

液冷储能箱的漏热性能分析

滕志斌（南通中集特种运输设备制造有限公司，江苏 南通 226001）

摘要：本文全面分析液冷储能箱的漏热性能。通过深入研究液冷储能箱的基本工作原理和设计要素，明确其在能源存储系统中的关键作用。再详细分析热传导、对流、辐射、接触热阻以及系统循环损耗对漏热性能的影响。在评估方法部分，通过建立全面的理论模型，提出关键参数以及确切的实验设计，能够评估漏热性能。基于这些分析，进一步提出包括材料创新、结构优化、热隔离措施以及系统集成与管理在内的多方面优化策略，旨在显著提高液冷储能箱的能源效率和性能稳定性。

关键词：液冷储能箱；漏热性能；热效率；系统优化

液冷储能技术作为当前能源存储领域的一项关键技术，具有显著的战略意义，它通过特定的传热介质和系统设计，实现能量的有效储存与管理，为现代工业和可持续发展提供强有力的支撑。但在实际操作过程中，漏热问题逐渐浮现为影响液冷储能箱性能的重要因素，既降低了能量存储的效率，也增加了能源消耗，甚至可能对系统的稳定性和安全性构成威胁。这一现象引发了对液冷储能箱漏热性能深入研究的必要性和紧迫性。因此，本研究旨在深入剖析漏热问题，探索其根本机理，以期发掘有效的对策，推动液冷储能技术向更高效、更安全的方向发展。

1 液冷储能箱的综述

1.1 工作原理

液冷储能箱的核心工作原理基于热力学中的相变储能概念，特别是利用材料在固态和液态之间转换时吸收和释放热能的特性。在储能过程中，当外部电力供应充足时，系统通过电加热方式提升工作介质的温度至熔点以上，使之熔化储存能量；而在能量释放阶段，工作介质开始凝固，释放之前储存的潜热，通过热交换器转换为所需的冷却能或热能。这一过程实现电能与热能之间的转换和存储，满足不同场景下对能量调节和利用的需求。

1.2 设计要素

液冷储能箱的设计涉及多个关键要素，详见表1，旨在确保系统的高效运行和能量转换的最优化。

表1 液冷储能箱的关键设计要素

设计要素	描述	重要性分析
相变材料选择	考虑熔点、潜热、热导率、化学稳定性和环境友好性等因素。	直接影响能量存储和释放效率，是系统性能的基础。
储能单元结构	优化以实现热量均匀分布和快速热响应，可能通过增加导热填料或改进几何结构。	关乎系统响应速度和存储均匀性，影响能量利用率。

换热系统设计	需兼顾热交换效率和控制策略，防止过度冷却或过热。	是系统与外部环境连接的桥梁，关系到能量转换的有效性。
绝热措施	采用高效隔热材料和技术减少热损失。	减少能量损耗，提高系统整体效率和经济性。
系统集成与优化	包括能量管理策略、安全防护、故障诊断等。	确保系统可靠性和稳定性，适应不同工况需求。

1.3 结构分析

液冷储能箱的效率和功能性源于其精密的结构设计，该设计综合了多个组件的协同工作，以确保能量的有效储存和管理。图1展示了液冷储能箱的核心组件。



图1 液冷储能箱核心组件

2 液冷储能箱漏热性能的成因

液冷储能箱在能量存储和转换过程中，不可避免地会遇到热能损失问题，即所谓的“漏热”。理解漏热的成因对于进一步优化储能系统的性能至关重要。液冷储能箱的漏热主要由以下几方面引起。

2.1 热传导

在液冷储能系统中，热传导是一个不可忽视的核心问题。尽管系统采用先进的绝热材料，但材料的热导率决定了热量无法被完全隔绝。特别是在存在显著温差情况下，热量会通过储能箱壁面的微小缺陷，依靠分子热运动逐渐“渗透”到外部环境。这一现象在热力学中被广泛研究，是影响储能效率的关键因素之一。

2.2 对流

对流现象在液冷储能箱中尤为复杂，因为它涉及到液体介质的流动性。在储能箱内，液体介质可能会因温度差异而产生自然对流，或者由泵等设备产生强制对流。这些流动不仅在介质内部形成热流动，还可能通过换热器等设备将热量传递到储能箱外部。这一过程中的热损失对系统效率有显著影响。

2.3 辐射

热辐射在所有热损失机制中可能是最难以控制的，因为它是物质基于其温度而自然发生的能量释放。在液冷储能系统中，尽管辐射对总热损失的贡献相对较小，但在高温操作条件下，特别是当绝热屏蔽不完全时，辐射损失可能变得不容忽视。

