

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-10

doi: 10.12465/issn.0253-4339.20260429001

集中供热系统的温度品位共享方式

胡景童¹ 江亿²

(1 中国建筑科学研究院有限公司 北京 100044; 2 清华大学建筑节能研究中心 北京 100084)

摘要 “双碳”目标下,集中供热系统正从燃煤供热转向以余热为主的多热源多热汇模式,统一管网须整合温度品位跨度极大的各类热源与热汇。现有的串联梯级利用方式依赖于换热环节按温度品位顺序排布,难以适应复杂热网的灵活接入。因此,本文提出温度品位共享的概念及4类管网连接方式:定义源汇侧平均温差 ΔT_{sh} 量化品位不匹配程度,将偏差归纳为供热品位不足、供热品位富余、取热品位不足、取热品位富余4类工况,分别建立供热上三管、供热下三管、取热下三管、取热上三管4类管网连接方式,通过增设旁通管路实现相邻换热环节之间温度品位的再分配。火积耗散分析表明,温度品位共享的热力学本质是将大温差掺混转化为小温差掺混,掺混损失严格减小;以吸收式换热器为例,论证了4类流程仅需在已有设备基础上增设旁通管路即可实现,无需引入新设备类型。基于火积耗散减小与支路总换热量之间的计算关系,给出了温度品位共享对整体回水温度影响的解析图谱。在大温差低回水路线下,回水温度降低有助于增大输配温差、降低所需循环流量,并为提升既有管网输配能力和扩大余热接入规模提供条件;典型边界条件下(单换热环节占支路总换热量20%、原始回水掺混温差为20 K),整体回水温度降低可达1.57 K。4类流程构成余热共享系统中温度品位全局调配的方法学基础,为新型零碳热力系统的工程实践提供路径。

关键词 集中供热;温度品位共享;余热利用;大温差供热;多热源多热汇;吸收式换热器

中图分类号: TU995;TK11

文献标识码: A

Temperature Grade Sharing Methods in District Heating Systems

Hu Jingtong¹ Jiang Yi^{2*}

(1. China Academy of Building Research, Beijing 100044, China; 2. Building Energy Research Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Objective Under the framework of China's dual-carbon targets, district heating systems are shifting from coal-fired sources to multi-sources together with multi-sink modes dominated by waste heat. A unified network should integrate heat sources and heat sinks whose temperature grades vary over an extremely wide range. However, existing series-cascade approaches require heat exchange units to be arranged strictly in the order of grades, limiting their applicability in complex networks. This study proposes a generalized framework, with termed temperature grade sharing, which redistributes the temperature grade among adjacent heat exchange processes through additional bypass pipes, thereby decoupling grade matching from the physical arrangement. Methods The average temperature difference of source - sink is defined to quantify the grade mismatch, which classifies the system into four scenarios: heating-supply deficiency or surplus, and heat-recovery deficiency or surplus. Four configurations were constructed correspondingly: heating-supply upper--three-pipe and lower-three-pipe systems and heat-recovery upper--three-pipe and lower-three-pipe systems. Entransy dissipation analysis was adopted to demonstrate that grade sharing converted single large-temperature-difference mixing into small-temperature-difference mixing across both interfaces, ensuring a strict reduction in mixing losses. An analytical relationship was then developed to correlate the achievable reduction in the network return temperature with the original return-side mixing temperature difference and relative heat load of the grade-deficient process. Results and Discussions Based on the analytical relationship between the reduction in the mixing-entransy dissipation and heat load of total branch, an analytical design map was established for the impact of temperature grade sharing on the overall network return temperature (Fig. 11). Operating under a large-temperature difference, a low-return temperature route with the fixed supply temperature and heat load, allows a substantial reduction in the return temperature. The

收稿日期:2026-04-29;修回日期:2026-06-08;录用日期:2026-06-09

责任编辑:田甜

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFC3810000)。(The project was supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2024YFC3810000).)



移动阅读

low return temperature enhances the transport temperature difference and reduces the required flow rate of circulation, thereby establishing the conditions for expanding network transport capacity and multi-source waste-heat integration without enlarging pipe diameters or equipment scales. For a representative boundary, i. e., a relative heat load of 20% and an original mixing temperature difference at return-side of 20 K, the network return temperature can be lowered by 1.57 K, which aligns with the analytical map. The four configurations collectively cover all four typical mismatch scenarios; their design parameters are identical, and within a branch, the borrowed and returned grades offset one another, leaving the total driving force unchanged. At equipment level, an absorption heat exchanger requires only an additional bypass pipe and a circulating pump; while no extra heat-exchange components are required.

Conclusion The proposed temperature-grade sharing framework decouples the cascade utilization from the physical arrangement. It provides a methodological foundation and a viable engineering pathway for the system-wide allocation of temperature grades in waste-heat-driven district heating systems, supporting the flexible integration and dynamic operation of multi-source together with multi-sink networks during dual-carbon transition.

Keywords district heating; temperature grade sharing; waste heat utilization; large temperature difference heating; multi-source multi-sink; absorption heat exchanger

碳排放双控制度下,全面构建新型零碳热力系统已成为减碳工作紧迫的战略任务。2026年作为“十五五”开局之年,政府工作报告首次将碳排放强度目标列入年度预期指标,明确单位国内生产总值CO₂排放降低约3.8%。“十五五”规划纲要要进一步提出单位国内生产总值CO₂排放累计降低17%的约束性目标,标志着减碳考核从能耗约束正式转向碳排放总量和强度双控^[1]。相较于进展迅速的零碳电力系统,热力系统的零碳化进程亟待加速。2022年,全国工业生产和建筑运行用热总量约为 1.83×10^{10} GJ,制备该部分热量排放的CO₂约为 1.6×10^9 t,占全国能源活动碳排放总量的15%^[2-3]。在双控考核的硬性约束下,庞大的热力碳排放必须寻求零碳替代方案。

零碳热力制备的核心路径是以热泵技术为基础,梯次利用自然环境热源与人类活动余热以匹配不同密度的热力需求。针对取热密度小于1 MW/hm²的低密度用热场景,依托空气、土壤、地表水等自然热源的分散式热泵已实现规模化应用。然而,面对北方城市采暖与工业用热等高密度需求,自然环境热源供给能力显著不足,必须转向回收人类活动排放的低品位余热^[2]。预测显示,全国核电、调峰火电、流程工业、数据中心及城市再生水等每年排放的可回收余热总量约为 2.4×10^{10} GJ;仅需回收其中40%,辅以热泵提温,即可覆盖高密度热力缺口。当前,北方地区集中供暖面积达175亿m²,热源结构中热电联产占比约为80%,工业余热和可再生能源供热占比已提升至2.3%^[4-5],集中供热正处于向全面余热利用转型的关键期。

