

# 铝质吹胀型平板回路热管及高温强冷空调

王定远<sup>1,2</sup>, 郭忠昌<sup>1,2</sup>, 李勇<sup>3</sup>, 裴玉哲<sup>1,2</sup>, 赵鹏达<sup>1,2</sup>, 张传美<sup>1,2</sup>, 王伟锋<sup>2,4</sup>, 常利华<sup>2,4</sup>, 王飞<sup>2,4</sup>, 罗荣邦<sup>2,4</sup>

(1.青岛海尔智能技术研发有限公司, 山东 青岛 266103; 2.数字家庭网络国家工程研究中心, 山东 青岛 266103; 3.华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641; 4.青岛海尔空调器有限公司, 山东 青岛 266101)

**摘要:**为解决空调室外机变频功率器件的高温散热难题,提出并开发一种铝质吹胀型平板回路热管及散热器。基于一款额定制冷量7 600 W的柜机空调搭建仿真和试验平台。结果表明,采用该铝质吹胀型平板回路热管散热器可解决变频功率器件在强制风冷模式下的高温散热难题;空调室外机周边温度在53℃时,空调仍具备100%制冷能力;空调室外机周边温度高达62℃时,空调不停机。该研究保障了空调有效应对夏季极端高温天气。

**关键词:**吹胀型;回路热管;电子散热;变频空调;高温制冷

**中图分类号:**TK124

**文献标志码:**A

**引用格式:**王定远,郭忠昌,李勇,等. 铝质吹胀型平板回路热管及高温强冷空调[J]. 山东大学学报(工学版), 2026, 56(2):158-165.

WANG Dingyuan, GUO Zhongchang, LI Yong, et al. Roll bond aluminum flat loop heat pipe for high-temperature strong cooling air-conditioner[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2026, 56(2):158-165.

## Roll bond aluminum flat loop heat pipe for high-temperature strong cooling air-conditioner

WANG Dingyuan<sup>1,2</sup>, GUO Zhongchang<sup>1,2</sup>, LI Yong<sup>3</sup>, PEI Yuzhe<sup>1,2</sup>, ZHAO Pengda<sup>1,2</sup>, ZHANG Chuanmei<sup>1,2</sup>, WANG Weifeng<sup>2,4</sup>, CHANG Lihua<sup>2,4</sup>, WANG Fei<sup>2,4</sup>, LUO Rongbang<sup>2,4</sup>

(1. Qingdao Haier Smart Technology R&D Co., Ltd., Qingdao 266103, Shandong, China; 2. National Engineering Research Center of Digital Home Networking, Qingdao 266103, Shandong, China; 3. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, Guangdong, China; 4. Qingdao Haier Air Conditioner Co., Ltd., Qingdao 266101, Shandong, China)

**Abstract:** In order to solve the high-temperature heat dissipation problem of inverter power devices in air conditioner outdoor units, this paper proposed and developed a novel pump-free roll bond aluminum flat-plate loop heat pipe and radiator. Thermal simulation and experimental investigations were carried out on a cabinet air conditioner with rated cooling capacity of 7 600 W, thereby effectively resolving the high-temperature heat dissipation issue of inverter power devices under air-forced cooling conditions. The prototype air conditioner achieved 100% of its rated refrigerating capacity when the ambient temperature of the outdoor unit reached 53℃, and was capable of continuous operation even at an outdoor ambient temperature of 62℃. This performance enabled the air conditioner to adapt well to the extreme high-temperature weather in summer.

**Keywords:** roll bond; loop heat pipe; heat dissipation; inverter air conditioner; high-temperature cooling

## 0 引言

目前,全球频繁出现极端高温天气且覆盖面广。以2024年和2025年夏天为例,国外多个城市

气温接近50℃,国内多地超过42℃。变频空调已经占据空调市场份额的90%以上,空调室外机因长时间太阳暴晒、地面高温反射、局部热岛效应以及建筑大楼室外机安装的百叶窗格栅阻碍通风等因素,其周围环境温度可达到并超过53℃。这导致空

调室外机散热不良、高温工况制冷能力差。另外,压缩机高频化、变频功率器件小尺寸化、变频板高频功率因数校正(power factor correction, PFC)集成等成为变频空调的发展趋势,空调变频功率器件发热越来越严重。

空调室外机变频板的散热普遍采用铝翅散热器,由于铝导热系数只有  $201 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  左右,无法实现变频功率器件高效均温散热。铝翅散热器存在“热点”,且散热器和电控箱在空调室外机安装的位置风速小,仅仅靠加大铝挤散热翅器的尺寸和重量无法有效解决变频功率器件大热流密度的高温散热难题。

