

回路热管的模拟及优化设计

莫冬传，吕树申*

(中山大学化学与化学工程学院，广州，510275)

摘要: 本文致力于设计出以水为工质、传热量 200W 以上的小型回路热管, 并应用 SINDA/FLUINT 对其进行模拟。主要研究回路热管的各种参数对其传热性能的影响并进行优化, 模拟的结果显示优化后的回路热管有着更优异的传热性能。

关键词: 回路热管, SINDA/FLUINT, 模拟, 优化

一、前言

伴随着科技的迅速发展, 许多电子产品有着小型化、精致化的趋势, 但由于对性能要求越来越高, 相对使用的功率必定也越来越高。这样, 电子组件表面的发热密度将迅猛增加, 相应的热处理问题就变得十分尖锐。比较典型的此类电子组件有计算机 CPU, VGA, 南北桥芯片组或通讯组件 PA 等。如何在有限的空间解决这类散热问题, 确保电子产品的正常操作成为了急需解决的关键技术问题和商业化需求。

回路热管(Loop Heat Pipe, LHP)是由俄罗斯科学家 Yu.F.Maidanik 教授所发明的一种传热装置。它利用蒸发器内的毛细芯产生的毛细力驱动回路运行, 利用工质的蒸发和冷凝来传递热量, 因此能够在小温差、长距离的情况下传递大量的热量, 是一种高效的两相传热装置。

由于回路热管有着良好的传热性能, 回路热管在航天航空方面应用比较广泛, 技术也比较成熟, 但目前回路热管有着造价昂贵, 装置庞大等缺点, 使它的应用也主要是在航天航空方面^[1]。如何将回路热管进行小型化, 廉价化, 从而广泛适用于民用, 特别是电子芯片冷却方面^{[2][3][4]}, 这是我们进行探讨的目的。

文献提及回路热管传热性能的评价主要有四个指标, 最低启动功率, 最高运行功率, 稳定操作温度以及回路的热阻。^{[3][5]}其中稳定操作温度指蒸发器壁面在某一特定功率下稳定操作时的温度。我们认为这是评价用来电子芯片散热的回路热管的最重要的参数。因为稳定操作温度的高低直接影响着电子芯片的工作性能。本文的优化设计将以此为准则。

本研究用到了一个软件----SINDA/FLUINT。该软件是由美国C&R公司开发的一个应用于复杂系统热设计分析和流体流动分析的综合性有限差分、集总参数(回路与网络类型)软件。应用领域包括航空航天、电子、石油化工、生物医药、汽车等, 在全世界有超过 25 个国家、

500 多个部门使用此软件。多年来，SINDA/FLUINT软件已经在航空航天业界提供给用户最可靠的传热与流体流动设计分析，为NASA(美国航天航空局)指定的热设计分析和流体流动分析软件。[6]

本研究的最终目的是要开发出适用于发热量大的电子芯片的散热用的回路热管，使用的工质为水，材料主要为铜，最大功率达到 200W 以上，电子芯片的工作温度不能超过 85℃，同时设计出来的回路热管在尺寸方面尽量小。

