

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.03.14

一种核电厂事故冷却水箱用3D打印高效热管换热单元技术研究

胡 彧^{1,2}, 何戈宁^{1,2}, 冯 杰^{1,2}, 张立玉^{1,2}, 王敬松^{1,2}, 韩隽雅^{1,2}

1. 中国核动力研究设计院, 四川 成都 610213
2. 核能增材制造四川省重点实验室, 四川 成都 610213

摘要: 针对“华龙一号”核电厂二次侧非能动余热排出系统事故冷却水箱在长期运行中因沸腾干烧导致非能动运行时间受限的问题, 提出一种基于增材制造技术的高效热管换热单元。通过热管传热极限分析, 明确了传统热管在携带极限、沸腾极限及蒸发段与冷凝段环境换热极限方面的性能瓶颈。利用激光选区熔融(SLM)增材制造技术, 设计制备了内部填充点阵结构、外部设置薄形翅片的蒸发段与冷凝段复杂结构, 并在冷凝段增设导流套筒以增强自然对流换热。数值模拟结果表明, 导流套筒产生的“烟囱效应”可使冷凝段换热功率提升至无套筒时的2倍以上。在此基础上, 搭建了重力热管试验平台, 开展不同结构组合与充液量条件下的传热性能试验。结果表明, 增材制造热管的传热性能显著优于传统结构, 其中由复杂蒸发段与多个模块化冷凝段组合构成的热管(HP-1-4)最大传热量达2 187 W, 验证了增材制造技术在提升热管传热面积与传热效率方面的显著优势。

关键词: 增材制造; 热管; 非能动余热排出; 事故冷却水箱

中图分类号: TL353 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)03-0103-08

Research on 3D Printed Heat Pipe for Nuclear Power Plant Accident Cooling Water Tank

HU Yu^{1,2}, HE Gening^{1,2}, FENG Jie^{1,2}, ZHANG Liyu^{1,2}, WANG Jingsong^{1,2}, HAN Juanya^{1,2}

1. Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China
2. Nuclear Power Additive Manufacturing Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610213, China

Abstract: To address the limited passive operation time of the accident cooling water tank in the secondary passive residual heat removal system of the HPR1000 nuclear power plant caused by boiling dryout, this study proposes a high-performance heat pipe unit fabricated by additive manufacturing. Heat transfer limit analysis reveals that the conventional heat pipe is primarily constrained by the entrainment limit, boiling limit, and heat transfer limits at the evaporator and condenser sections. Accordingly, a selective laser melting (SLM) additive manufacturing process is employed to fabricate a complex structure featuring internal lattice structures and external thin fins for both evaporator and condenser sections. A diversion sleeve is added to the condenser section to enhance natural convection heat transfer. Numerical results show that the chimney effect induced by the diversion sleeve more than doubles the heat transfer capacity compared to the configuration without a sleeve. A gravity heat pipe test bench is established to evaluate the thermal performance under various structural combinations and liquid filling amounts. Experimental results demonstrate that the additively manufactured heat pipe achieves significantly improved heat transfer performance, with the HP-1-4 configuration (combining a complex evaporator and multiple modular condensers) reaching a maximum heat transfer capacity of 2 187 W. This study confirms the effectiveness of additive manufacturing in enhancing the heat transfer area and efficiency of heat pipes, offering a promising solution for extending the passive operation duration of residual heat removal systems.

收稿日期: 2026-01-14 修回日期: 2026-02-09

作者简介: 胡 彧(1990—), 硕士, 高级工程师, 主要从事核动力装置设备设计研发工作。E-mail: 15881175326@163.com。

Keywords: additive manufacturing; heat pipe; passive residual heat removal; accident cooling water tank

引用格式:胡彧,何戈宁,冯杰,等.一种核电厂事故冷却水箱用3D打印高效热管换热单元技术研究[J].电焊机,2026,56(3):103-110.

Citation:HU Yu, HE Gening, FENG Jie, et al. Research on 3D Printed Heat Pipe for Nuclear Power Plant Accident Cooling Water Tank[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(3): 103-110.

