

电动汽车电池包热电制冷系统的实验研究

翁志奇, 邓 斌, 张鑫伟, 李国能*, 郭文文, 汤元君, 郑友取

(浙江科技学院 能源与环境系统工程系, 浙江 杭州 310023)

摘要:为提高电动汽车动力电池包在高温环境下的安全性,设计并测试了一个热电制冷系统,采用了自行开发的肋柱型散冷器,安装了6个热电制冷模块,并采用循环冷却水进行热端散热。在测试中,当输入功率为273.6 W时,热电制冷系统的能效比随散冷风速和冷却液流量的增加迅速增加,然后趋于稳定,最佳的散冷风速和冷却液流量分别为2.5 m/s和33.3 mL/s,系统最大能效比为0.26。针对于一个储电量为36 kW·h的锂电力电池包,电池包箱体内的温度在不同的产热率(50~200 W)下的降温幅度均超过20 °C。动力电池包在200 W的产热率下,其内部温度从68 °C降低到45 °C以内,表明设计的热电制冷系统可有效降低动力电池包内的温度,并提高电动汽车的安全性。

关键词:动力电池包;热电制冷;电池热管理;能效比

中图分类号:X383

文献标识码:A

Investigation on thermoelectric cooling system for battery pack of electrical vehicle

WENG Zhiqi, DENG Bin, ZHANG Xinwei, LI Guoneng*, GUO Wenwen, TANG Yuanjun, ZHENG Youqu

(Department of Energy and Environment System Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: In order to promote the safety of the power battery pack in high-temperature environments for electrical vehicles, a thermoelectric cooling system was designed and tested. This system utilized a self-developed pin fin assisted cooling distributor, equipped with 6 thermoelectric cooling modules, and employed circulating cooling water for heat dissipation at the hot-ends. The coefficient of performance (*COP*) of the thermoelectric cooling system increased rapidly with the increase of the cooling air velocity and flow rate of cooling liquid, and then stabilized. The optimal cooling air velocity and flow rate of cooling liquid were 2.5 m/s and 33.3 mL/s, respectively. The maximum of *COP* reached 0.26. For a lithium-ion power battery pack with a storage capacity of 36 kW·h, the temperature inside the battery pack case decreased by more than 20 °C under different heat generation rates (50~200 W). The initial temperature of the power battery pack dropped from 68 °C to below 45 °C at a heat generation rate of 200 W, indicating that the thermoelectric cooling system designed in this study could effectively reduce the temperature inside the power battery pack and improve the safety of electric vehicle.

Keywords: Power battery pack; Thermoelectric cooling; Battery thermal management; Coefficient of performance

收稿日期:2023-07-16

DOI:10.20078/j.eep.20230903

基金项目:浙江省自然科学基金重点项目(LZ21E060001)

作者简介:翁志奇(1999—),男,浙江乐清人,硕士研究生,主要从事半导体制冷研究。E-mail: 13396814039@163.com

作者简介:李国能(1981—),男,广东广州,教授,主要从事半导体制冷和温差发电研究。E-mail: 109028@zust.edu.cn

能源危机和环境污染促进了电动汽车的快速发展。动力电池作为电动汽车的储能装置,其安全性尤为重要。锂电池具有较高的输出功率、能量密度和较长的循环寿命等优点被广泛使用^[1]。锂电动力池包的最佳工作温度区间为 20 ~ 45 °C^[2]。当超过一定温度时电池容量和寿命会降低,当电池超过温度临界点时会发生热失控^[3-5],产生自燃等严重事故。因此,在高温气候下,控制电池组处于最佳的工作温度,需要配套使用热管理系统,以确保电池组的安全和获得最佳的工作性能。

目前动力电池包热管理的方式主要分为空气冷却、液体冷却、相变材料冷却和热管冷却^[6]。在空气冷却方面,CHEN 等^[7]在风冷条件下,通过优化电池间距,使电池最高温度降低了 3 °C。在液冷方面,ZHAO 等^[8]研究了锂电池组在风冷和液冷条件下的最高温度,结果表明液冷比风冷降低了 7.6 °C。液冷系统相比于风冷系统效果更显著,但是液冷系统更加复杂,成本更高。在相变冷却方面,WANG 等^[9]设计了一种基于铜泡沫和石蜡复合相变材料的新型无源电池热管理系统,通过组合实验研究了具有新型热管理系统和空气冷却系统的电池组的热性能。实验结果表明,基于新型热管理系统的电池组的最高温度可保持在 42 °C 以内。相变冷却方式可以实现较好的节能效果,但是增加了系统体积和重量。此外,已有研究表明当相变材料完全融化后增加了电池对外传热的热阻^[10]。

