的过冷液两方面因素相互作用而导致的. 到此,工质开始循环,小型 CPL 启动成功.

与大功率启动相比较而言,小型 CPL 主要应用于小热负荷场合,当蒸发器承载的热负荷很小时,小型 CPL 可能不易成功启动,其原因可能是由于小热负荷不足以使蒸发器蒸气槽道的液态工质在发生核态沸腾后很快流出蒸发器以驱动工质循环,加热热量逐渐透过毛细芯,使得毛细芯及液体通道中的温度缓慢的升高,导致相变在毛细芯内壁上发生,从而阻塞液体通道,最终导致启动失败<sup>[5]</sup>. 基于此,本文测试了蒸发器加热功率 7 W、储液器设定温度 315 K 条件下小型 CPL 的启动性能.

如图 4 所示,在加载热负荷后,小型 CPL 的蒸发器及其出口处温度逐渐升高,达到储液器设定温度 315 K 后,蒸发器及其出口温度基本不变,工质开始循环,小型 CPL 启动成功. 对比 20 W 启动过程,可以看出小功率条件下小型 CPL 的启动过程有以下特点:(1)启动后蒸发器运行温度非常接近储液器设定温度 315 K,而 20 W 功率时小型 CPL 蒸发器稳定运行温度超过了储液器设定温度 318 K;(2)7 W 功率时小型 CPL 启动过程耗时约 18 min,比 20 W 启动时间长;(3)7 W 功率启动过程中,冷凝器入口温度基本不变,这可能是小功率条件下 CPL 产生的蒸气量少,由于管道漏热,蒸气工质在蒸气管道中已发生冷凝所致. 因此,实验显示当蒸发器加热热负荷较小时,小型 CPL 表现出了更强的控温能力,但启动时间有所增加.

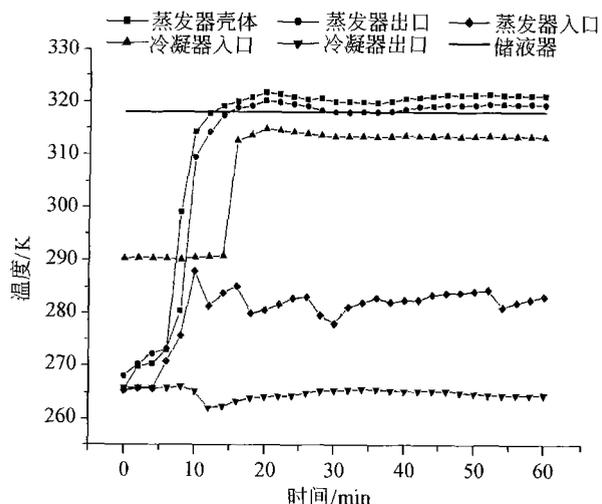


图 3 小型 CPL 启动过程的温度-时间曲线 (20 W)

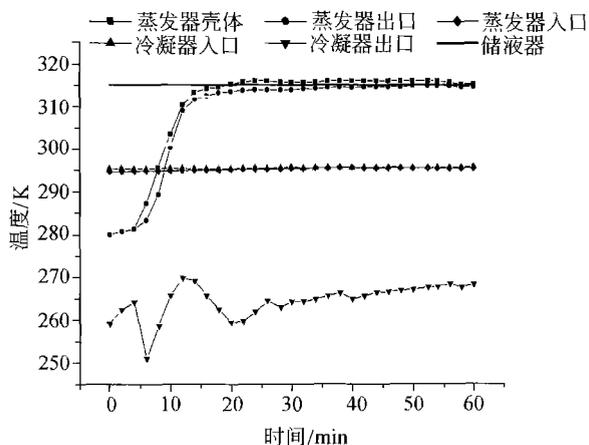


图4 小型CPL启动过程的温度-时间曲线(7W)