二、物理模型

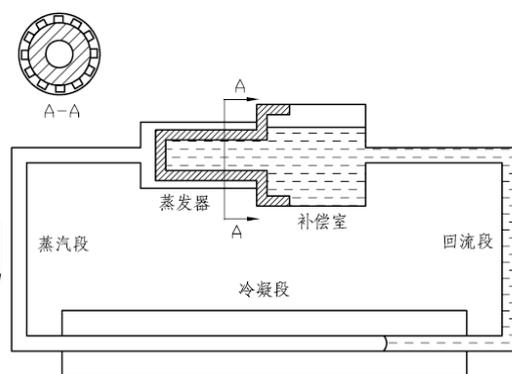


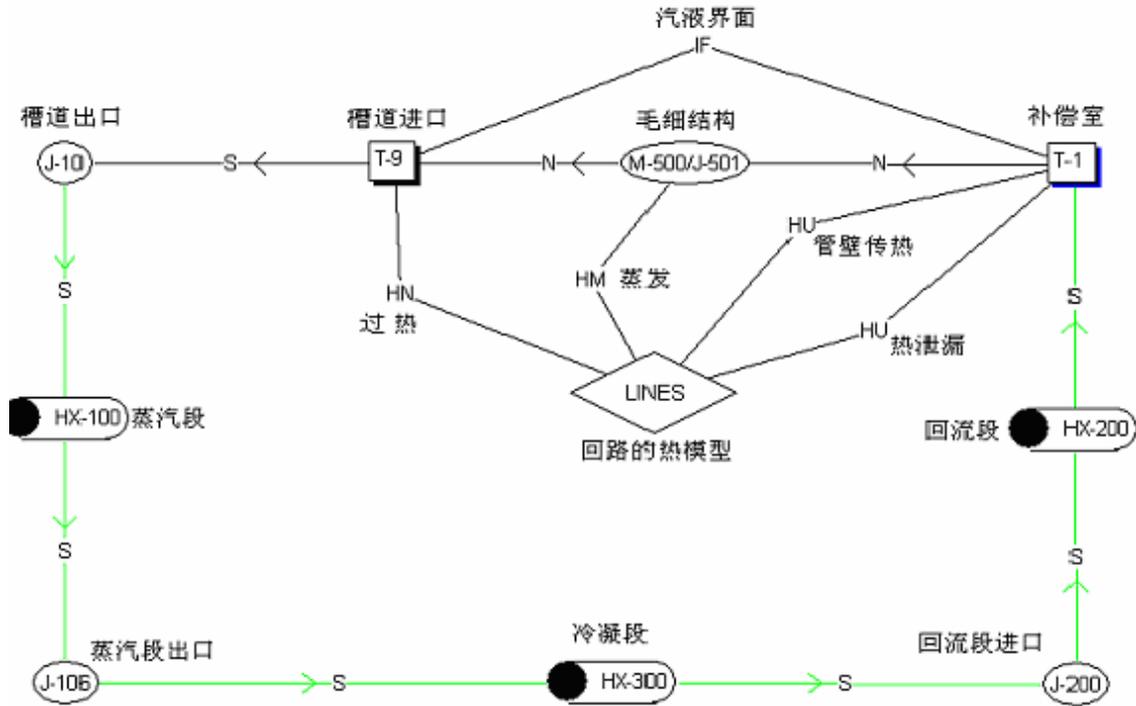
图 I 回路热管的示意图

回路热管由蒸发器、蒸汽段、冷凝器、回流段、补偿室五个部分组成，如图 I 所示。其中，在蒸发器内部有一组毛细结构(Wick Structure)。在蒸发器内壁或者毛细结构上有许多蒸汽槽道，如图 I 的 A-A 截面所示。其基本的工作原理是：毛细结构本身可以将液态往上吸，使得毛细结构充满工质液体，而当蒸发器被加热时，毛细结构也被加热，毛细结构中的液体便会蒸发成气体，并通过蒸汽槽道沿着蒸汽段到冷凝段，同时带走了热量；而在冷凝段中，气体被冷凝成了液体，释放出潜热；而毛细结构的毛细力再使液体沿着回流段回流到补偿室，并到达毛细结构。如此形成了一个工质的流动循环和热量传递过程。补偿室的作用主要是启动的时候容纳在蒸汽段和冷凝段的液体，并且在运行时防止液体来不及回流造成蒸发器干涸。