建设以统一管网、跨季节储热及热量变换装置为构架的余热共享系统,是实现大规模余热回收的工程路径。该系统通过设定统一的供回水温度(如90℃/20℃),将分散的余热资源接入循环管网,经跨

季节储热平抑供需时空差异,最终由终端热量变换装置输出匹配用户参数的热力。北方地区现已建成总长超 1.66×10^5 km的循环热水骨干管网^[4],具备改造成余热共享管网的基础条件。大温差供热技术的成熟,使循环水温差从传统的60 K(120℃/60℃)拓宽至100 K(120℃/20℃),同等流量下输热能力提升约70%;长距离输热技术的经济输送半径已突破100 km^[2]。太原、银川等地的实践证实了该路线的优越性,赤峰市规划数据表明,依托该系统,至2035年其中心城区供热碳排放强度有望降至现状的1/30^[6]。

各环节固有的温度品位差异与大热网统一供回水温度参数之间的不匹配,构成余热共享系统落地的核心技术瓶颈。系统接入的余热热源品位跨度极大:核电冷端余热、污水及环境热源多处于20~40℃低品位区间,传统风冷数据中心余热通常为25~45℃,液冷数据中心可提升至50~70℃,冶金、化工等工业余热则多分布于60~200℃,部分工艺余热可达数百摄氏度^[7-9]。与此同时,大热网对应的第一级隔压换热站通常需提供70~80℃出水,而地板辐射、低温散热器等末端用热需求可降至35~55℃^[7]。在统一管网供回水温度约束下,低品位热源可能因传热驱动力不足而难以接入,高品位热源则可能因直接混合或降温利用造成品位浪费。类比电力系统依赖变压器调节电压等级,集中供热系统也需配置热泵、吸收式换热、混水调温、分级管网等热量品位调节装置,以消解多源余热与多层级热负荷之间的温度错配^[10]。

现有换热设备有效化解了单一换热环节内部的传热阻碍,但针对管网全局层面的温度品位偏差仍缺乏普适性解决方案。吸收式换热器通过溶液的吸收与蒸发过程在不同温度水平之间传递热量,是大温差供热系统的核心设备^[11-12]。该技术表明,当源汇

两侧平均温度差大于 10 K 时,可无动力实现高效热量传递;当温差不足 10 K 乃至出现逆向时,需辅以电动热泵输入提温动力^[13-14]。然而,当某一换热环节整体的温度品位与管网供回水参数产生显著偏差时,仅依靠设备内部循环已无法奏效,可对管网侧连接方式进行调整。目前,串联梯级利用方式在缓解该类偏差方面取得了一定进展^[14-15],但其要求各环节严格依据温度品位高低顺次排列。这种高度依赖空间布局和管网拓扑的严苛条件,难以适应多热源、多热汇复杂热网的灵活接入与动态运行。

综上,新型零碳热力系统对集中供热管网提出了新的核心挑战:在统一供回水温度的约束下,如何使各类温度品位差异极大的热源与热汇(如核电余热、工业余热、数据中心余热、辐射供暖用户、隔压换热站等)通过同一管网实现高效换热? 现有的串联梯级利用方式要求换热环节按温度品位顺序排布,受空间和拓扑约束较强,难以适应实际工程中的复杂网络。本文针对这一关键问题,提出“温度品位共

享”的概念与 4 类管网连接方式,通过增设旁通管路实现温度品位在相邻换热环节之间的再分配,使品位不足的环节得以实现换热,同时将富余的温度品位沿支路传递给其他环节,为余热共享系统中温度品位的全局调配提供方法学基础。

1 温度品位不匹配问题的提出与量化

余热共享系统要求各热源将管网回水加热至统一的供水温度 t_g ,各热汇提取热量后将循环水冷却至统一的回水温度 t_h 。然而各换热环节实际涉及的温度品位与这对统一温度之间普遍存在偏差,这是余热共享系统面临的核心矛盾。以供回水温度 100 °C/30 °C 的热网为例(图 1),取热侧余热热源温度在 30~200 °C 区间广泛分布,供热侧用户需求温度在 30~100 °C 区间各不相同,品位偏差在管网供回水平均温度两侧大范围离散。根据偏差出现在供热侧还是取热侧、品位偏高还是偏低,温度品位不匹配可归纳为 4 类典型工况(详见表 1)。

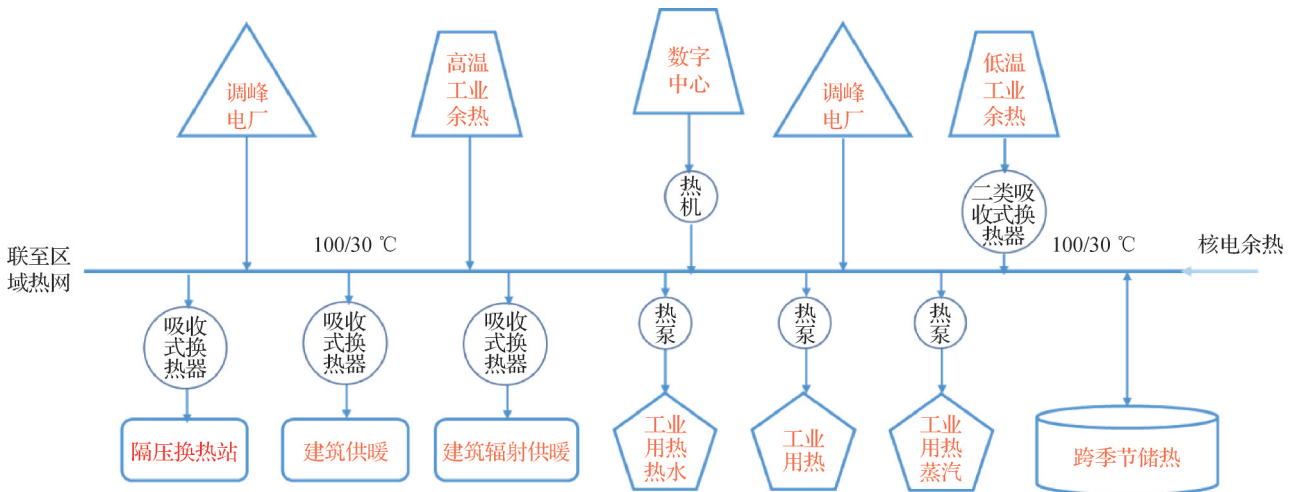


图 1 多热源多热汇在统一供回水温度下的温度品位分布

Fig.1 Temperature grade distribution of multiple heat sources and heat sinks under unified supply/return water temperatures

