

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

吴华新

(清华大学 建筑技术科学系 北京 100084)

摘 要: 提高能源的利用率来实现节能减排,是解决当前能源与环境问题的重要途径之一。通过对国内、外各行业窑炉与热动力设备排烟温度的列举与分析,指出这类排烟的余温仍较高,提出在烟气余热回收热量传递过程中采取“质”“量”分控的回收方式,利用烟气余热的“驱动力”,即可实现烟气余热的深度利用,并对深度利用后烟气特性变化而引起的回收条件改变的影响进行了分析。

关 键 词: 烟气余热; 深度热回收; 烟气特性; 质量分控

中图分类号: TK11 文献标识码: A

引 言

烟气余热通常按温度可分为: 高温余热, $T \geq 650\text{ }^\circ\text{C}$; 中温余热, $230\text{ }^\circ\text{C} \leq T < 650\text{ }^\circ\text{C}$; 低温余热, $T < 230\text{ }^\circ\text{C}$ 。2009 年我国工业废气的排放总量为 $436064 \times 10^8\text{ m}^3$, 其中燃料燃烧废气量占 55.3%, 为 $241201 \times 10^8\text{ m}^3$; 其余为生产工艺废气^[1]。若将这些燃料燃烧的废气均视为低温余热, 回收至标准态(298.15K, 101.325 kPa) 蕴含的热能高达 23540×10^4 万吨标准煤, 为同年能源消费总量的 7.7%^[2]。

在能源问题日益成为经济社会发展瓶颈的今天, 提高能源的利用率, 回收低位烟气余热, 作为二次能源资源化利用, 已成为我国节能减排的战略中最具潜力的研究方向。

本研究中的“低位烟气余热”是指现阶段尚未回收利用的、废弃的、高于环境温度的, 仍具有进一步回收利用价值的烟气热能。研究如何以较小的代价、最大限度的有效利用这部分余热对低位烟气余热资源化的实现具有重大的意义。

1 低位烟气余热的温度状况

目前, 国内、外常规能源利用的主要方式是燃烧燃料, 将化学能转化为热能, 其中烟气热能直接或间接做功可再转化成其它各种形式的能量^[3], 完成能量转化的乏、废烟气最终被排放到大气中。

由于 20 世纪 70 年代石油危机的影响, 国外对余热回收技术曾进行了广泛深入的研究, 但研究于 20 世纪 80 年代受到石油价格回落的影响而一度减少。近年来, 能源的稀缺与环保要求的提高, 对低位烟气余热利用研究又一次引起广泛的关注。图 1 为近 10 年来有关“烟气”“余热回收”作为检索词在 Web of Knowledge 专业数据库检索平台的检索情况, 科研文章共 703 篇, 数量具有逐年上升的趋势。图 2 为这些文章被引频次, 代表着该类研究的活跃程度, 总计为 2383 次, 平均引用次数为 3.39 次。

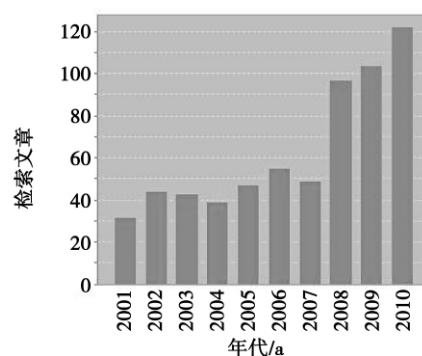


图 1 在 Web of Knowledge 平台上的检索“烟气”与“余热回收”的文章数

Fig. 1 Number of papers searched for key words “flue gas” and “waste heat recovery” on the Web of Knowledge platform

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。

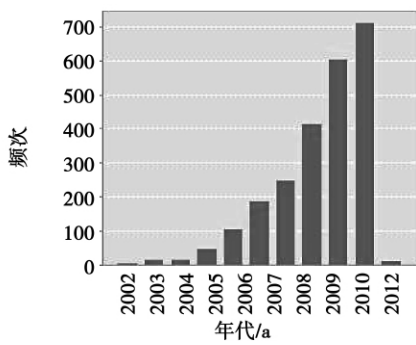


图2 相关文章被索引的频次

Fig. 2 Frequency of relevant papers indexed

1.1 国外工业行业的烟气排放温度

各种工业窑(硅酸盐工业)、炉(冶金、机械、电力工业)以及大型燃气轮机、内燃机等热动力装置排出烟气都有余温,携带有一定量的余热。表1中所列国外的热能利用系统一般都具有热量回收装置,能源利用率较高,回收后的烟气温度较低。