2.4 接触热阻

在液冷储能箱的复杂系统中，组件间的接触热阻是一个关键因素，它直接影响热能的传递效率。由于结构组件（例如换热器、隔板等）之间可能存在微观不平整或间隙，这些微观缺陷导致实际接触面积减少，形成了所谓的“接触热阻”，降低了热传递效率，还可能导致局部过热和热应力，从而影响系统的可靠性和寿命。

2.5 系统循环损耗

液冷储能系统的运行依赖于冷却液体的循环，这一过程需要消耗额外能量，并伴随着能量损失。例如，泵送液体所需的机械能量部分会转化为热能，增加系统的热负荷。此外，液体在管道和阀门中的流动会因摩擦和压力变化产生额外的热损失。这些循环损耗降低了系统的整体热效率，还可能导致能源的浪费。

3 液冷储能箱漏热性能评估

3.1 理论模型

在液冷储能箱的漏热性能分析中，理论模型的建立是一个至关重要的步骤，要求我们深入理解热传递的基本原理并将其数学化。这一过程需要物理学的深厚基础，还需要数学建模的精准技巧。首先，需要考虑的是热传导过程。热传导是描述热能通过物质内部传递的现象，通常由傅里叶定律（Fourier's Law）来描述。在液冷储能箱中，热传导可能发生在储能介质、储能箱壁以及其他多种材料中。建立数学模型时，需要准确计算材料的导热系数，并考虑温度对其的影响，从而预测在不同操作条件下的热损失。其次，对流传热是液冷系统中另一个关键因素。这涉及到冷却液流经系统时，热能通过流体运动从一个位置传递到另一个位置的过程。对流传热的数学模型需要考虑流体动力学参数，如速度、粘度和流体的热物性。此外，还

需要考虑流体在管道和储能箱内的流动模式，这对热交换效率有重要影响。最后，辐射传热虽在液冷储能箱中相对较少，但在高温工作条件下可能变得重要。辐射是通过电磁波（特别是红外线）进行的热能传递。建模辐射传热需要使用斯特藩-玻尔兹曼定律（Stefan-Boltzmann Law）和其他相关公式，来描述物体表面的辐射热通量。

3.2 关键参数

评估液冷储能箱的漏热性能，需要深入理解和准确测量若干关键参数，见图2。

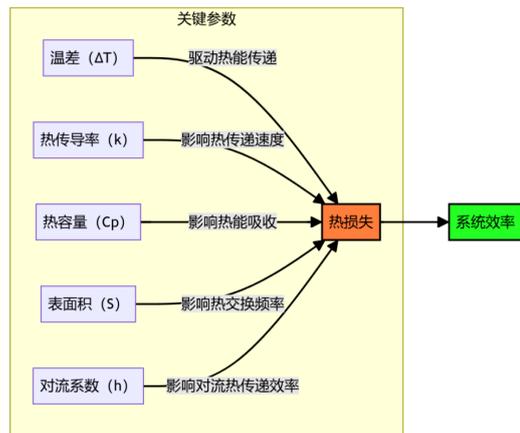


图2 评估液冷储能箱的漏热性能的关键参数

这些参数反映了储能系统的热力学特性，还能揭示系统性能的内在线索和影响因素。①温差 (ΔT)：这是储能箱内部与外部环境之间的温度差。温差是驱动热能传递的基本力量，其大小直接影响热能的损失速率。一个较大的温差通常意味着更高的漏热量，因此，控制和优化温差是减少能量损失的关键；②热传导率 (k)：材料的热传导率决定了热能通过储能箱壁的传递速度。选择低热传导率的材料可以有效降低热能损失，提高储能系统的整体热保持能力；③热容量 (C_p)：热容量是衡量材料储存热能的能力。在相同温度变化下，具有更高热容量的储能介质能吸收更多的热能，这有助于减缓温度上升，从而减少由于高温差引起的热损失；④表面积 (S)：储能箱的表面积越大，与外界的热交换就越频繁，这可能导致更多的热能损失。因此，在设计过程中，需要通过优化储能箱的形状和尺寸来控制表面积，以减少不必要的热损失；⑤对流系数 (h)：这是衡量储能箱表面与周围环境之间对流传热效率的参数。通过减少对流，例如使用隔热层或减少风速，可以显著降低热能损失。

