

文章编号: 1674-8085 (2021) 06-0069-04

圆柱型 Ni-MH 电池包浸液冷却设计及分析

郭军团¹, *谢世坤², 徐国昌¹, 张庭芳³

(1. 湖南科霸汽车动力电池有限责任公司, 湖南, 长沙 410205; 2. 井冈山大学机电工程学院, 江西, 吉安 343009;
3. 南昌大学机电工程学院, 江西, 南昌 330001)

摘要: 随着国家对环保的越发重视, 节能与新能源汽车的车型和产量急剧增加, 对动力电池包的防护等级和使用寿命的要求越来越高。而电池的使用寿命与所处的温度有很大关系, 温度适中, 其寿命越长, 温度越高寿命越短。本文主要研究圆柱型镍氢电池的电池包设计方案, 新开发一种全新的使用浸液冷却的电池包, 通过对浸液电池的性能测试, 部件的结构设计, 热仿真设计及台架和第三方测试验证, 有效控制电池温度和提高电池包的防护等级, 方案可行, 对镍氢电池包后续使用浸液散热提供依据和指导。

关键词: 镍氢电池; 圆柱型电池; 电池包; 散热冷却

中图分类号: TQ324.3

文献标识码: A

DOI:10.3669/j.issn.1674-8085.2021.06.013

DESIGN AND ANALYSIS OF IMMERSION COOLING FOR CYLINDRICAL Ni-MH BATTERY

GUO Jun-tuan¹, *XIE Shi-kun², XU Guo-chang¹, ZHANG Ting-fang³

(1. Hunan Copower EV Battery Co., Ltd., Changsha, Hunan 410205, China;
2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Jinggangshan University, Ji'an, Jiangxi 343009, China;
3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China)

Abstract: As the country pays more and more attention to environmental protection, the models and output of energy-saving and new energy vehicles increased sharply, and the requirements for the protection grade and service life of power battery pack were higher and higher. The service life of the battery is closely related to the temperature. The moderate temperature is for the longer service life, the higher temperature for the shorter service life. In this paper, the battery pack design scheme of cylindrical Ni MH battery was studied, and a new battery pack using immersion cooling was newly developed. Through the performance test of immersion battery, component structure design, thermal simulation design and bench and third-party test verification, the battery temperature was effectively controlled and the protection grade of battery pack was improved. The scheme is feasible, which can provide basis and guidance for subsequent use of immersion heat dissipation of Ni MH battery pack.

Key words: Ni-MH battery; cylindrical battery; battery pack; heat dissipation cooling

收稿日期: 2021-08-23; 修改日期: 2021-09-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51762022); 江西省自然科学基金项目(20181BAB206028); 江西省教育厅科技计划项目(GJJ201006); 吉安市重大科技专项(吉财教指[2020]83号)

作者简介: 郭军团(1984-), 男, 河北饶阳人, 工程师, 硕士, 主要从事镍氢动力电池 Pack 及其系统的研究(E-mail: guojuntuan1984@163.com);

*谢世坤(1973-), 男, 江西吉安人, 教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事材料成型工艺控制研究(E-mail: xskun@163.com);

徐国昌(1984-), 男, 江西吉安人, 工程师, 硕士, 主要从事镍氢电池开发研究(E-mail: xuguochang@corun.com);

张庭芳(1971-), 女, 山东曲阜人, 教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事镁合金塑性成型、工艺控制、新能源汽车和汽车电子控制等方面的研究(E-mail: tfzhang@ncu.edu.cn).

