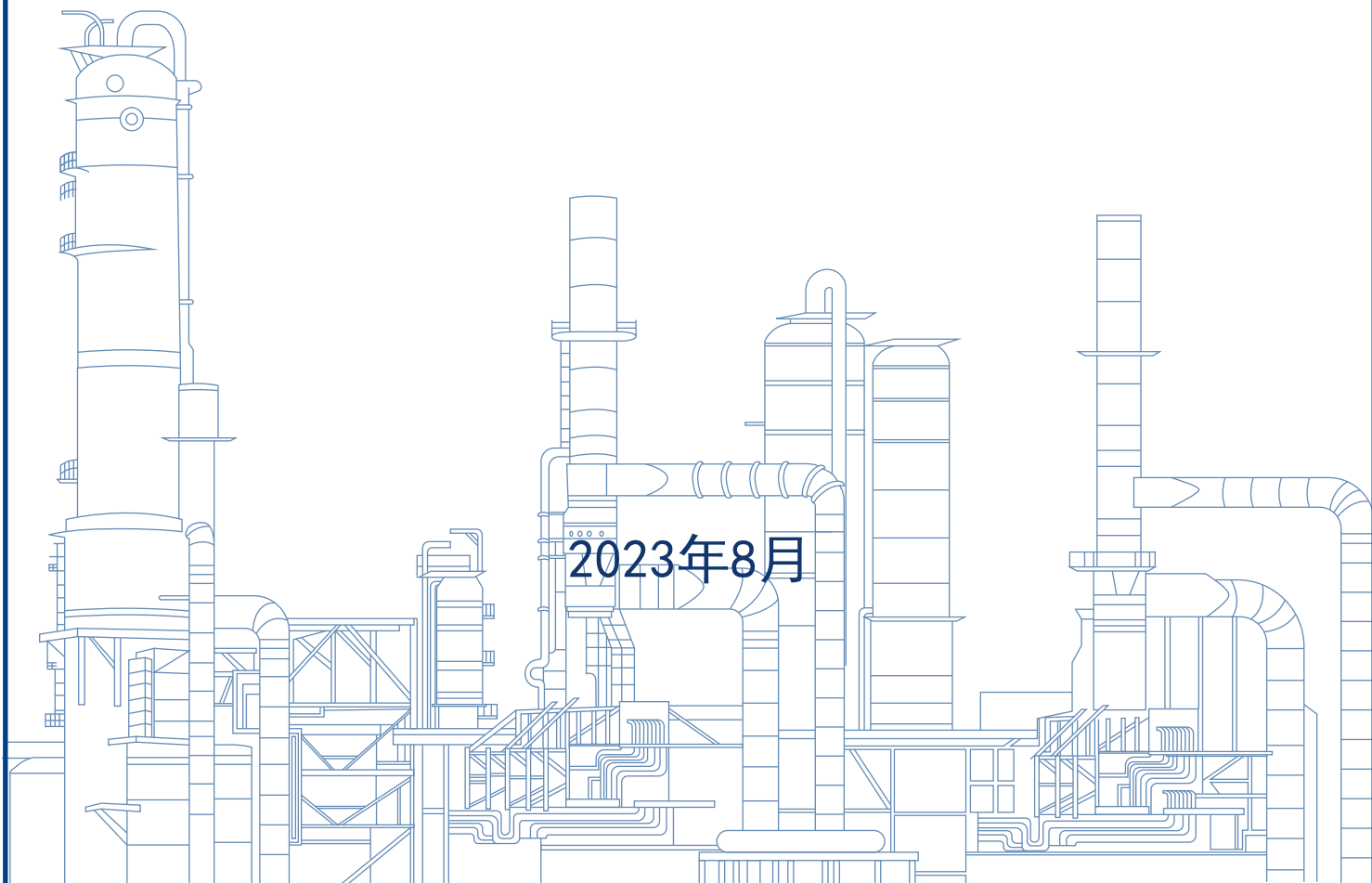


工业热泵发展白皮书 (2023)



中国节能协会热泵专业委员会
Heat Pump Committee of China Energy Conservation Association

2023年8月



主编单位

中国节能协会热泵专业委员会

主要参编单位

上海交通大学制冷与低温工程研究所
上海诺通新能源科技有限公司
艾默生环境优化技术（苏州）有限公司
重庆美的通用制冷设备有限公司
珠海格力电器有限公司
霍尼韦尔（中国）有限公司
东方电气集团东方电机有限公司
江森自控日立万宝压缩机（广州）有限公司

参编单位

德国国际合作机构（GIZ）
青岛海尔空调电子有限公司
福建雪人股份有限公司
上海复洁环保科技股份有限公司
苏州英华特涡旋技术股份有限公司
安徽新沪屏蔽泵有限责任公司
北京四季通能源科技有限公司
河北博志热能设备有限公司
苏州苏净安发空调有限公司
广东碧涑节能设备有限公司
深圳麦克维尔空调有限公司
易快普（苏州）热能环保设备有限公司
宁波奥克斯电气股份有限公司
广东欧科空调制冷有限公司

技术支持单位

中电联电能替代产业发展促进分会
中国节能协会节能服务产业委员会
中国节能协会冶金工业节能专业委员会
中国节能协会汽车工业节能专业委员会
上海市能效中心
清华大学能源与动力工程系
清华大学山西清洁能源研究院
北京大学能源研究院
中国建筑科学研究院有限公司
中国电力科学研究院有限公司

指导专家组

宋忠奎、王如竹、高屹峰、秦宏波、赵恒谊、杨汉、
骆名文、赵欢欢、蔡超、刘华、郝志、尹玉霞、李凡

主要编写人员

胡斌、蔡宏、祝银海、张川、李效禹、成岭、韩艳春、王永、周宇、
邹冠星、王钰钰、王应明、杨家祥、孙绪宏、柳玉林、林魁、周斌、方伟中、
韩宗美、朱宁、叶小斌、熊丹、巫宗进、彭聪、曹俊杰、王成、李世刚、
吴迪、张希、原真、孟帆、孙小亮、郜学、胡仕平、王水、许海生

序言

2020年9月22日第七十五届联合国大会一般性辩论中，中国国家主席习近平做出中国在2030年前碳达峰（二氧化碳排放达到峰值）、2060年碳中和（温室气体净零排放）的庄严承诺。实现碳中和、重构人与自然和谐关系的重任需要全世界各国精诚合作，在构建人类命运共同体的过程中，中国在全球气候治理中承担重大责任，展现非凡勇气，为世界共同迎战全球气候环境改变注入信心。

目前，工业用热消费占全国热力消费总量的比重超过60%，是我国热力消费的主要领域。我国工业消耗的能源有一半以上以废气和废水的形式转化为余热，其中只有30%被重新利用，这是能源利用效率低下的原因之一；而热泵可以通过对工艺过程中的废热进行回收再利用，从而大大节省能源消耗和相关的二氧化碳排放。随着非化石能源发电所占份额的不断增加，利用电力驱动的工业热泵是实现绿色低、可持续发展的必然选择。

工业热泵的价值在于其通过使用低碳电力减少供热碳排放的能力，和通过提供大规模灵活性支持电力脱碳工作的潜力，以及降低平衡电力系统和在用户端消耗热能的成本。因此，随着可再生能源的普及，工业热泵可以显著实现工业加热和用电终端的脱碳。

工业热泵在众多工业用热部门如农副食品加工、食品制造、酒、饮料和精制茶、纺织、木材加工、造纸、石油与煤炭、设备制造和汽车制造等，都具有广泛的应用前景。

中国节能协会热泵专业委员会、上海交通大学制冷与低温工程研究所、上海诺通新能源科技有限公司，以及本白皮书的参编单位等，这些年为推动工业热泵的政策制定、示范应用、技术发展和产品进步等做了很多工作。在本白皮书中详细介绍了工业热泵的供热和减碳潜力，分析了其投资价值和面临的主要障碍。相信白皮书的发布，将为制定相关政策激励提供有价值的参考，为技术发展和产品进步提供方向，促进工业热泵行业的快速发展壮大。

摘要

我国作为当今世界最大的制造业国家，工业能耗约占社会总能耗的2/3，实现碳中和目标的关键之一在于有效控制工业碳排放。热泵是将环境热能和工业余热回收并用于热能生产的装置，通过这种装置，可以大幅消减能源消耗和相关的碳排放。

白皮书从碳中和背景、工业热泵技术发展、工业热泵经济性分析、工业热泵市场潜力与节能减碳效益、工业热泵应用典型案例和企业发展现状等角度，全面探讨了工业热泵对于工业用热能减碳的巨大价值。

白皮书探讨了工业热泵的关键技术发展：其中系统循环理论已较为成熟，热泵压缩机技术在大流量、大压比及高温升领域不断取得突破，基于自然工质的低GWP工质技术也取得长足进步；基于HFO与HCFO工质的低GWP工质技术开发与商业化还有待进一步加强。

工业热泵在众多用热工业部门如农副食品加工、食品制造、酒、饮料和精制茶、纺织、木材加工、造纸、石油与煤炭、设备制造和汽车制造等，都具有广泛的应用前景。白皮书在对工业冷却水、废热水及乏汽这三类典型的工业余热采用工业热泵进行回收，制备热水、热风或蒸汽，并对标电锅炉或燃气锅炉进行了经济性分析，结果表明采用乏汽源热泵替代电锅炉的投资回收期均小于1年，具有极高的投资价值。

白皮书对工业热泵在我国19个典型用热工业部门的热泵供热潜力进行了预测，考虑200°C以下的热汇温度，基于COP平均值3.275，工业热泵每年可节能51.121亿GJ，在非化石能源发电量分别占比34%、50%、70%的情境下，分别减少3.261、4.018、4.965亿吨二氧化碳排放量。

白皮书还根据国内外工业热泵企业的调研，给出了国内外典型应用案例，内容涵盖了主要的工业领域，具有非常好的示范和引领作用。

最后，白皮书对工业热泵推广应用的主要障碍进行了总结，包括技术(供热行业的密集电气化带来的电网限制)、经济(高投资和安装成本)、监管(缺乏标准和强制性政策)，政策(国内经济形势及国际大环境的不确定性)，以及公众接受问题(工业热泵的普及程度不足)。为推进工业热泵的发展，助力实现碳中和，提供了切实可行的方向。

目 录

序言	1
摘要	2
1 背景	5
1.1 碳中和背景	5
1.2 我国工业能耗现状	5
1.3 工业热泵定义	5
1.4 工业热泵对碳中和的意义	6
1.5 国内外现有政策和法规	6
参考文献	10
2 工业热泵技术与发展	11
2.1 工业热泵系统类型	11
2.2 工业热泵用压缩机	15
2.3 工业热泵用工质	19
2.4 工业热泵用其他设备	24
参考文献	26
3 工业热泵经济性分析	28
3.1 工业冷却水源热泵	29
3.2 废热水源热泵	30
3.3 乏汽源热泵	32
参考文献	36
4 工业热泵市场潜力与节能减碳效益	37
4.1 市场潜力	37
4.2 节能减碳潜力分析	41
4.3 市场障碍	43
参考文献	43
5 工业热泵市场应用与典型案例	45
5.1 农副食品加工业	45
5.2 食品制造业	45
5.3 酒、饮料和精制茶制造业	46

5.4 纺织业	46
5.5 木材加工业	47
5.6 造纸和纸制品业	47
5.7 化学原料和化学制品制造业	48
5.8 汽车制造业	48
5.9 其它	48
5.10 典型案例	49
参考文献	57
6 工业热泵企业现状	59
6.1 中国企业	59
6.2 欧美企业	66
6.3 日本企业	70
6.4 结论	72
参考文献	72
7 结论与展望	73
7.1 总结与结论	73
7.2 建议与展望	74

1 背景

1.1 碳中和背景

自工业革命以来，地球的自然平衡受到前所未有的冲击。碳循环体系首当其冲，碳源和碳汇平衡被打破，大气层中的碳不断累积，引发了世界对全球变暖、海平面上升等后果的思考。面对日益严峻的气候危机挑战，早在2014年11月12日，中美双方在共同发表《中美气候变化联合声明》中便提出了中国2030年左右二氧化碳排放达到峰值且争取尽早达峰的计划；2015年11月30日，中国政府向联合国提交《强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献》报告，正式确定2030年左右二氧化碳排放达到峰值并争取尽早达峰的目标。2020年9月22日第七十五届联合国大会一般性辩论中，中国国家主席习近平做出中国在2030年前碳达峰（二氧化碳排放达到峰值）、2060年碳中和（温室气体净零排放）的庄严承诺，并在气候雄心峰会上进一步宣布，到2030年，中国单位国内生产总值二氧化碳排放将比2005年下降65%以上，非化石能源占一次能源消费比重将达到25%左右，森林蓄积量将比2005年增加60亿立方米，风电、太阳能发电总装机容量将达到12亿千瓦以上。实现碳中和、重构人与自然和谐关系的重任需要全世界各国精诚合作，在构建人类命运共同体的过程中，中国在全球气候治理中承担重大责任，展现非凡勇气，为世界共同迎战全球气候环境改变注入信心。

1.2 我国工业能耗现状

随着发展中国家劳动力廉价优势的显现，传统工业化国家大多已完成其工业生产向发展中国家的转移，工业能耗比重随之大幅降低，而新兴工业化国家的工业能耗占比则显著增加。中国作为当今世界最大的制造业国家，根据国家统计局数据，工业能耗约占社会总能耗的2/3。

目前，工业用热消费是我国热力消费的主要领域。与居民采暖市场明显的季节性不同，工业用热需求呈现为连续性特征，且对蒸汽参数要求较高，蒸汽需求量更大。近年来，随着我国工业的稳步发展，工业用热需求逐年上升。

在工业过程中，尽管不断引入节能措施，大量余热在生产过程中仍以气、液、固形式排放造成散失。在我国，大量的工业能耗以各种形式的余热被直接排放，而这种浪费的能量可以在同一工业场地内用作热源。热泵是将环境热能和工业余热回收并用于热能生产的装置，通过这种装置，可以大幅消减能源消耗和相关的二氧化碳排放。

1.3 工业热泵定义

热泵（Heat Pump）是一种在电能或热能等驱动下，将低温热源的热能转移到高温热源的节能装置，从而为住宅、商业和工农业等提供供热服务。工业热泵是指中、高功率范围内的热泵，主

要可用于工业过程中的热回收和热升级，也可用于工业、商业和多户住宅建筑中的供暖、制冷和空调，以及区域供暖。工业热泵作为一种主动热回收装置，可将工业过程中的废热温度提高到更高的温度，以用于同一过程或其他相邻过程的热需求。因此，当传统的被动热回收不可行时，可以利用热泵促进节能。

1.4 工业热泵对碳中和的意义

为了推动碳中和的实现，需要“五碳并举”。第一，资源增效减碳：达到同样的经济目标，并将能源需求降到最低。第二，能源结构降碳：大幅提升非化石能源比例。第三，地质空间存碳：通过碳捕集利用和封存来减排部分二氧化碳。第四，生态系统固碳：通过各种生态建设手段，巩固和增加二氧化碳的碳汇能力。第五，市场机制融碳：碳市场会通过市场机制来推动各类技术更合理有效地应用。其中，“能源结构降碳”是减碳幅度最大的一个方面，大力促进风光等可再生能源发展、改变产业用能结构等，将推动中国能源结构深度转型。

根据《网易研究局碳中和报告》，2020年全年中国共排放103.76亿吨二氧化碳，其中工业排放占比近50%，排放量达到了51.63亿吨，因此实现碳中和目标的关键在于有效控制工业碳排放。工业部门的脱碳手段包括：(1) 提高工艺效率和利用新工艺来减少最终能源消耗；(2) 余热回收；(3) 使用可再生能源代替化石能源。

我国工业消耗的能源有一半以上以废气和废水的形式转化为余热，其中只有30%被重新利用，这是能源利用效率低下的原因之一；而热泵可以通过对工艺过程中的废热进行再利用，从而大大节省能源消耗和相关的二氧化碳排放。随着可再生能源发电所占份额的不断增加，利用电力驱动的工业热泵是实现更可持续产业的有力选择。更具体地说，热泵的实施既可以显著提高能源效率，也可以吸收可再生能源。

工业热泵的价值在于其通过使用低碳电力减少供暖碳排放的能力，和通过提供大规模灵活性支持电力脱碳工作的潜力，以及降低平衡电力系统和在用户端消耗热能的成本。因此，随着可再生能源的普及，工业热泵可以显著推动热量和电力的脱碳。

1.5 国内外现有政策和法规

热泵技术凭借高效节能、环保安全等优势，受到多地政府的支持与推广，在供暖、生活、热水、烘干、工业等应用领域具有广阔的发展前景。

时间	部门	支持热泵的政策规定
2021年9月26日	中共北京市委办公厅 北京市人民政府办公厅	《关于推进北京城市副中心高质量发展的实施方案》
2021年10月11日	湖北省人民政府办公厅	《湖北省城乡人居环境建设“十四五”规划》
2021年11月27日	甘肃省人民政府办公厅	《甘肃省“十四五”生态环境保护规划》
2021年11月28日	北京市人民政府	《北京市“十四五”时期生态环境保护规划》
2022年1月3日	辽宁省人民政府办公厅	《辽宁省“十四五”生态经济发展规划的通知》
2022年1月6日	天津市人民政府办公厅	《天津市生态环境保护“十四五”规划》
2022年1月10日	重庆市住房和城乡建设委员会	《重庆市绿色建筑“十四五”规划》
2022年1月14日	上海市机关事务管理局	《上海市公共机构绿色低碳循环发展行动方案》
2022年1月14日	新疆维吾尔自治区党委 新疆维吾尔自治区人民政府	《新疆生态环境保护“十四五”规划》
2022年2月8日	内蒙古自治区人民政府办公厅	《内蒙古自治区“十四五”节能规划》
2022年7月7日	工业和信息化部 发展改革委 生态环境部	《工业领域碳达峰实施方案》
2022年10月11日	北京市人民政府	《北京市碳达峰实施方案》
2022年11月2日	江西省工业和信息化厅 江西省发展和改革委员会 江西省生态环境厅	《江西省工业领域碳达峰实施方案》
2022年12月5日	天津市工业和信息化局 天津市发展改革委 天津市生态环境局	《天津市工业领域碳达峰实施方案》
2022年12月9日	上海市经济和信息化委员会 上海市发展和改革委员会 上海市科学技术委员会 上海市生态环境局	《上海市工业领域碳达峰实施方案》
2023年1月16日	国家机关事务管理局	《国管局关于2023年公共机构能源资源节约和生态环境保护工作安排的的通知》

2023年1月17日	江苏省工业和信息化厅 江苏省发展和改革委员会 江苏省生态环境厅	《江苏省工业领域及重点行业碳达峰实施方案》
2023年3月2日	浙江省经济和信息化厅 浙江省发展和改革委员会 浙江省生态环境厅	《浙江省工业领域碳达峰实施方案》
2023年3月22日	河南省工业和信息化厅 河南省发展改革委 河南省生态环境厅	《河南省工业领域碳达峰实施方案》
2023年4月28日	山东省工业和信息化厅 山东省发展和改革委员会 山东省生态环境厅	《山东省工业领域碳达峰工作方案》
2023年5月4日	内蒙古自治区工业和信息化厅 内蒙古自治区发展改革委 内蒙古自治区生态环境厅	《内蒙古自治区工业领域碳达峰实施方案》

1.5.2 国外支持热泵的政策和法规

国家	支持热泵的政策规定
欧盟	<p>SPIRIT 项目</p> <ul style="list-style-type: none"> • 欧盟需要到 2030 年将碳排放量减少 55%，到 2050 年实现碳中和。通过高温热泵实现工业供暖脱碳是最有效的途径之一 • 该项目将运行 3.5 年，其最终目标是使工业热泵到 2030 年能满足 160°C 以下温度的工业热需求。
英国	<ul style="list-style-type: none"> • 提议从 2022 年起，对功率不超过 45 千瓦的热泵提供 4,000 英镑补贴。 • 发布 Clean Heat Grant 2022 政策，帮助小型家庭建筑过渡到低碳供暖系统，总预算 4.5 亿英镑，90,000 户家庭将能够从中申请 5,000 英镑。
荷兰	<ul style="list-style-type: none"> • 提供 1,000-2,500 欧元的家用热泵补贴。 • 新建筑：自 2011 年起禁止使用燃油，自 2016 年起禁止使用化石燃料供热。 • 所有建筑：除少数例外，从 2020 年起禁止使用燃油供热。
挪威	<ul style="list-style-type: none"> • 燃油的税率为 45%，电力的税率为 36%。较高的电力税率促使人们从以前普遍使用的电阻式采暖设备转换为效率更高的热泵； • 将旧的供热系统替换为清洁供热系统的补贴(90%的设备都改为采用热泵)。
瑞典	<ul style="list-style-type: none"> • 采用高碳税，化石气体税(45%)和电力税(39%)激励热泵和集中供暖。 • 热泵安装 ROT 扣税减免政策，安装热泵时，ROT 扣除。根据是岩热、地热、空气或水源热泵，扣除额略有不同。

