高温热泵

机械蒸汽再压缩

开辟供热脱碳新途径

德国西门子能源 Lukas Biyikli，如何通过蒸汽压缩使工业过程中的热量脱碳。



产热约占工业能源消耗的三分之二，是过程工业二氧化碳直接排放的主要来源。[1] 如今，工业设备产生的大部分热量都是燃烧化石燃料（即天然气或燃油锅炉）产生的。通常情况下，这些热量将会被转化为低压、中压或高压蒸汽。

因此，工业产热和蒸汽的去碳化将在实现既定气候目标和成功推动能源转型方面发挥重要作用。通过余热回收减少工业对化石燃料供热的依赖，存在巨大的机遇。据估计，在工业过程中所消耗的能源中高达 50% 最终会成为废热。[2]

高温热泵 (HTHP) 与蒸汽压缩和机械蒸汽再压缩 (MVR) 循环相结合，都是利用废热产生可用蒸汽的可持续性方法。这是因为它们只需要电力作为输入能源。这些技术可以达到下游石油和天然气、化工、纸浆和造纸行业许多工艺所需的蒸汽温度和压力，开辟新的脱碳途径。

高温热泵与蒸汽压缩相结合

热泵是一种高效的废热回收技术，自 19 世纪中期以来一直在使用。近年来，随着减排压力的增加，热泵得到了更为迅速的发展。

热泵的主要优势是只需要输入电能，这也意味着如果电力来自绿色能源，产热即可实现零排放。虽然电热锅炉和电加热器具有同等优势，但热泵的大部分能量由废热提供，它的效率比前两者要高 5 倍。

热泵通常分为低温热泵和高温热泵。目前安装的大多数热泵都是低温热泵，设计温度高至 100°C，它们通常应用在区域供热中。另一方面，高温热泵在工业蒸汽生产应用中越来越普遍。

根据所用制冷剂的不同，无蒸汽压缩的简单高温热泵循环最高出口温度的限制通常约 150°C，因此最高蒸汽压力为 5 bara。制冷剂达到的温度越高，两相流区域宽度减小的越明显，温度越接近临界点。因此，冷凝器中可回收和可用的潜热较少，热泵系统的性能系数 (COP) 和效益降低。因此，在设计系统时与制冷剂的临界温度须保持足够距离。

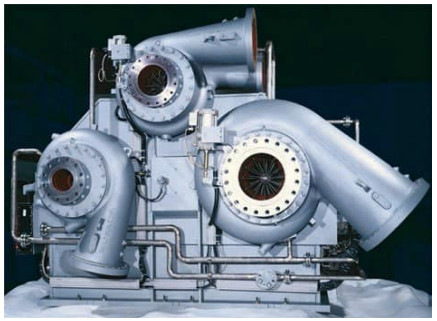
此外，合成制冷剂连续运行在 150°C 到 200°C 的温度之间时会失去稳定性。由于工艺蒸汽需求，通常热泵系统下游需要配备一台蒸汽压缩机，温度高于 150°C，压力大于 5 bara。

蒸汽压缩技术

在过去，蒸汽压缩应用需要的压力比相对较小，单级压缩机/鼓风机即可实现。然而，如今的许多工业产热应用需要多级压缩。

西门子能源采用的蒸汽压缩技术是整体齿轮式压缩机（IGC）（图 1）。虽然一些运营商认为整体齿轮式压缩机是一项新技术，但这些机器已在广泛的工业应用中积累了数百万小时的不间断运行业绩。西门子能源于 1948 年研发出第一台整体齿轮式压缩机（当时正式命名为 VK）。

整体齿轮式压缩机是带有大齿轮的离心压缩机，大齿轮轴驱动多达四个小齿轮轴（每个小齿轮轴有一个或两个叶轮）。每个叶轮以自身的最佳速度和频率转动，从而实现最高效率。此外，每个叶轮都有独立的蜗壳，气体可以在压缩级之间从机器中排出。在每级之后进行中间冷却。级间冷却对于最大程度降低能耗非常重要，对于防止温度超过压缩机的最大允许极限也至关重要，否则可能需要使用更昂贵的材料。