为保障变频功率器件安全,普通空调常采用压缩机降频方法,天气越热,空凋制冷越差。以采用铝翅散热器、额定制冷量为  $7\ 200 \text{ W}$  的普通柜机空调为例:室外  $53\text{ }^{\circ}\text{C}$  时制冷能力衰减  $31\%$ ,  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  时制冷能力衰减  $82\%$ 。现有空调国家标准以 T1 工况(室外机环境温度为  $43\text{ }^{\circ}\text{C}$ )为基准,但随着高温天气、空调室外机安装环境等因素的变化,空调需要进一步提升高温制冷能力到 T3 工况(室外机环境温度为  $52\text{ }^{\circ}\text{C}$  及以上)。因此,必须解决高温工况变频功率器件的散热难题。

热管及均热板采用温差驱动实现高效的相变传热<sup>[1-3]</sup>,不需要机械泵等动力源。在电子功率器件散热应用时,热管及均温板能消除“热点”<sup>[4-6]</sup>。学者们研究了铜-水热管、环路热管和均热板的相变传热与散热方案<sup>[7-10]</sup>,但在空调上应用仍存在诸多挑战。铜-水热管(管壳材料为纯铜,工作介质为去离子水)需要多根热管配合翅片阵列以增加散热面积,或者把热管嵌入到铝翅散热器中应用<sup>[11-12]</sup>,模具制造工艺复杂、成本高。环路热管和回路热管<sup>[13-15]</sup>具有传热距离远、传热功率大、利于安装等特点,可采用全铝制作,重量轻、成本低,但需要解决传热介质在内流道实现单向循环流动传热的问题。

本研究提出和开发一种无泵、无毛细芯、传热介质可单向循环的铝质吹胀型平板回路热管散热器,它采用相变传热原理实现近等温传热<sup>[16-20]</sup>。该散热器设计空调室外机安装结构,把变频功率器件的热量高效传递到空调室外机高速位置实现风冷散热,解决空调室外机电控板变频功率器件的温升过高难题,避免压缩机因变频功率器件过热导致降频和空凋制冷能力大幅度衰减,并在海尔某款柜机空调上应用,实现高温强冷。

## 1 铝质吹胀型平板回路热管及散热器

借鉴传统带毛细芯环路热管的相变循环回路设计方法,本文研制的无毛细芯、光管内流道铝质吹胀型平板回路热管,其结构由上下两块铝板压合,通过吹胀工艺形成光管内流道(内部无毛细结构),经过抽真空、灌注不可燃传热介质、灌注口密封、切断和断面焊接等工艺<sup>[14-16]</sup>,形成闭式流路的铝质吹胀型平板回路热管。通过创新结构设计,铝质吹胀型平板回路热管及散热器解决了一个关键技术难题,即如何让传热介质在热源驱动下实现无毛细芯的回路热管单向循环流动,进而解决铝质吹胀型平板回路热管在空调室外机的安装和工程化应用问题。

### 1.1 铝质吹胀型平板回路热管的无泵、无毛细芯单向循环结构设计

传统环路热管,在蒸发段需设计毛细芯结构,依靠毛细作用力实现内部传热介质的单向流动,也有部分研究通过添加单向阀、特斯拉阀部件和结构实现传热介质流动时的单向循环<sup>[17-21]</sup>。本研究设计一种新型铝质吹胀型平板回路热管,其流道内壁光滑、无毛细结构,结合压力差结构设计,实现仅依靠热源驱动的无泵单向循环,并以此为基础开发配套的高效散热器。

铝质吹胀型平板回路热管的单向循环结构关键设计方法如下。

#### (1) 流动压力差的流道构建

本研究提出“借助流道数量和管径差异构造压力差”的流道结构设计方案,即蒸发段出口设计3个宽度为  $8 \text{ mm}$ 、深度为  $5 \text{ mm}$  的流道,冷凝段出口到蒸发段的回液口采用1个宽度为  $10 \text{ mm}$ 、深度为  $5 \text{ mm}$  的流道。抽真空后,灌注传热介质 R245fa,灌注量占内容积的  $30\%$ ,实际灌注质量约  $20 \text{ g}$ 。在常温条件下,将所设计的铝质吹胀型平板回路热管样品靠近耳朵晃动,可听到内部液态传热介质流动的声音。

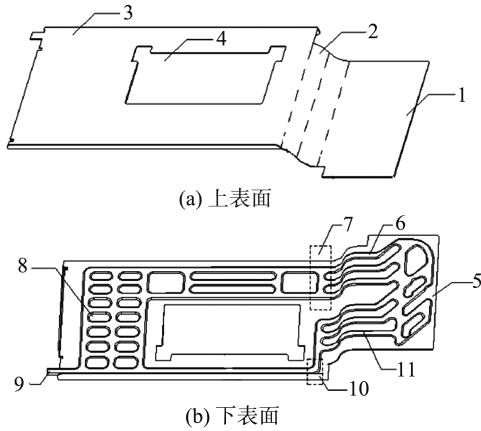
铝质吹胀型平板回路热管工作时,接触热源的蒸发段内传热介质受热发生相变,液态工质变成蒸气,导致蒸发段区域流道内部压力变大,在压力差作用下,蒸气推动液态传热介质流动,通过流路管道的管径和数量变化构造的压力差实现单向循环流动。