0 引言

“华龙一号”核电机组在能动安全系统的基础上增加了二次侧非能动余热排出系统(PRS系统),该系统以事故冷却水箱中的水为热阱,其目的是在事故后能通过设置在事故冷却水箱中的PRS换热器非能动导出堆芯余热及设备储热。目前PRS系统设计投运维持时间限值为72 h,PRS系统投运后,事故冷却水箱中的水将逐渐升温并发生沸腾,逐步变为水蒸气并扩散至大气中。PRS系统连续运行72 h后,事故冷却水箱中的水位低于可维持运行的最低水位,此后PRS系统无法再有效运行。本研究聚焦于应用热管技术延长PRS系统投运维持时间,从而提升电厂安全性^[1-3]。

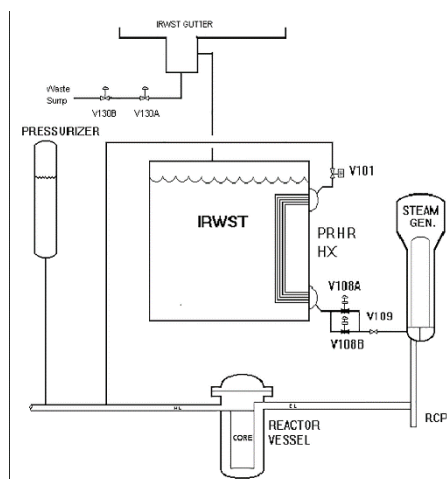


图1 二次侧非能动余热排出系统

Fig. 1 Secondary side passive residual heat removal system

热管是一种高效热量传递装置,被誉为热传导中的“超导体”。热管内部主要靠工作液体汽、液相变传热,热阻很小,具有很高的导热能力,与银、铜、铝等金属相比,单位重量的热管可多传热几个数量级的热量^[4]。随着热管技术迅速发展,热管在各行各业的热能综合利用和余热回收技术中展现了显著优势,广泛用于余热回收、太阳能系统、冻土保护

等领域,且在核能领域也具有巨大的应用前景。如段倩妮^[5]等人对应用于核反应堆余热排出系统的热管换热器开展了优化设计和传热特性分析。文献[6-7]开展了乏燃料池被动冷却用的热管技术研究,通过热管与环境空气自然对流去除乏燃料池中的衰变热。热管作为高效换热元件可以将PRS系统事故冷却水箱中热量持续导出到大气环境,确保在PRS系统投入运行过程中事故冷却水箱水的温度始终在饱和温度以下,进而缓解事故冷却水箱的沸腾干烧现象,延长PRS系统不干预运行时间。

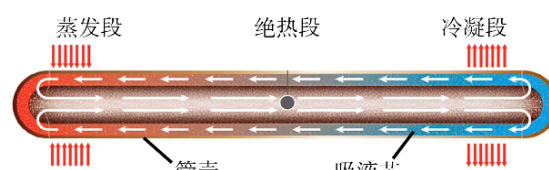


图2 热管工作原理

Fig. 2 Working principle of heat pipe

1 热管传热瓶颈分析

热管的传热现象可以用“木桶理论”进行解析,传热过程的每一部分均有可能成为限制热管负荷的传热极限。在传热过程中,可能限制热管传热的物理现象包括毛细力、声速、携带、沸腾、冷冻启动、连续蒸汽、蒸汽压力及冷凝等。

根据事故水箱运行工况,对计算条件作如下设定:事故水箱温度为95℃,事故水箱压力为常压,正常环境大气温度为20℃,环境大气压力为常压。设定热管内径25 mm,壁厚1.5 mm,材料为奥氏体不锈钢。蒸发段、冷凝段轴向长度均按0.5 m考虑,绝热段按3 m考虑。

本项目研究的热管布置在核电厂的二次侧非能动余热排出系统(PRS系统)中,采用无吸液芯的重力热管形式。按照参考文献[4]、[8]中给出的热管传热极限分析方法进行了传热极限分析。

根据热管运行条件,不涉及微型热管,不涉及极低的工作温度,因此热管管内的蒸汽流动不会出现自由分子状态或稀薄、真空状态,不需考虑连续流动极限、冷冻启动极限。

按参考文献[4]、文献[8]的方法,分析传统热管其他传热极限,分布情况见图3。由图3可以看出,上述研究工况中,热管粘性极限、声速极限、冷凝极限均较大。携带极限、沸腾极限、蒸发段环境换热极限较低,冷凝段环境换热极限则显著低于其他所有极限,上述传热极限直接限制了热管性能。因此对于核电厂事故冷却水箱用热管,为了提升其传热潜力,优化研究的重点应为携带极限、沸腾极限、蒸发段环境换热极限和冷凝段环境换热极限。