上述偏差的严重程度取决于换热环节热源或热汇的平均温度与管网供回水平均温度之间的差距。仍以 100 °C/30 °C 热网(管网供回水平均温度为 65 °C)中的 2 个换热环节为例。隔压换热站二次侧要求供回水 75 °C/45 °C,热汇侧平均温度达 60 °C,与管网平均温度仅相差 5 K,传热驱动力严重不足,吸收式换热流程几乎无法实现。而同一支路上的辐射供暖用户二次侧仅需 40 °C/35 °C,热汇侧平均温度仅为 37.5 °C,与管网平均温度相差 27.5 K,大量多余的温度品位在回水掺混中无端耗散。品位不足直接阻断换热,品位富余导致效率下降,而决定问题轻重的就是这个温度差距。

为量化温度品位不匹配的程度,定义源汇侧平均温差为 ΔT_{sh} 。在供热工况下,假定热网供水温度为 t_g ,回水温度为 t_h ,第 i 个用户需求的热汇侧平均温度为 $\bar{T}_{s,i}$,则:

$$\Delta T_{sh,i} = (t_g + t_h) / 2 - \bar{T}_{s,i} \quad (1)$$

取热工况下,若第 i 个热源的平均温度为 $\bar{T}_{s,i}$,则:

$$\Delta T_{sh,i} = \bar{T}_{s,i} - (t_g + t_h) / 2 \quad (2)$$

需说明的是,温度品位共享旨在解决换热环节温度品位与管网参数的匹配性问题,本文的分析以换热环节热负荷给定不变为前提,通过引入旁通管路对相邻换热环节之间的温度品位进行再分配。流量(包括旁通流量比 K_i 、干管流量 G 等)作为实现品位

再分配的调节手段,其取值由第2节各流程的参数设计给出。

根据偏差类型和方向,温度品位不匹配工况可归为4类:供热品位不足、供热品位富余、取热品位不足、取热品位富余(4类工况的特征、典型案例、 ΔT_{sh} 估算值与相应共享流程详见表1)。

ΔT_{sh} 直接反映了在给定热网参数下换热流程实现的难易程度。对于常规板式换热器流程, ΔT_{sh} 在3~

5 K时基本匹配,低于3 K则换热困难;对于基于吸收式换热的大温差流程,由于内部存在二次换热过程, ΔT_{sh} 需达到10~15 K方可无动力实现高效传热,低于10 K时需辅以电动热泵补充驱动力。前述隔压站 ΔT_{sh} 仅为5 K,远低于吸收式换热的匹配值;辐射供暖用户 ΔT_{sh} 达27.5 K,品位严重富余。当管网供回水温度对整体网络合适时,2类问题一般在同一支路中并存,这为通过品位的再分配同时解决2类问题提供了可能。

表1 4类温度品位不匹配工况及对应共享流程

Tab.1 Four types of temperature grade mismatch conditions and the corresponding sharing configurations

问题类型	特征	典型案例	ΔT_{sh} 估算值	流程名称	额外管路来源	实现效果	对后续流程的影响
供热品位不足	供热用户需求温度品位 > 网侧供热品位	隔压站、非流程工业高温需求	-20~5 K	供热上三管	供水管	引入较高温旁通水,提升等效热源平均温度	降低后续供水温度(借品位)
供热品位富余	供热用户需求温度品位 < 网侧供热品位	地板辐射供暖	20~30 K	供热下三管	回水管	引入较低温旁通水,降低等效热源平均温度	降低回水温度(还品位)
取热品位不足	取热热源温度品位 < 网侧温度品位	化工厂低温余热	-15~10 K	取热下三管	回水管	引入较低温旁通水,降低等效热汇平均温度	提升后续回水温度(借品位)
取热品位富余	取热热源温度品位 > 网侧温度品位	电厂/化工厂中高温部分余热	15~25 K	取热上三管	供水管	引入较高温旁通水,提升等效热汇平均温度	降低后续供水温度(还品位)

2 通过旁通管路实现温度品位的再分配

2.1 温度品位共享的基本思想——品位的借与还

温度品位共享的核心是通过增设旁通管路改变局部换热环节的温度边界条件,实现相邻环节之间传热驱动力的再分配。类比吸收式换热技术在一次网与二次网流量极不匹配时,通过梯级利用一次网热量实现流量的重新分配^[10];应对温度品位不匹配,需要采用类似的调配思路。具体做法是:从供水管或回水管增设一根旁通管接入特定换热环节,定量引入额外水流参与换热,改变该环节热源侧或热汇侧的平均温度,使偏离的 ΔT_{sh} 回到可实现的范围。

这种管网连接方式调整的本质是相邻换热环节之间温度品位的“借”与“还”。品位不足的环节通过旁通管路从后续流程获取额外的温度驱动力,后续流程的供水温度或回水温度因此偏离设计值,称为“借”品位;品位富余的环节则将多余的驱动力经旁通管路释放给后续流程,称为“还”品位。在同一热网支路中,品位不足环节的借取与品位富余环节的补还构成平衡,使支路总传热驱动力不增不减,只是从富余处调配到了匮乏处。针对供热与取热工况下的4类品位偏差,分别对应供热上三管、供热下三管、取热下三管、取热上三管4类管网连接方式,以下依

次阐述。

2.2 供热品位不足的解决——供热上三管流程

第1节的分析表明,在100℃/30℃热网中,隔压换热站二次侧要求供水75℃、回水45℃,热汇侧平均温度高达60℃。受限于管网供回水平均温度仅为65℃, ΔT_{sh} 仅为5 K,传热驱动力严重不足,吸收式换热流程难以实现。供热上三管流程的做法是:在常规流程外增设一根旁通管,截留该换热环节中部分换热后的管网水,使其不再排入回水主管,而是以较高的温度 $t_{g,i}$ 直接回流至供水主管(图2)。

旁通管的引入将单一的 $t_g \rightarrow t_h$ 供水路径转化为2股热源并联供热:一股是原始的 $t_g \rightarrow t_h$ 主流程,另一股是 $t_g \rightarrow t_{g,i}$ 的旁通流程。由于旁通流程的出水温度 $t_{g,i}$ 显著高于设计回水温度 t_h ,这股流体的平均温度更高,拉高了整个环节热源侧的综合平均温度, ΔT_{sh} 随之增大。仍以隔压站为例,通过调节旁通支路的流量分配,可将原本仅5 K的 ΔT_{sh} 提升至10 K以上,满足吸收式换热的要求,原本无法实现的换热得以进行。

旁通回水以温度 $t_{g,i}$ 汇入供水主管并与原供水掺混后,后续流程实际获得的供水温度将低于设计值 t_g 。这就是“借”品位的代价:隔压站环节 ΔT_{sh} 的提升,必然伴随后续流程 ΔT_{sh} 的降低。因此,采用供热上三

