

# 低位烟气余热深度回收利用状况述评( II )

## ——传热过程与技术应用研究

吴华新

(清华大学 建筑技术科学系 北京 100084)

**摘 要:**以热力学为指导,通过利用高效的传热技术与吸收式热泵技术的耦合,对低位烟气余热“质”和“量”分控回收,可实现低位烟气余热的深度回收与梯级利用。应用于高水蒸气含量的燃油、燃气设备的烟气余热回收,不仅回收显热,还深度回收其潜热,综合效益最佳。高效的传热技术可减少余热与利用介质间的传热温差而减少传热过程的不可逆损失是最为核心的技术问题,对其进行分析探讨,有利于高效、节能、环保的低位烟气余热深度回收与利用技术的发展。

**关 键 词:**烟气余热;热回收;烟气特性;质量分控

中图分类号:TK11 文献标识码:A

### 引 言

利用低位烟气余热需要技术的进步与创新。以高效传热技术为核心,吸收式热泵为平台组建的低位烟气余热梯级回收与利用系统,采取“质”和“量”分控的方式,不仅解决了低位烟气余热回收过程的技术难题——低温源的问题,而且实现了低位烟气余热回收与利用过程中“质”与“量”的统一<sup>[1]</sup>。低位烟气余热深度回收对设备热效率提高的幅度为:对于小型燃煤锅炉,排烟温度每降低 15~20℃;或大型燃煤锅炉,排烟温度每降低 15℃,锅炉热效率提高大约 1%;对于燃气锅炉,按理论空气量计算时,在未发生冷凝的条件下,排气温度每降低 20℃,燃料的利用率可以提高大约 2%;在发生冷凝的条件下,当烟气温度从 60℃降低到 40℃时,燃料的利用率能提高大约 8%<sup>[2]</sup>。

可见,在深度回收与利用燃料的烟气低位余热过程中,对于不同燃料的烟气应该加以区别。燃油、燃气窑炉与热能动力设备的烟气不仅回收显热,还应该回收烟气中水蒸气的冷凝潜热,对提高液体、气体燃料的利用率具有重要意义。

### 1 低位烟气余热深度回收策略

固体燃料烟气低位余热回收是以回收烟气的显热为主,回收前需要除尘、脱硫,减弱对换热表面的磨损与腐蚀。液体与气体燃料的低位烟气余热回收时应该显热与潜热并重。尤其是对于天然气,其主要成份是甲烷,燃烧后的排气腐蚀性最弱,深度回收利用最容易实现。且其中含有大量水蒸气,水蒸气温度高时在烟气中以气态的形式存在,如果使其全部或部分冷凝,天然气的利用率就会迅速增加。余热回收时,若仅从热力学第一定律能量在数量上的守恒关系分析,会掩盖热能在品质质量上的差异。付林等人采用了吸收式的气-水换热技术(Absorption heat exchange)<sup>[3]</sup>,跳出仅回收烟气冷凝热的“量”或“质”的单一思路,综合考虑烟气在冷凝之前的高品位余热,可以将高于冷凝温度的高品位的烟气余热与低品位的冷凝余热综合考虑,形成一种一体化的烟气温度梯级利用方式,即利用高品位的烟气余热作为驱动热源,采用吸收式循环,从烟气中回收部分低品位的冷凝热,供应一种中间温度梯级的热水。

图 1 是对上述理论进一步细化,根据天然气的排气温度与成份特征、现有可利用的回收传热技术和吸收式热泵参数特点以及为匹配热能利用的温度参数而制定的,将天然气烟气余热深度回收至环境温度附近的温降过程与相关技术流程图。图中以中间的粗实线将烟气回收利用分为了两侧,即:烟气余热的输入侧与烟气余热的输出侧。

将 170℃ 天然气烟气分四段提取至环境温度 20℃。

收稿日期:2011-05-12; 修订日期:2011-07-06

基金项目:国家重点基础研究发展计划基金资助项目(2010CB227305)

作者简介:吴华新(1975-),男,黑龙江哈尔滨人,清华大学博士后。

第一段采用热管传热技术将 170℃ 烟气降至 100℃ ,制取 130℃ 热水或蒸汽作为吸收式热泵的驱动源 ,实现余热的动力回收。

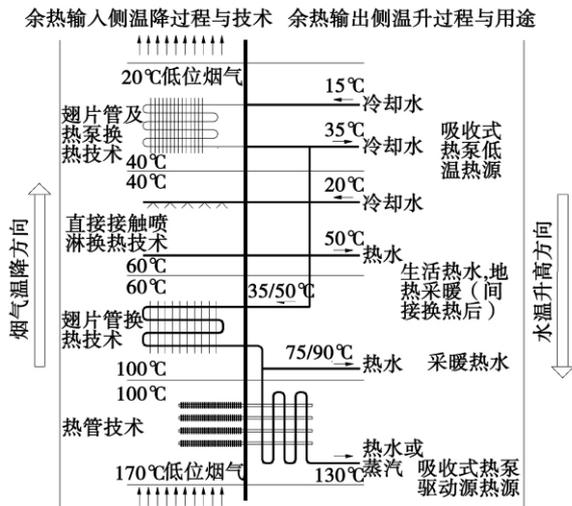


图 1 天然气烟气余热回收至环境温度的过程与技术

Fig.1 Process of and technology for recovering the waste heat from flue gas produced by burning nature gas to the ambient temperature

