

变废热为温暖

每天都有不少能源从隧道、工厂甚至下水道中悄然流失，大多未被察觉。如今，新技术正设法回收这些隐藏的热能，将昨日的废热转化为今日的温暖。借助耐用的含钼不锈钢材料，这些系统能够从最意想不到的地方安全地回收能源，无需额外燃烧一滴燃料，即可为家庭供暖并提升供热效率。

室内供热极其耗能，也是温室气体排放的主要来源之一。根据国际能源署（IEA）2022年的一份报告，建筑所消耗的能源中，近一半用于空间供暖和生活热水。这种巨大的能源需求，促使人们在空气、水体和各类废物流中寻找未被开发利用的热源。得益于现代热交换器与热泵技术，即使微小的温差也能被转化为可用的热能，从而为能源利用开辟了全新可能。

热量传递

热交换器能在两种流体（液体或气体）之间传递热能，两种流体不发生混合——热量通过其薄壁金属传导，而流体始终保持分离。简单来说，一种流体被加热，另一种流体则被冷却。

热泵在此基础上更进一步：它利用一个封闭的制冷剂循环系统和两个热交换器，从环境中（如室外空气、地表水或地下土壤）吸收热量，再将其转移到需要供暖的空间。制冷剂是一种低温下即可蒸发的流体，在一个

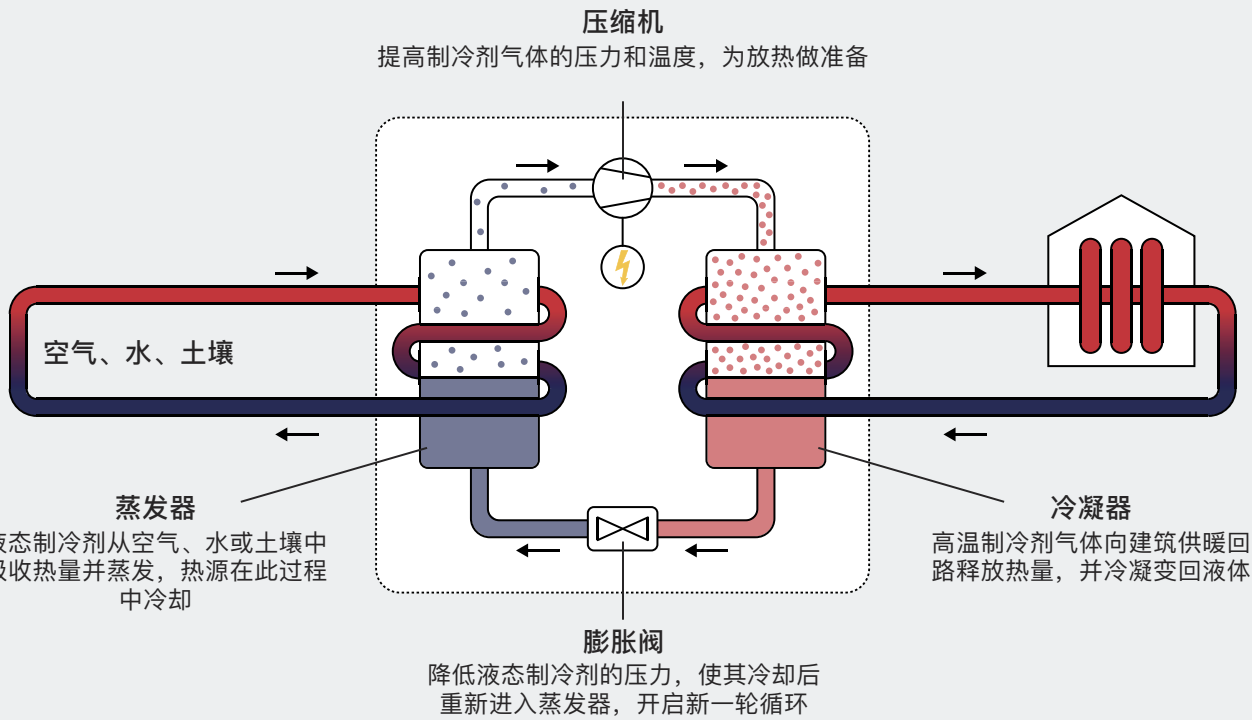
换热器中吸收热量，再在另一个换热器中释放热量。本质上，热泵的工作原理像一台“反向运行的冰箱”：它并非通过移除热量来制冷，而是捕获周围环境中的热量，并将其集中到需要的地方。

