

用于循环流化床的鳍片管束惯性分离器流动特性的研究

李晓东 沈跃良 严建华 李扬新 倪明江 岑可法
(浙江大学热能工程研究所)

[摘要] 本文运用激光多普勒测速方法及数值模拟方法对用于循环流化床的鳍片管束惯性分离器的流动动力特性进行了研究,得到了绕鳍片管流动的气流速度、湍流强度等参数的分布,并对试验和计算结果进行了分析讨论,为下一步对鳍片管束撞击式分离器的优化研究奠定了基础。

关键词 测量 流体动力特性 分离器
分类号 O351.2 TK229.66

0 前言

惯性分离器作为一种可被应用于循环流化床锅炉中的分离器,正得到越来越多的厂家及科研工作者的重视。与旋风分离器相比,惯性分离器具有一些显著的特点,结构简单易于布置,能方便地实施绝热和保温,压力损失较低,但它们也存在明显的缺陷,即分离效率不高,从而制约了它的应用。为改善惯性分离器的缺陷,浙江大学近年来提出了一种新型鳍片管束惯性分离器^[1],其分离元件主要是由鳍片焊接或夹在对流管束或过热器管束上,从而将分离与强化传热相结合。初步试验表明此种分离器具有高效、低阻、结构紧凑,特别是它能强化传热等优点^[2]。为深入研究此种分离器的具体特性,本文运用 LDV 及数值模拟等方法对绕鳍片管流体动力特性进行了系统研究,以指导鳍片管束分离器的优化

设计,同时进行了两相流的试验研究,本文给出了上述一系列研究结果。期望这些研究能为将鳍片管束分离器早日应用于实际工业中奠定基础。

1 绕流鳍片管流动特性的测试

1.1 测试方法及内容

基本鳍片管间及鳍片间距较小,采用接触式测试元件(如五孔探针、热球等)无法测得完整流场,而且误差较大,因此本文采用了非接触式激光多普勒(LDV)测速方法。测试系统主要由美国 TSI 公司生产的智能型 LDV 测速仪,鳍片管测试段,示踪粒子发生器,流量计,气流调节阀门,鼓风机等组成,鳍片管测试段由一直径 35 mm 管上焊有两鳍片并安装于有机玻璃通道中构成,试验段具体尺寸见图 1,试验风道平均截面速度为 4.2 m/s。

收稿日期 1995-07-04 收修改稿 1996-09-27

测试内容主要包括鳍片管前后的流速及湍流强度的分布,并指导完成鳍片管束分离器的分离试验工作。

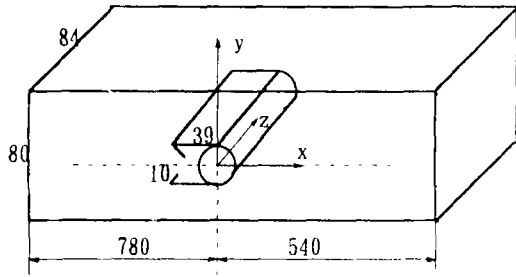


图 1 试验测试段及坐标示意图

1.2 LDV 测试结果与分析

由于鳍片的存在,使得气流绕流鳍片管的流动呈现一些独特的流动特性,下面我们对 LDV 测速仪的测试结果作一分析讨论。

1.2.1 鳍片管前后速度分布

图 2 为气流横掠鳍片管前各截面的速度分布。从图中可见,由于鳍片的影响,使得管前自约 $x/d = -2.3$ 距离处于始发生流线弯曲,至 $x/d = -1.43$ 时变得较为显著,当气流流动至管前 $x/d = -1.14$ 距离处(与鳍片顶端的绝对距离为 5 mm),在两鳍片间区域开始出现回流区,而且此回流区随 x/d 的减少而逐渐发展。以上现象说明由于鳍片的影

