

# 碳纤维换热器换热性能实验研究

曹生现, 段洁, 王恭, 赵波

(东北电力大学 自动化工程学院, 吉林 吉林 132012)

**摘要:** 为了解决烟气余热利用中换热器低温露点腐蚀问题, 提出了一种新型碳纤维换热器。并以碳钢换热器作为对比进行了实验。实验测量了碳纤维、碳钢两种材料换热管的导热系数; 利用烟风换热实验监测系统动态模拟火力发电厂锅炉尾部烟道换热器换热过程。在相同工况下实验测试了两种材料换热器的换热性能。结果表明: 本实验所用碳纤维换热管导热系数大于碳钢换热管; 碳纤维换热器整体换热性能弱于碳钢换热器。原因是为防止碳纤维换热器渗水, 外表面涂敷了一定厚度的树脂材料, 导致碳纤维换热器整体换热性能下降。

**关键词:** 碳纤维; 换热器; 导热系数; 换热性能

中图分类号: TK124 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2016.08.002

## 引言

目前, 我国火力发电厂排烟温度高于设计值的现象普遍存在。设计排烟温度一般在  $120 \sim 140^{\circ}\text{C}$ , 但实际排烟温度更高, 大量烟气余热排放至空气中, 一方面造成能源浪费, 另一方面给生态环境带来巨大压力, 是亟待解决的问题<sup>[1~2]</sup>。余热利用技术应运而生, 成为重要的节能措施, 是目前国内外学者和火力发电厂共同关注的热点问题, 取得了大量的研究和实际应用成果<sup>[3~8]</sup>, 有效降低排烟温度。但燃煤烟气中含有二氧化硫、三氧化硫、氮氧化物、水蒸气、灰分和未完全燃烧煤粉颗粒等物质, 锅炉受热面常采用 20 号碳钢、12Cr1MoV、15CrMo 合金钢等材料, 易发生“低温露点腐蚀”。为保证换热器安全、高效运行, 限制了排烟温度进一步降低, 制约了烟气余热利用水平。为提高火力发电厂烟气余热利用水平, 并防止换热设备发生“低温露点腐蚀”, 开发新

型高导热、耐腐蚀换热器势在必行。

碳纤维是兼具高导热性、耐磨性和耐腐蚀性等一系列特点的材料, 广泛应用于航空航天、风力发电、建筑材料、工业和医疗等领域<sup>[9~10]</sup>。因其导热性能优异, 已有相关电热产品问世, 但将碳纤维制成换热器应用于火力发电厂的相关产品研究尚属空白。一方面, 碳纤维换热器管材制备和连接工艺是关键技术, 有待进一步完善; 另一方面, 目前实验室缺少能够模拟火力发电厂烟风换热系统的换热器性能测试平台。解决上述两个关键问题, 将为碳纤维换热器的开发提供工艺技术支持, 为碳纤维换热器性能测试提供实验平台。

本研究优选碳纤维材料, 按照一定加工工艺制备碳纤维换热器, 进行碳纤维换热器、碳钢换热器换热性能实验对比研究, 为后续改进研发碳纤维换热器奠定基础。

## 1 碳纤维换热器制备工艺流程

碳纤维换热器基本结构是碳纤维管材, 碳纤维管材采用拉挤工艺制备而成。碳纤维束浸润不同的树脂槽, 并通过低温预成型口模, 控制树脂含量, 挤出包埋的空气。将不同树脂浸渍的碳纤维束进行高温拉挤成型固化, 固化温度  $150 \sim 250^{\circ}\text{C}$ 。其中, 浸渍所用热固性树脂基体可选用耐高温、抗腐蚀、高性能改性环氧树脂基体与相应固化剂和乙烯基聚脂等的混合物。碳纤维束采用 T36S-12K 碳纤维 880 卷束, 其中皮层碳纤维 39 卷, 通过送经、浸渍、预成型、入模具固化成型、拉挤管材和切割等工艺, 连续