近年来,将半导体制冷和电池热管理相结合逐渐成为电动汽车电池包热管理的研发方向。相比于传统的热管理方式,半导体制冷模块具有体积小、质量轻、制冷速度快、制冷量可通过电流精确控制等优点^[11-12]。当前国内外对提高热电制冷性能的研究可以分成三大方向:热电制冷材料研究、热电制冷散热研究和热电制冷器系统研究。在散热研究方面,杜海龙等^[13]利用半导体水冷式空调研究不同热端散热条件和不同冷端送风温度下制冷量与制冷效率的变化规律,结果表明,热端冷却水流量显著影响热电制冷的制冷效率。申丽梅等^[14]对热电制冷热端散热进行了详细的分析,结果表明散热器尺寸和风扇速度显著影响热端温度。张晓芳等^[15]对半导体的冷却能力进行了研

究,发现水冷制冷效果明显优于风冷,且其制冷性能与冷却水的温度有关,水温越低,热电制冷系统的制冷效率越高,制冷温度越低。

本文在前人工作的基础上,新设计了一款由热电制冷单元、散热单元和循环工质单元组成的热电制冷装置,研究了散冷风速和冷却液流量对热电制冷系统性能的影响规律,并对一个 36 kW·h 的锂电动力电池包进行了制冷降温实验研究。

1 热电制冷系统、实验台架和参数定义

1.1 热电制冷系统

图 1 为热电制冷系统及制冷单元的结构示意图。热电制冷系统主要由热电制冷单元、散热单元和循环工质单元组成,其中热电制冷单元是热电制冷系统的核心单元。热电制冷单元主要由热电制冷模块、散热器和水冷器组成。散热器的材质为 6061 铝合金,在数控加工中心基于一块铝合金一体化雕刻而成,整体尺寸为 170 mm×103 mm×40 mm。散热器采用错列布置的顺流三角形换热肋柱,肋柱边长为 3 mm,肋柱中心间距 6 mm,肋柱高度 25 mm,基底厚度 8 mm,这种设计可以提高系统的散冷速率,最大程度降低传热热阻。6 个热电制冷模块的冷端紧贴在散热器的安装面上,型号为 TEP-126T200,尺寸为 40 mm×40 mm×3.8 mm,最高耐温 200 °C,热电材料为碲化铋。国内各大厂商生产的热电制冷模块内部的热电材料优值(ZT 值)较为接近,因此在相同的输入功率下,更换不同的制冷模块其制冷性能差别不大,这说明系统结构设计的重要性。制冷模块的热端采用水冷方式进行散热,水冷器紧贴制冷模块的热端,并采用螺栓进行压紧固定,安装压力为 1 MPa,所有的接触面均采用石墨垫片以降低接触热阻。铝制水冷器内部具有多个流道,通过循环冷却液进行降温。此外,散热器的一端固定有散冷风扇(型号为 DELTA-BFB1012VVH,供电电压为 3.5 ~ 24 V),目的是将散热器中的冷量源源不断地输运到外部空间。整个热电制冷单元外部利用保温材料对其进行保温,避免冷量外泄。制冷单元的体积为 1.84 L,重量为 1.04 kg。

散热单元由水冷器、散热器和散热风扇组成。散热器和散热风扇的作用是用来维持整个系统的水温,从而保证热电制冷单元的热端温度,使得热电制冷系统内的冷热端始终保持在合理范围。循环工质单元由水箱、水泵、水冷器组成。实验中采

用的水箱为亚克力板做成的透明圆柱形水箱,蓄水容积为 0.2 L,在水泵的作用下完成冷却液的循环过程;此外,通过调节水泵的输入电压来获得不同的冷却流量以满足不同的实验需求。

