

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2020.01.010

新能源汽车低压充电电缆增强散热研究

李 森, 唐 波, 马婷婷, 张锡彦, 纪国剑

(常州大学 石油工程学院, 江苏 常州 213164)

摘要:目前新能源汽车充电电缆载流量小, 充电时间长, 成为限制新能源汽车推广的一个重要因素。要进一步提高载流量, 必然对电缆散热技术提出更高要求, 低压充电电缆快速散热成为亟待解决的技术问题。根据低压电缆散热需求, 综述了强制冷却技术、相变技术、绝缘层改性材料技术在电缆增强散热方面的应用研究, 指出了这几种研究方向的实现方法和优缺点, 阐述了低压充电电缆增强散热研究的主要发展方向。

关键词: 充电电缆; 新能源汽车; 强制冷却; 相变材料; 石墨烯

中图分类号: TM 21

文献标志码: A

文章编号: 2095-0411(2020)01-0062-08

Review of Research on the Enhanced Heat Dissipation of Low Voltage Charging Cables for New Energy Vehicles

LI Sen, TANG Bo, MA Tingting, ZHANG Xiyan, JI Guojian

(School of Petroleum Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: At present, the low carrying capacity of the charging cable and the long charging time has become an important factor restricting the promotion of new energy vehicles. It is necessary to put forward higher requirements for the cable heat dissipation technology to further increase the carrying capacity. The rapid heat dissipation of low-voltage charging cable becomes a technical problem that needs to be solved urgently. The application researches of forced cooling technology, phase-change technology and insulating layer modification material technology in enhancing heat dissipation of cable are reviewed in this paper according to the heat dissipation demand of low-voltage cable. The realization methods and advantages and disadvantages of these research directions are pointed out. The main development direction of the study on the enhancing heat dissipation of low-voltage charging cable is described.

Key words: charging cable; new energy vehicles; forced cooling; phase-change material; graphene

收稿日期: 2019-07-02。

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK20150266)。

作者简介: 李森(1985—), 男, 江苏徐州人, 博士, 讲师。通信联系人: 纪国剑(1980—), E-mail: jgj@cczu.edu.cn

引用本文: 李森, 唐波, 马婷婷, 等. 新能源汽车低压充电电缆增强散热研究[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2020, 32(1): 62-69.

1 低压电缆散热背景

随着环境和资源压力加剧,新能源电动车的节能价值逐步凸显,该领域即将迎来新的增长点,同时充电桩市场的需求也将迅速提高。近期国家发改委、工信部、国家能源局、住建部四部委联合发布了《电动汽车充电基础设施发展指南(2015—2020 年)》,明确提出到 2020 年中国充换电站数量达到 1.2 万个,充电桩达到 480 万个。于此同时,对充电时间缩短的需求也在同步提高。以常见的国家电网慢充桩为例,其电压为 220 V,电流仅为 25 A 左右,输出功率约为 5.5 kW,为一辆电动汽车充满电需要 5~10 h;如果采用直流快充桩,其电压为 380 V,电流仅为 50 A 左右,输出功率约为 19 kW,一般 1~2 h 能将一辆电动汽车充电至 80%。考虑到目前充满电的电动汽车行驶里程典型值也仅仅是 150~200 km,这样漫长的充电时间显然亟待缩短。

要缩短充电时间必需提高充电电流,而充电电流的提高必然带来电缆温度的升高。在新能源汽车领域,低压充电电缆温度过高会出现电缆绝缘损坏、充电稳定性下降、人员烫伤等危害。降低电缆发热的常规方法是提高电缆线芯直径,但是充电电缆特殊的使用场景使其不可以太粗太重,电缆线芯直径不能无限增大。如何实现充电过程中电缆快速散热是新能源电动车等行业发展的关键问题。

目前针对低压充电电缆散热的研究较少。该问题可以参考现有的电缆散热技术进行技术研发。在工业大容量输电电缆中,对于电缆散热问题研究比较充分,例如大功率主干线电缆、电弧炉或电阻炉的大电流水冷电缆、高温超导电缆等领域。目前电缆线路大容量化主要措施见图 1。图 1 中降低热阻和强制冷却方案与本文低压电缆相关性最高。其余措施多是用在大功率电缆、地埋电缆等用途。本文主要围绕电缆强制冷却方案、相变技术应用和绝缘导热性能改进进行讨论。

