

以流化床换热回收柴油机 废气余热的试验研究*

李戩洪 朱石伟

(中国科学院广州能源研究所)

[摘要]传统的对流换热式柴油机余热锅炉存在受热面容易污染和传热系数低的缺点。利用流化床换热可以解决这个问题。本文介绍了在 30 kW 柴油机上所作的试验研究。取得的结果令人满意,为工业应用提供了有用的设计参数

关键词 流化床 对流换热 废热利用 柴油机排气

分类号 TK421.5 TK115

0 前言

柴油机有效功的热效率只有(30~45)%,排气带走的热量相当可观,约占燃油总发热量的三分之一,而且温度较高(300~500℃)。如果加以回收利用,可提高柴油机总热效率(绝对值)(10~15)%。

柴油机的废气余热值得回收利用虽然早已为人们所共识,但实际应用并不普遍。主要原因是,现行的余热锅炉多为对流管式,存在的最大问题是柴油机废气中含有焦油、油渣等不完全燃烧物,会污染换热器的受热面,以致本来就不高的传热系数大幅下降。清除这些污垢也不容易,由于传热系数低,需要较大的换热面积,因此金属材料耗量大,装置的体积也大,经济效益并不见好。利用流化床换热则可以很好地解决上述问题^[1,2]。流化床换热管埋浸在流化状态的颗粒层里,由于固体颗粒层的热容量

比气体大得多,同时流化粒子不停地冲刷受热面,破坏或削弱了壁面气膜的边界层,从而使传热系数大增,比对流换热高 4~8 倍。而换热管因受到颗粒不停冲刷而保持表面清洁,这样就解决了表面积垢问题。柴油机排气除了有热能之外,还有一定的余压,刚好可以利用来推动流化床。这样既解决了受热面污染和传热系数低的问题,又充分回收了柴油机废气的余热和余压,互相配合,一举两得。

回收柴油机废气余热有广阔的应用前景。例如,列车上利用余热产生蒸汽或热水,冬天可以采暖,夏天可用来制冷空调。又如,轮船、渔船上可用来制冰,渔产品保鲜或干燥、海水淡化等。如果全国的内燃机车、轮船、柴油电站都加以利用,意义十分重大。

1 值得注意的几个问题

* 本研究得到广东省科学基金资助

收稿日期 1994-11-15 收修改稿 1995-01-05

1.1 排气阻力对柴油机功率的影响

以柴油机的排气去推动流化床,人们一定会担心,所造成的阻力会不会影响柴油机的出力?这是本研究是否可行的关键。因此有必要弄清排气阻力因素对柴油机出力的影响情况,以指引流化床换热装置的设计。

许多资料称,对增压柴油机,排气阻力不超过 3000 Pa,对非增压柴油机,不超过 5000 Pa,可视为对柴油机的铭牌功率没有影响。

实际上,排气阻力对柴油机功率的影响是一个不断变化的过程。在阻力增大的起始阶段,功率的变化是不大的。以后随着阻力不断增和,功率开始下降,而且下降的趋势越来越大。例如 6250 Z 型增压柴油机,排气阻力为 2666 Pa 时,功率为铭牌出力的 98.9%;又如 6250 型非增压柴油机,排气阻力为 2932 Pa 时,出力为 99%。可见在这范围内,对柴油机的功率没有多少影响^[3]。为留有余地,保证柴油机出力在 99% 以上,我们把流化床换热装置的压降指标定为 2000 Pa 以下。在这个范围内,可视为对柴油机功率没有影响。

1.2 换热管磨损问题

由于固体颗粒不停地冲刷受热面,虽然解决了管子壁面积垢的问题,但同时又产生了磨损问题。磨损是存在的,不过进程很缓慢。我们可以比较沸腾锅炉埋管受热面的情况。后者在高温燃烧(约 900℃)和猛烈冲刷的恶劣环境下,寿命尚可达一年或一年以上。对于本例来说,温度要低得多(床温约 250℃),流化速度也低得多,换热管寿命应该不成问题。况且防磨措施及耐磨材料已有相当成功的研究。

