

超音速气固两相分离试验研究

高铁瑜, 章利特, 夏庆锋, 徐廷相
(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 建立了超音速气固两相分离装置试验系统, 在室温和不同喷管进口全压下, 对空心玻璃珠颗粒的分离效率进行了试验研究. 试验结果表明: 当喷管进口全压在 482~537 kPa 范围时, 超音速气固两相分离试验装置对 Sauter 平均直径 9.84 μm 颗粒的总分离效率为 57.83%~67.28%, 对直径大于 8.31 μm 颗粒的分离效率为 75.73%~80.52%, 对直径在 15 μm 以上颗粒的分离效率为 96%~100%, 表明颗粒直径越大, 分离效率越高. 由此可见, 超音速气固两相分离方法是可行的. 试验研究为超音速气固两相分离技术的进一步深入研究和应用提供了有用的参考.

关键词: 超音速; 气固两相分离; 分离效率; 空心玻璃珠

中图分类号: TQ028 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)11-1311-04

Experimental Study on Separation of Gas and Solid Two Phases in Supersonic Gas Flow

Gao Tieyu, Zhang Lite, Xia Qingfeng, Xu Tingxiang
(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: An experimental system for separation of gas and solid two phases in supersonic gas flow was established. Separation efficiencies of hollow glass beads were measured under room temperature and different nozzle inlet total pressures from 482 kPa to 537 kPa. The experimental results show that the 57.83% - 67.28% particles with a Sauter average diameter of 9.84 μm can be separated by the experimental device. the 75.73% - 80.52% particles with diameters above 8.31 μm and the 96% - 100% particles with diameters above 15 μm can also be separated. Bigger particles correspond to higher separation efficiency. The present method for separation of gas and solid two phases in supersonic gas flow is successful and feasible.

Keywords: supersonic; separation of gas and solid two phases; separation efficiency; hollow glass bead

超音速气固两相分离方法是文献[1-2]根据夹带固体颗粒的超音速气流经过斜冲波后, 气固两相发生惯性分离的特点, 首先提出的一种高温高压含尘气体除尘的新方法. 以这种方法为基础的气固两相分离装置具有结构简单、无旋转零部件、运行安全可靠、投资小、分离效果好等优点. 随着研究的进一步深入, 可以在需要进行气固两相分离、并且夹带固体颗粒的气流可以产生超音速的工程实际中推广应用.

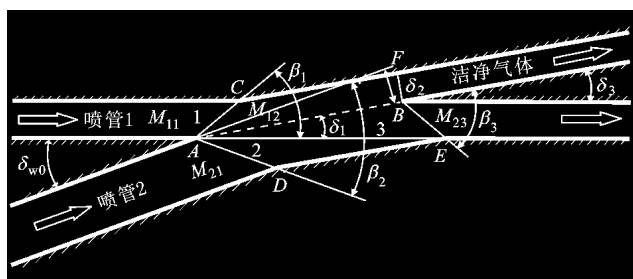
本文在超音速气固两相分离试验装置上, 进行

了不同喷管进口全压下的气固两相分离试验研究. 该试验研究从试验角度证明了超音速气固两相分离方法的可行性, 可为今后的进一步研究提供必要参考.

1 原理简介

如图 1 所示: 喷管 1 是使携带固体颗粒的高温高压气体加速到超音速的拉伐尔喷管, 称为携尘气喷管, 流经该喷管的气流称为携尘气流; 喷管 2 是使

吸纳从流经携尘气喷管气体中分离出来的固体颗粒的气体加速到超音速的拉伐尔喷管,称为吸尘气喷管,流经该喷管的气流称为吸尘气流. 2股气流分别流出喷管后在出口处的A点相汇,并沿AB继续向前流动,直至B点,由楔形状分开. 从携带气流中分离出来的固体颗粒穿过AB进入吸尘气流. 以AB为界,喷管1侧通道称为携尘气通道,喷管2侧通道称为吸尘气通道. 在二维情形下,气固两相的分离在图1中的多边形ADEBFCA区域内进行,所以称该区域为分离区域^[3].