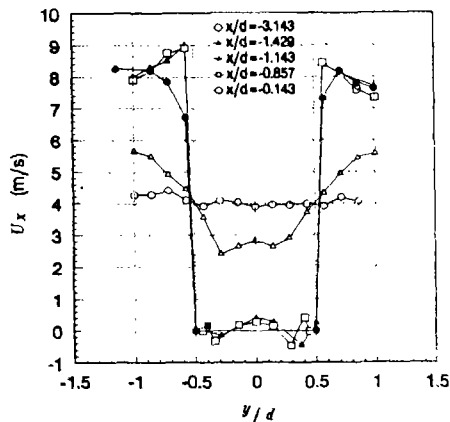


图 2 鳍片管前速度分布

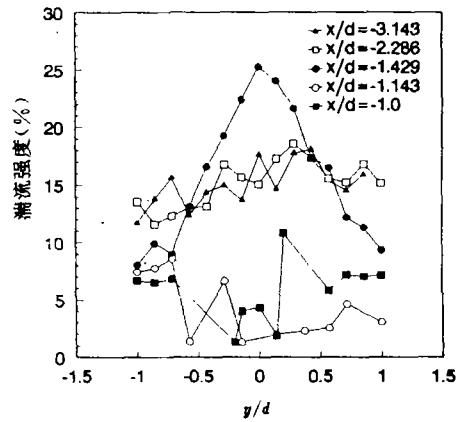


图 3 鳍片管前湍流强度的分布

响将使得管前具有较光管更强的管前影响作用。

进一步分析可知,当来流近鳍片管前首先绕鳍片构成的楔形体,而楔形体表面上产生的附面层使得速度逐步滞止于前驻点,由于楔形体之间出现的回流区,使得湍流度和对来流的卷吸能力增强,减少了颗粒的二次夹带,有助于颗粒的分离。同时由于回流引起的湍流度增加,使得换热增强。因此这样的结构对管前流动影响明显不同于绕光管流动^[3]。

1.2.2 鳍片管前后湍流结构

鳍片管前湍流结构,在管前距离 x/d 大于 1.43 的区域内其湍流强度分布呈中间高两边低,这一点与光管流动类似。当至鳍片稍前区域时,湍流强度分布发生变化,见图 3 曲线中 $x/d = -1.0$ 和 $x/d = -1.143$ 。该区域湍流强度普遍较来流值有所下降,呈中间低两边高的分布特点,这一流动特点与光管完全不同。鳍片间的“死区”所引起的滞止效应在两鳍片稍前区域即出现,这对分离很有利,它可减少颗粒被气流夹带的可能,使得大部分颗粒进入鳍片间而被分离。另外鳍片引起的滞止效应将大大减少颗粒冲刷管壁的速度,颗粒的鳍片管前减速并在鳍片端口被浓

缩,使得来流颗粒先撞击颗粒相再冲击管壁,从而减弱了对管束的磨损。

当气流进入鳍片区域 $x/d = 0 \sim -1.0$ 区域后,气流在鳍片内湍流强度有所增大,呈中间高两边低分布。由于鳍片内存在回流区,大大增强了气流脉动,使混合极其强烈,而鳍片外侧的湍流强度急剧下降,只有来流的 $1/3$ 左右,这是由于狭缝通道的整流作用所致。

通过比较气流流经鳍片管前后各截面平均湍流强度,可进一步说明此种形式流动结构的特点,如图4所示。从图可见,截面湍流强度最大处不是直接出现在圆柱壁面之后而是在约 $x/d = 3.0$ 之处,最大值与来流平均湍流强度比较增大近一倍(增大85%)。值得一提的是由于鳍片管的作用导致管后湍流强度分布与 20 m/s 来流速度绕光管时管后湍流强度分布相似,说明鳍片管管后湍流混合在相同条件下较光管强烈。

根据以上 LDV 测试结果可知,由于鳍片的影响,使得绕流鳍片管流动显现其独特的流动特性,验证了设置鳍片以及优化鳍片管设计的重要性。

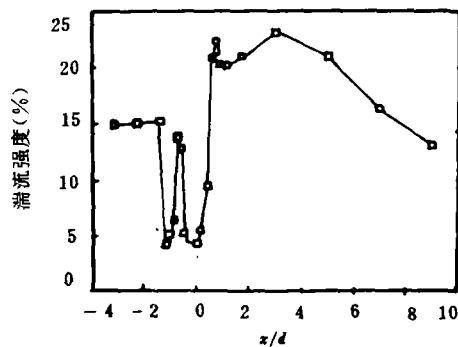


图4 绕流鳍片管各截面平均湍流强度分布

1.3 气固两相流分离试验结果与分析

依据上述 LDV 的测试结果,我们在气固多相流试验台上进行了气固两相流的分离试验,以下给出一部分试验结果。

1.3.1 鳍片曲边对分离效率的影响

根据 LDV 测试结果可知,在分离元件上设置鳍片曲边与直鳍片以构成一流动滞止区,以阻碍飞灰的二次夹带。分离试验证实了采用鳍片曲边的作用是较为明显的。采用鳍片曲边将使分离效率提高 $4\% \sim 9\%$,且这作用在低入口颗粒浓度时更为显著,在高浓度时有所削弱。这原因在于高浓度时,颗粒间的相互作用机会大大增加,已进入曲边流动滞止区的颗粒与再进入的颗粒碰撞几率大为增多,其效果将阻碍更多的颗粒进入曲边区域而增大了被夹带的可能性,因而降低了曲边鳍片的效果。

