

特种真空隔热板(VIP)在电池热管理方面的应用

배터리 열 관리에 특수 진공 단열재(VIP) 적용

○ 石芳录 刘三忠 华富才

(福建赛特新材股份有限公司 技术中心, 厦门 361021)

시 광루, 류삼중, 후아푸차이

(슈퍼텍, 기술 센터, 샤먼 361021)

摘要: 隔热材料是电池热管理系统不可或缺的关键材料,特种真空隔热板(VIP)以其卓越的隔热和防火性能在提升电池系统性能方面展现出良好应用前景。本文首次系统介绍了金属VIP和超薄VIP的主要性能指标,开展了隔热性能以及动态热传递特性的测试分析,并与现行气凝胶毡产品进行对比,用于电池包保温以显著改善电池包低温环境适应能力和续航能力,以及电池热失控扩散抑制,同时具有较高的性价比。结果表明新型特种真空隔热类产品在电池和储能系统的散热、隔热、防火一体化设计等方面更具优势。

关键词: 特种真空隔热板; 导热系数; 热扩散系数; 电池热管理; 热失控

中图分类号: U463 DOI:10.20042/j.cnki.1009-4903.2025.02.007

초록: 단열재는 배터리 열 관리 시스템에 필수적인 핵심 소재입니다. 특수 진공 단열재(VIP)은 뛰어난 단열 및 내화 특성으로 인해 배터리 시스템 성능 향상에 긍정적인 적용 전망을 보여줍니다. 본 논문에서는 금속VIP와 초박형VIP의 주요 성능 지표를 체계적으로 소개하고, 단열 성능 및 동적 열전달 특성에 대한 시험 분석을 수행하며, 기존 에어로젤 펠트 제품과 비교합니다. 이러한 단열재는 배터리 팩 단열에 사용되어 저온 환경에서 배터리 팩의 적응성과 내구성을 크게 향상시키고 배터리 열 폭주 확산을 억제하는 동시에 높은 비용 효율성을 제공합니다. 연구 결과는 새로운 특수 진공 단열 제품이 배터리 및 에너지 저장 시스템의 방열, 단열 및 내화 설계에 있어 더 많은 이점을 제공한다는 것을 보여줍니다.

키워드: 특수 진공 단열재; 열전도율; 열확산율; 배터리 열 관리; 열 폭주

CLC 번호: U463 DOI: 10.20042/j.cnki.1009-4903.2025.02.007

Application of Special Vacuum Insulation Panel (VIP) on Battery Thermal Management

Abstract: Thermal insulation material is an indispensable key material for battery thermal management system. Special vacuum insulation panel (VIP) shows a good application prospect in improving the performance of battery system with its excellent thermal insulation and fire protection performance. This paper systematically introduces the main performance indexes of metal VIP and ultra-thin VIP for the first time. The thermal insulation performance and dynamic heat transfer characteristics are tested and analyzed. Compared with existing aerogel felt products, special VIPs significantly improve the performance of the battery pack and the battery life in low temperature environment, so as to inhibit thermal runaway propagation of batteries, while maintaining high cost-effectiveness. The results show that the new special vacuum insulation products have more advantages in the integrated design of heat dissipation, heat insulation and fire prevention of batteries and energy storage systems.

Key words: Special vacuum insulation panels; Thermal conductivity; Thermal diffusivity; Battery thermal management; Thermal runaway

0引言

电动汽车(新能源汽车的一种)的大量应用有效解决了传统汽车带来的能源和环境问题。而动力电池作为电动汽车的核心部件,其寿命和使用效率决定了汽车使用性能。其中对电池寿命影响最重要的因素就是它的工作温度,温度过高或过低都会严重影响电池的性能,温度过低影响电池的充放电效率;温度过高会影响其寿命,其

温度如果蔓延失控还会导致爆炸等安全事故,因此确保电池在安全的温度范围内工作运行是整个行业所关注。

特别是随着电池能量密度的增加,续航能力得以快速提升,但产品的可靠性、安全性则更加突显。电池热失控引发的安全事故,阻碍了电动汽车等新能源汽车的发展。虽然为保障安全使用,电池在出厂前都会经历各种严苛的安全法规测试,但即使如此也不能完全

杜绝热失控事故的发生。

动力电池的工作原理是通过电化学反应而输出能量，因此这种反应必然与电池系统的温度密切相关。许多研究者对电池

的热力特性、温度对电池性能和寿命的影响做过详细建模仿真研究^[1]。如Sato^[2]等人研究表明，当电池温度高于50℃时，其放电效率和使用寿命都会有很大衰减；Khateeb^[3]等人指出，锂电池温度超出其最佳工作范围时，电池组温度均匀性变差，会引发热失控、起火等安全事故；Pesaran^[4]等人则提出，电池最佳工作温度控制应在25~40℃范围。因此，开发高效散热/隔热技术，构建电池热管理系统，使电池始终能维持在合适的温度范围内，从而保证电池正常运行，杜绝安全事故。

0 서문

전기 자동차(신에너지 자동차의 한 유형)의 광범위한 도입은 기존 자동차와 관련된 에너지 및 환경 문제를 효과적으로 해결했습니다. 전기 자동차의 핵심 구성 요소인 배터리의 수명과 효율은 자동차의 성능을 결정합니다. 배터리 수명에 영향을 미치는 가장 중요한 요소는 작동 온도입니다. 작동 온도는 너무 높거나 낮으면 배터리 성능에 심각한 영향을 미칠 수 있습니다. 낮은 온도는 배터리 충전 및 방전 효율에 영향을 미칠 수 있습니다. 높은 온도는 배터리 수명을 단축시킬 수 있으며, 제어되지 않은 온도 상승은 폭발 및 기타 안전 위험을 초래할 수 있습니다. 따라서 배터리가 안전한 온도 범위에서 작동하도록 하는 것은 업계 전체의 최우선 과제입니다.

특히 배터리 에너지 밀도가 증가함에 따라 주행 거리는 빠르게 향상되었지만, 제품 신뢰성과 안전성은 더욱 중요해졌습니다. 배터리 열 폭주로 인한 안전 사고는 전기차를 포함한 신에너지 자동차 개발을 저해하고 있습니다. 배터리는 안전한 사용을 보장하기 위해 출고 전 엄격한 안전 테스트를 거치지만, 이것만으로는 열 폭주 사고를 완전히 방지할 수 없습니다.