收稿日期: 2015-11-05; 修订日期: 2016-02-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51376042); 吉林省科技发展计划项目(20150203005sf); 吉林市科技发展计划项目(201464047); 东北电力大学博士科研启动基金资助项目(BSJXM-201316)

作者简介: 曹生现(1974-), 男, 山东菏泽人, 东北电力大学教授。

生产碳纤维管材工艺,制备出具有耐高温、抗腐蚀和抗氧化性的碳纤维管材。管材经过进一步成型、接头连接工艺,制备出碳纤维换热器。

## 2 碳纤维材料导热系数测量

换热器选材原则中,材料导热性能是重要指标,对换热器整体换热性能起主要作用,测量材料导热系数对研制和开发新型换热器具有重要意义。本实验分别测量了碳纤维换热管、碳钢换热管的导热系数。

### 2.1 实验装置

该装置基于稳态平衡法设计而成<sup>[11]</sup>,实验装置具体结构如图1所示。该装置由电加热炉、蒸汽发生器、导气管、冰水混合物、待测材料、铁制容器(底部开孔,孔径与样品外径相同,材料牢固镶嵌于其中)、保温材料、支座和接水杯组成。实验时,蒸汽发生器产生的蒸汽通过导气管通入管状材料内部,使材料内壁处于100℃的稳定高温环境中。镶嵌有待测材料的铁制容器中盛有0℃的冰水混合物,使材料外壁处于0℃环境中。为防止冰水混合物与周围环境发生热交换,容器四周需包裹保温材料,材料内部蒸汽降温凝结的水直接流入接水杯中。

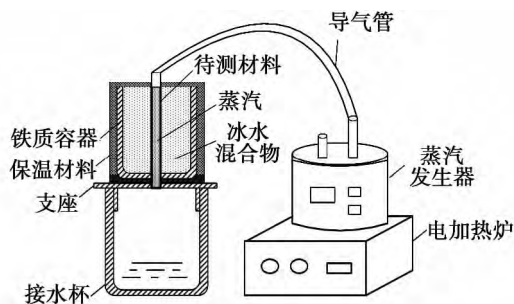


图1 导热系数测量装置

Fig. 1 Measurement configuration for thermal conductivity

### 2.2 实验原理

根据傅里叶导热方程,对于圆筒壁材料,通过整个圆筒壁面的热流量为:

$$\Phi = \frac{2\pi\lambda l(t_1 - t_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (1)$$

式中: $\lambda$ —材料导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;  $t_1$ 、 $t_2$ —材料内壁、外壁温度差,℃;  $r_1$ 、 $r_2$ —材料内径、外径,m;  $l$ —材料有效长度,m。

$t$ 时间内通过材料的热量为:

$$Q = \Phi t = \frac{2\pi\lambda l(t_1 - t_2)t}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (2)$$

管状材料传递的热量 $Q$ 等于冰水混合物溶解所吸收的热量,冰水混合物温度是0℃,对其加热时,热量先被冰吸收融化,在冰未完全融化前,冰水混合物温度保持0℃不变,此时 $Q = ML$ ,即热量 $Q$ 等于冰溶解所吸收的热量。其中 $M$ 为冰水混合物溶解质量, $L$ 为冰的溶解热, $L = 3.34 \times 10^5 \text{ J/kg}$ 。最终推导出导热系数计算公式为:

$$\lambda = \frac{ML \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi l(t_1 - t_2)t} \quad (3)$$

待测材料的外壁与冰水混合物接触,内壁与蒸汽接触,两壁面温度差为恒定值100℃,即 $t_1 - t_2 = 100^\circ\text{C}$ 。只要测量出 $M$ 、 $r_1$ 、 $r_2$ 、 $l$ 、 $t$ 即可由式(3)求出材料的导热系数。

### 2.3 实验结果与分析

基于上述实验装置,分别测试了碳纤维换热管、碳钢换热管两种材料的导热系数,换热管结构参数如表1所示。实验时间600s,每种材料换热管各完成5组平行实验,实验结果如表2所示。