#### (2) 重力应用和位势差设计

本研究设置“Z字型”平板结构,蒸发段在下

方,冷凝段在前上方,以利于传热介质在流道内靠重力作用加速蒸发和回流。在管道压力差和重力作用下,传热介质在热源的驱动下产生蒸气,蒸气推动气液两相传热介质在流道内实现单向循环流动,在远端冷凝段降温后回流到热源下方的蒸发段流道内。

铝质吹胀型平板回路热管设计图和样品分别如图1、2所示。



1—蒸发段;2—绝热段;3—冷凝段;4—裁切区;5—蒸发段下板;6、7—蒸发段出口;8—冷凝段内流道;9—灌注口;10—蒸发段回液内流道。

图1 铝质吹胀型平板回路热管设计图  
Fig.1 Design drawing of the roll bond aluminum flat loop heat pipe

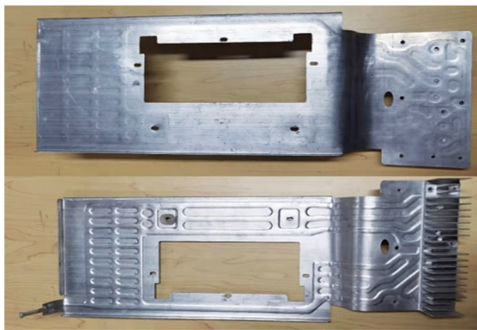


图2 铝质吹胀型平板回路热管样品

Fig.2 Sample of the roll bond aluminum flat loop heat pipe

## 1.2 铝质吹胀型平板回路热管散热器均温性测试

铝质吹胀型平板回路热管散热器的均温性测

表1 铝质吹胀型平板回路热管样品的均温性测试数据

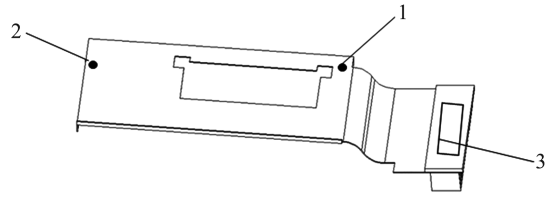
Table 1 Temperature uniformity test data of the roll bond aluminum flat loop heat pipes

样品序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\Delta T / ^\circ\text{C}$	3.52	3.44	3.58	3.56	3.37	3.49	3.61	3.55	3.43	3.27	3.48	3.59	3.71

## 1.3 铝质吹胀型平板回路热管散热器在空调室外机安装结构设计

为解决铝质吹胀型平板回路热管散热器在空调室外机上的安装问题,本研究提出一种平板桥式安装结构,利用电控箱和风机支架分别模拟桥墩,采用铝质吹胀型平板回路热管模拟平板桥体,铝质

试示意图如图3所示。



1— $T_1$  测试点;2— $T_2$  测试点;3—模拟热源。

图3 铝质吹胀型环路热管的均温性测试示意图  
Fig.3 Schematic diagram of the temperature uniformity test for the roll bond aluminum flat loop heat pipe

在铝质吹胀型平板回路热管散热器蒸发段位置,采用40 mm×40 mm×2 mm的陶瓷加热片作为模拟热源,在加热片和蒸发段之间均匀涂抹导热硅脂减小接触热阻和固定加热片。模拟热源直接覆盖于功率器件固定位置区域,加热功率为(75±5) W。实际测试前,先将铝质吹胀型平板回路热管竖直放置,即冷凝段在高处、蒸发段在低处,15 s后,确保铝质吹胀型平板回路热管内传热工质全部回流至冷凝段,再水平放置,即铝质吹胀型平板回路热管沿长度方向保持水平。开始测试时,铝质吹胀型平板回路热管处于自然对流传热状态,采用热电偶监测温度评估铝质吹胀型平板回路热管的均温性。用铝箔胶带粘贴固定热电偶,监测该铝质吹胀型平板回路热管蒸发段温度 $T_1$ 、热管冷凝段温度 $T_2$ 。启动模拟热源加热2 min后,记录各测试点的温度,计算铝质吹胀型平板回路热管样品的传热温差 $\Delta T$ ,计算公式为

$$\Delta T = |T_1 - T_2|, \quad (1)$$

式中, $T_1$ 为平板回路热管蒸发段温度, $T_2$ 为平板回路热管冷凝段温度。

铝质吹胀型平板回路热管样品的均温性要求 $\Delta T \leq 4 ^\circ\text{C}$ 。本研究制作13个铝质吹胀型平板回路热管散热器样品,按照上述测试方法进行测试,其传热温差如表1所示。测试结果表明,样品全部符合均温性要求。

