

文章编号:0253-4339(2026)02-0069-08
doi: 10.12465/issn.0253-4339.20241127002

入口铝管内径对电池冷却器换热性能的影响

马国浩¹ 卢曦¹ 郭佳琳²

(1 上海理工大学机械工程学院 上海 200093; 2 上海谦和泰技术有限公司 上海 200000)

摘要 基于两器(蒸发器、冷凝器)系统台架,对制冷剂侧入口铝管内径分别为5、8、12、15 mm的电池冷却器传热性能进行实验,研究了不同入口铝管内径对该电池冷却器压降和换热功率的影响。在2种不同的工况条件下,该电池冷却器入口铝管内径从5 mm增至8 mm的过程中,工况1(制冷剂侧:阀前压力2 MPa、阀前过冷度5 °C、出口压力0.4 MPa,出口过热度5 °C;冷却液侧:入口温度25 °C、流量16 L/min)压降从231.5 kPa降至52 kPa,工况2(制冷剂侧:阀前压力1.9 MPa、阀前过冷度5 °C、出口压力0.35 MPa,出口过热度5 °C;冷却液侧:出口温度15 °C、流量20 L/min)压降从262.5 kPa降至111.7 kPa,且质量流量和换热功率均增加;入口铝管内径从8 mm增至15 mm的过程中,工况1压降从52 kPa降至13.6 kPa,工况2压降从111.7 kPa降至30.8 kPa,与此同时电池冷却器的质量流量和换热功率均降低。在2种不同工况下换热功率均在8 mm管径下达到最大值,工况1为9 214.7 W,工况2为13 698.1 W。通过将不同入口铝管管径与换热功率拟合关系式可以匹配合适的入口管径以获得最大的换热功率。

关键词 电池冷却器;入口铝管内径;不确定度;压降;换热功率

中图分类号: TB657.5;TK124

文献标识码: A

Effect of the Inlet Aluminum Tube Inner Diameter on the Heat Transfer Performance of Battery Coolers

Ma Guohao¹ Lu Xi¹ Guo Jialin²

(1. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China; 2. Shanghai QHT Technology Co., Ltd., Shanghai, 200000, China)

Abstract In this study, based on a two-unit (evaporator and condenser) system bench, the heat transfer performance of a battery cooler with refrigerant-side inlet aluminum tube inner diameters (IATIDs) of 5 mm, 8 mm, 12 mm, and 15 mm was investigated. The effects of the different IATIDs on the pressure drop and heat transfer power of the battery cooler were also investigated. When the IATLD of the battery cooler increased from 5 mm to 8 mm, the pressure drop in working condition 1 (refrigerant side: expansion valve inlet pressure of 2 MPa, valve inlet subcooling degree of 5 °C, cooler outlet pressure of 0.4 MPa, and cooler outlet superheat degree of 5 °C, coolant side: inlet temperature of 25 °C and flow rate of 16 L/min) reduced from 231.5 kPa to 52 kPa, and the pressure drop in working condition 2 (refrigerant side: valve inlet pressure of 1.9 MPa, valve inlet subcooling degree of 5 °C, cooler outlet pressure of 0.35 MPa, and cooler outlet superheat degree of 5 °C, coolant side: outlet temperature of 15 °C and flow rate of 20 L/min) reduced from 262.5 kPa to 111.7 kPa. The mass flow rate and heat transfer rate increased. When the IATID increased from 8 mm to 15 mm, the pressure drop in working condition 1 reduced from 52 kPa to 13.6 kPa, the pressure drop in working condition 2 reduced from 111.7 kPa to 30.8 kPa, and the mass flow rate and heat transfer rate decreased. The heat transfer rate attained a maximum value at an IATID of 8 mm under the two conditions, i. e. 9 214.7 W for condition 1 and 13 698.1 W for condition 2. By fitting the relationship between different IATIDs and heat transfer rate, we can match the appropriate IATID to obtain the maximum heat transfer rate.

Keywords battery cooler; inlet aluminum tube inner diameter; uncertainty; pressure drop; heat transfer rate

电池作为新能源汽车的动力来源,已成为电动汽车的核心组件之一^[1-2]。而在充、放电过程中动力电池会产生大量的热量^[3],若不能及时将这些热量带走,电池温度就会过高,导致变形、性能下降,甚至引起安全事故^[4-5]。而电池冷却器作为一种换热器,其

功能是利用两相制冷剂通过板片与另一侧的冷却液进行换热,从而降低冷却液温度,进而达到冷却动力电池的目的^[6-7]。因此,电池冷却器对于保证电池的稳定性和安全性至关重要。对于换热器的换热性能,国内外学者进行了大量研究。刘鹏鹏等^[8]研究了

基金项目:国家自然科学基金(51975379)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51975379).)