管流程的前提是后续流程具有足够的品位富余来承受供水温度的下降。第1节的例子已经表明,同一支路上的辐射供暖用户 ΔT_{sh} 高达 27.5 K,品位大量富余,完全有能力承受隔压站环节借走的那部分品位。定性而言,需要借品位的环节在热网支路中的位置越靠前、换热量占支路总换热量的比例越小,对后续流程供水温度的影响越小,越适合采用。

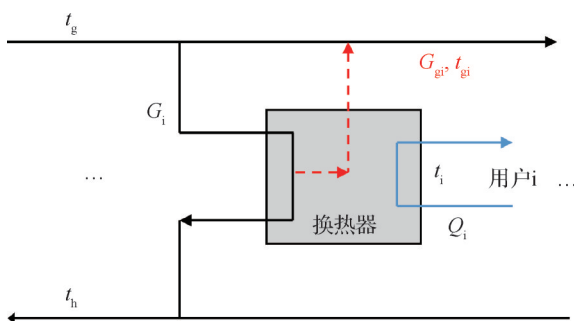


图2 供热上三管流程

Fig.2 Heating-supply upper-three-pipe configuration

2.3 取热品位不足的解决方式——取热下三管流程

取热下三管流程与供热上三管在热力学机制上构成镜像对称:供热上三管是在热源侧引入较高温旁通水形成并联热源侧,提升该环节等效热源平均温度;取热下三管则是在热汇侧引入较低温旁通水形成并联热汇侧,降低该环节等效热汇平均温度。2种方式方向相反,但目的相同,都是增大 ΔT_{sh} ,使品位不足的换热得以实现。以具体场景说明:在 100 °C/30 °C 热网中,某化工厂排放的低温余热进出口温度为 60 °C/50 °C,热源平均温度仅为 55 °C。管网供回水平均温度为 65 °C,热源温度反而低于热网平均温度, ΔT_{sh} 为 -10 K,传热驱动力出现逆向,常规流程无法将该部分余热接入管网。这是“双碳”转型中大量低温工业余热接入集中供热管网时面临的典型困境。

取热下三管流程的做法是:增设一根旁通管,从回水主管引入部分低温回水作为额外的热汇参与取热换热,换热后的旁通水以较高温度 $t_{h,i}$ 回流至回水主管(图3)。这将单一的 $t_h \rightarrow t_g$ 取热路径转化为2股热汇并联取热:一股是原始的 $t_h \rightarrow t_g$ 主流程,另一股是 $t_{h,i} \rightarrow t_g$ 的旁通流程。由于旁通流程的出水温度 $t_{h,i}$ 低于设计供水温度 t_g ,这股流体的平均温度更低,拉低了整个环节热汇侧的综合平均温度, ΔT_{sh} 随之增大。仍以前述化工厂余热为例,通过调节旁通支路的流量分配,可显著增大 ΔT_{sh} ,使低温余热的接入变为可行。

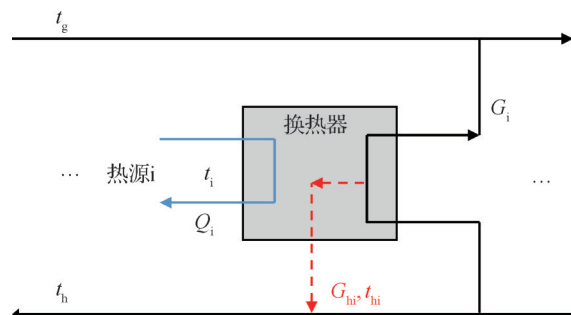


图3 取热下三管流程

Fig.3 Heat-recovery lower-three-pipe configuration

与供热上三管类似,取热下三管同样需要“借”品位,只是方向相反。旁通水换热后以温度 $t_{h,i}$ 汇入回水主管,导致后续流程的回水温度高于设计值 t_h 。供热上三管是降低了后续的供水温度,取热下三管则是抬高了后续的回水温度,两者均会导致后续流程 ΔT_{sh} 的降低。因此,采用取热下三管流程的前提同样是后续流程具有足够的品位富余。在实际热网中,同一支路上一般同时存在低温余热和高温余热:低温余热环节通过取热下三管借来的品位,恰好可以由高温余热环节的品位富余来补偿。

2.4 品位富余的对称处理——供热下三管与取热上三管流程

与品位不足导致换热无法实现不同,品位富余带来的问题是效率损失,使多余的传热驱动力以掺混的形式无端耗散。供热下三管流程专门应对这类问题。当用户需求温度较低(如辐射供暖仅需 30~45 °C),热网供热品位明显富余时,从回水管引入低温回水作为额外热源参与供热,降低该环节的热源平均温度,使 ΔT_{sh} 减小至合理范围(图4)。换热后回水温度低于设计回水温度 t_h ,相当于将多余的品位“还”给了后续流程。由于只是降低了回水温度,不会对后续流程产生不利影响,只要存在品位富余即可采用。

取热上三管流程与供热下三管镜像对称,解决

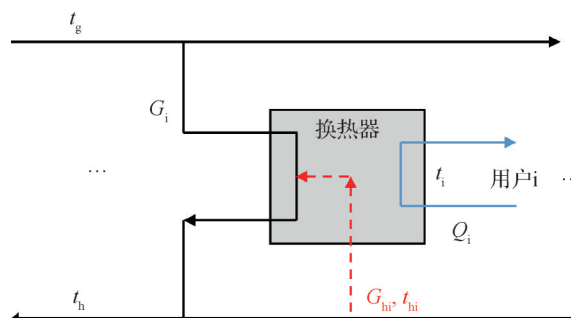


图4 供热下三管流程

Fig.4 Heating-supply lower-three-pipe configuration

取热品位富余的问题。当余热热源温度品位较高, 远超热网取热需求时, 从供水管引入高温水作为额外热汇, 提升热汇平均温度, 使 ΔT_{sh} 降至合理范围 (图5)。该流程降低了后续流程的供水温度需求, 同样是将品位“还”给后续流程, 不会产生不利影响。