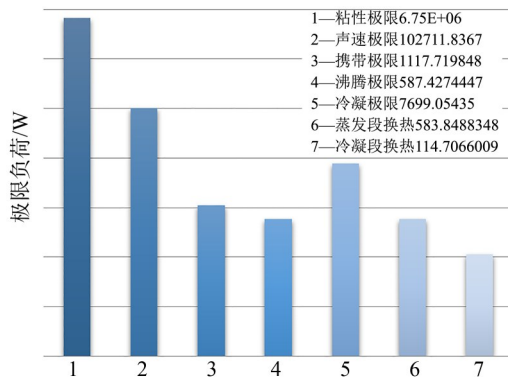


图3 传统热管传热极限值分布

Fig. 3 Distribution of heat transfer limits of conventional heat pipe

2 增材制造热管设计

传统热管载热能力有限,有文献指出目前带翅片的铜合金重力热管的最大载热能力约200 W。然而,增材制造(又名3D打印)技术的发展为热管技术的发展提供了全新的可能。3D打印可以便捷实现异形、结构一体化、薄型翅片、微通道、点阵结构等创新设计,满足了热管等传热设备紧凑型、高效性、模块化的发展趋势。因此,本研究要充分利用3D打印技术优势,提升热管的性能。

2.1 增材制造工艺选择

3D打印与传统等材(锻造、铸造为代表)、减材制造(机械加工为代表)不同,是一种以三维模型数据为基础,通过材料堆积的方式制造零件或实物的技术。增材制造包括了很多不同的制造工艺,ISO

17296-2:2015将其划分为七大类。从技术成熟度上来讲,目前国内工业领域实际应用的金属增材制造技术主要有三种:激光选区熔融(SLM)、激光同轴送粉、电弧熔丝。国外则实现了电子束选区熔融(EBM)技术在工业领域的批量应用,但国内目前尚在研究熟化中^[9]。由于激光选区熔融(SLM)技术成熟度高,适用的材料范围广、制造成型精度高,并且具有超复杂结构成型、成形材料性能优异等优点^[10],因此将激光选区熔化工艺(SLM)选作事故冷却水箱热管换热单元研究应用的技术。

2.2 增材制造热管设计方案

针对热管蒸发段换热极限、沸腾极限的提升需求,采用3D打印思维设计出了内部填充点阵结构且外部设置薄形翅片的蒸发段及冷凝段的复杂结构。该结构的优势在于:一方面,利用3D打印技术提高了蒸发段环境换热极限、沸腾极限,另一方面,充液量增加也有助于维持并提高冷冻启动极限。考虑到冷凝段的换热极限提升要求很高,将冷凝段设计为模块化的可叠加结构(冷凝段由多个采用3D打印思维设计出的冷凝单元叠加而成)。为了提高冷凝段换热极限,拟在冷凝段外设置导流套筒结构,以利用烟囱效应提高空气流速进而提高传热效率。

为提升热管的携带极限,在蒸发段、冷凝段优化设计的同时,增设“分流套筒”结构完全隔离开汽液流体,彻底解决携带极限问题(优化后不用再考虑携带极限)。热管换热单元总体设计方案见图4。

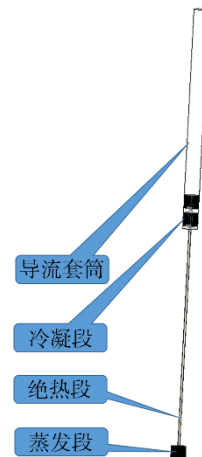


图4 热管换热单元总体设计方案

Fig. 4 Overall design scheme of heat pipe heat transfer unit

材料选择耐腐蚀性能优异、具有成熟3D打印经验的奥氏体不锈钢(316L)作为热管换热单元的材料。

2.3 导流套筒对冷凝段强化传热数值分析研究

2.3.1 计算模型及边界条件

根据冷凝段初步设计参数确定了计算物理模型,其中冷凝段长度为200 mm,外径为200 mm,翅片厚度为1 mm,如图5所示。数值分析采用的商用CFD软件为CFX v18.0,为便于计算,选取了1/24的三维模型,简化计算模型如图6所示。网格划分如图7所示,当导流套筒长度为3 m时,网格模型共6 571 500个网格、6 799 342个节点。