收稿日期:2024-11-27;修回日期:2024-12-21;录用日期:2025-02-13

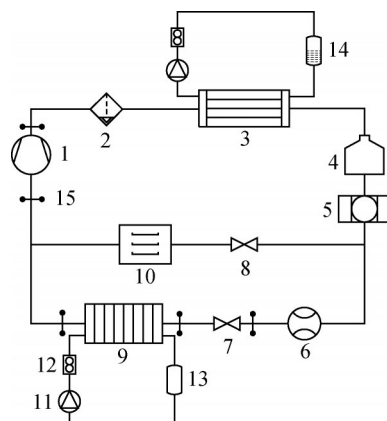
光管和2种不同管径的强化管在R410A下的管内沸腾实验,结果表明2种管径下强化管的换热性能有所差异,但均优于光管。李成恩等^[9]对换热器的翅片结构进行优化,发现优化后的翅片结构用5 mm空调管径替代7 mm管径时可达到相同的换热量,且成本降低了26%。F. A. Tereda等^[10]通过对某板式换热器不同流量、不同进出口管径进行实验,得出流动分布不均匀度随着流量的增加而增加,随孔径的减小而减小的结论。王磊^[11]通过对管式换热器管径变化的研究发现,在管列间距和管排间距合理分配的前提下, $\varphi 7.94$ mm和 $\varphi 7$ mm的管径可以达到 $\varphi 9.52$ mm的换热量。赵定乾^[12]提出了小管径空调器的流路设计与分流器的设计思路,减小了制冷剂在小管径中的分配不均匀度。邱晗等^[13]对超临界CO₂流体在管内径为22.12 mm的螺旋槽管和光管的冷却换热进行了对比,结果表明螺旋槽管的平均传热系数远高于光管。韩广明等^[14]研究了对多种制冷剂在相同工况下管内径对冷凝器性能的影响,发现压降随着管内径的增加呈现下滑的趋势,当内径达到12 mm时,压降达到稳定。H. T. Chen等^[15]研究了2种不同直径的板翅式换热器和管式换热器的流体流动特性。S. Alqaed等^[16]以带湍流器的换热器为对象,研究了湍流器孔径和间距的变化对压降和熵的影响。王婷婷等^[17]以2种不同功能的空调进行优化设计,并总结了空调器用小管径代替大管径的优化设计准则。B. D. Raja等^[18]以传热系数最大化和总压降最小化为目标对板式换热器进行优化,通过对端口直径、端口水平距离、端口垂直距离、板厚、板数、V型角度等多因素进行设计,结果表明,端口直径、V型角度和板数是重要的几何参数。广东美的制冷设备有限公司分别对管径为5 mm^[19]、6 mm^[20]换热器进行研究。张阳等^[21]研究了吸排气管径变化对空调系统制冷性能的影响,结果表明,改变吸排气管的管径会直接影响管内的温降或压降。

目前文献中对换热器换热性能的研究主要是改变换热器内部结构,以增加传热系数,缺少对板式换热器与空调系统相连接处铝管内径变化对传热性能的影响研究。本文旨在通过实验测试,深入研究制冷剂侧入口铝管内径(inlet aluminium tubes inner diameters, IATID)变化对电池冷却器压降和换热功率的影响规律。

1 空调系统单体测试系统

汽车空调系统单体测试系统图如图1所示,包括3个循环回路:水冷冷凝器循环回路(图1上侧),该回

路用来将压缩后的高温高压气态制冷剂冷凝为中温高压的液态制冷剂;冷却液循环回路(图1下侧),其中循环液体为体积分数为50%的乙二醇溶液;制冷循环。本文中制冷循环工质为R134a,首先油分离器将压缩后的气态制冷剂中的润滑油进行分离,避免润滑油对实验结果准确性的影响^[22],分离后进入到水冷冷凝器冷凝,冷凝后多余的液态制冷剂存储在储液罐内,然后流经过滤干燥器和流量计,过滤干燥器不仅可以吸收制冷系统的水分,还可以过滤系统的杂质,避免制冷管路发生冰堵和脏堵;之后到达主路膨胀阀前,该膨胀阀为可调节开度的电子膨胀阀,主要作用是降低冷凝后制冷剂液体的压力和温度,还可以调节制冷剂流量,通过调节不同开度可实现不同的节流降压效果,膨胀后低温低压的湿蒸气经过电池冷却器吸收来自冷却液的热量后蒸发为气态,之后被吸入压缩机,完成一次制冷循环。为了更好地控制主路流量以及防止压缩机液击,在该干燥过滤器后旁通一条辅路,主要由辅路膨胀阀和量热器组成。



1 压缩机; 2 油分离器; 3 冷凝器; 4 储液罐; 5 干燥过滤器;
6 质量流量计; 7 主路膨胀阀; 8 辅路膨胀阀; 9 电池冷却器;
10 量热器; 11 电子水泵; 12 水侧体积流量计; 13 模拟热源;
14 恒温水槽; 15PT传感器。