3.3 实验方法

实验方法在漏热性能评估中占据了核心地位，它涉及到实验设施的选择、实验方案的制定。实验设施

必须具备高精度的控温和测温系统，因为温度是影响漏热性能的关键参数。实验室应配备稳定性和可重复性高的温度控制器，以模拟不同的工作环境。同时，为了精确测量储能箱内外的温度分布，需要使用高精度的温度传感器，并在实验过程中进行实时数据记录。实验方案的制定应基于实际工作条件。实验应模拟液冷储能箱在实际运行过程中可能遇到的各种情况，包括不同的环境温度、冷却液流速、储能介质的种类等。通过改变这些条件，我们可以观察它们对漏热性能的具体影响，从而更全面评估储能箱的性能。在整个实验过程中，实验数据的记录和处理也非常重要。需要建立一个完整的数据记录系统，实时收集和存储实验数据，并使用专业的数据分析软件进行深入分析。此外，实验的可重复性也是评价实验质量的重要标准，因此每个实验至少需要重复几次，以验证数据的一致性和可靠性。

4 优化液冷储能箱的策略

4.1 材料选择与创新

在储能系统中，选择合适的材料是至关重要的，因为材料的热物理性能直接影响着系统的热损失。当前，科研人员正致力于研究和开发具有更低热传导率的新型材料。例如，纳米绝热材料由于其独特的微结构，能够在微观层面上抑制热量传递，显著提高储能系统的热绝缘性能。此外，相变材料（PCM）也因其能在相变过程中吸收和释放大热而受到关注。这些材料可以用于储能箱的内部，作为热储存介质，或者添加到储能箱的绝热层中，以减少热能的流失。通过这些创新材料的应用，可以保证储能效率，并显著降低系统的漏热量。

4.2 结构设计优化

除了材料创新外，储能箱的结构设计也是影响其热损失的重要因素。通过使用计算流体动力学（CFD）等高级模拟工具，工程师详细分析不同设计选择对系统热性能的影响。例如，通过优化储能箱的几何形状，如采用圆形或椭圆形设计，可以减少尖角和不规则表面，从而降低热交换面积和热损失。此外，储能箱内部组件的合理布局也至关重要。通过优化组件的位置和方向，可以最小化内部的热阻和热桥效应，进一步降低热能流失。这种基于模拟的设计方法可以提高储能箱的热效率，还可以在设计阶段就预测和避免可能的设计缺陷，从而节省研发成本和时间。

4.3 热隔离与控制

有效的热隔离是减少储能系统热损失的核心策略。实施高效的隔热措施，例如在储能箱外部施加绝

热材料或采用真空隔热技术，能显著降低与外部环境的热交换。这种方法能够减少系统内外部的温差，减少由此产生的热流动。此外，通过精确的温度控制系统，能够维持储能介质在一个理想的温度范围内，避免因温度波动过大而导致的能量损失。例如，可以使用温度传感器和自动调节机制，确保介质温度稳定，从而优化热效率和能量存储容量。

4.4 系统集成与管理

液冷储能系统的性能不仅依赖于单个组件的效率，还需要系统级的整合和管理。这意味着储能系统需要与周边的设施和其他能源系统协同工作。通过集成智能能源管理系统，可以实时监控和分析储能箱的工作状态，包括其内部的温度、压力和流体流速等关键参数。基于这些数据，系统可以动态调整这些参数，以最佳适应不断变化的外部环境条件和能源需求。例如，在能源需求高峰时段，智能系统可以预测能源负荷变化，并相应调整储能介质的流速和温度，确保系统的高效运行。此外，这种集成方法还促进了与可再生能源（如太阳能和风能）的结合，进一步提高能源利用率和系统的环境可持续性。

5 结语

通过对液冷储能箱的漏热性能进行系统分析，可以认识到材料选择、结构设计、热隔离措施以及系统集成管理在能量损失控制和系统效率提升中的核心作用。特别是新型绝热材料和先进的热管理技术的应用，为降低系统的热损失和提高能量转换效率开辟了新途径。同时，智能能源管理系统的集成不仅优化储能系统的运行，还确保其能够灵活应对复杂的能源需求和环境变化。未来，随着新材料、新技术的不断涌现，如何进一步提高储能介质的热稳定性、减少系统成本、并确保长期运行的可靠性和安全性，将是未来研究的重点。此外，液冷储能系统与可再生能源的深度融合、大规模商业应用以及市场化进程也将是未来发展的方向。我们期待着通过持续的技术创新和跨学科合作，液冷储能技术能够为全球能源转型和可持续发展目标的实现做出更大贡献。

参考文献：

- [1] 张建府. 储能电站集中式液冷换热方案设计及控制策略 [J]. 电力与能源, 2023, 44(02): 108-109+156.
- [2] 帅昌俊. 液冷集装箱式储能系统设计开发研究 [J]. 河南科技, 2022, 41(12): 91-94.
- [3] 王宁, 王凌云, 刘世桐等. 基于 CFD 的单相浸没式液冷电池箱结构设计和仿真优化 [J]. 中国高科技, 2023(07): 24-26.