전력 배터리의 작동 원리는 전기 화학 반응을 통해 에너지를 출력하는 것이므로 이 반응은 필연적으로 배터리 시스템의 온도와 밀접하게 관련됩니다. 많은 연구자들이 배터리의 열적 특성과 배터리 성능 및 수명에 미치는 온도의 영향에 대한 자세한 모델링 및 시뮬레이션 연구를 수행했습니다[1]. 예를 들어, Sato et al. [2]은 배터리 온도가 50°C보다 높으면 방전 효율과 수명이 크게 감소한다는 것을 발견했습니다. Khateeb et al. [3]은 리튬 배터리의 온도가 최적 작동 범위를 초과하면 배터리 팩의 온도 균일성이 저하되어 열 폭주, 화재 및 기타 안전 사고가 발생한다고 지적했습니다. Pesaran et al. [4]은 배터리의 최적 작동 온도는 25~40°C 범위에서 제어해야 한다고 제안했습니다. 따라서 효율적인 방열/절연 기술을 개발하고 배터리가 항상 적절한 온도 범위에 유지되도록 배터리 열 관리 시스템을 구축하여 배터리의 정상적인

작동을 보장하고 안전 사고를 없애는 것이 필요합니다.

1 新型电池技术对新型隔热材料或隔热结构的需求

电池热管理技术，根据是否消耗额外能源，可分为被动技术和主动技术；根据传热介质和换热方式的不同，热管理模式可细分为风冷、液冷、相变材料PCM和热管冷却等模式。

电池热管理不仅包括电池包的温度控制，也包含电芯间的隔热/散热。前者更多与电池系统的运行质量有关，后者则更多关注电池热失控与温度蔓延过程，事关安全。

1. 새로운 배터리 기술에는 새로운 단열재 또는 구조가 필요합니다.

배터리 열 관리 기술은 추가 에너지 소비 여부에 따라 수동형과 능동형으로 구분할 수 있습니다. 열 전달 매체와 열 교환 방식에 따라 열 관리 모드는 공랭식, 액랭식, 상변화 물질(PCM), 히트파이프 냉각으로 세분될 수 있습니다.

배터리 열 관리는 배터리 팩의 온도 제어뿐만 아니라 배터리 셀 간의 단열 및 방열까지 포함합니다. 전자는 배터리 시스템의 작동 품질과 더 밀접한 관련이 있는 반면, 후자는 안전에 필수적인 배터리 열 폭주 및 온도 분포에 더 중점을 둡니다.

关于锂电池热管理技术的研究, 各种冷却换热方式的开发已有大量文献报道^[5]; 但针对热管理所用隔热材料的特性分析却鲜有报道。事实上, 隔热材料在电池热管理中扮演着非常重要的角色, 不同用途所关注的指标也有明显差异, 选择合适的隔热材料对提升热管理水平至关重要^[6]; 此外, 快速发展的新型电池技术对开发新型隔热材料或隔热结构的需求也更为迫切, 并提出新的要求:

锂电池的热管理技术研究和相关技术多种多样, 各种冷却换热方式的开发已有大量文献报道^[5], 但针对热管理所用隔热材料的特性分析却鲜有报道。事实上, 隔热材料在电池热管理中扮演着非常重要的角色, 不同用途所关注的指标也有明显差异, 选择合适的隔热材料对提升热管理水平至关重要^[6]; 此外, 快速发展的新型电池技术对开发新型隔热材料或隔热结构的需求也更为迫切, 并提出新的要求:

① 动力电池因电气滥用、机械滥用、短路等引起的热失控会在短时间内急剧释放大量的热量, 常规的隔热材料和液冷方案并不能完全解决问题。

② 传统汽车利用余热为乘员舱提供舒适的环境而不消耗额外功率, 而新能源汽车的热管理则在本质上需要通过消耗电池本身的能量来维持, 因此特别需要开发高效隔热材料, 特别是超低导热系数的隔热材料或隔热结构。

③ 随着市场对动力电池能量密度要求的不断提高, 其中一个解决途径是通过使用更优异的隔热材料, 来增加电池包电芯的排布数量, 从而实现提高能量密度以增加续航能力, 或者降低电池包的体积以增加车内空间, 保证舒适的驾乘体验。

④ 为使电动汽车能适应各种不同环境, 特别是北方冬季寒冷地区(室外温度往往低于 -10°C), 电动汽车在静态下很难维持动力电池所需的正常温度范围, 这会导致电池容量和寿命发生衰减。为此, 对电池系统必须采取可靠高效的保温措施。

⑤ 面对电动汽车暴露出的安全问题, 国家有关部委已陆续出台多项强制性国家标准^[7-9], 进一步强化安全性要求, 并明确规定热失控后“5分钟”内电池系统不起火不爆炸, 以便为乘员提高安全的黄金逃生时间, 而任何解决热失控的方案都离不开优异的隔热材料。

- (1) 전기적 오용, 기계적 오용, 단락 등으로 인한 전력 배터리의 열 폭주는 짧은 시간 내에 대량의 열을 빠르게 방출합니다. 기존의 단열재와 액체 냉각 솔루션은 이 문제를 완전히 해결할 수 없습니다. (2) 기존 자동차는 추가 전력을 소모하지 않고 폐열을

이용하여 승객실에 쾌적한 환경을 제공하지만, 신에너지 자동차의 열 관리는 본질적으로 배터리 자체의 에너지를 소모하여 유지해야 합니다. 따라서 고효율 단열재, 특히 열전도율이 매우 낮은 단열재 또는 단열 구조를 개발해야 할 특별한 필요성이 있습니다. (3) 전력 배터리의 에너지 밀도에 대한 시장의 요구가 지속적으로 증가함에 따라, 한 가지 해결책은 더 나은 단열재를 사용하여 배터리 팩의 배터리 셀 수를 늘리는 것입니다. 이를 통해 에너지 밀도를 높여 내구성을 높이거나 배터리 팩의 부피를 줄여 차량 내부 공간을 늘리고 편안한 주행 경험을 보장합니다. (4) 전기자동차가 다양한 환경, 특히 북반구의 한랭 지역(실외 온도가 종종 -10°C 미만)에 적용할 수 있도록 하기 위해서는 정전 시 동력 배터리에 필요한 정상 온도 범위를 유지하기 어려워 배터리 용량과 수명이 저하됩니다. 이를 위해서는 배터리 시스템에 대한 안정적이고 효율적인 절연 조치가 필수적입니다. (5) 전기자동차의 안전 문제에 대응하여 관련 국가 부처 및 위원회는 일련의 강제 국가 표준^[7-9]을 연이어 발표하여 안전 요건을 더욱 강화하고, 배터리 시스템이 열 폭주 후 “5분” 이내에 발화 또는 폭발하지 않도록 명확히 규정함으로써 승객의 골든 이스케이프 타임을 개선했습니다.