图1 换热器单体测试系统

Fig.1 Heat exchanger unit test system

电池冷却器的结构如图2所示,由许多板片堆叠而成,冷却液和制冷剂在板片之间的流道以对流的形式流动,对流过程中R134a蒸发吸收冷却液的热量,冷却液被冷却后由电子水泵驱动至动力电池组以带走电池放电过程中散发的热量,从而实现电池冷却的效果。

根据QC/T 664—2000《汽车空调用软管及软管组合件》^[23]可知,汽车空调系统中连接管路的内径范围为4.8~29 mm,而考虑到成本和换热能力的影响,目

前蒸发器入口段的内径大部分控制在 6~15 mm,因此,本文针对电池冷却器设置了铝管长度为 100 mm,内径分别为 5、8、12、15 mm 的 4 种入口管径,以此来分析不同入口铝管内径对电池冷却器压降和换热功率的影响。

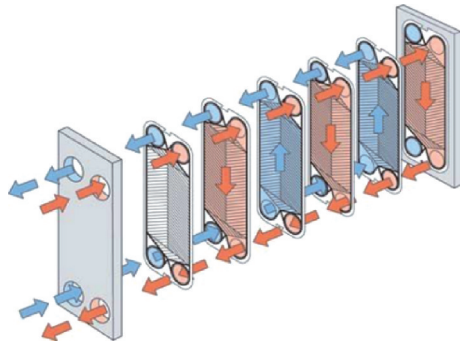


图 2 电池冷却器结构

Fig.2 Structure of chiller

该测试系统的主要零部件规格参数如表 1 所示,传感器精度和测量范围如表 2 所示。

表 1 主要部件规格参数

Tab.1 Specifications of the main components

设备	特性参数
压缩机	最大制冷量约 36 kW
油分离器	分离精度达 99%
冷凝器	最大换热功率 50 kW
量热器	最大加热功率 25 kW
干燥过滤器	过滤精度 20 μm

表 2 测量仪器及参数

Tab.2 Measure component parameters

测量参数	测量仪表	量程	精度
制冷剂温度	铂电阻	-200~600 °C	±0.1 °C
制冷剂压力	高压传感器	0~4 MPa	±0.2%
	低压传感器	0~1.6 MPa	±0.2%
冷却液温度	热电偶	-40~200 °C	±0.5 °C
冷却液流量	涡轮流量计	0~60 L/min	±0.2%
制冷剂流量	高精度质量流量计	0~500 kg/h	±0.1%

2 实验方案

2.1 测试方法

按照 JB/T 8701—2018《制冷用板式换热器》^[24]中对换热量的测定要求,工况测试时至少需要稳定 30 min,且每个工况采集 7 组数据,每组数据间隔相等且不少于 3 min。实验测试工况如表 3 所示。

表 3 实验工况

Tab.3 Test conditions

介质	项目	工况 1	工况 2
制冷剂侧	阀前压力/MPa	2	1.9
	阀前过冷度/°C	5	5
	出口压力/MPa	0.4	0.35
	出口过热度/°C	5	5
冷却液侧	入口温度/°C	25	—
	出口温度/°C	—	15
	流量/(L/min)	16	20

注:表中压力为表示绝对压力。

2.2 电池冷却器换热功率计算

近似认为膨胀阀前后焓值相等,电池冷却器进出口的焓差可由电池冷却器出口的制冷剂压力和过热度以及阀前制冷剂的压力和过冷度得到,然后根据测量得到的质量流量,即可获得制冷剂侧的换热功率:

$$Q_{\text{ref}} = F_m (H_{\text{out}} - H_{\text{in}}) \quad (1)$$

式中: Q_{ref} 为制冷剂侧的换热功率,W; F_m 为制冷剂的质量流量,kg/h; H_{in} 为入口的制冷剂焓值,kJ/kg; H_{out} 为出口的制冷剂焓值,kJ/kg。

计算中涉及的制冷剂所有物性均通过 REFPROP 查阅得到。

2.3 热平衡条件

理论上电池冷却器冷却液侧和制冷剂侧的换热功率应该是相等的。

冷却液侧换热功率计算式为:

$$Q_c = \rho c F_v (T_{\text{in}} - T_{\text{out}}) \quad (2)$$

式中: Q_c 为冷却液的换热功率,W; T_{in} 为冷却液进口温度,°C; T_{out} 为冷却液出口温度,°C; c 为冷却液比热容,J/(kg·K); ρ 为冷却液密度,kg/m³; F_v 为冷却液体积流量,L/min。