### 2.2 储液器温度变化对小型CPL启动性能的影响

储液器的温度变化将引起蒸发器运行温度改变,进而引起CPL系统压力波动,这是影响系统是否成功启动的关键因素之一,图5给出了储液器设定温度变化对小型CPL启动性能影响的测试结果.实验开始时储液器温度用控温仪控制在313 K,给蒸发器加热负荷后,小型CPL呈现启动迹象,6 min左右蒸发器温度达到设定温度并保持稳定,蒸发器出口及第一个蒸气管道测温点处随之先后发生温度阶跃现象,说明蒸气已经产生且气液界面已经逐步向冷凝器方向移动.在8 min左右,关掉控温仪采用强制冷却措施对储液器降温,发现蒸发器及其出口处温度开始降低,蒸发器内蒸气压力降低以维持与储液器内压力保持平衡.同时第一个蒸气管

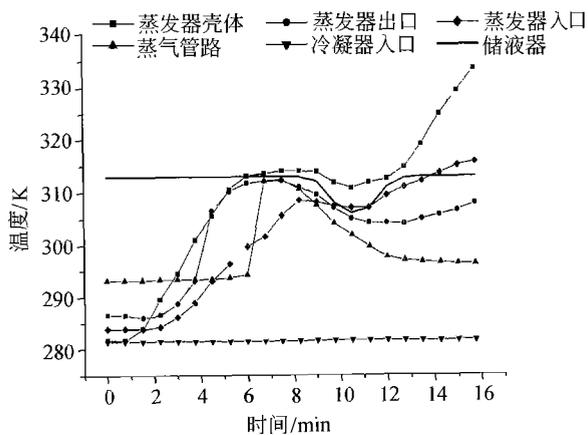


图5 储液器温度变化对小型CPL启动性能的影响

道测温点的温度也开始下降,表明汽液界面开始逐渐向蒸发器方向回退.11 min时重新对储液器加热控温,储液器温度上升,压力提高,压迫工质进入蒸发器,随后蒸发器温度又重新上升.13 min时储液器温度重新控制在313 K,但蒸发器温度会继续上升,且蒸发器入口温度也开始大幅上升,表明工质相变已在蒸发器液体通道侧发生,阻碍了液态工质补充到毛细芯内,毛细芯逐渐烧干,小型CPL启动失败.因此,试验结果表明储液器温度变化将引起小型CPL启动时温度及压力的波动,实际运行中应尽量保证储液器温度的恒定性.

### 2.3 工质充灌量对小型CPL启动性能的影响

如前所述,为了确保CPL启动前毛细芯完全润湿,液态工质必须全部充满整个CPL环路,充液量不足可能使环路并未充满了液态工质,有很多气态工质分布在其中,当加载热负荷后,将直接导致毛细芯的供液不足,使之逐步烧干,引起CPL启动失败.

为了验证充液量不足对CPL系统启动性能的影响,实验中将氨工质充灌量从前面试验的64%减小至29%(CPL系统总容积的百分比),系统设定温度为318 K,蒸发器加热功率为7 W.为了使蒸发器在启动前尽可能地被液态工质完全润湿,采用干冰对蒸发器冷敷,使其温度处于CPL系统最低处,将蒸发器内工质全部冷凝.此种工况下的CPL启动过程如图6所示,当开始对蒸发器加热以后,蒸发器及其出入口温度均开始上升.当蒸发器温度超过相变