表1 国外高能耗工业行业的排烟温度

Tab. 1 Exhaust gas temperatures in the high energy consumption industries in foreign countries

行业	排烟温度/℃	备注
钢铁行业 ^[4]	190	焦炭炉排烟
化工行业 ^[4]	230	锅炉排烟
工业旋转窑 ^[5]	180	
水泥行业烟气 ^[6]	140~178	采用热回收工艺后
造纸行业 ^[7]	107	高于酸露点20℃
天然气锅炉烟气 ^[8]	160~240	接触式冷凝后为30℃
燃气蒸汽联合循环烟气 ^[9]	180	接触式余热回收后为57.3℃
柴油机排气 ^[10]	>135	余热锅炉出口

1.2 我国工业行业的烟气排放温度

近些年,我国通过持续的引导与推进“节能减排”国家战略,不仅淘汰了高能耗、高污染行业中的落后产能,现有工艺中的高、中温烟气余热有很大一部分已经或正在被考虑直接回收利用到生产工艺过程中或通过余热锅炉发电、生产蒸汽、热水等方式回收利用。目前,我国能源的加工转化效率为72.01%,发电机电站热力系统的效率为41.73%^[2],与国外发达国家相比还有一定差距。低温烟气的热能未得到任何有效利用,一般被视为废气直接排入大气环境中。表2对我国一些常见工业行业的热能动力设备产生的烟气理论温度、排放温度

(选取相关同类文献中的较低值)与来源进行了汇总。

表2 常见行业的理论烟气温度与排烟温度

Tab. 2 Theoretical flue gas temperatures and exhaust gas temperatures in the commonly - seen industries

行业	烟气温度/℃	排烟温度/℃	备注
钢铁行业 ^[11]	2 038	220~240	焦炉排气
钢铁行业 ^[12]	1 427	150~200	高炉排气
水泥行业烟气 ^[13]	1 800	120~130	物料温度1450℃
燃煤动力锅炉烟气 ^[14,15]	1 300~1 600	接近300	2 t/h以下锅炉
		240左右	10 t/h以下锅炉
		200	20 t/h以上锅炉
天然气锅炉烟气 ^[16]	1 300~1 600	120以上	户式热、暖两用热水炉
		150~250	民用燃气供暖
燃气蒸汽联合循环烟气 ^[17]	1 100	180以上	
柴油机废气 ^[18]	1 000以上	160	余热锅炉出口

从表2中的数据看出,所列出行业的窑炉与热能动力设备烟气排放温度普遍高于国外的同类设备的排烟温度,均在120℃以上,高的可达200℃以上。因此,烟气的排放温度低只是相对于理论烟气温度和传统热能利用技术的排烟温度而言的。

表中所引用的钢铁(与有色金属)冶炼加工行业、水泥建材行业、石油化工行业以及电力(热力)生产供应行业是传统的高耗能、高污染行业。从余热回收的角度,这行业同时也是低位余热资源相对富集的行业。

1.3 低位烟气余热资源化利用的条件

低位烟气余热“资源化”利用时应具备的两个特性:一是低品位剩余特性,即温度低于该行业现有热利用过程的排放温度;二是低品位余温特性,即烟温要高于烟气排放时的环境温度。

2 深度利用低位烟气余热的科学技术路线

2.1 传统换热器的局限性

低温烟气回收过程中,需要高效的换热装置来实现,但传统换热器的传热过程在应用上存在着局限性。图3为典型传统的间壁式换热器传热过程冷热流体的温度变化状况示意图。

$T_{h,i}$ 和 $T_{h,o}$ 分别为热流体进出换热器的温度,

$T_{c,i}$ 和 $T_{c,o}$ 分别为冷流体进出换热器的温度。对于这样的简单的换热过程冷流体的进口温度必将小于热流体的出口温度。应用于烟气余热利用时,烟气出口温度必将高于利用热媒(气体或液体工质)的进口温度。当深度利用烟气余热时,热媒的温度将更低,使热媒的应用范围受限,从而限制了烟气余热的利用深度。