但考虑到环境温度影响,制冷剂 and 冷却液均会与环境发生热交换,因此造成制冷剂侧与冷却液侧的换热功率会有偏差,即热平衡比:

$$\eta = \frac{Q_{\text{ref}} - Q_c}{Q_{\text{ref}}} \quad (3)$$

式中: η 为热平衡比,%; Q_{ref} 为制冷剂侧换热功率,W; Q_c 为冷却液侧换热功率,W。

由 GB/T 27698—2013《热交换器及传热元件性能测试方法》^[25]确定该电池冷却器能效测试允许的热平衡比不超过 3% 则记为该数据有效。

2.4 测试结果不确定度分析

该测试系统的不确定度主要由测试设备、测试

人员、测试方法、环境温湿度和统计分析等引入。由于测试仪器全程固定且数据为自动采集,因此测试人员、测试方法和环境温湿度的影响可忽略不计。该电池冷却器性能测试的不确定度主要为测试设备和统计分析。

2.4.1 测试设备不确定度

测试设备自身的不确定度可通过设备校准证书直接获取,或基于鉴定证书的结论,并根据B类不确定度的计算方法进行计算,计算式^[26]如下:

$$U_B = a/k \quad (4)$$

式中: a 为被测量可能值区间的半宽度; k 为置信因子。

2.4.2 测试参数测量不确定度

1) 制冷剂侧不确定度。

$$U_c(Q_1) = \sqrt{u_1^2 + (c_2u_2)^2 + (c_3u_3)^2 + (c_4u_4)^2} \quad (5)$$

$$U(Q_1) = k_1U_c(Q_1) \quad (6)$$

式中: $U_c(Q_1)$ 为制冷剂侧合成标准不确定度; $U(Q_1)$ 为制冷剂侧扩展不确定度; k_1 为制冷剂侧扩展因子; u_1 为制冷剂侧换热功率多次测量引起的A类标准不确定度分项; u_2 为制冷剂流量测试引起的B类标准不确定度分项; u_3 、 u_4 分别为进、出口焓值测试引起的B类标准不确定度分项; $c_2 \sim c_4$ 为灵敏系数。

2) 冷却液侧不确定度。

$$U_c(Q_2) = \sqrt{u_5^2 + (c_6u_6)^2 + (c_7u_7)^2 + (c_8u_8)^2} \quad (7)$$

$$U(Q_2) = k_2U_c(Q_2) \quad (8)$$

式中: $U_c(Q_2)$ 为冷却液侧合成标准不确定度; $U(Q_2)$ 为冷却液侧扩展不确定度; k_2 为冷却液侧扩展因子; u_5 为冷却液侧换热功率多次测量引起A类的标准不确定度; u_6 为冷却液流量测试引起的B类标准不确定度分项; u_7 、 u_8 分别为进、出口温度测试引起的B类标准不确定度分项; $c_6 \sim c_8$ 为灵敏系数。

由冷却液的比热容和密度导致的测量不确定度远小于上述因素,因此本文不予考虑。

以工况1入口铝管管径为5 mm下的测试结果(表4)以及测试元器件的不确定度,计算出 $U_c(Q_1) = 93.26 \text{ W}$ 、 $U_c(Q_2) = 111.73 \text{ W}$ 。

取置信概率 $p = 95\%$,扩展因子 $k_1 = k_2 = 2$,最终得出 $U(Q_1) = 186.52 \text{ W}$ 、 $U(Q_2) = 223.46 \text{ W}$ 。

该电池冷却器在此工况下测得的制冷剂侧换热功率为9 036.8 W,冷却液侧换热功率为9 067.1 W,热平衡比为-0.34%,制冷剂侧换热功率测量不确定度为2.06%,冷却液侧换热功率测量不确定度为2.46%。制冷剂侧与冷却液侧测量的换热功率不确定度均小于3%,由此可得该测试方法测量结果的正

确性。

表4 工况1入口铝管内径为5 mm的测试结果

Tab.4 Test results of 5 mm inner diameter of inlet aluminum tube under working condition 1

测点	数值
阀前过冷度/°C	4.94
出口过热度/°C	4.95
阀前焓值/(kJ/kg)	291.68
出口焓值/(kJ/kg)	408.38
制冷剂侧换热功率/W	9 036.8
冷却液侧换热功率/W	9 067.1
热平衡比/%	-0.34