值得提及的是,热电制冷系统的设计采用热端水冷和冷端风冷的热量管理组合,其原因是多方面的。一方面,热端采用水冷可及时高效地将热量转移,在其它位置进行散热;在热端安装大体积的风冷散热器具有较高的安装难度,容易造成接触不良,影响制冷效果。另外一方面,冷端采用风冷可减少不必要的中间环节,节省空间,还可以增加电池包内部空间的空气对流,有利于降低电芯的温度;此外,电池包内部安装水路存在泄露的风险,较为委托的做法是采用风冷。

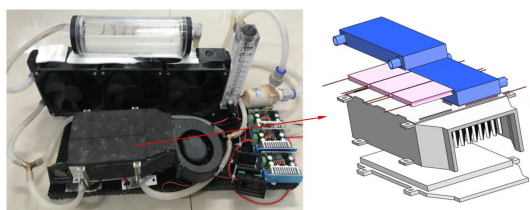


图 1 热电制冷系统及其制冷单元的结构示意图

Fig. 1 Thermoelectric cooling system and its configuration of cooling unit

1.2 实验台架简介

图 2 为热电制冷系统的实验台架示意图。实验台架由 K 型热电偶、涡轮式风速计和数据采集仪组成。在散冷器的出风口、制冷模块的冷热端和电池箱体内装有 4 个 K 型热电偶。紧贴于制冷模块热端上的热电偶测量热电制冷单元的热端温度 T_h ,安装在散冷器内部的热电偶用来测定制冷单元的冷端温度 T_c 。测量进风口温度 T_b 和出风口温度 T_{out} ,用于计算整个制冷系统的能效比。此外电池包箱体内温度 T_b 同时用于衡量整个电池热管理系统的性能。K 型热电偶型号为 TES1310,自带液晶显示屏,测量范围为 $-50 \sim 200 \text{ }^\circ\text{C}$,精度为 $\pm 0.1\%$ 。散冷器的散冷风速采用型号为 PM6252 的涡轮式风速仪测量,量程为 $0.2 \sim 30 \text{ m/s}$,精度为 $\pm 2\%$ 。冷却液流量采用玻璃转子流量计进行测量,型号为 LZTM-15,流量范围为 $0 \sim 50 \text{ mL/s}$ 。两个电能表型号为 DSNDVM568,量程为 $4.5 \sim 30 \text{ V}$,精度为 $\pm 1\%$,用于测量加热器产热功率和制冷单元的功率。散冷风扇、散热风扇和水泵的电压由 3 台可调稳压器 XL4016E 分别和 3 个电压表进行调节其功耗,实验前进行标定。

1.3 参数定义

热电制冷也称为半导体制冷,是帕尔贴效应

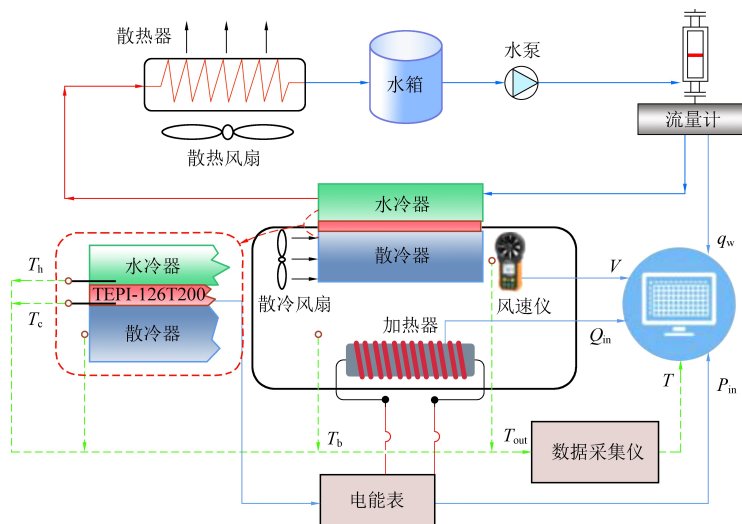


图 2 热电制冷系统的实验台架示意图

Fig. 2 Sketch of experimental setup for the thermoelectric cooling system

在热电制冷领域的应用^[17]。半导体制冷模块由一定数量的具有热电效应的半导体材料 PN 结构成,当电流通过 PN 结时,PN 结的一端会温度下降,成为半导体制冷模块的冷端,另一端温度会上升,成为热端。当电流通过一对 PN 结时,单位时间内放出的热量或吸收的热量与电流强度成正比。

$$Q_p = (\alpha_p - \alpha_n)IT_c \quad (1)$$

式(1)中 α_p 、 α_n 分别为 P 型和 N 型半导体的塞贝克系数; T_c 为冷端的绝对温度, K; Q_p 为帕尔贴热, J; I 为通过 PN 结的电流, A。在热端采取一定的措施加以散热,使其保持在一定温度,那么冷端就会开始冷却,直至周围介质传入的热量 Q_0 和沿着