1.3.2 管束间距对分离效率的影响

根据绕分离元件的湍流结构分布并从分离角度来看,多排管束布置时应避开 $x/d = 0.714$ 和 $x/d = 3.0$ 这两个区域。试验结果表明分离效率随管束纵向间距的增加呈单调下降的趋势,这说明在高湍流区域布置分离管束不利于颗粒的分离。另外,考虑到由于间距的增大使得撞击后一排的颗粒浓度有所下降,起不到充分利用分离元件的效果,故在选择纵向间距时,应依据布置工艺等要求尽可能地选择小值。

1.3.3 分离元件管排对分离效率的影响

由试验研究得到,此种分离器中起主要作用的是前4排管,前4排管分离量与7排管总量之比可达 $90\% \sim 95\%$ 以上,更多的管排并不能起到更大的作用。原因在于绕管排流动前管排对后排起着加速湍化的作用,且使管排前后各旋涡区互相重叠,致使横向脉动得到强烈的发展,因而分离能力是逐排下降的,这就大大降低了后几排分离元件的分离效率。

从以上分离试验的结果可看出鳍片管束分离器的流动特性决定了其所具有分离特点,因此深入了解分离器的流动特性,对于优化完善分离器是非常重要的。基于此,本文采

用了数值模拟方法对绕鳍片管流动特性作了进一步研究。

2 气流绕鳍片管流动的数值模拟

气流绕单鳍片管流动基本上属于弱旋的通道流,解决此类问题,运用 $k-\epsilon$ 双方程模型较为准确可靠^[4-5],因此本文采用 $k-\epsilon$ 双方程湍流模型进行了数值模拟,并将计算结果与实验结果加以比较,以进一步探讨气流绕流单鳍片管的流动结构。

在具体实施计算时,根据气流绕流单鳍片管的流动特点,作如下假设和处理:(1)流动为二维流动;(2)气相为不可压缩流体,且为常物性,流动为稳态流动;(3)入口边界条件,均匀来流,速度为 4.2 m/s;(4)出口边界条件:出口截面流动认为已充分发展,出口边界的 k, ϵ 按坐标局部单向化方式处理,即其一阶导数为 0;(5)固体壁面条件:在壁面粘性底层中考虑分子粘性系数,采用壁面函数法处理;(6)对斜壁面和圆柱表面的处理是采用足够的小台阶壁面近似代替。

算法采用交错网格的 SIMPLE 算法,其

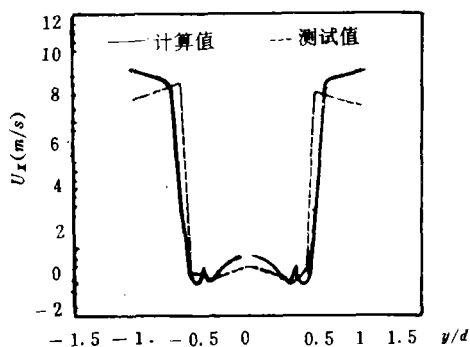


图5 管前截面速度分布计算值与试验值的比较($x/d = -0.857$)

控制方程可参见文献^[4-5]。运用上述方法对气流绕单鳍片管流动进行的数值计算,可得到一些较有价值的结果。

图5为来流速度为 4.2 m/s 管前 $x/d = -0.857$ 处的速度分布。将数值计算结果与试验速度值相比较,结果表明,两者吻合较好。另由图可见,不仅在鳍片区域间曲鳍片外侧出现回流,而且在曲鳍片与直鳍片间也出现了二次回流(这在 LDV 测试中,因鳍片条件所限而未能测出),这回流将一部分含尘气流卷吸到曲鳍片间,从而减少了颗粒被主流气流的二次夹带,有助颗粒的分离。

以上结果说明采用的模型及其计算处理方法是可靠合理的,这就为下一步进行管簇计算提供了依据。

3 结论

通过对气流绕流单鳍片管流动测试结果及数值模拟结果的分析,可得到如下一些结论:

(1)由于鳍片的影响,使得管前流动显现独特的流动特性,特别是鳍片前区域的滞止效应以及鳍片两侧贴壁处的高湍流强度和高峰动速度,对颗粒的分离以及鳍片管的换热极为有利。同时,由于鳍片的存在以及管前区域的特殊流动结构使得鳍片管束分离器的磨损并不严重。

(2)鳍片管后截面平均湍流强度最大值出现在约 $x/d = 3.0$ 处,其分布与以 20 m/s 的来流速度绕流光管的湍流强度分布相似,说明鳍片的存在增强了气流的湍流混合能力。

(3)运用 $k-\epsilon$ 双方程湍流模型对绕单鳍片管流动的数值计算结果与 LDV 试验结果比较,两者较为吻合,说明选用的模型和计算

方法是合理的,为下一步进行绕管簇流动计算提供了理论依据和手段。

参 考 文 献

- 1 中华人民共和国专利,专利号 J,ZL 93. 235633. 8
- 2 李晓东等. 鳍片管束撞击式气固分离器的试验研究. 工

程热物理学报,1995,16(3)