当前全球石油资源日益紧缺,环境和大气污染越来越严重。我国最高领导人在气候峰会上提出“中国力争 2030 年前实现碳达峰,2060 年前实现碳中和”这一重要指标,全国各行业均在针对“碳达峰、碳中和”进军。作为最近几年风头正紧的节能与新能源汽车更是大势所趋。随着人民物质生活水平的提高,对汽车的要求不仅功能性更要求美观性的提升,汽车的车型日益增多,混合动力、纯电动、氢燃料电动等新车型相继问世,而为满足多样化车型的需求,作为重要零部件的电池包系统的要求也越来越高。

为了应对日益严峻的能源和环境问题,世界各国均将发展新能源汽车纳入国家发展战略,从而实现节能减排的目标^[1]。动力电池系统作为新能源汽车的核心部件之一,其性能优劣直接决定了新能源汽车性能是否达标^[2]。

1 电池包散热现状

电池包内的温度环境对电芯的可靠性、寿命及性能都有很大的影响。因此,使电池包内温度维持的一定的温度范围区间内就显得尤其重要。这主要是通过冷却来实现。目前,电池模组主动冷却方式主要包括:强制风冷散热、液冷散热与相变材料冷却等几种方式^[3]。风冷即利用空气作为换热介质,主要采用自然对流或者强制对流的方式,将电池模组产生的热量带走^[4]。由于风冷模式结构简单、成本较低且易于实现,许多车型都采用了风冷方式,如丰田、奇瑞等^[5]。

风冷是以低温空气为介质,利用热的对流,降低电池温度的一种散热方式。该技术利用风机为电池降温,系统结构简单、便于维护且成本低,在丰田混动车上应用广泛,其基本原理图如图 1 所示,冷却示意图如图 2 所示。

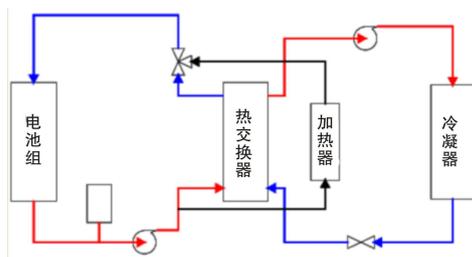


图 1 风冷基本原理图

Fig.1 Basic schematic diagram of air cooling

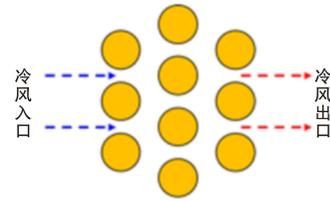


图 2 冷却示意图

Fig.2 Cooling diagram

液冷就是利用导热率相对较高的流体间接或直接接触电池散热的方法。直接接触式的液冷所用的是绝缘且热导率高的液体(如硅基油、矿物油)直接接触单体电池或模块。它能够很好地解决模块温度均匀化的问题,但是由于绝缘液体粘度较大,流速不会很高,从而限制了其换热效果。系统的热交换效率很大程度上取决于流体的热导率、粘度、密度、速度以及流体流过电池的方式^[6]。

间接接触式液冷中,液体在管道内流动,通过翅片或热沉等介质接触电池而带走热量,从而冷却电池^[7]。由于没有绝缘要求,且没有流速限制,所以可以选用热导率高的液体,换热效果非常好。但在温度均匀性方面,不如直接接触式的液冷。为了防止泄漏及短路,该方法对管道的密封性有较高的要求。

液冷技术通过液体对流换热,将电池产生的热量带走,降低电池温度。液体介质的换热系数高、热容量大、冷却速度快,对降低最高温度、提升电池组温度场一致性的效果显著,同时,热管理系统的体积也相对较小。市场上通用的液体主要为乙二醇和水的混合液^[8],实际运行过程中,导流管道与电池表面通过绝缘导热物料进行热量传导,冷却液体流经导流管道时,因换热系数高,导热速度快,将电池表面的热量带走。此系统往往配置比较复杂,需要额外增加冷凝换热器或需与整车冷凝器配套使用。液冷基本原理图如图 3 所示。