模型左右两侧设置为对称面,与导流套筒接触

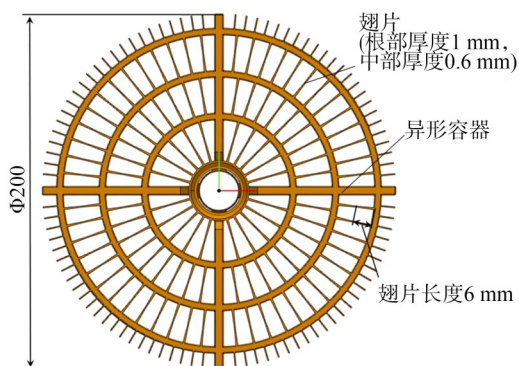


图5 冷凝段翅片结构

Fig. 5 Schematic diagram of fin structure in condensation section

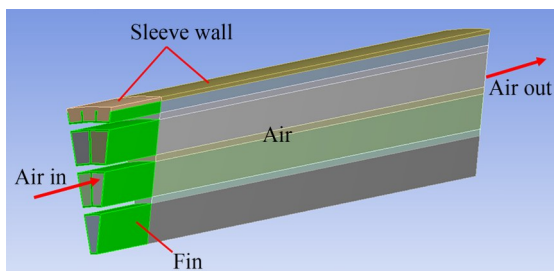


图6 冷凝段计算模型

Fig. 6 Schematic diagram of calculation model for condensation section

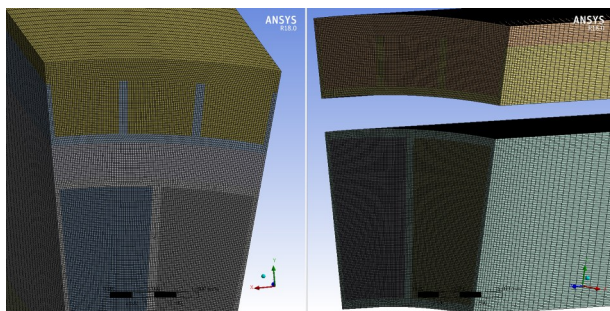


图7 冷凝段网格模型

Fig. 7 Schematic diagram of mesh model for condensation section

面设置无滑移绝热表面,进、出口均采用开口边界条件,冷凝腔内壁面设置为定壁温 $T_{wall}=343.15\text{ K}$ 。

2.3.2 流动与传热分析

图8为热管冷凝段翅片换热单元不同高度处横截面的流体温度云图,其中0 m处为翅片换热单元进口截面,0.2 m处为翅片换热单元出口截面。可以看到随着空气流经翅片通道,较冷空气不断被热管冷凝段的翅片加热,进而带走了热管内部工质液化