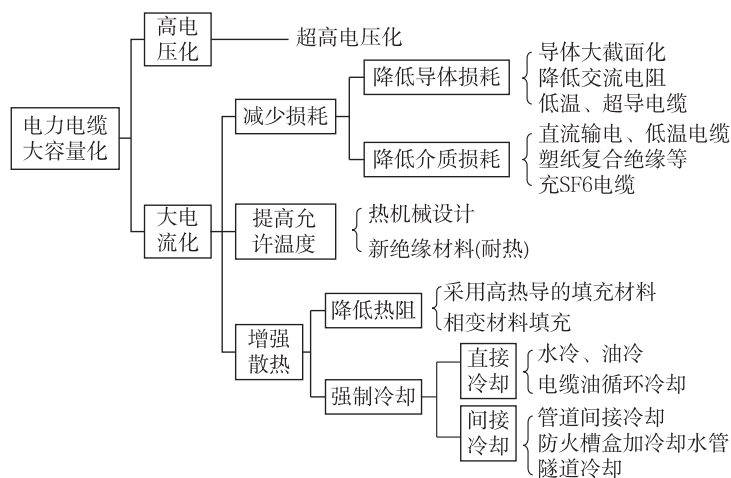


图 1 增加电缆容量的主要措施

Fig.1 Main measures to increase cable capacity

2 强制冷却技术在电缆散热中的应用

采用冷却方式对电缆载流量的提高是十分显著的,国外(主要是日本及欧洲)早在 20 世纪 70 年代即开始了电缆强制冷却的研究,并在多个电压等级电缆系统上应用了强制冷却系统,对电缆在强制冷却时对载流量的影响作了大量的试验积,累了相当多的数据。但在中国,电缆采用冷却技术还属于比较前沿的技术(一般仅考虑风冷),尚无较为系统的理论。

在新能源汽车低压充电电缆领域,目前工程实践中尚无成熟产品。有些公司已经开始申请相关专

利,并开始尝试做强制冷却方案的充电电缆样品。

图 2 是两种专利中提出的内部强制液体冷却方案。其中图 2(a)为江苏晟彼特特种电缆有限公司提出的一种内部冷却方案^[1]。该方案中,在电力线缆导体和绝缘层之间设置有冷却腔支撑肋,为图中 11—14 的位置,支撑肋和电力线缆导体围成用于输送冷却液的冷却腔。冷却液和电缆线芯直接接触。该方案冷却效果较好,但是该方案中有如下问题需要注意:①导体或线缆铠装直接与冷却液接触,需注意冷却液的腐蚀和导电问题;②在生产过程中包敷绝缘层时需同时用模具形成冷却腔支撑肋;③该线缆两端接口需要特别设计。

图 2(b)为江苏艾立可电子科技有限公司提出的内部间接冷却方案^[2]。图中 10 为两根冷却液管道。作为间接冷却方案,冷却液和导线中间有其他介质,导热性能较上一方案略差,同时冷却液管道尺寸太细,流动阻力大,容易变形压迫使流通不畅。不过生产成本较低,同时该线缆两端接口设计是工艺难点。