第二段采用翅片管换热技术将 100℃ 烟气温降至 60℃ ,制取 75 /90℃ 的热水供采暖使用或进入到下一级继续升温 ,实现余热的热能回收。

第三段采用直接接触式换热技术将 60℃ 烟气温降至 40℃ ,主要回收烟气的潜热 ,吸收潜热的热媒水来自于吸收式热泵的冷却水 ,制取 50℃ 的热水 ,经过间接换热后可以供生活热水使用或进入下一级继续升温 ,实现余热的潜热回收。

第四段采用翅片管换热技术或热泵相关技术 ,利用热泵的冷却水的低温 ,将 40℃ 烟气温降至 20℃ ,用于回收热量的 15℃ 低温水来自于吸收式热泵 ,升温后的冷却水作为热泵低温热源吸收热量 ,实现了余热的深度回收。

上述以吸收式热泵技术为平台的 ,分四段对天然气烟气余热的回收与利用 ,对天然气烟气余热按温度的逐级实现了动力回收、热回收、潜热回收与深度至环境温度附近的热回收。从温度参数上实现了天然气烟气余热的梯级回收与利用。

为减小传热过程的不可逆损失 ,将同级间的传热温差控制较小。因此 ,回收过程中应采用各种高效的换热器。例如 ,采用高效的翅片管式、热管式、板式换热器等间接接触方式的换热器;或采用喷淋

塔、填料塔、吸收塔等直接接触式的换热器。前者使用最为普遍 ,相关的研究与技术应用最多 ,后者因其还具有环保减排的特性而得到了日益广泛的应用。

## 2 间接接触换热方式的烟气余热回收

### 2.1 基于翅片管方法的热回收

翅片通过扩大换热表面积 ,减小热阻 ,强化气态流体侧对流换热等成为余热回收的最有效的方法。铜管、铝翅片的翅片管换热器在暖通空调领域具有广泛的应用<sup>[4]</sup>。由于低位烟气余热回收工况为:烟温高于 100℃ ,流速 4 ~ 8 m/s ,水蒸气含量 5 ~ 15% 之间<sup>[5]</sup> ,这与空调工况具有明显的不同 ,因此 ,低位烟气余热回收常采用整体翅片管、高频焊翅片管和为冷凝回收烟气潜热而开发的抗腐蚀搪瓷整体翅片管以及聚丙烯塑料翅片管等等。

李慧君、林宗虎指出 ,随着我国能源结构的调整 ,清洁能源天然气将得到广泛的使用<sup>[6-8]</sup>。天然气锅炉的排烟温度在 150 ~ 250℃ 之间 ,烟气成份中水蒸汽约占 20% ,是烟气热量的主要携带者 ,烟气冷凝温度在 50 ~ 60℃ 之间。在余热回收过程中 ,由于凝结现象的存在 ,在换热器不同截面上烟气侧的换热系数及物性参数都发生很大的变化 ,导致传热性能的改变。为此 ,依据传热传质理论对烟气侧换热进行了实验研究 ,实验中的冷凝换热器为纯铜翅片管式换热器 ,铜管内径  $\phi 6$  mm ,铜管外径  $\phi 8$  mm ,管长 185 mm ,每两排 9 根管 ,错列布置 ,共 10 排。对比实验数据如表 1 所示。

表 1 加装冷凝换热器前后的实验数据

Tab.1 Test data obtained before and after a condensate heat exchanger has been additionally installed

	加装前	加装后
排烟温度 /℃	126.6	47.9
高热值效率 /%	79.94	91.47
NO <sub>x</sub> 浓度 /mL · m <sup>-3</sup>	68.75	6.79
CO <sub>x</sub> 浓度 /mL · m <sup>-3</sup>	234.8	33.52

从表中的实验数据可知 ,将排烟温度降至酸露点以下是可以实现的 ,热值经济效益可提高 10% 以上 ,且在烟气中的水蒸气潜热的同时 ,可以降低烟气中的有害物质浓度 ,利于环保。

贾力等人也做了类似的相关研究<sup>[9-12]</sup>。天然气烟气冷凝换热明显不同于纯蒸汽或含有少量不凝性气体的蒸汽的冷凝换热 ,也不同于湿空气除湿过

程。因为对于蒸汽冷凝换热, 对流换热部分所占比例极小, 可以忽略不计; 对于湿空气去湿过程, 则以对流换热为主, 水蒸气冷凝只是起到一定强化传热的作用。天然气烟气中水蒸气占有 15% ~ 20% 的份额, 烟气的显热与水蒸气的潜热属于同一数量级, 天然气低位烟气余热提取过程为含大量不凝性气体的对流凝结换热。冷凝时烟气进入过饱和区域, 热力学不稳定性, 将在烟气中产生雾, 虽不利于换热, 但有利于对有害气体的吸收。烟气冷凝对  $\text{SO}_2$  的净化效果比较明显, 通过烟气冷凝过程以后, 排烟中  $\text{SO}_2$  能降低 20% ~ 40%,  $\text{NO}_x$  的冷凝吸收率也能达到 10% ~ 20%。