1.3 流化颗粒粘结问题

在正常连续运行情况下,流化颗粒一般是不会粘结的。问题在于停机冷却后,再

重新启动时,有可能出现粒子粘结、结团的现象。随着床温升高,粒子又相互碰撞,会很快恢复正常。试验中将注意这个问题。

2 流化床换热试验装置

为考察流化床换热用于回收柴油机废气余热的可行性,研究运行中可能出现的问题和各技术参数的影响,我们研究设计了一组试验装置,直接在柴油机排气上作热态试验。设计的一个重要原则是尽量减小压降,限制在 2000 Pa 以下。其中的技术措施包括选取合适的料层高度和流化速度,以及良好的布风系统。由于用在柴油机废气的特殊场合,要求布风板阻力小、不易堵塞、不漏料。现成的多种形式的布风板都不理想。为此,研究提出了一种新的气体分布器,并获得了中国专利(91.216035.7)。

图 1 是试验装置示意图。柴油机的排气管接到流化床风室进口管上,废气经等压风室、布风板分配进入流化床内,令静止的颗粒床层形成流化状态。换热管埋浸在颗粒床层中。废气最后从顶部排出。柴油机型号 4-90, 30 kW。流化床横截面 $0.25 \times 0.25 \text{ m}^2$, 高 1 m。两侧面板镶有玻璃,以便观察床内情况。换热管外径 $2.7 \times 10^{-2} \text{ m}$,

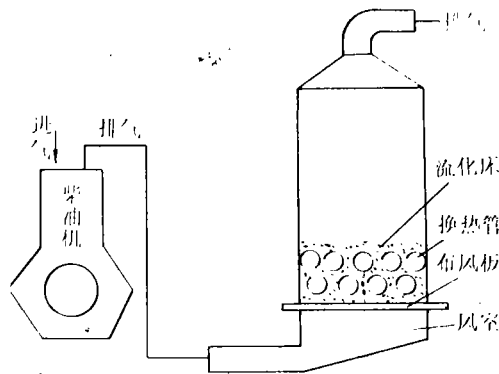


图 1 流化床换热器试验台

共9根,分两层错列布置。上排管轴线距布风板0.1 m。流化颗粒为河砂,经筛分选择,粒度为0.45~0.90 mm。

3 热态试验结果

热态试验内容包括:布风板性能和阻力试验;流动及阻力试验;传热试验。

3.1 布风板性能和阻力试验

要实现小于2000 Pa的整体阻力,一块压降小的布风板是关键,还要适合柴油机废气的特殊环境。为此,我们研制了一种新的布风板,是半管侧流式,并做了不同尺寸的三块进行试验。试验结果在图2示出:三块布风板的压降都不大,从0.6 m/s到1.0 m/s的流化速度范围,压降在300~800 Pa之间。在运行工况下,我们选定操作气速为0.7 m/s左右,对应的布风板压降仅为400 Pa,比预期的目标还要好。

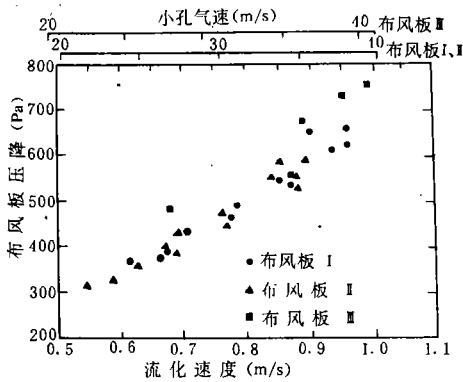


图2 布风板压降试验结果

三块面风板的布风均匀性都很好,基本没有漏料现象。布风板的成功设计,为项目的可行打下了良好的基础。

3.2 流动及阻力试验

试验内容是测量加入料层(高度为80

mm)及埋入换热管后的总压降,考察流化床在柴油机排气推动下的工作情况。

试验中看到,虽然柴油机排气是间歇性的,但由于等压风室和砂床的作用,流化质量良好,砂床就象烧开的水一样在换热管周围不停地翻滚,冲刷着受热面;停机后观察换热管,壁面象经过抛光一样光亮,而其它被废气直接冲刷的部分已经积满了油垢,可见确实是解决了受热面污染的问题。此外还有减小噪音的作用。停机冷却后再启动也没有任何困难和障碍,流化质量照样很好。