芬兰	<ul style="list-style-type: none">• 通过减免热泵用户的个人所得税, 返还热泵用户热泵安装(劳务部分)费用的 60%, 最高为 3,000 欧元;• 碳税、石油总税率为 45%, 天然气 43%, 电力 33%。
丹麦	<ul style="list-style-type: none">• 热泵替换燃油设备有相应补贴;• 燃油(50%)、化石气体(56%)、居民用电(70%, 但取暖费减半至 35%) 丹麦 的税率;• 从 2013 年起禁止在新建筑中使用燃油锅炉, 从 2016 年起禁止在现有建筑中新建或更换为燃油锅炉。
法国	<ul style="list-style-type: none">• 节能和可再生能源设备投资成本的税收抵免不超过 30% (或 16,000 欧元), 且这类项目改建的增值税由 10% 降至 5.5%;• 为包括可再生供热技术在内的改造提供最高不超过 30,000 欧元的零利率贷款;• 取消对化石燃料的补贴, 能源税与燃料的碳含量挂钩。燃油的总体税率为 34%, 化石气体为 24%, 电力为 36%;• 根据能效要求, 新建独户住宅不能使用电阻类采暖设备。
爱尔兰	<ul style="list-style-type: none">• 为热泵(和其他可再生能源技术或能效措施)提供高达 30% 的成本补助, 对达到最低能效性能标准的个人住宅提供高达 3,500 欧元的补助。
意大利	<ul style="list-style-type: none">• Ecobonus 2021 政策: 对购买热泵的个人进行所得税减免 65% 热泵费用, 单户建筑最多资助 3 万欧元。
德国	<ul style="list-style-type: none">• 在至少五年房龄的现有建筑中安装热泵, 根据旧供暖的类型, 可以获得 35% 到 50% 的补贴比例。• 住宅建筑中每栋住宅单元最高 60,000 欧元, 非住宅建筑中每栋建筑每平方米净建筑面积最高 1,000 欧元 (最高 1,500 万欧元)。
西班牙	<ul style="list-style-type: none">• 马德里计划提供用于翻新建筑的制冷、制热空调热泵设施的政策补贴, 补贴金额不超过安装成本 50%。

参考文献

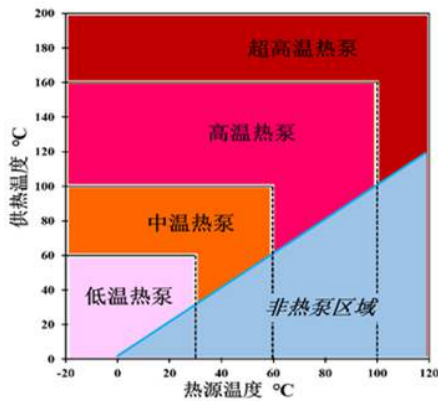
- [1] 国家统计局. 2022年中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- [2] International Energy Agency. Application of Industrial Heat Pumps, Part 1[R]. Sweden: IEA Heat Pump Centre, 2014.
- [3] Hu B, Liu H, Jiang J, et al. Ten megawatt scale vapor compression heat pump for low temperature waste heat recovery: Onsite application research[J]. Energy, 2022, 238: 121699.
- [4] 江亿. 发展热泵技术是实现零碳能源的关键途径,中国电力企业发展, 2021,12-15.
- [5] Wang Y, Wang J, He W. Development of efficient, flexible and affordable heat pumps for supporting heat and power decarbonisation in the UK and beyond: Review and perspectives[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 154: 111747.
- [6] Wang J Y, Wang Z, Zhou D, et al. Key issues and novel optimization approaches of industrial waste heat recovery in district heating systems[J]. Energy, 2019, 188: 116005.
- [7] Chua K J, Chou S K, Yang W M. Advances in heat pump systems: A review[J]. Applied Energy, 2010, 87(12): 3611-3624.
- [8] Zhang J, Zhang H H, He Y L, et al. A comprehensive review on advances and applications of industrial heat pumps based on the practices in China[J]. Applied Energy, 2016, 178: 800-825.
- [9] Marina A, Spoelstra S, Zondag H A, et al. An estimation of the European industrial heat pump market potential[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 139: 110545.
- [10] 杨良就.“碳中和”目标下的欧洲热泵政策[J].上海节能, 2022, No.405(09):1165-1171.
- [11] 杨泽宇, 黎嘉琦. 网易研究局碳中和报告[R]. 网易公司, 2021.

2 工业热泵技术与发展

2.1 工业热泵系统类型

2.1.1 工业热泵的分类

工业热泵是一种极具吸引力的工业用能量转换技术。根据应用要求，使用各种热源，不同工质和热泵的输出温度也不同。在本白皮书中，根据工业应用的温度要求和热泵的进一步发展，将热泵分为四种不同的类型：低温热泵、中温热泵、高温热泵和超高温热泵，如图2-1所示。在该分类方案中，不同类型的热泵严格按照供热温度（ T_{out} ）定义。当供热温度大于 160°C 时，可直接产生饱和温度为 160°C 的高压水蒸汽，用于正常的工业蒸汽工艺，因此这种新的分类方案将 160°C 的输出温度定义为高温热泵和超高温热泵之间的边界。水的正常沸点 100°C 定义为中温热泵和高温热泵之间的边界， 60°C 定义为低温热泵和中温热泵之间的边界。



低温工业热泵： $T_{out} < 60^{\circ}\text{C}$ ；

中温工业热泵： $60 \leq T_{out} < 100^{\circ}\text{C}$ ；

高温工业热泵： $100 \leq T_{out} < 160^{\circ}\text{C}$ ；

超高温工业热泵： $T_{out} \geq 160^{\circ}\text{C}$ 。

图2-1 工业热泵根据供热温度的分类

2.1.2 工业热泵的系统循环

作为最常规的热泵循环，蒸气压缩热泵系统基于逆卡诺循环，并通过理想等熵压缩和等焓膨胀进行了改进。最常见的配置是单级循环，包括原始的单级、带有蒸气喷射或喷射器以改善循环性能的单级循环，以及配有经济器和内部热交换器的单级循环。多级系统采用多个压缩级数，以牺牲机械能消耗为代价，实现更高的输出温度。复叠式热泵系统将两种或更多工作流体的循环耦合起来，以实现更大的温升。混合热泵系统将蒸气压缩热泵与吸收、吸附、太阳能或化学热泵系统等其他热力系统集成在一起。

余热回收热泵系统的典型配置包括单级、多级、复叠热泵和并联热泵。在这些基本配置的基础上，增加了一些有效的改进，如过冷器、中间热交换器、喷射器等，以进一步提高系统效率或降低排气温度。单级热泵是基本配置，具有连接、运行和维护简单的优点。然而，由于压缩比较低，温升受到限制。同时，当用于大规模供热场合时，组件需要定制。带过冷器的单级热泵可以增加供热能力，改善系统性能。安装在蒸发器后的中间热交换器通过吸收冷凝器后过冷液体的热

量，在蒸气进入压缩机之前对其进行预热来提高排气温度，进一步扩大热泵的应用范围。热泵中增加的喷射器可以通过高压蒸气驱动，将低压蒸气提升到中压，降低压缩机的功耗，节省投资。多级压缩式热泵可以大大提高温升，适用于热源和热汇温差较大的场合。中间冷却和蒸气喷射在降低排气温度方面表现良好，不仅确保了压缩机的安全运行，还降低了压缩机的功耗。通过组合使用不同工质的两个热泵系统，复叠热泵也可以实现更高的温升，其系统性能受工质匹配和中间热交换效率的影响。

2.1.2.1 热水（热风）制备

在加热、洗涤、消毒和干燥等过程中需要大量热水或热风，其通常由锅炉、燃烧器或电加热器制备，工艺过程中产生的余热通过冷却塔排放。

热水或热风也可以通过热泵来制备，根据温升不同，制备过程可以采用单级压缩或复叠压缩等系统循环方式，在一些热源温度较低的场合也可以采用跨临界（CO₂）循环。

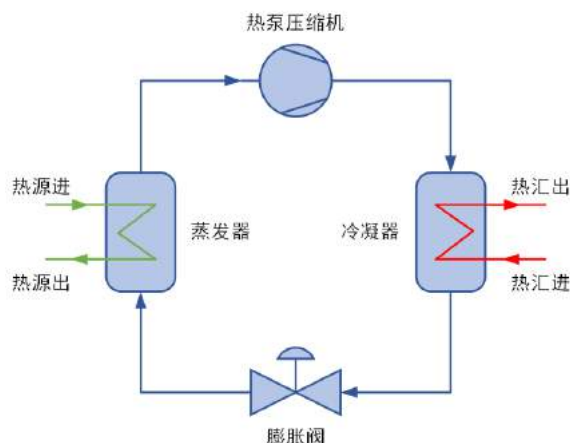


图2-2 单级压缩循环流程图

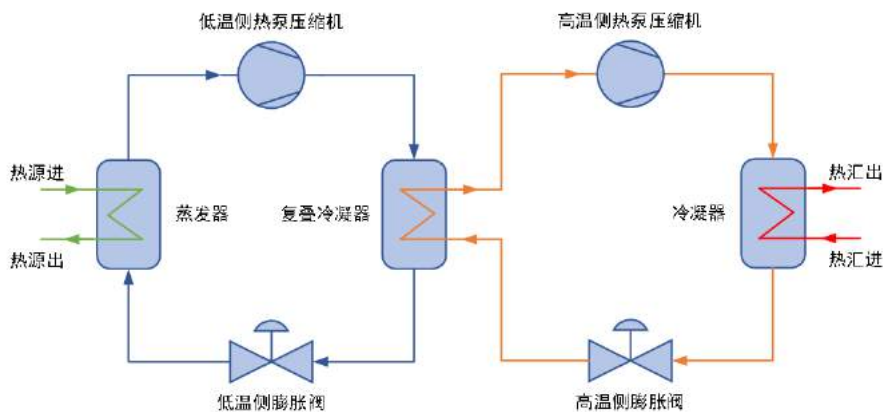


图2-3 复叠循环流程图

亚临界热泵循环的温度上限由工质的临界温度决定。必须保持与所需冷凝温度之间约10-15K的温差，以确保亚临界热泵运行。冷凝温度越接近临界点，冷凝焓和COP（性能系数）越小。跨临界或超临界热泵循环适用于二氧化碳。在跨临界循环过程中，传递到汇的热量是敏感的，并且需要较大的温度滑动，这适用于热水（热风）加热。跨临界循环的流程图可参考单级压缩循环。

2.1.2.2 蒸汽制备

水蒸气具有高热容量和传热性能，是一种应用广泛的热载体。与其他加热流体(如热水和空气)相比，蒸汽具有更高的比能量，系统可以采用更合理的流速和管道直径。此外，在冷凝过程中，其潜热可以在恒定温度下使用。

具有巴氏杀菌等应用的工业过程，干燥和蒸馏在100-125°C的温度范围内有热需求。这个温度区间正好是微压蒸汽热泵机组的适用范围。在低温余热回收领域，微压蒸汽热泵机组可回收余热水、乏汽、乏风等余热，来生产微压蒸汽。本报告将制备120°C以下饱和水蒸汽的热泵机组称为微压蒸汽热泵机组。

根据温升不同，微压蒸汽的制备可以采用单级压缩与复叠压缩等配合闪蒸罐的循环方式，这些循环的典型流程见图2-4与图2-5。

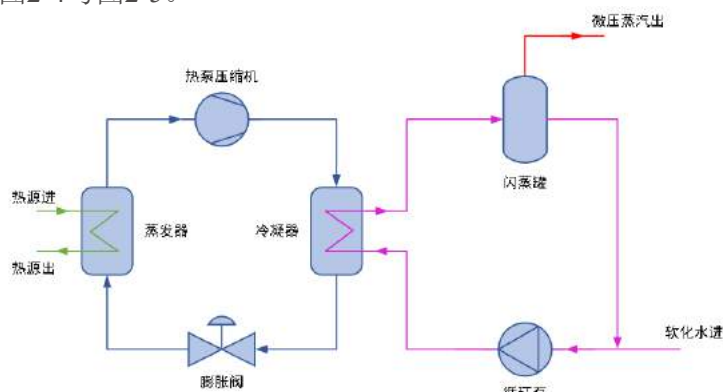


图2-4 单级压缩+闪蒸循环流程图

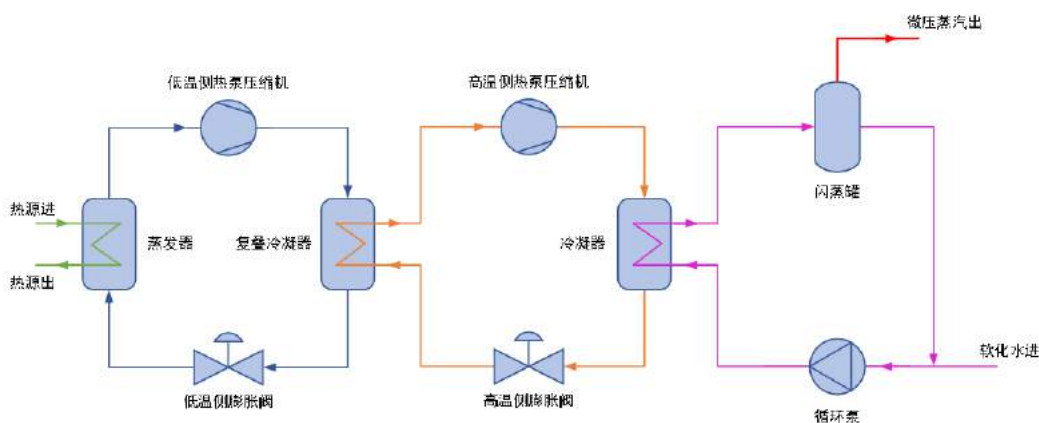


图2-5 复叠压缩+闪蒸循环流程图

当热汇温度 $>120^{\circ}\text{C}$ ，大部分低GWP工质脱离亚临界状态，少数能使用的工质(如R1336mzz(z)与R1234zd(E))由于冷凝温度接近临界温度，冷凝焓和COP较低。在微压蒸汽热泵机组的基础上增加水蒸汽压缩机，可直接对闪蒸罐出口的微压蒸汽进行增压，达到最大 200°C 的蒸汽使用温度。本报告将制备 $120\sim 200^{\circ}\text{C}$ 饱和水蒸汽的热泵机组称为低压蒸汽热泵机组。

在 120°C 到 200°C 的温度区间内，低压蒸汽热泵机组进一步提升了高温热泵的使用范围，可以渗透到过去未能触及的领域如医药与食品的消毒和灭菌、化学行业的分离及纸张行业的烘干等。

低压蒸汽的制备可视温升的不同，可以采用单级压缩与复叠压缩等配合闪蒸罐的循环方式，这些循环的典型流程见图2-6与2-7。

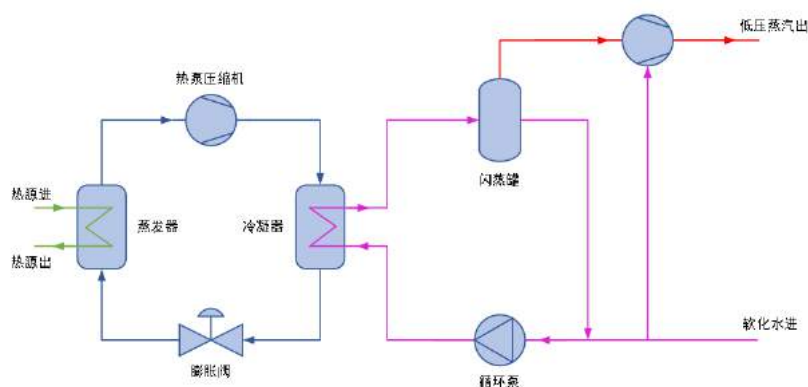


图2-6单级压缩+闪蒸+蒸汽压缩循环流程图

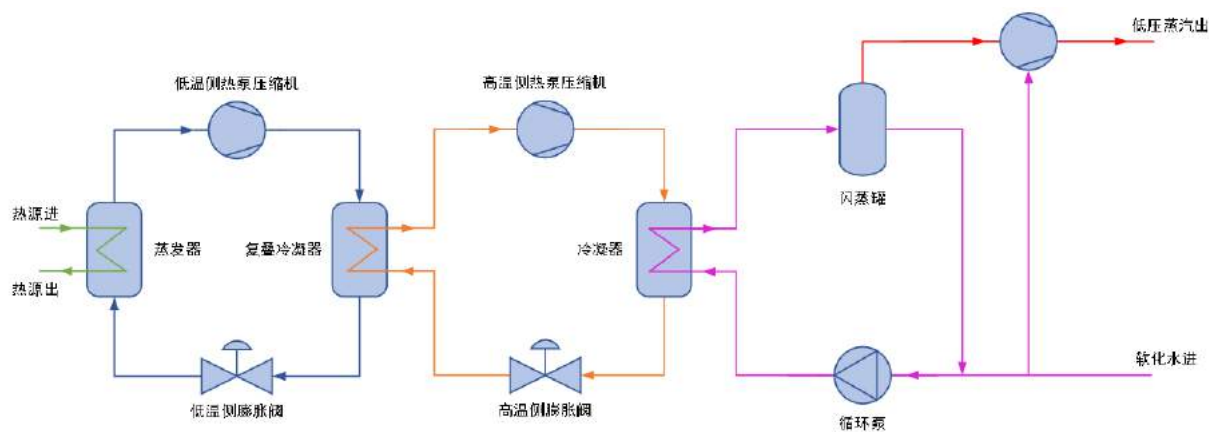


图2-7复叠压缩+闪蒸+蒸汽压缩循环流程图

2.1.3 工业热泵系统循环的发展

工业热泵技术可以成为供应温度低于 100°C 的首选供热技术，目前该技术已十分成熟。对于供应温度在 100°C 和 200°C 之间的技术，当前处于开发和示范应用阶段，而提供更高热汇温度的热泵技术需要进一步研究。示范项目应旨在打破应用障碍，解决大型热泵系统升级和广泛使用的问题。额外的研发活动应侧重于性能改进，并制定向完全可再生的热系统(包括热泵)过渡的能源战略。这些研发项目需要跨行业合作，涵盖从研发到制造和应用的整个范围。

2.1.3.1 跨临界CO₂热泵

跨临界CO₂热泵在上世纪90年代的日本率先商业化，通过采用工作压力超过10MPa的高压往复压缩机，CO₂热泵成功用于民用热水制备，并进一步拓展到工业领域的热风制备，最高热水及热风的温度可达120°C。德国将工艺离心机技术引入跨临界CO₂循环系统，从而实现了大规模冷热电三联储能方案。

由于工艺用往复压缩机的运行压力不低于30MPa，而工艺用离心压缩机的运行压力也不低于20MPa，因此压缩机不会成为制约CO₂热泵的瓶颈。技术难题可能在于CO₂热泵用于工业领域的系统设计与匹配，以达到运行性能与制造成本的最佳平衡。

2.1.3.2 带储能功能的高温热泵

随着可再生能源的发展，电力波动将大大增加。储能系统可以吸收或释放电力，被认为是消除电力波动、提高间歇性电力并网能力的有效技术。热泵与热能存储相结合，提供了全系统的灵活性服务，如负荷转移、调峰和需求侧管理，从而确保在非高峰时段提高多余可再生能源的利用率。热泵提供了利用热能存储系统转移电力负荷的潜力，并可用于需求侧管理策略。它们可以提供需求响应，从而降低系统运行成本，实现调峰和节能。

更重要的是，热泵与热能存储相结合，可以在一定程度上实现大型热泵机组的连续运行，避免了频繁启停机导致的压缩机可靠性问题。而储能功能甚至可以替代热泵机组的调频，实现热泵压缩机在工频下运行，这又对高可靠性的离心热泵压缩机在高温热泵领域拓展应用极为有利。

2.2 工业热泵用压缩机

在蒸气压缩式热泵系统中，各种类型的热泵压缩机是决定系统供热能力的关键部件，对系统的运行性能、噪声、振动、维护和使用寿命等有着直接的影响。相比较民用热泵，工业热泵的热源温度与供热温度范围宽广，热泵系统所采用的工质物性也存在很大的差异，这就决定了采用不同工作温度与不同工质的热泵压缩机有着各自特点。

2.2.1 工业热泵用压缩机的应用现状

2.2.1.1 往复压缩机

往复压缩机作为应用最广泛的一种压缩机，尽管市场份额已经被其它形式的压缩机逐渐压缩，但在小制热量的应用场合仍然占有一席之地，并在小型高温热泵中取得了技术与市场的突破。Viking与AVLSchrick联合开发的HeatBooster工业热泵，其核心设备是一台往复式热泵压缩机，在半程维护之前，该压缩机可在高达200°C的温度下工作40000小时。

2.2.1.2 涡旋压缩机

涡旋压缩机由于具有动力平衡性好、压力波动小以及振动和噪声小等优点，在热泵应用场合中相比较往复式压缩机更具有优势。利用涡旋式热泵压缩机在空气源热泵中制备80°C热水的稳定性已经在诸多应用场景中得到了验证，并且得到了商业化。达到120°C热汇温度的涡旋热泵压缩机样机已经由Emerson成功开发并投入了示范运行。AlterECO项目中设计了一台能够在140°C冷凝温度和200kW热输出下运行的高温热泵，热泵由两台功率分别为75kW的并联涡旋压缩机运行，并经过1000多小时的试验来验证了其可靠性。英华特针对高温烘干应用开发了15-25HP的涡旋热泵压缩机，具有以下特点：(1) R515B工质应用，极低GWP值更环保；(2) 高冷凝温度,可满足80-100°C应用区间需求；(3) 大制热能力可满足更多商业、工业应用场景；(4) 外置电气保护模块，自带相序、缺相、过热多种安全保障。

2.2.1.3 滚动转子压缩机

滚动转子压缩机依靠气缸中偏心圆筒形转子的滚动减小内部容积，实现对气体的有效压缩，具有结构简单、体积小、易损件少、可靠性高等优点，主要用于空调/热泵、轻商冷冻冷藏等领域。