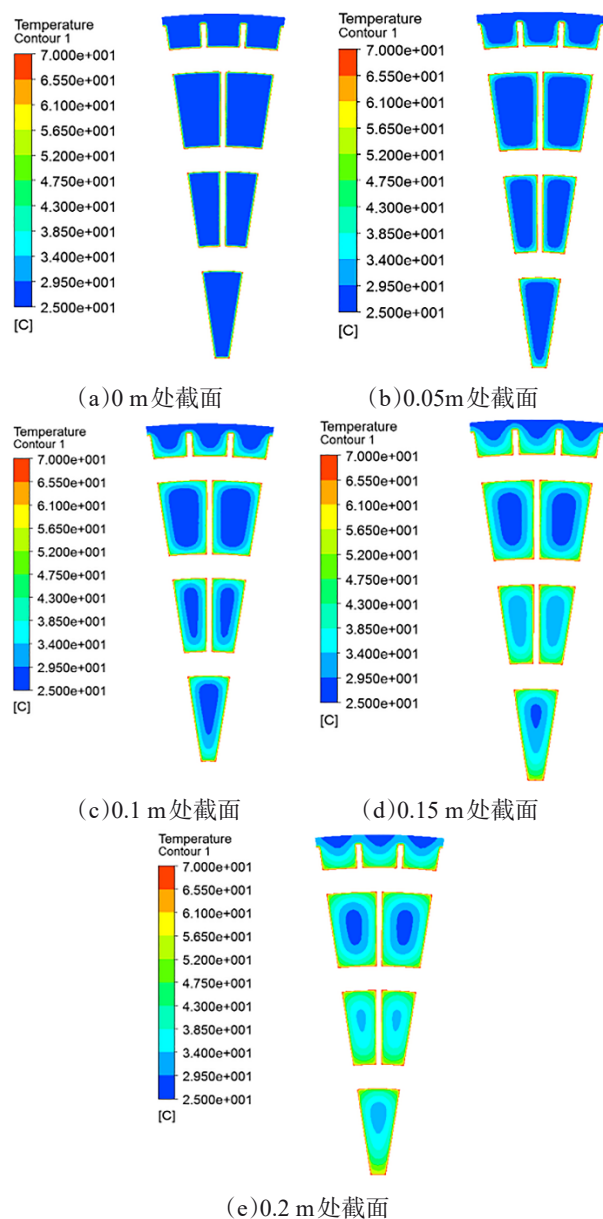


图8 换热单元沿流向不同截面上流体的温度场云图 (导流套筒3 m)

Fig. 8 Temperature field contours on different cross-sections along the flow direction of the heat transfer unit (diversion sleeve length:3 m)

释放的热量,实现了冷凝的作用。

为研究导流套筒长度对热管冷凝段翅片换热单元换热性能的影响,分别针对导流套筒长度为 3 m、2.5 m、1.5 m、1 m、0.5 m 的几种方案开展了流动传热计算,图 9 为不同导流套筒长度对应的流体速度场分布。可以看出随着套筒长度增加,流体的主流速度相应增加。图 10 为流经换热单元的空气

质量流量及热功率随导流套筒长度变化关系,可以看到随着导流套筒长度增加,“烟囱效应”越显著,空气质量流量和热功率均呈现增加趋势。当导流套筒长度为 3 m 时,其换热功率是不设置导流套筒时的 2 倍以上,表明导流套筒显著增强了热管冷凝段自然循环换热效果。同时,随着导流套筒长度增加,自然循环换热能力进一步提升。

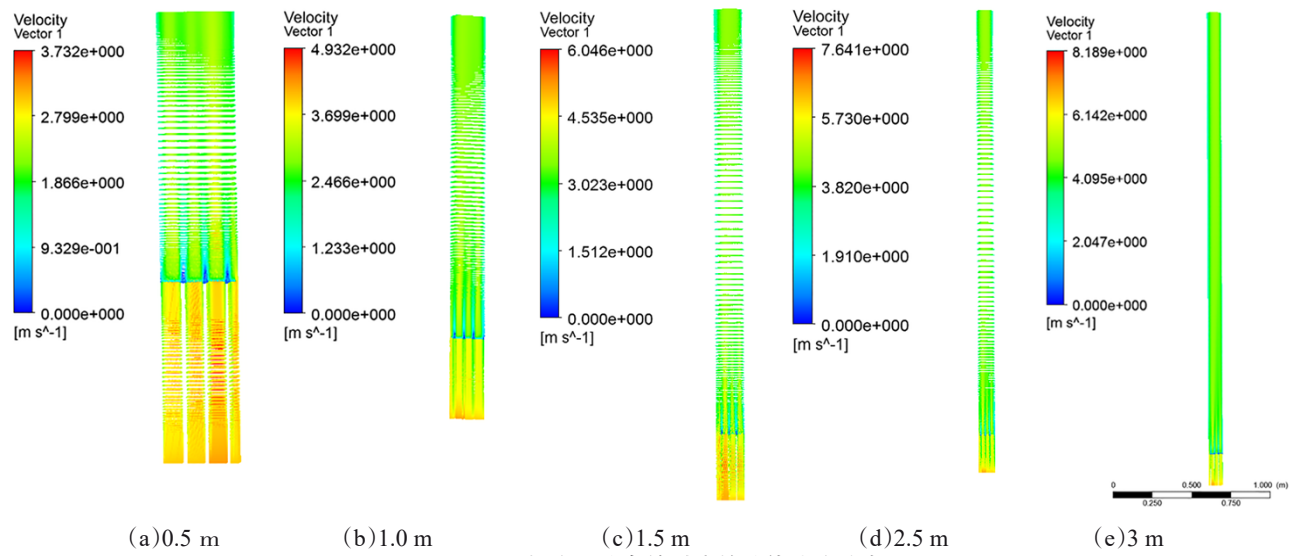


图 9 不同长度导流套筒对应的流体速度分布

Fig. 9 Fluid velocity distribution contours corresponding to different diversion sleeve lengths