表1 换热管结构参数

Tab. 1 Structural parameters of heat exchanger tube

	外径/m	厚度/m	长度/m
碳纤维换热管	0.032	0.003 25	0.058
碳钢换热管	0.026	0.002	0.095

由表2可以看出,相同实验时间内,碳纤维材料传热溶解冰水混合物的质量是13.70kg,碳钢传热溶解冰水混合物的质量是27.73kg,经计算,碳纤维材料换热管的导热系数是47.55  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,大于碳钢材料换热管的导热系数43.22  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,表明本实验所用碳纤维换热管导热性能优于碳钢换热管。运用于烟气余热利用中,在相同工况下,碳纤维换热器理论上换热量应大于碳钢换热器,加之碳纤

维材料耐酸、碱腐蚀,“低温露点腐蚀”问题得以解决,可更大幅度地降低排烟温度,提高烟气余热回收利用效率。

表 2 导热系数测量结果

Tab. 2 Results of thermal conductivity measurement

实验次数	溶解质量/kg	平均质量/kg	平均导热系数/ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
碳纤维换热管	1	14.28	47.55
	2	13.09	
	3	13.94	
	4	11.90	
	5	15.30	
碳钢换热管	1	27.03	43.22
	2	28.90	
	3	28.22	
	4	26.10	
	5	28.39	

### 3 碳纤维换热器换热性能实验研究

#### 3.1 实验系统

实验系统参照实际火力发电厂烟风系统设计,分别采用碳纤维、碳钢两种不同材料换热器进行模拟实验研究,以对比两种材料换热器在相同工况下的换热性能。实验系统具体结构如图 2 所示,实验前将上、下水箱注满水,运行水泵并启动冷却装置,待稳定后可进行锅炉点火,动态模拟电厂锅炉尾部烟道中换热器换热过程,利用采集模块采集各测点参数值,送入工控机完成数据处理和计算,在线监测换热器循环冷却水温升、换热器烟气温降幅度和换热器换热热流量,以对比两种材料换热器的换热性能。

#### 3.2 实验工况

换热器进口烟气温度控制在  $(125 \pm 10) ^\circ C$ ,换热器进口水温度稳定在  $(19 \pm 0.5) ^\circ C$ ,冷却水流量控制在  $(1.4 \pm 0.02) m^3/h$ ,烟气流量控制在  $(100 \pm 25) m^3/h$ ,实验稳定连续运行 8 h。碳纤维、碳钢换热器均为蛇形管结构,为防止碳纤维换热器渗水,外部涂敷了一定厚度的树脂材料,碳钢换热器未涂敷任何材料,几何结构参数如表 3 所示。

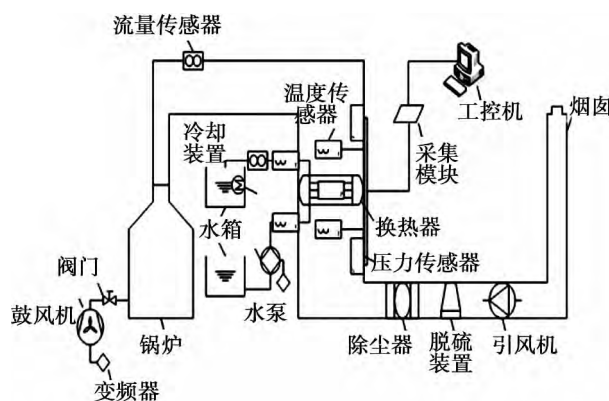


图 2 系统结构图

Fig. 2 Experimental setup

表 3 换热器结构参数

Tab. 3 Structural parameters of heat exchanger

	碳纤维换热器	碳钢换热器
管外径 $\times$ 壁厚 / m	$0.032 \times 0.003$	$0.025 \times 0.0025$
横向节距 / m	0.056	0.065
纵向节距 / m	0.048	0.057
横向管排数(奇/偶)	2/3	
纵向管排数	4	
换热面积(不含弯头) / $m^2$	0.5024	0.3925