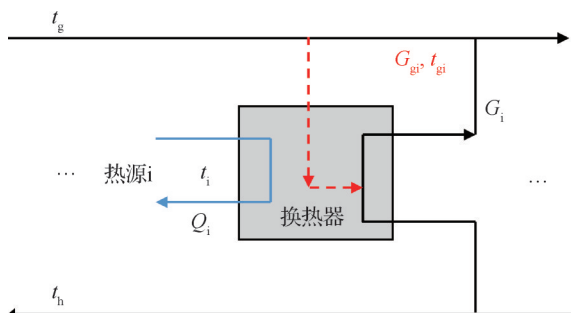


图5 取热上三管流程

Fig.5 Heat-recovery upper-three-pipe configuration

至此, 4类流程构成了一个完整的框架。供热上三管与取热下三管解决品位不足问题, 是“借”品位的流程, 会影响后续流程; 供热下三管与取热上三管解决品位富余问题, 是“还”品位的流程, 有利于后续流程。在同一热网支路中, 品位不足环节借来的品位, 恰好由品位富余环节还回, 支路总的传热驱动力不增不减, 只是从富余处调配到了缺乏处。

以上4类流程从管网连接方式的角度给出了温度品位再分配的完整框架。下一节将从热力学层面论证该再分配使掺混损失严格减小的机制, 说明其设备实现方式, 并给出工程参数设计方法。

3 热力学分析与参数设计

温度品位共享通过旁通管路将掺混位置从回水侧转移至供水侧 (或反之), 但总损失是否因此减小, 需要从热力学层面给出严格论证。本章首先依托火积耗散理论, 阐明大温差掺混向小温差掺混转化的物理机制; 给出掺混损失随用户温度需求的定量变化规律; 继而以吸收式换热器为例说明上述流程的设备实现方式; 最后针对工程需求最为迫切的供热上三管与取热下三管2类流程, 给出参数设计方法。

3.1 掺混损失的转化机制

火积耗散是量化传热过程不可逆损失的指标, 对于等压掺混过程, 火积耗散率正比于掺混温差的平方与流量的乘积^[12]。以下以供热上三管流程为例, 借助 $T-Q$ 图剖析温度品位共享减小掺混损失的物理机制。

设热网供水温度为 t_g 、回水温度为 t_h , 管网水流经第 i 个供热环节后的实际出水温度为 $t_{h,i}$ 。当用户需

求温度较高时, $t_{h,i}$ 显著高于 t_h 。若未采用品位共享流程, 该股高温回水直接汇入回水主管, 与温度为 t_h 的回水发生掺混, 形成较大的掺混损失。设该环节的管网水流量为 G_i , 回水主管流量为 G_h , 比定压热容为 c_p , 则回水掺混过程的火积耗散为:

$$\Phi_{\text{mix, h}} = \frac{1}{2} c_p G_i (t_{h,i} - t_h)^2 \frac{G_h}{G_h + G_i} \quad (3)$$

式(3)表明, 掺混火积耗散正比于掺混温差 $(t_{h,i} - t_h)$ 的平方, 意味着温差越大, 损失越大。若能将该大温差掺混拆分为2处较小温差的掺混, 由于耗散与温差平方成正比, 总损失将严格减小。供热上三管正是实现这一拆分的管网连接方式。

图6直观展示了该转化过程。图6(a)为未采用品位共享时的回水掺混方式: 管网水从 t_g 冷却至实际出水温度 $t_{h,i}$ 后排入回水管, 与温度 t_h 的回水发生掺混。用户需求温度较高, $t_{h,i}$ 显著高于 t_h , $T-Q$ 图右下方形成较大的阴影三角形区域, 其面积正比于 $(t_{h,i} - t_h)^2$, 即为回水掺混导致的火积耗散。 $t_{h,i}$ 与 t_h 的差距越大, 该三角形面积越大, 掺混损失越严重。

图6(b)为采用供热上三管后的双侧调配方式。管网水分为2股: 旁通股以 Q_u 的换热量从 t_g 冷却至 $t_{g,i}$ 后返回供水管, 主股以 $(Q_i - Q_u)$ 的换热量继续冷却至接近 $t_{h,0}$ 后排入回水管。回水侧的出水温度从原来的 $t_{h,i}$ 大幅降至 $t_{h,0}$, 掺混温差显著缩小, 原来右下方的大三角形近乎消失。与此同时, 供水侧因旁通水以 $t_{g,i}$ 汇入 t_g 的供水管, 在左上方形成一个新的阴影三角形, 面积正比于 $(t_g - t_{g,i})^2$ 。由于 $(t_g - t_{g,i})$ 远小于原来的 $(t_{h,i} - t_h)$, 新三角形面积远小于原三角形。对比图6(a)和(b)可知: 右下方的大三角形被左上方的新三角形替代, 掺混损失严格减小。其物理原因是: 总换热量不变, 但掺混从1处大温差集中发生变为2处小温差分散发生, 由于火积耗散正比于温差的平方, 2处小温差掺混的损失之和必然小于原来1处大温差掺混的损失。

以下对上述定性判断给出定量验证。引入供热上三管流程后, 环节管网出水分2股: 主股冷却至接近 t_h 后排入回水主管, 旁通股以较高温度 $t_{g,i}$ 排入供水主管。设旁通流量为 $G_{s,i}$, 供水主管流量为 G_s , 则供水侧因旁通汇入产生的火积耗散为:

$$\Phi_{\text{mix, s}} = \frac{1}{2} c_p G_{s,i} (t_g - t_{g,i})^2 \frac{G_s}{G_s + G_{s,i}} \quad (4)$$

在保持热源侧平均换热温度不变的约束下, 将式(3)与式(4)对比: 由于旁通温度 $t_{g,i}$ 介于 t_g 与 $t_{h,i}$ 之间 (即 $t_g > t_{g,i} > t_{h,i}$), 供水侧掺混温差 $(t_g - t_{g,i})$ 必然小于原回水侧掺混温差 $(t_{h,i} - t_h)$; 同时旁通流量 $G_{s,i}$ 小于原环节

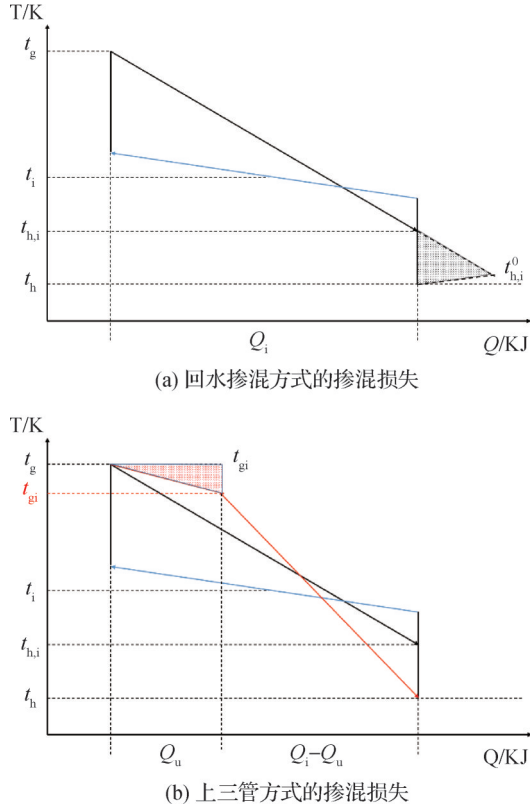


图6 采用供热上三管前后的T-Q图对比

Fig.6 Comparison of T-Q diagrams before and after adopting the heating-supply upper-three-pipe configuration