图 1 4 类隔热材料的隔热性能

그림 1 4가지 종류의 단열재의 단열성능

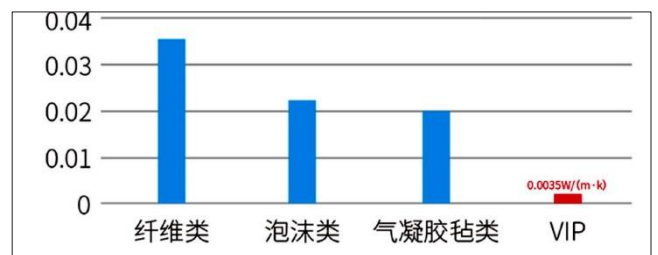


图 2 真空隔热板 (VIP)

그림 2 진공 단열재(VIP)

2 用于电池热管理的常用隔热材料

目前动力电池常用隔热材料有泡沫类、纤维类、气凝胶毡类和特种真空隔热板(金属VIP、超薄VIP), 这些材料各有优缺点。作为隔热材料, 导热系数是衡量性能优劣的主要指标, 图 1 示出常用的4类隔热

材料导热系数的差异，在满足同等隔热效果时也是隔热厚度的差异。其中：

① 泡沫和纤维类：其隔热性能相对较差，安装不便，但成本低廉。

② 气凝胶复合毡：采用新型气凝胶纳米粉体与纤维类复合方式，其制品具有较低导热系数，厚度仅为传统材料的 1/2 ~ 1/5，且耐温性能优良，使用温区广(-196~1000℃)、性能稳定，产品在新能源汽车电池热管理系统中已得到应用，但

成本较高。随着热管理系统隔热性能要求的进一步提升，其性能改善也面临挑战。

③ 真空绝热板(vacuum insulation panels, VIP)：其产品如图 所示，它是新一代高效隔热材料。其芯材为纤维或粉体类，其高阻隔包覆膜材可保证真空气密性，通过抽真空可有效隔绝气体导热并实现良好隔热。该产品具有极低的导热系数，隔热结构紧凑，其厚度仅为传统材料的 1/8~1/10，且不吸水、耐酸碱腐蚀。该产品已在家电、化工以及新能源汽车领域得到广泛应用。特别是 VIP 产品的低导热、低温度扩散系数特点，为新能源汽车动力电池紧凑设计和进一步提升其安全性提供了选择。

2. 배터리 열 관리에 일반적으로 사용되는 단열재

현재 전력 배터리에 일반적으로 사용되는 단열재로는 폼, 섬유, 에어로젤 펠트, 특수 진공 단열 재(금속 VIP, 초박형 VIP) 등이 있습니다. 이러한 재료는 각각 장단점을 가지고 있습니다. 단열재로서 열전도도는 성능 품질을 측정하는 주요 지표입니다. 그림 1은 일반적으로 사용되는 네 가지 단열재의 열전도도 차이를 보여주며, 이는 동일한 단열 효과를 얻을 때 단열 두께의 차이이기도 합니다. 다음은 그 예입니다.

(1) 폼 및 섬유: 단열 성능이 상대적으로 낮고 설치가 불편하지만 비용이 저렴합니다.

(2) 에어로젤 복합 펠트: 새로운 유형의 에어로젤 나노파우더와 섬유 복합 공법을 사용하여 열전도도가 낮고 두께가 기존 소재의 1/2~1/5에 불과합니다. 또한 내열성이 우수하고 작동 온도 범위가 넓으며(-196~1000℃), 성능이 안정적입니다. 이 제품은 신에너지 자동차 배터리의 열 관리 시스템에 사용되었지만 비용이 비교적 높습니다. 열 관리 시스템의 단열 성능 요구 사항이 더욱 향상됨에 따라 성능 개선에도 과제가 있습니다. (3) 진공 단열재(VIP)： 제품은 그림 2에 나와 있습니다. 차세대 고효율 단열재입니다. 핵심 재료는 섬유 또는 분말이며, 고차단 코팅재는 진공 기밀성을 보장할 수 있습니다. 진공 처리를 통해 가스 열전도를 효과적으로 차단하고 우수한 단열을 달성할 수 있습니다. 이 제품은 열전도 계수가 매우 낮고 단열 구조가 콤팩트합니다. 두께는 기존 소재의 1/8~1/10에 불과합니다. 물을 흡수하지 않으며 산 및 알칼리 부식에 강합니다. 이 제품은 가전제품, 화학 제품 및 신에너지

자동차에 널리 사용되었습니다. 특히 VIP 제품의 낮은 열전도율과 낮은 온도 확산 계수 특성은 신에너지 자동차 전원 배터리의 콤팩트한 설계에 대한 옵션을 제공하고 안전성을 더욱 향상시킵니다.

3 金属VIP 与超薄VIP 的性能及传热特性

3.1 金属VIP 结构及隔热性能

金属VIP 采用铝箔或不锈钢箔作为膜材料，以玄武岩纤维、高硅氧等作为芯材，抽真空后，采用焊接的方式封装，其产品具有耐高低温、低导热系数、性能稳定、耐穿刺和防火 A 级不燃等特点；是除高硅氧纤维和气凝胶毡等材料之外，另一首选的高效保温隔热材料。其主要指标见表 1。

为评价金属VIP 宽温区传热过程的非稳态特性，采用如图 3 测试装置来测量冷热面的温度响应。维持热面（加热面）在

表1 金属VIP 主要性能指标
표 1 금속VIP의 주요 성과 지표

项目 아이 템	指标 지표
中心导热系数(25℃)/(mw/(m·k)) 중심 열전도율(25℃)/(mw/(m·k))	<3
克重(1.5mm 厚度)/(kg/m ²) 무게 (1.5mm 두께)	1.3~2.0
整体漏率/(Pa·m ³ /s) 전체 누설율/(Pa·m ³ /s)	≤10 ⁻¹⁰
适用温区 /℃ 적용 온도 /℃	-253~1000

