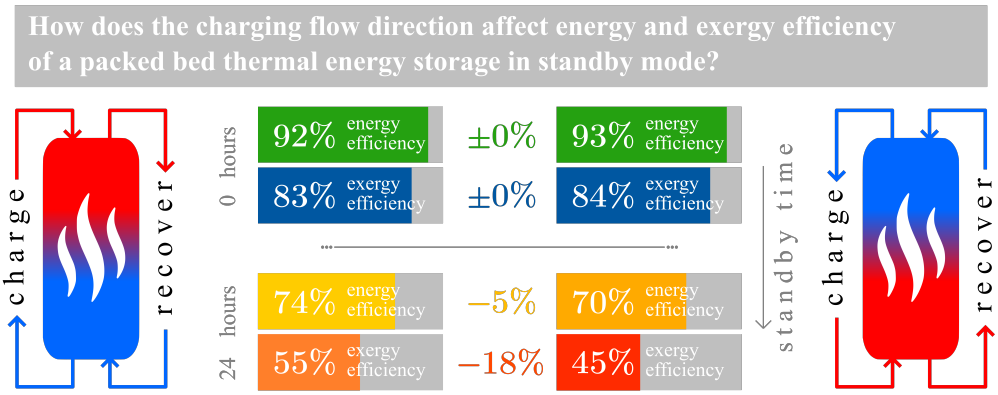
arXiv:2301.01071v1

图文摘要

填充床热能储存装置的待机效率与热跃层退化：一项实验研究

Paul Schwarzmayr、Felix Birkelbach、Heimo Walter、Ren´e Hofmann



亮点

填充床热能储存的待机效率与热跃层退化：一项实验研究

Paul Schwarzmayr、Felix Birkelbach、Heimo Walter、Ren´e Hofmann

- 通过实验研究填充床热能储存装置的待机模式。
- 测得的 Energy 效率和火用效率最高分别为 92% 和 83%。
- 采用第二定律分析处理测量数据。
- 待机效率取决于充能期的空气流动方向。
- 自然对流对长时间待机期间的影响显著。

填充床热能储存的待机效率与温跃层退化：实验研究

Paul Schwarzmayr[a,*], Felix Birkelbach[a], Heimo Walter[a], Ren´e Hofmann[a]

[a]能源系统与热力学研究所，维也纳工业大学，*Getreidemarkt 9*，维也纳，*1060*，奥地利

摘要

工业过程产生的废热潜力巨大，若能加以利用，或可为缓解气候变化作出重大贡献。填充床热能储存系统是一种低成本储能技术，可用于实现工业过程废热的利用。该系统可储存余热，并在之后需要时释放这些能量。为确保填充床热能储存系统高效运行，必须深入研究其待机模式下的特性。本研究通过实验，考察了实验室规模填充床热能储存系统在待机模式下的待机效率和温跃层退化，并研究了前一充能期内传热流体采用不同流动方向时的影响。结果表明，在较长的待机期间，待机效率会显著受到流动方向的影响。在前一充热过程中传热流体由底部向顶部流动时，持续 22 小时的待机过程所产生的最大熵产生率，是流动方向相反时同一过程的两倍。流动方向相反时，该过程的能量效率和㶲效率分别低 5% 和 18%。

关键词：填充床、热能储存、待机模式、分层、热跃层退化、能量/火用效率

*通讯作者电子邮箱：paul.schwarzmayr@tuwien.ac.at (Paul Schwarzmayr)

预印本已提交至 *Applied Energy* *2023*年*1*月*4*日

1. 引言

能源密集型工业中废热的回收具有巨大潜力，可为缓解气候变化作出重大贡献。工业部门超过三分之二（≈ 70%）的能源需求用于供热 [1]。正如 Papapetrou 等人 [2], 所述，某些部门多达一半的热能消耗会以废热形式排放；他们估算了欧盟各工业部门按温度等级和国家划分的可用废热潜力。Panayiotou 等人 [3] 也开展了类似研究，评估了欧洲主要工业的废热潜力。在估算全球可用废热的研究中，Forman 等人 [4] 得出结论：全球 72% 的一次能源消耗在转化后耗散。尤其是在钢铁工业中，由于热能需求与供应在时间上不匹配，热能往往会被浪费。热能储存（TES）技术可用于改善这些间歇式工艺的效率，弥合热能需求与供应之间的差距。Manente 等人 [5] 研究了将储热系统集成到工业能源工艺中，并发现无论采用显热型还是潜热型储热装置，集成后都能提高能量效率并增加工艺产出。

一种简单但效率极高的热能储存系统是填充床热能储存系统（PBTES）。Gautam等人（[6], [7]）和Baoshan等人 [8]对填充床热能储存系统进行了全面综述。PBTES系统属于显热储能系统，采用岩石或其他合适材料组成的填充床作为储热材料。为PBTES充热时，高温传热流体（HTF）——多数情况下为空气——流经填充床，将热量传递给储热材料。回收储存的热量时，储能装置内部的流动方向反转，并使用低温传热流体从储热材料中提取热量。由于传热流体与填充床直接接触，储能装置内部可提供很大的传热表面积。这使系统具有极高的功率，同时在填充床内部形成明显的温度分层，从而整体提升系统效率。温度分层是指储存容积分为高温区和低温区。这两个区域由一层很薄的体积层隔开，即温跃层，整个温度梯度集中在其中。充热过程中，高温传热流体将温跃层推向储能装置的一端，使高温区扩大。放能过程中，低温传热流体则推动