吹胀型平板回路热管的蒸发段与电控箱下方的变频功率器件采用螺丝固定,铝质吹胀型平板回路热管冷凝段中间裁切后通过绝缘胶垫(绝缘和减震)和螺丝固定在风机支架上。安装结构如图4所示。

空调工作时,电控板变频功率器件发热,通过铝质吹胀型平板回路热管均温传热。空调室外机

风扇旋转吸风从铝质吹胀型平板回路热管表面带走热量,实现功率器件的高效强制对流散热。

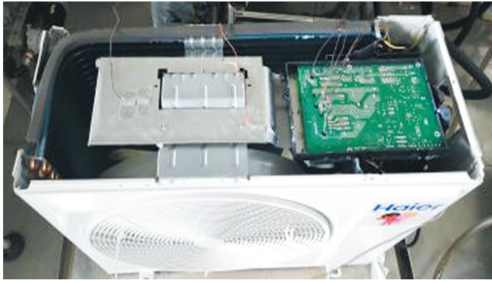


图 4 铝质吹胀型平板回路热管在空调室外机的安装结构  
Fig.4 Installation structure of a roll bond aluminum flat loop heat pipe in an air-conditioner outdoor unit

## 2 热仿真设计

### 2.1 仿真几何模型

采用额定制冷量为 7 600 W 的海尔某款变频柜机空调为研究对象。室外机环境温度为 53 °C,经过室外机冷凝器被加热后的风温为 62 °C(散热器进风口温度为 62 °C)。变频功率器件热耗数据见表 2。表 2 中热耗分别表示变频功率器件在空调 2 种不同工况的发热量(空调压缩机运行频率分别为 36、68 Hz)。

表 2 变频功率器件的仿真参数

Table 2 Simulation parameters of inverter power devices

芯片编号	名称	尺寸/ (mm×mm×mm)	频率热耗/W	
			36 Hz	68 Hz
智能功率模块				
H1	(intelligent power module, IPM)	15×30×2	30	32
H2	二极管	18×20×2	10	20
绝缘栅双极晶体管				
H3	(insulated gate bipolar transistor, IGBT)	18×20×2	10	36
H4	整流桥	20×30×2	20	35

传统铝翅散热器的几何模型如图 5 所示。图 5 中 H1、H4 为绝缘功率器件,H2、H3 为不绝缘功率器件,需添加绝缘导热垫片(0.3 mm 厚,导热系数为 5 W/(m·K))。

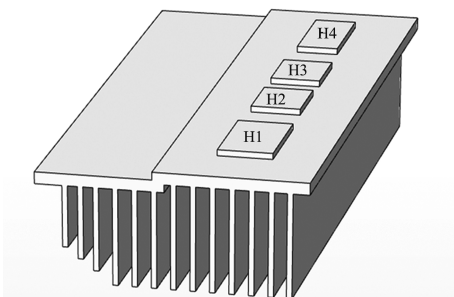


图 5 铝翅散热器几何模型

Fig.5 Geometry model of an aluminum extruded radiator

本研究在散热器开槽布点处设置边界点探针作为芯片温度检测点,其位置如图 6 所示。

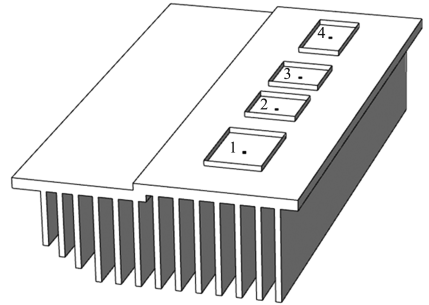


图 6 芯片温度检测点位置示意图

Fig.6 Schematic diagram of the temperature test points

铝质吹胀型平板回路热管散热器的几何模型如图 7 所示。其中,铝挤翅片尺寸为 175 mm×38 mm×30 mm,散热基板厚度为 5 mm,翅片器齿数为 23,齿高为 25 mm,齿厚为 2.5 mm。

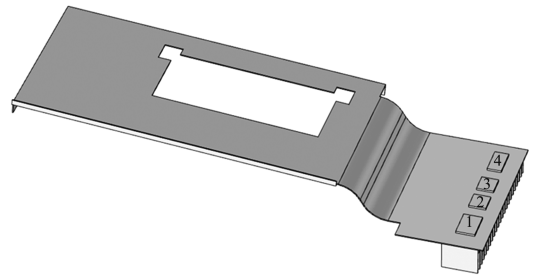
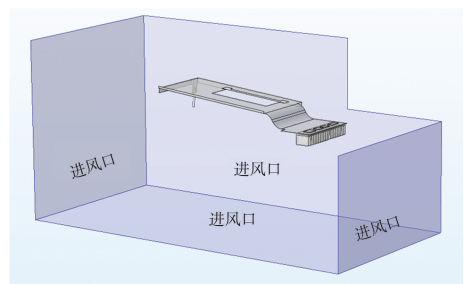