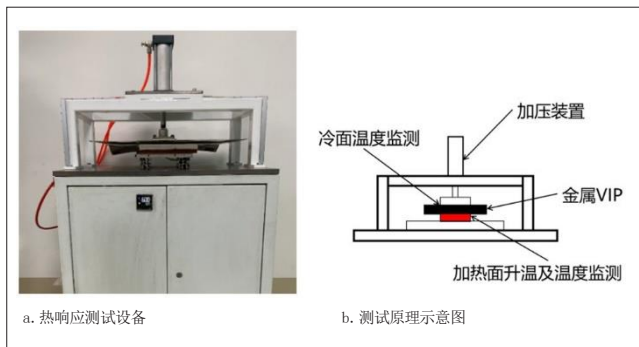


图3 温度响应测试装置

그림 3 온도 반응 시험 장치

200℃、400℃、600℃高温条件,冷面温度随时间增加而逐渐上升(如图4所示),分别为23.4℃、26.8℃和123.1℃;400℃以下,冷面温度几乎与室温持平;即使在600℃的高温条件下,金属VIP同样表现出良好的隔热效果,此时冷面温度只有123.1℃,热面与冷面温度差高达476.9℃。在宽温区,8mm厚金属VIP表现出优异的隔热性能。

3 金属VIP 및 초박형VIP의 성능 및 열전달 특성

3.1 金属VIP 구조 및 단열 성능

金属VIP는 알루미늄 호일 또는 스테인리스 스틸 호일을 막재로 사용하고, 현무암 섬유, 고실리카 또는 기타 심재를 심재로 사용합니다. 진공 처리 후 용접으로 캡슐화합니다. 이 제품은 고온 및 저온 내성, 낮은 열전도도, 안정적인 성능, 내천공성 및 A급 내화성을 특징으로 합니다. 고실리카 섬유 및 에어로젤 펠트 외에도 고효율 단열재로 선호됩니다. 주요 사양은 표 1에 제시되어 있습니다.

넓은 온도 범위에서 금속VIP의 열전달 과정의 비안정 상태 특성을 평가하기 위해 그림 3에 제시된 시험 설정을 사용하여 고온 및 저온 표면의 온도 반응을 측정했습니다.

고온면(가열면)을 200℃, 400℃, 600℃로 유지했을 때, 저온면 온도는 시간이 지남에 따라 점진적으로 증가하여 각각 23.4℃, 26.8℃, 123.1℃에 도달했습니다(그림 4 참조). 400℃ 미만에서는 저온면 온도가 거의 실온과 동일하게 유지되었습니다. 600℃에서도 금속VIP는 우수한 단열 성능을 보였으며, 저온면 온도는 123.1℃에 불과하여 고온면과 저온면의 온도 차이는 476.9℃였습니다. 넓은 온도 범위에서 8mm 두께의 금속VIP는 우수한 단열 성능을 보였습니다.

金属VIP 内部使用耐高温芯材填充,并进行抽真空,在垂直于金属VIP 平面的方向表现出优异的隔热效果;其外部包覆材料选用不锈钢箔。金属VIP 这种独特的“散热-隔热-散热”结构的热传递过程呈现二维传热特征(如图5所示)。从热成像结果(图6)来看,金属VIP 的表面温度会以加热区为圆心向四周迅速扩散降低,平行于板面方向具有良好的散热效果;如果包覆材料选用高导热材料如铝箔,并连接至热管理的散热器

统,因垂直于板面方向良好的隔热性能,可大大减小电芯间的传热,显著延迟温度扩散,又能有效地将集聚的热量通过平行板面(方向)传导,再通过散热系统将热量带走,或有效地减小其热负荷,从而实现良好的电池热管理。

金属VIP 内部는 고온 내성 심재로 채워지고 진공 상태로 진공 처리되어 금속VIP 평면에 수직인 방향으로 우수한 단열 성능을 제공합니다. 외부 클래딩 재료는 스테인리스 스틸 포일입니다. 금속VIP의 고유한 “방열-단열-방열” 구조는 2차원 열 전달 과정을 나타냅니다(그림 5 참조). 열화상 결과(그림 6)는 금속VIP의 표면 온도가 플레이트 표면에 평행한 방향으로 급격히 감소하여 가열된 영역에서 사방으로 확산되는 것을 보여줍니다. 클래딩 재료가 알루미늄 포일과 같은 고열전도성 재료로 되어 있고 열 관리 방열 시스템에 연결된 경우, 플레이트 표면에 수직인 방향으로 우수한 단열 특성을 발휘하여 배터리 셀 간의 열 전달을 크게 줄여 온도 확산을 크게 지연시킬 수 있습니다. 또한 축적된 열을 플레이트 표면에 평행하게 효과적으로 전달하여 방열 시스템을 통해 열을 제거함으로써 열 부하를 효과적으로 줄여 탁월한 배터리 열 관리 성능을 달성할 수 있습니다.

3.2 卓越的隔热性能及高性价比

将相同长宽尺寸、厚度8mm的金属VIP与9mm厚的气凝胶毡,在热面为400℃、600℃条件下进行冷面温度响应的对比测试,如图7所示。从图7可知,相对于气凝胶毡,金属VIP冷面温度明显更低,在热面600℃、400℃情况下,其差值分别为148.4℃(175.2℃-26.8℃)和204.8℃(327.9℃-123.1℃)。

而在快速升温(非稳态)热面,从室温持续加热到200℃,

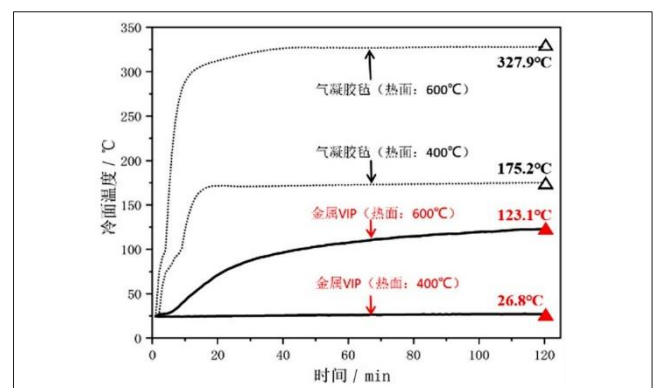


图7 金属VIP与气凝胶毡冷面温度响应曲线(热面为400℃、600℃条件下)