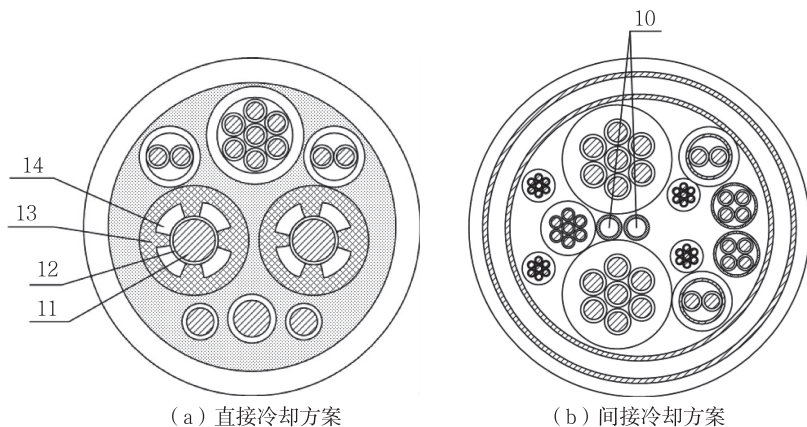


图 2 两种专利中提出的内部冷却方案

Fig.2 Internal cooling scheme proposed in two patents

沃尔新能源推出了可高达 600 A 充电解决方案,具体公布的样机设计图如图 3 所示。该方案尚无批量产品生产。可以推测存在的问题是,冷却液密封和绝缘问题没有很好解决,从图中可见必须处理好该电缆内部冷却液通道和充电枪接口的设计,这一步骤相对比较复杂。这也是采用冷却液进行内冷却非常需要注意的问题。此外瑞士灏讯电缆和特斯拉汽车均推出了带有强制冷却系统的充电设备样品,能够降低有效降低温度,容许更高的电流运行。

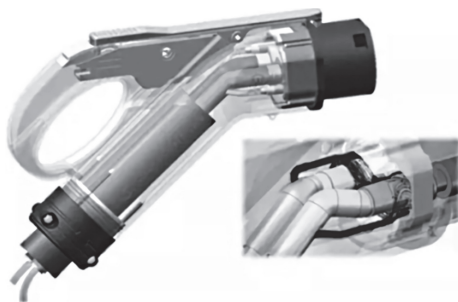


图 3 沃尔新能源样机设计图

Fig.3 Prototype design drawing of Woer new energy

采用液体强制冷却是效果最理想的强化散热方案。目前这种方案主要存在以下几种困难需要工程上加以解决:① 生产工艺困难。电缆线芯在生产中采用多股铜线绞制而成,要在线芯中心或外侧增加冷却液通道,同时要求该通道必需有一定强度,以支撑流道不会发生变形阻塞,这些要求对于生产工艺是比较困难的;② 充电桩冷却系统。充电桩中必需配备一套冷却循环系统,主要包括泵、稳压器、风冷散热器等,这些设备布置在充电桩中,对于充电桩设计安装提出更高要求;③ 绝缘要求提高,冷却液和电缆线芯直接接触,存在导电风险,必需经过严格设计,提高绝缘强度。

3 相变技术在电缆散热中的应用

3.1 相变材料在电缆散热中的应用

相变材料(PCM)在恒温相变过程中吸收(或放出)的大量热量来进行热能贮存(或释放),具有储热密度高以及导热性能好等优点,适用于大功率密度的设备散热。将相变材料填充到电缆绝缘层中,可以在电缆工作时快速吸收大量热量。当电缆停止工作时,相变材料再逐步释放热量,以此来维持电缆温度。

如湖南华菱线缆股份有限公司^[3]提出采用相变材料技术来解决电缆的发热升温问题。该专利提出将高温和低温相变材料分别填充至电缆内的内外两屏蔽层中对电缆进行逐级控温,以缓冲瞬间高电流、间歇负载等引起的发热。所提出的电缆结构示意图如图 4 所示。该结构的电缆尚未见实际应用。

另外,国网河北省电力公司的郭刚^[4]也提出一种将复合相变材料应用于电缆填充层的相变控温方法,并以 YJV22-8.7/10 kV-3×300 三芯 XLPE 电缆为例进行有限元数值计算,计算结果表明该方法可降低电缆线芯温升达 37.38%,提升电缆载流量达 60.61%,部分计算结果如图 5 所示。图 5(a)显示对于间歇工作电缆,当电流从 300 A 升至 561 A 维持 4 h 工作状态,又降至 170 A,如果采用常规线芯电缆温度将超过 90 °C,如果采用相变线芯电缆,由于相变材料相变点为 55 °C,电缆最高温度始终低于 55 °C。图 5(b)显示相变焓值越大,电缆载流量将显著上升。