温跃层向相反方向移动。若温跃层理想，理论上PBTES在整个过程中放能温度都可达到充热温度。实际上，向周围环境的热损失、填充床内部的热传导和自然对流等不可逆效应会导致温跃层退化，从而降低储能装置的效率。Esence等人 [9], 对PBTES系统的经验反馈和数值建模进行了广泛综述，并指出，保持PBTES中的高温度分层对于最大限度提高火用效率和储热容量至关重要。Stekli等人 [10]也得出了类似结论，并指出温跃层储热系统面临的最大技术经济挑战是温跃层退化。Bruch等人（[11], [12]）对以岩石为储热材料、导热油为传热流体的PBTES开展了多次连续充放热循环实验研究。Bruch等人得出结论：对于设计合理且运行良好的PBTES，在动态运行条件下，即进行连续充放热循环时，温跃层退化可以忽略不计。然而，Okello等人 [13] 发现，如果分层储热装置中的热量在一段时间（12-24h）后才使用，那么随着系统逐渐达到热平衡，会观察到明显的温跃层退化和火用损失。

关于热能储存系统静态运行（即待机模式）的研究十分少见，例如 Okello 等人研究的系统。Mertens等人[14] 对用于聚光太阳能发电（CSP）的填充床热能储存系统进行了数值研究，也考虑了待机模式。Xu等人 [15] 对以熔盐为传热流体的填充床热能储存系统的待机模式进行了数值研究。近期关于填充床热能储存系统静态运行的研究来自 Rodrigues等人 [16] 和 Yang等人 [17]。Rodrigues等人通过数值研究考察了充热过程后的去分层现象，同时考虑了层流自然对流，并采用局部热非平衡假设。Yang等人的研究则通过数值研究和实验验证，考察了中试规模填充床热能储存系统试验装置的动态与静态运行。这两项研究仅考察了从顶部充热后经历的待机过程，当然，这也是优先选择的方式。由于储能装置中冷热区域并存，储罐内可能产生浮力效应，进而引发自然对流。为尽量减少去分层，尤其是在待机期间相当长的情况下，始终应优先选择从顶部充热 [9] 。

未来的工业能源系统将具有高度灵活性，其需求与供应轨迹会不断波动且难以预测。如果热能储存系统要成为未来能源系统的一部分，也必须具备高度的灵活性和效率。它们需要应对各种需求与供应波动，因此应能够采用不同的运行模式，包括长期待机的静态运行。将热能储存系统运行整合到工业过程中，通常需要通过定义机组组合问题，并采用混合整数线性规划等方法求解来进行优化。正如 Koller 等人 [18] 所讨论的，优化结果的质量取决于底层模型的准确性。要优化填充床热能储存系统的待机模式，准确的模型以及对其热行为的深入理解必不可少。除这些运行要求外，现代热能储存系统还必须满足其他设计要求。在关于热能储存系统系统与材料要求的综述中，Gasia 等人 [19]指出，除了储热材料的热物理性质和经济要求外，技术要求也至关重要，其中包括将热能储存系统整合到设施中。Cabeza 等人 [20] 甚至指出，热能储存系统最重要的设计准则之一，是将其整合到整个应用系统中。热能储存系统需要整合到现有能源系统中，同时尽可能少地改变现有系统。在某些情况下，由于结构限制或经济考量（例如改造成本），可能需要从底部为储能装置充热，并从顶部放热。在这种配置下，待机模式期间的去分层情况可能会有所不同。

据作者所知，目前尚无研究发表，探讨充热期间传热流体流动方向对填充床热能储存系统去分层及待机效率的影响。因此，本研究旨在通过实验，考察在前序充热过程中采用不同传热流体流动方向时，PBTES试验装置的待机模式。研究目标是提供信息，以便做出明智决策。为了让工业企业能够决定是否以及如何将储热系统集成到现有流程中，需要为经济评估和投资回收期计算提供依据。对于填充床热能储存系统而言，储热容量、热功率以及能量与火用往返效率是关键绩效指标，可作为此类计算的依据。本

研究为不同运行条件下待机模式期间上述关键绩效指标提供了参考值。

本文第2节介绍了本研究所用的实验装置，并描述了所采用的测量设备、传感器布置和测量控制。第3节采用第一定律和第二定律进行数据分析，从而量化填充床热能储存系统在待机期间的内部效应。第3节末尾简要介绍并讨论了测量误差对计算量的影响。第4节讨论实验数据和推导所得结果，并深入阐释熵产方程，同时给出和讨论不同运行条件下的Energy 和㶲效率参考值。最后，第5节总结主要结果，并结合本研究获得的新见解，得出结论，探讨其影响和潜力。

2. 材料与方法

本研究的实验装置由一套实验室规模的PBTES试验装置组成，填充了作为储热材料的LD炉渣。LD炉渣是炼钢工艺林茨-多瑙维茨（LD）工艺的副产品，由形状不规则的多孔岩石组成（见图1）。LD炉渣的几何形状可增强传热流体与储热材料之间的传热，并使填充床内的流体分布均匀。储存容器为立式圆锥形钢制容器，内部填充储热材料。为尽量减少向周围环境的热损失，热能储存系统采用多层陶瓷棉、岩棉和铝板进行保温。图1展示了施加隔热材料前后的试验台。试验台连接至空气供应装置（空气供应装置），可提供温度为20至400 °C、质量流量为100至400 kg/h的空气。

此外，实验装置还配备了若干温度传感器和差压传感器。图2展示了简化的管道与仪表流程图，其中包含与本研究相关的设备。有关传感器布置和过程控制系统的详细信息，请参阅作者此前的研究 [21]。四线制电阻