그림 7. 금속VIP 및 에어로젤 펠트의 차가운 표면의 온도 반응 곡선(400℃ 및 600℃의 뜨거운 표면)

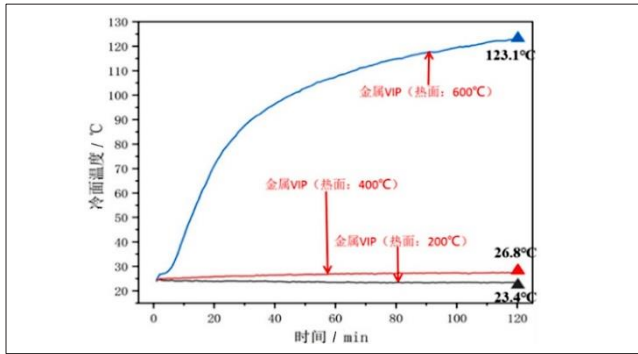


图 4 试样冷面温度响应曲线 그림 4. 시편의 차가운 표면의 온도 반응 곡선

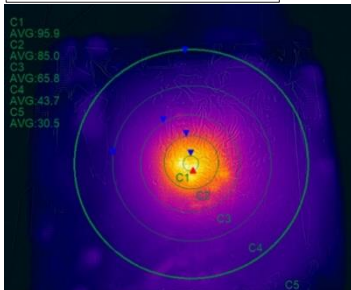
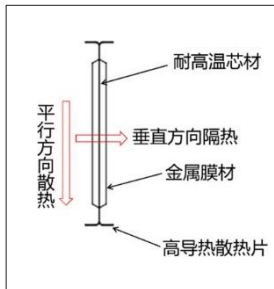


图5 金属VIP二维传热示意图

그림 5. 금속 VIP에서의 2차원 열전달의 개략도

图6 试样热成像结果 그림 6. 샘플 열화상 결과

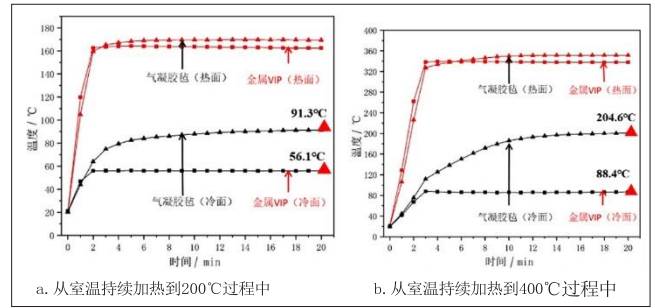


图 8 金属 VIP 与气凝胶毡冷 / 热面温度响应曲线

그림 8. 금속 VIP 및 에어로젤 펠트의 차갑고 뜨거운 표면의 온도 반응 곡선

400 °C过程中，金属VIP冷面温度也与气凝胶毡有显著差异，图8示出其冷面、热面的温度响应曲线。因此，由于金属VIP具有更低导热系数或热扩散系数，其温度传播或扩散速度显著变慢，为电池热失控提供更长的安全逃逸时间，或大大降低热管理冷却系统的热负荷。

对于三元锂电池，电芯热失控温度最高达 700 ~800 °C。目前行业一般用 2.5 mm的气凝胶垫进行热失控隔离（要求相邻电芯温度控制在 200 °C以内）。采用金属VIP可有效降低气凝胶厚度，为电池系统释放更多空间和重量。表 2 系针对特定

表2 三元锂电池的2种隔热方式性价比
표2 3원계 리튬 전지에 대한 두 가지 열 절연 방법의 비용 효율성

三元锂电池	尺寸/mm	厚度/mm	数量/片	价格/(元/m ²)	克重/(kg/m ²)	热阻/(m ² ·k/w)
气凝胶毡	205×98	2.5	216.0	169	1.7	0.1
金属VIP	205×98	1.5	216.0	160	1.4	0.5

3원계 전지	차수/mm	두께/mm	수량/개	단가/(元/m ²)	무게/(kg/m ²)	열 저항/(m ² ·k/w)
에어로젤	205×98	2.5	216.0	169	1.7	0.1
금속VIP	205×98	1.5	216.0	160	1.4	0.5

尺寸的电池组采用气凝胶毡和金属VIP 2种隔热方式的主要参数作对比核算。可以看出，除整体重量有所增加外，金属VIP的热阻是气凝胶毡的5倍，且厚度明显减薄，表现出较高的性价比。

3.2 탁월한 단일 성능 및 높은 비용 효율성

그림 7과 같이, 치수, 너비, 두께가 동일한 8mm 금속VIP와 두께 9mm 에어로젤 펠트를 400℃와 600℃의 고온 표면 온도에서 저온 표면 온도 반응 시험에서 비교했습니다. 그림 7은 금속VIP 저온 표면 온도가 에어로젤 펠트보다 상당히 낮음을 보여줍니다. 600℃와 400℃의 고온 표면 온도에서 그 차이는 각각 148.4℃(175.2℃ - 26.8℃)와 204.8℃(327.9℃ - 123.1℃)입니다.

실온에서 200℃와 400℃로 금속(비안정 상태) 가열하는 동안에도 금속VIP의 저온 표면 온도는 에어로젤 펠트의 저온 표면 온도와 상당히 다릅니다. 그림 8은 저온 및 고온 표면에 대한 온도 반응 곡선을 보여줍니다. 따라서 금속VIP의 낮은 열전도도 또는 열 확산율로 인해 온도 전파 또는 확산 속도가 상당히 느려져 배터리 열 폭주 시 안전한 탈출 시간을 늘리거나 열 관리 냉각 시스템의 열 부하를 크게 줄입니다.