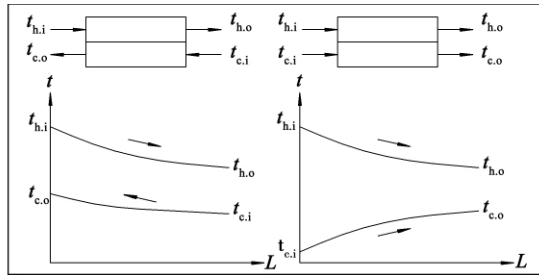


图 3 间壁式换热器冷热流体温度变化简图

Fig. 3 Sketch showing a change of cold and hot fluid temperature in a recuperative heat exchanger

2.2 深度利用烟气余热的技术路线

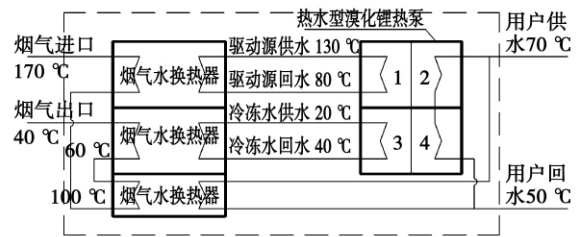
传统的烟气余热利用过程都是以热力学第一定律为出发点,单纯地考虑余热利用过程中的“量”的守恒,回收热量,而没有从热力学第二定律角度考虑余热的品质,回收热“质”——热的驱动力。

综合考虑烟气回收过程中余热的“量”与“质”,是可以实现烟气出口温度低于热媒进口温度的。应用实例如图 4 所示,图 4(a)为多段烟气水换热器与热水型溴化锂热泵的组合;图 4(b)为烟气水换热器与热水型溴化锂热泵换热机组的组合。两图从余热端看:输入为 170℃烟气,输出为 40℃烟气;从用户端看:输入为 50℃回水,输出为 70℃供水。从整体看,烟气出口温度低于热媒进口温度条件下,实现了低温余热向高温热媒的“传热”。

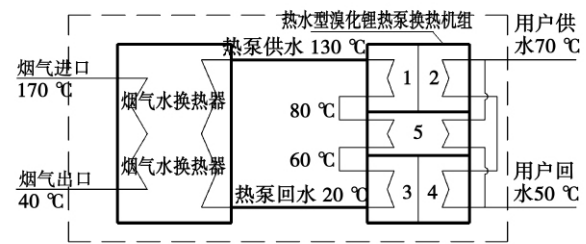
因此,在低位烟气余热回收过程中引入热泵,可实现低位烟气余热回收热量传递过程中的“量”与“质”的分配控制,在一定程度上突破传统换热过程思维状态下,换热器进出口温度的限制,提高低位烟气余热回收过程的烟气的温降深度。

本技术路线实际上是低位烟气余热的梯级利用方式,利用低位烟气余热高温段的“驱动力”,通过吸收式热泵原理对烟气低温段“余热”的回收,实现了烟气余热高低温之间温度段热媒的输出。核心技术问题是如何选择适宜于低位烟气深度回收烟气性质改变工况条件下,高效回收低位烟气余热的换热装置与过程,有效地减少高低能级间大温差传热过

程的不可逆损失。



(a) 多段烟气水换热器与热水型溴化锂热泵



(b) 烟气水换热器与热水型溴化锂热泵换热机组

图 4 烟气余热深度利用应用原理图

Fig. 4 Schematic diagram of in - depth utilization of waste heat in flue gas

3 低位烟气余热深度回收换热装置与过程应满足的条件

以往低位烟气余热未被利用最重要的原因是经济性问题,因为低温烟气余热的特点是“数量大而品质低”,回收利用代价高。烟气的温度低,深度利用意味着,烟气与工质间更小的传热温差,需要更大的传热面积,将造成金属消耗增加,设备投资增大,低温烟气余热利用的经济性差。但由于近些年来燃料成本的快速增长,材料成本相对于燃料成本增幅较小,经济性的问题已发生改变,材料成本已不被视为低温烟气余热利用的主要障碍。但是,由于烟气的温度深度降低后引起的烟气余热回收条件的改变是相关研究的技术人员不得不面对、认真考虑解决的问题。

3.1 烟气温度低于酸露点温度时的腐蚀

若烟气中的不饱和水蒸气达到对应的水蒸气分压力的饱和温度时,烟气中的水蒸气就会凝结出来。烟气中水蒸气露点较低,燃煤设备烟气的水蒸气露点约在 30~50℃之间,燃油、燃气设备烟气的含水量大,水蒸气露点在 50~60℃之间。但如果燃料中含有硫分,燃烧时会生成 SO_2 ,继续氧化成 SO_3 , SO_3