在热泵领域，滚动转子压缩机主要用于CO₂工质，采用双级压缩的方式来实现效率高、振动低和噪声小。大金工业有限公司从2002年开始开发用于CO₂热泵热水器和汽车空调的高性能和可靠性的滚动转子压缩机，GMCC美芝从2006年已经开始CO₂滚动转子压缩机研发工作。

2.2.1.4 罗茨压缩机

罗茨压缩机作为最早问世的旋转压缩机，19世纪中叶就开始在市场上获得应用，由于结构简单、制造成本低，逐渐在蒸汽压缩领域获得应用。由于罗茨蒸汽压缩机齿型为直齿设计，没有扭转角，因此没有内压缩过程，效率随着压比上升急剧下降，主要用于中小流量、温升10~15°C的MVR装置，在一些温升超过15°C的场合，也有双级罗茨蒸汽压缩机的应用。随着国家对节能的日益重视，罗茨压缩机在空气动力行业逐渐被螺杆压缩机与离心压缩机所替代，在蒸汽压缩行业也呈现这样的趋势。为了提高罗茨蒸汽压缩机的效率，国外制造商（如凯撒）开始往高速方向发展，除了要解决轴承与轴封的可靠性问题，更大的瓶颈在于罗茨蒸汽压缩机的排气噪声的控制。

2.2.1.5 单螺杆压缩机

单螺杆压缩机除了具有回转压缩机的结构简单、体积小和无气阀组件等特点外，还因为两个星轮在螺杆两侧对称配置而具备独特优点：(1) 结构合理，具有理想的力平衡性；(2) 单机容量大，

无余隙容积；(3) 高速轻载，易于建立流体动力润滑。单螺杆压缩机的主要缺点是中、高频率的噪声较大，啮合副与机壳的几何形状和相互位置精度要求高。

不同于双螺杆压缩机，单螺杆压缩机不存在同步齿轮结构，因此转子与星轮需要良好的润滑来减少直接接触带来的磨损，这就意味着单螺杆压缩机主要用于喷油压缩。

欧适能制造的高温热泵采用了单螺杆压缩机，热汇温度为95-130°C。废热来自温度为35-55°C（一级经济器循环）或8-25°C（两级复叠循环）的热源。单机供热能力为170-750kW，通过多台机器并联可以实现更高的容量，例如1.5MW的双机组。

StarRefrigeration的热泵（Neatpump）可以产生高达90°C的热水，加热能力从380-2600kW。采用特殊铸钢设计的Vilter单螺杆压缩机技术（VSSH系列）可承受高达76bar的压力。在50/90°C时，可实现约4的COP。

2.2.1.6 双螺杆压缩机

双螺杆压缩机由于尺寸小、重量轻和易维护，在诸多工业领域对大型往复压缩机和小型离心压缩机形成了全面挑战，尤其在制冷、空调及热泵应用场合，还具有部分负荷下的良好性能。Ochsner基于双螺杆压缩机制造的工业热泵，热汇温度可以实现130°C，制热量可以达到750kW。

在空气源热泵中，由于环境温度随着季节变换及日夜更替波动较大，空气侧低温级循环的压比会在2~10之间波动，为热泵压缩机带来巨大的挑战，要求热泵压缩机在宽压比变动范围内仍然能维持高效。而双螺杆压缩机由于带有内容积比调节机构，可以根据实际的运行压比调节排气孔口形状，实现压缩机效率的最优化。

双螺杆蒸汽压缩机介入高温（排气温度达到200°C或更高）领域，主要沿用无油双螺杆气体压缩机路线，结构上将以滑动轴承、多道充气碳环密封（或干气密封）来应对高温工况下的技术挑战。

2.2.1.7 离心压缩机

离心压缩机结构简单，运动零件少，且制造精度要求低，具有制造成本低和可靠性高的优点。虽然离心压缩机在部分负荷下具有喘振风险，但在一些工作压力变化范围狭小的场合（如水源热泵）、制热量较大（>1MW）的应用场合中，仍将具有无可比拟的系统总效率与极有竞争力的投资回收期。FriothermAG的Unitop系列工业热泵采用两级离心压缩机实现40-90°C的供热温度，斯德哥尔摩地区的供暖网络采用了大型热泵机组，配备了6台并联的Unitop50FY。上海交通大学与格力空调联合开发的基于离心压缩机的10MW级水源热泵，在30~40°C热源温度与60~70°C热水温度下运行，在供暖季累计12个月的运行中充分验证了离心压缩机的稳定性和可靠性。

离心蒸汽压缩机由于容积流量大，可靠性高，动力平衡性好，是目前蒸汽压缩领域的主要应用机型，目前单级压缩最大温升可达20~25℃，双级压缩最大温升可达40~45℃，而且离心蒸汽压缩机的结构不受排气温度与排气压力限制，因此可以用在罗茨蒸汽压缩机与螺杆蒸汽压缩机所不能胜任的高温工况（可达250℃或更高）。

离心蒸汽压缩机的发展趋势是小型化与多级化，以延伸到更小气量与更大温升的蒸汽压缩工况。从结构上而言，高速电机直驱将是未来的主要发展方向，驱动电机采用磁悬浮轴承或气悬浮轴承将避免齿轮传动所带来的成本增加与效率损失问题。

2.2.2 工业热泵用压缩机的发展

2.2.2.1 大容量半封闭高温热泵压缩机

采用封闭式的结构，把电动机和压缩机连成一整体，装在同一机体内共用一根主轴，因而可以取消开启式压缩机中的轴封装置，避免了由此产生或多或少泄漏的可能性。半封闭压缩机用于制冷循环及常规热泵循环已经成熟，但用于高温热泵仍然受到一些限制。

目前小型半封闭高温压缩机如往复式压缩机与涡旋式压缩机不存在润滑油管理问题，当高温压缩机往大型化发展，螺杆式压缩机必然要面临润滑油管理问题，因为工作副和油必须在高温下兼容，并且必须考虑回油的热回收，由于高排放温度和油的热稳定性，传统的结构受到限制。一种有效的解决方案是采用多级磁悬浮离心压缩机，由于磁悬浮离心压缩机纯无油运行，不存在润滑油管理问题，在压缩机热力学方面显然不存在温度限制。但另一个困难在于高温工况下（如蒸发温度 $>60^{\circ}\text{C}$ ，冷凝温度 $>100^{\circ}\text{C}$ ），半封闭电机散热问题，这需要平衡两个方面：电机冷却造成的热损失与电机过热引起的可靠性下降。

2.2.2.2 高温蒸汽压缩机

在可供选择的低GWP工质中，R1336mzz(Z)由于临界温度达到164.1℃，不易燃且无毒，将高温热泵的热汇温度推向了155℃。当高温热泵热汇温度的目标值是175℃或更高时，采用R718(水)成为目前的最佳选择，这就要求开发高温蒸汽压缩机来适应该要求。综合考虑压缩机的运行原理、结构特点与操作特性，双螺杆蒸汽压缩机与离心蒸汽压缩机成为高温蒸汽压缩机的两个选择。

双螺杆蒸汽压缩机由于允许注水，采用单级压缩可以达到较大的温升($>60^{\circ}\text{C}$)，由于是容积式压缩，采用刚性轴设计，适应变工况能力强，变转速范围宽广。但缺点是在高温工况下水蒸汽经过转子的间隙产生较大的泄漏损失，导致效率偏低。同时高压水蒸汽要求复杂的轴封结构及系统来防止水蒸汽漏入轴承侧污染润滑油，由于其双轴结构配备4套轴封，必然增大了双螺杆蒸汽压缩

机的制造成本。可行的解决方案是提高双螺杆压缩机的运行转速来减少压缩机尺寸，提高压缩机效率，这可以通过采用高速永磁电机直驱来实现。双螺杆蒸汽压缩机在高速、高温下的可靠性问题是下一步需要研究的重要问题。

与双螺杆蒸汽压缩机相比，离心蒸汽压缩机的特点是结构简单，流量大，单轴设计时造价低。缺点是离心蒸汽压缩机作为速度式压缩机，适应变工况能力差，变转速范围狭窄。同时为了控制排气温度及确保一定的压缩效率，单级压缩温升一般不超过18~22°C，导致大温差工况下需要采用两级或多级压缩。据调研，国内市场上已有用于MVC装置的两级和三级离心蒸汽压缩机，温升分别达到35和50°C，可以预见的是，多级压缩不应该成为离心蒸汽压缩机应用于高温热泵的技术障碍。困难在于，在MVC多级离心蒸汽压缩机技术引入高温热泵的过程中，如何使制造成本在批量化生产过程中获得大幅下降。

2.3 工业热泵用工质

高温循环工质是压缩式高温热泵的“血液”，蒸气压缩循环的关键工况点的设计与热泵工质的选型直接相关，而压缩机的选型与设计也需要首先确定热泵工质。热泵工质往往从制冷剂中选取，而制冷剂到目前为止已经经历了近200年的发展，在过去的200年中，由于需求的不同，对制冷剂的选型要求也一直变化。

在高温热泵系统中，对工质的选型要求大多也符合对制冷系统中制冷剂的要求。但是，热泵工质的压力温度工作范围往往更高，对热泵工质的热物理性质要求更好。同时在余热回收中的热泵系统与制冷系统相比，往往具有更高的容量，因而对工质的环保特性和经济性要求相应也会更高。

同时工质与润滑油混合后的热稳定性也是系统设计中需要重点考虑的因素。工质与润滑油混合物的性质将进一步限制压缩机的排气温度，过高的温度有可能引起润滑油和系统其他部件材料的化学分解或焦化。此外，热泵工质需要具有与金属材料或其他化学材料良好的相容性，避免在运行过程中降解。需要相容的常见材料有铝、钢、铜，以及聚合物等。

2.3.1 目前工质的成熟应用

在当前的技术体系中，R134a和R245fa具有相对优异的热力学性能，已经在热泵系统中广泛应用。

2.3.1.1 R134a

R134a的临界温度为101.1°C，对蒸气压缩式热泵而言，当冷凝温度低于70°C时，R134a往往是比较合适的选择。

东京电力公司研制了以R134a为工质的离心式高温热泵，制取130°C的高温高压水及高温空气，用以木材干燥和变压器制造的工艺过程。该系统采用了跨临界多级循环流程，COP 达到3.0，与化石燃料锅炉相比，节省了27%一次能源消耗量，降低CO₂排放量达44%。

瑞士Friothers公司开发了工质为R134a，最高冷凝温度为90°C，制热量范围为2 MW 到20 MW的离心式高温热泵机组。

由于R134a的GWP达到1300，出于环境保护的考虑，已经被各国逐渐限制使用。

2.3.1.2 R245fa

R245fa是工业高温热泵中使用的主要工质，临界温度为154°C，对蒸汽压缩式热泵而言，当冷凝温度低于125°C时，R245a往往是比较合适的选择。R245a具有较高的热稳定性和水解稳定性，但其GWP值为858，很可能在未来几年被淘汰(或降低)。

日本神户制钢所研制的系列蒸汽高温热泵，采用高压缩比高温适用的两级螺杆式压缩机，工质采用高温工质R245fa，热功率380~660kW，冷凝温度可达120°C，COP达到3.2，可对工厂内的温排水实施热回收，适用于食品、药品、轻化工等工业的原料浓缩及干燥等多种工序。

2.3.2 未来工质的发展

工质的选择在蒸汽压缩热泵中起着关键作用。工质的特性不仅决定了蒸汽压缩热泵的性能，还对环境有较大影响。目前，工质选择原则优先考虑其全球变暖潜能(GWP)和臭氧消耗潜能(ODP)，首选ODP值为零和GWP小于150的工质。基于这些要求，纯低GWP(GWP<150) 工质，如天然工质、碳氢化合物(HCs)、低GWP氢氟碳化合物(HFC)、新型氢氟碳化合物(HFO)和氢氯氟烃(HCFOs)，被建议在蒸汽压缩热泵中推广使用。根据工业用热需求和各种蒸汽压缩热泵选项提供的输出温度范围，这些热泵在不同环境下的应用满足30-200°C的输出温度。

天然工质、合成氢氟烃(HFO)和氢氯氟烃(HCFOs)被认为是有望取代HFC的第四代低GWP工质。在高温热泵和有机朗肯循环(ORC)应用中，HFC-245fa的主要替代品是HFO-1366mzz(Z)、HFO-1234ze(Z)、HCFO-1233zd(E)、HCFO-1224yd(Z)以及碳氢化合物HC-601(正戊烷)和HC-600(正丁烷)。

2.3.2.1 HFOs

适用于高温热泵的HFOs工质包括R1336mmz(Z)、R1336mmz (E)、R1234ze (E)和R515B等等。

R1336mmz(Z)具有相对较低的临界压力(29bar), 临界温度为171.3°C, 该工质的安全分类为A1, ODP为零, GWP为2, 大气寿命为22天。它在250°C以下稳定, 因此适用于余热回收工业热泵和有机朗肯循环等应用, 以替代R245fa。其同分异构体R1336mzz(E)的GWP约为18, 临界温度为137.7°C。

R1234ze(E)的临界压力为36.3Bar, 临界温度为109.4°C, 该工质的安全分类为A2L, 大气寿命为16.4天, ODP为零, GWP<1; R515B的临界压力为35.8Bar, 临界温度为108.9°C, 该工质的安全分类为A1, ODP为零, GWP为299。R1234ze(E)和R515B两种工质的热物性非常接近, 基本可以共用相同的系统设计。R1234ze(E)和R515B适用于工业热泵的各种场景, 以替代R134a。尤其在80°C~95°C温度区间, 相比于R134a, R1234ze(E)和R515B的能效优势非常显著, 更好的适用于各种热源需要。

2.3.2.2 HCFOs

适用于高温热泵的HCFOs工质包括R1233zd(E)与R1224yd(Z)。

在可用的HCFOs中, R1233zd(E)被认为是高温热泵的潜在工质。对臭氧层几乎无影响, ODP几乎为0且大气寿命短(6天), GWP为1, 临界温度为166.5°C, 临界压力为36.2bar, 安全分类为A1。尽管R1233zd(E)在高温热泵应用中的实验案例比较少, 但是其在有机朗肯循环(ORC)和离心冷水机组等应用领域大量应用, 基于其在高温应用中具有优异的传热性能和显著的能效优势, 因此适用于余热回收工业热泵、有机朗肯循环和离心冷水机组等应用领域, 以取代R245fa。根据分析, 与经典热泵工质相比, R1233zd(E)可以在COP和VHC之间做出很好的折衷, 它的VHC高(当VHC是唯一标准时, 它是热汇出口温度低于140°C的首选流体), 同时COP也很好, 因此它可能是一种适合的流体, 尤其适用于热源入口温度大于65°C的范围。

HCFO工质R1224yd(Z)是一种A1安全等级的工质, 主要用于透平式制冷机和余热回收热泵。由于ODP(大气寿命为21天)几乎为0, GWP值低于1, R1244yd(Z)对环境的影响很小。其物理性质与R245fa和R1233zd(E)非常接近。此外, 它还与最常用的金属、塑料和弹性体具有良好的相容性, 并且可与合成油(如POE)混溶。

2.3.2.3 天然工质

适合高温热泵的天然工质有水(R718)、二氧化碳(R744)、氨(R717)、碳氢化合物等。

(1) 水(R718)

水工质有以下特殊优点：(1) 水的ODP为零，GWP<1，这意味着水是一种环境友好的工质，未来不会受到限制；(2) 自然界中有大量水，与任何其他种类的工质相比，水是最容易获得和最经济的工质，自来水、经处理的废水或经过粗过滤的河水都可直接用作补给水；(3) 无毒、不易燃、不易爆，不具有其他危险性质；(4) 水的化学性质非常稳定，长期使用不会分解；(5) 与丙烷、氨和二氧化碳相比，水的蒸发潜热和单位质量制热量较大；(6) 水的压差非常小，减少了安全预防措施；(7) 与其他工质相比，水具有较高的理论性能系数(COP)；(8) 以水为工质的系统可以使用直接热交换器进行蒸发和冷凝。

水蒸气作为工质的缺点是其高比容、所需的高压比，以及由此产生的压缩机出口温度高。已经证明，这些技术挑战可以通过专门开发的压缩机来克服，尤其是带有级间冷却器的多级涡轮压缩机。在当今世界，COP高的制冷系统是主要目标，但它并不是决定使用哪种工质的唯一因素。ODP和GWP等环境参数正变得越来越严格。此外，还大量考虑了工质的经济成本和安全性能。就所有这些方面和上述特定操作条件而言，水是最好的工质。

(2) 二氧化碳(R744)

二氧化碳热泵通常采用较小的尺寸。它们也在更大范围内被商业化。尽管低临界温度为31°C，高临界压力为73.6bar，二氧化碳热泵在跨临界循环中也能达到90至120°C的热汇温度。如果热汇的入口温度不远高于临界温度，二氧化碳作为高温热泵流体是可行的。气体冷却器中的高跨临界温度滑移使二氧化碳成为一种特别适用于热源和热汇温差大的场景的工质。

天然工质CO₂是第一代工质之一。在制冷与热泵领域，相比NH₃更安全。同时由于其高流体密度和高工作压力，可以使用更小型的热泵系统。其单位体积制冷量是CFC、HCFC、HFC和HC工质的3-10倍，在制冷循环中显示出巨大优势。对于制热，跨临界循环是使用最广泛的CO₂热泵配置。从二氧化碳的T-s和T-h图可以看出，在接近临界温度时，随着温度的降低，焓和熵急剧下降，提高了气体冷却器的加热性能。然而，CO₂的工作压力几乎是传统工质的5-10倍。所需的高温排放与高压有关，导致更高的压差。此外，巨大的压差导致膨胀过程中不可逆节流损失高，导致COP较低。

(3) 氨(R717)

氨是一种实践良好的工质，具有优异的热力学和传输性能，已广泛应用于加热和冷却系统。在美国，超过95%的工业制冷使用氨气，而且氨气在欧洲也占有很高的市场份额。尽管氨在一定浓度下有毒，但它有明显的刺鼻气味，泄漏时很容易察觉。由于氨(B2L)的毒性，必须采取某些安全预防措施。

由于氨具有较高的体积加热能力，因此在大规模需求中具有竞争优势。因此，体积小的压缩机足以满足相同的供热能力。同时，与其他工质相比，氨的成本更低。氨高温热泵的输出温度受高压特性的限制，例如，97.5°C下的饱和压力为60bar。大多数氨高温热泵的供应温度限制在90°C。最近，压缩机材料的改进使氨压缩机在更高排气温度(约110°C)下的压力增加到76bar成为可能。

(4) 碳氢化合物

碳氢化合物正丁烷(R600)和戊烷(R601)是ODP为零且GWP极低的工质。它们相对便宜，在38.0bar和33.7bar时的临界温度分别为152°C和196.6°C。R600被认为是供热温度为120°C的高温热泵蒸汽发生器的合适介质，该温度可通过成熟压缩机技术来实现。另一方面，由于易燃性高(A3)，必须采取特殊的安全措施，因此HCs一般被建议用于充灌量小的小型系统。根据EN378，实验室设备的HCs最大容量限制为150g，在受监督商业系统可达到2.5kg。

(5) 其它

乙醇是一种在130°C到150°C冷凝温度和80K升程的单级循环中COP最高的工作流体。体积热容量(VHC)是所有分析流体中最小的，这使得压缩机尺寸显著增大，因此意味着部件的采购成本更高。

在假设提升温度为80K的情况下，对于所有考虑的蒸发温度值，乙醇具有最少的火用损。乙醇是唯一一种性能系数随冷凝温度增加而增加的流体。高临界温度和饱和曲线的形状允许该流体在110°C的蒸发温度下达到最大COP。

2.3.3 工质的参考替代路线

对于未来可用的替代工质应当在综合考虑工质本身的性质、热泵系统的节能性、环保性、安全性、经济性等各方面的性质下做出选择。从目前的技术发展状况看，国际上在各个产品领域采用何种替代技术路线仍存在诸多争议，但是更低GWP的工质在全球范围内的应用推广将是必然的趋势。表2-1给出了工业热泵用工质的参考替代路线表。

表2-1 工业热泵用工质参考替代路线表

	常规工质	低 GWP 工质		
		HFOs	HCFOs	自然工质
低温热泵	R134a	R1234ze(E)	/	R290/R717/R744
中温热泵	R134a	R1234ze(E)	R1224yd(Z)	R290/R600/R717/R744
高温热泵	R245fa	R1336mzz(Z)	R1233zd(E)/R1224yd(Z)	R600/R744
超高温热泵	/	/	/	R601/ R718/Ethanol

2.4 工业热泵用其他设备

2.4.1 换热器

换热器又称热交换器，是工业热泵中必不可少的部分。热泵设备的换热器有蒸发器、冷凝器、蒸发-冷凝器、中间冷却器、回热器等，其中蒸发器和冷凝器的换热效率对热泵设备的性能有决定性的影响，故本白皮书仅讨论蒸发器、冷凝器两种换热器。换热器使热量由温度较高的流体传递给温度较低的流体，热泵设备中蒸发器、冷凝器的热量传递方向不同：工质在蒸发器中汽化，从热源吸热，进而在冷凝器中液化，向热汇放热。

根据换热介质不同，工业热泵的换热器的形式有所区别，主要可分为风冷式换热器、水冷式换热器和蒸发式换热器。风冷式换热器的主要代表是翅片管式换热器。水冷式换热器的主要代表是管壳式换热器、板式换热器、套管式换热器。