삼원계 리튬 이온 배터리의 경우, 배터리 셀의 열 폭주 온도는 최대 700~800℃에 달할 수 있습니다. 현재 업계에서는 일반적으로 열 폭주 격리를 위해 2.5mm 에어로젤 매트를 사용합니다(인접 배터리 셀의 온도를 200℃ 이내로 제어해야 함). 금속VIP를 사용하면 에어로젤의 두께를 효과적으로 줄여 배터리 시스템의 공간과 무게를 줄일 수 있습니다. 표 2는 특정 크기의 배터리 팩에 대한 두 가지 열 절연 방법인 에어로젤 매트와 금속VIP의 주요 매개변수를 비교합니다. 전체 중량이 약간 증가하지만 금속VIP의 열 저항성은 에어로젤 매트의 5배에 달하고 두께도 현저히 얇아 비용 효율성이 높은 것으로 나타났습니다.

3.3 用于电池包隔热的超薄VIP

大量试验证明，电池包的工作温度与其放电量的保持率显著相关，图9示出市场主流的磷酸铁锂类电池的放电量保持率与温度的趋势图。可以看出，随着温度降低，放电量保持率会下降；低于-5℃时放电量保持率会急速下降；在-20℃时折损近25%，这也是冬季低温环境新能源汽车(电动汽车)续航严重下降的重要原因之一，同时解答了北方用户抱怨冬季快充时间过长的问题。因此电池包的整体保温对于延长电池寿命、提升充电效率和用户体验感至关重要。

真空隔热特别超薄VIP，厚度仅1~5mm，产品具有良好的隔热和缓冲功能，并通过新能源行业要求的系列测试验证，特别依据GB/T 2423.50《环境试验 第2部分：试验方法 试验Cy：恒定湿热 主要用于元件的加速试验》开展了“双85”环境可靠性测试，在环境温度85±2℃、湿度85±5%RH条件下，产品进行1000h老化测试，其导热系数仍小于8mw/m·k，体现出产品具有长期抵抗湿气渗透的能力和热性能的稳定性。其主要性能指标如表3所示，批量产品已应用于动力锂电池包的保温热防护等领域。

示例：某品牌电池包采用同样3mm厚度的隔热泡棉和超薄(银麟 ultrathin™)VIP 分别进行保温处理，初始温度25℃，置于-20℃的低温环境下，在自然对流状态，随着时间变化(前者)泡棉电池包约3.5h后温度降至0℃而(后者)使用银麟

图9 电池包放电量保持率与温度关系
그림 9 배터리 팩 방전 용량 유지율과 온도의 관계

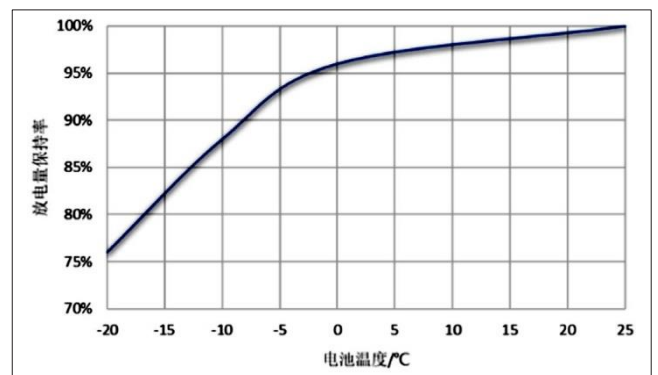


表3 超薄VIP材料的主要性能指标

项目	性能指标
初始导热系数/($\text{mw}/\text{m}\cdot\text{k}$)	3.5
双“85”可靠性测试, 1000 h 后导热系数/($\text{mw}/\text{m}\cdot\text{k}$)	≤ 8
铜乙酸盐雾, 240 h 后导热系数变化/($\text{mw}/\text{m}\cdot\text{k}$)	< 2
耐压性能	3 800 V(DC) 下, 漏电流 $< 1 \text{ mA}$
绝缘性能	1 000 V(DC) 下, 电阻 $5000 \text{ M}\Omega$

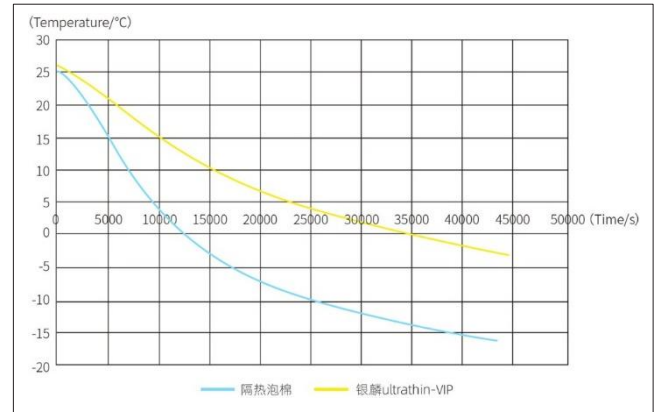
图 10 采用 2 种隔热材料的电池包降温曲线

ultrathin™-VIP 的电池包约 10 h 后温度才降至 0°C , 其降温曲线如图 10 所示。其保温时长相差 3 倍多, 极大地提升了电池包低温环境适应能力和续航能力。

3.3 电池 3 电芯用超薄型 VIP

광범위한 테스트를 통해 배터리 팩의 작동 온도와 방전 용량 유지율 사이에 유의미한 상관관계가 있음이 입증되었습니다. 그림 9는 일반 리튬인산철 배터리의 방전 용량 유지율 온도 추세를 보여줍니다. 보시다시피, 방전 용량 유지율은 온도가 낮아짐에 따라 감소하며, -5°C 이하에서는 급격히 떨어지고 -20°C 에서는 거의 25%까지 떨어집니다. 이는 겨울철 신에너지 자동차의 주행 거리가 크게 줄어드는 주요 원인 중 하나입니다. 또한 중국 북부 지역 사용자들이 겨울철 급속 충전 시간이 길다는 불만을 해소하는 데에도 도움이 됩니다. 따라서 배터리 팩의 전반적인 단열은 배터리 수명 연장, 충전 효율 향상, 그리고 사용자 체험 향상에 매우 중요합니다. 두께가 $1\sim 5\text{mm}$ 에 불과한 초박형 진공 단열 VIP는 탁월한 단열 및 완충 성능을 제공하며, 신에너지 산업에서 요구하는 일련의 테스트를 통과했습니다. 구체적으로, 본 제품은 GB/T 2423.50 “환경 시험 - 제2부: 시험 방법 - 시험 주기: 정상 습열 - 주로 가속 부품 시험용”에 따라 “더블 85” 환경 신뢰성 시험을 거쳤습니다. $85\pm 2^\circ\text{C}$ 의 주변 온도와 $85\pm 5\% \text{RH}$ 의 습도에서 1,000시간의 노화 시험을 거쳤습니다. 열전도도는 $8 \text{ mW}/\text{m}\cdot\text{K}$ 미만으로 유지되어 제품의 장기적인 습기 침투 저항성과 열 안정성을 입증했습니다. 주요 성능 지표는 표 3에 나와 있습니다. 양산 제품은 전력 리튬 배터리 팩의 단열 및 보호와 같은 용도로 사용되었습니다. 예를 들어, 특정 브랜드의 배터리 팩은 3mm 두께의 단열 폼과 초박형(Yinlin Ultrathin™) VIP를 모두 사용하여 단열합니다. 처음에는 25°C 의 온도에서 자연 대류가 발생하는 -20°C 환경에 팩을 놓습니다. 시간이 지남에 따라 폼 팩(전자)은 약 3.5시간 후에 0°C 로 떨어지는 반면, Yinlin Ultrathin™-VIP