与水蒸汽形成硫酸蒸汽,其露点(酸露点)是较高的,它与 SO_3 浓度、烟气中水蒸气含量等因素有关。当回收低位烟气余热的设备表面低于 SO_3 的酸露点温度时,酸露将凝结于余热回收装置的表面,腐蚀换热表面,缩短设备的使用寿命。根据研究表明^[19],烟气中 SO_3 的浓度只要0.005%(50 mL/m³)左右,烟气酸露点就高达150℃。

准确地确定酸露点温度对于深度回收低温烟气的余热具有非常重要的意义。但准确计算酸露点温度的本质并不是要消除腐蚀,而是把腐蚀控制在一定的水平上,使腐蚀不再对设备运行的可靠性与安全性构成影响。在能源价格相对于材料价格增幅大得多的现实条件下,低温烟气余热深度利用设备应是将腐蚀的速度控制在可接受的范围内上,即技术经济合理——使代价(换热表面性能衰减)与收益(所回收热量)的比例在令人满意的水平上^[20]。

3.2 含尘烟气在换热表面的沉积与磨损

烟气中的灰尘来自于未燃尽的煤渣、熔渣等。烟尘在换热表面的沉积与磨损现象主要发生于固体燃料的低位烟气余热回收的过程中^[21]。低温烟气中的灰尘沉积的主要原因是低温时烟气中的 SO_2 、 SO_3 以及 NO_x 等共同生成的酸性物质,附着于换热器表面形成的酸露,使受热表面湿润易积灰。磨损不仅是因为烟气中的含尘量多,还因为有的烟尘硬度大,颗粒具有棱角,当运动的尘粒碰撞到换热表面时,尘粒的动能转变为换热面金属的内能。

由此产生的不良结果是:阻碍受热面传热,增加风机阻力,引起电机过载,腐蚀风机叶片,破坏动平衡。不仅造成热回收的经济性变差,同时也可能影响到系统运行的安全性。

降低含尘烟气在热回收装置的表面的沉积与磨损,一方面采取主动防尘的方式,降低含尘量,工艺流程设计中考虑减少灰尘的沉积,选取具有自洁功能的换热表面;另一方面采取被动防尘的方式,提高换热表面的防腐与耐磨性。

3.3 烟气深度降温后抬升能力的减弱

低位烟气余热深度回收利用后,烟气的温度降低,通过烟囱排放烟气时的抬升能力减弱,可能造成固体燃料烟气的污染物扩散能力的降低。

实际上,烟气的抬升能力与烟气的热力性质、动力性质以及气象条件等因素相关,当排放地点与气象条件确定后,污染物到达某点的最大浓度,仅取决于烟云距地面的实际高度,即烟囱的有效源高度。它等于烟囱本身高度、烟气在烟囱出口动能抬升高

度与烟气浮力上升高度之和。影响烟气抬升的主要因素是烟气所具有的初始动量与浮力。初始动量决定于烟气出口速度;浮力大小决定于烟气与周围空气的密度差与温度差。低温烟气余热深度利用后,温度降低仅对烟气的浮升能力构成了影响。

对于消耗固体燃料较多的大型燃煤电厂,可采用冷却塔排烟的方式^[22]——烟气从冷却塔排放,利用烟气加热冷却水塔的水汽混合所产生的巨大热释放率,提高了冷却水塔的抬升能力^[23],烟气的排放高度不仅高于常规烟囱,冷却水塔的液滴还可吸附腐蚀介质与烟尘,具有减排功能;对于液体或气体燃料的中小型设备的排烟可考虑增加烟囱高度与出口动能的方式,增加烟气的抬升能力,弥补由烟气温降后扩散能力不足,可能造成的污染问题^[24]。

3.4 烟气深度温降生成冷凝液的处理

对于液体、气体燃料的低位烟气余热深度利用过程后,烟气被冷凝而减少排放的 SO_2 、 NO_x 等污染物,均溶解于冷凝液中,冷凝液呈酸性。冷凝液的成份、酸性强度与浓度不仅取决于燃料成分还与燃烧、冷凝过程有关。冷凝液中一般含有硫酸根、硝酸根、亚硝酸根、碳酸根和碳酸氢根阴离子,以及被腐蚀金属材料的阳离子。冷凝液体的处理分为直接(包括稀释后)排放或中和处理后排放并且实现排放物的资源化利用^[25~27]。