图1：维也纳工业大学实验室中的PBTES试验装置：带隔热材料（左）、储热材料（中）、不带隔热材料（右）

温度测量采用AA级（或1/3 DIN）PT100电阻温度探测器（RTD）。试验台配备两个PT100温度传感器（T_{T} 和 T_{B}），用于测量储存容器入口和出口处的传热流体温度；此外，填充床内部设有九个PT100温度传感器（T_1，T_2，……，T_9），储存装置横向表面、钢制容器与第一层保温层之间设有八个PT100温度传感器（$2\times T_{\mathrm{s}2}$，$2\times T_{\mathrm{s}4}$，$2\times T_{\mathrm{s}6}$，$2\times T_{\mathrm{s}8}$）。为进行数据分析，储存容积被划分为九个竖直区段，如图2所示。每个区段的储存容器中心轴上均设有一个温度传感器。热能储存系统横向表面的八个传感器两两相对安装在热能储存系统每隔一个区段的位置。图2中仅显示了每对传感器中的一个。空气供应装置提供传热流体的质量流量、湿度以及周围环境温度的测量值。对于300 °C的测量值，温度传感器（包括信号转换的所有步骤）的测量误差不超过 ± 0.6°C。传热流体的质量流量由热线风速计测量，其相对于测量值的最大测量误差为4%。表1列出了试验台几何结构、储热材料特性以及实验所用运行参数的详细信息。

本研究针对不同待机时间开展了实验。实验从储能装置为空开始（储能装置内的温度介于 20 °C$to25$°C 之间），随后进行两小时充热。充热过程结束后，热能储存系统进入待机状态，持续不同时间段（0.5 h 和 22 h），之后再次回收储存热量。回收的截止温度设为 70 °C。对热能储存系统从顶部充热（称为正向工况）和从底部充热（称为反向工况）均重复这一过程。

3. 理论与计算

为阐明填充床热能储存系统的充热方向对热跃层退化和待机效率的影响，本文采用实验温度数据进行分析。数据分析采用一种能够分别考察周围环境热损失以及填充床内部传热影响的方法。实现这一目的的巧妙方法是利用熵产方程（方程（1））， 即

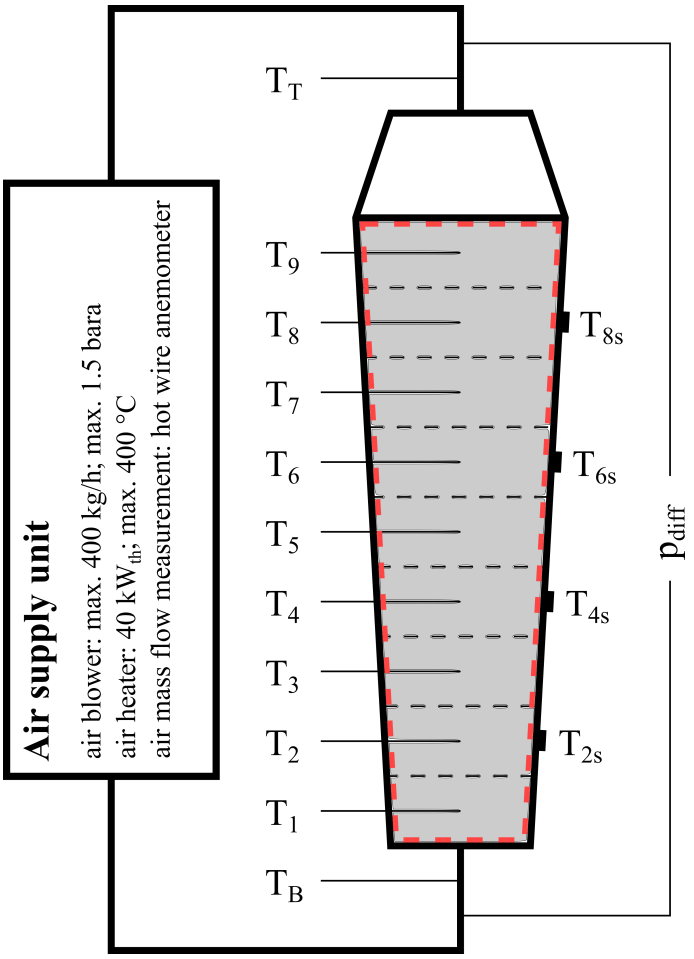


图2：储能装置仪器化与离散化

表1：参数汇总：试验台几何结构、储热材料的数据/属性、运行参数

试验台	
储能类型	垂直填充床 热能储存
储罐材料	P295
储罐直径	200 mm（底部） 500 mm（中部） 700 mm（顶部）
储罐高度	2050 mm
储存容积	0.405 米^3
隔热材料	100 mm 陶瓷棉 ($\lambda = 0.055$瓦特·米$^{-1}$·开尔文$^{-1}$) 80 mm 岩棉 ($\lambda = 0.04$W m^{-1} K^{-1}) 0.1 毫米铝 板
储热材料	
储存材料类型	LD炉渣（不规则
材料	形状，部分多孔）
储热材料的组成	氧化钙（24 - 49 %）， SiO_2 （6 - 37 %）， Fe_xO_y (10 - 36 %), 氧化镁 (0 - 13 %), Al_2O_3 (0 - 7 %), Cr_2O_3 (0 - 0.55 %)
粒径	16 毫米至 32 毫米
颗粒密度	3800 千克/米$^{-3}$
孔隙率	0.42
体积密度	2200 千克/米$^{-3}$
比热容	900 J kg^{-1} K^{-1}
运行参数	
储能材料质量	891 kg
材料	
空气质量流量	200 kg h^{-1}
充热温度	300 °C
恢复温度	20 °C
平均表观	1 米秒$^{-1}$
空气速度	