팩(후자)은 0°C 에 도달하는 데 약 10시간이 걸립니다. 냉각 곡선은 그림 10에 나와 있습니다. 이러한 3배 이상의 절연 지속 시간 차이는 배터리 팩의 저온 환경 적응성과 배터리 수명을 크게 향상시킵니다.



4

关于隔热材料的导热系数与热扩散率

新能源汽车(电动汽车)电池的电池包的保温与电芯间热管理, 涉及稳态和非稳态 2 个完全不同的传热过程; 因此, 其关注的物性参数有明显不同, 如前文所述, 前者涉及节能, 后者涉及安全。对于电池包温控来说, 隔热材料与电池包更多的处于传热的稳态过程或准稳态过程, 其传热过程一般通过傅里叶方程来描述, 涉及的特征参数是导热系数 k 值(Thermal Conductivity), 即在确定的温度分布下, 热量的传递能力; 而新能源汽车电池电芯间的温度控制特别是热失控过程, 则属于非稳态传热。关注温度的动态变化, 通常采用热扩散率 a 值(Thermal Diffusivity)或导温系数来表征, 其物理意义是指物体在(快速)加热或冷却过程中, 各部分温度趋向一致的能力, 显示物体的热惯性, 热扩散系数越小表示热惯性越大, 物体达到热平衡的状态越慢。具体来说, 热扩散率($a=k/\rho\times C_p$)体现了导热过程中材料的导热能力(k)与沿途物质储热能力之间($\rho\times C_p$)的综合关系。不同材料的热扩散率有很大差异, 如木材为 $1.5\times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, 铝材为 $9.5\times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 。通常导热系数

表4 常温下各类材料导热系数与热扩散率
표 4 다양한 재료의 실온에서의 열전도율 및 열확산도

材料 재료	导热系数 열전도율/(w/m·k)	热扩散率 열확산도/(10 ⁻⁶ m ² /s)
金属 금속	4~420	3~165
气体 기체	0.01~0.20	15~165
非金属(少数例外) 비금속(소수 예외)	0.17~70	0.1~1.6
液体(非金属) 액체(비금속)	0.05~0.68	0.08~0.16
普通隔热材料 일반 단열 재료	0.04~0.12	0.16~1.6
气凝胶毡 에어로겔 펠트	0.016 ~ 0.025	0.05 ~ 0.08
金属 VIP 금속VIP	0.003~ 0.010	<0.01

越小, 密度越大, 热扩散率越小, 材料的热惯性就越大。表 4 示出不同材料的导热系数和热扩散率范围。显然, 金属 VIP 具有很大的热惯性, 特别适用于于电池电芯间的热管理系统。

此外, 目前用于电池热管理的超薄 VIP 的热性能测试仍以中心导热系数k 值的测量为主, 多数测量仪器依据 GB/T 10295、GB/T 10294、GB/T 39704 国家标准, 或ISO 8301 国际标准, 或 ASTM C518 美国标准, 即通过稳态传热的傅里叶方程来计算k 值, 也是推荐的标准仲裁方法, 但大多数仪器适应于测量厚度大于 >10 mm 以上的产品。对于厚度小于 <5 mm 的很薄的隔热材料的热性能的测量则不适用, 而超薄 VIP 厚度通常厚度仅仅为 1~3mm, 即使在同样的预紧压力下, 厚度的测量相对误差也远大于 10%; 而且两面温差较小, 温度测量误差也很大, 从而造成不同仪器间的测量数据偏离很大, 有些甚至超过 100%, 且不具备可比性。因此, 对于超薄结构的VIP 隔热性能的评价, 采用热面温度响应曲线或在确定热流密度、确定的时间间隔条件下冷热面的温升来判断更为科学和合理。

4

단열재의 열전도도 및 열확산도에 관하여

신에너지 자동차 배터리 팩의 단열 및 셀 간 열 관리는 안정 상태와 비안정 상태라는 완전히 다른 두 가지 열전달 과정을 포함합니다. 따라서 관심 대상의 물리적 특성은 상당히 다릅니다. 앞서 언급했듯이 전자는 에너지 절약과 관련이 있고, 후자는 안전과 관련이 있습니다. 배터리 팩 온도 제어의 경우, 단열재와 배터리 팩은 안정 상태 또는 준안정 상태 열전달 과정에 있을 가능성이 더 높습니다. 이 열전달 과정은 일반적으로 푸리에 방정식으로 표현되며, 특성 매개변수는 주어진 온도 분포에서 열전달 용량을 측정하는 열전도도 k(열전도도)입니다. 그러나 신에너지 자동차 배터리의 셀 간 온도 제어, 특히 열 폭주 시에는