对比燃煤、燃油、燃气装置与设备形成的烟气,天然气燃料的主要成份是 CH_4 ,燃烧过程中生成 CO_2 与 H_2O ,燃烧后排出的烟气含有大量水蒸气,水蒸气的汽化潜热在高位发热值中占有约10%的比例。同时,单位热值的价格比煤高,深度回收利用更容易且经济性更好。

综上,烟气温度降低而引起的烟气特性变化所带来的回收条件改变而引起的四个方面问题。前两方面问题随着近年来我国环保要求的提高,形式发生了有益的变化,大型电厂的烟气在排放前普遍都已经进行了严格脱硫除尘,并达到了国家的相关标准,为低温烟气余热的深度利用创造了很好的条件。后两个问题是实现低温烟气热能深度利用后产生的新问题,需要认真的研究解决。

4 结论与展望

国内外的各类炉窑的排烟温度状况表明,深度回收其余热的节能潜力巨大,是未来烟气余热回收技术领域发展的必然趋势。

通过在低位烟气余热回收热量传递过程中采取“质”“量”分控的回收方式,减少高低能级间大温差传热过程的不可逆损失,可实现低位烟气余热的深度利用。

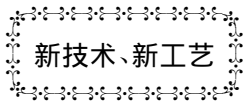
低位烟气余热深度回收利用不仅有来自经济成本的问题,还有来自于回收条件的改变而产生的技术难题亟待解决。应以热力学作为指导,针对低位烟气余热深度回收的科学技术路线研究对应的高效、节能、环保的热回收技术设备与过程,将在后续的研究中加以论述。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国统计局编. 中国统计年鉴 2010 [M]. 北京: 中国统计出版社 2011.
Compiled by the Statistics Bureau of PRC. China Statistics Yearbook 2010 [M]. Beijing: China Statistics Press 2011.
- [2] 国家统计局能源统计司编. 中国能源统计年鉴 2010 [M]. 北京: 中国统计出版社 2011.
Mainly compiled by the Energy Statistics Department under the State Statistics Bureau of PRC. China Statistics Yearbook 2010 [M]. Beijing: China Statistics Press 2011.
- [3] 李贵良. 低品位余热回收利用技术的研发及应用[J]. 山西能源与节能. 2010, 58(1): 60-61.
LI Gui-liang. Development and application of low quality waste heat recovery and utilization technologies [J]. Shanxi Energy and Energy-saving 2010, 58(1): 60-61.
- [4] Yasmine Ammar, Sharon Joyce, Rosemary Norman, et al. Low grade thermal energy sources and uses from the process industry in the UK [J]. Applied Energy 2012, 89: 3-20.
- [5] Ziya Sogut, Zuhul Oktay, Hikmet Karakoc. Mathematical modeling of heat recovery from a rotary kiln [J]. Applied Thermal Engineering 2010, 30: 817-825.
- [6] Shaleen Khurana, Rangan Banerjee, Uday Gaitonde. Energy balance and cogeneration for a cement plant [J]. Applied Thermal Engineering 2002, 22: 485-494.
- [7] Mostajeran Goortani B, Mateos-Espejel E, Moshkelani M, et al. Energy efficiency improvement of a Kraft process through practical stack gases heat recovery [J]. Applied Thermal Engineering 2011, 31: 4091-4096.
- [8] Chen Qun, Karen Finney, Li Hanning, et al. Condensing boiler applications in the process industry [J]. Applied Energy 2012, 89: 30-36.
- [9] Vhutshilo A, Madzivhandila, Thokozani Majoji, Toshko K Zhelev. Recovery of flue gas energy in heat-integrated gasification combined cycle (IGCC) power plants using the contact economizer system [J]. Energy Fuels 2011, 25: 1529-1536.
- [10] Soot Deposits and Fires in Exhaust Gas Boilers [M]. Augsburg: Man Diesel Manual 2009.
- [11] 车得福, 刘艳华. 烟气热能梯级利用 [M]. 北京: 化学工业出版社 2006.
CHE De-fu, LIU Yan-hua. Flue gas thermal energy stepped utilization [M]. Beijing: Chemical Industry Press 2006.
- [12] 温燕明, 朱玉廷. 焦炉烟气的余能回收利用方法. 中国: CN200710113659. 8 [P]. 2007.
WEN Yan-ming, ZHU Yu-ting. Methods for recovering and utilizing the waste energy in the flue gas of a coke-fired boiler. China CN200710113659. 8 [P] 2007.
- [13] 彭岩, 姚敏娟. 大型干法水泥生产线纯低温余热发电热量利用分析 [J]. 中国水泥 2005, 5: 51-54.
PENG Yan, YAO Min-juan. Analysis of the utilization of the heat for pure low temperature waste heat power generation in a large-sized dry-method cement production line [J]. China Cement, 2005, 5: 51-54.
- [14] 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.
- [15] 李慧君, 罗忠录. 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. Analysis of the flue gas heat exchange characteristics of a natural gas-fired boiler [J]. Power Engineering 2006, 26(4): 467-471.
- [16] 徐俊芳, 王随林, 潘树源, 等. 天然气锅炉烟气冷凝热回收利用技术工程应用方案探讨 [J]. 暖通空调 2009, 39(11): 128-132.
XU Jun-fang, WANG Sui-lin, PAN Shu-yuan, et al. Exploratory study of the versions for engineering applications of flue gas condensation heat recovery and utilization technologies in a natural gas-fired boiler [J]. Heating and Air Conditioning, 2009, 39(11): 128-132.
- [17] 薛梅, 董华. 天然气热电冷联供系统的效益分析 [J]. 煤气与热力 2003, 23(5): 309-311.
XUE Mei, DONG Hua. Analysis of the cost-effectiveness of a natural gas-fired heating-power-cooling cogeneration system [J]. Coal Gas and Thermal Power 2003, 23(5): 309-311.
- [18] 蒋祖星. 船舶柴油机排气余热动力回收方案的决策方法研究 [J]. 广州航海高等专科学校学报 2006, 14(1): 9-11.
JIANG Zu-xing. Study of the methods for making decisions of the exhaust gas waste heat and power recovery versions in a marine diesel [J]. Journal of Guangzhou Navigation Higher Learning Specialized School 2006, 14(1): 9-11.
- [19] Alireza Bahadori. Estimation of combustion flue gas acid dew point during heat recovery and efficiency gain [J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31: 1457-1462.
- [20] 李赫. 船用柴油机废气余热回收 [J]. 热能动力工程, 1992, 7(1): 33-34.
LI He. Marine diesel engine exhaust gas waste heat recovery [J].