3 实验结果分析及讨论

将该电池冷却器连接到换热器单体实验室中,为减小环境温度对实验结果的影响,整个系统管路及样件均包有15~20 mm厚的福乐斯保温棉,如图3所示。



图3 测试中的电池冷却器

Fig.3 Chiller in test

3.1 不同入口铝管内径对压降的影响

制冷剂压降计算式:

$$p_d = p_{in} - p_{out} \quad (9)$$

式中: p_d 为流经电池冷却器的压降,kPa; p_{in} 为电池冷却器进口处的压力,kPa; p_{out} 为电池冷却器出口处的压力,kPa。

由于同一工况下制冷剂出口压力保持不变,因此压降与制冷剂进口压力直接相关。不同入口管径下制冷剂进口压力的变化如图4所示。

由图4可知,随着入口铝管内径的增加,进口压力均有所下降。由进口压力可得压降变化趋势如图5所示。

在2种不同的工况下,电池冷却器压降均随着入口铝管内径的增大呈递减趋势。内径从5 mm增至8

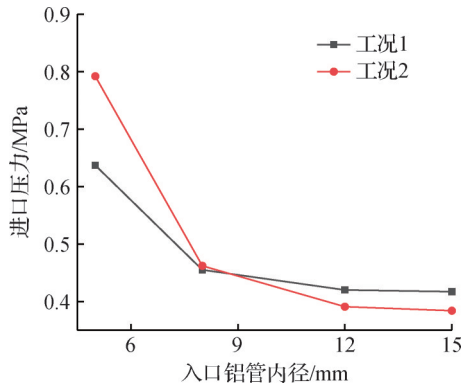


图 4 不同入口铝管内径对进口压力的影响

Fig.4 Effect of different IATIDs on inlet pressure

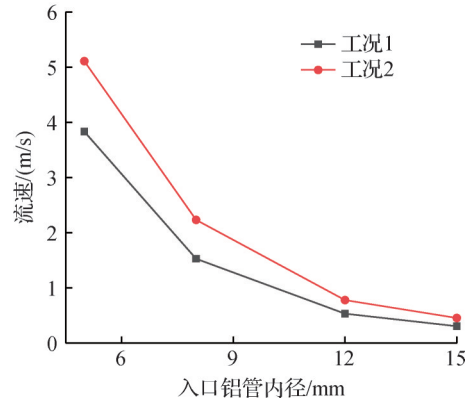


图 6 不同入口铝管内径对流速的影响

Fig.6 Effect of different IATIDs on flow velocity

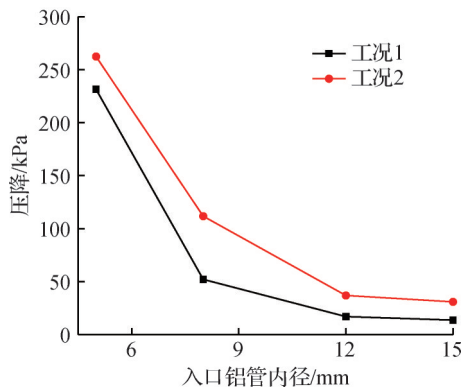


图 5 不同入口铝管内径对压降的影响

Fig.5 Effect of different IATIDs on pressure drop

mm 过程中压降降低最多,随着内径增至 15 mm,压降的减小量越来越趋于平缓。

制冷剂在电池冷却器内的压降主要由摩擦压降、加速压降和重力压降 3 部分组成^[27],但对压降组分比重的测试结果显示,摩擦压降约占总压降的 90%^[28]。所以不同内径对压降的影响可以通过其对摩擦压降的影响进行解释。

由米洛保尔斯基计算式可得流速对摩擦阻力压力降有较大影响^[29],通过测得的质量流量计算得到不同内径下的制冷剂流速变化趋势如图 6 所示。由图 6 可知,在相同工况下,随着入口铝管内径的增加,管内制冷剂的流速逐渐降低,在管径从 5 mm 增至 15 mm 的过程中,工况 1 中制冷剂的流速从 3.832 m/s 减至 0.305 m/s,工况 2 中制冷剂的流速从 5.108 m/s 减至 0.455 m/s。其变化趋势与压降的变化趋势完全一致。这是因为制冷剂的气液速度差随着管径的减小而增大,进而导致制冷剂气液界面间剪切力的增加,这不仅会导致气液界面间摩擦压降的增加,还导致制冷剂液膜与电池冷却器内壁面之间摩擦压降的增加,进而加大制冷剂的流动功耗。

此外,在同一入口铝管内径下,工况 2 比工况 1

的压降稍大。一方面,在相同的入口管内径下工况 2 的流速较工况 1 快,使制冷剂气液界面间摩擦压降增加,从而导致压降增加。另一方面,工况 2 相比工况 1 而言,工况 2 中电池冷却器出口压力较低,相应的其蒸发温度和蒸发压力也较低。由制冷剂 R134a 热力计算物性参数表(压力、焓、焓、黏度、密度、比热容)可知,蒸发温度和蒸发压力较低时,制冷剂 R134a 的运动黏度较高,黏度较高的流体意味着分子间的内聚力和分子间的摩擦力较大,而分子间的相互作用力阻碍了流体分子的相对运动,从而增加了流体流动的阻力。因此,在相同的入口管径下,工况 2 的压降高于工况 1。