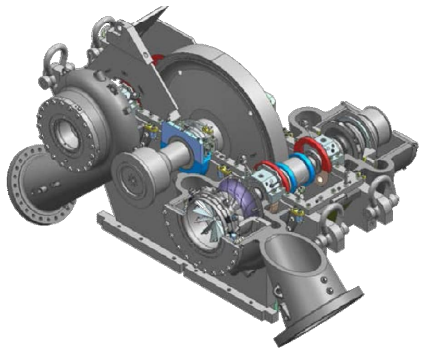


图 1. 具有独立蜗壳的整体齿轮式压缩机 (IGC)

西门子能源生产的整体齿轮式压缩机入口单级处理量可高达 120 万立方米/小时，叶轮直径最大为 2 米。采用双吸设计时，流量高达 240 万立方米/小时，此时压缩机入口处的流量被分配给两个平行级/叶轮。

由于每个叶轮有独立的蜗壳，因此每个压缩级是独立的，从而能够应用组合式制冷剂/蒸汽压缩机（当蒸汽压缩机用在热泵下游时）。

在组合配置中，两种不同的工艺气体热泵的制冷剂和蒸汽在同一台机器内进行压缩，如图 2 所示。制冷剂级数和蒸汽级数可以随意设置。例如，四级/叶轮用于制冷剂压缩，四级用于蒸汽压缩，总数不超过八级。此类应用所需的压缩机组数量从两台减少到一台，压缩设备的初始资本成本节省大约 20 - 30%。

蒸汽压缩机并非通过常用的水或翅片/风扇冷却器来进行冷却，而是通过将水注入级间工艺气体管道中进行冷却。注入的水通过吸收蒸汽的热量蒸发，如图 3 所示。

由于水蒸发需要较高潜热，因此蒸汽温度显著降低，并且全部压缩热（通常是副产品）用于产生额外的蒸汽。所需的冷却温度通过注水量来控制（注入的水越多，冷却温度越低）。

结合使用高温热泵和蒸汽压缩可实现高达 300°C 的温度和 60 bara 的压力。在蒸汽压缩机下游安装小型电过热器，温度可以达到更高。如前所述，这些温度和压力在石油和天然气、化工以及纸浆和造纸行业等许多工艺的要求范围以内，这些行业传统上依赖化石燃料燃烧产热/产汽。

机械蒸汽再压缩 (MVR) 循环

MVR 循环是传统热泵的替代方案，回收废热产生低压、中压或高压蒸汽。

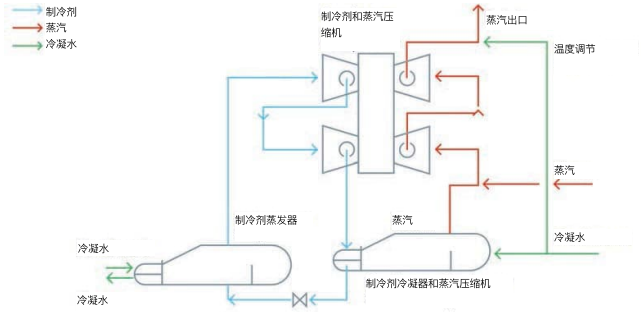


图 2. 组合式制冷剂/蒸汽压缩机

在 MVR 循环中，中温或低温废汽中的热能可用于直接蒸发给水。蒸汽压缩至工艺所需的温度和压力。全部蒸发潜热由免费的废热提供，只有明显低于潜热/蒸发热的显热通过压缩提供。

几乎在所有情况下，废热源的温度都低于 100°C，这意味着水需要在低于大气压的压力下蒸发。虽然在设备设计时需要额外考虑（例如密封系统防止吸入周围空气），但西门子能源现有的技术完全可以应对这些挑战。

与热泵相比，MVR 循环不需要制冷剂。这是有利的，因为欧盟正在考虑对合成制冷剂中全氟和多氟烷基物质 (PFAS)进行限制。另一方面，天然制冷剂通常有毒（例如 NH_3）或是含有碳氢化合物（例如戊烷），这都需要额外考虑，包括防爆。在许多情况下，由于不使用膨胀阀、闪蒸罐、制冷剂冷凝器和一些辅助管道，初始投资和占地面积比热泵将减少。