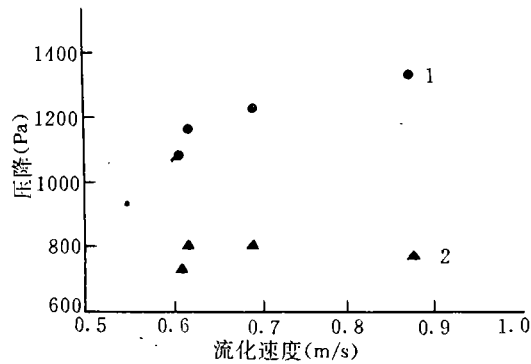


图3 床层压降试验

●床层+布风板压降
▲床层压降

图3是床层压降试验结果。图中数据1为总的压降,它随着气速增大而增大,但实际增大的部分只是相应的布风板压降的增大。数据2是扣除了相应布风板压降后料层的净压降。图4是埋入换热器后的总压降试验结果。可以看到,换热器整体总阻力是不大的。在0.7 m/s的操作气速附近,总的压降还不到1400 Pa。可以推算,即使增加料层高度至120 mm,总压降也不过1800 Pa左右,比我们已留有余地的规定范围(<2000 Pa)还要小。因此,在我们的选型和操作参数下,不必担心阻力会超过

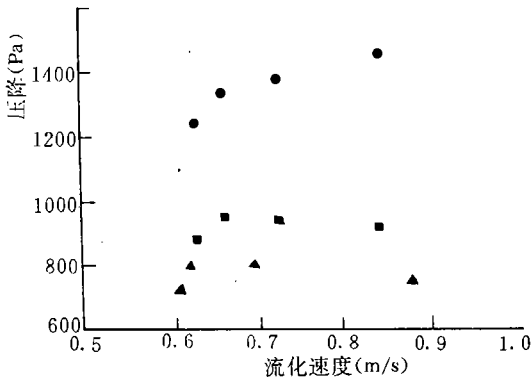


图 4 埋入换热管后床层的压降

●床层、换热器、布风板
□床层+换热器
▲床层

设计指标,也不会影响柴油机的出力。3.3 传热试验

表 1 是传热试验结果。由于试验的柴油机没有负载,废气温度不高,影响了传热系数未能取得最佳数值,因此也未作优化参数的试验。换言之,所得的传热系数的结果还有进一步提高的余地。

从表中看出,三次试验结果所得的传热系数均在 $170 \text{ w}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ 左右。这个值对于流化床换热来说不算高,但在本工况下是正常的。主要原因是烟气温度太低,因而其导热系数也低,其次是辐射换热的贡献也小。即便如此,也比常规的对流换热高了几倍。

表 1 流化床传热试验数据及结果

项目	单位	来源	数值		
			第一次	第二次	第三次
柴油机排气温度	℃	测量	125	125	112
床层平均温度	℃	测量	78.5	79	70.5
流化速度	m/s	测量	1.09	1.09	0.95
进口水温	℃	测量	31	31	31
出口水温	℃	测量	38.2	38.6	37.2
水流量	kg/h	测量	171.7	167.3	161.0
吸热量	W	计算	1437.5	1578.5	1160.7
受热面积	m^2	取定	0.189	0.1893	0.1893
平均温差	℃	计算	43.8	44.1	36.3
传热系数	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$	测量计算	173.4	177.1	168.9
传热系数	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$	利用公式(1)计算	187	187	184

关于流化颗粒层内对叉排管束的换热系数,有 Zabrodsky 的经验公式^[4]: $h_{\text{max}} = 28.2 \rho_p^{0.2} K_s^{0.6} d_p^{-0.36} \left(\frac{X}{d_p}\right)^{0.04} \left(\frac{d_T}{d_{20}}\right)^{-0.12}$ (1)