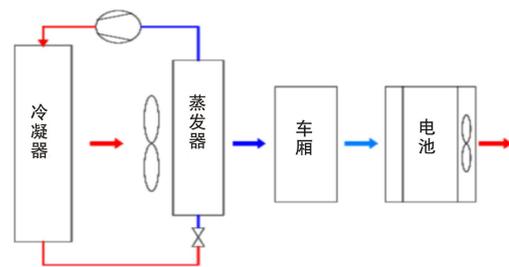


图 3 液冷基本原理图

Fig.3 Basic schematic diagram of liquid cooling

相变散热是利用其相变潜热来吸收电池充放电过程产生的热量,可保持较好的温度均匀性,但由于其成本较高,结构更为复杂且难以维护,目前应用相对较少^[9]。

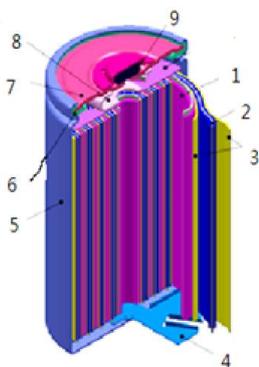
相变材料或热管储热利用了物体相变时的潜热来存储或释放能量。在电池充放电过程中,相变材料吸热,带走一部分热量,缓解了电池的发热情况。相变材料安放在电池组内,直接和电池模块接触换热时,一旦变形则会带来一些问题。

圆柱型镍氢电池目前普遍采用的是风冷和水冷进行散热,散热结构简单,技术成熟,但也有其缺点,风冷无法达到 IP67,水冷成本高且需要额外配置散热装置。为解决目前的应用课题且降低成本,提出镍氢电池浸液散热的方式,以提高 IP 防护等级,降低电池环境温度延长电芯使用寿命。

2 镍氢电池包浸液结构设计

2.1 镍氢电池结构

圆柱形密封式镍氢蓄电池具有结构坚固,安全性高,免维护,使用寿命长,自放电率低,使用温度范围宽、一致性高等特点,适于大功率放电使用。主要结构如图 4 所示。



1-正极板 2-负极板 3-隔板 4-负极集电体 5-钢壳
6-正极集电体 7-封口板底板 8-焦耳 9-安全阀

图 4 镍氢电池结构

Fig.4 Ni-MH battery structure

2.2 冷却液体选择

由图 4 可看出,镍氢电池为保证在使用过程中,若出现滥用能够及时地进行排气,镍氢电池顶部设计有安全阀,安全阀采用特殊的材质,正常情况下保证内部电解液不会溢出,非正常情况下能够及时地进行排气。若使用浸液设计,则需要对对冷却液进行筛选,冷却液的要求主要有以下几点:

- 1) 绝缘;
- 2) 导热和蓄热;
- 3) 不与安全阀反应;
- 4) 不与电池其他零部件反应;
- 5) 不会高温燃烧。

经过挑选和进行大量的实验对比,最终选择二甲基硅油作为冷却液。二甲基硅油的导热系数为 0.2,闪点 390℃,绝缘性能良好。

2.3 电池包结构设计

镍氢电池采用浸液设计,可大大减少电池之间的间隙,从而缩小电池包模组的体积,方便电池包的安装。

电池包的结构主要由以下图 5 所示部分组成。

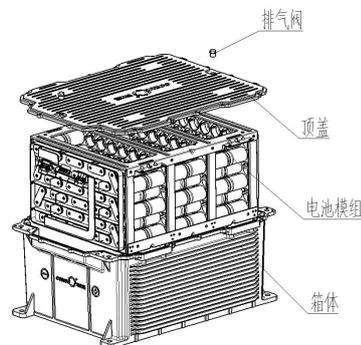


图 5 电池包结构

Fig.5 Battery pack structure

排气阀主要作用当电池被滥用时,及时将气体排出,进行电池包泄压;箱体主要采用的是铝合金压铸工艺,两侧留有散热翅片,增大散热面积;电池模组采用密集排列,当电池模组放入箱体中时,注入导热液体,将电池完全进行浸液操作;顶盖与箱体之间采用硅胶密封,保证密封面不溢出液体,顶盖内侧设计有延伸导热柱,用于传导热量。