在这套能量转换系统背后，是严苛的运行环境——要求材料必须日复一日地抵抗高温、潮湿和腐蚀。不锈钢正是理想之选。根据系统不同部位的温度、介质和工况，可选用从标准牌号到更高耐蚀性的不锈钢牌号如含钼2%的316不锈钢或含钼6%的超级奥氏体不锈钢。钼的添加显著提高了材料的抗腐蚀性能，尤其在高温、潮湿或化学腐蚀性强的环境中表现突出。

在废热回收系统中，腐蚀可能源于与潮湿废气、废水或其他腐蚀性介质的接触：废气若冷却至露点以下时，会形成酸性冷凝物；而废水中可能含有氯化物、硫化物或有机化合物，长期侵蚀金属表面。在封闭的热泵回路中，材料必须承受高压、温度波动以及偶尔的潮湿环境影响。含钼不锈钢能够形成稳定且可自我修复的钝化膜，有效抵御这些恶劣条件，确保在空气、水和热量持续相互作用的环境中，仍拥有长久的使用寿命。

热泵的工作原理

热泵以封闭循环方式工作，包含四个主要部件：蒸发器、压缩机、冷凝器和膨胀阀。大多数热泵中，作为热交换器的蒸发器与冷凝器均采用不锈钢制造，具体牌号的选择根据所接触的流体和各环节的运行工况来确定。



地铁的余热利用

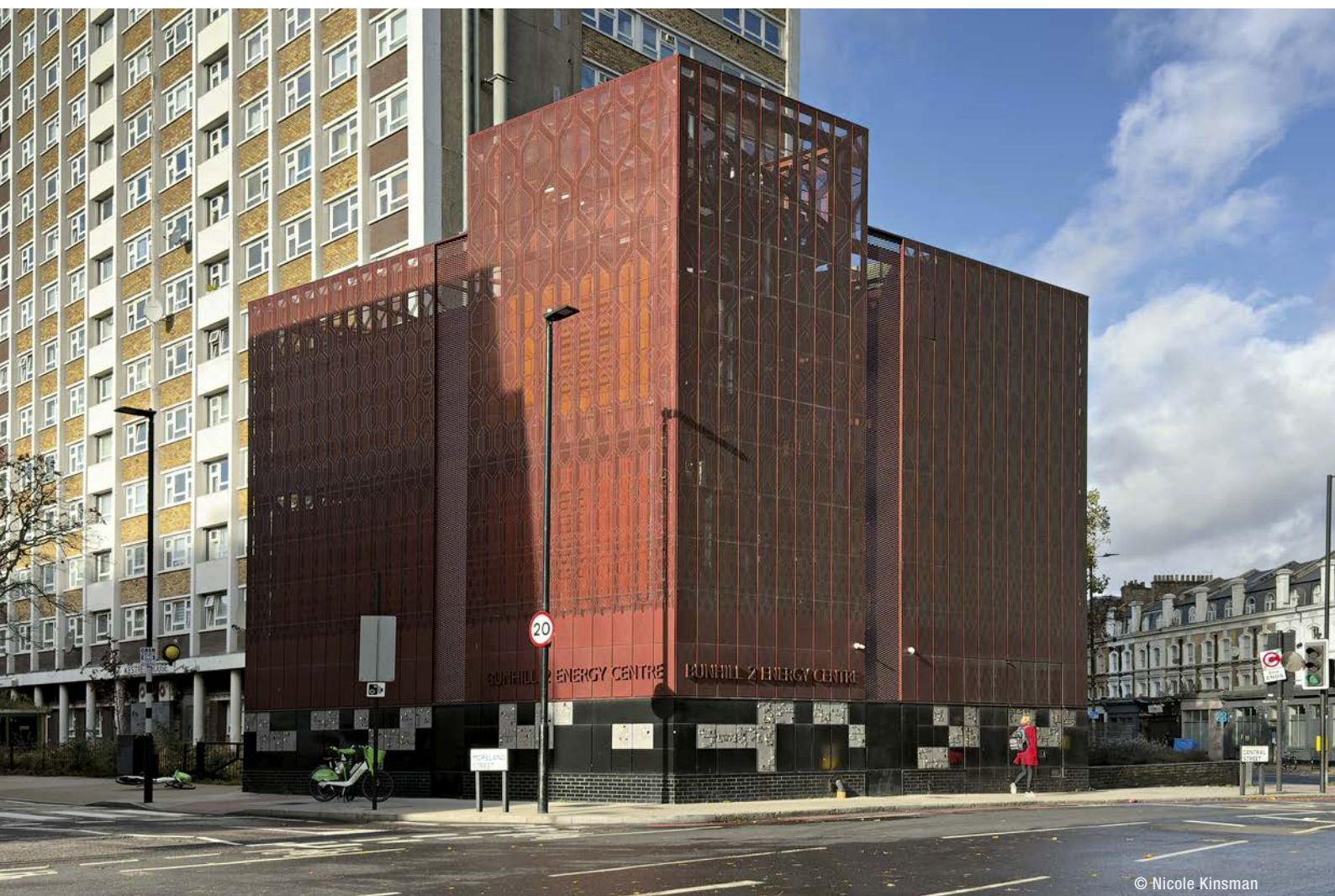
伦敦地铁以“闷热”闻名。列车运行、刹车系统和机械设备产生的热气在隧道中不断积聚。如今，邦希尔2号能源中心（Bunhill 2 Energy Centre）打造了一套创新系统来捕获这些隧道热能，并将其接入区域供热管网，服务于伊斯灵顿区的社区。