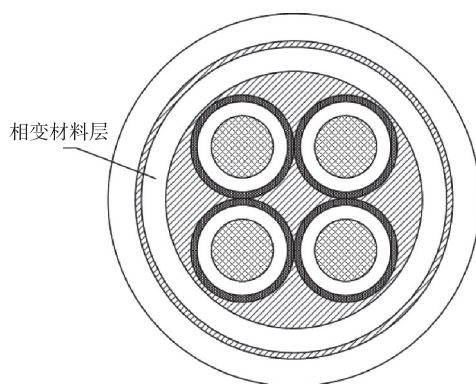


图 4 相变自控温屏蔽电缆结构示意图

Fig.4 Structure diagram of phase change automatic temperature shielded cable

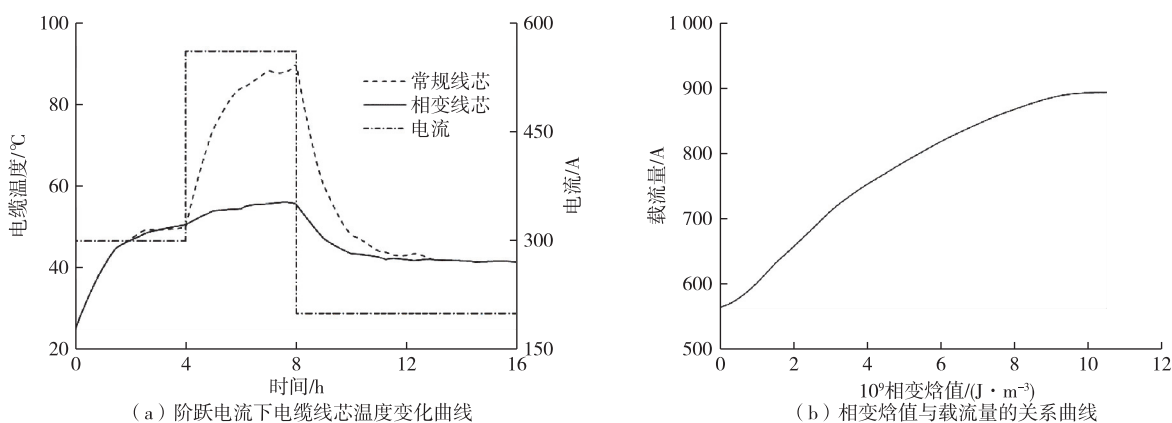


图 5 相变线芯间歇工况数值计算结果

Fig.5 Numerical calculation results of phase change core under intermittent condition

目前,提出将相变材料应用于电缆线中快速散热的实例较少,这与相变材料应用的不成熟有关。相变材料存在最大的问题在于多次循环相变过程中,热物理性质退化^[5],使得相变储能能力下降。另外要将相变材料填充到电缆绝缘层中,通常采用胶囊型制备符合相变材料技术,但是这种填充方式有可能改

变绝缘层绝缘和力学强度,需要对该填充工艺做更具体的研究。

当然新能源电动汽车大电流充电背景的提出为相变材料应用于电缆强化散热提供了一个有力发展的契机。根据不同的使用目的,开发出具有合适的相变温度与相变潜热的相变储能材料;研究改善相变材料的导热性能,提高其相变速率的方法;相变储能材料与电缆材料的相容性以及混合后填充层的储热/放热特性的研究等。这些问题的研究,有利于拓展相变材料在电缆领域中的应用,并对提高能源的利用效率及减少温室气体的排放具有重要意义。

3.2 热管技术在电缆散热中的应用

热管^[6]是一种高效的传热元件,它通过自身内部工作液体的蒸发与冷凝相变过程来实现传热的传热元件,具有极高的导热性能和优良的等温性。在电缆散热方面,一般是利用热管对电缆集中的导管或电缆沟进行局部冷却以及电缆的各种联结处的冷却^[7],如图 6 所示。文献[8]中采用 4 根热管对电缆沟进行冷却实验,发现 4 根热管的总的最大吸热量达到 1.7 W/cm,相当于电缆沟的总发热量的 50%。可见热管完全可用于电缆沟的冷却。