半导体引脚基于傅里叶导热传入的热量 Q_E 的总和等于帕尔贴热量时,界面处的温度达到平衡。

$$Q_P = Q_0 + Q_E \quad (2)$$

半导体引脚的传热可近似为仅沿引脚方向的一维传热,忽略引脚周向对流换热和辐射换热,忽略引脚与基座之间的接触热阻,热端沿半导体引脚流入冷端的热量为:

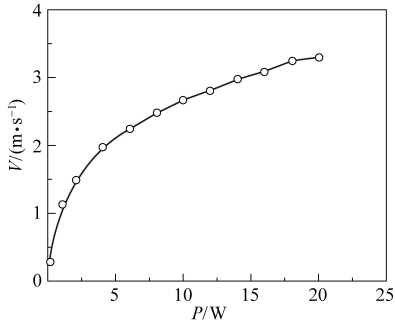
$$Q_E = \frac{1}{2} I^2 R - K \Delta T - \frac{1}{2} \mu I \Delta T \quad (3)$$

式(3)中 μ 为汤姆逊系数,当塞贝克系数不随温度变化时,汤姆逊系数为零。在冷热端温差 ΔT 不大的场合,通常使用单极半导体制冷模块。对于单极半导体制冷模块,其制冷量为:

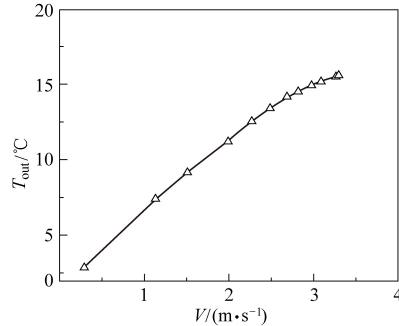
$$Q_0 = (\alpha_p - \alpha_n) I T_c - \frac{1}{2} I^2 R - K A (T_h - T_c) - \frac{1}{2} \mu I \Delta T \quad (4)$$

式(4)中 K 和 A 分别为 PN 结的传热系数 ($W/(m \cdot K)$) 和面积 (m^2),对于本文的实验系统,热电制冷系统的能效比为:

$$COP = \rho c_p V A' (T_b - T_{out}) / P_{in} \quad (5)$$



(a) 散冷风速与散冷风扇功耗的关系



(b) 热电制冷系统的出口风温随着散冷风速的变化规律

图3 热电制冷系统的散冷风扇性能及其出口风温

Fig. 3 Performance of the cooling fan and the outlet temperature of thermoelectric cooling system

图4为热电制冷系统的工作温差及能效比 (COP : coefficient of performance) 随散冷风速的变化规律。热电制冷系统的工作温差随散冷风速的增加而下降,说明散冷能力逐渐增强。与图3的规律类似,当散冷风速大于 2.5 m/s 时,工作温差下降不明显。热电制冷系统的能效比 COP 是核心指标,由图4可知,热电制冷系统的 COP 均低于 0.3 ,随着散冷风速的增加不断增加。因此,在大工作温差下,热电制冷系统的 COP 降低,甚至低于 0.1 ,这是冷量无法及时从制冷模块运输到外部导致的。值得注意的是,当散冷风速大于 2.5 m/s 时, COP 仍在上升,但幅度有所下降。当散冷风速为 2.5 m/s 时, COP 为 0.24 。此外,保持一定的散冷风速非常关键。当散冷风速为 1.2 m/s

式(5)中 ρ 、 c_p 、 V 和 A' 分别为空气密度 (kg/m^3)、热容 ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$)、散冷风速 (m/s) 和面积 (m^2)。 P_{in} 为热电制冷系统的功率消耗 (W)。