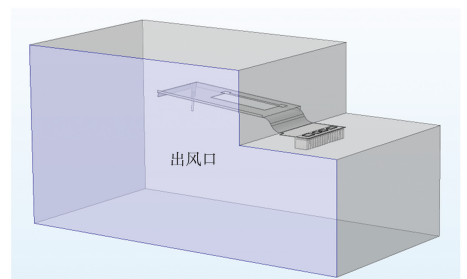
图 7 铝质吹胀型平板回路热管散热器几何模型

Fig.7 Geometric model of a roll bond aluminum flat loop heat pipe radiator

根据实际工况将模型简化并设置进风口和出风口,如图 8 所示。



(a) 进风口



(b) 出风口

图 8 仿真模型进出风口边界

Fig.8 Inlet and outlet boundaries of the simulation model

### 2.2 网格划分

铝质吹胀型平板回路热管散热器的模型如图9所示,划分网格均采用自由四面体网格。本研究对该模型进行网格无关性验证,结果如图10所示。由图10可知,随着网格的细化,在4个功率器件检测点处的温度变化趋于一致。综合模拟计算的精度和效率,选定最佳网格为12.5万个。

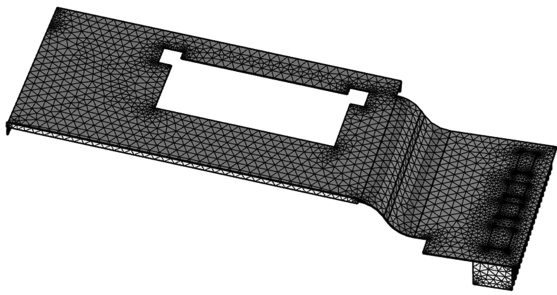


图9 铝质吹胀型平板回路热管散热器模型网格  
Fig.9 Schematic model meshing of the roll bond aluminum flat loop heat pipe radiator

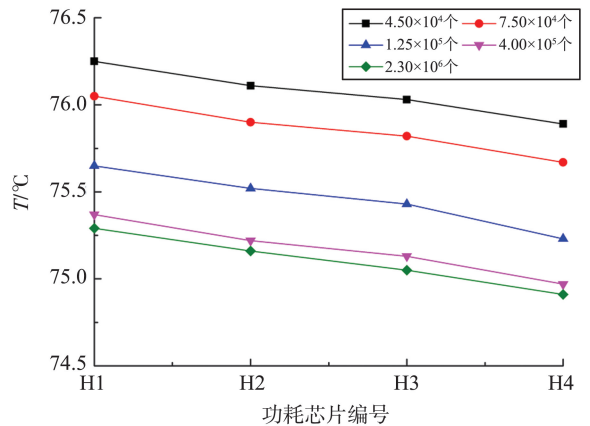


图10 不同网格数量下芯片温度  
Fig.10 Temperature of chips under different numbers of grids

### 2.3 求解设置

本研究的数值模拟基于 COMSOL Multiphysics 6.2软件(评估版),采用共轭传热模型,选择稳态研究。湍流模型选用非等温流传热模型,模拟计算条件的设置如表3所示。

表3 模拟计算条件设置参数

Table 3 Setting parameters for simulation conditions

进风口风速/ (m·s <sup>-1</sup> )	进风口 温度/°C	导热系数/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )			变频功率器件总功率/W	
		平板热管	铝翅散热器	变频功率器件	36 Hz	68 Hz
3	62	20 000	201	180	80	123

## 3 结果与讨论

传统铝翅散热器和铝质吹胀型平板回路热管散热器的散热仿真云图分别如图11、12所示,变频功率器件检测点的温度如表4所示。相较于传统铝翅散热器,同样工况下,采用铝质吹胀型平板

回路热管散热器的功率器件散热性能更优:当热耗为80 W时,IPM降低19.55 °C,二极管降低16.71 °C,IGBT降低15.29 °C,整流桥降低14.60 °C,整体降幅为16.17%~20.45%;当热耗为123 W时,IPM降低28.68 °C,二极管降低29.05 °C,IGBT降低30.71 °C,整流桥降低26.69 °C,整体降幅为23.33%~25.69%。