对于低压充电电缆,可以考虑采用小微型热管,散布于电缆绝缘层中,快速将电缆线性发热量导出到电缆表层,增强散热速度。该方案同样要考虑加工工艺,首先小微型热管的生产工艺和混合工艺是首先要解决的问题。同时要考虑有可能改变绝缘层绝缘和力学强度,需要对该填充工艺做更具体的研究。

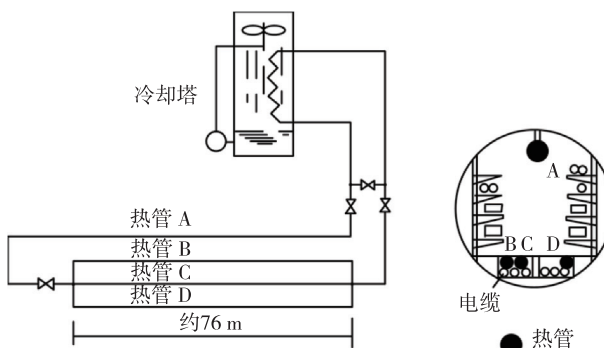


图 6 热管冷却电缆沟的试验设备示意图

Fig.6 Schematic diagram of test equipment for heat pipe cooling cable trench

4 绝缘层改性材料技术在电缆散热中的应用

在电缆绝缘层中加入热界面改性材料是提高其散热性能的有效方法之一。减少绝缘层的热阻率, 有效提高电缆内部铜芯的散热效率^[8]。最典型的电缆绝缘层包括乙丙橡胶、交联聚乙烯和热塑性弹性体等^[9-10], 因为它不易被腐蚀, 具有保护作用的同时还具有良好的弹性^[11]。但是其导热性能很差, 可加入热导填充物以提高其热导率^[12-13]。包括碳化硅、氮化硼和各种碳的同素异形体常被用作热导填料加入绝缘层中^[14-18]。但是为了达到热界面材料所需要的热导率, 填料的体积比往往需要高达 60%, 但是这会使得复合绝缘层材料密度过大并且机械性能差^[19-21]。

石墨烯具有所有已知材料中最高的热导率。为了将石墨烯的超高热导率服务于热界面材料,研究人员开展了很多工作。SHAHIL 等^[15]构造了石墨烯和碳纳米管共同修饰的高分子环氧树脂,得到了高热导率的复合热界面材料。其中石墨烯含量为 50%,碳纳米管的含量为 0.36%。BONNET 等^[16]报道了石墨烯和碳纳米管共同改性的橡胶纳米流体和纳米复合物,也获得了热导率很高的复合物。在该报道中绝缘层材料的热导率增强幅度可以达到 1 500%,但是石墨烯的载入量依然太高^[15-17]。而且在加入石墨烯的同时还需要加入一定量的碳纳米管以便将石墨烯纳米片相互连接,但是碳纳米管的制备十分困难需要耗费大量的时间和昂贵的催化剂。因此应优化所采用的石墨烯的厚度,尺寸及含量,由传热机理出发优化石墨烯基复合绝缘材料的各项性能。

要实现石墨烯类功能填料对电缆中绝缘材料的成功改性,需要实现如下几点:

- 1) 石墨烯片不仅需要均匀分布,而且不能形成完整的输运网络。

石墨烯除了具有良好的导热性能之外,还具有优越的导电性。所以改性的同时不能改变绝缘层的

介电性能。应避免当石墨烯的含量超过某一阈值后,其可充当电子快速运输的完备通道,影响绝缘层的介电性能。如图 7 所示,图 7(a)中,石墨烯片在绝缘基材中形成连续结构,可以有效提高导热率,但是同时也带来绝缘性能下降的风险;图 7(b)中,由于石墨烯片未能形成连续结构,虽然保证了绝缘性能,但是导热率提高有限。