封闭系统的热力学第二定律表达式。该方程左侧表示系统熵的变化。右侧是由于热穿过系统边界而进入系统的熵与系统内部生成的熵之和。

如果将该方程应用于边界设置恰当的系统，熵产生项仅受填充床内部传热所导致的不可逆效应影响。本研究选择的系统边界仅包围填充床本身（图2中的红色虚线所示）。这样，只有填充床内部传热所产生的不可逆效应会计入熵产生项，而传热至周围环境所导致的不可逆效应则不计入其中。所选系统的熵产方程可写为

$$\sum_{i=1}^{n} \mathrm{d}S_{\mathrm{sys},i}(t) = \frac{\delta Q_{\mathrm{t/b}}(t)}{T_{\mathrm{t/b}}(t)} + \sum_{i=1}^{n} \frac{\delta Q_{\mathrm{lat},i}(t)}{T_i(t)} + \delta S_{\mathrm{gen}}. \tag{1}$$

系统熵的变化（方程（1）左侧）可根据方程（2）中的状态方程，利用测得的温度数据计算得出。

$$\mathrm{d}S_{\mathrm{sys},i}(t) = m_i \int_{T_i(t)}^{T_i(t+dt)} \frac{c(T)}{T} dT \tag{2}$$

对于方程（1）的下一项，即由于热穿过系统边界而进入系统的熵，需要计算向周围环境的热损失。利用竖直圆柱自然对流努塞尔数的适当关联式 [22], ，可使用方程（3）计算热能储存系统九个竖直区段中每个区段向周围环境的侧向热损失率。

$$\dot{Q}_{\mathrm{lat},i}(t) = k\, A_{\mathrm{lat},i}\, (T_{\mathrm{amb}} - T_{\mathrm{s},i}) \tag{3}$$

方程（3）中的传热系数 k 根据几何数据、周围环境的传热系数以及绝缘材料的热物理性质计算得出（见表1）。假设绝缘材料的热导率在整个温度

范围内保持不变。对于$T_{\mathrm{s},\ i}$采用钢制容器与第一层保温层界面处温度传感器的测量值。

考虑 TES 的待机过程，此时穿过系统边界的唯一热流是向周围环境的热损失，填充床的能量平衡可写为

$$\sum_{i=1}^{n} \mathrm{d}U_{\mathrm{sys},i}(t) = \delta Q_{\mathrm{t/b}}(t) + \sum_{i=1}^{n} \delta Q_{\mathrm{lat},i}(t). \tag{4}$$

系统内能的变化等于所有热损失之和。利用这一等式可以计算填充床顶部和底部表面的热损失。最后，可对方程（1）进行重新排列，以计算系统内部的熵产生。

另一种评估充热方向对热跃层退化和待机效率影响的方法，是计算正向和反向流动工况下的能量与火用往返效率，并进行比较。因此，需要计算储能装置的热功率以及充热和放能过程中储存/回收的热能等特征参数。热功率根据传热流体流经填充床时的能量平衡确定：

$$\dot{Q}(t) = \dot{m}(t)\ \left[c_p(T_{\mathrm{out}}(t))\, T_{\mathrm{out}}(t) - c_p(T_{\mathrm{in}}(t))\, T_{\mathrm{in}}(t)\right] \tag{5}$$

储存/回收的能量定义为功率在特定时间区间内的积分：

$$U(t) = \int_{t_0}^{t} \dot{Q}(t)\, \mathrm{d}t \tag{6}$$

根据应用于传热流体流经填充床过程的热力学第二定律的另一种表达式（如公式（7）所示），可计算系统的火用输入/输出速率。储存/回收的火用 $B(t)$ 可类比公式（6）$\dot{}$ $\dot{}$ 确定，方法是将 $Q(t)$ 替换为 $B(t)$，其中

$$\dot{B}(t) = \dot{Q}(t) - T_{\mathrm{ref}}\,\dot{m}(t) \int_{T_{\mathrm{in}}}^{T_{\mathrm{out}}} \frac{c_p(T)}{T}\,\mathrm{d}T. \tag{7}$$

最后，能量效率 η_{e} 和火用效率 η_{b} 可分别通过回收量与储存量之比计算：

$$\eta_{\mathrm{e}} = \frac{U_{\mathrm{recover}}}{U_{\mathrm{charge}}}\,,\ \eta_{\mathrm{b}} = \frac{B_{\mathrm{recover}}}{B_{\mathrm{charge}}} \tag{8}$$

采用高斯误差传播定律估算测量误差对推导量的影响。对于仅使用温度传感器测量值进行的计算，所得不确定度与测量值相比可以忽略不计。纳入传热流体质量流量的计算，其计算结果的误差略高。公式（9）给出了将误差传播定律应用于公式（5）中的能量平衡所得的结果。对于所有实验，计算所得热流率的误差 $\dot{Q}$ 相对于测量值均远低于 4.5%。这些不确定度不会影响本研究结果的质量。

$$\delta\dot{Q}^2 = \left(\frac{\partial\dot{Q}}{\partial\dot{m}}\right)^2 \delta\dot{m}^2 + \left(\frac{\partial\dot{Q}}{\partial h_{\mathrm{in}}}\right)^2 \delta h_{\mathrm{in}}^2 + \left(\frac{\partial\dot{Q}}{\partial h_{\mathrm{out}}}\right)^2 \delta h_{\mathrm{out}}^2 \tag{9}$$

$$\delta h_i = c_p\left(T_i\right)\,\delta T_i \tag{10}$$

4. 结果与讨论

使用第2节末尾所述实验中收集的数据，对所研究的填充床热能储存系统试验装置的待机效率和热跃层退化进行定性和定量分析。图3展示了试验装置在正向（上图）和反向（下图）充热两小时后，内部温跃层的退化情况。充热过程结束后（待机时间 =0h）的温跃层以蓝色实线表示。 ◦ 标记表示温度传感器的垂直位置。两种流动方向下，充热后的温跃层形状相似。位置上的细微差异