图 4 所示为 MVR 循环示例，其中温度在 75°C 的 68 兆瓦热量 (MWth) 废热可用于产生 100 MWth 的压力为 6 bar 温度为 180°C 的蒸汽。系统的最终性能系数大于 3。

在此应用中，水先在 0.15 bara 的压力下蒸发，然后在蒸汽压缩机中压缩。虽然低于大气压的蒸汽密度非常低（仅为 0.1 kg/m³），但西门子能源一台整体齿轮式压缩机仍然可以处理整个体积流量。该系统的性能系数与同类热泵系统的性能系数类似，但不再使用上述组件而降低了初始投资。

如果热源温度升高，可以进一步提高性能系数和降低初始投资。在另一个例子中，废热源的温度约为 105°C，所需的蒸汽压力为 3 bara，此时性能系数可大于 7。这种情况下，能够在 0.65 bara 压力下产生 MVR 循环的蒸汽，从而提高蒸汽密度，与之前示例的 0.15 bara 相比，体积流量会更低。

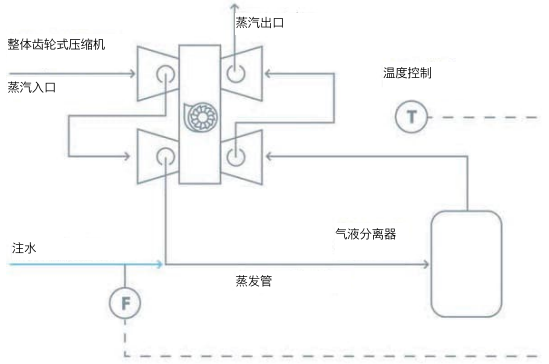


图 3. 通过注水冷却蒸汽

结论

热泵和 MVR 循环都是可持续的高效废热回收技术。选择哪种技术在很大程度上取决于特定的工艺要求或设备要求。

MVR 循环通常对于较高温度的热源更有利。因为这会增加蒸汽蒸发温度和压力，从而通过减小体积流量而提高性能系数和减少系统占地面积。随着热源温度降低，热泵经济性会变得更高，原因是相应 MVR 循环内的蒸汽体积流量会不断增加，从而增大系统的尺寸和成本。此外，在某一点，蒸汽压力变得过低。因此，对密封性能的要求极高，使得热泵成为更好的选择。

归根结底，并没有在某个确定的温度临界点上一种技术明显优于另外一种技术。选择时需要考虑多种不同因素。西门子能源对这两种选择进行了深入评估，以确定最佳循环配置。当然，最终依然取决于客户在初始投资、运营支出、占地面积、交货时间、复杂程度以及环境和安全方面的要求。

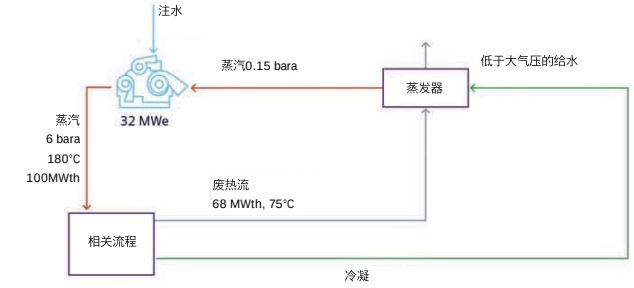


图 4. 机械蒸汽再压缩 (MVR) 循环

参考资料

1. WEST, K. and BELLEVRAT, E., 'Clean and efficient heat for industry', International Energy Agency (IEA), (23 January 2018), https://www.iea.org/commentaries/clean-and-efficient-heat-for-industry.
2. 'Waste Heat Recovery Resource', US Department of Energy (DOE), (24 January 2017), https://www.energy.gov/eere/amo/articles/waste-heat-recovery-resource-page#:~:text=It%20is%20estimated%20that%20between,equipment%20surfaces%20and%20heated%20products.