- Journal of Engineering for Thermal Energy and Power ,1992 ,7 (1) : 33 - 34.
- [21] Petr Stehlik. Heat transfer as an important subject in waste-to-energy systems [J]. Applied Thermal Engineering ,2007 ,27: 1658 - 1670.
- [22] Oguz O ,Yurteri C ,Tuncel G. Modelling plume rise and dispersion of power plant flue gases discharged through cooling towers [C]// 26th NATO/CCMS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and Its Application 2003.
- [23] Eldredge T V ,Benton D J ,Hodgson J W. An investigation of the effects of flue gas injection on natural draft cooling tower performance [J]. J. Eng. Gas Turbines Power ,1997 , 119 (2) : 478 - 485.
- [24] 曹希萍 ,冯 璟. 浅析排烟冷却塔及在国内工程中的应用 [J] , 电力勘测设计 2007(1) : 47 - 51.
CAO Xi-ping ,FENG Hing. Brief analysis of exhaust gas cooling towers and their applications in domestic engineering projects [J]. Electric Power Survey & Design 2007 ,1: 47 - 51.
- [25] Pandiyarajan V ,Chinna Pandian M ,Malana 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.
- [26] 李淑仪 ,蓝佩玲 ,徐胜光 ,等. 燃煤烟气脱硫副产物在酸性土壤的农业资源化利用 [J] ,生态科学 2003 22(3) : 222 - 226.
LI Shu-yi ,LAN Pei-ling ,XU Sheng-guang ,et al. Utilization of by-products during flue gas desulfurization in a coal-fired boiler in acidic soil as an agricultural resource [J]. Ecological Science , 2003 22(3) : 222 - 226.
- [27] 李 彦 ,衣怀峰 ,赵 博 ,等. 燃煤烟气脱硫石膏在新疆盐碱土壤改良中的应用研究 [J] ,生态环境学报 2010 ,19(7) : 1682 - 1685.
LI Yan ,YI Huai-feng ,ZHAO Bo ,et al. Study of applications of the gypsum produced during flue gas desulfurization in a coal-fired boiler in improving the salt-alkali soil in Xinjiang region [J]. Journal of Ecological Environment ,2010 ,19(7) : 1682 - 1685.