车得福等人通过对冷凝式锅炉的研究, 指出冷凝锅炉的经济排烟温度为 40 ~ 55℃ 之间<sup>[13-15]</sup>。实验研究了不凝性气体占多数时的水蒸气冷凝换热过程, 在不同水蒸气分压比(3% ~ 20%)、不同温度下(100 ~ 200℃) 加湿空气的冷凝换热特性。实验表明, 不凝性气体(空气) 占多数时, 其对流与冷凝同时发生的复合换热系数可以达到无冷凝时干空气对流换热系数的 1.53 倍。

前述的利用翅片管式换热器回收低位烟气余热的研究主要集中于对烟气余热的热利用上, 防腐只是被动的选择防腐材质的换热表面, 而没有根据冷凝液的特性采取相应的防腐对策。

王随林等人指出“强化传热与防腐”是低位烟气余热冷凝回收的两个关键性技术问题<sup>[16-18]</sup>。模拟计算与工程实际应用均表明: 采用渐变断面的烟气流动方式时, 烟气在换热面上分布更均匀, 有利于强化换热, 减小阻力, 结构紧凑, 且可有效降低烟气流动噪声; 并针对酸性冷凝液对烟气冷凝热回收换热器表面的腐蚀特性, 在换热器表面采取了 Ni-Cu-P 复合化学镀层与有机涂层相结合的方式。研究表明, 非晶态镍磷复合化学镀层 + 有机高分子聚合物涂层冷凝换热器表面的具有优良的防腐效果。

过增元等人根据对换热器的热阻产生原理进行了逐项分析<sup>[19]</sup>, 可知, 当换热器一侧流体为换热性能较差的气体介质时, 换热器翅片材料的热导率存在一个阈值区域 15 ~ 25 W/(m·K), 高于这个阈值区域, 制约肋片管换热器换热能力的主要因素是管外对流换热的能力, 此时若要单纯通过提高热导率来增强换热几乎没有效果。据此开发了改性塑料翅片管式换热器, 结构如图 2 所示, 通过研究指出: 当改性塑料材料的热导率达到 20 W/(m·K), 其换热量与纯铜换热器换热量之比可以达到 92%, 与不锈

钢换热器换热量之比可以达到 96.2%, 差别很小。当塑料表面较为清洁, 而纯铜与不锈钢表面存在污垢热阻时, 塑料翅片管换热器的换热性能与纯铜换热器的性能基本相同, 用经过改性后的聚丙烯作为翅片材料实现了防腐。

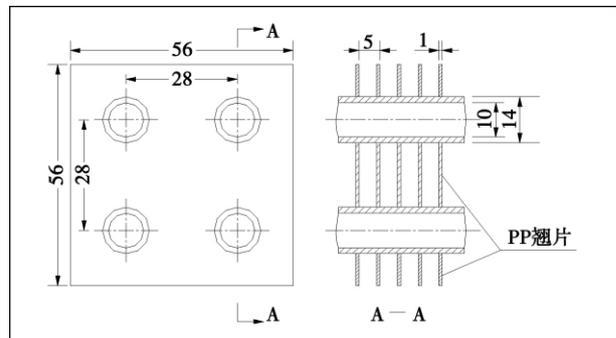


图 2 改性塑料翅片结构尺寸

Fig. 2 Structure and dimensions of denatured plastic fins

Hwang 等人为了防止对流冷凝回收潜热过程中由于酸性冷凝液的浓缩而产生的腐蚀<sup>[20]</sup>, 采用了钛金属为材质的短翅片换热器, 同时, 为了提高换热装置的综合传热性能, 将翅片管交错排列。通过回收潜热, 燃料的热效率提高到 93%, 努谢特数  $Nu$  与舍伍德数  $Sh$  分别提高 50% 和 10%。

Pandiyarajan 把翅片管式换热器用于回收动力装置烟气的低温余热回收<sup>[21]</sup>, 并将余热回收利用与相变储能相结合, 装置可将约占柴油机燃料热值的 30% 的排烟中的 1/3 ~ 1/2 的余热加以回收, 并存储于相变蓄能罐中备用, 实现了柴油机在 25%、50% 和 75% 以及满负荷各工况条件下运行时所需热能的蓄补结合, 克服了回收热能使用的连续性与柴油机余热负荷输出不稳定性之间的矛盾, 提高了燃料的综合利用率。

## 2.2 基于热管方法的热回收

热管是根据蒸发与冷凝过程的基本原理, 依靠工质相变过程传热的。重力热管结构如图 3 所示, 在热管的蒸发段与冷凝段的传热系数可达到  $10^3 \sim 10^5$  W/(m<sup>2</sup>·K), 实现小温差, 大热流密度传热, 而热阻仅为 0.01 ~ 0.03 K/W<sup>[22]</sup>。热管位于烟气与热媒之间, 相当于一个“超导热体”, 可用于气-气、气-水、气-气等各种余热回收换热过程。