翅片管式换热器的基本传热元件为翅片管，由基管和翅片组合而成。翅片主要作用为增加换热面积，往往盘绕在盘管表面，通常呈U型以适配壳体。同时，为加快空气流经蒸发器，提高换热效率，换热器往往配有外机风扇。翅片管式换热器具有结构简单、改造灵活、易于加工、适应能力强等优点，是应用最广泛的换热器之一。为了降低能耗与提高换热性能，目前翅片管式换热器技术在朝着开发管翅材料、优化加工工艺、设计新型流程结构等方面发展，旨在提高换热效率，减少所需换热面积。

管壳式换热器由壳体、传热管束、管板、折流板（挡板）和管箱等部件组成。壳体多为圆筒形，内部装有管束，管束两端固定在管板上。进行换热的冷热两种流体，一种在管内流动，称为管程流体；另一种在管外流动，称为壳程流体。为提高管外流体的传热分系数，通常在壳体内安装若干挡板。该换热器结构简单、造价低、流通截面较宽、易于清洗水垢；但传热系数低、占地面积大。

板式换热器由许多金属板片贯叠连接而成，片与片之间采用焊接密封，形成传热板两侧的冷、热流体通道，在流动过程中通过板壁进行热交换。两种流体在流道内呈逆流式换热态势，加之板片表面制成瘤形、波纹形、人字形等等各种形状有利于破坏流体的层流膜层，在低速下产生漩涡，形成旺盛紊流强化了传热作用。板片的各种形状造就了板片间的许多支撑点，使得可以承受3MPa左右压力的换热器板片厚度可减少到0.5mm左右(其板距一般为2~5mm)，使其在相同负荷的情况下，体积仅为壳管式的1/3~1/6，重量只有壳管式的1/2~1/5，所需的工质充注量仅为其1/7。就水的换热而言，在相同负荷同样水速的条件下，传热系数为壳管式传热系数的2~5倍。板式换热器具有体积小、重量轻、传热效率高、可靠性好、工艺过程简单、适合于批量生产的优点，但也存在易堵塞、压力损失较大等缺点。

套管式换热器的核心部分是由两种不同直径的直管套在一起组成的同心套管。换热时一种流体走内管，另一种流体走环隙，内管的壁面为传热面。每一段套管称为一程，程数可根据传热面积要求而增减。套管式换热器的优点是结构简单、耐高压、传热面积可根据需要增减。其缺点是单位传热面积的金属耗量大；套管接头多，检修清洗不方便。此类换热器适用于高温、高压及小流量流体间的换热。

2.4.2 水泵

水泵是整个工业热泵循环系统的动力输配装置，无论在空气源、地源、水源还是余热源热泵中，对系统的能耗、制热效果和用户舒适性都起到影响作用。在工业热泵应用中，水泵主要分为屏蔽泵和离心泵。

屏蔽泵是一种无密封泵，泵和驱动电机都被密封在一个被泵送介质充满的压力容器内，此压力容器只有静密封，并由一个电线组来提供旋转磁场并驱动转子。屏蔽泵具有结构紧凑，振动与噪声较小，泵效率高，无泄漏的特点。屏蔽泵由于的定子与转子间隙很小，所以要求输送的水足够干净，否则可能会堵塞屏蔽间隙，影响泵的冷却与润滑，导致烧坏电机。另外，使用屏蔽泵的系统必须有防冻措施，以保证低温环境下水泵里的水不会发生冻结现象从而影响水泵的启动甚至导致损坏。

离心泵的基本构造包括叶轮、泵体、泵轴、电机、轴承、密封环与填料函等。离心泵在泵壳和吸水管内充满水后启动，电机通过泵轴带动叶轮和水做高速旋转运动，水发生离心运动，被甩向叶轮外缘，经蜗形泵壳的流道流入水泵的压水管路。离心泵的优点包括结构简单紧凑、可高速运行、经久耐用、排液均匀无脉冲等，但是易发生气缚和气蚀现象，应尽量避免。

2.4.3 阀件

工业热泵用阀件主要包括截止阀、电子膨胀阀等。

截止阀，也叫截门，是使用最广泛的一种阀门之一。截止阀闭合时依靠阀杠压力，使阀瓣密封面与阀座密封面紧密贴合，阻止介质流通。它在开闭过程中密封面之间摩擦力小，比较耐用，开启高度不大，制造容易，维修方便，不仅适用于中低压，而且适用于高压。但是其结构长度较大，流体阻力大，长期运行时密封可靠性不强。

电子膨胀阀是一种可按预设程序调节进入装置的工质流量的节流元件。它由步进电机、阀芯、阀体、进出液管等主要部件组成，通过电动机转子的转动，使阀芯下端的锥体部分在阀孔中上下移动，以此改变阀孔的流通面积，起到调节工质流量的作用。在一些负荷变化较剧烈或运行工况范围较宽场合，传统的节流元件（如毛细管、热力膨胀阀等）已不能满足舒适性及节能方面的要求，电子膨胀阀结合压缩机变容量技术已得到越来越广泛的应用。

参考文献

- [1] Broberg Viklund S, Johansson M T. Technologies for utilization of industrial excess heat: Potentials for energy recovery and CO₂ emission reduction[J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 77: 369-379.
- [2] Arpagaus C, Bless F, Uhlmann M, et al. High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials[J]. *Energy*, 2018, 152: 985-1010.
- [3] International Energy Agency. Application of Industrial Heat Pumps, Part 2[R]. Sweden: IEA Heat Pump Centre, 2014.
- [4] Mateu-Royo C, Arpagaus C, Mota-Babiloni A, et al. Advanced high temperature heat pump configurations using low GWP refrigerants for industrial waste heat recovery: A comprehensive study[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 229: 113752.
- [5] Choyu Watanabe Y U, Satoshi Hirano, Takeshi Hikawa. Pioneering Industrial Heat Pump Technology in Japan[C]. 11th IEA Heat Pump Conference, 2014.
- [6] Jiang J T, Hu B, Wang R Z, et al. A review and perspective on industry high-temperature heat pumps[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 161: 112106.
- [7] Hu B, Liu H, Jiang J T, et al. Ten megawatt scale vapor compression heat pump for low temperature waste heat recovery: Onsite application research[J]. *Energy*, 2022, 238: 121699.
- [8] International Energy Agency. Application of Industrial Heat Pumps, Part 1[R]. Sweden: IEA Heat Pump Centre, 2014.
- [9] Bless F, Arpagaus C, Bertsch S S, et al. Theoretical analysis of steam generation methods - Energy, CO₂ emission, and cost analysis[J]. *Energy*, 2017, 129: 114-121.
- [10] Bamigbetan O, Eikevik T M, Nekså P, et al. Theoretical analysis of suitable fluids for high temperature heat pumps up to 125 °C heat delivery[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2018, 92: 185-195.
- [11] Nowak T. Heat Pumps Integrating technologies to decarbonise heating and cooling[M]. 2018.
- [12] Ting Z Y, Hao Z, Lin W, et al. Application and analysis of multi-stage flash vaporization process in steam production in high-temperature heat pump system with large temperature difference[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2022, 133: 123-132.
- [13] 吴业正. 制冷压缩机[M]. 第3版. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [14] 邢子文. 螺杆压缩机——理论、设计及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [15] 束鹏程. 回转压缩机[M]. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- [16] Meroni A, Zühlsdorf B, Elmegaard B, et al. Design of centrifugal compressors for heat pump systems[J]. *Applied Energy*, 2018, 232: 139-156.

- [17] Hu B, Liu H, Wang R Z, et al. A high-efficient centrifugal heat pump with industrial waste heat recovery for district heating[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 125: 359-365.
- [18] Šarevski M N, Šarevski V N. Thermal characteristics of high-temperature R718 heat pumps with turbo compressor thermal vapor recompression[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 117: 355-365.
- [19] Tian Y F, Shen J B, Wang C, et al. Modeling and performance study of a water-injected twin-screw water vapor compressor[J]. International Journal of Refrigeration, 2017, 83: 75-87.
- [20] Hu B, Wu D, Wang R Z. Water vapor compression and its various applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 98: 92-107.
- [21] Wu D, Hu B, Wang R Z. Vapor compression heat pumps with pure Low-GWP refrigerants[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 138: 110571.
- [22] Yan H Z, Wu D, Liang J Y, et al. Selection and validation on low-GWP refrigerants for a water-source heat pump[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 193: 116938.
- [23] Jiang J T, Hu B, Wang R Z, et al. Theoretical performance assessment of low-GWP refrigerant R1233zd(E) applied in high temperature heat pump system[J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 131: 897-908.
- [24] Kilicarslan A, Müller N. A comparative study of water as a refrigerant with some current refrigerants [J]. International Journal of Energy Research, 2005, 29(11): 947-959.
- [25] Mikielwicz D, Wajns J. Performance of the very high-temperature heat pump with low GWP working fluids[J]. Energy, 2019, 182: 460-470.
- [26] 冉晴,崔明辉,刘涛.翅片管式换热器的研究进展[J].区域供热,2022,No.220(05):129-135.
- [27] 郑贤德. 制冷原理与装置[M]. 北京:机械工业出版社,2000.11.

3 工业热泵经济性分析

工业热泵在众多用热工业部门如农副食品加工、食品制造、酒、饮料和精制茶、纺织、木材加工、造纸、石油与煤炭、设备制造和汽车制造等，都具有广泛的应用前景。使用工业热泵需要较大的初投资。为此，白皮书分别对使用化工工业冷却水源、废热水源、乏汽源的工业热泵进行初步的经济性分析。分析按照制备热水(热风)和蒸汽两种情况，并和电锅炉及燃气锅炉进行投资回收期的对比分析。需要说明的是，能源价格和热泵系统初投资，都在动态变化中；本章的热泵设备价格，是根据企业调研，按工业热泵设备量产后的价格估算。

在进行经济性评估时，设定工业电价为0.8元/度，工业燃气价格3.8元/m³，热泵年运行时间为8000小时。投资回收期PBP按下式计算：

$$PBP = \frac{\ln[1 / (1 - C_p r / E_s)]}{\ln(1 + r)}$$

其中C_p为工业热泵总投资，E_s为年净节约费用，r为贴现率(取5%)。

为了便于进行经济性分析，对不同系统类型的工业热泵机组售价进行了预估，见表3-1。

表3-1工业热泵机组预估售价

系统类型	单位售价(元/kW)
单级热泵	1000
复叠热泵	1500
单级热泵+闪蒸	1200
复叠热泵+闪蒸	1700
单级热泵+闪蒸+单级蒸汽压缩	2200
单级热泵+闪蒸+双级蒸汽压缩	2800
复叠热泵+闪蒸+单级蒸汽压缩	2700
复叠热泵+闪蒸+双级蒸汽压缩	3300
单级蒸汽压缩	1000
双级蒸汽压缩	1500

注：表3-1仅作为工业热泵经济性分析的计算依据，不作为采购参考价。

电锅炉、燃气锅炉与工业热泵的相关安装与服务价格见下表2-2。

表3-2电锅炉、燃气锅炉与工业热泵安装与服务价格

	项目安装系数	人工费(万元/年)	维保费用(%)
电锅炉	1.2	5	5
燃气锅炉	2	10	5
工业热泵	2	10	10

3.1 工业冷却水源热泵

工业用水主要包括锅炉用水、工艺用水、清洗用水和冷却用水、污水等。其中用水量最大的是冷却用水，约占工业用水量的百分之九十以上。工业冷却水的供水温度一般为30~32℃，回水温度一般为40~42℃，温差8~12℃，由于工业冷却水循环量大，极其适合作为工业热泵的热源。

3.1.1 制备热水(热风)

利用工业冷却水源热泵制备热水(热风)的性能与经济性见表3-3。

表3-3工业冷却水源热水(热风)热泵性能与经济性分析表

供热温度(℃)	COP	投资回收期(年)		循环类型
		对标电锅炉	对标燃气锅炉	
60	5.28	0.37	0.98	单级热泵
70	4.04	0.40	1.22	
80	3.13	0.44	1.74	
90	3.34	0.73	2.78	复叠热泵
100	2.94	0.77	3.53	
110	2.59	0.84	5.88	
120	2.26	0.94	/	

3.1.2 制备蒸汽

利用工业冷却水源热泵制备蒸汽的性能与经济性见表3-4。

表3-4工业冷却水源蒸汽热泵性能与经济性分析表

供热温度(°C)	COP	投资回收期(年)		循环类型
		对标电锅炉	对标燃气锅炉	
100	2.83	0.84	/	复叠热泵+闪蒸
110	2.49	0.91	/	
120	2.16	1.02	/	
130	2.26	1.66	/	复叠热泵+闪蒸+ 单级蒸汽压缩
140	2.14	1.73	/	
150	2.03	1.80	/	
160	1.99	2.47	/	复叠热泵+闪蒸+ 双级蒸汽压缩
170	1.91	2.61	/	
180	1.83	2.76	/	
190	1.76	2.93	/	
200	1.70	3.11	/	

注：冷却水供水温度30°C，回水温度40°C，蒸发侧与冷凝侧传热温差5°C，热泵压缩机绝热效率80%，低温热泵压缩机工质采用R134a，高温热泵压缩机工质采用R245fa，级间蒸发温度55°C，循环泵扬程3m，循环泵绝热效率70%，蒸汽压缩机绝热效率69%，低压级蒸汽压缩机入口温度100°C，高压级蒸汽压缩机入口温度140°C。

从工业冷却水源热泵的经济性分析情况来看：

(1) 制备热水(热风)：对标电锅炉，所有投资回收期均小于1年，具有极高的投资价值；对标燃气锅炉，热汇温度不超过80°C时，投资回收期不超过3年，具有一定投资价值。

(2) 制备蒸汽：对标电锅炉，所有投资回收期均小于3.2年，具有一定投资价值；对标燃气锅炉，各个情景下均没有投资价值。

3.2 废热水源热泵

废热水主要指工业排出的用于冷却的废水，主要来自发电站、钢铁厂、焦化厂等。为了避免废热水直接排向环境造成热污染，往往需要采用冷却塔对其进行冷却，一方面增大了处理成本，另一方面浪费了大量余热。如果能采用工业热泵对这一部分废水进行回收，将有很好的社会价值与经济价值。

3.1.1 制备热水(热风)

利用废热水源热泵制备热水(热风)的性能与经济性见表3-5。

表3-5废热水源热水(热风)热泵性能与经济性分析表

供热温度(°C)	COP	投资回收期(年)		循环类型
		对标电锅炉	对标燃气锅炉	
100	3.78	0.44	1.31	单级热泵
110	3.07	0.48	1.81	
120	2.50	0.54	3.42	

3.2.2 制备蒸汽

利用废热水源热泵制备蒸汽的性能与经济性见表3-6。

表3-6废热水源蒸汽热泵性能与经济性分析表

供热温度(°C)	COP	投资回收期(年)		循环类型
		对标电锅炉	对标燃气锅炉	
100	3.41	0.52	1.92	单级热泵+闪蒸
110	2.78	0.57	3.02	
120	2.26	0.66	10.70	
130	2.65	1.09	4.38	单级热泵+闪蒸+ 单级蒸汽压缩
140	2.48	1.12	6.29	
150	2.32	1.16	7.57	
160	2.19	1.71	/	单级热泵+闪蒸+ 双级蒸汽压缩
170	2.08	1.74	/	
180	1.99	1.81	/	
190	1.90	1.87	/	
200	1.82	1.93	/	

注：废热水冷却后温度50°C，蒸发侧与冷凝侧传热温差5°C，热泵压缩机绝热效率80%，工质采用R245fa，循环泵扬程3m，循环泵绝热效率70%，蒸汽压缩机绝热效率69%，低压级蒸汽压缩机入口温度100°C，高压级蒸汽压缩机入口温度140°C。

从废热水源热泵的经济性分析情况来看：

(1) 制备热水(热风)：对标电锅炉，所有投资回收期均小于1年，具有极高的投资价值；对标燃气锅炉，所有投资回收期不超过3.5年，具有一定投资价值。

(2) 制备蒸汽：对标电锅炉，所有投资回收期均小于2年，具有极高的投资价值；对标燃气锅炉，仅有制备温度110°C以下的蒸汽，投资回收期不超过3年，具有一定投资价值。

3.3 乏汽源热泵

用汽管道或者设备末端的低压蒸汽因为自身温度、压力无法满足生产工艺需求，往往直接向环境排放，造成能量损失，如果采用蒸汽压缩机对这部分乏汽增压后再利用，将给企业节省大量蒸汽费用。最常见的乏汽源热泵的应用是废水处理行业的MVR装置，MVR技术通过重新利用蒸发系统自身产生的二次蒸汽的能量，来减少对外界能源的需求。

利用废水水源热泵制备蒸汽的性能与经济性见表3-7~表3-16。

3.3.1 进汽温度80°C

表3-7乏汽源蒸汽热泵性能与经济性分析表(进汽温度80°C)

供热温度(°C)	COP	投资回收期(年)		循环类型
		对标电锅炉	对标燃气锅炉	
100	13.17	0.32	0.69	单级蒸汽压缩
110	8.98	0.33	0.76	
120	6.89	0.35	0.83	
130	5.64	0.36	0.91	
140	4.81	0.37	1.00	
150	3.74	0.65	2.00	双级蒸汽压缩
160	3.34	0.67	2.98	
170	3.02	0.69	3.70	
180	2.76	0.71	4.86	
190	2.55	0.73	6.99	
200	2.37	0.75	/	

3.3.2 进汽温度90°C

表3-8乏汽源蒸汽热泵性能与经济性分析表(进汽温度90°C)

供热温度(°C)	COP	投资回收期(年)		循环类型
		对标电锅炉	对标燃气锅炉	
110	12.68	0.32	0.69	单级蒸汽压缩
120	8.52	0.33	0.75	
130	6.45	0.34	0.81	
140	5.22	0.36	0.89	
150	4.40	0.37	0.97	
160	3.85	0.64	2.38	双级蒸汽压缩
170	3.43	0.66	2.84	
180	3.09	0.68	3.5	
190	2.82	0.70	4.52	
200	2.60	0.72	6.31	

3.3.3 进汽温度100°C

表3-9乏汽源蒸汽热泵性能与经济性分析表(进汽温度100°C)

供热温度(°C)	COP	投资回收期(年)		循环类型
		对标电锅炉	对标燃气锅炉	
120	13.03	0.32	0.69	单级蒸汽压缩
130	8.76	0.33	0.74	
140	6.63	0.34	0.80	
150	5.36	0.35	0.87	
160	4.52	0.36	0.95	
170	3.94	0.63	2.32	双级蒸汽压缩
180	3.49	0.65	2.75	
190	3.15	0.67	3.36	
200	2.87	0.69	4.29	

3.3.4 进汽温度110°C

表3-10乏汽源蒸汽热泵性能与经济性分析表(进汽温度110°C)

供热温度(°C)	COP	投资回收期(年)		循环类型
		对标电锅炉	对标燃气锅炉	
130	13.37	0.32	0.68	单级蒸汽压缩
140	8.99	0.33	0.73	
150	6.81	0.34	0.79	
160	5.5	0.35	0.85	
170	4.63	0.36	0.92	
180	4.00	0.67	2.28	双级蒸汽压缩
190	3.54	0.70	2.69	
200	3.19	0.74	3.26	

3.3.5 进汽温度120°C

表3-11乏汽源蒸汽热泵性能与经济性分析表(进汽温度120°C)

供热温度(°C)	COP	投资回收期(年)		循环类型
		对标电锅炉	对标燃气锅炉	
140	13.71	0.32	0.68	单级蒸汽压缩
150	9.22	0.33	0.73	
160	6.98	0.34	0.78	
170	5.64	0.35	0.84	
180	4.75	0.36	0.90	
190	4.05	0.62	1.77	双级蒸汽压缩
200	3.59	0.64	1.92	

3.3.6 进汽温度130°C

表3-12乏汽源蒸汽热泵性能与经济性分析表(进汽温度130°C)

供热温度(°C)	COP	投资回收期(年)		循环类型
		对标电锅炉	对标燃气锅炉	
150	14.05	0.32	0.67	单级蒸汽压缩
160	9.44	0.33	0.72	
170	7.14	0.34	0.77	
180	5.77	0.35	0.82	
190	4.86	0.35	0.88	
200	4.20	0.36	0.95	

3.3.7 进汽温度140°C

表3-13乏汽源蒸汽热泵性能与经济性分析表(进汽温度140°C)

供热温度(°C)	COP	投资回收期(年)		循环类型
		对标电锅炉	对标燃气锅炉	
160	14.37	0.32	0.67	单级蒸汽压缩
170	9.66	0.32	0.71	
180	7.31	0.33	0.76	
190	5.90	0.34	0.81	
200	4.96	0.35	0.7	

3.3.8 进汽温度150°C

表3-14乏汽源蒸汽热泵性能与经济性分析表(进汽温度150°C)

供热温度(°C)	COP	投资回收期(年)		循环类型
		对标电锅炉	对标燃气锅炉	
170	14.69	0.32	0.69	单级蒸汽压缩
180	9.87	0.32	0.74	
190	7.46	0.33	0.80	
200	6.02	0.34	0.87	

3.3.9 进汽温度160°C

表3-15乏汽源蒸汽热泵性能与经济性分析表(进汽温度160°C)

供热温度(°C)	COP	投资回收期(年)		循环类型
		对标电锅炉	对标燃气锅炉	
180	15.00	0.31	0.66	单级蒸汽压缩
190	10.07	0.32	0.70	
200	7.61	0.33	0.74	

3.3.10 进汽温度170°C

表3-16乏汽源蒸汽热泵性能与经济性分析表(进汽温度170°C)

供热温度(°C)	COP	投资回收期(年)		循环类型
		对标电锅炉	对标燃气锅炉	
190	15.30	0.31	0.66	单级蒸汽压缩
200	10.27	0.32	0.70	

注：蒸汽压缩机绝热效率69%。

从乏汽源热泵的经济性分析情况来看：

(1)对标电锅炉：在乏汽温度 $>80^{\circ}\text{C}$ ，热汇温度低于 200°C 的情境下，投资回收期均可小于1年，具有极高的投资价值；

(2)对标燃气锅炉：在乏汽温度 $>80^{\circ}\text{C}$ ，温差小于 60°C 的情境下，投资回收期小于1年，具有极高的投资价值；当温差大于 60°C 、小于 90°C 的情境下，投资回收期小于3年，具有一定投资价值。

参考文献

- [1] Arpagaus C, Bless F, Uhlmann M, Schiffmann J, Bertsch S.S, 2018. High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials. *Energy* 152, 985-1010.
- [2] Sulaiman A.Y, Cotter D.D, Le K.X, Huang M.J, Hewitt N.J, 2022. Thermodynamic analysis of subcritical High-Temperature heat pump using low GWP Refrigerants: A theoretical evaluation. *Energy Conversion and Management*, 268, 116034.
- [3] Kosmadakisa G, Arpagaus C, Neofytou P, Bertsch S, 2020. Techno-economic analysis of high-temperature heat pumps with low-global warming potential refrigerants for upgrading waste heat up to 150°C. *Energy Conversion and Management* 226, 113488.
- [4] Schlossera F, Jesperb M, Vogelsanga J, Walmsleyc T.G, Arpagausd C., Hesselbacha J., 2020. Large-scale heat pumps: Applications, performance, economic feasibility and industrial integration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133, 110219.
- [5] Ommen T, Jensen J.K, Markussen W.B, Reinholdt L, Elmegaard B, 2015. Technical and economic working domains of industrial heat pumps: Part 1-Single stage vapour compression heat pumps. *International journal of refrigeration*, 55, 168-182.