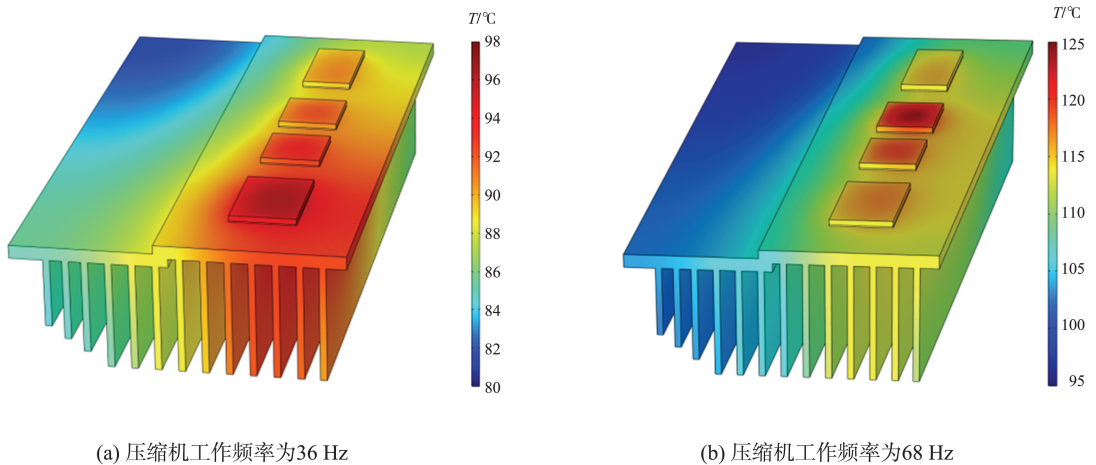
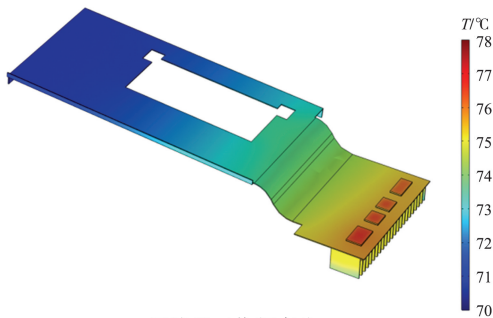
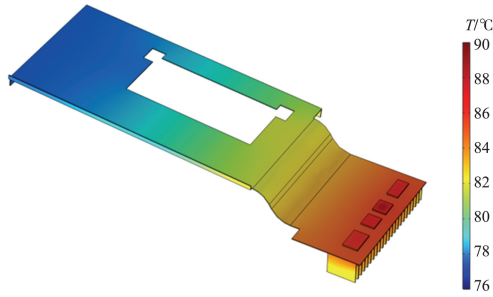


图11 铝翅散热器功率器件仿真温度  
Fig.11 Simulation temperature distribution of power devices on the aluminum extruded radiator



(a) 压缩机工作频率为36 Hz



(b) 压缩机工作频率为68 Hz

图 12 铝质吹胀型平板回路热管散热器功率器件仿真温度  
Fig.12 Simulation temperature distribution of power devices on the roll bond aluminum flat loop heat pipe radiator

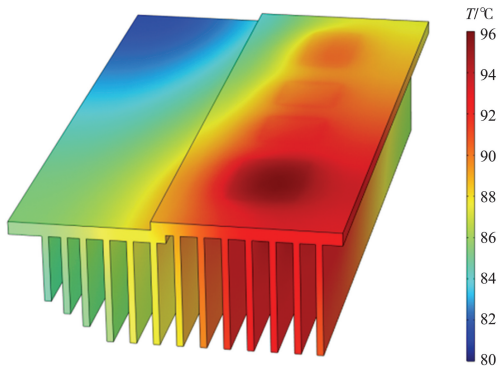
表 4 两种散热器的功率器件模拟温度  
Table 4 Simulation temperature of power devices on the two radiators

散热器类型	T/°C			
	H1	H2	H3	H4
铝翅散热器(80 W)	95.60	92.61	91.11	90.27
铝质吹胀型平板回路热管散热器(80 W)	76.05	75.90	75.82	75.67
铝翅散热器(123 W)	116.15	117.08	119.53	114.39
铝质吹胀型平板回路热管散热器(123 W)	87.47	88.03	88.82	87.70

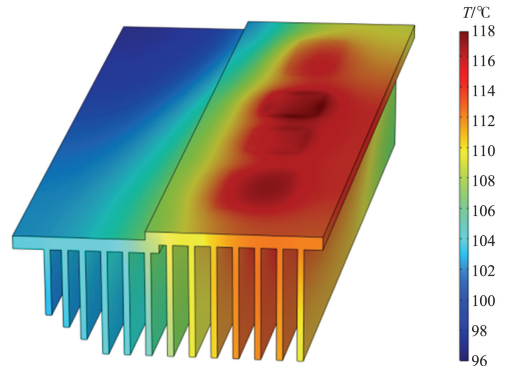
### 3.1 散热器均温性比较

铝翅散热器和铝质吹胀型平板回路热管散热器的温度分布如图 13、14 所示。

功率器件热功率为 80 W 时,铝翅散热器最大温差为 14.4 °C,铝质吹胀型平板回路热管散热器最大温差为 4.7 °C;功率器件热功率为 123 W 时,铝翅散热器最大温差为 20.8 °C,铝质吹胀型平板回路热管散热器最大温差为 7.9 °C。