2 实验结果与分析

2.1 散冷风速的影响

图3是热电制冷系统的散冷风扇性能及其出口风温。为研究散冷风速对制冷效率的影响,需要标定散冷风扇功率与散冷风速的曲线。在环境温度为 $28 \text{ }^\circ\text{C}$,冷却液流量为 16.7 mL/s 时,通过调节散冷风扇的工作电压获得不同的散冷风速。由图3可知,随着散冷风速的增加,散冷器出口温度逐渐增加。当散冷风速介于 $0 \sim 2.5 \text{ m/s}$ 时,散冷风速对热电制冷系统的出风温度影响较大,散冷风速从 0 增加到 2.5 m/s 时,出口温度增加了 $13.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 。当风速大于 2.5 m/s 时,散冷风速对出风温度影响较小,散冷风速从 2.5 m/s 增加到 3.3 m/s 时,噪声明显增大,但出口温度只增加了 $2.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 。因此,散冷风速 2.5 m/s 是一个较佳的选择。

时,系统的 COP 即可达到 0.17 以上。对于本文设计的散冷器内的肋柱,其特征尺寸为 3 mm ,当散冷风速大于 0.89 m/s 时,肋柱绕流的雷诺数即可突破 180 ,此时流动向湍流转换^[18],从而强化了散冷器内部的对流换热过程。对于本文所研究的工况,当散冷风速从零增加到 2.5 m/s 时, COP 得到了快速的增加,这主要是得益于散冷器内部湍流换热的不断增强,从加速了冷量的运输。图4(c)给出了由公式(1)~(4)计算获得的理论 COP 与实验测量获得的 COP 的对比。由图4(c)可见,当风速大于 2.25 m/s 之后,理论 COP 与实验 COP 的误差小于 15% ;当风速更低时,实验 COP 远低于理论 COP 。造成上述差别的原因在于公式(1)~(4)没有考虑散冷过程的流动和对流热阻问

题。当风速较低时,散冷的对流热阻大,而公式(1)~(4)仅仅考虑了制冷模块热阻,因此在风速

较低时,理论 COP 的预测不准确。

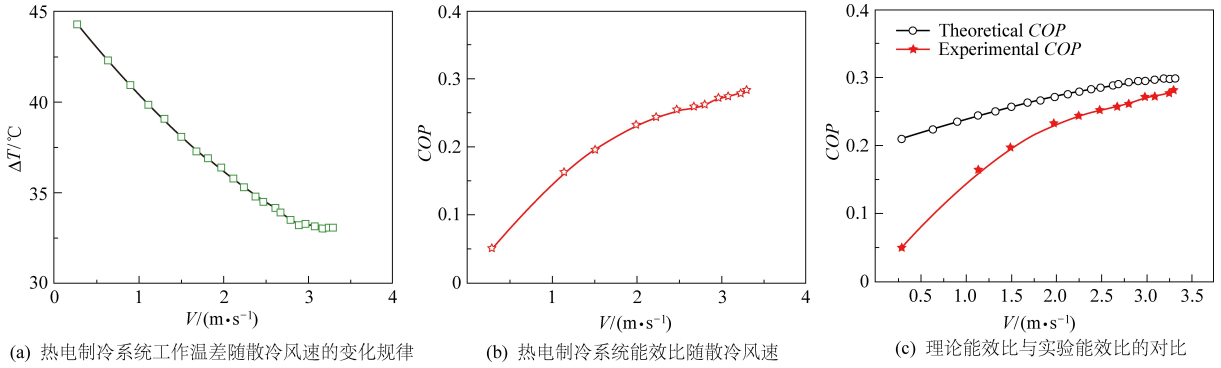


图 4 热电制冷系统的工作温差及能效比

Fig. 4 Working temperature difference and COP of thermoelectric cooling system

2.2 冷却液流量对能效比影响

图 5 为散冷风速为 2.5 m/s,冷却液流量分别为 8.3、16.7、25.0、33.3、41.7、50.0 mL/s 时,热电制冷系统的出口温度和 COP 随冷却液流量的变化规律。由图 5 可知,热电制冷系统在 15 min 内出口温度已经达到了相对稳定的状态。由于冷却液流量的不同,热电制冷系统的出口温度不同,当流量在 8.3 mL/s 时,热电制冷系统的出口温度降低到 16 °C。随着冷却液流量的增大,出口温度逐渐降低,当流速增大到 33.3 mL/s 时,出口温度最低值达到 11.5 °C。当冷却液流量大于 33.3 mL/s