4 工业热泵市场潜力与节能减碳效益

4.1 市场潜力

工业热泵通常需要较大的投资，从投资者角度出发，希望将这项技术首先推广到回收期最短的行业。因此，不管是投资者还是制造商，主要关注的是热量需求最高的工业部门和用途。通过评估每个工业部门的热量需求和应用过程的温度水平，可以估计热泵在工业过程中的理论应用潜力。

根据中国统计年鉴，表4-1 给出了19个典型用热工业部门的能源消耗。

表4-1中国19个典型用热工业部门的能源消耗

序号	工业部门	能源消耗 (百万吨标准煤)	能源消耗 (亿 GJ)
1	农副食品加工	4126	12.077
2	食品制造	2042	5.977
3	酒、饮料和精制茶	1283	3.755
4	纺织	7398	21.654
5	木材加工	1036	3.032
6	造纸	3847	11.260
7	石油与煤炭	32572	95.338
8	化工	53272	155.927
9	医药制造	2179	6.378
10	化学纤维制造	2416	7.072
11	橡胶和塑料制造	4868	14.249
12	非金属矿物制品	33344	97.598
13	黑色金属冶炼	65387	191.388
14	有色金属冶炼	24436	71.524
15	金属制品	6552	19.178
16	通用设备制造	3627	10.616
17	专用设备制造	1884	5.514
18	汽车制造	3663	10.722
19	其它	14523	42.509
	合计	253932	785.768

目前中国没有系统地梳理不同工业行业的用热需求，现有的终端用热数据统计也没有按温度进行拆分，因此中国工业部门的用热温度分布要大量参考欧洲与美国的调研数据，尽管这些调研是针对特定地理区域得出的，但大多数数据被认为代表了世界各地相应的工业子部门。欧洲典型用热工业部门占能源总消耗的比例见表4-2。

表4-2欧洲典型用热工业部门的用热需求比例

	能源消耗(亿 GJ)	用热需求(亿 GJ)	热需求比例(%)
钢铁与有色金属	26.711	13.403	50.18
化工	22.138	12.898	58.26
非金属	14.286	7.947	55.63
造纸	12.930	7.569	58.54
食品	11.353	6.465	56.94
机械	7.411	3.185	42.98
木材	2.712	1.703	62.79
交通工具	3.154	1.419	45.00
纺织与皮革	2.460	0.915	37.18
其它	14.601	6.055	41.47

根据表4-2的用热需求比例，中国的典型用热工业部门的用热需求见图4-1。其中“农副食品加工”、“食品制造”与“酒、饮料和精制茶”参考欧洲的食品部门，“石油与煤炭”、“医药制造”、“化学纤维制造”与“橡胶和塑料制造”参考欧洲的化工部门，“金属制品”、“通用设备制造”与“专用设备制造”参考欧洲的机械部门。

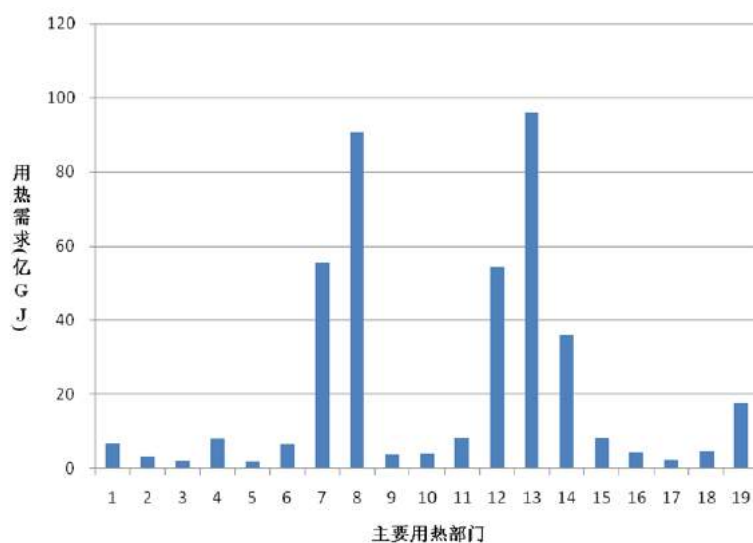


图4-1中国典型用热工业部门的用热需求

欧洲典型用热工业部门的按温度水平划分的用热比例(%)见表4-3。

表4-3欧洲典型用热工业部门的按温度水平划分的用热比例(%)

	<80°C	80~100°C	100~150°C	150~200°C	>200°C
钢铁	9	1.5	3.5	1.5	84.5
化工	12.5	4	5.5	4.5	73.5
有色金属	9.5	1.5	3.5	1.5	84
非金属	6.5	0	13.5	0	80
食品与烟草	37.5	14.5	35	4.5	8.5
造纸	17	22	10	38	13
机械	72	0	8	3.5	16.5
木材	23	62.5	5.5	7	2
交通工具	80.5	1.5	4.5	1.5	12
纺织	58.5	17	24.5	0	0
其它	73	3.5	12.5	2.5	8.5

参考表4-3的欧洲用热需求比例，表4-4与图4-2给出了中国19个典型用热工业部门分温度区间的用热需求估计。可以看到，大量的用热需求集中在>200°C，合计达到280.7亿GJ/年，而这些用热需求目前的热泵技术无法覆盖。

表4-4 中国19个典型用热工业部门按温度水平划分的用热需求(亿GJ)

序号	工业部门	<80°C	80~100°C	100~150°C	150~200°C	>200°C
1	农副食品加工	2.579	0.997	2.407	0.309	0.585
2	食品制造	1.276	0.493	1.191	0.153	0.289
3	酒、饮料和精制茶	0.802	0.310	0.748	0.096	0.182
4	纺织	5.877	1.369	1.972	0.000	0.000
5	木材加工	0.438	1.190	0.105	0.133	0.038
6	造纸	1.121	1.450	0.659	2.505	0.857
7	石油与煤炭	6.943	2.222	3.055	2.499	40.825
8	化工	11.355	3.634	4.996	4.088	66.770
9	医药制造	0.464	0.149	0.204	0.167	2.731
10	化学纤维制造	0.515	0.165	0.227	0.185	3.028
11	橡胶和塑料制造	1.038	0.332	0.457	0.374	6.101
12	非金属矿物制品	3.529	0.000	7.330	0.000	43.435
13	黑色金属冶炼	8.643	1.441	3.361	1.441	81.152
14	有色金属冶炼	3.410	0.538	1.256	0.538	30.148
15	金属制品	5.935	0.000	0.659	0.288	1.360
16	通用设备制造	3.285	0.000	0.365	0.160	0.753
17	专用设备制造	1.706	0.000	0.190	0.083	0.391
18	汽车制造	3.884	0.072	0.217	0.072	0.579
19	其它	12.869	0.617	2.204	0.441	1.498
	合计	75.669	14.979	31.603	13.534	280.723

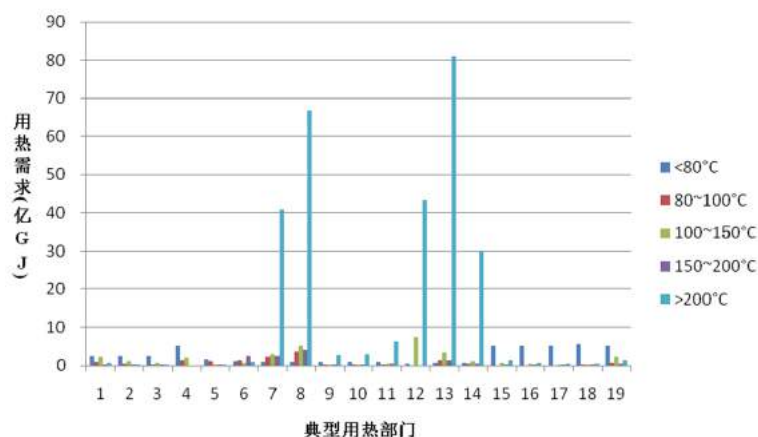


图4-2中国典型用热工业部门的用热需求(全部温度区间)

考虑到钢铁、有色金属与非金属工业大量的低温供热需求可由高温余热直接通过简单的热交换等手段来满足，工业热泵的应用潜力较小，热泵供热需求将有一定幅度的减少，其中：

- (1) 钢铁与有色金属部门的工业热泵占供热需求比重预估为0；
- (2) 非金属加工部门的工业热泵占供热需求比重预估为0.1；
- (3) 石油与煤炭、化工、医药制造、化纤、橡胶部门的工业热泵占供热需求比重预估为0.2；
- (4) 其它部门的工业热泵占供热需求比重预估为0.8。

中国典型用热工业部门的工业热泵供热潜力见表4-5与图4-3。

表4-5 中国19个典型用热工业部门按温度水平划分的热泵供热潜力(亿GJ)

序号	工业部门	<80°C	80~100°C	100~150°C	150~200°C	合计
1	农副食品加工	2.063	0.798	1.925	0.248	5.034
2	食品制造	1.021	0.395	0.953	0.123	2.491
3	酒、饮料和精制茶	0.641	0.248	0.599	0.077	1.565
4	纺织	4.702	1.095	1.578	0.000	7.375
5	木材加工	0.350	0.952	0.084	0.107	1.493
6	造纸	0.896	1.160	0.527	2.004	4.588
7	石油与煤炭	1.389	0.444	0.611	0.500	2.944
8	化工	2.271	0.727	0.999	0.818	4.815
9	医药制造	0.093	0.030	0.041	0.033	0.197
10	化学纤维制造	0.103	0.033	0.045	0.037	0.218
11	橡胶和塑料制造	0.208	0.066	0.091	0.075	0.440
12	非金属矿物制品	0.353	0.000	0.733	0.000	1.086
13	黑色金属冶炼	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
14	有色金属冶炼	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
15	金属制品	4.748	0.000	0.528	0.231	5.506
16	通用设备制造	2.628	0.000	0.292	0.128	3.048
17	专用设备制造	1.365	0.000	0.152	0.066	1.583
18	汽车制造	3.107	0.058	0.174	0.058	3.397
19	其它	10.295	0.494	1.763	0.353	12.904
	合计	36.233	6.499	11.095	4.856	58.683

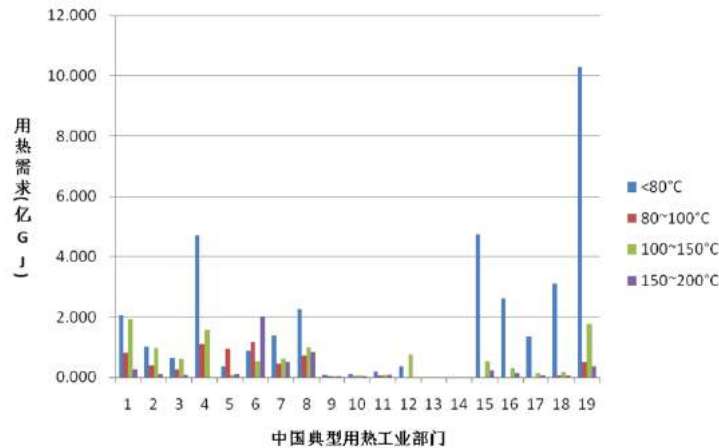


图4-3中国典型用热工业部门的热泵供热潜力

4.2 节能减碳潜力分析

热泵可以通过电力驱动，从低温热源中提取热能，在较高温度下释放，具有优秀的节能效益和重要的减碳意义。以工业燃煤锅炉为参照，工业热泵锅炉的节能计算公式为：

$$S = E / \eta_{\text{coal}} - E / \eta_{\text{HP}} \quad (1)$$

式中，S — 年节能量，GJ；

E — 热泵年供热潜力，GJ；

η_{coal} — 燃煤锅炉效率，85%；

η_{HP} — 热泵效率，即热泵平均COP。按照工业余热平均温度60°C，平均用热温度120°C，平均热力学完善度取0.5，热泵的平均COP在3.275。

以工业燃煤锅炉为参照，工业热泵锅炉的减碳计算公式为：

$$\Delta C = \frac{E \times EF_{\text{coal}}}{\eta_{\text{coal}}} - \frac{E \times EF_{\text{HP}}}{\eta_{\text{HP}}} \quad (2)$$

式中， ΔC — 年减碳量，亿吨CO₂；

EF — 碳排放因子，吨CO₂/GJ。煤炭的碳排放因子取92.5 kgCO₂/GJ，电力的碳排放因子取决于可再生电力占比。

表4-6和图4-4给出了中国19个典型用热工业部门的节能减碳潜力分析表，减碳量考虑了非化石能源发电量占比分别为34%、50%、70%三个占比。2022年，我国非化石能源发电量占比已达到34%以上，随着可再生能源的发展，电力的碳排放因子将进一步降低，热泵的减碳潜力更巨大。

表4-6 中国19个典型用热工业部门节能减碳潜力分析

序号	工业部门	年节能量 (亿 GJ)	年减碳量(亿吨 CO ₂)		
			34%	50%	70%
1	农副食品加工	4.385	0.280	0.345	0.426
2	食品制造	2.170	0.138	0.171	0.211
3	酒、饮料和精制茶	1.363	0.087	0.107	0.132
4	纺织	6.425	0.410	0.505	0.624
5	木材加工	1.301	0.083	0.102	0.126
6	造纸	3.997	0.255	0.314	0.388
7	石油与煤炭	2.565	0.164	0.202	0.249
8	化工	4.194	0.268	0.330	0.407
9	医药制造	0.172	0.011	0.013	0.017
10	化学纤维制造	0.190	0.012	0.015	0.018
11	橡胶和塑料制造	0.383	0.024	0.030	0.037
12	非金属矿物制品	0.946	0.060	0.074	0.092
13	黑色金属冶炼	0.000	0.000	0.000	0.000
14	有色金属冶炼	0.000	0.000	0.000	0.000
15	金属制品	4.796	0.306	0.377	0.466
16	通用设备制造	2.655	0.169	0.209	0.258
17	专用设备制造	1.379	0.088	0.108	0.134
18	汽车制造	2.959	0.189	0.233	0.287
19	其它	11.241	0.717	0.884	1.092
合计		51.121	3.261	4.018	4.965

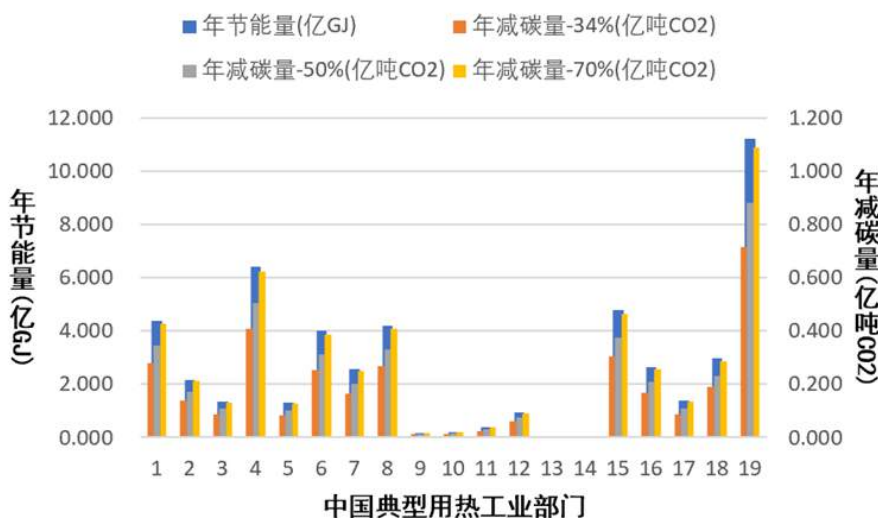


图4-4 中国典型用热工业部门的热泵节能减碳分析

4.3 市场障碍

尽管工业热泵具有巨大的市场潜力，但工业热泵由于缺乏示范项目和培训活动，市场存在较多障碍：

(1) 用户对热源和与热汇可达到的温度及容量缺乏认识，导致针对工业热泵的技术与经济可行性的评价难以启动。

(2) 投资方无法合理评估投资回收期(通常受到初投资成本、年运行时间、电价、气价等多个因素影响)，从而难以作出投资决策。

(3) 制造商缺乏对工业热泵应用过程的了解，定制化的设计导致产品的高制造成本、高安装成本与低可靠性，将进一步拉长了投资回收期。

(4) 广泛采用热泵的一个重要障碍是电网的局限性，这一点尚未得到广泛认可。高温可能会增加高峰期的电力需求，这反过来可能需要额外的电网基础设施投资来满足需求。尤其是冬季供暖季节性用电需求的增加，与冬季水电、光电的季节性削弱正好矛盾。

尽管如此，随着热泵市场的不断增长和供热技术在需求侧的广泛采用，我国的供热电气化稳步发展，那么热泵的成本可能会因为其制造的更大经济性和供应链的改善而降低。在扩大规模的过程中，制造商、供应商、工程师和用户对系统设计、安装、控制和维护的学习也可以极大地提高热泵的现场性能，从而降低运营成本，并可能降低安装和维护成本。

参考文献

- [1] 方豪. 低品位工业余热应用于城镇集中供暖关键问题研究[D].清华大学,2015.
- [2] 张建国.“碳中和”目标下,热泵供热技术前景展望[J].中国能源,2021,43(07):12-18.
- [3] Xu Z Y, Gao J T, Hu B, et al. Multi-criterion comparison of compression and absorption heat pumps for ultra-low grade waste heat recovery[J]. Energy, 2022, 238: 121804.
- [4] Brueckner S, Miró L, Cabeza L F, et al. Methods to estimate the industrial waste heat potential of regions – A categorization and literature review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 38: 164-171.
- [5] Su Z X, Zhang M L, Xu P H, et al. Opportunities and strategies for multigrade waste heat utilization in various industries: A recent review[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 229: 113769.
- [6] Jakobs R M, Stadtländer C. Industrial Heat Pumps, Second Phase[R]. Borås, Sweden, 2020.
- [7] International Energy Agency. Application of Industrial Heat Pumps[R]. Sweden: IEA Heat Pump Centre, 2014.
- [8] Arzbaecher C, Parmenter K, Fouche E. Industrial Waste-Heat Recovery: Benefits and Recent Advance-

ments in Technology and Applications[C]. ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry, 2007.

[9] Jouhara H, Khordehgh N, Almahmoud S, et al. Waste heat recovery technologies and applications[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2018, 6: 268-289.

[10] Firth A, Zhang B, Yang A D. Quantification of global waste heat and its environmental effects[J]. Applied Energy, 2019, 235: 1314-1334.

[11] Arpagaus C, Bless F, Uhlmann M, et al. High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials[J]. Energy, 2018, 152: 985-1010.

[12] Wolf S, Lambauer J, Blesl M, et al. Industrial heat pumps in Germany: Potentials, technological development and market barriers[C]. ECEEE Industrial Summer Study, 2012.

[13] Kosmadakis G. Estimating the potential of industrial (high-temperature) heat pumps for exploiting waste heat in EU industries[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 156: 287-298.

[14] Rehfeldt M, Fleiter T, Toro F. A bottom-up estimation of the heating and cooling demand in European industry[J]. Energy Efficiency, 2018, 11(5): 1057-1082.

[15] Dupont M, Sapora E. The heat recovery potential in the French industry: which opportunities for heat pump systems?[C]. ECEEE 2009 Summer Study, 2009.

[16] 国家统计局. 2021年中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.