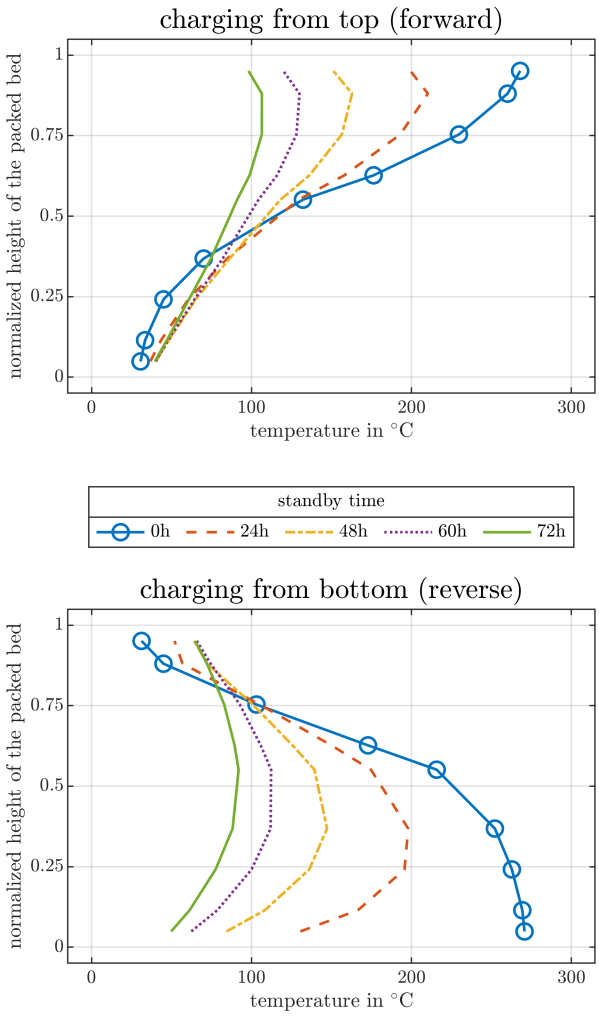


图3：待机期间顶部充电（上图）和底部充电（下图）的热跃层退化

温跃层的形成是由于储存容器呈圆锥形，因此储存材料的质量分布略有不均。

待机一段时间后，储能装置中的温度下降，温跃层开始退化，如图3所示。对于“从顶部充热”的实验，即正向工况，温跃层逐渐变平，并在整个待机期间保持其形状。填充床热端（顶部）的温跃层略有弯曲，这是由于顶部表面发生热损失。对于“从底部充热”的实验，即反向工况，温跃层同样逐渐变平，但除此之外，其形状还发生了显著变化。同样，温跃层热端出现弯曲，这是由填充床底部表面的热损失造成的。不过，这次弯曲更加明显。这是因为在第一种工况下，浮力效应使温跃层具有自稳定性，而在第二种工况下则没有。在正向工况下，顶部表面的热损失会由自然对流输送至顶部的热量予以补偿；而在反向工况下，没有任何因素能够补偿底部表面的热损失。除了这种弯曲之外，还可以观察到反向工况下温跃层退化得更快。与正向工况不同，填充床冷端的温度升高，储能装置内部的最高温度则向冷端移动。这些观察结果表明，填充床中的自然对流可能会对填充床热能储存系统的待机模式产生显著影响。

为量化这些效应，采用方程（1）中的熵产方程。评估结果如图4所示。该图展示了方程（1）中的三个项，分别以独立曲线绘出，表示试验台在充热2小时后进入待机期间正向流动工况和反向流动工况下的情况。带有 ∘标记的蓝线表示系统熵 S_{sys}的变化率，带有 ∗标记的红线表示由跨越系统边界 S_Q 的热流率所导致的熵流率，而带有 □标记的绿线表示系统内部的熵产生率 S_{gen}。横轴表示待机模式下经过的时间。请注意， S_{sys} 和 S_Q 的绝对值在反向工况下更高。这是因为储能装置下半部分的表面积体积比更高，导致向周围环境的热损失更多。尽管如此，这些额外的热损失并不影响本文得出的结果和结论，正如本节稍后将讨论的那样。

更值得关注的是，熵产生率项 $\dot{S}_{gen}$也存在显著差异。正如第3节所述，该项仅受填充床内部不可逆效应的影响，这些效应可能包括由导热、自然对流和辐射引起的传热。由于填充床内部的温差极小，辐射传热可以忽略不计。在正向流动工况下，储能装置中的热区位于冷区上方，因此自然对流的影响也微不足道。因此，正向工况下产生的熵仅由固体储能材料中热传导引起的不可逆效应所导致。由于热传导不受浮力影响，反向工况下由热传导产生的熵量也相同。根据图4，这在待机期间的最初几分钟内成立。然而，在反向工况下，熵产生项持续增加，直到待机约七小时后达到最大值，其数值是正向工况的两倍。这部分额外的熵产生只能用填充床内自然对流传热所导致的不可逆效应来解释。此外还可以确定，系统需要约七小时才能在填充床内形成充分发展的空气循环。