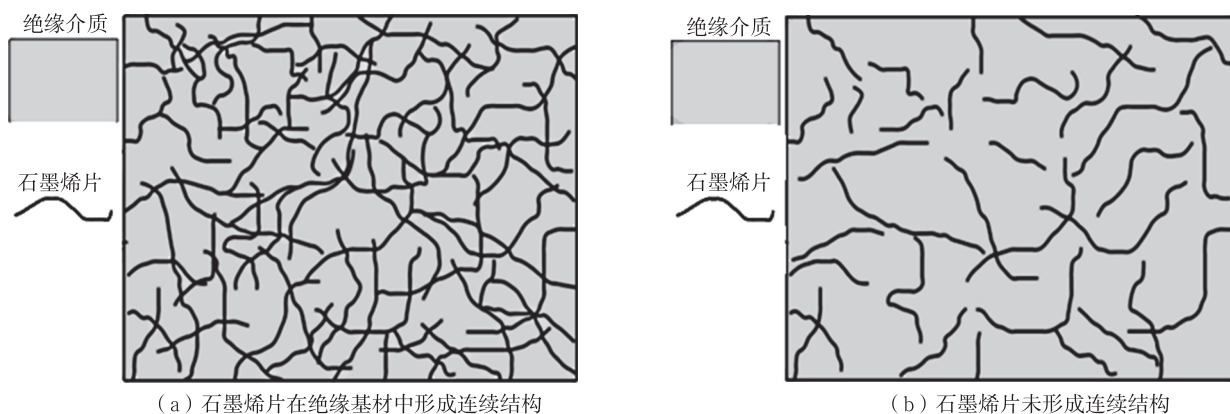


图 7 石墨烯片在绝缘基材中的不同结构

Fig.7 Different structures of graphene sheet in insulating substrate

2) 石墨烯片表面的官能团含量应该实现优化。

石墨烯表面官能团的存在能使石墨烯片和橡胶或塑料等绝缘材料的声子模式更加匹配,有利于声子在石墨烯和基材界面之间的运输,从而提高基材的热导率。石墨烯表面官能团保留量的优化需要进一步的研究,例如采用不同还原程度的石墨烯作为填料,通过测试分析和相关计算获得石墨烯表面官能团的保留量及石墨烯片的厚度,同时测定一系列石墨烯基复合材料的热导率。实现石墨烯还原程度以及厚度的优化,最大限度提高绝缘材料的散热性能。

3) 在高温条件下保证石墨烯改性电缆绝缘层的高散热性能。

对于充电设备来说,保持长时间工作的稳定性至关重要。因此,高温条件下保持绝缘层的高热导率是设备长时间稳定工作的前提条件之一。研究表明,包括石墨烯基复合材料在内的众多导热材料随着温度的升高其热导率都会显著下降^[15, 22-24]。不同的实验结果已经验证,当温度由室温上升至 393 K 后,石墨烯基复合热界面材料的热导率下降可超过 30%,如图 8 所示^[23]。

温度的升高会引起石墨烯基复合材料热导率的快速下降,原因包括晶格振动加剧引起热导率的本征下降,以及由于热膨胀系数的差异引起填料和基材间出现空隙而导致热导率的下降。如果石墨烯片的尺寸过小,那么必然增加升温过程中出现空隙的概率。同样的,如果石墨烯厚度过低,在填料具有相同质量分数的前提下,出现空隙的概率更高。因此可通过优化石墨烯尺寸和厚度抑制复合热界面材料的热导率受温度的影响。

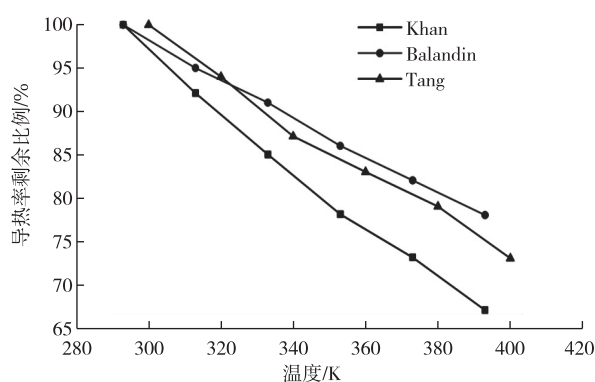


图 8 石墨烯基复合热界面材料热导率随温度升高变化曲线

Fig.8 Thermal conductivity curve of graphene based composite thermal interface material with temperature rise