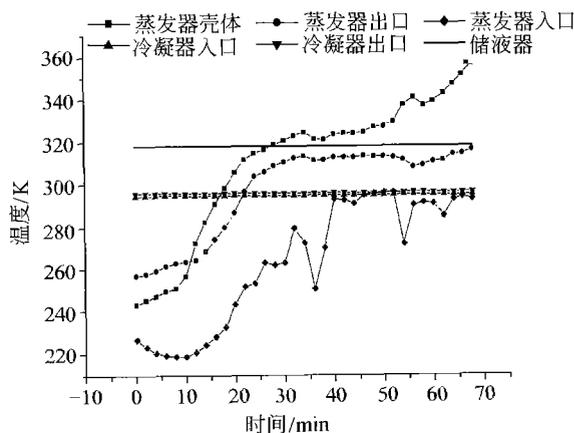


图6 低工质充灌量对小型CPL启动性能的影响

温度之后,在较短的时间内其温度曲线略有趋平,但很快又开始上升,蒸发器出口温度曲线与之相似,冷凝器处温度几乎没有变动,蒸发器入口处温度在开始的上升阶段之后出现了大幅度的波动,小型CPL启动失败.以上现象的原因是:由于充液量不足,蒸发器在产生了少量的蒸气之后便逐渐烧干,温度曲线趋平段是蒸气产生过程,随后温度上升是其烧干过程.因此,保证合适的工质充灌量是必要的.

#### 2.4 热负荷变化对小型CPL运行性能的影响

小型CPL作为一种控温元件,其热源的发热功率往往是不断变化的,CPL对突然变化热负荷的控制能力是重要研究问题.为此,进行了小型CPL热负荷变化实验测试.

如图7所示,加热功率依次为15,25,30,20,35W.从试验结果可以看出,随着加热功率的变化,CPL快速响应,蒸发器温度出现轻微波动后

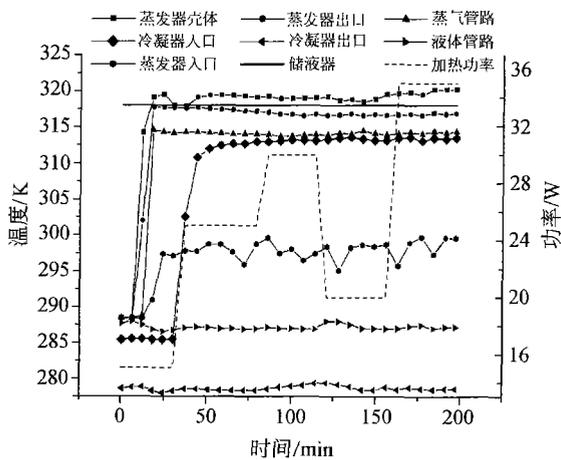


图7 热负荷变化对小型CPL运行性能的影响

随即稳定,即使热负荷改变也未引起蒸发器温度大的变化,实验中未发现工质在毛细芯内的充灌失败的趋势,显示出小型CPL对变化热负荷具有较高的适应能力.

### 3 结论

(1) 研制了圆柱形蒸发器的小型CPL,蒸发器外径为11mm,内含平均孔径 $3.8\mu\text{m}$ 的烧结镍粉毛细芯,直径3.0mm的液体、蒸气管路可以满足小型CPL的柔性要求,小型CPL的工质是纯度为99.99%的液氨.

(2) 实验测试了系统的启动性能与稳态运行特征.实验结果显示,即使在7W的小加热功率条件下小型CPL也可正常启动.当加热负荷突然变化时,小型CPL可快速响应,蒸发器温度出现轻微波动后随即稳定,系统可以正常运行,显示出小型CPL对变化热负荷具有较高的适应能力.另外,实验发现储液器设定温度的突然改变、工质充灌量的不足对小型CPL的正常启动有不利影响.

### 参考文献

- 1 Jentung Ku. Recent advances in capillary pumped loop technology. AIAA Paper 97-3870, 1997
- 2 Tarik Kaya, Jentung Ku. Experimental investigation of performance characteristics of small loop heat pipes. AIAA 2003-1038, 2003
- 3 李强,宣益民,陈小波.小型CPL用高性能烧结毛细芯的研制.粉末冶金技术,2005,23(5):330-333
- 4 Cullimore B. Start-up transient in capillary pumped loop. AIAA Paper 91-1374, 1991
- 5 Maydanik Y F, Solodovnik N, Fershtater Y G. Investigation of dynamic and stationary characteristics of a loop heat pipe. in: Proc of 9th International Heat Pipe Conference, Albuquerque, 1995