时,热电制冷系统的出口温度变化很小,当流量处于最大值 50 mL/s 时,出口温度只比流量为 33.3 mL/s 时低 0.5 °C。因此,基于出口温度标准可认为冷却液流量的最优值为 33.3 mL/s。由图 5 可见,热电制冷系统的 COP 随冷却液流量的增大而提高,当流量为 8.3 mL/s 时,COP 仅为 0.17。当冷却液流量为 33.3 mL/s 时,热电制冷系统的 COP 增大至 0.26。当冷却液流量大于 33.3 mL/s 时,COP 的变化幅度变小,在最大流量为 50 mL/s 情况下,COP 仅比 33.3 mL/s 时增大了 0.01。

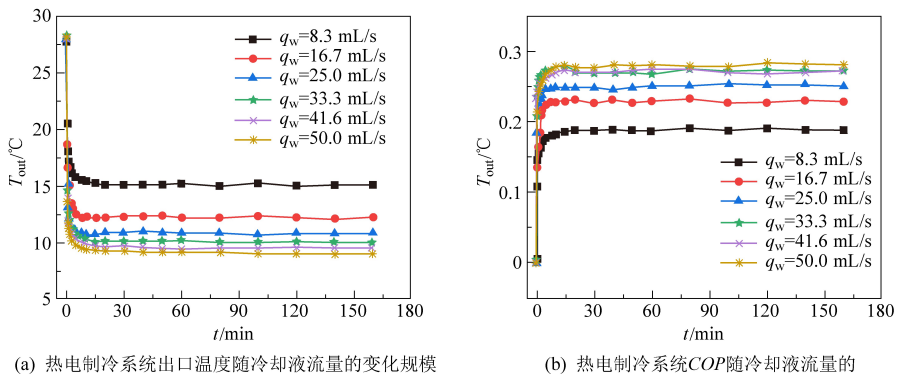


图 5 不同冷却液流量下热电制冷系统的出口温度和 COP

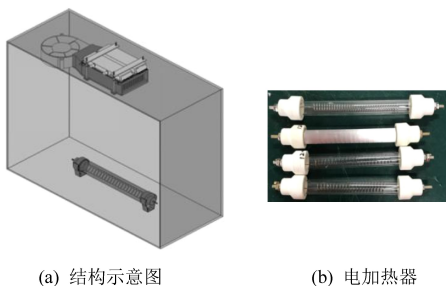
Fig. 5 Outlet temperature and COP of the thermoelectric cooling system under different flow rate of cooling liquid

3 电动汽车电池包主动制冷实验研究

基于本文研发的热电制冷系统,根据前人研究获得的电池放电产热率^[19],采用电加热器来模拟 36 kW·h 锂动力电池包产热功率,在电池包产热功率分别为 50、100、150、200 W 时,对电池包进行主动制冷实验研究。图 6 给出了测试对象的结构示意图,电池包模拟箱体体积为 0.5 m×0.4 m×0.4 m,采用 5 mm 亚克力板制作,亚克力板的导热

系数为 0.2 W/(m·K),外壳无保温层。热电制冷系统运行在本文获得的优化参数下,即散冷风速 2.5 m/s,冷却液流量为 33.3 mL/s。值得注意的是,本文的实验台架建立在产热相对集中的假设上,实际电池包产热的边界条件目前难以获得,后续工作将重点围绕这一科学问题进行更为有针对性的制冷控制实验,从而提供更有针对性的实验数据。

图 7 为电池包箱体在启动热电制冷系统后的降温曲线和采用热电制冷系统前后箱体内温度的

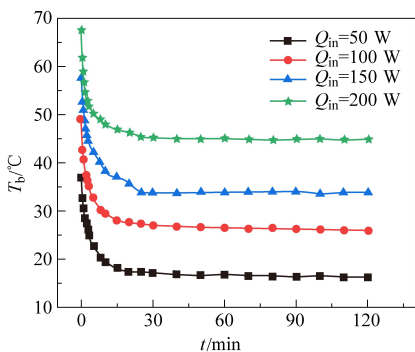


(a) 结构示意图 (b) 电加热器

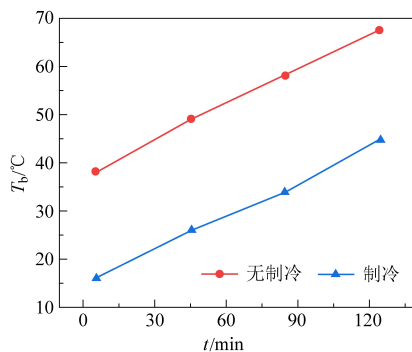
图 6 基于热电制冷系统的电动汽车
电池包主动制冷实验示意图

Fig. 6 Active cooling experiments on electrical vehicle
battery pack with the thermoelectric cooling system