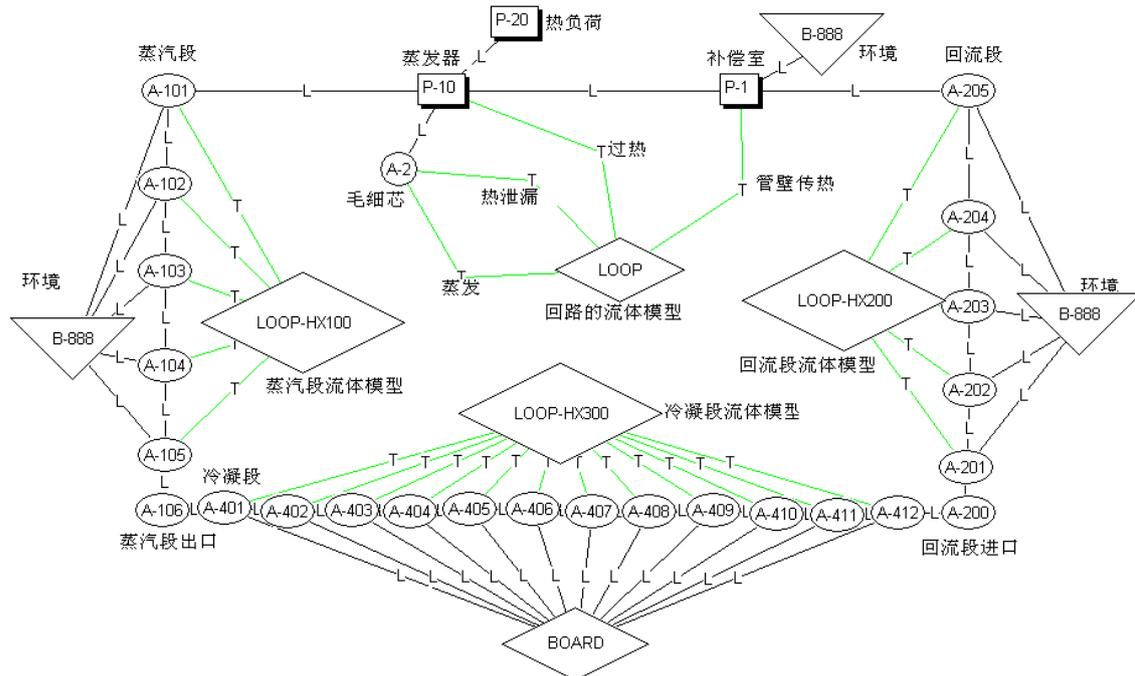
三、数学模型

在这个模型中，补偿室和蒸汽槽道的体积都用tanks来建模，环路中的其它部分用junctions和connectors来模拟。模拟补偿室的tank在每一步求解过程中通过HLDLMP来保持在所给定的状态，其中HLDLMP的作用是使lump表现为plenum。然后，体系的压力在稳态求解结束时调整到使整个环路都处于能量平衡。当然，这包括计算不平衡的能量，然后朝最终解的方向改变压力。[7]其它的控制语句都是在这个基础上实现。最后得到的模型的直观图如图 II 和图 III

所示。其中图II为主要的流体模型，图III为主要的热模型。



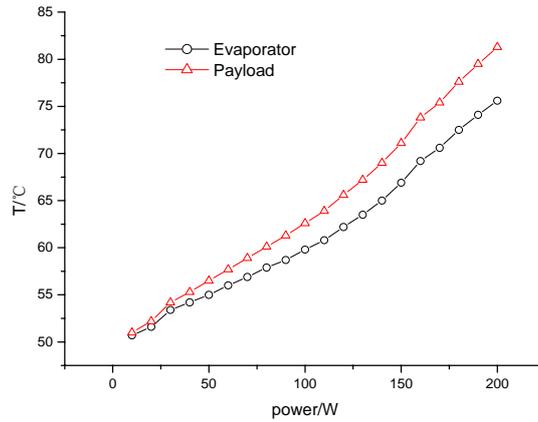
图II 模型的主要流体模型



图III 模型的主要热模型

我们计算了不同功率下回路热管负荷端和蒸发器壁的温度，得到如图IV所示的曲线。由图可见，负荷端和蒸发器壁的温度都在随着功率的增大而增大，近似线性上升。在 150W 时，蒸发器壁的温度为 66.9℃，负荷端的温度为 71.1℃。在 200W 时，蒸发器壁的温度为 75.6℃，负荷端的温度为 81.3℃。在这个温度下，绝大多数电子芯片仍然是处于正常工作状态，体现

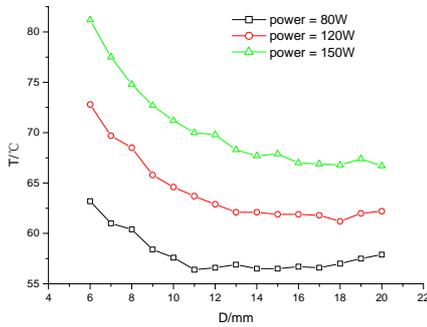
了回路热管在热量传递方面的优异性能。



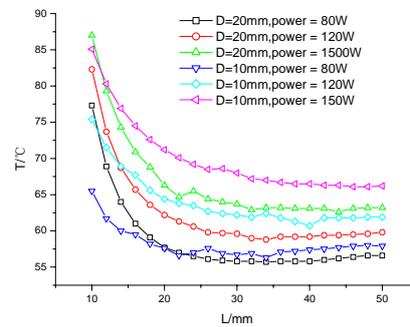
图IV 不同功率下负荷端和蒸发器的壁温

四、优化设计

在初步模拟的基础上，我们进一步讨论了回路热管的各种参数对其传热性能的影响。在此只讨论蒸发器的直径和长度的影响，如图V和图VI所示。其中的D为蒸发器的外径，L为蒸发器的长度，T为蒸发器的壁温。



图V 蒸发器直径对蒸发器壁面温度的影响



图VI 蒸发器长度对蒸发器壁面温度的影响

由图V可见，在80W时候，蒸发器的温度随着蒸发器直径的增大先较快地减小，然后较为平缓地有所增大。在120W和150W时也可以观察到类似现象。在开始的时候，蒸发器的直径增大可以增大受热面积，热流密度下降，从而使蒸发器的温度下降。但随着蒸发器直径增大后，吸液芯的直径也随之增大，从吸液芯外壁到内壁的热阻减小，热泄漏将增大，从而导致温度回升。