通过评估公式（8）中定义的效率，也可以支持这些结果。若考虑比值 $\eta_{\mathrm{b}}/\eta_{\mathrm{e}}$，其中 η_{b} 为火用往返效率， η_{e} 为能量往返效率，那么如果系统内部不存在传热等不可逆效应，即使向周围环境的热损失不同，正向工况和反向工况下该比值也都等于1。如果两种工况下不可逆效应的程度相同，那么即使向周围环境的热损失不同，该比值在两种工况下仍会相同，但小于1。然而，如果正向工况和反向工况下该比值不同，则比值 $\eta_{\mathrm{b}}/\eta_{\mathrm{e}}$较小的工况中发生了更多不可逆效应。对测量数据的评估结果（见表2）正是如此。关于这些额外的不可逆效应只能由自然对流传热引起的论证，与前文相同。

既然已经证明，自然对流对填充床热能储存系统待机效率的影响取决于前一充能期的传热流体流动方向，那么可以据此推导出一些重要指标

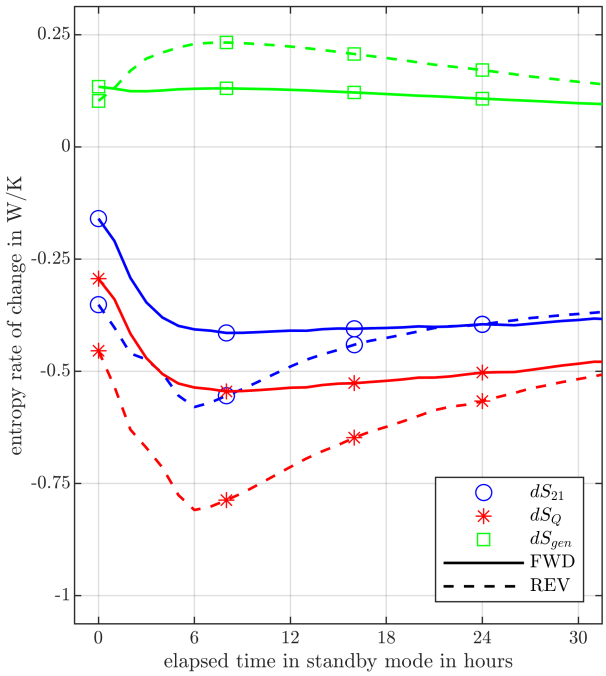


图4：待机 ≈ 33小时期间的熵产生

表2：不同充电方向（正向和反向）及待机时间（0.5 h和22 h）下实验的Energy和火用效率

		正向	反向	$\Delta\eta_{\mathrm{rel}}$
0.5 小时	η_{e}	0.92	0.93	$\approx 0\%$
	η_{b}	0.83	0.84	$\approx 0\%$
	$\eta_{\mathrm{b}}/\eta_{\mathrm{e}}$	0.90	0.90	
22 h	η_{e}	0.74	0.70	$\approx 5\%$
	η_{b}	0.55	0.45	$\approx 18\%$
	$\eta_{\mathrm{b}}/\eta_{\mathrm{e}}$	0.74	0.64	

以下段落将呈现并讨论相关数据。图5绘制了不同实验中归一化能量输入和输出速率随归一化储存/回收能量的变化情况。计算量以能量输入速率和充热结束时的储存能量进行归一化。所有实验均从空储能装置（储存能量为零）和能量输入速率为零的状态开始。图5中的黑色圆圈标记了这一初始点。在随后的充热过程中，试验台在每次实验中均表现出相似的行为（黑色实线，带箭头标记）。充热两小时后，传热流体流动停止，储能装置切换至待机模式。对于一半实验，在待机0.5小时后开始回收储存热量（放能）；另一半实验则在待机22小时后开始放能。若假设储能装置理想，不向周围环境散热且不存在热跃层退化，那么无论待机时间长短，放能曲线都会继续沿着黑色实线变化。然而，实际储能装置的放能行为有所不同。图5中的彩色曲线展示了实验中观测到的实际放能曲线。可以看出，充热与放能之间的待机时间越长，能够回收的能量就越少。如果储能装置仅在待机0.5小时后便切换至放能模式（由于空气供应装置的热惯性，这是能够实现的最短待机时间），则能量效率非常高（92%，与Bruch等人 [12]的观测结果相似），且能达到理论最大能量输出速率的87%。正向工况和反向工况实验的结果相似。在待机时间较长的实验中，两种工况的结果开始出现差异。待机22小时后开始放热时，正向工况的能量效率为74%，而反向工况为70%。能量输出速率也存在类似差异：正向工况和反向工况分别达到理论最大能量输出速率的65%和62%。

由于填充床内部的熵产生，以及储热材料与传热流体之间有限的传热，火用效率通常低于能量效率，如图6所示。待机时间为 0.5 h 时，火用效率已低至 83%。正向工况和反向工况的实验结果再次表现出相似的趋势。对于待机时间较长的实验，正向工况和

