



高效利用工业余热

Dominik Stephan

面对高昂的能源账单，越来越多的人开始关注如何更有效地管理取暖问题，以尽可能减少热量的流失，并将现有的余热资源转化为可再利用的能源。与此同时，在工业领域，随着生产活动的快速扩张，高能耗企业的数量不断增加，随之而来的是大量工业废气余热的产生。这些宝贵的余热资源如果得不到合理利用，将造成巨大的能源浪费，并加剧环境问题。传统能源利用方式中普遍存在的严重浪费与污染问题，使得高效回收和利用这些余热资源、实现能源的闭环循环成为当今工业发展的关键挑战之一。

余热是指燃料经过燃烧过程产生并在完成某一工艺流程后剩余的有价值能量，它是可燃物质和初次能源转换过程的副产品。作为一种有效地提高能源利用效率的方法，热能回收利用正在受到多国政府的重视和支持，各国纷纷出台相关政策鼓励企业实施余热回收项目。

流程工业必须做好准备迎接寒冬：除了尽可能实现能源和热供应的“去碳化”要求，急剧上涨的能源价格也对该行业施加了巨大压力。因此，实现能源效率最大化的需求显而易见——

但在热能方面，剩余的节能潜力究竟有多大？考虑到不同行业的多样性及其特有的生产工艺、设施和流程，要准确评估这一点并不容易。然而，通过深入研究和技术创新，探索并实现这些潜在的节能机会，对于推动整个工业领域的可持续发展具有重要意义。

1 将余热转化为可用能源

德国能源署（DENA）虽然未能提供一个确切的数字，但估计德国工业每年用于工艺热能生产的总能量约为1670PJ（或460TW·h）。这一数值反映了德国工业在生产过程中消耗了巨大能量。值得注意的是，这不是指节

能潜力，而是实际已经使用的能源总量。据弗劳恩霍夫研究所（Fraunhofer IPM）、环境与能源研究中心（IZES）以及工业研究所（IfD）共同发布的“余热图谱”研究报告显示，德国工业产生的余热量大约在130 ~ 250 PJ（即36 ~ 69 TW·h），这个数量级的能量相当于几个典型核电站的年发电量。

传统上，废热被认为是能量使用过程中的最终产物和不可避免的损失。即使是在最佳情况下，也只能通过增强隔热措施和优化工艺设计来尽可能地延长其在使用流程中的使用时间，最终仍然需要将其释放到环境中。然而，从DENA的角度看，这些热流实

本文作者系《PROCESS》德文版编辑。



际上蕴含着显著再利用潜力。根据不同的工艺流程，有 30% ~ 95% 的热量是可以被重新利用的。尤其是高温废气（其中 30% ~ 90% 的废热可以回收）、冷却过程和制冷设备（废热回收率可达 35% ~ 95%），以及电力驱动设备（如压缩空气生产中产生的废热）等领域，均蕴藏着巨大的回收潜力。

2 废热潜力巨大

确实，并非所有的废热流都是相同的，它们离开工艺流程时的温度水平直接影响了其回收利用的难度和适用范围。例如，燃烧废气的温度可以轻易达到 150℃ 甚至更高，蒸汽通常能达到 100℃，而典型的工艺废热温度则多在 40 ~ 90℃，按工业标准来看已算是相对较低的温度了。可用废热的“热度”直接决定了其潜在的应用场景：

1) 高温废热 (250 ~ 550℃)：可以直接用于发电，比如通过蒸汽轮机发电。

2) 中温废热 (125 ~ 400℃)：适合用来预热锅炉给水或燃烧空气，提高整体热效率。

3) 较高温废热 (270℃ 以上)：可以应用于有机朗肯循环 (ORC) 工艺，这是一种基于逆向热泵原理的热力循

环，能够将热能转化为电能。

4) 中温废热 (125 ~ 275℃)：可直接用作工艺热源或在干燥设备中使用。

5) 适中温度废热 (超过 270℃)：可用于加热生活用水，甚至在温度达到 80℃ 以上时用于制冷。

6) 低温废热 (30 ~ 75℃)：虽然温度较低，但仍可用于供暖需求。

通过使用热泵技术，即使是低温废热也可以被提升到更高的温度，从而扩大其应用范围。例如，热泵可以输出 50 ~ 160℃ 的液体，适用于塑料制造、化工加工或干燥等过程，其功率范围可以从 20 kW 扩展到 20 MW 以上。对于需要更高温度的应用，如蒸馏、加热或蒸汽产生，高温热泵能够提供超过 100℃ 的温度。此外，利用吸收式制冷机可以将废热转化为冷量。以吸收式制冷机的性能系数 (COP) 为 0.6 ~ 0.75 为例，这意味着 20 kW 的废热功率可以转换成 12 ~ 15 kW 的制冷功率。同样，500 kW 的废热通过有机朗肯循环 (ORC) 技术可以转化为大约 50 kW 的电能。

通过对不同温度级别的废热进行合理利用，不仅可以有效提高能源利用效率，减少能源浪费，还有助于降低企业的运营成本，促进可持续发展。

3 废热投资回报率

德国能源署 (DENA) 指出，废热

利用项目的投资回报率往往能达到两位数的百分比，这得益于一些间接效益，比如可以省去复杂的工艺冷却过程。此外，废热不一定非要企业自身利用，将其转移至综合工厂或接入区域或远程供热网络同样是可行的选择。