适合于低位烟气余热回收温度范围的常用工质有水、氨、甲醇、乙醇、F22 等, 壳体材料为碳钢和低合金钢管。文献[23]提供了 31 种纯工质的热力学

质,可在提取低位烟气余热时选择使用。

蒋开国采用醇、烷类有机工质热管<sup>[24]</sup>,对燃油锅炉经过空气预热器(排烟温度由 240℃ 下降到了 150℃)后的低位烟气余热进行了再回收,烟气出口温度深度温降至 80℃,回收的烟气显热及少部分潜热,热量用于锅炉软化补水的预热。

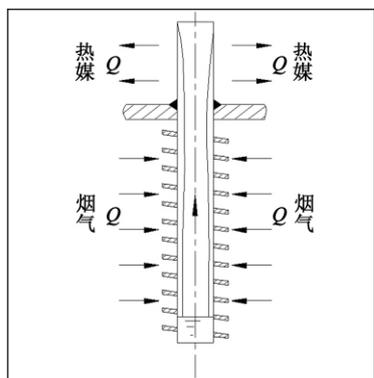


图3 重力热管结构图

Fig. 3 Structural drawing of a gravity-based heat pipe

胡炯华等人采用以水为介质的热管技术,以热管余热锅炉的形式,将冶炼制酸工艺过程的低温烟气的温度由 241℃ 降至 194℃ 制取蒸汽<sup>[25]</sup>。

Noie 利用  $\varepsilon$ -NTU 法对虹吸式热管空气-空气换热工况的传热性能进行了理论分析与实验研究<sup>[26]</sup>,冷凝侧的温度固定为 20℃,蒸发侧的温度变化范围为 100 ~ 250℃,对烟气的冷凝研究是很好的借鉴。热管式换热器的蒸发段与冷凝段的长度为 600 mm,绝热过度段长度为 1000 mm。热管与翅片均为铜质,每根热管的翅片数为 90 片,蒸馏水充填蒸发段长度的 60%。研究了迎面风速 0.5 ~ 5.5 m/s 输入功率 18 ~ 72 kW 范围内的效率变化范围为 37% 至 65%。指出当热管两侧冷、热流体的热容量相等时的传热效率最低。

从以上的国内外的以热管技术为主回收烟气低温余热时,只要技术可行,运行稳定的情况下,热管装置的回收期短,均具有很好的经济性。但是,应用热管技术深度提取烟气低温余热时还是受到诸多技术条件的限制,如工质蒸发温度限制,蒸发温度过于接近烟气温度虽然可制取较高温度的热媒,但提取烟气余热的总量减少了;烟气温度在运行出现波动时,低于热管中所充装工质的蒸发温度时还将造成热管不启动;热管换热器的蒸发段和凝结段一般为一体,在大型化结构设计方面具有一定的困难;水在高温下与金属反应析氢,有机工质高温分解,都会使

热管的真空度受到破坏,影响热管的运行稳定性与使用寿命<sup>[27]</sup>。

### 2.3 基于板式换热方法的余热回收

板式换热器作为高效、紧凑的一次表面换热设备,不仅是民用板式换热器中空调、采暖和生活热水换热的主要设备,也是在工业板式换热器中废气、废水余热利用的重要设备。

中科天一科技针对燃气锅炉 150 ~ 200℃ 的排烟温度,开发了以波纹板式换热器为核心单元的锅炉烟气余热冷凝回收装置<sup>[28]</sup>,换热元件的核心为 316L 不锈钢材质的波纹板换热装置。数据显示,锅炉运行时的实际排烟温度为 191℃,冷凝回收余热后烟气温度降为 78℃,二次供暖回水温度为 29℃,加热后温度为 37℃,可实现烟气显热和水蒸气冷凝潜热的深度回收。

Kolev 将板式烟气回收装置与翅片管间壁式换热装置以及蜂窝填料式的直接接触式换热装置比较后<sup>[29]</sup>,认为利用板式换热装置回收天然气烟气余热的整体经济性最优。建立热回收过程的传热传质模型,推导出换热准则与压降准则方程,计算比较了烟气与水进出口参数,烟气中空气过量系数以及烟气流道板间距变化对换热过程的影响。当烟气的入口温度 160℃,出口温度可降低到 30℃ 时,烟气中空气的过量系数为 1.1,空气流道当量直径为 6 mm 时,薄片板式换热器的单位体积的最大换热能力为 2 380 kW/m<sup>3</sup>。

### 3 直接接触换热方式的烟气余热回收

直接接触换热方式的余热回收可分为冷凝式热回收与吸收式热回收。冷凝式热回收一般采用直接接触式冷凝式锅炉或常规锅炉加装直接接触式冷凝式热回收装置;吸收式热回收是采用液体或固体对与水蒸气的吸收、吸附作用回收水蒸气潜热,从而实现了烟气余热的全面回收。

#### 3.1 基于冷凝式原理的热回收

直接接触式冷凝原理的热回收,一般以水作为热的载体。向烟气中喷入比烟气水蒸气露点温度更低的水,烟气与水直接接触换热,二者之间不仅伴随有显热交换,而且伴随着潜热交换;同时烟气中的各种组分在与水接触的界面上被吸附吸收,对烟气具有洗涤净化的作用。从热力学角度,在烟气与水直接接触换热过程是动量、热量、质量传递同时发生,并且相互耦合、交叉影响,是复杂的不可逆热力