비안정 상태 열전달이 포함됩니다. 동적 온도 변동은 종종 열확산도(a) 또는 열전도도로 특성화됩니다. 물리적 의미는 물체의 다양한 부분이 (급속한) 가열 또는 냉각 중에 일정한 온도를 유지하는 능력을 나타내며, 물체의 열 관성을 나타냅니다. 열 확산율이 작을수록 열 관성이 크고 열 평형 속도가 느립니다. 구체적으로, 열 확산율($a=k/\rho \times C_p$)은 재료의 열전도도(k)와 경로를 따라 재료의 열 저장 용량($\rho \times C_p$) 사이의 결합된 관계를 반영합니다. 열 확산율은 목재의 경우 $1.5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, 알루미늄의 경우 $9.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 와 같이 재료마다 상당히 다릅니다. 일반적으로 열전도도가 낮고 밀도가 높으며 열 확산율이 낮을수록 열 관성이 커집니다. 표 4는 다양한 재료의 열전도도와 열 확산율 범위를 보여줍니다. 금속 VIP는 상당한 열 관성을 가지고 있어 배터리 셀 간의 열 관리 시스템에 특히 적합합니다. 또한, 배터리 열 관리에 사용되는 초박형 VIP의 열 성능 시험은 현재 중앙 열전도도 k 값 측정에 중점을 두고 있습니다. 대부분의 계측기는 안정 상태 열전달에 대한 푸리에 방정식을 사용하여 k 값을 계산합니다. 이는 GB/T 10295, GB/T 10294, GB/T 39704와 같은 국가 표준, ISO 8301과 같은 국제 표준, ASTM C518과 같은 미국 표준을 기반으로 하는 권장 표준 중재 방법입니다. 그러나 대부분의 계측기는 두께가 10mm를 초과하는 제품 측정에만 적합합니다. 이는 매우 얇은 단열재(5mm 미만)의 열 특성 측정에는 적용할 수 없습니다. 초박형 VIP는 일반적으로 두께가 1~3mm에 불과하며, 동일한 예압에서도 두께 측정의 상대 오차는 10%를 훨씬 넘습니다. 또한 두 표면 사이의 온도 차이가 작아 상당한 온도 측정 오류가 발생합니다. 이로 인해 서로 다른 계측기 간의 측정 데이터 편차가 크게 발생하여 때로는 100%를 초과하여 비교할 수 없게 됩니다. 따라서 특정 열유속밀도와 특정 시간 간격의 조건에서 고온 표면 온도 반응 곡선이나 고온 및 저온 표면의 온도 상승을 사용하여 초박형 VIP 구조의 단열 성능을 평가하는 것이 더 과학적이고 합리적입니다.

5 展望

真空隔热技术及产品在家电等领域已大规模普及, 成为冰箱、冰柜等制冷器具节能降耗、最大限度利用空间的唯一必选材料。真空隔热技术用于电池热管理才刚刚起步, 需要针对电

池热管理系统的特点深入开展的产品验证和产品适应性设计,但特种真空隔热板产品(VIP)或真空隔热结构(VIS)的形状尺寸可设计性,灵活的膜材、芯材和真空密封方式的组合特性,无与伦比的隔热性能,使电池系统的散热、隔热、防火或防火分区一体化设计成为可能,也即新型真空隔热板产品在汽车电池和储能系统的热管理方面具有极大的应用潜力。

5 展望

真空 단열 기술과 제품은 가전제품을 비롯한 여러 산업 분야에서 널리 채택되어 냉장고, 냉동고 및 기타 냉장 기기의 에너지 절약, 소비량 감소, 공간 활용 극대화를 위한 필수 소재로 자리 잡았습니다. 배터리 열 관리를 위한 진공 단열 기술의 적용은 이제 막 시작 단계에 있으며, 배터리 열 관리 시스템의 특정 특성에 맞춘 심층적인 제품 검증 및 적용성 설계가 필요합니다. 그러나 특수 진공 단열 패널(VIP) 또는 진공 단열 구조(VIS)의 설계 가능성, 멤브레인 소재, 코어 소재 및 진공 밀봉 방식의 유연한 조합, 그리고 탁월한 단열 성능은 배터리 시스템의 방열, 단열, 방화 또는 화재 구역 설정의 통합 설계를 가능하게 합니다. 이 새로운 진공 단열 패널 제품은 자동차 배터리 및 에너지 저장 시스템의 열 관리에 상당한 잠재력을 가지고 있습니다.

参考文献

- [1] 张云等. 锂电池性能与温度相关性的基础研究[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(5): 13-141.
- [2] Sato N. Thermal Behavior Analysis of Lithium-ion Batteries for Electric and Hybrid Vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2001, 99(1-2): 70-77.
- [3] WILKE S, SCHWETZER B, KHATEEB S, et al. Preventing thermal runaway propagation in lithium ion battery packs using a phase change composite material: an experimental study[J]. Journal of Power Sources, 2017, 340: 51-59.
- [4] Pesaran AA. Battery Thermal Models for Hybrid Vehicle Simulations[J]. Journal of Power Sources, 2002, 10(2): 377-382.
- [5] 芮新宇, 等. 锂离子电池热失控蔓延问题研究综述[J]. 电池工业, 2020, 24(3): 193-205.
- [6] 江西中懋新能源材料技术有限公司. 一种耐高温隔热片: CN222039868U. 2024.1.22.
- [7] GB 38031-2020 《电动汽车用动力蓄电池安全要求》.
- [8] GB 18384-2020 《电动汽车安全要求》.
- [9] GB 38032-2020 《电动客车安全要求》.

참고문헌

- [1] Zhang Liyu 등. 리튬배터리 성능과 온도의 상관관계에 대한 기초 실험 연구[J]. 사안교통대학교 저널, 2018, 52(5): 13-141.
- [2] Sato N. 전기 및 하이브리드 자동차용 리튬이온 배터리의 열 거동 분석[J]. 파워 소스 저널, 2001, 99(1-2): 70-77.
- [3] WILKE S, SCHWETZER B, KHATEEB S 외. 상변화 복합 재료를 사용한 리튬이온 배터리 팩의 열 폭주 전파 방지 실험 연구[J]. 파워 소스 저널, 2017, 340: 51-59.

- [4] Pesaran AA. 하이브리드 자동차 시뮬레이션을 위한 배터리 열 모델[J]. Journal of Power Sources, 2002, 10(2): 377-382.
- [5] Rui Xinyu 외. 리튬이온 배터리의 열 폭주 전파 문제에 대한 연구 검토[J]. Battery Industry, 2020, 24(3): 193-205.
- [6] Jiangxi Zhongmao New Energy Materials Technology Co., Ltd. 고온 내열 단열 시트: CN222039868U. 2024.1.22.
- [7] GB 38031-2020 "전기 자동차용 전력 배터리에 대한 안전 요구 사항".
- [8] GB 18384-2020 "전기 자동차에 대한 안전 요구 사항".
- [9] GB 38032-2020 "전기 버스에 대한 안전 요구 사항".