(辉 编辑)



余热锅炉消音器的研制

据《Теплоэнергетика》2011 年 8 月刊报道 ,МЭИ(莫斯科动力学院)的专家研制了一种消音器 ,有助于降低 ПГУ(燃蒸联合装置)和 КУ(余热锅炉)燃气轮机装置的噪声 ,并进行了专门研究和分析。

结论如下:

- (1) 声响测量表明 ,余热锅炉内噪声级的降低取决于其热交换受热面的面积。使用所研制的消音器 ,能使低频和中频噪声降低几个分贝 ,使高频噪声降低几十分贝;
- (2) 提出了计算余热锅炉内声功率的公式 ,该功率取决于热交换受热面面积;
- (3) 在制定降噪措施时 ,考虑到声功率在余热锅炉内的减小 ,可以制造结构更紧凑和更廉价的消音器 ,即生产出在市场上更具竞争力的产品;
- (4) 所制定的余热锅炉燃气轮机装置和蒸燃联合装置降噪的措施可以使周围居民区内的噪声降低到环境卫生标准。

(吉桂明 摘译)

低位烟气余热深度回收利用状况述评(I) = **Review of the Application Status of Low Quality Flue Gas Waste Heat Utilization Technologies-Remaining Temperature Conditions and Heat Recovery Difficulties**

[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(3) . - 271 ~ 276

To enhance the utilization rate of energy sources for realizing energy conservation and emission reduction is one of important approaches for solving the current problems relating to energy sources and environment. Through an enumeration and analysis of the temperatures of flue gases outgoing from kilns and thermal energy and power equipment items in various sectors in both domestic and abroad ,it has been pointed out that the temperatures of the kind are still relatively high and a separate control in quality and quantity is proposed to be adopted for the mode of heat recovery during the heat transfer process of the flue gases in the waste heat recovery with an in-depth utilization of the waste heat in the flue gases being realized by utilizing the “driving power” of the waste heat in the flue gases. In addition ,an analysis of the influence of the change of the conditions for recovering the heat caused by a change in flue gas characteristics after the in-depth waste heat utilization was also performed. **Key words:** flue gas waste heat ,in-depth heat recovery ,flue gas characteristics ,separate control in quality and quantity

轴流压气机非轴对称轮毂造型对间隙流控制研究 = **Study of the Control Over the Clearance Leakage Flow by Modeling a Non-axisymmetrical Wheel Hub of an Axial Flow Compressor**

[刊 汉] MI Pan ,CHU Wu-li , ZHANG Hao-guang ,WANG Wei (College of Power and Energy Source ,Northwest Polytechnic University ,Xi'an , China ,Post Code: 710072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27(3) . - 277 ~ 281

A full three-dimensional numerical simulation was performed of a single-stage axial flow compressor with a clearance between the stator and rotor. An analysis of the flow field indicates that the leakage flow from the clearance between the stator and rotor can result in a relatively large flow separation in the end wall zone of the passage. To control the flow loss ,a non-axisymmetrical modeling was performed of the wheel hub of the stator and the overall performance of the compressor was improved after the said modeling. The flow field analytic results show that the non-axisymmetrical end wall modeling can change the distribution of the static pressure on the end wall ,thus improving the flow pattern of the clearance leakage flow in the passage and eliminating the return flow loss zone at the outlet of the passage. As a result ,the total pressure ratio of the compressor increases and the isentropic efficiency goes up by 0.9%. **Key words:** axial flow compressor ,non-axisymmetrical end wall ,clearance leakage flow ,isentropic efficiency

某大型舰船主汽轮机的建模与动态仿真 = **Modeling and Dynamic-state Simulation of a Large-sized War-ship-purposed Main Steam Turbine**

[刊 汉] CHEN Hang ,ZHENG Qun ,DENG Qing-feng ,WANG Jie(College of Power and Energy Source Engineering ,Harbin Engineering University ,Harbin ,China ,Post Code: 150001) //