对比。由图 7 可知, 电池包箱体温度在 20 min 内降低了 20 °C 以上, 此后温度变化趋于平缓。当产热率分别为 50、100、150、200 W 时, 5 分钟内的降温幅度分别为 14.3、16.1、15.9、17.6 °C, 分别占总降温幅度的 69%、70%、66%、77%。因此, 采用本文研发的热电制冷系统, 可迅速降低电池包箱体温度。在不采用热电制冷系统对电池包箱体进行主动降温时, 在 4 种电池产热工况下电池包箱体温度都超出了电池最佳的使用温度, 在 200 W 的产热率下电池包箱体温度最高达到了 68 °C。采用热电制冷系统后, 当电池



(a) 采用热电制冷系统后箱体温度的时间响应曲线



(b) 采用热电制冷系统前后电池包箱体温度对比

图 7 不同产热率下动力电池包箱体温度变化规律

Fig. 7 Battery pack temperature under different heat generation rates

4 结 论

本文设计并测试了一个热电制冷系统, 采用了一体化加工制作的肋柱型散热器, 安装了 6 个热电制冷模块, 并采用循环冷却水进行热端散热。制冷单元的体积为 1.84 L, 重量为 1.04 kg。本文详细研究了散热风速和冷却液流量对热电制冷系统性能的影响, 从而获得最优的运行参数, 并对一个储电量为 36 kW · h 的锂动力电池包进行了制冷降温实验研究。论文获得了以下结论:

(1) 热电制冷系统的功耗为 282.5 W, 其能效

产热功率在 150 W 时, 箱内温度保持在 38 °C 之内; 当电池产热功率在 200 W 时, 箱内温度保持在 45 °C 以内。由图 7 可知, 热电制冷系统可以迅速控制电池包箱体温度, 在本文研究的各个实验工况下电池包箱体温度平均降低 20 °C 以上。由于热电制冷系统的功耗为 282.5 W (含散热风扇、散热风扇和水泵的功耗), 耗电代价不低, 但是电池包在高温下容易诱发自燃等事故, 因此本文研发的热电制冷系统可作为传统风冷式电池包降温措施的补充方案, 在常规风冷式降温措施无法进一步降温时, 启动本系统进行降温, 保证电动汽车的安全。此外, 随着电池技术的发展, 产热率不断下降, 本文所研发的热电制冷系统体积小, 结构紧凑, 易于维护, 应用前景广泛。此外, 本文的研究并未考虑实际电池包内部电池的几何布置方式, 后续研究可重点关注该问题。由于本论文设计的制冷系统内部安装有散热风扇, 电池包内部将有冷却风进行强迫对流换热, 有利于电池的降温, 在一定的产热率下将有效控制电池包内部空间的温度。电池包内部温度分布的不均匀性不是本文的研究范围。

比随散热风速和冷却液流量的增加迅速增加后趋于稳定, 最佳的散热风速和冷却液流量分别为 2.5 m/s 和 33.3 mL/s, 系统最大能效比为 0.26。

(2) 保持一定的散热风速非常重要, 否则会导致冷量堆积在散热器中, 无法及时运输到外部空间。随着散热风速的增加, 散热器内部湍流换热不断增强, 从加速了冷量的运输。

(3) 对于一个储电量为 36 kW · h 的锂动力电池包, 当电池包的产热率为 200 W 时, 电池包箱体内部温度从 68 °C 降低到 45 °C 以内, 说明热电制冷系统可有效降低动力电池包内的温度。

(4)在电池包不同的产热率(50~200 W)下,采用热电制冷系统可迅速将电池包箱体内的温度降低 20 ℃ 以上,但热电制冷系统的耗电代价不低。因此,本文研发的热电制冷系统可作为传统风冷式电池包降温措施的补充方案,在常规风冷式降温措施无法进一步降温时,启动本系统进行降温,保证电动汽车的安全。

参考文献 (References):

[1] WANG Q, JIANG B, LI B, et al. A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles[J]. *Renewable and Sustainable Energy reviews*, 2016, 64(10): 106-128.