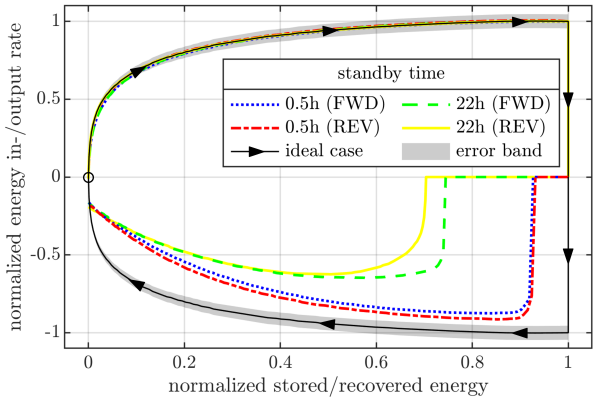


图5：能量输入/输出速率与储存/回收能量

反向工况的火用效率分别为 55% 和 45%。这些结果汇总于表2。可以看出，待机时间为 0.5 h 时，正向工况和反向工况的效率几乎相同。这意味着两种工况等效，若前序充热过程中传热流体的流动方向为自底部向顶部，则无需预期额外损失。相比之下，在待机时间为 22 h 且运行参数相同的情况下，能量效率降低了 5%，火用效率降低了 18%。最后需要指出的是，计算所得的效率适用于几何结构、保温层和储存温度与第2节及表1所述相近的填充床热能储存系统。本文得出的结果和结论适用于所有采用填充床作为储热材料、并以气体或流体作为传热流体的热能储存系统。然而，对于上述参数中有一项显著不同时的填充床热能储存系统，其效率可能与本文所述结果不同。

5. 结论

本研究考察了在前序充热过程中，传热流体采用不同流动方向时，填充床热能储存系统的待机效率。实验研究所用的试验台是一套实验室规模的填充床热能储存系统，传热流体在其中垂直流动。储罐内填充了粒径为 16 mmto32mm 的不规则多孔岩石形态 LD炉渣作为储热材料，并以空气作为传热流体。

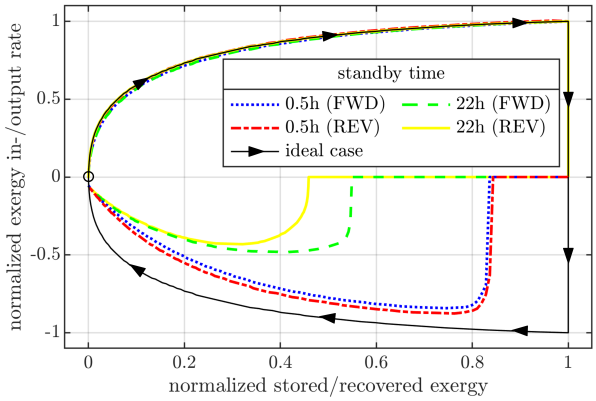


图6：火用输入/输出率与储存/回收火用

结果表明，如果在充热过程结束后立即回收填充床热能储存系统中储存的热量，前序充热过程中的流体流动方向不会影响系统的能量和火用效率。然而，在较长的储能装置待机期间，效率和热跃层退化程度会显著受到前序充热过程中传热流体流动方向的影响。当前序充热过程中的流动方向为自底部向顶部时，待机期间填充床内因不可逆效应而产生的熵，以及由此造成的火用损失，是反向流动时的两倍。这一差异可归因于自然对流。研究发现，该系统需要七小时才能在填充床内形成充分发展的空气循环。对于最大待机时间远低于七小时的储能系统，前序充热过程中的流体流动方向不会影响储能装置的待机效率。然而，如果系统设计用于更长的待机期间，充热流动方向应始终为自顶部向底部。与从顶部充热相比，从底部充热会导致能量效率和火用效率显著下降；在待机 22 小时后，两者分别下降 5% 和 18%。

本研究所呈现的结果详细介绍了填充床热能储存装置的效率，可作为经济评估和回收期计算的依据。因此，本

研究有助于热能储存系统的发展，使其能够得到部署，从而利用工业部门巨大的废热潜力。

致谢

作者感谢奥地利气候与能源基金会通过其 Energieforschung (e! MISSION) 计划资助本研究项目 $5DIndustrialTwin\ \ 6^{\mathrm{th}}$ （KLIEN/FFG 项目编号 881140）。此外，作者感谢 TU Wien Bibliothek 为其开放获取资助计划提供的经费支持。

利益冲突声明

作者声明，他们不存在已知的可能影响本文所报告研究的竞争性经济利益或个人关系。

参考文献

[1] H. Jouhara, A. G. Olabi，社论：工业余热回收，Energy 160 (2018) 1–2. doi:10.1016/j.energy.2018.07.013.[2] M. Papapetrou, G. Kosmadakis, A. Cipollina, U. La Commare, G. Mi- cale，工业余热：按工业部门、温度等级和国家估算欧盟的技术可用资源，Applied Thermal Engineering 138 (2018) 207–216. doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.04.043.[3] G. P. Panayiotou, G. Bianchi, G. Georgiou, L. Aresti, M. Argyrou, R. Agathokleous, K. M. Tsamos, S. A. Tassou, G. Florides, S. Kalogirou, P. Christodoulides，欧洲主要工业的废热潜力初步评估，Energy Procedia 123 (2017) 335–345. doi:10.1016/j.egypro.2017.07.263.[4] C. Forman, I. K. Muritala, R. Pardemann, B. Meyer，全球废热潜力估算，Renewable and Sustainable Energy Reviews 57 (2016) 1568–1579. doi:10.1016/j.rser.2015.12.192.