- 3 岑可法. 自由射流. 圆柱及管簇后尾迹湍流结构的试验研究,浙江大学学报,1963,14(2)
- 4 岑可法,樊建人. 工程气固多相流动的理论及计算,浙江大学出版社,1990
- 5 周力行. 湍流两相流动与燃烧的数值解法,清华大学出版社,1991

(渠源 编辑)

作者简介 李晓东 男 1966 年生,1994 年获浙江大学工程热物理专业博士学位。主要从事高效低污染流化床燃烧技术的研究,近年来,在上述领域发表论文 30 余篇。(通讯处:310027 浙江大学热能工程研究所)



北大西洋浮动生产船

据“Gas Turbine World”1996 年 5~6 月号报道,大西洋 Frontier Alliance 公司正在展开 Schiehallion 油田项目——一艘浮动生产储存和卸货船(FPSO),以便在设德兰岛以西 200 km、水深 400 m 的大西洋上作业。船上的主电源(应急电源除外)和过程用热将由二台 40 MW 的 RLM6000 燃气轮发电机组提供。余热锅炉被安装在燃气轮机的排气流中,以便提供需要的过程热。燃气轮机是使用生产过程燃料气或馏出油的双燃料机组,并且将以 90% 负荷连续运行。

主发电机组箱体具有不锈钢消音罩壳、管道、过滤系统,具有三点基座安装,从而允许船舶变形。发电机组能在分别为 8°纵倾和 6°横摇正常海况,并在 13°纵倾和 22°横摇的风浪条件下运行。

FPSO 有油分离和高压天然气压缩的二套装置,能装 95 万桶原油,并可以以 24 小时卸油 60 万桶的速率把油卸到穿梭油轮上。

该船舶将利用前部顶端安装的内部转台系统常设地系泊,该系统被设计成在安全风暴条件下把 FPSO 系泊在工作站。14 个系泊腿将把船舶锚定在海床上。

该浮动生产船将于 1997 年第四季度开始生产原油。

(学牛 供稿)

载热气化燃煤联合循环性能研究 = A Study on the Performance of Heat-Carrying Gasification Coal-Fired Combined Cycle [刊, 中]/Xu Xiangdong, Zhao Li, Zhu Weimin (Tsinghua University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. 1996, 11(6): 337~342

A relatively comprehensive analysis is given of the performance of a new-type coal-fired combined cycle version, i. e. a heat-carrying partial gasification coal-fired combined cycle version. To select a rational system configuration, the authors used the mathematical model of existing components and calculated the system parameters under various configurations. From some useful conclusions thus obtained a relatively optimized version has been selected, which can eventually provide a reliable theoretical basis for the development and realization of the above-cited system. Key words: heat-carrying gasification, combined cycle, differential speed circulating fluidized bed

用于循环流化床的鳍片管束惯性分离器流动特性的研究 = A Study on the Hydrodynamic Characteristics of a Finned Tube Bank Inertial Separator Used for a Circulating Fluidized Bed [刊, 中]/Li Xiaodong, Shen Yueliang, Yan Jianhua, Li Yangxin, et al. (Thermal Power Engineering Institute of Zhejiang University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, -1996, 11(6): 343~347

By employing laser Doppler velocity measurement and numerical simulation method the authors have conducted a study on the hydrodynamic characteristics of a finned tube bank inertial separator used for a circulating fluidized bed, thereby obtaining the distribution of such parameters as the gas velocity flowing around the finned tubes, and the turbulent flow intensity, etc. In addition, the test and calculation results were analysed and discussed, which will provide a solid basis for the further optimization study of the finned tube bank impact separator. Key words: measurement, hydrodynamic characteristics, separator

DEH 转速测量系统的故障树分析 = Fault Tree Analysis for a DEH Rotating-Speed Measurement System [刊, 中]/Ma Fangmei, Zhang Jiachen, Hei Yingxia, et al. (Huazhong University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996, 11(6): 348~353

Through the use of a Monte Carlo method-based fault tree theory the reliability simulation of a digital electro-hydraulic (DEH) speed measurement system of a 300 MW steam turbine was performed and the system reliability studied along with a fault analysis of the system. On the basis of the above some observations were given. Key words: fault tree, reliability simulation, DEH measurement system

能量系统的烟经济学分析通用模型及其在电厂中的应用 = A General Model for the Exergy Economics Analysis of an Energy System and its Use for an Electric Power Plant [刊, 中]/ Yang Yongping, Wang Jiakuan (Beijing Postgraduate Department of North China Electrical Power Engineering Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, -1996, 11(6): 354~359

During the operation of an electric power plant it often happens that some main parameters deviate from their design values. The study of the effect of such deviations on the economic operation of a