正负极出线端的密封及固定考虑使用塑料件及绝缘胶进行双重防护,并在箱体内侧的极柱上增加紧固螺母,防止极柱脱落。具体见图 6 所示。

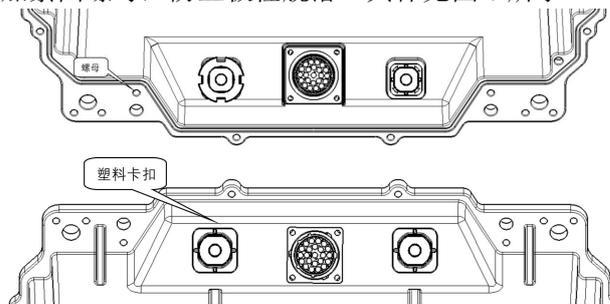


图 6 正负极柱固定结构

Fig.6 Positive and negative pole fixing structure

用于浸液设计的电池包,必须保证 IP67 的防护要求,防止内部液体溢出,同时防止外部灰尘和雨水等的浸入。顶盖和箱体的密封在设计 and 选材上可以满足要求,排气阀在选择时,因其特殊要求,必须具备疏水性、疏油性并同时能够通风排气,排气阀的过滤膜采用进口 E-ptfe 材质。

3 镍氢电池浸液散热仿真分析

3.1 仿真发热原理

通过电化学反应的吉布斯自由能和反应热能等的公式,以及镍氢电池在充放电阶段的不同反应,整理得出镍氢电池不同阶段的生热率公式如下充电时主反应的生热率:

$$Q_{c,s} = 0.547I_c + 3.6I_c^2 R_t \quad (\text{KJ/h}) \quad (1)$$

充电时副反应的生热率:

$$Q_{c,s} = 5.334I_c + 3.6I_c^2 R_t \quad (\text{KJ/h}) \quad (2)$$

放电时主反应的生热率:

$$Q_d = -0.547I_d + 3.6I_d^2 R_t \quad (\text{KJ/h}) \quad (3)$$

式中, R_t 极化内阻 R_p (Ω) 和焦耳内阻 R_j (Ω) 之和。

充电时,主、副反应均为放热反应。充电初期只有主反应,电池温度随着充电时间逐渐升高;充电后期(荷电态>80%),副反应出现,主、副反应同时存在,比较式(1)和式(2)副反应放出的热量是主反应的10倍左右,因此电池温度上升的速度明显加快;放电过程主反应为吸热反应,但由于焦耳热、极化热始终为正,电池温度升高或降低由它们共同决定^[6]。

3.2 仿真模型的简化

本项目采用 ANSYS FLUENT 软件进行仿真分析,首先将电池包进行简化处理,处理后的模型如图7所示。

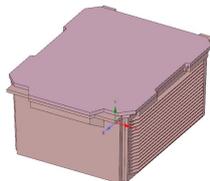


图7 简化模型

Fig.7 Simplified model

3.3 网格划分及仿真参数设置

根据简化后的模型进行网格划分,网格模型如图8所示。

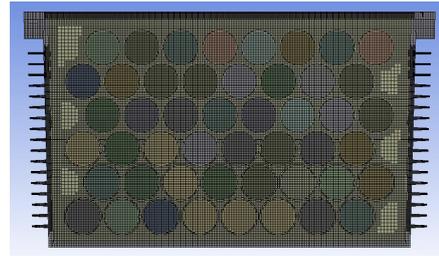


图8 剖面网格

Fig.8 Section grid

网格总数量为1444万左右,网格质量最低为0.147。网格质量很好,数量适中。

根据电池包内部所使用的物料设置相应的物料参数,具体如下表1所示。

表1 物料参数表
Table 1 Material parameter table

几何材料	密度 (kg/m^3)	比热 ($\text{J/kg} \cdot \text{K}$)	导热系数 (W/m.K)
电芯	2800	1537	各向异性分别为1、1、15
电芯间隔	3930	240	2
支撑塑料	1140	1600	0.26
外壳	7860	480	50