[5] G. Manente, Y. Ding, A. Sciacovelli，工业余热利用与转化的热能储存方案选择结构化流程，《储能杂志》51 (2022) 104411. doi:10.1016/j.est.2022.104411.[6] A. Gautam, R. P. Saini，低温应用中基于显热的填充床太阳能热储能系统综述，《太阳能》207 (2020) 937–956. doi:10.1016/j.solener.2020.07.027.[7] A. Gautam, R. P. Saini, 填充床太阳能热储能系统的技术、应用和经济方面综述，《储能杂志》27 (2020) 101046. doi:10.1016/j.est.2019.101046.[8] B. Xie, N. Baudin, J. Soto, Y. Fan, L. Luo，热斜温层填充床热能储存系统：综述，载于：M. Jeguirim（编），《可再生能源生产与分配》，《可再生能源技术进展》第1卷，学术出版社，2022年，第325–385页。doi:10.1016/B978-0-323-91892-3.24001-6.[9] T. Esence, A. Bruch, S. Molina, B. Stutz, J.-F. Fourmigu´e，填充床热能储存系统的经验反馈与数值建模综述，《太阳能》153 (2017) 628–654. doi:10.1016/j.solener.2017.03.032.[10] J. Stekli, L. Irwin, R. Pitchumani，配备热能储存的聚光太阳能发电面临的技术挑战与机遇，《热科学与工程应用杂志》5 (2) (2013).doi:10.1115/1.4024143.[11] A. Bruch, J. F. Fourmigu´e, R. Couturier，聚光太阳能发电厂用导热油填充床热储能系统的中试规模实验与数值研究，《太阳能》105 (2014) 116–125. doi:10.1016/j.solener.2014.03.019.[12] A. Bruch, S. Molina, T. Esence, J. F. Fourmigu´e, R. Couturier，中试规模导热油填充床热储能系统循环行为的实验研究，《可再生能源》103 (2017) 277–285. doi:10.1016/j.renene.2016.11.029.[13] D. Okello, O. J. Nydal, E. J. K. Banda，高温岩石床热能储存系统中热分层消除的实验研究

应用，能源转换与管理 86 (2014) 125–131。 doi:10.1016/j.enconman.2014.05.005.[14] N. Mertens、F. Alobaid、L. Frigge、B. Epple，《聚光太阳能集成式岩床温跃层储能的动态模拟》，《太阳能》110 (2014) 830–842。 doi:10.1016/j.solener.2014.10.021。[15] C. Xu、Z. Wang、Y. He、X. Li、F. Bai，《熔盐填充床温跃层热能储存系统的参数研究与待机特性》，《可再生能源》48 (2012) 1–9。 doi:10.1016/j.renene.2012.04.017。[16] F. A. Rodrigues、M. J. de Lemos，《热能储存系统待机循环中的分层与能量损失》，《清洁环境能源国际期刊》22 (2021) 1–32。[17] B. Yang、F. Bai、Y. Wang、Z. Wang，《灵活高温储热用空气基固体填充床待机过程研究：实验结果与建模》，Applied Energy 238 (2019) 135–146。 doi:10.1016/j.apenergy.2019.01.073.[18] M. Koller、R. Hofmann、H. Walter，《填充床显热热能储存的混合整数线性规划模型》，《计算机与化学工程》125 (2019) 40–53。 doi:10.1016/j.compchemeng.2019.03.007.[19] J. Gasia、L. Mir´o、L. F. Cabeza，《高温热能储存的系统与材料要求综述。第一部分：一般要求》，Renewable and Sustainable Energy Reviews 75 (2017) 1320–1338。 doi:10.1016/j.rser.2016.11.119.[20] L. F. Cabeza、I. Martorell、L. Mir´o、A. I. Fern´andez、C. Barreneche、L. F. Cabeza、A. I. Fern´andez、C. Barreneche，1 - 热能储存系统简介，载于：L. F. Cabeza（编），《热能储存系统进展》（第二版），能源系列，伍德海德出版公司，2021年，第1–33页。 doi:10.1016/B978-0-12-819885-8.00001-2.[21] P. Schwarzmayr、F. Birkelbach、L. Kasper、R. Hofmann，《工业能源系统数字孪生平台开发》，载于：加速

能源创新与新兴技术，第25卷，Energy Proceedings，剑桥，美国，2022年。doi:https://doi.org/10.46855/energy-proceedings-9974。

[22]G. P. Merker，《对流传热》，《传热与传质》，施普林格·柏林·海德堡，柏林，海德堡，1987年。 doi:10.1007/978-3-642-82890-4。

符号表

缩略语空气供应装置 欧盟 正向 传热流体 林茨-多瑙维茨 填充床热能储存系统 反向 电阻温度检测器 热能储存系统罗马符号

A 表面积，单位 $\mathrm{m}^2$$B$ 火用，单位 JB 火用流率，单位 Wc 储热材料比热容，单位 $\mathrm{J\,kg^{-1}\,K^{-1}}$$c_p$ 传热流体定压比热容，单位 $\mathrm{J\,kg^{-1}\,K^{-1}}$$h$ 比焓，单位 $\mathrm{J\,kg^{-1}}$

k 传热系数，单位 W m^{-2} K^{-1}m 储能材料质量，单位 kg$\dot{m}$ 传热流体质量流率，单位 kg s^{-1}n 垂直体积分段数 $n = 9$$Q$ 热量，单位 J$\dot{Q}$ 传热流体或周围环境的热流率，单位 WS 熵，单位 J K^{-1}$\dot{S}$ 熵流率，单位 W K^{-1}T 温度，单位 Kt 时间，单位 sU 内能，单位 J希腊字母符号λ 热导率，单位 W m^{-1} K^{-1}η 效率下标amb 环境b 火用$charge$ 充能e 能量gen 生成HTF 传热流体i 体积单元索引in 入口

lat 横向out 出口Q 热 $recover$ 回收ref 参考 ($T_{\mathrm{ref}} = 295.15\mathrm{K}$)$rel$ 相对的 s 表面sys 系统t/b 顶部/底部