一台宽度达两米的风扇通过通风井，从伦敦地铁北线隧道中抽取热空气。热空气流经一个充满水的换热器，将热量从空气传递至水中。为增加空气与金属的接触面，换热器的冷却盘管采用了不锈钢翅片设计，使热空气（导热性相对较差）的热量最大限度地向循环水传递。空气温度从约 24℃ 降至 14℃ 后被排向外部，而水的温度则从 8℃ 升至 13℃，随后流入氨热泵系统。



伦敦地铁隧道中的热空气如今被回收，作为地上供暖的热源加以利用

伦敦伊斯灵顿区的邦希尔2号能源中心，其红色金属外壳之下隐藏着先进的余热回收技术，这座功能性基础设施不仅为人们带来温暖，更塑造了社区的独特身份。



该系统选用氨作为制冷剂，因其效率高，尤其适合将水温提升至 70℃ 以上以满足伊斯灵顿区老旧建筑的供热需求。与许多常见制冷剂不同，氨对环境友好，全球变暖潜能值为零，且不会破坏臭氧层。热泵由现场的两台燃气热电联产（CHP）机组供电，这些机组同时也为区域供热管网输送热能，从管网回流的 55℃ 温水进入热泵后，被重新加热至 75℃，再循环输送至居民家中。

在夏季，当室外气温高于隧道内空气温度时，风机可反转运行，将经系统冷却后的空气送入地铁隧道，起到降温作用。

邦希尔 2 号能源中心的蒸发器采用 316 不锈钢制造，而冷凝器则使用钼含量 6% 的不锈钢。6% 钼不锈钢在严苛工况下兼具高强度和优异的耐腐蚀性能——能够承受 60 巴压力、较高温度以及伦敦城市自来水中超过 50 ppm 的氯离子含量。

与燃油或燃气供暖系统相比，该系统每年可减少约 500 吨二氧化碳排放。更值得关注的是，接入该供热管网的居民，其供暖费用比其他社区供热系统低约 10%，而社区供热本身的成本仅为独立家庭供暖系统的一半左右。