3.2 不同入口铝管内径对换热功率的影响

由式(1)可知,电池冷却器换热功率仅与制冷剂进出口焓差和流经电池冷却器的质量流量成正比,而在该 2 种工况下由于进出口的温度和压力均为定值,因此其进出口焓值也确定,即该电池冷却器的换热功率仅与制冷剂质量流量有关。由质量流量计测得 2 种不同工况下质量流量随入口铝管内径的变化趋势如图 7 所示。

由图 7 可知,随着管径的增加,流经电池冷却器

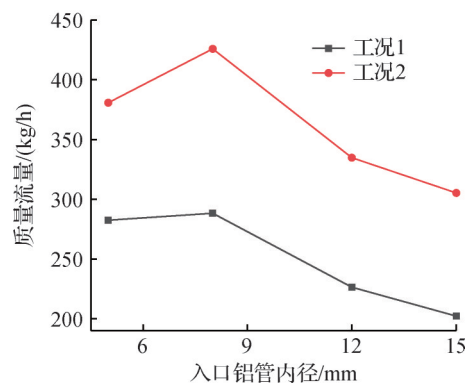


图 7 不同入口铝管内径对质量流量的影响

Fig.7 Effect of different IATIDs on mass flow

的制冷剂质量流量呈现出先增加后减小的趋势,且均在8 mm入口管径下达到最大,工况1质量流量为288.3 kg/h,工况2质量流量为425.9 kg/h,在12 mm和15 mm管径下迅速下降。

在相同工况下,当入口铝管内径为5 mm时,制冷剂经过膨胀阀后形成的湿蒸气在受限的管道内流动,能够充分换热并实现蒸发出口过热5℃。则当入口铝管内径增至8 mm时,此时在电池冷却器入口段湿蒸气中气相含量增多,为了维持出口过热5℃的条件,则需要适当增大膨胀阀的开度,使流入电池冷却器的制冷剂增加。当入口铝管内径继续增至12~15 mm时,此时管径已超过电池冷却器入口尺寸,会在入口处产生节流效应,该节流效应导致大量湿蒸气在电池冷却器入口处聚集,形成局部高压区域,从而影响制冷剂在换热器内的分布和换热效果。为了应对该情况,需要适当减小膨胀阀开度,以减小制冷剂质量流量,确保制冷剂能够均匀、稳定地流过电池冷却器,实现预期的换热效果。

在同一入口管径下,工况2的质量流量比工况1条件下高,这是因为工况2蒸发温度低,两侧换热温差较大,且工况2冷却液侧流量较大,导致其具有较大的换热功率,而为了使两侧达到热平衡,工况2制冷剂侧需要更大的质量流量。

不同入口铝管内径对电池冷却器换热功率的影响如图8所示。随着管径的增加电池冷却器的换热功率先增加后减小,其与质量流量的变化趋势完全一致,在8 mm的入口管径下换热功率最大,工况1为9 214.7 W,工况2为13 698.1 W。

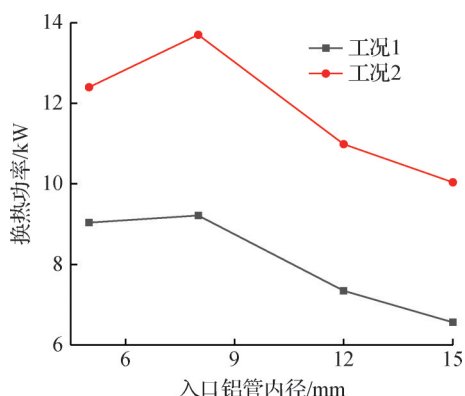


图8 不同入口铝管内径对换热功率的影响

Fig.8 Effect of different IATIDs on heat exchange power

将不同入口管径 x 下换热功率 $f(x)$ 的变化拟合为多项式:

工况1:

$$f_1(x) = 10.45x^3 - 336.32x^2 + 3\,083.8x + 719.93 \quad (10)$$

工况2:

$$f_2(x) = 21.08x^3 - 685.93x^2 + 6\,631.65x - 6\,248.81 \quad (11)$$

根据多项式可以对不同入口铝管内径下的换热功率进行预测,在工况不变的前提下不改变其他参数从而为该电池冷却器匹配合适的管径,以使其换热功率最大。

4 结论

本文通过对制冷剂侧不同入口铝管内径(5、8、12、15 mm)下的电池冷却器进行单体性能测试,研究了不同入口铝管内径对电池冷却器压降以及换热功率的影响,得到如下结论:

1)随着入口铝管内径的增大,电池冷却器的压降逐渐减小,入口管径从5 mm增至15 mm的过程中,工况1的压降从231.5 kPa降至13.6 kPa,工况2的压降从262.5 kPa降至30.8 kPa。

2)不同工况下,流经电池冷却器的质量流量呈先增加后减小的趋势,在8 mm管径下质量流量最大,工况1为288.3 kg/h,工况2为425.9 kg/h;电池冷却器的换热功率随着管径的变化趋势同流量一致,均在8 mm的管径下达到最大,工况1为9 214.7 W,工况2为13 698.1 W。

3)电池冷却器入口铝管内径的改变,可以有效改变电池冷却器的压降和换热功率,通过入口铝管内径与换热功率的拟合关系式可以匹配合适的管径以获得最大的换热功率。

参考文献

[1] 罗泽飞,覃元庆. 新能源汽车电池智能制造工艺的创新与优化研究[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(5): 1751-1753. (LUO Zefei, QIN Yuanqing. Research on the Innovation and optimization of smart manufacturing processes for new energy vehicle batteries [J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(5): 1751-1753.)