#### 3.3 实验结果与分析

##### 3.3.1 冷却水温升幅度

换热器进口烟气温度、循环冷却水流量、换热器结构等参数一定条件下,换热器循环冷却水温度变化能够反映换热器换热性能好坏,循环冷却水温升幅度越大,换热器换热性能越好。两种材料换热器实验工况完全一致,碳纤维、碳钢换热器稳定连续运行 8 h 水温变化曲线如图 3、图 4 所示。

由图 3、图 4 可知,碳纤维换热器内循环冷却水平均温升  $0.25 \sim 0.35 ^\circ C$ ,碳钢换热器内循环冷却水平均温升  $0.65 \sim 0.75 ^\circ C$ ,平均高出碳纤维换热器  $0.4 ^\circ C$ ,换热面积却小于碳纤维换热器  $0.1099 m^2$ 。由此可知,相同实验工况下,本实验所用碳纤维换热器换热性能低于碳钢换热器,这与上述材料导热系数测量实验结果相违背。此现象的原因为:为防止碳纤维换热器渗水,实验所用碳纤维换热器外部涂覆了一定厚度的环氧树脂材料,该树脂材料导热性能差,增加了烟气与碳纤维材料之间的传热热阻,致

使碳纤维换热器整体换热性能下降,导致碳纤维换热器内部循环冷却水温升幅度小于碳钢换热器。但在这样高的热阻下,碳纤维换热器仍能够达到相同工况下碳钢换热器温升的 50%,可见碳纤维换热器本身具有良好的换热能力。

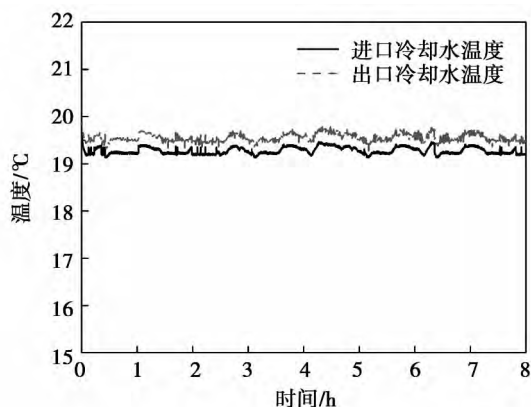


图 3 碳纤维换热器水温变化曲线

Fig. 3 Water temperature in carbon fiber heat exchanger

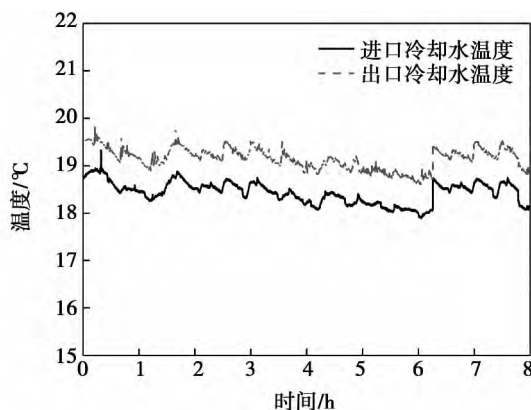


图 4 碳钢换热器水温变化曲线

Fig. 4 Water temperature in carbon steel heat exchanger

### 3.3.2 烟气温降幅度

循环冷却水流量、温度和换热器结构等参数一定条件下,换热器烟气温降幅度能够反映换热器换热性能好坏,烟气温降幅度越大,换热器换热性能越好。两种材料换热器实验工况完全一致,碳纤维、碳钢换热器稳定连续运行 8 h 烟气温度变化曲线如图 5、图 6 所示,烟气温降变化曲线如图 7、图 8 所示。