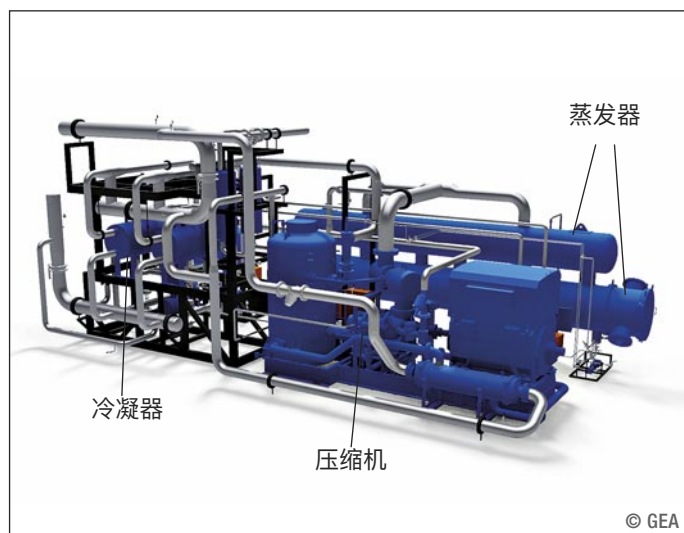
该项目也凸显了伦敦尚未开发的能源潜力：大伦敦市政府估计，废热有望满足该市 38% 的供暖需求。邦希尔 2 号能源中心具有开创性意义，为全球高人口密度城市实现供暖脱碳提供了切实可行的范本。

马尔默的全域热回收

瑞典第三大城市马尔默，是全球少数真正全市范围实行区域供暖的城市之一。这座海滨城市约 90% 的供热通过一个覆盖全市和邻近布勒市的供热系统提供。其中大部分热能直接来自垃圾焚烧、废水处理和其他工业流程的余热回收以及可再生能源，仅在最冷的日子里才会少量使用化石燃料。这种一体化供热系统能够高效地为马尔默大多数建筑供热，同时持续减少碳排放。

垃圾变能源

马尔默和布勒市 60% 的供热来自该市的垃圾焚烧厂，利用原本会被废弃的垃圾焚烧热能。除了垃圾焚烧直接产生的热能，系统还从烟气中回收余热。为改善空



▶ 马尔默安装的氨热泵 3D 模型

气质量，烟气需经过净化处理，去除含氯化物和其他腐蚀性化合物的高温酸性冷凝液等有害物质。由 6% 钼不锈钢制成的一系列板式换热器，将冷凝过程中的热能导入区域供暖系统。不锈钢的高钼含量确保了设备在烟气冷凝液造成的强腐蚀环境中仍能长期可靠地运行。

多种热源协同利用

垃圾焚烧厂的余热回收系统还与另一套“气味浓烈”的设施马尔默的污水与废水处理系统协同运作。经处理后的出水温度通常在 12℃ 至 18℃ 之间，显著高于地表水温。四台大型热泵回收这部分热能，用来预热区域供热的循环水，之后再由垃圾焚烧系统将其加热至最终使用温度。这些热泵为系统内 10 万户家庭提供的热能占总热能需求的 8%，自 2017 年启动以来，每年减少约 5 万吨二氧化碳排放。

污水热泵的蒸发器和冷凝器均采用 316 不锈钢制造，其钼含量为 2%，能够抵御处理后的废水中氯化物、生物化合物的腐蚀以及冷凝器侧较高的温度和压力环境。

综上所述，这些技术展示了城市如何将废弃物转化为热能。实现可持续供暖的答案，或许不在于烧更多燃料，而是蕴藏在垃圾或废水中。这些富有创意的区域供暖网系统证明，依托合适的基础设施和材料，城市与工业废热几乎可以永久回收利用。钼确保了即使是最“脏”的热源，也能被回收、输送并再利用，为更清洁的未来贡献力量。(Nicole Kinsman)