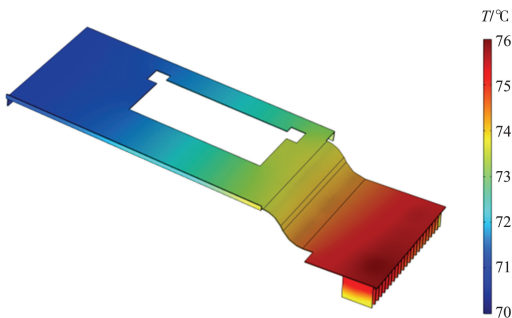
(a) 压缩机工作频率为36 Hz



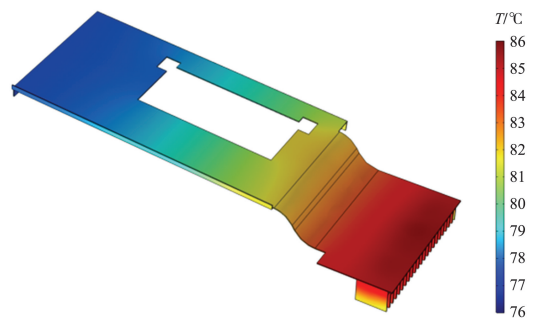
(b) 压缩机工作频率为68 Hz

图 13 铝翅散热器仿真温度分布

Fig.13 Simulation temperature distribution of the aluminum extruded radiator



(a) 压缩机工作频率为36 Hz



(b) 压缩机工作频率为68 Hz

图 14 铝制吹胀型平板回路热管散热器仿真温度分布

Fig.14 Simulation temperature distribution of the roll bond aluminum flat loop heat pipe radiator

两种热源功率下,铝质吹胀型平板回路热管散热器的温差均明显小于铝翅散热器,均温性更优。

### 3.2 试验数据与仿真对照

变频功率器件模拟温度与试验温度对比如表 5

所示。由表5可知,模拟温度与试验温度误差在3%以内。

表5 变频功率器件模拟温度与试验温度  
Table 5 Experimental measurement values and simulation values of the chips temperature

变频功率器件	模拟温度/℃	试验温度/℃	误差/%
H1	87.47	89.90	2.70
H2	88.03	88.40	0.42
H3	88.82	91.50	2.90
H4	87.70	87.70	0

### 3.3 空调焓差室制冷能力

把铝质吹胀型平板回路热管散热器在海尔某款变频空调76柜机KFR-76LW/01XDA83的室外机集成,经整机焓差室测试表明,室外侧53℃且室内侧35℃/26℃工况的制冷量为7628W,制冷能力为100%;室外侧62℃且室内侧35℃/26℃工况的制冷量为3300W。

## 4 结论

本文研制了一种无毛细芯的铝质吹胀型平板回路热管散热器,并结合变频空调室外机的变频散热应用进行仿真和试验,主要研究结论如下。

(1) 铝质吹胀型平板回路热管散热器的均温性能、散热性能均优于传统铝翅散热器。模拟仿真结果显示,相较于传统铝翅散热器,采用铝质吹胀型平板回路热管散热器时,在相同工况下4个功率器件的温度均更低。当热耗为80W时,温度整体降幅为16.17%~20.45%;当热耗为123W时,温度整体降幅为23.33%~25.69%。

(2) 通过铝质吹胀型平板回路热管散热器,解决空调室外机的变频高温散热难题,实现海尔某76柜机空调在室外机周边温度53℃工况下依然具备100%的制冷能力。在室外机周边温度62℃时,不降频运行或停机,可有效应对目前出现的42℃以上的极端高温天气,适合于我国高温地区 and 高温季节使用,也有助于推广到热带国家和地区应用。