流量 G_i 。2个因素叠加,使得式(4)的值严格小于式(3)。该结论成立需同时满足2个条件:

条件一,旁通温度高于原回水掺混的算术平均温度:

$$t_{g,i} > \frac{t_{h,i} + t_h}{2} \quad (5)$$

条件二,供水侧掺混温差小于原回水侧掺混温差:

$$t_g - t_{g,i} < t_{h,i} - t_h \quad (6)$$

当上三管流程使主股回水温度降至 t_h 时,旁通股承担了全部的高温回水,其温度 $t_{g,i}$ 必然高于 $(t_{h,i} + t_h)/2$,条件一自动满足;同时供水侧掺混温差 $(t_g - t_{g,i})$ 取代了原来的回水侧掺混温差 $(t_{h,i} - t_h)$,在 $t_{g,i} > t_{h,i}$ 的正常工况下条件二亦自然成立。

2个条件的物理意义是:供热上三管将原本集中在回水侧的大温差掺混 $(t_{h,i} - t_h)$ 转化为供水侧的小温差掺混 $(t_g - t_{g,i})$ 。由于火积耗散正比于温差的平方,小温差掺混的损失必然小于大温差掺混。综上所述,温度品位共享的热力学机制可以概括为:将原本集中在回水侧的大温差掺混 $(t_{h,i} - t_h)$ 转化为供水侧的小温差掺混 $(t_g - t_{g,i})$,由于火积耗散正比于温差的平方,总掺混损失因此严格减小。

上述机制对取热下三管同样成立。取热下三管将原本集中在回水管的大温差掺混转化为供水侧的小温差掺混,转化方向与供热上三管相同,但触发条件互为对称——供热上三管应对热汇品位不足(用户需求温度高),取热下三管应对热源品位不足(余热温度低),其推导逻辑与成立条件互为镜像。

3.2 掺混损失随用户温度需求的定量变化

掺混火积耗散正比于温差的平方,由此可以预判:用户侧平均温度越高,品位不足越严重,上三管方式相对于回水掺混方式的优势越大。以供回水温度 $100\text{ }^\circ\text{C}/30\text{ }^\circ\text{C}$ 的热网为例进行验证。设源汇侧换热平均温差固定为 10 K ,上网温度固定为 $98\text{ }^\circ\text{C}$,图7给出了回水掺混方式的掺混火积耗散 $\Phi_{\text{mix},h}$,以及供热上三管方式在旁通流量比 K_i 分别取 0.7 和 0.9 时的总掺混火积耗散 Φ_{mix} 随用户侧平均温度的变化。

3条曲线随用户侧平均温度升高呈现出清晰的分化。当用户侧平均温度接近热网供回水平均温度时,品位匹配良好,回水掺混损失本身很小,常规两管方式已足够;随用户侧平均温度升高、品位不足加剧,回水掺混损失急剧增大,而上三管方式的增速远为平缓,两者差距迅速拉开; K_i 越高,上三管的掺混损失越小, $K_i=0.9$ 时整个温度范围内均显著优于回水掺混方式。

品位不足越严重的换热环节,采用温度品位共享的减损收益越大。该定量结果与图6中三角形面积随温差平方增长的定性判断一致。

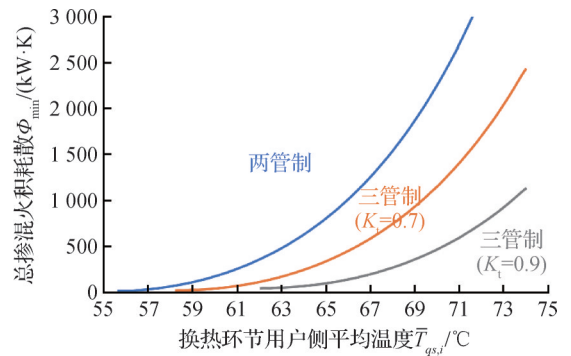


图7 100 °C/30 °C热网中掺混火积耗散随用户侧平均温度变化的对比

Fig.7 Comparison of mixing entransy dissipation varying with the user-side mean temperature in a 100 °C/30 °C network

3.3 吸收式换热器对温度品位共享流程的实现

3.1 和 3.2 节从管网连接方式的角度阐明了温度品位共享的热力学机制。本节以吸收式换热器为例,说明图2供热上三管与图3取热下三管的设备实

现方式。

吸收式换热器由发生器、冷凝器、板式换热器、蒸发器与吸收器5个换热部件组成^[11]。在常规吸收式换热流程中,管网供水以温度 t_g 进入,依次流经发生器、板式换热器和蒸发器,全部冷却至接近回水温度 t_h 后排入回水管;用户侧二次水则通过冷凝器和吸收器获取热量,被加热至所需温度。

实现供热上三管时,只需在上述流程中增设1根旁通管路(图8)。管网水流经发生器后,一部分不再进入后续的板式换热器和蒸发器,而是以较高温度 $t_{g,i}$ 直接返回供水主管。这股旁通水正是第2节所述旁通流程的物理载体,即管网水在发生器中释放部分热量后即返回供水管,拉高了热源侧综合平均温度,使 ΔT_{sh} 增至吸收式换热可实现的范围。其余管网水继续依次流经板式换热器和蒸发器,冷却至 t_h 后排入回水管,完成主流程换热。旁通流量与主流程流量之比 K_i 由外部温度品位共享的参数需求确定。

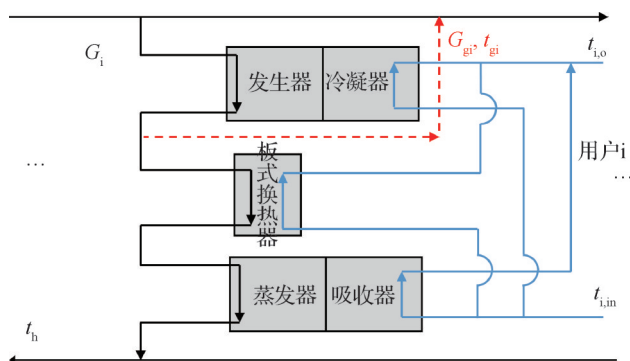


图8 供热上三管的吸收式换热器内部流程

Fig.8 Internal flow arrangement of the absorption heat exchanger for the heating-supply upper-three-pipe configuration