由图VI可见，随着蒸发器的长度在增大，蒸发器的温度先迅速下降后平缓上升。这是两方面作用的效果。一方面，随着蒸发器长度增大，同一功率下蒸发器的热流密度将下降，从而使蒸发器的温度下降。另一方面，蒸发器的长度增大，槽道的长度也在增大，则蒸汽在槽

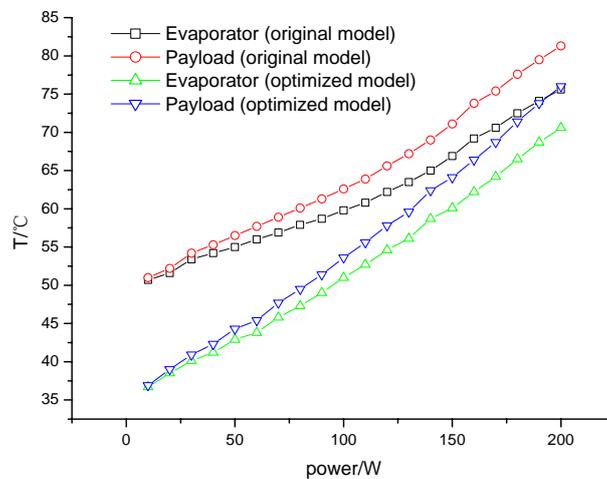
道内的压降更大，流动更为困难，导致蒸发效率下降，从而使蒸发器的温度上升。

根据上面的讨论，结合各方面因素的考虑，提出优化模型。优化模型与初始模型的改动之处如表 I 所示：

表 I 优化模型与初始模型的参数对比：

	初始模型	优化模型
蒸发器长度/mm	20	25
蒸发器直径/mm	20	15

经过优化后，蒸发器的体积减少了 30%。我们再来考察一下优化后模型的传热性能。



图VII 优化模型和初始模型在不同功率下负荷端和蒸发器壁的温度对比

我们首先关心的是优化后的模型能不能显著改善负荷端和蒸发器壁的温度。从图VII可见，优化模型负荷端和蒸发器壁的温度都比初始模型有了很大的下降。在 10W 启动时，优化模型负荷端和蒸发器壁的温度比初始模型下降了大约 15℃。而在 200W 全速工作时，优化模型负荷端和蒸发器壁的温度都比初始模型下降了大约 5℃。200W 时，优化模型的负荷端温度只有 76℃，比最高上限 85℃要低 9℃，这在安全工作的范围内。

五、结论

本文研究尝试研制最大传热量 200W 以上的回路热管，要求该回路热管可以用在电子芯片冷却方面，故要求蒸发器的壁温不能超过 85℃。我们首先用 SINDA/FLUINT 对回路热管进行了模拟，然后再对回路热管进行优化设计。由模拟的结果，我们可以得到以下几点结论：

- 1、 本研究用 SINDA/FLUINT 对回路热管进行的模拟是成功的。
- 2、 回路热管的传热性能非常优秀，即使在负荷端受热功率为 200W 时，蒸发器壁的温度也只有 75.6℃，负荷端的温度只有 81.3℃，远远低于最高允许温度。

3、 优化后，蒸发器体积减少 30%；10W 启动时蒸发器的温度为 36.7℃，下降了 15℃，200W 运行时蒸发器的温度为 70.6℃，下降了 5℃。最大功率时负荷端温度为 76.0℃，远远小于设计要求的 85℃，可以保证电子芯片的安全工作。

4、 如果回路热管的小型化和廉价化得以开发成功，将解决现在快速发展的电子工业的元件散热问题，使电子工业更快速地发展。

致谢：本文获第五届化学学院创新化学研究基金资助，特此感谢。

参 考 文 献

- 1 向艳超，侯增祺，张加迅，环路热管技术(LHP)的发展现状，工程热物理学报，2004-7
- 2 V.G. Pastukhov et, Miniature loop heat pipes for electronics cooling, Applied Thermal Engineering 23 (2003) 1125–1135
- 3 B.J. Huang, development of a low-cost LHP for commercial application, 13th International Heat Pipe Conference (13th IHPC), Shanghai, China, September 21-25, 2004.
- 4 Yu.F.Maidanik, miniature loop heat pipes, 13th International Heat Pipe Conference (13th IHPC), Shanghai, China, September 21-25, 2004.
- 5 王添铭，回路式热管之毛细结构的设计、制造及性能测试，国立台湾大学机械工程学研究所硕士论文
- 6 C&R technologies, Sinda/Fluint ver4.7 user's manual, Dec. 2004
- 7 C&R technologies, loop heat pipe prebuilt model, Mar. 2004