过程。

根据水与烟气接触的过程特点,直接接触式换热器可分为喷淋式、填料式与鼓泡式等多种形式,如图4所示。

寇广孝采用喷淋式蒸发再冷却塔与间接式换热装置相结合的方式,冷凝回收燃气锅炉烟气的低温余热<sup>[30]</sup>。回收余热的一部分由冷凝液加热系统回水,用于参数为95/70℃的系统供暖,另一部分预热锅炉的助燃空气,减少了空气温升所需的热量。燃料的利用率提高了10%~12%,锅炉热效率达到95%,同时使得烟气中NO<sub>x</sub>及CO污染物的体积分数大大降低,分别低于10和30 mL/m<sup>3</sup>。

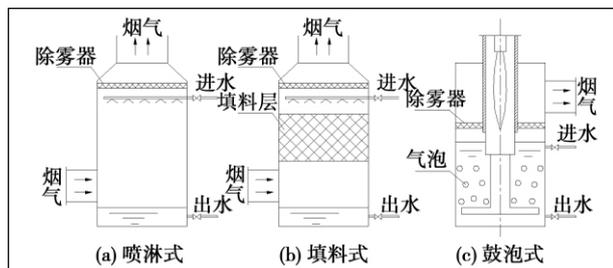


图4 三种直接接触式换热器工作原理图

Fig. 4 Diagram showing the operating principle of three types of direct contact heat exchanger

赵钦欣认为相对于常规的换热方式,采用直接接触方式的优势在于<sup>[31]</sup>:极大地增加了烟气-水两相流体的接触面积,瞬间完成传热和传质,达到强化换热,提高锅炉效率。

Kuck利用法国人R. Guilletde的专利技术,采用接触式喷淋填料塔的方式用水吸收180℃烟气余热至60℃排出<sup>[32]</sup>。同时,利用循环泵将吸收了烟气余热的热水喷淋于填料塔,用于预热锅炉进风的加热加湿,如图5所示,并已将此技术实际应用于200 MW的热电厂。

鉴于烟气与水的接触时发生复杂的耦合传热、传质以及有害物的吸附溶解过程,出于经济性考虑,工程技术人员更关注热利用过程,且烟气成份差异很大,热回收量通常可经过传热、传质计算获得,减排量则是通过实验测定。

### 3.2 基于吸收式原理的热回收

Riffat等人对吸收式的烟气低温余热回收系统的可行性进行了研究<sup>[33]</sup>。吸收式热回收可分为液体吸收与固体吸附两种方式。液体吸收一般采用溴化锂或氨水溶液作为吸收液,利用吸收液中水蒸气分压力与烟气中水蒸气分压力之间差,吸收烟气中

的水蒸气,从而提取潜热。吸收液的性质可由吸收液的成份、浓度与温度共同确定,吸收过程中,吸收液的温度与浓度是变化的。固体吸附一般采用转轮式换热器,利用硅胶或沸石及其合成材料制成的分子筛,吸附烟气中的水蒸气,气吸附能力是由吸附的面积、热容量决定的。

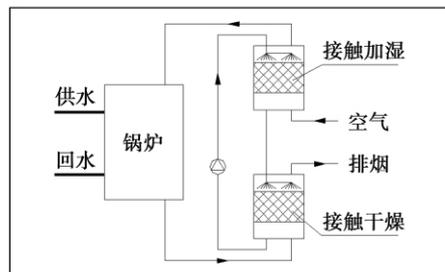


图5 喷淋填料式烟气余热回收循环原理图

Fig. 5 Diagram showing the operating principle of a sprinkler-filling type flue gas waste heat recovery cycle

吸收式热回收技术与冷凝式热回收相比较,它克服了冷凝吸收,热媒必须低于露点的缺点,吸收液的温度高或低于露点时也能吸收烟气潜热。热回收过程可控,尤其是其可应用于高湿度、高露点温度的低位烟气余热的回收过程,回收温度与比例可以通过合理的系统设计实现,从而减少了烟气的热损失,提高了锅炉的热效率。

直接接触式的热力过程机理复杂,普通工程技术人员由于对直接式换热机理认识不够深入,很难形成直接接触式换热器与系统的设计方案,并且由于热、质交换的热媒吸收了烟气中含有的颗粒物杂质与SO<sub>2</sub>,NO<sub>x</sub>等,热媒的水质差且呈酸性,不能被直接利用,需要采取过滤等处理措施或间接换热利用,但系统复杂,易造成设计、运行管理困难等,都在不同程度上限制了直接接触式换热器在低位烟气余热深度回收中的应用。烟气与水直接接触传热过程不仅可以实现小温差高效的传热,还具有环保的优势,使得其在低位烟气余热利用方面具有很好的应用前景<sup>[34]</sup>。