5 工业热泵市场应用与典型案例

热泵是一种将外部热源的能量转换为有用热量的电气设备，可用于各种工业部门的供热电气化，被认为是提高间歇性可再生能源利用水平和有效整合的最节能、最环保的技术之一。当热泵利用低温余热，提供给蒸发器侧并实现能量循环流动时，在工业部门的使用受到青睐。这降低了温升，使其达到约40-50°C的合理值，使高效运行成为可能。

通过提供能源或利用废物流作为能源，热泵技术可支持的典型工业包括造纸、食品饮料、化学、汽车、金属、塑料、机械工程、纺织品、木材等。

5.1 农副食品加工业

农副产品加工是指直接以农、林、牧、渔业产品为原料进行的谷物磨制、饲料加工、植物油和制糖加工、屠宰及肉类加工、水产品加工，以及蔬菜、水果和坚果等食品的加工。

农副产品产出以后，进入消费领域以前所进行的一系列再制造活动。收购企业向生产者收购来的农副产品，大多数是未经加工的初级产品，不仅规格、质量很不一致，而且有的农副产品还含有大量的水分和杂质。为便于贮存、调运和销售，就必须通过初步加工来清除杂质、统一规格。特别是鲜活农副产品，只有经过初步加工才能防止霉变、死亡，保持其使用价值。

农副产品加工中蒸汽的一个典型应用是油脂的脱溴。在油脂生产的最后一道工艺，需要将蒸汽直接烹入脱溴塔以消除油脂中的各种异味。蒸汽通过含有异味成分的油脂使汽液表面直接接触，从而达到消除异味的目的。

农副产品根据加工工艺的不同，可以采用热水或热风作为热源，适用于工业热泵的温度多在80~130°C之间。

5.2 食品制造业

食品制造业是指以农副产品为原料通过物理加工或利用酵母发酵的方法制造食品的工业生产部门，包括烘焙食品制造、糖果、巧克力、蜜饯制造、方便食品制造、乳制品制造、罐头食品制造、调味品和发酵制品制造和其他食品制造。

食品制造业中蒸汽的一个典型应用是方便面的生产，面饼油炸之前需要经过蒸煮来确保口感。方便面的蒸煮是经过一个隧道式的蒸箱，蒸汽通过多个喷管直接喷入蒸箱从而与方便面直接接触。

在乳制品制造过程中，采用蒸汽直接喷射加热乳制品灭菌，将预热后的牛奶与蒸汽混合，瞬间加热到135°C，持温数秒后再闪蒸迅速冷却并移除与牛奶混合的蒸汽冷凝水。不但实现了给乳品灭菌以便常温及长时间保存，同时避免影响牛奶的口感。

食品根据加工工艺的不同，可以采用热水或低压蒸汽作为热源，适用于工业热泵的温度多在80~160°C之间。

5.3 酒、饮料和精制茶制造业

酒、饮料和精制茶制造业包括酒的制造、饮料制造和精制茶加工。

白酒生产涉及加热、液化、糖化、蒸馏、干燥、灭菌等工艺，均需消耗大量蒸汽，酿酒生产汽耗占其综合能耗的80%以上。在混蒸白酒生产工艺中，共有三个生产过程：“装甑”、“蒸酒”和“蒸煮”。在“蒸酒”过程中，通过加热利用沸点的差异使酒精从原有的酒液中浓缩分离，冷却后获得高酒精含量酒品的工艺。在正常的大气压下，水的沸点是100℃，酒精的沸点是78.3℃，将酒液加热至两种温度之间时，就会产生大量的含酒精的蒸汽，将这种蒸汽收入管道并进行冷凝，就会与原来的料液分开，从而形成高酒精含量的酒品。

啤酒生产过程中，需消耗蒸汽用于醪液的升温、麦汁煮沸、CIP加热、啤酒瓶清洗及啤酒巴氏杀菌等。啤酒厂的生产线有3个工艺环节，分别为糖化、煮沸和发酵。现有的工艺流程是将煮沸锅产生的115℃饱和蒸汽引入到汽水换热器，将进口温度为78~84℃的麦汁加热至98℃。

碳酸饮料在灌装工艺中，白砂糖需要与水预先进行溶化，再经过85℃持续5min的巴氏杀菌处理。

果蔬汁类及其饮料的制造过程一般是原料经选择、预处理、破碎、榨汁、粗滤、澄清、均质、脱气、浓缩、灌装等工艺。其中预处理、萃取等工序，原料需要经过60℃~80℃的热加工处理，再经过冷却澄清处理至室温，静置沉淀。UHT(超高温瞬时灭菌)是目前果蔬汁饮料采用的主流灭菌工艺，通过将物料加热至130~140℃持续3s~10s来达到杀灭细菌的目的。

茶类饮料的加工主要包括原料处理、浸提、净化、浓缩、干燥、包装等工序。一般浸提茶叶的热水温度采用80~100℃。

酒、饮料和精制茶制造业根据工艺的不同，可以采用热水、热风或低压蒸汽作为热源，适用于工业热泵的温度多在80~180℃之间。

5.4 纺织业

纺织业在我国是一个劳动密集程度高和对外依存度较大的产业，包括棉纺织、化纤、麻纺织、毛纺织、丝绸、纺织品针织行业、印染业等。

印染企业用热水温度为50~100℃，日用水量达300~3000 t/d不等，主要以电厂副产品蒸汽或用燃煤锅炉提供的蒸汽作为热源。余热水温度通常为30~45℃，夏季甚至达到55℃，需要使用冷却塔冷却才能达到排放标准。如果回收利用印染余热制取所需的热水，不仅可节省煤炭等高温能源，而且可提高能源的综合利用率，并且相应地减少CO₂、NO_x、SO_x、粉尘等污染物的排放，保护环境。

印染行业能耗高、耗水量大、污染严重。在印染生产过程中需要大量的热量，因此各种工艺都需要消耗大量的煤、蒸汽和电。煮练、漂白、染色、洗涤过程中排放大量高温废水；干燥和凝固过程中排出高温废气。在印染的不同阶段，废水在不同的温度水平下排放，可达到的最高温度为130℃。在热定型过程中，需要高温蒸汽来完成热定型，废气温度高达160-200℃。如果高温废水直接排放到污水处理厂，过高的废水温度会杀死生化细菌，破坏生化处理程序，从而造成严重的热污染和能源浪费。因此，对中国传统的印染工业进行改造，使废气和废水的余热得到回收，为印染过程提供有用的热量，具有十分重要的意义。此外，作为一种高效的余热回收技术，工业热泵可以应用于印染行业。

纺织业根据工艺的不同，可以采用热水或蒸汽作为热源，适用于工业热泵的温度多在80~160℃之间。

5.5 木材加工业

木材加工，以木材为原料，主要用机械或化学方法进行的加工，其产品仍保持木材的基本特性。在森林工业中，木材加工业和林产化学加工同为森林采伐运输的后续工业，是木材资源综合利用的重要部门。

木材干燥在木材加工企业中，通常是能耗最大的工序，一般占企业能耗的40~70%，木材加工业根据工艺的不同，可以采用热风或蒸汽作为热源，适用于工业热泵的温度多在100~180℃之间。

5.6 造纸和纸制品业

造纸及纸制品制造业是我国的基础原材料工业，近年在国外先进技术和装备的引进下，行业整体技术水平和生产能力提升明显，生产规模不断扩大。从产业链来看，造纸及纸制品制造行业上游主要为废纸、淀粉、煤电能源等行业，下游主要涉及电子、家电、食品、医药、日化、家居等领域。

造纸的生产程序复杂，涉及木材制备，纸浆生产，化学回收，漂白和造纸等各种工艺步骤。造纸工业是能耗较高的行业之一，对于使用商品浆和废纸为主要原料的造纸企业而言，纸机的蒸汽消耗占用总能耗的50%以上。

造纸车间使用蒸汽一般根据设备的耐压要求和干燥曲线决定进造纸车间的蒸汽压力。纸机的烘缸为纸张的主要干燥设备，蒸汽温度最高不超过160℃。涂布机的热风箱为了提高它的干燥效率，故一般采用的蒸汽压力是180℃。淀粉连续蒸煮器对蒸汽的压力也有要求，一般不能低于140℃，否则可能达不到蒸煮温度和淀粉煮不熟。因此造纸工业一般采用140~180℃的饱和蒸汽用于其各种流程。

造纸及纸制品制造业根据工艺的不同，一般采用蒸汽作为热源，适用于工业热泵的温度多在100~180℃之间。

5.7 化学原料和化学制品制造业

化学原料及化学制品制造业是指利用化学工艺生产经济社会所需的各种化学产品的社会生产部门的总称，共包括基础化学原料制造、肥料制造、农药制造、涂料、油墨、颜料及类似产品制造、合成材料制造、专用化学产品制造及日用化学产品制造7个子行业。

化学原料及化学制品制造业在国民经济中占有重要地位，然而也是能量消耗大户。在化学原料及化学制品制造业中，近一半的能量消耗用在分离过程中，最常见且能量消耗最大的分离过程就是精馏操作，其是利用待分离物系中组分的相对挥发性的不同来进行分离的一种典型单元操作。

化学原料及化学制品制造业根据工艺的不同，可以采用热水、热风或蒸汽作为热源，适用于工业热泵的温度多在80~180°C之间。

5.8 汽车制造业

汽车制造业是国民经济的支柱产业之一，其产业链链条长，影响面广，对消费的拉动作用大，在国民经济和社会发展中拥有举足轻重的作用。

汽车整车制造过程主要由总装、冲压、焊接和涂装四大工艺车间构成，而涂装工艺是汽车制造四大工艺环节中能耗最大的环节，其涂装前处理工艺过程中需要消耗大量的热量，而整车厂中空压机运行、焊接工艺车间有大量的工艺余热需要排放，利用余热回收再利用技术及工业高温热泵系统技术回收焊接、空压机运行中的余热作为涂装前处理工艺的热源，可节约大量蒸汽的使用，对汽车涂装节能具有极大的意义。

汽车制造业根据工艺的不同，可以采用热水或蒸汽作为热源，适用于工业热泵的温度多在80~160°C之间。

5.9 其它

除了上述几个典型用热行业外，工业热泵在石油与天然气开采业、石油与煤炭加工业、橡胶和塑料制造业、非金属矿业制造业、金属制品业、装备制造业及一些新兴产业中有大量应用。

5.10 典型案例

5.10.1 国内典型案例

表5-1 国内典型案例（一）

案例信息		工艺流程	现场图片
山东日照红旗现代渔业产业园养殖恒温项目			
行业	渔业		
实施方	中广电器/金利新能源		
制热量	12×217kW		
热汇介质	热水		
热汇温度	40°C		
辽河油田空气源热泵高温机组管输加热应用项目			
行业	石油和天然气		
实施方	沈阳群贺新能源		
制热量	43.2kW		
热汇介质	热水		
热汇温度	75°C		
西北某油田石油加热节能减碳改造项目			
行业	石油和天然气		
实施方	海尔智慧楼宇		
制热量	120kW		
热汇介质	热水		
热汇温度	70°C		
大庆油田新中一污水站-电动离心压缩式热泵机组			
行业	石油和天然气		
实施方	格力电器		
制热量	3×4.8MW		
热汇介质	热水		
热汇温度	75°C		
塔河油田空气源热泵井口原油加热项目			
行业	石油和天然气		
实施方	京科华		
制热量	35kW		
热汇介质	热水		
热汇温度	80°C		

表5-2 国内典型案例（二）



案例信息		工艺流程	现场图片
中石油稠油加热项目			
行业	石油和天然气		
实施方	英华特/苏净		
制热量	400kW		
热汇介质	热风		
热汇温度	75°C		
300吨/天粮食热泵干燥塔			
行业	农副产品加工		
实施方	中科院理化所		
制热量	650kW		
热汇介质	热风		
热汇温度	70°C		
山东郊润食品氨高温热泵 80°C 热水项目			
行业	农副产品加工		
实施方	雪人股份		
制热量	380kW		
热汇介质	热水		
热汇温度	80°C		
宏济堂酒坊高温空气源热泵蒸汽供应项目			
行业	酒、饮料和精制茶		
实施方	上海诺通新能源		
制热量	216kW		
热汇介质	蒸汽		
热汇温度	120°C		
啤酒厂冷热两用热泵节能改造项目			
行业	酒、饮料和精制茶		
实施方	柯茂&维尔利		
制热量	4200/1350kW		
热汇介质	热水		
热汇温度	95/75°C		

表5-3 国内典型案例（三）

案例信息		工艺流程	现场图片
高效分体式烟叶热泵烘干机在河南烟草烤房中的应用			
行业	烟草制品		
实施方	艾默生/青岛海信日立		
制热量	未提供		
热汇介质	热风		
热汇温度	75℃		
襄城热泵烤烟项目			
行业	烟草制品		
实施方	麦克维尔		
制热量	40kW		
热汇介质	热风		
热汇温度	未提供		
四川省凉山彝族自治州会东县烟叶烤房旧改项目			
行业	烟草制品		
实施方	格力电器		
制热量	3×40kW		
热汇介质	热风		
热汇温度	75℃		
安徽黄山胶囊能源站改造项目			
行业	医药制造		
实施方	正刚新能源		
制热量	2100kW		
热汇介质	热水		
热汇温度	85℃		
亳州中药材热泵标准化烘干工厂项目			
行业	医药制造	 <p>1-热泵机组 2-冷凝器 3-循环风机 4-回风阀 5-第一通道 6-第二通道 6-排风阀 7-回风阀 8-新风阀 9-排湿阀 10-进料门 11-检查门 12-加热器 13-干燥室 14-回风室 15-回风室</p>	
实施方	中科院理化所		
制热量	2×28HP		
热汇介质	热风		
热汇温度	70℃		

表5-4 国内典型案例（四）

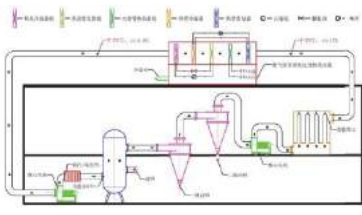

案例信息		工艺流程	现场图片
闪蒸干燥尾气闭路循环改造示范项目			
行业	医药制造		
实施方	中科院理化所		
制热量	4×12HP		
热汇介质	热风		
热汇温度	70°C		
山东昌邑石化有限公司集中供暖项目			
行业	化工		
实施方	美的集团		
制热量	6×5333kW		
热汇介质	热水		
热汇温度	60°C		
四川氯碱化工项目			
行业	化工		
实施方	东方电机		
制热量	900kW		
热汇介质	蒸汽		
热汇温度	150°C		
宁波电镀蒸汽替代项目			
行业	装备制造		
实施方	上海诺通新能源		
制热量	480kW		
热汇介质	蒸汽		
热汇温度	120°C		
苏州工厂磷化线废热回收节能改造项目			
行业	装备制造		
实施方	艾默生/科立德冷链		
制热量	2×56kW		
热汇介质	热水		
热汇温度	120°C		

表5-5 国内典型案例（五）

案例信息		工艺流程	现场图片
高温热水喷涂工艺项目			
行业	装备制造		
实施方	麦克维尔		
制热量	未知		
热汇介质	热水		
热汇温度	80°C		
丹佛斯清洗池高温加热、烘干项目			
行业	装备制造		
实施方	四季通		
制热量	32kW		
热汇介质	热风		
热汇温度	90°C		
无锡振华冷热联供项目			
行业	装备制造		
实施方	苏净安发		
制热量	3×20HP		
热汇介质	热水		
热汇温度	90°C		
高温热泵在转轮除湿机应用的节能项目			
行业	新能源		
实施方	艾默生/瀚润特环保		
制热量	64kW		
热汇介质	未提供		
热汇温度	120°C		
赣锋锂业实验室热源改造项目			
行业	新能源		
实施方	麦克维尔		
制热量	18kW		
热汇介质	热水		
热汇温度	70°C		

表5-6 国内典型案例（六）

案例信息		工艺流程	现场图片
广州市大观净水厂高温水源热泵用于污泥干化供热项目			
行业	新能源		
实施方	碧涞节能		
制热量	400kW		
热汇介质	热风		
热汇温度	110°C		
宁德时代涂布机烘干热风热能循环应用项目			
行业	环境治理		
实施方	复洁环保		
制热量	3×1176kW		
热汇介质	热水		
热汇温度	85°C		
扬州领煌工厂余热回收热泵蒸汽项目			
行业	环境治理		
实施方	易快普		
制热量	2860kW		
热汇介质	蒸汽		
热汇温度	115°C		
广石化油泥干化项目			
行业	化工		
实施方	英华特		
制热量	2200kW		
热汇介质	热水		
热汇温度	83°C		
张家口中央厨房食材配送和餐饮服务项目			
行业	餐饮业		
实施方	神舟制冷		
制热量	303.6kW		
热汇介质	热水		
热汇温度	75°C		

表5-7 国内典型案例（七）



案例信息		工艺流程	现场图片
北京大兴机场烟气余热利用项目			
行业	其它		
实施方	美的集团		
制热量	37.3MW(合计)		
热汇介质	热水		
热汇温度	50°C		
高温热水光缆制造工艺项目			
行业	其它		
实施方	麦克维尔		
制热量	10HP		
热汇介质	热水		
热汇温度	70°C		
热泵型高温热水供应系统			
行业	其它		
实施方	易快普		
制热量	470kW		
热汇介质	热水		
热汇温度	80°C		
湖南益阳南洋高科技产业园废水余热回收项目			
行业	其它		
实施方	碧涑节能		
制热量	869kW		
热汇介质	蒸汽		
热汇温度	105°C		

5.10.2 国外典型案例

表5-8 国外典型案例（一）

行业	农副产品		行业	农副产品	
制造厂	Olion		制造厂	Kronoterm	
制热量	1090kW		制热量	2000kW	
热汇介质	热水		热汇介质	热水	
热汇温度	95°C		热汇温度	80°C	
行业	食品加工		行业	食品加工	
制造厂	AIT		制造厂	Viessmann	
制热量	400kW		制热量	194kW	
热汇介质	热风		热汇介质	热水	
热汇温度	110°C		热汇温度	70°C	
行业	食品加工		行业	食品加工	
制造厂	基伊埃		制造厂	前川	
制热量	1400kW		制热量	1000kW	
热汇介质	热水		热汇介质	热水	
热汇温度	63°C		热汇温度	78°C	
行业	纺织		行业	木材加工	
制造厂	Hybird Energy		制造厂	基伊埃	
制热量	1200kW		制热量	2×4510kW	
热汇介质	热水		热汇介质	热风	
热汇温度	85		热汇温度	83°C	
行业	造纸		行业	化工	
制造厂	江森自控		制造厂	神户制钢	
制热量	3×1300kW		制热量	2×400	
热汇介质	热水		热汇介质	热水	
热汇温度	70°C		热汇温度	90°C	
行业	汽车制造		行业	汽车制造	
制造厂	Aspiration Energy		制造厂	Aspiration Energy	
制热量	2×136kW		制热量	348kW	
热汇介质	热水		热汇介质	热水	
热汇温度	85°C		热汇温度	75°C	

表5-9 国外典型案例（二）

行业	金属制品		行业	装备制造	
制造厂	Viessmann		制造厂	Viessmann	
制热量	2×300kW		制热量	107kW	
热汇介质	热水		热汇介质	热水	
热汇温度	65°C		热汇温度	70	
行业	非金属矿业		行业	非金属矿业	
制造厂	基伊埃		制造厂	Viking Heat Engines	
制热量	1400kW		制热量	400kW	
热汇介质	热水		热汇介质	热风	
热汇温度	63°C		热汇温度	110°C	

5.10.3 总结

从国外与国内工业热泵典型案例来看，由于欧美日与我国工业体系的不同，欧美日工业热泵的典型应用基本涵盖了主要的制造业，我国的工业热泵主要集中在农副食品加工、烟草制品、医药制造、新能源等我国的特色工业。

参考文献

- [1] 胡斌,王文毅,王凯,曹锋.高温热泵技术在工业制冷领域的应用[J].制冷学报,2011,32(05):1-5.
- [2] 贾炜镔.压缩式水源热泵技术在河一联合站的应用[J].石油工程建设,2020,46(05):83-85.
- [3] 江亿.发展热泵技术是实现零碳能源的关键途径,中国电力企业发展,2021,12-15.
- [4] 李帅旗,何世辉,宋文吉,冯自平.基于蒸汽压缩技术的热泵蒸汽系统热力性能分析[J].化工进展,2020,39(09):3583-3589.
- [5] 孟祥来.某医院污水源热泵系统应用分析[J].制冷与空调,2020,20(06):49-52.
- [6] 王如竹,王丽伟,蔡军,杜帅,胡斌,潘权稳,江龙,徐震原.工业余热热泵及余热网络化利用的研究现状与发展趋势[J].制冷学报,2017,38(02):1-10.
- [7] 吴迪,胡斌,王如竹,江南山,李子亮.水制冷剂及水蒸气压缩机研究现状和展望[J].化工学报,2017,68(08):2959-2968.
- [8] 张艳来,尹凯丹,龙成树,张进疆,刘清化,龚丽.热泵技术在我国农产品干燥中的应用及展望[J].农机化研究,2014,36(05):1-7.
- [9] 周赤忠.热泵热水器技术及应用[J].能源研究与信息,2009,25(04):223-227.
- [10] 周子成.二氧化碳热泵热水器[J].制冷与空调,2005(04):9-18.
- [11] Bobelin D, Bourig A. Experimental Results of a Newly Developed Very High Temperature Industrial Heat

Pump (140°C) Equipped With Scroll Compressors and Working With a New Blend Refrigerant[C]. International Refrigeration and Air Conditioning Conference, 2012.