由图 5、图 6 可知,维持换热器进口烟气温度

125 °C 左右,碳纤维换热器出口烟气温度在 90 °C 附近波动,碳钢换热器出口烟气温度在 80 °C 附近波动。由图 7、图 8 可知,碳纤维换热器平均烟气温降 35 °C,碳钢换热器平均烟气温降 45 °C,比碳纤维换热器烟气温降高约 10 °C。造成此现象的因素同上述循环冷却水温升幅度影响因素,碳纤维换热器外表面涂覆的树脂材料阻碍了烟气与碳纤维材料的直接接触,影响了碳纤维换热器换热性能,但仍能保持约 30 °C 的烟气温降,可见碳纤维换热器本身具有良好的换热能力。

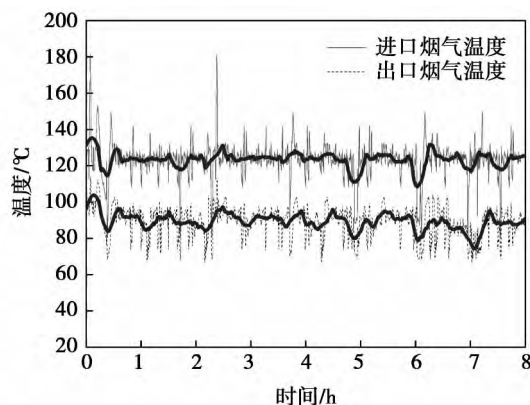


图 5 碳纤维换热器烟气温变化曲线

Fig. 5 Flue gas temperature in carbon fiber heat exchanger

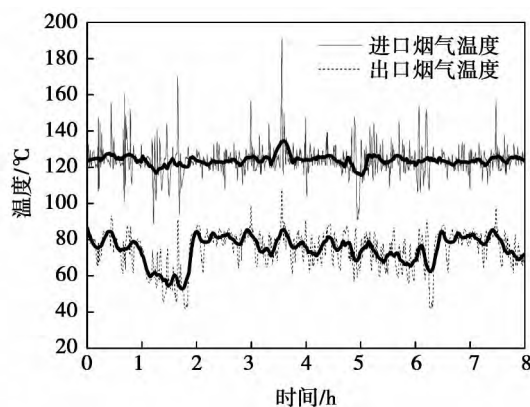


图 6 碳钢换热器烟气温变化曲线

Fig. 6 Flue gas temperature in carbon steel heat exchanger

### 3.3.3 传热热流量

传热热流量能够直接反映出换热器的换热能力,本文热流量包括换热器烟气侧放热热流量和循

环冷却水侧吸热热流量 根据实时采集的运行参数, 利用工控机计算而得。两种材料换热器实验工况完全一致, 碳纤维、碳钢换热器稳定连续运行 8 h 换热热流量变化曲线如图 9、图 10 所示。