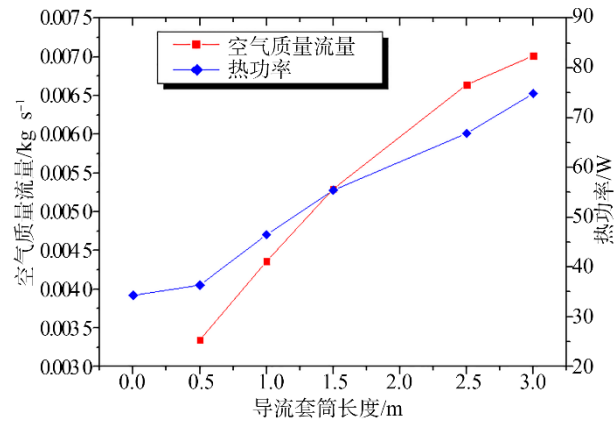


图 10 空气质量流量及热功率随导流套筒长度变化关系

Fig. 10 Variation of air mass flow rate and thermal power with diversion sleeve length

3 增材制造热管性能试验研究

为了验证热管换热单元的传热性能,进一步开展了性能验证试验。首先研究了热管传热性能(传热量)的测量方法,建立了试验台以及配套数据采

集系统。然后选取了 1 种蒸发段和 4 种冷凝段进行组合,研究充液量和试验段结构对热管传热量的影响。

3.1 试验装置

为模拟实际运行工况,完成对热管传热量的测量,搭建了热管传热量测量试验装置。该试验装置主要由加热水箱、热管、抽真空及充液装置、烟囱、数据采集系统这五部分组成,如图 11 所示。

在本试验中,水箱作为热源为蒸发段提供热量。水箱底部设有 4 个 3 kW 的电加热器,在试验开始前开启电加热器使水加热到试验温度,并且为了减少试验过程中水箱向环境中的散热,在水箱外部包裹有保温棉。为测量水温变化情况,水箱两侧对称布置有 4 对热电偶,布置位置距水箱底部分别为 15 cm、30 cm、45 cm、60 cm。

热管由蒸发段、绝热段、冷凝段三部分构成,各部分通过真空卡箍连接,且在绝热段与冷凝段上布置有 6 个热电偶来采集壁面温度,用于辅助判断热

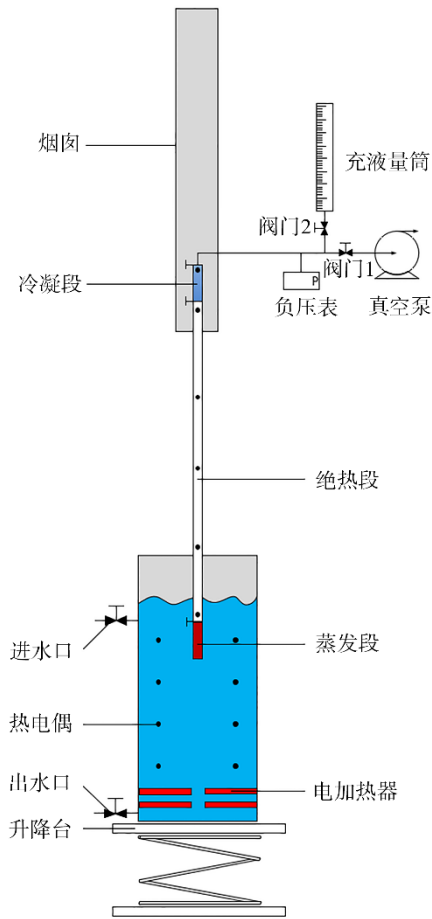


图 11 重力热管试验装置

Fig. 11 Schematic diagram of gravity heat pipe experimental setup
管是否处于正常的工作状态。热管的绝热段尺寸固定,为内径 25 mm,长 3 100 mm 的光管,蒸发段和冷凝长度试样样件如图 12、图 13 所示。