式中各参数均用 SI 制。其中 d_p 为颗粒平均粒径,适用于小于 0.8mm 的颗粒; K_s 为烟气导热系数; d_T 为换热管径, d_{20} 为 $2 \times$

$10^{-2}m$ 的基准管径; X'_m 为管子间的最小间距。利用(1)式,计得三次试验工况下的传热系数为 187、187 和 184 $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$,与实验结果相差仅 8.15%,说明实验没有明显的人为误差,结果是可靠的。反过来也说明可利用式(1)去推算其它工况下的传热系数。比如,在柴油机正常运行工况下,排气温度为 350~500 $^\circ C$,假定在 400 $^\circ C$ 情况下,利用公式(1)计算可得传热系数为 260 $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 。

(2)本研究提出限定流化床换热装置总压降小于 2000 Pa 的指标,保证了柴油机的功率在 99%以上。本方案选型和技术参数的选择满足了这一要求,其中布风板的设计更具特色。

(3)初步的传热系数试验结果令人满意,比常规的对流换热约高 4 倍,还有进一步提高的余地。

参 考 文 献

- 1 Carlomagno G M et al. Heat recovery from diesel exhausts by means of a fluidized bed heat exchanger. AIChE Symposium Series, 1983, 79(222), 66~74
- 2 Virr M J and Williams H W. Heat recovery by shallow fluidized beds. CEP July 1985, 50~56
- 3 柴油机发电站设计编写组. 柴油机电站设计. 1977年9月第一版
- 4 [美]Rohsenow W M 等主编. 传热学应用手册. 谢力译,北京,科学出版社,1992年

4 结 论

(1)以流化床换热回收柴油机废气余热技术上是可行的,既充分回收了废气的余热和余压,又解决了常规对流换热器受热面污染和传热系数低的问题。

作者简介 李戡洪 男 1949年生,副研究员,1985年中科院广州能源所热能工程硕士研究生毕业。主要从事流化床燃烧、锅炉除尘、余热利用、太阳能热利用等研究。主要成果有:“沸腾悬浮综合燃烧装置”获科学院一等奖、“沸腾锅炉高效除尘技术”获科学院三等奖,均为第二完成人。 510070 广州先烈中路 81号大院



核电开发的宏伟计划

据“Modern Power Systems”1995年8月号报道,中国国家计委已把核电描述为最有前途的能源,并宣布计划在2010年前要建造相当于十个大亚湾压水堆的核反应堆。

设定了2010年前20000MW的生产目标,该委员会也透露了7个新的核项目的细节。核电站建设将集中在经济发达但仍遭受能源短缺的东部和南部沿海地区。此计划考虑到,估计在2020年前国家还要增加50000MW的装机容量。煤的储量正在减少并且中国是原油的纯进口者。发展水电也证明是一个复杂的问题,并且引起争论的长江三峡工程大概至少在20年内不会开始生产电力。

同时,300MW的秦山核电站已由国家鉴定委员会验收。

(学牛 供稿)

simulation results the capacity for coping with load fluctuations has been identified. **Key words:** high-efficiency hydraulic coupling, dynamic performance, hydraulic transmission system

燃用混煤电站锅炉结渣原因分析及结渣趋势的模糊预测 = An Analysis of the causes of Boiler Slagging at a Mixed Coal-Fired Power Station and a Fuzzy Prediction of the Slagging Tendency [刊, 中]/Guo Jia, Zeng Hancai (Huazhong University of Science & Engineering) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996, 11(4). 209~212

In connection with a new problem of firing a coal mixture comprising two kinds or more than two kinds of coals of different properties analysed in this paper are the causes of slag formation for such coal mixture with its slagging tendency being predicted by the use of a fuzzy cluster analytical method. On this basis pertinent procedures and measures are proposed to cope with the above-cited problem. **Key words:** coal, combustion mixture, slagging cause analysis, fuzzy prediction, preventive measures