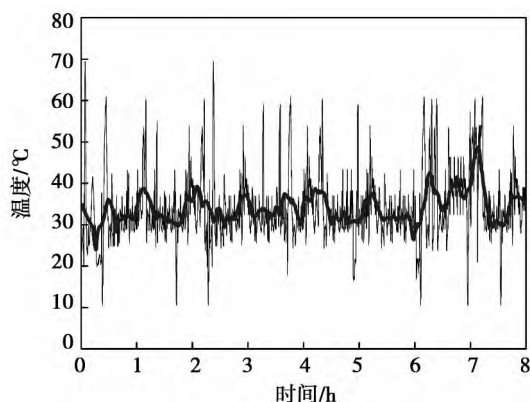


图 7 碳纤维换热器烟气温降变化曲线

Fig. 7 Flue gas temperature drop in carbon fiber heat exchanger

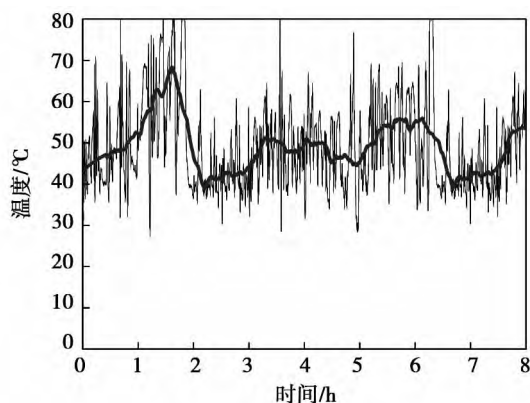


图 8 碳钢换热器烟气温降变化曲线

Fig. 8 Flue gas temperature drop in carbon steel heat exchanger

由图 9、图 10 可知, 碳纤维换热器烟气侧放热热流量在 1 000 W 波动, 循环冷却水侧吸热热流量在 500 W 波动, 两者差值平均 500 W。这一部分热流量是换热器所处烟道散热损失和其它环境因素综合作用的结果。碳钢换热器烟气侧放热热流量在 1 700 W 波动, 循环冷却水侧吸热热流量在 1 200 W 波动, 两者差值同样 500 W。散热损失相同, 碳纤维换热器烟气侧、循环冷却水侧换热热流量均低于碳钢换热器。

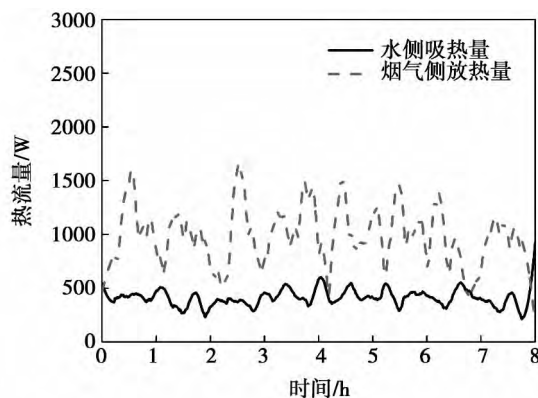


图 9 碳纤维换热器换热热流量变化曲线

Fig. 9 Heat flux in carbon fiber heat exchanger

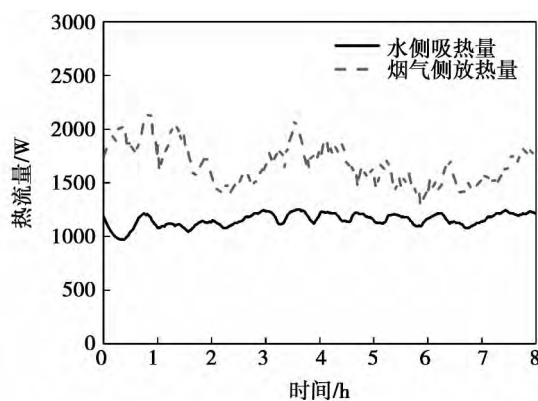


图 10 碳钢换热器换热热流量变化曲线

Fig. 10 Heat flux in carbon steel heat exchanger

## 4 结 论

(1) 实验测量了碳纤维换热管、碳钢换热管导热系数, 分别是 47.55、43.22 W/(m·K), 表明本实验用碳纤维换热管导热性能优于碳钢换热管;

(2) 利用烟风换热实验监测系统, 测试了碳纤维换热器、碳钢换热器换热性能。对比分析可知, 相同实验工况下, 碳纤维换热器内循环冷却水温升幅度、烟气温降幅度、换热热流量均小于碳钢换热器, 分别是 0.4 °C、10 °C 和 700 W, 表明本实验用碳纤维换热器换热性能劣于碳钢换热器;

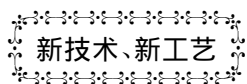
(3) 本实验用碳纤维换热器换热性能受涂覆的树脂材料影响, 导致碳纤维换热器整体换热性能下降, 但仍具有一定的换热能力。表明碳纤维换热器应用的可行性, 为后续碳纤维换热器的优化、改进奠