图 12 蒸发段样件

Fig. 12 Evaporation section specimen



(a)方案 1

(b)方案 2



(c)方案 3

(d)方案 4

图 13 冷凝段样件

Fig. 13 Condensation section specimens

抽真空及充液装置由负压表、真空泵、充液量筒、针阀以及连接它们的管路组成,与冷凝段上方的开口通过真空卡箍连接。其中负压表用于观察管内的实时压力;真空泵与充液量筒则通过控制阀门的开度,实现对热管的抽真空和充液。烟囱套在冷凝段外,通过建立起空气的自然循环增强对冷凝段的冷却。由于冷凝段 4 的直径为 320 mm,而其余的冷凝段直径都在 200 mm 以内,所以设置了两种规格的烟囱:直径分别为 325 mm 和 205 mm,长度均为 3 m。其中直径 325 mm 的烟囱用于含有冷凝段 4 的试验,直径为 205 mm 的烟囱用于其余冷凝段的试验。

3.2 试验结果分析

为探究蒸发段热管的最佳充液量以及不同热管组合对传热量影响,在真空度 -96 kPa,水箱温度 90 °C 的条件下,完成各热管组合 HP-1、HP-2、HP-3 和 HP-4(编号表示冷凝段方案编号,多个编号表示设置了多个冷凝段重叠)的试验,试验结果如图 14 所示。可以看到除了 HP-1 和 HP-2 传热量相近外,随着冷凝段复杂程度的提高,热管传热量有明显的上升。此外对于蒸发段的最佳充液量,由图 14 可以看出随着充液量的变化,在 50~1 000 mL 的充液量范

围内,各热管组合的传热量随着充液量的增加有下降的趋势,而在 50~100 mL 范围时,热管传热量出现最大值(但 HP-4 在充液量为 50 mL 时的传热量相较于充液量为 250 mL 及以上的传热量要小很多)。由于蒸发段内部结构复杂,流道细小,在试验后可能会有部分工质积存在管内,导致充液量会略低于管内实际的含液量,因此选择 250 mL 作为蒸发段的较优充液量。

为探究热管的传热量还能否进一步提高,使用 HP-2-3 和 HP-1-2-3 来进行试验。从试验结果(见图 14)可以看到 HP-1-2-3 的传热量显著提高,最大传热量达到 1 181 W,为 HP-3 传热量的 1.40~1.62 倍。而 HP-1-2-3 的传热量较 HP-2-3 却有小幅度下降,其原因可能是由于烟囱的直径为 205 mm,仅比冷凝段直径大 5 mm,在三个具有复杂肋片结构的冷凝段叠加后,使得空气在烟囱内部流动阻力增大,削弱了空气对冷凝段的冷却效果,也就导致热管的传热量下降。

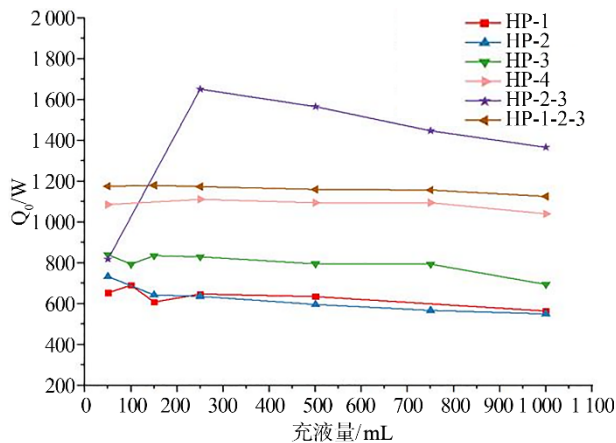


图 14 不同热管组合传热量随充液量的变化

Fig. 14 Variation of heat transfer capacity with liquid filling amount for different heat pipe combinations

进一步使用了 HP-1-4 来进行试验。试验结果如图 15 所示。HP-1-4 最大传热量达到 2 187 W,相较于 HP-4 的最大传热量 1 920 W,可以看出叠加冷凝段实现了提升热管传热量的目的。

3.3 小结

(1) 在充液量不超过蒸发段容积时,充液量在较大范围内变化对热管传热量影响不大。

(2) 在本试验条件下,冷凝段的传热性能是限制热管传热量的主要因素。相较于提高蒸发段的

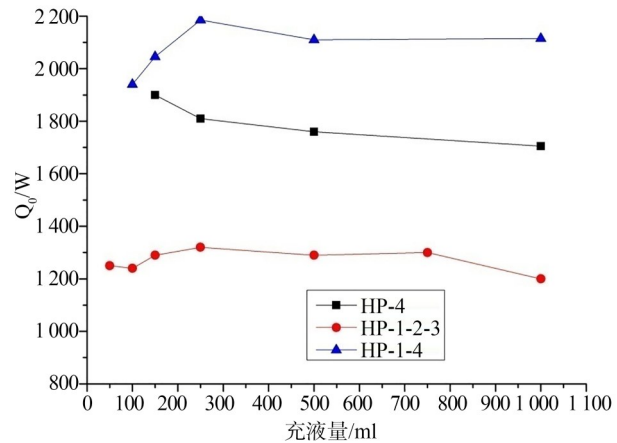


图 15 水温 95 °C 下不同试验段组合的传热量

Fig. 15 Heat transfer capacity of different test section combinations at water temperature of 95 °C