[12] Chamoun M, Rulliere R, Haberschill P, et al. Modelica-based modeling and simulation of a twin screw compressor for heat pump applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 58(1): 479-489.

[13] Fukuda S, Kondou C, Takata N, et al. Low GWP refrigerants R1234ze(E) and R1234ze(Z) for high temperature heat pumps[J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 40: 161-173.

[14] Bamigbetan O, Eikevik T M, Neksa P, et al. Theoretical analysis of suitable fluids for high temperature heat pumps up to 125 °C heat delivery[J]. International Journal of Refrigeration, 2018, 92: 185-195.

[15] 庞卫科,林文举,潘麒麟,林文野,戴群特,杨鲁伟,张振涛.离心风机驱动机械蒸汽再压缩热泵系统的性能分析[J].机械工程学报,2013,49(12):142-146.

[16] Peureux J., Sapora E., Bobelin D. Very high-temperature heat pumps applied to energy efficiency in industry. ACHEMA, 2012, 21, 1-23.

[17] Tian Y F, Lu J L, Shen J B, et al. Optimization on shaft seals for a twin-screw steam compressor based on a novel uniform property region (UPR) model on discharge end-face[J]. International Journal of Refrigeration, 2018, 91: 167-176.

[18] Wang X D, Hwang Y, Radermacher R. Two-stage heat pump system with vapor-injected scroll compressor using R410A as a refrigerant[J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(6): 1442-1451.

[19] Wu D, Hu B, Wang R Z, et al. The performance comparison of high temperature heat pump among R718 and other refrigerants[J]. Renewable Energy, 2020, 154: 715-722.

[20] Yan H Z, Hu B, Wang R Z. Air-Source Heat Pump for Distributed Steam Generation: A New and Sustainable Solution to Replace Coal-Fired Boilers in China[J]. Advanced Sustainable Systems, 2020, 4(11): 2000118.

6 工业热泵企业现状

法国科学家萨迪·卡诺在1824年首次以论文提出“卡诺循环”理论，这成为热泵技术的起源。20世纪70年代以来，热泵工业进入了黄金时期，世界各国对热泵的研究工作都十分重视，诸如国际能源机构和欧洲共同体，都制定了大型热泵发展计划，热泵新技术层出不穷，热泵的用途也在不断的开拓，广泛应用于空调和工业领域，在能源的节约和环境保护方面起着重大的作用。前国际热能署专门成立国际热泵中心，设立热泵推广工程，向世界上各国推广协调热泵技术的应用和发展。美、加、瑞典、德、日、韩等国政府均发出专门官方指引，促进热泵技术的社会应用，涌现了一批领先的热泵企业。

中国工业热泵的发展较为滞后，直到20世纪80年代热泵才得到发展和研究。90年代国家积极引进国外热泵技术和先进生产线，开始大力开发适合国情的热泵装置和热泵系统。21世纪，中国逐渐形成完整的热泵工业体系，技术不断创新发展，热泵迈入市场推广阶段，小型家用热泵及大型热泵装置得以普及。近年来因国家碳中和、煤改电等政策推动，人们对环保节能产品的追求日益增长，工业热泵将在中国开辟出一席之地，迎来发展春天。

6.1 中国企业

热泵发展历史虽长，但中国热泵的发展却相当滞后，直到20世纪80年代热泵才得到发展和研究。90年代中国积极引进国外热泵技术和先进生产线，开始大力开发适合国情的热泵装置和热泵系统，中国热泵行业在理论研究、实验研究、产品开发、工程应用等方面取得丰硕成果，在民用与商用热泵领域逐步形成了完整的体系，但在工业领域的高温热泵方面与欧美、日本企业无论在技术研发还是产品商业化上面，尚存在一定差距。

6.1.1 美的集团

美的集团成立于1968年，是一家覆盖智能家居、楼宇科技，工业技术、机器人与自动化和数字化创新业务五大业务板块为一体的全球化科技集团，每年为全球超过4亿用户，各领域的重要客户与战略合作伙伴提供满意的产品和服务。迄今，美的在全球拥有约200家子公司、35个研发中心和35个主要生产基地，业务覆盖200多个国家和地区。

美的在热泵的研发、生产，以及国际拓展方面都进行了较大的投入。比如在产品研发上，美的设有专门面向户式热泵的研发部，在商业热泵方面，从转子到涡旋，再到螺杆和离心，从50°C水温到100°C以上的蒸汽，美的都进行了全面的布局。

基于此，美的在2023年5月份重磅发布了热泵“全场景”综合解决方案。据了解，美的热泵综合解决方案覆盖了全气候区域、全建筑类型、全末端应用、全项目类别，该方案4kW~10MW/30~160°C的全产品线布局，打造了从洋房别墅到千家万户的全场景生活供热、空气源-水源耦合供热、热能梯级利用、全场景生活热水、农林牧渔供热、工业冷热同供等解决方案，并帮助各行各业的项目实现节能减碳。

6.1.2 格力电器

珠海格力电器股份有限公司成立于1991年，公司成立初期，主要依靠组装生产家用空调，现已发展成为多元化、科技型的全球工业制造集团，产业覆盖家用消费品和工业装备两大领域。

北方工业生产余热较多，但大部分没有进行合理利用而直接粗放排放，造成能源浪费和环境污染，它的直接后果就是持续出现雾霾天气，空气中PM2.5超标。格力CVP系列永磁同步变频离心式热泵机组可将低温余热转换成高温热能加以利用，既获得了节能减排效益，又解决了民生供热。

格力CVP系列永磁同步变频离心式热泵机组最大供热量达到10MW，可采用除地下水以外的其他温度合适冷热源，如：工业余热/水、电厂余热/水、城市污水/再生水、江河水、湖水、海水、地下井水、温泉水、地热尾水、地下环路水、空调系统冷却水等，同时省去了锅炉房和冷却塔，以及家用空调的室外机，令建筑和环境更加美观。

6.1.3 海尔智家

青岛海尔空调电子有限公司是海尔集团的支柱企业之一。自1999年至今，海尔中央空调历经23年的发展，目前已拥有包括单元式商用空调、多联式中央空调、热水空调、冷水式中央空调在内的4大产品系列群、1000多个型号的产品，畅销全球100多个国家和地区，入驻地产、铁路、政府公建等重点领域。

海尔中央空调拥有世界领先的制造水平，是目前国内规格最全、品种最多、技术水平最高的商用及家庭中央空调生产基地。拥有专业的中央研究院，下设46个专业实验室，包括世界领先水平的环境模拟实验室、噪音实验室、EMC实验室等；拥有专业的技术研发团队；拥有目前国内家电行业最大的综合性检测基地；致力于成为全球领先的中央空调整体解决方案服务商。

海尔中央空调助力绿色建筑的建设与改造，在清洁能源供暖领域，产品覆盖区域能源、乡村振兴、舒适家居、智慧热水、生态供热五大能源应用场景，精心打造了上万个精品工程，赢得全球用户青睐，为海尔赢得无数荣誉。另外海尔建造可视化的互联工厂，打造自动化、智能化生产线，打造按需设计、按需制造、按需配送的创新体系。实现工厂无缝对接用户；用户根据个性化定制需求全程指导产品生产，还能实时了解订单进度，实现了用户与工厂之间的零距离。

6.1.4 冰轮环境

冰轮环境前身为1956年成立的公私合营烟台机械修配厂，1998年在深交所上市。公司起家于制冷压缩机，是中国工商业制冷行业的领军企业。公司掌握制冷压缩机“全压力、宽温区、多工质”的核心技术，进行冷热一体化的产业布局，服务于冷链物流、中央空调、余热回收、集中供暖和燃煤锅炉节能改造产业。同时，在“碳中和”的背景下，公司进一步加大节能减碳领域的产品研发，积极拓展碳捕集/封存/利用、氢能等新领域。

冰轮环境开发的GHWS-HFO高温水汽一体机，响应国家节能减排及环保政策，针对有高温热水或蒸汽需求的制冷工业领域，回收利用其排放的冷凝余热，提升能源利用效率。该产品可直接产出温度达到128°C的高温蒸汽，以满足绝大多数工业用热蒸汽工艺，同时避免能量的大量浪费，消除余热及燃煤锅炉对环境造成的影响。

GHWS-HFO高温水汽一体机利用70°C余热水源制备1.5bar压力的水蒸汽(310kg/h)或132°C温度的热水，可应用于乳业、禽畜屠宰等生产厂或其他有低温热源排放同时有高温热水或热蒸汽需求的场所。

6.1.5 汉钟精机

汉钟精机成立于1987年，以高品质及平价策略供应全球一流的产品，现为全球中少数专注于设计及制造压缩机与真空泵之世界级大厂之一，中国市场市占率均为第一位，全球市场名列前五大。

自2006年至今，汉钟精机螺杆制冷压缩机连续多年在中国市场占有率位居前列，经过多年在螺杆压缩机领域丰富的技术积累和大量高温热泵应用的经验积累以及数年的产品布局，已拥有面向高温热泵市场提供全面解决方案的能力。

汉钟精机采用双级压缩技术，研发了适用于大压比工况的高温压缩机，突破传统热泵压缩机应用极限，即可提供最高出水温度可达90°C，是国家煤改电全面推广的全新技术解决方案。针对余热回收而开发的新型超高温热泵压缩机。突破传统压缩机制热极限，可提供最高出水温度可达120°C，可直接产出蒸汽。利用余热技术和ECO技术，压缩机具有更高的效率，制热COP可达3.8~4.2。

6.1.6 雪人股份

热泵机组中的低温液态工质在蒸发器中吸收热源侧的热量蒸发，变成低温低压气态工质。经过螺杆压缩机压缩变为高温高压气态工质。在冷凝器中放热凝结为高温高压液态工质，经节流阀降压降温后重新送入蒸发器中。

高温氨热泵机组采用瑞典SRMTEC品牌SRH系列开启式螺杆压缩机，通过优化设计，推出全系列标准氨螺杆高温热泵机组。该机组利用制冷系统排气废热、水地源废热、工业废水等低温热源进行热量吸收，将不能直接利用的热能转为可供人类生活、生产需要的高温热水；热泵出水温度30~90℃，并采用氨作为工质，绿色环保、节能，可应用于食品加工、区域供暖、余热回收、锅炉预加热等领域。

6.1.7 诺通科技

上海诺通新能源科技有限公司（以下简称诺通科技）成立于2021年5月，是由山东力诺瑞特新能源有限公司和上海交通大学合作的产业化成果，也是一家致力于提供各类先进新能源低碳技术的企业。诺通科技依托股东双方在生产研发上的实力，致力于90度及以上高温热水、蒸汽等热能技术的研发生产和推广。公司定位于热泵蒸汽机的集成及标准化研发、非标项目的设计、销售、安装和调试，立足能源系统的创新设计，为客户提供最贴合的能源解决方案。

诺通科技推出的空气源高温热泵蒸汽供应系统作为一种全新的蒸汽供应技术，该系统通过空气源高温热泵可以有效提取空气中蕴含的低温热量，产生高温热水，后生成低压水蒸气并送入水蒸气压缩机组中压缩增压升温，最终可实现120℃以上的高温水蒸气输出，满足120-180℃高温水蒸气的供应要求。诺通科技推出的空气源高温热泵蒸汽供应系统可以广泛应用于需要高温蒸汽的行业，如酿造、轻纺、建材、木材、化工、冶金、交通、制药、造纸、食品等。与传统燃煤燃气锅炉相比，空气源热泵蒸汽系统更安全，没有触电、泄漏、爆炸等安全隐患；效率高、更节能，没有不环保、运行费用高等难题；同时使用过程更便捷，无需专人值守，也无需年检、报批；成为目前“小型燃煤锅炉替代”改造的优选产品。

6.1.8 英华特

苏州英华特涡旋技术股份有限公司（以下简称英华特）成立于2011年，总部位于江苏省常熟市，是一家专注涡旋式压缩机研发、制造和销售的企业。

英华特致力以创新产品及服务为客户提供先进的压缩机技术解决方案。在十多年的发展中，英华特通过创新技术自主研发了高能效双向柔性涡旋式制冷压缩机，是国内最早实现量产涡旋式压缩机的专业制造商之一，为中国涡旋压缩机技术发展做出了重要的贡献。英华特始终坚持技术创新道路，专注品质的稳定与提升，陆续开发出适用于工业热泵市场的变频和定频涡旋压缩机产品，助力热泵应用领域的拓展和革新。

英华特涡旋压缩机集成了喷气增焓、双柔性涡旋设计、全直流变频等领先技术，实现超宽运行范围及高能效。单压缩机制热量从3kW到180kW，覆盖30~100°C超宽冷凝温度，实现高出水温度或出风温度，可应用于不同的工业场景。目前，英华特的产品及服务已广泛应用于国内外木材加工业、化工制品制造业、汽车制造业、食品制造业、石油化工行业、农副产品加工业等不同行业，为客户提供全方位的压缩机技术赋能服务，致力成为全球先进的气候和能源领域解决方案提供商。

6.1.9 四季通

北京四季通能源科技有限公司成立于2014年，是一家专注于双级耦合高温热泵系统设计、生产、销售及服务的国家高新技术企业和北京市专精特新企业。四季通依托双级耦合技术，致力于工业高温应用及建筑供暖应用，践行“应用创新”理念，不断为客户创造价值，获得国家专利及软件著作权50余项。

四季通双级耦合热泵系统在工业高温应用领域的特点体现在既可以在余热充分情况下稳定供热，也可以在余热不足或没有余热的情况下稳定供热，最高供热温度可达120°C。广泛应用于金属清洗烘干、乳酸菌发酵酸菜加工、磷化池加热、电镀池加热、煤矿通风加热、输油系统加热、纺织印染、消杀洗涤、高温烘干、屠宰行业、畜禽养殖、余热回收等工业高温应用领域。其中丹佛斯（天津）有限公司清洗池高温加热项目荣获2022年“节能杯”热泵工农业最佳应用奖。

四季通以专业化、标准化、智能化为产品核心竞争力，实现系统运行更稳定、供热过程更节能、供热体验更舒适，为用户提供一站式供热系统解决方案。

6.1.10 易快普

易快普（苏州）热能环保设备有限公司坐落于苏州工业园区金鸡湖商务区，公司遵循技术为本、开拓创新、至诚守信、互利共赢的价值观，以实践和应用节能环保技术为使命，致力于成为撬装蒸发装置技术应用的行业领导者。

公司在环保领域的“高难废水”处理、零碳排放“热能供应”和工业余热回收热泵“蒸汽供应”上，普及可靠、节能、低成本的热力装置和系统解决方案。

公司现有相关授权专利20余项，涵盖了发明、实用新型。公司现已通过ISO9001质量体系认证。公司业务从设计研发到售后维修、产品更新换代，其产品和服务可适用于众多行业。

6.1.11 博志热能

河北博志热能设备有限公司坐落于河北省邢台市高新技术开发区，公司占地面积70亩，建筑面积10万平方米，清洁能源产品年生产能力达到10万套，是一家专业数字清洁能源产品及解决方案提供商。业务涵盖清洁能源产品的“研”、“产”、“销”、“服”及其全生命周期管理于一体的国家高新技术企业。

博志建设有120匹的-35°C的超低环境模拟智能实验室、智能模拟演示运行台、多功能在线运行试验台，公司拥有完整的清洁能源产业链，产品系列丰富，产品涉及工业专用特种高温热泵、特种蒸汽热泵、极寒特种采暖热泵、低温特种烘干热泵、家用和商用冷暖两用热泵、燃气采暖热水炉。其中在工业专用特种高温热泵、特种蒸汽热泵、极寒特种采暖热泵和低温特种烘干热泵产品及应用方面具有核心竞争力和优势。

6.1.12 碧涑节能

广东碧涑节能设备有限公司位于中国家电之都-广东顺德，创立于2002年，是国内最早从事空气源热泵热水机、节能饮水机研发、生产、安装销售的专业节能设备制造商。公司是国内空气源热泵行业及节能饮水机行业最早获得全国工业生产许可证的企业，产品已全线通过国家CCC认证、CQC认证、欧盟CE认证、国家级涉水批件、ISO质量体系认证、ISO1400环境认证、职业健康安全管理体系认证等。除此，公司还荣获了《全国热泵十大名优品牌》、《十大杰出品牌》、《商用温热开水机标准化起草单位》、《广东省高新技术企业》、《广东省守合同重信用企业》、《采用国际标准产品标志证书》、《中国节能产品认证证书》等诸多荣誉资质。

6.1.13 江森自控日立万宝

江森自控日立万宝压缩机（广州）有限公司（后文简称日立）前称广州日立压缩机有限公司，成立于2003年，于2015年更名为江森自控日立万宝压缩机（广州）有限公司，拥有江森自控日立与广州工控万宝两大股东优势资源。

日立是国际名列前茅的涡旋压缩机供应商，公司一致致力于研发性能优良，可靠性高的涡旋压缩机产品。目前针对工业热泵，目前主要有以下产品：R410A产品最高冷凝温度65°C，压缩机单体最大排量150cc/rev，最大转速140rps；R32产品最高冷凝温度68°C，在190mm缸径平台，最大单机能力达100kw；R134a产品最高冷凝温度达95°C，可满足最高92°C出水要求；R515B/R1234ze(E)产品最高冷凝温度超100°C。

6.1.14 东方电机

东方电气集团东方电机有限公司成立于1958年，是中央管理的涉及国家安全和国民经济命脉的国有重要骨干企业中国东方电气集团有限公司的全资核心子公司。东方电机形成了水、火、核、气、风“多电并举”的产业发展格局。公司主要从事水轮发电机组、热能发电机（包括燃煤、燃气、核能）、风力发电机、成套节能环保设备、泵等设备的研发、设计、制造和服务；在污泥、餐厨垃圾、工业余热能回收利用等节能环保领域具有工程应用业绩，拥有专业的节能环保技术和工程系统集成能力，为用户提供优质的技术咨询、系统设计、设备开发制造、设备集成供货、工程总承包等全方位服务。在余热利用领域，可为用户提供余热水、余热蒸汽、乏汽等多种余热综合利用（产热水、高温蒸汽、发电）方案及工程实施。

6.1.15 复洁环保

上海复洁环保科技股份有限公司，是一家专注于污泥等物料脱水干化与固液分离、恶臭及挥发性有机废气净化、节能降碳综合服务的国家专精特新“小巨人”企业、科创板上市企业。公司创新开发应用的高温水源热泵技术装备，通过吸收污水厂的中水显热用于污泥干化，实现85℃高温供水，实现了从污水厂内获取污泥干化热能的技术突破，促进了污水资源化、能源化，进一步显著降低了污泥脱水干化的全程能耗和碳排放强度，并率先在包括广州大观净水厂污泥脱水干化项目、深圳福永水质净化厂污泥脱水干化项目、上海虹桥污水处理厂污泥脱水干化项目等多个高标杆项目中实现应用并稳定运行，先后被评为广东环保产业减污降碳协同增效先进设备（2021.12）、粤港澳绿色大湾区典型技术与案例（2022.06）、中国清洁供热产业突破性创新技术（2023.05），并参编了由国家发改委环资司指导编制的《热泵助力碳中和白皮书(2022)》。

6.1.16 苏净安发

苏州苏净安发环境科技有限公司是上市公司创元科技股份有限公司（股票代码：000551）旗下苏净集团的骨干企业，是国有资本控股的国家高新技术企业。

苏净集团是国家创新型试点企业和国家重点高新技术企业，也是国内洁净环保领域技术创新、装备制造和工程整体解决方案的综合供应商。苏州苏净安发环境科技有限公司成立于1993年，是我国较早从事空调及暖通产品的研发、生产、销售和安装集成供应商之一，企业经过近三十年来的发展，热泵板块已发展形成多个产品系列，二氧化碳热泵，复叠变频热泵机组，空气源（冷水）热泵机组、水冷冷水机组、工业螺杆机组、风冷热泵模块机组、热泵烘干机组等等。产品广泛应用于工业、农业、商业、交通运输业、航空航天业等，以及绿色清洁采暖改造、煤矿油田、畜牧业、农业烘干、生物医药等特殊行业。公司始终注重于创新、研发、改革，安发聚集了一支高素质、有远见、技术过硬的研发团队，建立了完善的产品研发体系，拥有先进的实验设备，在热泵研发、制造方面有深厚的沉淀，为客户提供售前、售中、售后全生命周期的服务保障体系。

6.1.17 安徽新沪

安徽新沪屏蔽泵有限责任公司成立于2018年5月28日，为浙江大元泵业股份有限公司（上交所：603757）的全资子公司，秉持“节能环保绿色低碳，为全球可持续发展做贡献”的愿景，专注于泵的设计、生产和销售。

安徽新沪拥有百余人的研发团队和CNAS认证及TÜV合作实验室，具备强大的研发和测试能力。安徽新沪产品获得CCC、GS、TÜV、UL、CE等多项认证，满足RoHS、REACH、EEI等法规要求。安徽新沪作为全国泵标准化技术委员会委员单位、全国旋转电机标准化技术委员会起重冶金和屏蔽电机标准化分技术委员会委员单位，参与起草了一系列屏蔽泵和屏蔽电机标准。