导热液体的参数设置如表2所示。

表2 导热流体参数设置
Table 2 Thermal fluid parameter setting

材料	密度 (kg/m^3)	导热系数 (W/m.K)	比热 ($\text{J/kg} \cdot \text{K}$)	粘性 (kg/m-s)	热膨胀系数 ($1/\text{K}$)
油液	970	0.2	249	0.095	6.67e-4

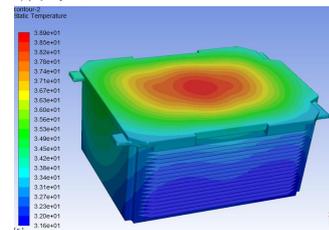
电池的电流按照流经每个单体的电流1.5A(0.2C)进行设置,设置环境温度为25℃。

3.4 仿真分析结果

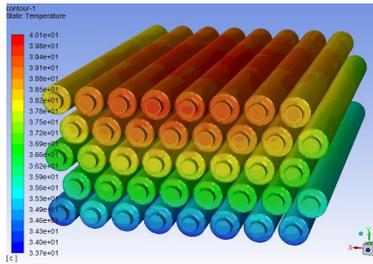
为对比分析浸液散热的效果,仿真时设置两种工况,一种为浸液冷却,一种为空气。

设置外壳外表面边界条件,外壳外表面和空气接触,自然对流换热还有辐射能量,边界采用 Mixed 边界模型,对流换热系数根据经验选取为5,外界环境温度为300 K,辐射模型参数采用默认设置。压力速度耦合方法采用 Coupled,压力项采用 PRESTO。

经过仿真计算,浸液结果如图9所示。空气冷却结果如图10所示。

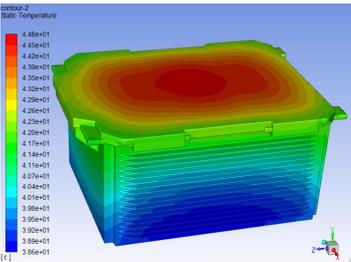


a) 浸液外壳温度云图

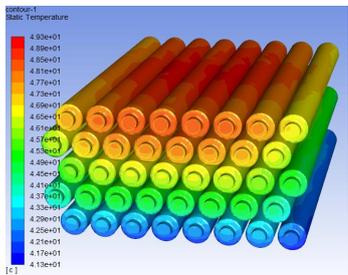


b) 浸液电芯温度云图
图 9 浸液结果云图

Fig.9 Cloud chart of immersion results



a) 空气冷却外壳温度云图



b) 空气冷却电芯温度云图

图 10 空气冷却结果云图
Fig.10 Cloud chart of air cooling results

从以上两种不同工况的仿真结果可看出在 1.5 A (0.2C) 小电流充电过程中, 使用浸液冷却散热的电池包温度主要集中在中上部区域, 最高温度可以达到 40.1℃; 而使用空气冷却散热的最高温度达到 49.3℃。