有效换热面积,提高冷凝段的有效换热面积能更显著地增加热管的传热量。

(3) 增材制造技术可以实现热管复杂结构创新设计,在不大幅增加热管体积的情况下使得其传热面积和传热性能大幅提升。

4 结论

本研究基于增材制造技术,开展了核电厂二次侧非能动余热排出系统事故冷却水箱用增材制造热管换热单元技术的研究。

(1) 通过热管极限分析方法,探明了热管换热单元的换热限制因素及强化传热的方向,提出了基于点阵结构及薄形翅片的蒸发段和冷凝段复杂结构。为进一步提升换热能力,热管冷凝段增加了导流套筒结构,数值分析表明导流套筒结构的“烟囱效应”显著提升了换热效果。

(2) 开展了热管换热单元传热性能试验研究,试验结果表明增材制造的复杂结构的热管,可实现其传热面积和传热性能有效提升。

参考文献:

- [1] 何勇,陈雨航,何雪溢,等.核领域增材制造技术的研究进展[J].科技视界,2024,14(02):41-46.
HE Y, CHEN Y H, HE X Y, et al. Research progress in additive manufacturing technology in the nuclear field [J]. Science & Technology Vision, 2024, 14 (02): 41-46.

- [2] 汪宇,卢庆,陈志辉,等.非能动余热排出系统过冷沸腾传热特性研究[J].核动力工程,2024,45(03):258-262.
WANG Y, LU Q, CHEN Z H, et al. Study on Heat Transfer Characteristics of Sub-cooled Boiling in Passive Residual Heat Removal System[J]. Nuclear Power Engineering, 2024, 45(03): 258-262.
- [3] 孙奥,程杰,朱东保,等.二次侧非能动余热排出系统启动特性研究[J].动力工程学报,2023,43(12):1592-1598.
SUN A, CHEN J, ZHU D B, et al. Study on the Start-up Characteristics of Secondary Passive Residual Heat Removal System [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2023, 43(12): 1592-1598.
- [4] 庄骏,张红.热管技术及其工程应用[M].北京:化学工业出版社,2000:41.
- [5] 段倩泥,王成龙,张大林,等.余热排出系统中的热管设计及传热性能研究[J].原子能科学技术,2021,55(6):1000-1006.
DUAN Q N, WANG C L, ZHANG D L, et al. Heat Pipe Design and Heat Transfer Performance in Residual Heat Removal System[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2021, 55(6): 1000-1006.
- [6] FU W, LI X, WU X, et al. Investigation of a longterm passive cooling system using two-phase thermosyphon loops for the nuclear reactor spent fuel pool[J]. Annals of Nuclear Energy, 2015, 85: 346-356.
- [7] CHOI J, LIM C, KIM H. Fork-end heat pipe for passive air cooling of spent nuclear fuel pool[J]. Nuclear Engineering and Design, 2021, 374(1): 111081.
- [8] Bahman Zohuri. Heat Pipe Design and Technology-Modern Applications for Practical Thermal Management[M]. Springer International Publishing, 2016.
- [9] 吕玥萱,肖克华,饶宇.增材制造高性能微通道换热器模块化单元传热与压损实验[J].工程热物理学报, 2024, 45(01): 186-193.
LV Y X, XIAO K H, RAO Y. Experiments of Heat Transfer and Pressure Loss in a High-performance Additively Manufactured Modular Microchannel Heat Exchanger [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2024, 45(01): 186-193.
- [10] 石岩,马志乾,刘佳,等.SLM增材制造高通量微通道换热器结构优化设计[J].低温与超导,2021,49(06):57-62+92.
SHI Y, MA Z Q, LIU J, et al. Structural optimization design of SLM additive manufacturing high throughput microchannel heat exchanger [J]. Cryogenics and Superconductivity, 2021, 49(06): 57-62+92.