取热下三管的设备实现与供热上三管构成镜像(图9)。管网回水以温度 t_h 进入,依次流经蒸发器、吸收器等部件,被加热至供水温度 t_g 后排入供水管。增设旁通管路后,管网水流经发生器和冷凝器后,一部分以较低温度 $t_{h,i}$ 直接返回回水主管,作为额外的低温热汇降低热汇侧综合平均温度;热源侧二次水通过蒸发器和吸收器释放热量。2类流程在设备内部的旁通位置恰好互换:供热上三管旁通发生器出水至供水管,取热下三管旁通发生器出水至回水管,对称关系与第2节管网层面的分析完全一致。

上述流程在已有吸收式换热器基础上仅需增设1根旁通管路和1台循环泵即可实现,不要求额外的复杂设备。当温度品位偏差更为严重时,可在此基础上额外配置独立的吸收式热泵,或通过设计多级

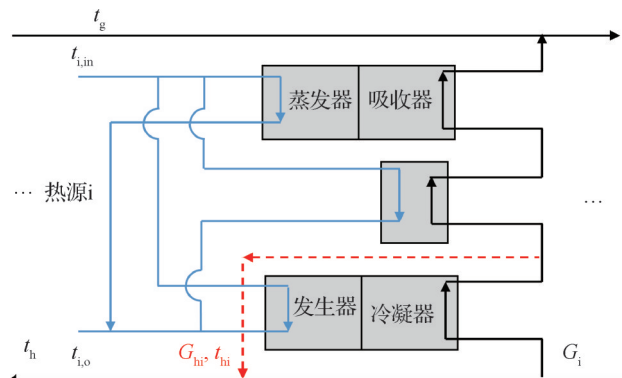


图9 取热下三管的吸收式换热器内部流程

Fig.9 Internal flow arrangement of the absorption heat exchanger for the heat-recovery lower-three-pipe configuration

热泵以获得更大的设计自由度^[16],相关内容不在本文讨论范围之内。

工程实施层面,温度品位共享流程依靠旁通管路与循环泵实现,所需旁通流量由具体工况下的品位偏差决定(详见3.4节的参数设计示例);相应的水泵增量功耗与常规换热站调节装置同量级,从流程构成看不涉及新增大型换热设备;旁通泵功和水力平衡需结合具体管径、阻力特性与控制策略进一步核算,限于本文篇幅不再展开。

3.4 参数设计要点与算例

前述分析表明,温度品位共享可严格减小掺混损失,但在工程设计中旁通流量的选取受后续流程承受能力的约束。以供热上三管为例,参数设计需把握3个要点:1)旁通流量比的确定。旁通流量比 K_i 定义为旁通流量与该换热环节总管网流量之比($K_i = G_{gi}/G_i$),其取值由 ΔT_{sh} 的设计目标(通常不低于10 K)与热平衡方程联立求解;2)后续流程的承受能力。旁通水以温度 $t_{g,i}$ 汇入供水主管后,干管供水温度由 t_g 降至 $t_{g'}$, $t_{g'}$ 不得低于后续流程所需的最低供水温度;3)适用边界。流程的适用范围不受 ΔT_{sh} 正负号限制,真正的约束是 $t_{g'}$:当 $t_{g'}$ 降至后续流程无法正常运行的水平时,品位借取达到极限。

以100℃/30℃热网某支路为例(图10):支路串联3个换热环节,热负荷 $Q_1=100$ kW、 $Q_2=Q_3=200$ kW,对应 ΔT_{sh} 依次为5 K、17.5 K、17.5 K,第一个环节品位不足最严重。对该环节采用供热上三管,按 $\Delta T_{sh} \geq 10$ K反推得 $K \approx 0.308$, $t_{g,i}=95$ ℃(取代表值),后续2个环节可正常运行。

上述算例仅给出单一工况下的可行性。为揭示温度品位共享对整体回水温度的影响规律,以原始回水掺混温差 $\Delta T_{h,i}^0$ 与单环节换热量占比 r_i 为变量进

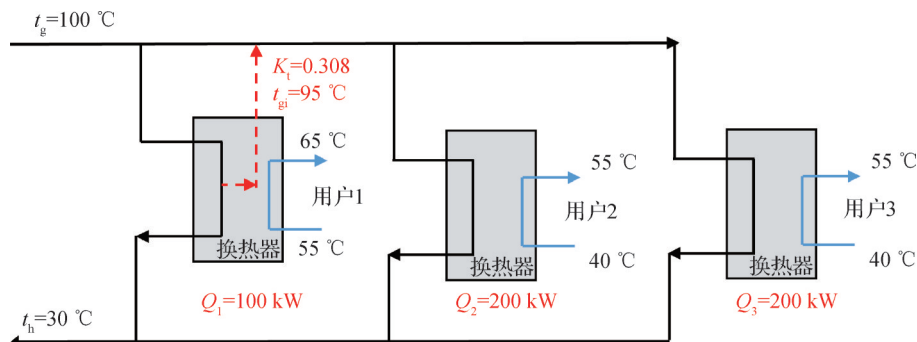


图 10 供热上三管参数选取算例

Fig.10 Design example of parameter selection for the heating-supply upper-three-pipe configuration

行参数化分析。在掺混损失减小量 $\Delta\Phi_{\text{mix}}$ 与支路总换热量 Q_{tot} 之间,整体回水温度降低量 $|\Delta t_h|$ 满足以下关系:

$$|\Delta t_h| = -\Delta\Phi_{\text{mix}}/Q_{\text{tot}} \quad (7)$$

由此可参数化地得到图 11。图 11 表明,原始回水掺混温差越大、单环节换热量占比越大,温度品位共享带来的整体回水温度降低越显著。在大温差低回水的零碳供热路线下,当供水温度和输热量一定时,回水温度降低有助于增大输配温差、降低所需循环流量,并在管径与设备规模不变的前提下提升管网输配能力,为扩大单一管网可接入的多源余热规模提供条件。这是温度品位共享在工程层面的核心价值。前述算例工况下,回水温度可降低 1.57 K,与图 11 解析关系一致。

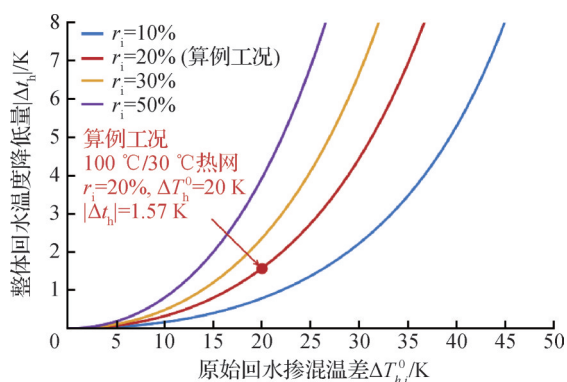


图 11 温度品位共享对整体回水温度的影响

Fig.11 Effect of temperature grade sharing on the overall return water temperature