目前采用石墨烯制备导热增强型复合相变储能材料的研究,为电缆散热技术提供了一种新的方向。这类相变储能材料具有导热系数高、传热速率快、能量利用率高等优势,已成为目前相变储能研究领域的热点之一^[25]。例如,利用真空浸渗等手段,将高导热的石墨烯泡沫与有机相变材料复合,可获得具有高导热、形状稳定、高储能密度的相变复合材料^[26]。如 YANG 等^[27]利用冰模板法将含有氧化石墨烯和石墨烯的混合水溶液进行低温冷冻,干燥后获得了混杂石墨烯泡沫,并通过真空浸渗填入聚乙二醇。测试结果表明,在氧化石墨烯和石墨烯的含量分别只有 0.45% 和 1.8% 时,就可以实现对纯聚乙二醇热导率的提高,提高幅度达到了 360%。根据最新的研究来看,石墨烯相变复合材料可以被认为是最有前途的能量转换和存储应用技术^[28-30],但是仍然处于初步研究阶段,在充电电缆领域尚未有实际应用实例。

5 结 论

随着节能环保要求提高,新能源汽车发展势在必行。目前充电电缆载流量小,充电时间长,成为限制新能源汽车推广的一个重要因素。要进一步提高载流量,必然对电缆散热技术提出更高要求。本文根据低压电缆散热需求,综合调研了电缆强制循环冷却技术、相变技术、绝缘层改性材料技术等领域现有技术方案。

使用冷却剂在电缆导体中进行直接强制循环冷却,是电缆冷却和散热技术中效果最好的一种。但是目前在低压电缆中尚未见大规模成熟使用,仅有少量研究专利和部分样机,采用的方案基本都是线芯内直接冷却。该方案需要解决生产工艺改进、循环系统设计以及绝缘要求提高等问题。相变技术可以分为相变材料和热管技术两类。相变材料可以在相变温度时恒温相变,大量吸收相变潜热。工程上应用的相变材料已经大量开发,有部分专利涉及到将相变材料填充绝缘层的降温方式。但是相变材料自身仍然存在性能上的不足,同时将其用于尺寸较小的低压电缆需要解决的技术问题较复杂,尚需要更深入的研究。通过填充改性材料提高绝缘层热导率,很多文献对这一方案进行研究,其中以石墨烯材料导热效果最好,但是因为其导电性较强,有可能破坏绝缘材料的绝缘性能,需要进一步研究优化填料方案。

在低压电缆增强散热技术中,以上 3 种技术目前均未成熟。为达到最好的散热效果,可以分别组合采用这几种方案,从而实现大幅度提高电缆自流量,减少新能源汽车充电时间的目的。

参考文献:

- [1]朱汉青. 电动汽车充电桩冷却电缆: 201710226268.0[P]. 2017-04-08.
- [2]黄焕强. 一种新能源电动汽车柔性冷却散热、温控充电桩电缆: 201621302721.9[P]. 2016-11-30.
- [3]王振金, 李华斌. 相变自控温屏蔽电缆: 201310739853.2[P]. 2013-12-29.
- [4]郭刚. 计及电流波动性的三芯电缆相变控温方法及其性能分析[J]. 河北电力技术, 2016, 35(2):18-21.
- [5]尚燕, 张雄. 相变储能材料的应用及研究现状[J]. 材料导报, 2005, 19(5):265-268.
- [6]庄骏, 张红. 热管技术及其工程应用[J]. 能源研究与利用, 2000(5):41.
- [7]刘锦余. 利用热管冷却地下电缆[J]. 中国电力, 1981(5):72-73.
- [8]GARIMELLA S V, FLEISCHER A S, MURTHY J Y, et al. Thermal challenges in next-generation electronic systems[J]. IEEE Transactions on Components & Packaging Technologies, 2008, 31(4):801-815.
- [9]JAGANNADHAM K. Electrical conductivity of copper-graphene composite films synthesized by electrochemical deposition with exfoliated graphene platelets[J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 2012, 43(2):316-324.
- [10]MARTINGALLEGO M, VERDEJO R, KHAYET M, et al. Thermal conductivity of carbon nanotubes and graphene in epoxy nanofluids and nanocomposites[J]. Nanoscale Research Letters, 2011, 6(1):1-7.
- [11]IM H, KIM J. Thermal conductivity of a graphene oxide-carbon nanotube hybrid/epoxy composite[J]. Carbon, 2012, 50(15):5429-5440.