[2] QIAN X, XUAN D, ZHAO X, et al. Heat dissipation optimization of lithium-ion battery pack based on neural networks[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 162(11): 114289.

[3] REDDY T B, LINDEN D. *Linden's handbook of batteries*[M]. New York: McGraw-Hill, 2011: 26.68-75.

[4] PESARAN A A. Battery thermal models for hybrid vehicle simulations[J]. *Journal of Power Sources*, 2002, 110(2): 377-382.

[5] WANG Y F, WU J T. Performance improvement of thermal management system of lithium-ion battery module on purely electric AUVs[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 146(1): 74-84.

[6] ZOU H, WANG W, ZHANG G, et al. Experimental investigation on an integrated thermal management system with heat pipe heat exchanger for electric vehicle[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 118(6): 88-95.

[7] CHEN Kai, CHEN Yiming, LI Zeyu, et al. Design of the cell spacing of battery pack in parallel air-cooled battery thermal management system[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 127(12): 393-401.

[8] ZHAO Jiateng, RAO Zhonghao, LI Yimin. Thermal performance of mini-channel liquid cooled cylinder based battery thermal management for cylindrical lithium-ion power battery[J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 103(10): 157-165.

[9] WANG Xiaoming, XIE Yongqi, DAY R, et al. Performance analysis of a novel thermal management system with composite phase change material for a lithium-ion battery pack[J]. *Energy*, 2018, 156(8): 154-168.

[10] BANDHAUER T M, GARIMELLA S, FULLER T F. A critical

review of thermal issues in lithium-ion batteries[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2011, 158(3): 1-25.

[11] SIDDIQUE A R M, MAHMUD S, VAN H B. A comprehensive review on a passive phase change materials and an active thermoelectric cooler battery thermal management system and their limitation[J]. *Journal of Power Sources*, 2018, 401(10): 224-237.

[12] LYU Y, SIDDIQUE A R M, MAJID S H, et al. Electric vehicle battery thermal management system with thermoelectric cooling[J]. *Energy Reports*, 2019, 5(11): 822-827.

[13] 杜海龙, 齐朝晖, 陈焕新, 等. 水冷热电空调器性能的实验研究[J]. *流体机械*, 2008, 36(12): 53-56.

DU Hailong, QI Zhaohui, CHEN Huanxin, et al. Experimental investigation on the characteristics of water-cooled thermoelectric air conditioner[J]. *Fluid Machinery*, 2008, 36(12): 53-56.

[14] 毛佳妮, 申丽梅, 李爱博, 等. 半导体制冷器制冷性能的综合影响因素探讨及其优化设计分析[J]. *流体机械*, 2010, 38(7): 68-72+19.

MAO Jiani, SHEN Limei, LI Aibo, et al. Combined Influence of thermoelectric refrigerating performance and optimization of thermoelectric cooler[J]. *Fluid Machinery*, 2010, 38(7): 68-72+19.

[15] 张晓芳, 钟建新, 杨穗. 水冷式半导体冰箱制冷性能的研究[J]. *工程设计学报*, 2012, 19(2): 105-111.

ZHANG Xiaofang, ZHONG Jianxin, YANG Sui. Water cooling effects on thermoelectric refrigerators[J]. *Chinese Journal of Engineering Design*, 2012, 19(2): 105-111.

[16] 徐德胜. *半导体制冷与应用技术*[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992.

[17] 申利梅, 陈焕新, 张威, 等. 影响热电制冷性能的关键因素及其分析[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(10): 1866-1872.

SHEN Limei, CHEN Huanxin, ZHANG Wei, et al. Analysis of the crucial factors affecting the performance of thermoelectric cooling[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 1866-1872.

[18] FENT Z G, MICHAELIDES E E. Inclusion of heat transfer computations for particle laden flows[J]. *Physics of Fluids*, 2008, 20(4): 040604.

[19] 王鹏博, 郑俊超. 锂离子电池的发展现状及展望[J]. *自然杂志*, 2017, 39(4): 283-289.

WANG Pengbo, ZHENG Junchao. The present situation and expectation of lithium-ion battery[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2017, 39(4): 283-289.