对于希望开发废热潜力的流程工业企业，专家们推荐采用一个多阶段的方法：1) 追踪热流：首先需要对生产流程中的热流进行跟踪，识别出主要的热源和热损失点。这项工作并不容易。根据弗劳恩霍夫研究所 (Fraunhofer IPM) 的研究，超过 80% 的受访企业甚至无法准确估计自身运营中产生的废热量，更不用说精确测量和计算了，而在热泵的帮助下，这些废热流可以被提高到一个可用的温度水平，并重新整合到生产过程中；2) 优先考虑效率措施：如果可能的话，应优先采取措施避免废热的产生。这是因为即使是最高效的能源使用也会伴随一定程度的能量损失，因此提高能源使用效率始终应该放在首位。

4 热泵废热回收解决方案

在接下来的步骤中，应当将废热优先用于那些能够接受最高温度输出的应用场合，同时确保不会影响到正常的生产流程。选择合适的设



在德国柏林，所有二氧化碳排放中有一半来自热能部门，因此余热利用和热泵成为关注的焦点。

下转 P 23 页

- [2] YAN Z, TIAN J, WANG K, et al. Microreaction processes for synthesis and utilization of epoxides: A review[J]. Chem Eng Sci, 2021, 229: 1-19.
- [3] SHEN J, ZHAO Y, CHEN G, et al. Investigation of Nitration Processes of iso-Octanol with Mixed Acid in a Microreactor[J]. Chinese J Chem Eng, 2009, 17 (3) : 412-418.
- [4] YU Z, LV Y, YU C, et al. Continuous flow reactor for Balz-Schiemann reaction: a new procedure for the preparation of aromatic fluorides[J]. Tetrahedron Lett, 2013, 54 (10) : 1261-1263.
- [5] DEGENNAROL, FANELLI F, GIOVINE A, et al. External Trapping of Halomethylithium Enabled by Flow Microreactors[J]. Adv. Synth. Catal, 2015, 357, 21-27.
- [6] YU X, HUANG G, WANG Y, et al. Synthesis of piperacillin with low impurity content using a new three-feed membrane dispersion microreactor[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 387: 124178.
- [7] Pan Y, Zhao S, Wang L, et al. Large-scale production of cefazolin in a microreactor with a low impurity content and high yield[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 497: 154887.
- [8] BHASKAR KV, RASHED M, Bhat KS, et al. A continuous flow microreactor as a practical tool for the synthesis of active pharmaceutical ingredients[J]. Process Safety and Environmental Protection. 2024, 192, 437-449.
- [9] LEROUJ, TONKOVICHAL, SILVAL, P, et al. Microchannel reactor architecture enables greener processes[J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65 (1) , 380-385.
- [10] 阳平坚, 彭栓, 王静, 等. 碳捕集, 利用和封存 (CCUS) 技术发展现状及应用展望[J]. 环境科学. 2024, 44 (1) : 404-416.
- [11] HEIDARYANE, AGHEL B, SAHRAIES, et al. Enhanced carbon dioxide absorption using alcohol solvents in a microreactor: Comparison with MEA+ water mixture[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2023, 151, 105105.
- [12] WANG K, WANG YJ, CHEN GG, et al. Enhancement of Mixing and Mass Transfer Performance with a Microstructure Minireactor for Controllable Preparation of CaCO₃ Nanoparticles[J]. Ind. Eng. Chem. Res, 2007, 46, 6092-6098.

上接 P19 页

备也非常重要: 高效的、专为废热应用设计的换热器通常具有更高的工作效率和更低的总体拥有成本 (TCO)。这样做不仅可以避免因扩展或升级能源生产设施而产生的额外费用, 还能显著提高整个系统的经济效益。

对于那些不能直接利用的废热, 可以通过热泵技术将其温度提升至更高水平, 或者通过热网分配给其他企业和公共事业部门。此外, 废热还可以储存在金属、热油或熔融盐等储能介质中, 以实现时间上的灵活调度。这类储能装置的放热温度通常介于 100 ~ 400℃, 非常适合用于流程工业中常见的高温蒸汽需求。

不过, 仅仅依赖废热利用并不能完全解决能源问题。事实上, 废热利用本身也有能效方面的考量。如果能够通过工艺优化、智能化控制或是寻找替代路

从废热到电力: 聚焦 ORC (有机朗肯循环) 技术

- 与蒸汽动力技术的关系: ORC (有机朗肯循环) 类似于传统的蒸汽动力发电工艺。
- 有机工质: ORC 使用一种有机工质, 沸点低于水。
- 温度要求: ORC 系统可在低至 80℃ 的温度下运行。
- 热传导: 废热用于加热有机工质。
- 蒸发过程: 加热的工质蒸发生成蒸汽。
- 膨胀过程: 蒸汽驱动涡轮机, 为发电机提供电力。
- 循环系统: 工质冷却后凝结, 重新恢复到液态。
- 高效发电: ORC 技术能够高效地将废热转化为电能。
- 应用领域: ORC 系统广泛应用于工业、地热资源以及工业和商业废热利用领域。
- 降低碳排放: 通过废热利用, ORC 技术有助于减少二氧化碳排放。

径来减少 (甚至是避免) 废热的产生, 那么最终的能源成本将会更加令人满意。总之, 合理规划和综合利用各种手

段, 才能真正实现节能减排的目标, 同时保证生产效率不受影响。