## 4 结论与展望

通过吸收式热泵技术与高效的传热技术的耦合,在低位烟气余热过程中通过“质”“量”分控的方式,可实现低位烟气余热的动力回收与热力回收,并

实现温度至环境温度附近的深度热回收。

为减小传热过程的不可逆损失, 适宜于低温烟气特性的小温差高效传热技术是研究的重点与核心。

高效的换热技术与吸收式热泵技术的相互参数匹配的系统集成技术仍处于起步阶段。需要以热力学为指导, 梯级回收利用烟气余热, 实现“质”“量”统一, 且兼顾环保, 开发发展高效、节能、环保的低位烟气余热深度回收利用的系统集成技术。

参考文献:

[1] 吴华新. 低位烟气余热深度回收利用状况述评( I )——新技术路线与回收条件改变的影响[J]. 热能动力工程, 2012, 27(3): 271 - 276.  
WU Hua-xin. Review of the application status of low quality flue gas waste heat utilization technologies( 1 )-Remaining temperature conditions and heat recovery difficulties[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2012, 27(3): 271 - 276.

[2] 付林, 李辉. 天然气热电冷联供技术及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.  
FU Lin, LI Hui. Natural gas heat, power and cooling cogeneration technology and application[M]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2008.

[3] 付林, 李岩, 张世钢, 等. 吸收式换热的概念与应用[J]. 建筑科学, 2010, 26(10): 136 - 140.  
FU Lin, LI Yan, ZHANG Shi-gang, et al. Concept and application of absorption type heat exchange[J]. Architectural Science, 2010, 26(10): 136 - 140.

[4] Wang C C, Ralph L. Webb K, et al. Data reduction for air-side performance of fin-and-tube heat exchangers[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2000, 21: 218 - 226

[5] Shi Xiaojun, Che Defu, Brian Agnew, et al. An investigation of the performance of compact heat exchanger for latent heat recovery from exhaust flue gases[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, 54: 606 - 615

[6] 李慧君, 王树众, 张斌, 等. 冷凝式燃气锅炉烟气余热回收可行性经济分析[J]. 工业锅炉, 2003, 78(2): 1 - 4.  
LI Hui-jun, WANG Shu-zhong, ZHANG Bin, et al. Feasibility and cost-effectiveness analysis of the recovery of waste heat from the flue gas of a condensing type gas-fired boiler[J]. Industrial Boiler, 2003, 78(2): 1 - 4.

[7] 李慧君, 林宗虎. 燃气锅炉烟气余热回收实验分析[J]. 工业锅炉, 2004, 88(6): 1 - 4.  
LI Hui-jun, LIN Zong-hu. Analysis of the waste heat recovery test of a gas-fired boiler[J]. Industrial Boiler, 2004, 88(6): 1 - 4.

[8] 李慧君, 罗忠录, 程刚强, 等. 天然气锅炉烟气换热特性的分析[J]. 动力工程, 2006, 26(4): 467 - 471.  
LI Hui-jun, LUO Zhong-lu, et al. Analysis of the flue gas heat exchange characteristics of a natural gas-fired boiler[J]. Power Engineering, 2006, 26(4): 467 - 471.

[9] 孙金栋, 贾力, 陈铁兵. 烟气冷凝环保分析[J]. 北京建筑工

程学院学报, 2000, 16(3): 9 - 11.  
SUN Jin-dong, JIA Li, CHEN Tie-bing. Analysis of the environmental protection by condensing flue gases[J]. Journal of Beijing Architectural Engineering College, 2000, 16(3): 9 - 11.

[10] 贾力, 孙金栋, 李孝萍. 湿烟气冷凝换热研究[J]. 北京建筑工程学院学报, 2001, 17(2): 15 - 18.  
JIA Li, SUN Jin-dong, LI Xiao-ping. Study of the heat exchange during condensation of wet flue gases[J]. Journal of Beijing Architectural Engineering College, 2001, 17(2): 15 - 18.

[11] 贾力, 吴冬梅, 齐巍. 混合气体横向冲刷水平管时对流冷凝换热的机理研究[J]. 热科学与技术, 2007, 6(3): 209 - 213.  
JIA Li, WU Dong-mei, QI Wei. Study of the mechanism controlling the convection condensation and heat exchange when a gas mixture laterally sweeping across horizontal tubes[J]. Thermal Science and Technology, 2007, 6(3): 209 - 213.

[12] 贾力, 齐巍, 吴冬梅, 等. 含湿混合气体水平管外对流冷凝换热实验研究[J]. 热科学与技术, 2007, 6(4): 300 - 305.  
JIA Li, QI Wei, WU Dong-mei, et al. Experimental study of the convection condensation heat exchange of a wet gas mixture outside horizontal tubes[J]. Thermal Science and Technology, 2007, 6(4): 300 - 305.

[13] 管耀东, 车得福, 庄正宁, 等. 高水分烟气对流冷凝换热模拟实验研究[J]. 工业锅炉, 2003, 77(1): 12 - 15.  
DA Yao-dong, CHE De-fu, ZHUANG Zheng-ning, et al. Simultaneous experimental study of the convection condensation heat exchange of flue gases with a high water content[J]. Industrial Boiler, 2003, 77(1): 12 - 15.

[14] Che De-fu, Liu Yan-hua, Gao Chun-yang. Evaluation of retrofitting a conventional natural gas fired boiler into a condensing boiler[J]. Energy Conversion & Management, 2004, 45: 3251 - 3266.