- [12]SHI Z, RADWAN M, KIRIHARA S, et al. Enhanced thermal conductivity of polymer composites filled with three-dimensional brushlike AlN nanowhiskers[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(22):282.
- [13]ZHI C, BANDO Y, TERAOKA T, et al. Boron nanotube-polymer composites: towards thermoconductive, electrically insulating polymeric composites with boron nitride nanotubes as fillers[J]. *Advanced Functional Materials*, 2010, 19(12):1857-1862.
- [14]BABAEI H, KEBLINSKI P, KHODADADI J M. Thermal conductivity enhancement of paraffins by increasing the alignment of molecules through adding CNT/graphene[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2013, 58(1):209-216.
- [15]SHAHIL K M, BALANDIN A A. Graphene-multilayer graphene nanocomposites as highly efficient thermal interface materials[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(2):861-867.
- [16]BONNET P, SIREUDE D, GARNIER B, et al. Thermal properties and percolation in carbon nanotube-polymer composites[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(20):787.
- [17]POP E, MANN D, WANG Q, et al. Thermal conductance of an individual single-wall carbon nanotube above room temperature[J]. *Nano Letters*, 2005, 6(1):96-100.
- [18]GHOSH S, CALIZO I, TEWELDEBRHAN D, et al. Extremely high thermal conductivity of graphene: prospects for thermal management applications in nanoelectronic circuits[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(15):151911.
- [19]SARVAR F, WHALLEY D C, CONWAY P P. Thermal interface materials: a review of the state of the art[C]// *Electronics Systemintegration Technology Conference*. Dresden Geruam: IEEE Publisher, 2006:1292-1302.
- [20]PRASHER R S, NARASIMHAN S. Nano and micro technology-based next-generation package-level cooling solutions[J]. *Intel Technology Journal*, 2005, 9(4):285-296.
- [21]FELBA J. Thermally conductive nanocomposites[M]// *Nano-Bio-Electronic, Photonic and MEMS Packaging*. Boston: Springer US, 2010:277-314.
- [22]TANG B, HU G, GAO H, et al. Application of graphene as filler to improve thermal transport property of epoxy resin for thermal interface materials[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2015, 58:420-429.
- [23]SHAHIL K M F, BALANDIN A A. Thermal properties of graphene and multilayer graphene: applications in thermal interface materials[J]. *Solid State Communications*, 2012, 152(15):1331-1340.
- [24]MOISALA A, LI Q, KINLOCH I A, et al. Thermal and electrical conductivity of single-and multi-walled carbon nanotube-epoxy composites[J]. *Composites Science & Technology*, 2006, 66(10):1285-1288.
- [25]陈素清, 黄国波, 鲍建设, 等. 石墨烯导热增强相变储能材料的制备及性能[J]. *新型炭材料*, 2018, 33(3): 262-267.
- [26]孔丽. 石墨烯基相变储能复合材料的制备及导热机理分析的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- [27]YANG J, QI G, LIU Y, et al. Hybrid graphene aerogels/phase change material composites: thermal conductivity, shape-stabilization and light-to-thermal energy storage[J]. *Carbon*, 2016, 100: 693-702.
- [28]ALLAHBAKHSI A, ARJMAND M. Graphene-based phase change composites for energy harvesting and storage: state of the art and future prospects[J]. *Carbon*, 2019, 148: 441-480.
- [29]LIU Y, ZHANG D. Effect of covalent functionalization and phase change matrix on heat transfer across graphene/phase change material interfaces[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 151: 38-45.
- [30]LEONG K Y, ABDUL R M R, GURUNATHAN B A. Nano-enhanced phase change materials: a review of thermophysical properties, applications and challenges[J]. *Journal of Energy Storage*, 2019, 21: 18-31.

(责任编辑:殷丽莉)