4 结论

针对换热环节温度品位与管网参数之间的偏差问题,本文提出温度品位共享的概念与 4 类管网连接方式(供热上三管、供热下三管、取热下三管、取热上三管)。通过增设旁通管路,品位不足的环节从后续流程借取驱动力,品位富余的环节将多余驱动力还

给后续流程,支路总传热驱动力守恒。该方式不要各环节按温度品位高低顺次排列,突破了既有串联梯级利用对空间布局和管网拓扑的依赖。

火积耗散分析表明,温度品位共享将大温差掺混转化为小温差掺混,掺混损失严格减小。以吸收式换热器为例的分析表明,4 类流程可在已有设备基础上仅通过增设旁通管路即可实现,无需引入新设备类型。基于火积耗散减小与支路总换热量之间的计算关系,在固定旁通回水温度时,给出了温度品位共享对整体回水温度影响的定量关系(图 11)。在大温差低回水路线下,当供水温度和输热量一定时,回水温度降低有助于增大输配温差、降低所需循环流量,从而在管径与设备规模不变前提下提升管网输配能力,并为扩大单一供热系统可接入的多源余热规模提供条件。典型边界(单环节占比 20%、原始回水掺混温差 20 K)下,回水温度可降低 1.57 K,与图 11 关系一致。

综上所述,4 类温度品位共享流程覆盖了余热共享系统中供热侧/取热侧、品位不足/品位富余 4 种典型偏差,为温度品位的全局调配提供了方法学基础与工程实现路径。本文重点阐明其热力学机制、设备实现方式和参数设计方法;实际工程运行验证、泵功增量、水力平衡、节能降本效果及控制策略仍需结合具体项目进一步开展定量研究。

参考文献

- [1] 李强. 政府工作报告——2026 年 3 月 5 日在第十四届全国人民代表大会第四次会议上[R]. 北京: 人民出版社, 2026. (Li Qiang. Report on the work of the government — Delivered at the fourth session of the 14th National People's Congress on March 5, 2026 [R]. Beijing: People's Publishing House, 2026.)
- [2] 江亿, 付林, 夏建军, 等. 构建新型零碳热力系统[J]. 中国工程科学, 2025, 27(5): 1-18. (Jiang Yi, Fu Lin, Xia Jianjun, et al. Building a zero-carbon thermal system

- [J]. Strategic Study of Chinese Academy of Engineering, 2025, 27(5): 1-18.)
- [3] 江亿, 胡珊. 中国城乡能源供给系统的低碳途径[J]. 科技导报, 2023, 41(16): 6-22. (Jiang Yi, Hu Shan. The low carbon transition approach for China's urban and rural energy supply systems[J]. Science & Technology Review, 2023, 41(16): 6-22.)
- [4] 中国城镇供热协会. 中国城镇供热 2025 年度发展报告[R]. 北京: 中国城镇供热协会, 2025. (China District Heating Association. 2025 Annual development report on China's urban district heating[R]. Beijing: China District Heating Association, 2025.)
- [5] 中国清洁供热产业委员会. 中国清洁供热产业发展报告(2024)[R]. 北京: 中国建筑节能协会, 2024. (China Clean Heating Industry Committee. China clean heating industry development report (2024) [R]. Beijing: China Association of Building Energy Efficiency, 2024.)
- [6] 方豪, 黄伟, 江亿, 等. 基于工业余热与可再生能源耦合的赤峰市低碳供热研究[J]. 暖通空调, 2024, 54(3): 144-149. (Fang Hao, Huang Wei, Jiang Yi, et al. Low carbon heating in Chifeng based on coupling of industrial wasteheat and renewable energy [J]. Journal of HV&AC, 2024, 54(3): 144-149.)
- [7] Lund H, Werner S, Wiltshire R, et al. 4th Generation District Heating (4GDH) Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems[J]. Energy, 2014, 68: 1-11.
- [8] Jouhara H, Khordehghah N, Almahmoud S, et al. Waste heat recovery technologies and applications [J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2018, 6: 268-289.
- [9] Yuan Xiaolei, Liu Jiayi, Sun Sijia, et al. Data center waste heat for district heating networks: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2025, 219: 115863.
- [10] Fu Lin, Li Yonghong, Wu Yanting, et al. Low carbon district heating in China in 2025- a district heating mode with low grade waste heat as heat source [J]. Energy, 2021, 230: 120765.
- [11] 谢晓云, 江亿. 吸收式热泵与吸收式换热器[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2024. (Xie Xiaoyun, Jiang Yi. Absorption heat pumps and absorption heat exchangers [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2024.)
- [12] GB/T 39286—2020 吸收式换热器[S]. (GB/T 39286—2020 Absorption heat exchanger[S].)
- [13] 祝侃. 降低供热系统能源品位损失的分析与研究[D]. 北京: 清华大学, 2014. (Zhu Kan. Analysis and research on reducing the energy-grade loss of district heating systems [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.)
- [14] 方豪, 李叶茂, 夏建军, 等. 低品位工业余热应用于城镇集中供暖系统若干关键问题及解决方法[J]. 暖通空调, 2016, 46(12): 15-22. (Fang Hao, Li Yemao, Xia Jianjun, et al. Key issues and solutions of low-grade industrial waste heat applied to urban centralized heating systems[J]. Journal of HV&AC, 2016, 46(12): 15-22.)
- [15] 李叶茂. 降低热网回水温度的技术途径研究[D]. 北京: 清华大学, 2019. (Li Yemao. Research on technical approaches to reducing return water temperature of district heating networks [D]. Beijing: Tsinghua University, 2019.)
- [16] Hu Jingtong, Xie Xiaoyun, Jiang Yi. Design and experimental study of a second type absorption heat exchanger [J]. International Journal of Refrigeration, 2020, 118: 50-60.

通信作者简介

江亿,男,中国工程院院士,教授,博士生导师,清华大学建筑节能研究中心,E-mail:jiangyi@tsinghua.edu.cn。研究方向为面向碳中和的政策与关键技术、城市能源系统、建筑节能等,

About the corresponding author

Jiang Yi, male, Academician of the Chinese Academy of Engineering, professor, Ph. D. supervisor, Building Energy Research Center, Tsinghua University, E-mail: jiangyi@tsinghua.edu.cn. Research fields: policies and key technologies toward carbon neutrality, urban energy systems, and building energy efficiency.