定基础。

#### 参考文献:

- [1] 徐 刚, 许 诚, 杨勇平, 等. 电站锅炉余热深度利用及尾部受热面综合优化 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(14): 1-8.  
XU Gang, XU Cheng, YANG Yong-ping, et al. Deep utilization of exhaust heat and comprehensive optimization of tail heating surfaces for utility boilers [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(14): 1-8.
- [2] 胡广涛, 岳益峰. 降低锅炉排烟温度利用烟气余热的实践与理论研究 [J]. 节能技术, 2012, 30(174): 295-298.  
HU Guang-tao, YUE Yi-feng. Research and practice on recovering boiler waste heat by reducing the exhaust gas temperature [J]. Energy Conservation Technology, 2012, 30(174): 295-298.
- [3] 康晓妮, 马文举, 马 涛, 等. 320 MW 机组锅炉加装低温省煤器的经济型研究 [J]. 热力发电, 2012, 41(5): 8-11.  
KANG Xiao-ni, MA Wen-ju, MA Tao, et al. Economic study on adding low-temperature economizer on a 320 MW unit [J]. Thermal Power Generation, 2012, 41(5): 8-11.
- [4] 赵 斌, 张路涛, 吕 太, 等. 带排烟余热回收的 CFB 锅炉节能分析 [J]. 热能动力工程, 2013, 28(5): 497-501.  
ZHAO Bin, ZHANG Lu-tao, LU Tai, et al. Energy-saving analysis of a CFB boiler with the waste heat recovered from the exhaust gases [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2013, 28(5): 497-501.
- [5] ESPATOLERO S, CORTES C, ROMEO L M. Optimization of boiler cold-end and integration with the steam cycle in supercritical units [J]. Applied Energy, 2010, 87(5): 1651-1660.
- [6] WANG Chao-jun, HE Bo-shu, SUN Shao-yang. Application of a low pressure economizer for waste heat recovery from the exhaust flue gas in a 600 MW power plant [J]. Energy, 2012, 48(1): 196-202.
- [7] 程东涛, 马汀山, 陈 恺, 等. 低温省煤器对汽轮机组热力系统经济性影响研究 [J]. 热能动力工程, 2015, 30(3): 427-430.  
CHENG Dong-tao, MA Ting-shan, CHEN Kai, et al. Study of the influence of a low temperature economizer on the thermal cost-effectiveness of a steam turbine unit [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2015, 30(3): 427-430.
- [8] 吴华新. 低位烟气余热深度回收利用状况述评(Ⅱ) [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-remaining temperature conditions and heat recovery difficulties [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2012, 27(3): 271-276.
- [9] 杨小平, 黄智彬, 张志勇, 等. 实现节能减排的碳纤维复合材料应用进展 [J]. 材料导报, 2010, 24(2): 1-5, 10.  
YANG Xiao-ping, HUANG Zhi-bin, ZHANG Zhi-yong, et al. Application progress of carbon fiber reinforced polymers for energy saving and emission reduction [J]. Materials Review, 2010, 24(2): 1-5, 10.
- [10] 罗益锋, 罗晰旻. 近期碳纤维及其复合材料的新发展 [J]. 高科技纤维与应用, 2014, 39(1): 1-9, 18.  
LUO Yi-feng, LUO Xi-min. New developments of recent carbon fiber and their composite materials [J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2014, 39(1): 1-9, 18.
- [11] 代 伟, 谢春茂. 导热系数实验装置研究 [J]. 实验科学与技术, 2008, 6(1): 146-147, 153.  
DAI Wei, XIE Chun-mao. Study on thermal conductivity test installation [J]. Experiment Science & Technology, 2008, 6(1): 146-147, 153.