浸液散热效果明显。

4 台架实验验证

根据实际项目需求, 进行台架搭建, 并按照实际工况电流进行相应的测试, 台架搭建如图 11 所示。



图 11 台架实验照片

Fig.11 Bench test photos

温度曲线如图 12 所示。

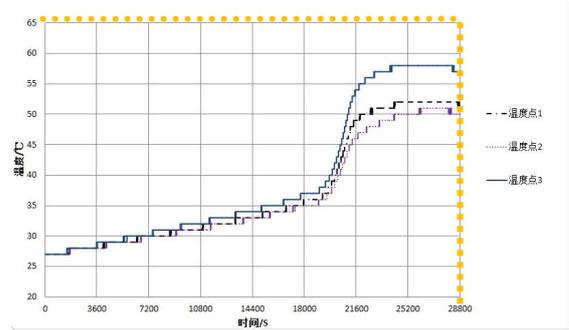


图 12 充电温升曲线图

Fig.12 Charging temperature rise curve

经台架测试验证, 正常充电过程中 (% ~100%, 0.2C 充满电需要 18000 s), 电池包的温度可以控制在 45℃ 以内, 保证电池使用安全。

5 IP 防护测试

将新开发的电池包委托第三方检测机构进行相应 IP 防护的测试, 测试标准 GB4208-2018。电池包整体浸入水深深度 1 m 的水池内, 浸水时间 30 min, 测试后检查箱体内部无任何灰尘和水的进入, 则判定满足 IP67 的防护要求。实际测试过程照片如图 13 所示, 经检测机构检查判定满足 IP67 防护。



图 13 IP 防护测试照片

Fig.13 IP protection test photos

6 结论

通过对镍氢电池用浸液类型的选择、电池包结构的设计、热仿真以及台架测试, 确定浸液散热方案满足温度控制的要求, 同时针对设计开发的电池包委托第三方检测机构做了 IP 防护等级的确认, 确定浸液油冷包的设计开发满足设计开发目标, 能够满足汽车对 IP 防护的要求, 具备小批量推广的条件。

(下转第 87 页)

足以阻止隧道及围岩冻害的发生, 还需要主动采取加热措施, 防止冻害现象的发生。

参考文献:

- [1] 陈香利. 回头沟隧道岩石导热系数及围岩温度场分布规律研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [2] Zeng Y, Liu K, Zhou X, et al. Tunnel temperature fields analysis under the couple effect of convection-conduction in cold regions [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 120:378-392.
- [3] Krarti M, Kreider J F. Analytical model for heat transfer in an underground air tunnel [J]. *Energy Conversion and Management*, 1996, 37(10):1561-1574.
- [4] Guymon G L, Luthin J N J W R R. A coupled heat and moisture transport model for arctic soils[J]. 1974, 10(5): 995-1001.
- [5] Liu W, Feng Q, Wang C, et al. Analytical solution for three-dimensional radial heat transfer in a cold-region tunnel [J]. 2019, 164.
- [6] 孙晓鹏. 季节性冻土区铁路隧道防冻措施及温度场变化规律研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [7] 罗彦斌. 隧道冻害发生机理及其防治措施的研究 [D]. 西安: 长安大学, 2007.
- [8] 李磊. 多年冻土隧道洞口段抗冻设防长度计算方法及温度响应研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2016
- [9] 李寅, 吴文敬, 王晓静等. 高硅氧纤维/酚醛泡沫复合材料的结构与性能[J]. *宇航材料工艺*, 2018, 48(5):26-29.
- [10] 李荣博, 刘晓强, 龚崑, 等. 新燃料运输容器聚氨酯泡沫填充材料性能研究[J]. *包装工程*, 2017, 38(21): 10-14.

(上接第 73 页)

参考文献:

- [1] 曹明伟. 纯电动汽车电池组被动式液冷散热系统仿真分析与优化[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [2] 饶中浩, 张国庆. 电池热管理[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [3] 林国发. 纯电动汽车锂电池组温度场研究及散热结构优化[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [4] 李秋芬. 车用动力电池包的散热仿真分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [5] 徐善红, 聂永福. 动力电池系统热管理仿真分析及设计优化[J]. *汽车实用技术*, 2019, (11):3-5.
- [6] 楼英莺. 混合动力车用镍氢电池散热系统研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [7] Claude Letoumeau, Denis Geoffroy, Philippe St-Germain, Progress in lithium polymer battery system for electric vehicles[C]. Belgium, Brussels: EVS-15, 1998.
- [8] 张浩, 罗志民, 宋韩龙, 等. 电动车动力锂离子电池水冷系统研究[J]. *汽车实用技术*, 2017(6): 47-50.
- [9] 魏增辉, 许思传, 李钊, 等. 基于相变材料和液冷的 LiFePO₄ 电池包热管理研究[J]. *电源技术*, 2016, 40(1): 44-46.