[2] ZHU Futang, WANG Yueqi, XIE Yi, et al. Analysis on battery thermal management system based on flat heat pipe at high discharging rate [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 254: 123798.

[3] 晏榆洋,付辉. 基于组合数学质量比建模的车用锂离子电池组热管理研究[J]. 汽车技术, 2024(5): 37-44. (YAN Yuyang, FU Hui. Research on thermal management of automotive lithium-ion battery packs based on combinatorial mathematical mass ratio modeling [J]. Automobile Technology, 2024(5): 37-44.)

[4] 金星,苗西朋. 锂离子动力电池充放电跟踪系统设计

- [J]. 中国测试, 2024, 50(1): 122-127. (JIN Xing, MIAO Xipeng. Design of heat tracking system for charge and discharge of lithium-ion power battery [J]. China Measurement & Test, 2024, 50(1): 122-127.)
- [5] 宗磊, 朱峰, 杜峰, 等. 电动汽车动力电池寿命衰减的影响因素分析[J]. 电源技术, 2022, 46(12): 1353-1356. (ZONG Lei, ZHU Feng, DU Feng, et al. Analysis of life decline influencing factors of electric vehicle power battery [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2022, 46(12): 1353-1356.)
- [6] MUNESHWARAN M, KIM H J, TAYYAB M, et al. Flow maldistribution in plate heat exchangers-impact, analysis, and solutions [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2025, 207: 114905.
- [7] 马秋鸣, 聂磊, 潘权稳, 等. 电动汽车电池冷却器换热性能[J]. 化工学报, 2021, 72(增刊1): 170-177. (MA Qiuming, NIE Lei, PAN Quanwen, et al. Heat exchange performance of a battery chiller for electric vehicles [J]. CIESC Journal, 2021, 72(Suppl. 1): 170-177.)
- [8] 刘鹏鹏, 黄理浩, 陶乐仁, 等. R410A 在不同直径水平单管管内换热性能研究[J]. 制冷技术, 2023, 43(4): 28-32. (LIU Pengpeng, HUANG Lihao, TAO Leren, et al. Research on heat transfer performance of R410A inside horizontal single tubes with different diameters [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2023, 43(4): 28-32.)
- [9] 李成恩, 李创业, 李日新, 等. 小管径空调冷凝器翅片的优化[J]. 制冷学报, 2024, 45(4): 150-158. (LI Cheng'en, LI Chuangye, LI Rixin, et al. Optimization on condenser fin in air conditioners with small tube diameter [J]. Journal of Refrigeration, 2024, 45(4): 150-158.)
- [10] TEREDA F A, SRIHARI N, SUNDEN B, et al. Experimental investigation on port-to-channel flow maldistribution in plate heat exchangers [J]. Heat Transfer Engineering, 2007, 28(5): 435-443.
- [11] 王磊. 铜管管径对翅片管式冷凝器性能和经济性的影响[J]. 制冷与空调(北京), 2019, 19(12): 34-38. (WANG Lei. Impact of copper tube diameter on performance and economics of finned-tube condenser [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2019, 19(12): 34-38.)
- [12] 赵定乾. 小管径空调换热器的流路设计和分流器开发[D]. 上海: 上海交通大学, 2019. (ZHAO Dingqian. Flow path design and diverter development of small-diameter air conditioning heat exchanger [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019.)
- [13] 邱晗, 陶乐仁, 李猛, 等. 超临界二氧化碳在水平螺旋槽管和光管管内传热特性的数值模拟[J]. 制冷技术, 2022, 42(4): 8-14. (QIU Han, TAO Leren, LI Meng, et al. Numerical simulation of heat transfer characteristics of supercritical carbon dioxide in horizontal spirally fluted tube and smooth tube [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2022, 42(4): 8-14.)
- [14] 韩广明, 李敏霞, 马一太. 低GWP工质空调冷凝器性能模拟计算[J]. 化工进展, 2014, 33(4): 824-830. (HAN Guangming, LI Minxia, MA Yitai. Simulation and calculation for performance of an air-conditioning condenser with low GWP working fluids [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2014, 33(4): 824-830.)
- [15] CHEN H T, LIN Y S, CHEN P C, et al. Numerical and experimental study of natural convection heat transfer characteristics for vertical plate fin and tube heat exchangers with various tube diameters [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 100: 320-331.
- [16] ALQAED S, MUSTAFA J, SHARIFPUR M. Numerical and optimization study of turbulent water-copper nanofluid flow in a heat exchanger in power plant with conical rings: investigating conical ring hole diameter's influence [J]. Annals of Nuclear Energy, 2024, 203: 110494.
- [17] 王婷婷, 任滔, 丁国良, 等. 小管径空调器的优化设计[J]. 制冷技术, 2012, 32(4): 1-4. (WANG Tingting, REN Tao, DING Guoliang, et al. Optimal design of room air conditioner with smaller diameter copper tube [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2012, 32(4): 1-4.)
- [18] RAJA B D, JHALA R L, PATEL V. Thermal-hydraulic optimization of plate heat exchanger: a multi-objective approach [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2018, 124: 522-535.
- [19] 钟宏龙, 武滔. $\varphi 5$ 柜机蒸发器应用研究[C]//第十二届全国电冰箱(柜)、空调器及压缩机学术交流大会论文集. 合肥: 中国制冷学会, 2014. (ZHONG Honglong, WU Tao. Research on the application of $\varphi 5$ cabinet evaporator [C]//Proceedings of the 12th National Refrigerator (Cabinet), Air Conditioner and Compressor Academic Exchange Conference. Hefei: Chinese Association of Refrigeration, 2014.)
- [20] 陈华. $\varphi 6$ 管换热器在热泵窗机上的应用研究[C]//2014年中国家用电器技术大会论文集. 宁波: 中国家用电器协会, 2014. (CHEN Hua. Research on the application of $\varphi 6$ tube heat exchanger in heat pump window machine [C]//Proceedings of the 2014 China Household Appliances Technology Conference. Ningbo: China Household Electrical Appliances Association, 2014.)
- [21] 张阳, 涂小苹, 梁祥飞. 吸气管管径变化对空调系统制冷性能的影响[J]. 制冷与空调(北京), 2014, 14(10): 29-33. (ZHANG Yang, TU Xiaoping, LIANG Xiangfei. Influence of various suction/discharge pipes'