[15] Liang Yongbin, Che Defu, Kang Yanbin. Effect of vapor condensation on forced convection heat transfer of moistened gas[J]. Heat Mass Transfer, 2007, 43: 677 - 686.

[16] 葛海霞, 王随林, 穆连波, 等. 烟气冷凝热能回收利用装置的优化[J]. 暖通空调, 2011, 40(1): 113 - 116.  
GE Hai-xia, WANG Sui-lin, MU Lian-bo, et al. Optimization of a flue gas condensation heat energy recovery and utilization device[J]. Heating, Ventilation and Air Conditioning, 2011, 40(1): 113 - 116.

[17] 王随林. 新型防腐镀膜烟气冷凝换热器换热实验研究[J]. 煤气与热力, 2010, 30(3): 20 - 24.  
WANG Sui-lin. Experimental study of the heat exchange in a new type preservative film-plated flue gas condensation heat exchanger[J]. Coal Gas and Thermal Power, 2010, 30(3): 20 - 24.

[18] 刘重阳, 刘贵昌, 王随林, 等. Ni-Cu-P 化学镀层的制备及其耐烟气冷凝液的腐蚀性能[J]. 材料保护, 2011, 44(3): 8 - 10.  
LIU Chong-yang, LIU Gui-chang, WANG Sui-lin, et al. Preparation of a Ni-Cu-P chemically-plated layer and its corrosion performance resistant to flue gas condensing solution[J]. Material Protection, 2011, 44(3): 8 - 10.

(下转第 415 页)

- and numerical analysis of a supersonic nozzle cascade [J]. Journal of Engineering Thermophysics 2006 27(2): 217-219.
- [4] FENG Zhen-ping, LI Ying-chen, YANG Dian-liang, et al. Aerodynamic design of advanced supersonic turbine stages for liquid hydrogen/oxygen turbo-rocket [R]. ISABE Paper 2005-1030 2005.
- [5] 杨其国, 韩万金. 几种超音速叶型的设计与比较 [J]. 汽轮机技术 2006 48(2): 81-84.  
YANG Qi-guo, HAN Wan-jin. Design and comparison of several types of supersonic blade profiles [J]. Steam Turbine Technology, 2006 48(2): 81-84.
- [6] 周鸿儒, 顾忠华, 韩万金, 等. 气冷涡轮级气热耦合非定常数值模拟 [J]. 热能动力工程 2011 26(2): 134-139 249.  
ZHOU Hong-ru, GU Zhong-hua, HAN Wan-jin, et al. Unsteady Numerical Simulation of the Air-heat Coupling of an Air-cooled Turbine Stage [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power 2011 26(2): 134-139 249.
- [7] 张宏, 李光里, 赵长宇. 高性能亚音速平面叶栅风洞设计 [J]. 沈阳航空工业学院学报 2010 27(5): 18-22.
- ZHANG Hong, LI Guang-li, ZHAO Chang-yu. Design of a high-performance sub-sonic wind tunnel for plane cascades [J]. Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering 2010 27(5): 18-22.
- [8] 黄海波, 季路成, 肖翔, 等. 激波管风洞中叶栅测压实验与计算研究 [J]. 工程热物理学报 2002 23(3): 301-304.  
HUANG Hai-bo, JI Lu-cheng, XIAO Xiang, et al. Study of the pressure measurement test and calculation of a cascade in a shock-wave tube wind tunnel [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2002 23(3): 301-304.
- [9] 王希季, 钟芳源. 船舶汽轮机原理与热计算 [M]. 北京: 北京科学教育出版社, 1961.  
WANG Xi-ji, ZHONG Fang-yuan. Theory and thermal calculation of marine steam turbines [M]. Beijing: Beijing Science and Education Press, 1961.

(丛敏编辑)