(姜雪梅 编辑)



新技术、新工艺

## 用于海船的大功率动力装置的展望

据《Судостроение》2015 年 9~10 月刊报道,以 C. O. Макаров 海军上将命名的俄罗斯国立海洋和内河船队大学的专家分析了用于海船大功率动力装置的发展远景。

一些类型的海船都装有大功率的动力装置。大量的集装箱船、海洋破冰船、液化天然气运输船和油船均属于这种船舶。例如,现代集装箱船动力装置的功率达到 90 MW,破冰船的功率达到 30~55 MW,核动力破冰船的功率达到 70 MW,大型液化气运输船的功率达到 21~40 MW。

对在这些船舶上使用柴油机装置、汽轮机装置和核动力装置进行了性能分析和比较。指出,现有的用于海船大功率装置几乎已经无法再进行改进。而利用天然气运行的大功率装置,尤其是基于燃气轮机的蒸燃联合装置的效率可以超过 50%。这种装置首先可用于 LNG(液化天然气)运输船。也可以把它们用于大功率的海洋破冰船。因此,必须尽快地开始在这个领域内的设计工作。

(吉桂明 摘译,徐立民 提供)

层流压气机叶片设计中的关键问题 = **The Key Problems in the Inverse Design of Laminar Flow Compressor Blade Profile** [刊 汉] SAI Qing-yi ,HUANG Dian-gui ( University of Shanghai for Science and Technology ,Shanghai ,China ,Post code: 200093) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31( 8) . -1 ~5

Laminar flow compressor blades are type of blades that maintain laminar flow conditions in passages for a wide range of operating conditions. In this way ,the aerodynamic efficiency and off-design performance of compressor can then be considerably improved. This type of blade has several characteristic features ,including a slightly rearward maximum thickness location ,a relatively small leading edge radius and a flat suction side. Based on the review of mainly relevant literatures ,the key and basic problems for laminar compressor blade are summarized. A prospective stating that the aerodynamic performance is closely related to the continuous degree of first-order and second-order derivatives of blade profile is proposed. It is suggested to conduct study on the sensitivity of discontinuous degree for first-order and second-order derivative distributions under different values of Reynolds numbers ,Mach numbers ( supersonic area ,transonic area and shock wave position) and pressure gradients ( favorable pressure and adverse pressure areas) ,and then identify the objective laws. In this way ,the fundamental principle for the deviation of discrete line in the process of design ,manufacturing as well as performance prediction for laminar compressor blade is determined. **Key words:** axial compressor ,laminar flow ,inverse design ,blade profile ,transition

碳纤维换热器换热性能实验研究 = **Experimental Study on the Heat Transfer Performance of Carbon Fiber Heat Exchanger** [刊 汉] CAO Sheng-xian ,DUAN Jie ,WANG Gong ,ZHAO Buo( School of Automation Engineering ,Northeast Dianli University ,Jilin ,Jilin ,China ,Post Code: 132012) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31( 8) . -6 ~11

This paper proposes a kind of carbon fiber heat exchanger aiming to solve the low temperature dew point corrosion in the waste heat utilization. Comparative experiments on the coefficient of thermal conductivity between carbon fiber heat exchanger tube and carbon steel heat exchanger tube have been done. The experiment on heat transfer performance is done by means of the monitoring system for heat exchange in air and gas system ,which can simulates the working environment of heat exchangers in power plant. The experimental results show that the thermal conductivity of carbon fiber heat exchanger tube is higher than that of carbon steel heat exchanger tube ,while the overall heat transfer performance of carbon fiber heat exchanger is relatively poor due to the resin coating ,which is utilized to prevent water percolation. **Key words:** carbon fiber ,heat exchanger ,thermal conductivity ,heat transfer performance

梯度多孔材料部分填充圆管强化换热的研究 = **Study on Heat Transfer Enhancement in Pipes Partially Filled with Gradient-porous Materials** [刊 汉] WANG Bai-cun ,WANG Peng-fei ( College of Chemical and Biological Engineering ,Zhejiang University ,38 Zheda Street ,Hangzhou ,China ,Post Code: 310027) ,HONG Yi-feng ( School of Materials Science and Engineering ,Georgia Institute of Technology ,Atlanta ,GA 30332 ,USA) ,XU Zhong-bin ( College of Chemical and Biological Engineering ,Zhejiang University ,38 Zheda Street ,Hangzhou ,Chi-