### 参考文献:

[1] 于永全,贺素艳,王军,等. 高温制冷家用空调器性能研究[J]. 制冷, 2014, 33(4): 10-15.  
YU Yongquan, HE Suyan, WANG Jun, et al. Research on performance of high temperature refrigeration

household air conditioner [J]. Refrigeration, 2014, 33(4): 10-15.  
[2] 曲燕,程林,栾涛. 非规则截面散热板内嵌热管的传热能力分析[J]. 山东大学学报(工学版), 2008, 38(5): 42-45.  
QU Yan, CHENG Lin, LUAN Tao. Transport capacity analysis for special cross section heat pipes in radiators [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2008, 38(5): 42-45.  
[3] CHEN Z S, LI Y, ZHOU W J, et al. Design, fabrication and thermal performance of a novel ultra-thin vapour chamber for cooling electronic devices [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 187: 221-231.  
[4] LI Y, ZHOU W J, LI Z X, et al. Experimental analysis of thin vapor chamber with composite wick structure under different cooling conditions [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 156: 471-484.  
[5] ZHOU W J, CHEN Y T, LI Y, et al. Experimental study on improving the heat transfer performance of large-diameter thin flattened heat pipes [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024, 61: 105159.  
[6] ZHOU W J, LI Y, HUANG G W, et al. Thermal performance of a large-diameter thin flattened heat pipe with novel composite wick structure [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024, 57: 104352.  
[7] 陆万鹏,史月涛,孙奉仲. 分离式热管换热器与低压省煤器的性能分析[J]. 山东大学学报(工学版), 2012, 42(2): 102-107.  
LU Wanpeng, SHI Yuetao, SUN Fengzhong. Performance analyses of separated type heat pipe and low pressure economizer [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2012, 42(2): 102-107.  
[8] ZHOU W J, LI Y, CHEN Z S, et al. Experimental study on the heat transfer performance of ultra-thin flattened heat pipe with hybrid spiral woven mesh wick structure [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 170: 115009.  
[9] LI Y, ZHOU W J, LI Z X, et al. Experimental analysis of thin vapor chamber with composite wick structure under different cooling conditions [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 156: 471-484.  
[10] 黄大革,杨双根. 高热流密度电子设备散热技术[J]. 流体机械, 2006, 34(9): 71-74.  
HUANG Dage, YANG Shuanggen. Cooling technique for high flux electronic [J]. Fluid Machinery, 2006, 34(9): 71-74.  
[11] 兰州石油机械研究所. 换热器[M]. 2版. 北京: 中国石化出版社, 2013: 1387-1437.

- [12] 金利强, 朱建军, 王懿, 等. 重力热管两相传热特性影响参数的数值研究[J]. 风机技术, 2023(5): 63-68.  
JIN Liqiang, ZHU Jianjun, WANG Yi, et al. Numerical study on the influence parameters of two-phase heat transfer characteristics of gravity heat pipe[J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 2023(5): 63-68.
- [13] 方彬. 热管节能减排换热器设计与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013: 1-20.
- [14] DENG L Q, LI Y, XIN Z F, et al. Thermal study of the natural air cooling using roll bond flat heat pipe as plate fin under multi-heat source condition[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2023, 183: 107834.
- [15] DENG L Q, LI Y, XU P K, et al. Fabrication and thermal performance of a novel roll-bond flat thermosyphon [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 181: 115959.
- [16] 李勇, 徐沛悬, 杨世凡, 等. 吹胀型铝质均热板的传热性能[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2020, 48(2): 34-41.  
LI Yong, XU Peixuan, YANG Shifan, et al. Thermal performance of roll bond aluminum vapor chamber[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 48(2): 34-41.
- [17] 刘念, 唐永乐, 张学伟, 等. 倾角对平板型 LHP 运行性能的影响[J]. 节能, 2024, 43(4): 57-60.  
LIU Nian, TANG Yongle, ZHANG Xuewei, et al. Effect of inclination on the operating performance of flat plate LHP [J]. Energy Conservation, 2024, 43(4): 57-60.
- [18] 浮恒. 面向服务器芯片散热的吹胀型分离式环路热管冷却系统研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2023: 14-30.  
FU Heng. Research on the roll-bond separated-loop heat pipe cooling system for server chip heat dissipation[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2023: 14-30.
- [19] 徐佳, 王定远, 白耀文, 等. 基于热虹吸平板热管的半导体制冷冰箱散热研究[J]. 家电科技, 2018(4): 82-85.  
XU Jia, WANG Dingyuan, BAI Yaowen, et al. Research on the heat rejection performance of one semiconductor refrigerator based on thermosyphon plate heat pipe [J]. Journal of Appliance Science & Technology, 2018(4): 82-85.
- [20] 胡卓焕, 丁效誉, 许佳寅. 特斯拉阀通道结构毛细芯对环路热管启动性能的影响[J]. 化工进展, 2024(11): 6031-6038.  
HU Zhuohuan, DING Xiaoyu, XU Jiayin. Effect of Tesla-valve-structure wicks on the start-up performance of loop heat pipes [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2024(11): 6031-6038.
- [21] 柳洋, 朱波, 陈超伟, 等. 多热源冷却的新型环路热管设计及性能[J]. 山东大学学报(工学版), 2025, 55(6): 1-10.  
LIU Yang, ZHU Bo, CHEN Chaowei, et al. Design and performance of a novel loop heat pipe for multi-heat-sources cooling [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(6): 1-10.

(编辑:郭少华)