- diameters on air-conditioning system's refrigeration performance [J]. *Refrigeration and Air-conditioning*, 2014, 14(10): 29-33.)
- [22] 赵梅春, 王晓蕾, 陈伟锋, 等. 压缩机油分离器分离效率测试台的设计[J]. *低温工程*, 2012(5): 34-36. (ZHAO Meichun, WANG Xiaolei, CHEN Weifeng, et al. Design for separation efficiency test stand of oil separator used in compressors[J]. *Cryogenics*, 2012(5): 34-36.)
- [23] 汽车空调用软管及软管组合件: QC/T 664—2000[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000. (Hoses and hose assemblies for automotive air conditioning: QC/T 664—2000 [S]. Beijing: China Standard Press, 2000.)
- [24] 制冷用板式换热器: JB/T 8701—2018[S]. 北京: 机械工业出版社, 2018. (Plate heat exchanger for refrigeration: JB/T 8701—2018 [S]. Beijing: Machinery Industry Press, 2018.)
- [25] 热交换器及传热元件性能测试方法: GB/T 27698—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013. (Test methods for the performance of heat exchangers and heat exchange elements: GB/T 27698—2013[S]. Beijing: China Standard Press, 2013.)
- [26] 测量不确定度评定与表示: JJF 1059.1—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012. (Evaluation and expression of uncertainty in measurement: JJF 1059.1—2012 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.)
- [27] COLLIER J G, THOME J R. Convective boiling and condensation [M]. 3rd ed. New York: Oxford University Press, 1994.
- [28] 刘猛洪. 矩形管内R134a两相流动压降特性分析[J]. *制冷技术*, 2017, 37(5): 59-63. (LIU Menghong. Analysis on two-phase flow pressure drop characteristics of R134a inside rectangular tube[J]. *Chinese Journal of Refrigeration Technology*, 2017, 37(5): 59-63.)
- [29] 林宗虎. 气液两相流和沸腾传热[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2003. (LIN Zonghu. Gas-liquid two-phase flow and boiling heat transfer [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2003.)

通信作者简介

卢曦, 男, 教授, 上海理工大学机械工程学院, 021-55275287, E-mail: luxi_usst@163.com。研究方向: 汽车零部件设计制造一体化, 汽车强度和可靠性设计与评价、旋锻近净成形制造工艺等。

About the corresponding author

Lu Xi, male, professor, School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, 86-21-55275287, E-mail: luxi_usst@163.com. Research fields: integration of automotive parts design and manufacturing, design and evaluation of automotive strength and reliability, and manufacturing process of spin forging near-net forming.