双回流燃烧器实验研究与应用 = Experimental Study of a Dual Return-flow Burner and Its Application [刊, 中]/Qiu Jihua, Chen Gang, et al (Huazhong University of Science & Engineering) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996, 11(4). -213~216

In view of the existing problems related to the firing of low-grade coals in home-made utility boilers, such as ignition difficulty, instable combustion and low combustion efficiency, etc the authors have proposed a new type of direct flow burner capable of producing both an inner and an outer return flow zone. Its laboratory cold and hot-state test results are analysed and discussed followed by a brief description of the industrial use of such burners. **Key words:** burner, combustion, boiler

新型燃用无烟煤的 CUF 锅炉冷态模化试验研究 = An Experimental Study on the Cold-state Simulation of an Anthracite-fired New Type CUF Boiler [刊, 中]/ Zhang Xuan (Suzhou Thermotechnical Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996, 11(4). -217~221

A new type CUF boiler developed for the firing of low-volatile anthracite combines the merits of four-corner tangential firing and vertical firing. An experimental study was conducted of the CUF boiler performance through the use of a cold-state simulation method. The in-boiler aerodynamic field and horizontal flue duct gas speed distribution at the furnace outlet was measured. The test results show that the CUF boiler has marked superiority in terms of anthracite ignition improvement, combustion stability and burn-down as well as a satisfactory performance characterized by the absence of furnace slagging and a uniform flue gas speed at the furnace outlet. **Key words:** anthracite, cold-state simulation, CUF boiler

以流化床换热回收柴油机废气余热的试验研究 = An Experimental Study on the Recovery of Diesel Exhaust Heat by the use of a Fluidized Bed Heat Exchanger [刊, 中]/Li Jianhong, Zhu Shiwei

(Guangzhou Energy Resources Research Institute of Chinese Academy of Sciences) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996, 11(4). -222~226

Conventional heat exchangers of convective heat transfer for the recovery of diesel exhaust heat suffer from easily fouled heating surfaces and a low heat transfer factor. These defects can be overcome by the use of a fluidized bed heat exchanger. The experimental study conducted on a 30 kw diesel engine has produced satisfactory results, providing helpful design parameters for industrial applications. **Key words:** fluidized bed, convective heat transfer, waste heat utilization, diesel exhausts

铸铁锅炉扩缩通道流动与换热实验结果分析 = Analysis of a Cast-iron Boiler Divergent-convergent Channel Flow and Heat Exchange Test Results [刊, 中]/Wang Xiqing, Zhang Hongjun (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996, 11(4). -227~230

Based on the summing-up of experimental results the authors have proposed an experimental correlation formula for the gas flow resistance and convection heat exchange factor in a cast-iron boiler divergent-convergent channel with the applicable range of the formula being specified. In addition, an optimum divergent-convergent angle was obtained as a result of computation and analysis of the said channel intensified heat exchange performance on the basis of the experimental data. **Key words:** cast-iron boiler, divergent-convergent channel, flow resistance, convection heat exchange, intensified heat exchange

150 W 准分子激光器横流风机研究设计 = Study and Design of a Transverse Flow Fan for a 150 W Quasi-molecular Laser Device [刊, 中]/Li Yantao (Harbin 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996, 11(4). -231~236

Described in the present paper is the type selection, aerodynamic and structural design, and circulation gas cooling of a transverse flow fan for a 150 W quasi-molecular laser device. Through a full-scale product operation and measurement it has been proved that the transverse flow fan has the advantage of obtaining directly a flat-shape high-speed uniform flow field. Based on an accurate and reliable computation the fan features a construction compactness and rational design. **Key words:** transverse flow ventilator, calculation, design

板式换热器在供热系统中的应用 = Application of Plate Heat Exchangers in a Heat Supply System [刊, 中]/Liu Rui ren (Harbin Commercial Architectural Design Institute), Zhao Xinhong (Harbin Architectural Engineering Design Center) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996, 11(4). -237~240