## (上接第404页)

- [19] Chen Lin, Li Zhen, Guo Zeng-Yuan. Experimental investigation of plastic finned-tube heat exchangers with emphasis on material thermal conductivity [J]. Experimental Thermal and Fluid Science 2009 33: 922-928.
- [20] Kyudae Hwang, Chan ho Song, Kiyoshi Saito, et al. Experimental study on titanium heat exchanger used in a gas fired water heater for latent heat recovery [J]. Applied Thermal Engineering 2010, 30: 2730-2737.
- [21] Pandiyarajan V, Pandian M C, Malan a E, et al. Experimental investigation on heat recovery from diesel engine exhaust using finned shell and tube heat exchanger and thermal storage system [J]. Applied Energy 2011 88: 77-87.
- [22] Leonard L. Vasiliev. Heat pipes in modern heat exchangers [J]. Applied Thermal Engineering 2005 25: 1-19.
- [23] Bahaa Saleh, Gerald Koglbauer, Martin Wendland, et al. Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles [J]. Energy, 2007 32: 1210-1221.
- [24] 蒋开国. 锅炉烟气的余热回收与利用 [J]. 湖南城市学院学报 2007 16(2): 28-30.  
JIANG Kai-guo. Waste heat recovery and utilization of flue gases of a boiler [J]. Journal of Hunan Metropolitan College 2007 16(2): 28-30.
- [25] 胡炯华. 热管余热锅炉在低温烟气余热回收中的应用 [J]. 有色冶金设计与研究 2006 27(4): 9-13.  
HU Jiong-hua. Application of a heat-pipe-based waste boiler in recovery of waste heat from low temperature flue gases [J]. Non-ferrous metallurgical design and research 2006 27(4): 9-13.
- [26] Noie S H. Investigation of thermal performance of an air-to-air thermosyphon heat exchanger using  $\epsilon$ -NTU method [J]. Applied Thermal Engineering 2006 26: 559-567.
- [27] 丁琦, 肖晓劲. 浅谈燃气供热锅炉采用热管技术回收余热的适应性 [J]. 城市节能 2005 7(6): 261-263.  
DING Qi, XIAO Xiao-jin. Exploratory investigation of the adaptability of a gas-fired heat-supply boiler using the heat-pipe technology to waste heat recovery [J]. Urban Energy Saving, 2005 7(6): 261-263.
- [28] 北京中科天一环境技术有限公司. 烟气余热冷凝回收——节能减排新技术 [J]. 城市开发 2010(1): 83.  
Beijing Zhongke Tianyi Environment Technology Co. Ltd. Recovery of waste heat from flue gases through condensation-energy saving and emissions reduction new technologies [J]. Urban Development 2010(1): 83.
- [29] Dimitar Kolev, Nikolai Kolev. Performance characteristics of a new type of lamellar heat exchanger for the utilization of flue gas heat [J]. Applied Thermal Engineering 2002 22: 1919-1930.
- [30] 寇广孝, 王汉青, 王志勇, 等. 基于空气加湿的直接接触换热冷凝式燃气锅炉 [J]. 煤气与热力 2004 24(9): 486-488.  
KOU Guang-xiao, WANG Han-qing, WANG Zhi-yong, et al. Air-humidification-based direct contact heat exchange condensing type gas-fired boilers [J]. Coal Gas and Thermal Power 2004 24(9): 486-488.
- [31] 康子晋, 郝蕾, 赵钦新. 直接接触换热水锅炉原理及应用 [J]. 节能技术 2003 21(5): 17-20.  
KANG Zi-jin, ZHENG Lei, ZHAO Qin-xin. Theory of a direct contact heat exchange hot water boiler and its applications [J]. Energy Saving Technology 2003 21(5): 17-20.
- [32] Kuck J. Efficiency of vapour-pump-equipped condensing boilers [J]. Applied Thermal Engineering 1996 16: 233-244.
- [33] Riffat S B, Zhao X, Doherty P S. Application of sorption heat recovery systems in heating appliances—Feasibility study [J]. Applied Thermal Engineering 2006 26: 46-55.
- [34] 胡宝亭. 空气-水直接接触高效传热过程及设备研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学 2004.  
HU Bao-ting. Study of an air-water direct contact high efficiency heat transfer process and equipment [D]. Qingdao: China Oceanology University 2004.

(辉编辑)

低位烟气余热深度回收利用状况述评( II) —传热过程与技术应用研究 = **Review of the Status Quo of Low Quality Flue Gas Waste Heat Recovery and Utilization( II) -Study of the Application of Heat Transfer Process and Technologies** [刊, 汉] WU Hua-xin ( Department of Architectural Technology and Science, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27 (4). - 399 ~ 404

Guided by the thermodynamics and through a coupling of the efficient heat transfer technology and absorption type heat pump technology, to recover the low quality waste heat in flue gas by making use of a separate control in quality and quantity can accomplish an in-depth recovery and stepped utilization of the above-mentioned waste heat. When the technology under discussion is used to recover the waste heat in the flue gas from an oil and gas-fired equipment item having a high steam content, it can not only recover the apparent heat but also the latent heat in depth, achieving an optimum overall cost-effectiveness. The efficient heat transfer technology can reduce the temperature difference for heat transfer between the media of the waste heat and its utilization while to reduce the irreversible loss in the heat transfer process becomes the most core technical problem. Therefore, its analysis and exploration will help develop the technologies for recovering and utilizing in-depth the low quality waste heat in flue gases in a high efficiency, energy-saving and environmental protection way. **Key words:** flue gas waste heat, heat recovery, flue gas characteristics, separate control in quality and quantity

某型涡轮动叶气动性能的实验研究 = **Experimental Study of the Aerodynamic Performance of the Rotating Blades of a Turbine** [刊, 汉] LIANG Chen, NIU Xi-ying, LIN Feng ( CSIC No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150078), WANG Xiang-feng ( College of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27 (4). - 405 ~ 410

In a low speed wind tunnel for annulus turbine cascades, an air blowing test was performed of the prototype and two sets of modified rotating cascade at various incidence angles. Five-hole probes and static pressure measuring holes provided on the surface of the blades were used, measuring the distribution of the aerodynamic parameters in a cross section at the outlet of the cascade along the pitch and blade height direction respectively as well as the distribution of the static pressure coefficients on the surface of the blade profile in the rotating surfaces at the blade hub, middle and tip respectively. The test results show that compared with those of the prototype, the total pressure losses of the rotating blades thus modified decrease by 6.17%, 4.73%, 13.53%, 19.34% and 21.7% at five incidence angles re-