安徽新沪专注于屏蔽泵的研发和制造，矢志不渝的坚持以客户需求为导向的产品研发和质量提升，为不同流体介质无泄漏输送的一般性和特殊性要求提供专业的解决方案。安徽新沪产品远销欧美亚多个国家和地区，产品广泛应于建筑、节能、环保、暖通、城市给排水等工业、民用诸多领域的冷热循环供水系统中。在热泵领域已先后开发出用于供暖系统用空气源热泵、地源热泵、水源热泵配套的系列变频节能屏蔽电泵，与格力、美的、三星、大金、NIBE、菲诗蔓等国内外热泵生产企业提供配套服务，在工业领域，用于输送高温高压热水方面，已开发出大功率大流量高扬程屏蔽泵用于工业热泵类似场景。公司秉承绿色低碳节能环保理念设计产品，组织生产。精心选择培育供应商，打造优质快捷的供应链系统，采用当今国际先进的制造技术和设备，为客户提供安全、稳定、可靠、耐用且符合当地法律法规的产品。

6.2 欧美企业

自1939年第一台中大型热泵出现在瑞士苏黎世市政厅，欧美企业就一直处于热泵技术开发与商业化的领导地位。

6.2.1 江森自控(Johnson Controls)

江森自控(Johnson Controls)建立于1885年，公司总部设在美国威斯康辛州的密尔沃基市，在“车内体验”，“设施效益”和“动力方案”行业是全球的领导者。

江森自控秉承可持续发展理念，积极推进中国市场余热回收集中供暖应用，推出基于工业级高性能离心式热泵的余热回收集中供暖解决方案。

余热回收解决方案通过回收低温工业余热，生产高温热水用于市政供暖或工艺加热，帮助企业实现节能、减排目标。可广泛应用于热电厂、企业自备电厂、市政污水厂、工矿企业及石油化工等领域。

江森自控工业级余热回收式热泵，采用开式设计，驱动方式可灵活选用电机驱动或蒸汽透平驱动。热泵产品主要包括电驱动的YEWS, YS, YK, CYK及蒸汽驱动的Titan OM。单机制热量范围从400kW到30MW，热水出水温度最高90°C。

6.2.2 基伊埃(GEA)

基伊埃始建于1920年，专注于专业机械工程领域(尤其是化工工程和设备)和工业设计。基伊埃制冷技术事业部是世界上工业制冷各个领域的先驱者之一，在技术上拥有150年以上制冷经验。主要产品包括活塞式压缩机组、螺杆式压缩机、盐水机组、氨冷水机组、阀门、各种压力容器、自控系统等。主要为工业冷冻和食品冷冻提供成套设备和工程设计，安装调试及维护保养。

基伊埃为加工行业提供全面的热泵机组，提供最先进的技术以及定制解决方案来满足客户的要求，功率范围介于300kW到10MW之间都可以实现。基伊埃热泵机组从氨制冷系统进行热回收，可提供高达95°C的热水供应。

6.2.3 丹佛斯(Danfoss)

丹佛斯于1933年在丹麦创立，经过80年的发展，已经成为丹麦最大的跨国工业集团之一。丹佛斯以推广应用先进的制造技术，并关注节能环保而闻名于世，是制冷和空调控制，供热和水控制，以及传动控制等领域处于世界领先地位的产品制造商和服务供应商。

磁悬浮离心式制冷压缩机诞生至今，已有20多年的时间。目前，磁悬浮离心式制冷压缩机已经被大批量的投入到实际应用中，在这个过程中，丹佛斯对磁悬浮技术的应用和推广做出了重大贡献，同时，在如今的磁悬浮离心机领域，丹佛斯也是压缩机占有率最高的品牌。

作为全球首款针对高压比应用优化的无油压缩机，天磁高压比系列压缩机有两种型号：TTH325与TGH250。TH325系列额定制冷量为325kW(90冷吨)，采用R-134a或R-513A工质；TGH250系列额定制冷量为250kW(70冷吨)，采用低全球变暖潜值(GWP)的环保HFO-1234ze工质。

无油技术为热泵采暖带来碳中和的巨大潜力。丹佛斯磁悬浮无油方案压缩机，目前能够实现优化的运行范围和更高的出水温度，全面满足商用热泵采暖的应用需求。磁悬浮的变频功能达到更高的效率，在满足区域供热网络或商业建筑热泵应用的需求时降低系统能耗。随着可再生能源并入电网，二氧化碳排放量会进一步减少。因为无油磁轴承离心式压缩机可长期保持性能，随着时间的推移，与其他有性能衰减的方案比，其对于能效提升的贡献会越发显著。

6.2.4 艾默生(Emerson)

艾默生(Emerson)是一家全球性的技术与工程公司，为工业、商业及住宅市场客户提供创新性解决方案。成立于1890年。

艾默生凭借创新的进取精神，克服重重技术难点，开发出了适用于超高温工业专用的涡旋压缩机及整体解决方案。能够广泛用于工业用途的热泵锅炉、工业生产各流程中大于100°C的制热需求和工业生产中热能回收再造高温系统。尤其是在应用于工厂热回收改造项目时，通过取代传统的电热方式，最快能在1到2年内收回投资成本，相较传统方案而言，更加节能，同时还为安全生产保驾护航。如此宽广的运行范围以及大于100°C的超高冷凝温度，为诸多未曾探索的工业领域提供了强大的技术支持和解决方案。

艾默生与 Star Refrigeration 利用艾默生的工业制冷压缩机—Vilter 单螺杆压缩机。通过使用氨工质，该压缩机技术解决方案为 Star Refrigeration 及其挪威的项目合作伙伴 Norsk Kulde 和 Drammen Fjernevarme 提供了理想的工质，制备 90°C 的热水用于新的区域供热系统，以满足当地居民和企业的需求。相比使用 HFC 的热泵，氨工质工业热泵在性能上提高了约 15%。此外，单螺杆压缩机上平衡的径向和轴向力设计减少了设备轴承的应力，使得运营和维护成本较低。

6.2.5 欧适能(Ochsner)

欧适能创立于1942年，致力于热泵研发、能源系统设计、推广以及提供工业环保节能技术支持。欧适能工业热泵致力于工厂生产过程余热和余热等能源的回收利用，广泛应用于食品工业、纺织、造纸、机械加工、电厂、化工、制药、皮革加工等领域，采用独有的ÖKO1工质，功率范围覆盖220 kW至685 kW。

在地表热或者低温余热的回收利用方面，仍然可以通过欧适能高温热泵生产高达98°C的高温热水。对于同时需要制热和制冷的情况，使用欧适能高温热泵，制冷和制热的能效比相叠加，能够实现能源利用的优化。在发电厂、机械加工或者化工、制药、特别是食品冷冻过程中大量的余热、余热不能用传统的热交换器提取出来。通过使用欧适能高温热泵，这些工业余热、余热可以被重新利用。欧适能成功利用热泵将该品位的热量直接并且高效地利用，生产高达98°C的热水。在很多情况下热泵还兼具对热源实现冷却的功能。

6.2.6 Friotherm

Friotherm植根于Sulzer集团，提供高质量、高可靠性的热泵、制冷机、组件和服务。1878年，Sulzer开始建造制冷厂，作为其业务领域“蒸汽机”和“压缩机”的业务扩展。Friotherm通过开发工业制冷机和热泵来满足行业不断变化的需求，从而保留和扩大了这一传统。1936年，Friotherm在苏黎世市政厅安装了世界上第一台热泵，该工厂仍处于运行状态。迄今Friotherm成功地为区域供暖系统建造了大容量的热泵。

Friotherm的Unitop系列透平式高温热泵，功率覆盖300~800kW，可产出最高95°C的高温热水，用于能源生产、能源供应、DH和DC应用、工业生产过程与建筑服务。

6.2.7 西门子能源(Siemens Energy)

西门子能源提供几乎覆盖整个能源价值链的产品、解决方案和服务，业务包括发电、输电、新能源业务、可再生能源及能源工业应用。

西门子能源对创新、清洁和高效能源生产和使用的探索也体现在工业热泵和大型储能设施领域。工业热泵可以有效提高工业生产中热能利用效率。工厂产生的余热和废热多为低温热源。传统热泵仅能将它们的温度提高到 60~70℃，并不能满足工业用热的需求。因此，工厂一方面将低温热排放出去，另一方面又需要购买大量的热蒸汽和热水，大大增加了生产成本。西门子能源的工业热泵产品可以将工厂废热转换为150℃的高温热蒸汽，最大制热量可达到70MW，不仅提高废热利用率，也大幅降低了生产成本。

目前，西门子能源已与 Vattenfall 公司签署谅解备忘录，计划为德国柏林的 Potsdamer Platz 项目安装功率为 7 MW的工业热泵，以为周边区域供热。

6.2.8 曼恩能源(Man Energy)

曼恩能源是区域性的专注于石化贸易以及新能源工程的具备设计与施工公司，致力于为市场提供光伏行业以及水处理行业的先进的技术以及执行方案。公司在确保质量的基础上，最大化客户的收益，以及确保过程中的安全，以及可持续性发展。

曼恩能源于2018年获得ETES(Electro-thermal energy storage)独家授权，在市场推广大规模冷热电三联储能方案，最大制热量80MW，最大供热温度可达150℃(用于区域供热或者流程工业)，使用寿命长达35年，且在产品生命周期中无效率折损。

巴斯夫和曼恩能源建立战略合作伙伴关系，决定在巴斯夫位于路德维希港的生产基地新建一座工业规模的热泵装置。该项目旨在为减少温室气体排放作出重要贡献，在化工生产中使用低碳技术，并降低基地的天然气消耗量。该项目所新建的大型热泵将为巴斯夫实现利用可再生能源的电力生产蒸汽，同时利用冷却水系统排出的废热作为热能来源。水中的余热将被压缩处理以产生蒸汽，并被输送到该基地的蒸汽网络。通过将热泵装置整合到生产基础设施，每小时可生产 150 吨蒸汽。该项目每年可使该基地减少 39 万吨二氧化碳排放量。同时，它将使冷却水系统更高效，并减少对气候和天气条件的依赖。

6.2.9 麦克维尔(McQuay)

麦克维尔早在1872年便在美国明尼苏达州明尼亚波斯市成立，经过150多年的发展和兼并，麦克维尔已成为世界上最大的制造和销售制冷、暖通空调、冷冻冷藏和空气净化设备的专业公司之一，并因全系列高品质的环保节能的空调产品、优质的服务和全球领先的空调系统解决方案提供成为世界同业的领先者，在国际间享有盛誉。

麦克维尔的产品和服务涵盖了家用、商用、工业用和特种暖通空调设备，以及空气净化设备及冷冻冷藏用机组的整个范畴，为全球不同领域的用户提供产品、技术、系统方案解决服务。麦克维尔是一个跨国公司，依托着集团大金中央空调（DAIKINAP）事业，致力于在全世界大力开展业务，我们从全球角度去思考和行动，始终尊重世界各地多样的文化，为全球不同气候区域的用户创造新的价值。

麦克维尔的工业热泵产品具有以下特点：(1) 运行范围广，高低级均采用变频EVI压缩机，制热最低环境温度可至-30°C，最高热水温度可达 90°C；(2) 高效制热，环境温度 20°C下，机组制热 COP 高达3.46(15°C冷水循环加热至80°C热水)；(3) 水温控制精确，自动无级变频调节输出，使水温更稳定，水温波动 2°C，可更好地满足工艺生产等精确控温需求；(4) 应用灵活，根据用户的热水量需求，热水发生器最多 16 个模块组合使用，最大组合能力为 320HP，单台6/10/20HP 热水发生器可自由组合使用，用一个控制器控制，热水发生器模块之间可互为备用。

6.2.10 霍尼韦尔(Honeywell)

霍尼韦尔始于1885年，在华历史可以追溯到1935年在上海开设的第一个经销机构。霍尼韦尔秉持深耕中国谋求长期发展的理念，贯彻“东方服务东方”和“东方服务世界”的战略，以本土创新推动增长。目前霍尼韦尔所有业务集团均已落户中国，上海是霍尼韦尔亚太区总部。

霍尼韦尔旗下的Solstice®系列工质、发泡剂、推进剂与溶剂在世界范围内广泛应用，迄今已帮助减排超过3.26亿吨的二氧化碳当量，相当于减少了7.55亿桶石油的潜在排放。目前多款由霍尼韦尔开发的工质已应用于工业热泵行业，包括R410A、R134a和R245fa等，并且在积极推动环境友好型工质R1233zd(E)、R1234ze(E)和R515B应用于高温热泵领域，帮助热泵系统实现80-150°C热水/热风输出。

6.3 日本企业

日本的热泵商业化晚于欧美，但自1980年代便开展了超级热泵计划，开发出4类热泵，其中有利用45°C余热水，制热出水温度85°C的中高温热泵，以及利用80°C余热水，产出150°C蒸汽的高温热泵。

6.3.1 神户制钢(Kobeclco)

日本神户制钢所(简称KOBELCO)是世界500强之一，是日本第三大钢铁联合企业。该公司创建于1905年，以钢铁制造业、锻造业起家，其前身为1905年9月建立的当时日本国内最大的贸易厂家的神户钢铁厂。1960年公司开启了全球化发展的新纪元，迄今以成为涵盖钢铁、机械、工程、房地产等多个领域。

神户制钢所与东京若干企业共同开发出了蒸汽供应温度可达120°C的高效蒸汽供应系统"SGH120"和可提供最高温度为165°C的高效蒸汽供应系统"SGH165"。神户制钢所于2011年5月开始销售这两种型号的热泵。工厂里利用蒸汽的杀菌、浓缩、干燥、蒸馏工序中，以前超过120°C的高温蒸汽只能依靠锅炉提供，但在全球变暖的背景下，随着节能需求的增加，需要人们掌握利用热泵系统生成超过120°C高温蒸汽的技术，以及供应高温蒸汽时提高热泵性能效率的技术。在SGH120中，热泵可提供120°C蒸汽，而在SGH165中为热泵增配了蒸汽压缩机，可实现165°C蒸汽供应。这样，可对工厂内的温排水实施热回收，从而使得热泵系统在食品、饮料的杀菌，化学药品、饮料的浓缩，印刷物、涂装品、污泥、纸张、医药品、食品等的干燥，以及蒸馏酒的蒸馏等许多使用蒸汽的工序中的适用范围进一步扩大。此外还通过配备新开发的高压缩比/耐高温螺旋压缩机、压缩机发动机的耐高温化设计、使用耐高温的工质建立起了耐高温的高效热泵循环系统，SGH120的COP达到了3.2，与以前的燃气锅炉相比，可节能60%，CO₂排放量削减了约70%。

6.3.2 三菱重工(Mitsubishi Heavy Industrial)

三菱重工始创于1884年，历经130余年的变迁和发展，现已成为世界上少数具有综合解决“人类社会难题”实力的企业。事业领域涉及航天航空、能源动力、海洋船舶、交通、机械、空调设备等，制造产品超过700余种。

三菱重工提供的ETW系列水源热泵热水机组额定制热量627kW，通过回收再利用系统中的余热，连续提供最高90°C热水，相当于一吨热水锅炉，从而大幅减少CO₂排放量和运行成本。

6.2.3 前川 (Mayekawa)

前川制作所创立于1924年，为满足顾客和社会需求，作为工业用冷冻机厂商前川制作所将长期培养的冷却技术、压缩技术作为基础，以及由此产生的各种产品、服务、工程。

CO₂热泵家庭用小型供热水设备，其节能和安全性等方面得到了良好的评价，到目前为止日本已有众多销售实绩。用于工业、业务领域的热泵加热系统在今后也处于飞跃性阶段。被要求的条件不仅是以往的削减能耗量、CO₂排放量、营运成本，对于和生产工序设备相关的大容量化、高温化、温度稳定性、耐用性以及维修对应能力等也有所要求。

前川制作所的EcoSirocco系列CO₂热风热泵，该划时代热泵能够利用工艺制冷中使用的冷水及余热、井水等可再生能源，为干燥及加热提供所需空气。EcoSirocco无需燃烧就能产生热风。同时还能将制造热风时产生的冷水用于空调和工艺制冷。此外，在需要120°C以上热风时，能够与其他热源混合使用。可以对应各类干燥及加热的需求，在CO₂减排、节省能源与节省成本方面回应了客户的期待。

6.4 结论

通过国内外工业热泵企业进行了调研，由于欧美日等发达国家较早的开始工业热泵的技术开发与商业化，并且在压缩机与工质领域积累了百余年的技术基础，因此在工业热泵的各项指标如供热能力、供热温度还是装机数量，都大幅度领先于我国的工业热泵企业。我国的工业热泵企业需要在研发大容量、更高效、更可靠、大温差及具有更长寿命的工业热泵系统上投入更多的精力。

参考文献

- [1] Broberg Viklund S, Johansson M T. Technologies for utilization of industrial excess heat: Potentials for energy recovery and CO₂ emission reduction[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 77: 369-379.
- [2] Arpagaus C, Bless F, Uhlmann M, et al. High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials[J]. Energy, 2018, 152: 985-1010.
- [3] Jakobs R M, Stadtländer C. Industrial Heat Pumps, Second Phase[R]. Borås, Sweden, 2020.
- [4] Mateu-Royo C, Arpagaus C, Mota-Babiloni A, et al. Advanced high temperature heat pump configurations using low GWP refrigerants for industrial waste heat recovery: A comprehensive study[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 229: 113752.
- [5] Association E H P. Large scale heat pumps in Europe, Vol. 2[R]. Brussels, Belgium, 2020.
- [6] Watanabe C, Uchiyama Y, Hirano S, et al. Pioneering Industrial Heat Pump Technology in Japan[C]. 11th IEA Heat Pump Conference, 2014

7 结论与展望

7.1 总结与结论

本《工业热泵发展白皮书》从工业热泵技术应用与发展、工业热泵市场潜力与节能减碳效益、工业热泵市场应用与典型案例、工业热泵企业现状四个方面分析了工业热泵的应用现状、市场潜力与对“双碳”战略的贡献，相关结论如下：

(1) 我国作为当今世界最大的制造业国家，工业能耗约占社会总能耗的2/3，其中大量的工业能耗以各种余热的形式被直接排放。因此实现碳中和目标的关键在于有效回收工业余热，控制工业碳排放。热泵是将环境热能和工业余热回收并用于热能生产的装置，通过这种装置，可以大幅消减能源消耗和相关的碳排放。

(2) 在我国各项工业热泵的关键技术中，热泵系统循环技术已较为成熟，热泵压缩机技术也在大流量、高温及高温升领域不断取得突破，基于自然工质的低GWP工质技术也取得长足进步；基于HFO与HCFO工质的低GWP工质技术开发与商业化还有待进一步加强。

(3) 对工业冷却水、废热水及乏汽这三类典型的工业余热采用工业热泵进行回收，制备热水、热风或蒸汽，并对标电锅炉或燃气锅炉进行了经济性分析，结果表明：采用乏汽源热泵替代电锅炉的投资回收期均小于1年，具有极高的投资价值；其余型式的工业热泵，受热源与热汇温度、热汇介质及取代对象(电锅炉或燃气锅炉)，投资回收期差别较大，需要进行审慎的经济性评估。

(4) 参考欧洲典型用热工业部门占能源总消耗的比例，对工业热泵在我国19个典型用热工业部门的热泵供热潜力进行了预测，考虑200°C以下的热汇温度，工业热泵的供热需求达到58.683亿GJ，基于COP平均值3.275，工业热泵每年可节能51.121亿GJ，在非化石能源发电量分别占比34%、50%、70%的情境下，分别减少3.261、4.018、4.965亿吨二氧化碳排放量。

(5) 对国内外工业热泵企业进行了调研，由于欧美日等发达国家较早开始工业热泵的技术开发与商业化，并且在压缩机与工质领域积累了百余年的技术基础，因此工业热泵的主要指标（如供热能力、供热温度及装机数量）都优于我国的工业热泵企业。

(6) 对工业热泵主要市场应用进行了调研，给出了一些国内外典型应用案例。欧美日工业热泵的典型应用基本涵盖了主要的制造业，我国的工业热泵主要集中在农副食品加工、烟草制品、医药制造、新能源等我国的特色工业。

(7) 对工业热泵推广应用的主要障碍进行了总结，包括技术(供热行业的密集电气化带来的电网限制)、经济(高投资和安装成本)、监管(缺乏标准和强制性政策)，政策(国内经济形势及国际大环境的不确定性)，以及公众接受问题(工业热泵的普及程度不足)。

7.2 建议与展望

工业热泵技术的全面推广对于碳达峰与碳中和具有重大意义，但工业热泵技术的快速发展离不开政府、企业、科研机构的相互协作与共同努力：

(1) 加强政策引导与电力部门支持。积极推出支持工业热泵技术应用的资金扶持政策，健全财政补贴机制，创新经营管理模式，提高管理效率，降低工业热泵技术应用成本；由政府牵头电力部门为工业热泵企业用户提供绿色电价，并采取切实有效措施来缓解工业热泵对企业用户电网增容带来的压力；充分利用互联网等新兴媒体等方式大力宣传工业热泵技术优势，营造良好的社会认知氛围，及时总结工业热泵技术相关先进经验和做法。

(2) 加强工业热泵企业技术创新与管理创新。健全适应未来大规模发展的工业热泵相关制造、应用、运行维护和测评相关标准体系；研发大容量、高效率、大温差及长寿命的工业热泵装置；加快低GWP工质及相关技术研发，积极推广包括自然工质在内的环境友好型工质；综合考虑工程所在地气候、经济及工程自身的技术及未来规划等因素，选择适宜的工业热泵产品和供热方案，发挥工业热泵技术的应有优势。

(3) 突出工业热泵在双碳目标达成过程中的作用。热泵作为最先进的新能源技术之一，契合终端用能电气化发展的需求，是电力高效转为热能的最佳途径，可为工业和建筑提供所需的各类热量，以满足建筑供暖、生活热水和各类工业生产过程中的热量需求，并将大大减少整个国家化石燃料的消耗，可实现10-15亿吨的CO₂减排量。