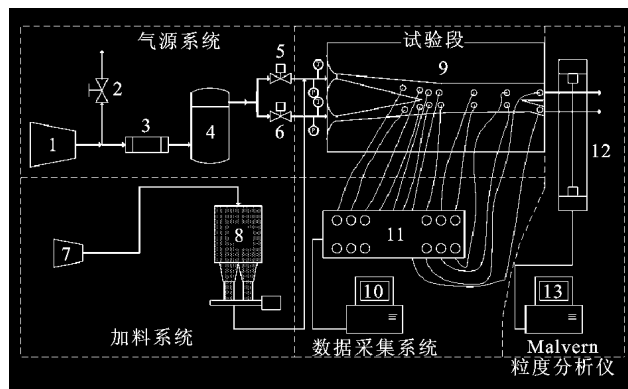
1,2,3:斜冲波

图1 超音速气固两相分离装置的基本工作原理简图^[1]

如图1所示, M_{11} 和 M_{21} 分别为携尘气喷管和吸尘气喷管出口处的气流马赫数,两股气流之间的夹角为 δ_0 并且在A点处汇合. 由于气流受A点的扰动,在携尘气流和吸尘气流中,分别形成源于A点的贴体斜冲波1和斜冲波2. 携尘气流中的斜冲波1与直线AC重合,它与来流方向的夹角,即冲波角为 β_1 . 当携尘气流穿越斜冲波1后,流动由来流方向突然变为与AB平行的方向,气流马赫数从 M_{11} 突降到 M_{12} ,来流方向与AB的夹角,即壁面折转角为 δ_1 . 吸尘气流中的斜冲波2与直线AD重合,它与来流方向的夹角,即冲波角为 β_2 . 当吸尘气流穿越斜冲波2后,流动方向由来流方向突然变为与AB平行的方向,气流马赫数从 M_{21} 突降到 M_{22} . 来流方向与AB的夹角,即壁面折转角为 δ_2 . 由于携尘气体中的固体颗粒在拉伐尔喷管中不断被气体加速,到穿过斜冲波前的速度已经很高,在惯性力作用下,基本保持原来的方向运动,可以穿过界面AB而进入吸尘气体,并被吸尘气体带出分离区域^[4],而原来的携尘气体在固体颗粒从AB分离出去以后,就成为洁净气体,流向所需要的场合. 吸入固体颗粒后的超音速吸尘气体又受B点的扰动,产生源于B点、与BE重合的斜冲波3,冲波角为 β_3 ,流动方向由原来平行于AB的方向变成平行于携尘气体在冲波前的来流方向.

2 试验系统

超音速气固两相分离装置试验系统如图2所示. 该试验系统主要包括气源系统、加料系统、气固两相分离试验段、气相数据采集系统以及Malvern粒度分析仪. 由压缩机来的压缩空气其中一路经过旁通阀排空气,另一路经输气管道进入燃烧室,再经过陶瓷过滤器对燃气进行预过滤,燃气净化后又分成两路,第一路经压力调节阀进入气固两相分离装置试验段的携尘气喷管,第二路经压力调节阀进入试验段的吸尘气喷管. 由压缩机和双螺杆颗粒加料器组成的加料系统,将一定粒度分布的固体颗粒,经调节阀输送到试验段的携尘气进口管道,再进入携尘气喷管. 固体颗粒在携尘气喷管内被不断膨胀加速的携尘气夹带加速后,通过分离界面进入吸尘气通道,并在吸尘气的夹带下由吸尘气通道出口排出. 固体颗粒从携尘气中分离后得到的净化携尘气,经扩压器扩压到所需压力后,由携尘气通道出口排出. 在分离装置的携尘气和吸尘气的通道出口用Malvern仪分别测量2种气体各自所含固体颗粒的直径分布^[5],并经粒度分析仪处理后,在线显示并输出有关数据. 同时,压力和温度数据采集系统和数据采集系统微机共同完成测点的压力和温度信号的传输、数据的采集和显示输出.



1:气源压缩机;2:旁通阀;3:燃烧室;4:主路陶瓷过滤器;5:携尘气喷管进口全压调节阀;6:吸尘气喷管进口全压调节阀;
7:加料压缩机;8:双螺杆颗粒加料器;9:试验段;10:数据采集系统微机;11:压力温度数据采集系统;
12: Malvern 仪;13:颗粒粒度分析微机

图2 超音速气固两相分离实验系统简图

3 分离效率测量与数据处理方法

本文气固两相分离效率测量^[3]的依据是固体颗粒质量守恒法则. 变量 Q_m 表示固体颗粒质量流量,下标0、1和2分别表示携尘气喷管进口、吸尘气通

道出口和携尘气通道出口位置,即 Q_{m0} 、 Q_{m1} 和 Q_{m2} 可分别表示这 3 个位置处的固体颗粒质量流量,显然有

$$Q_{m0} = Q_{m1} + Q_{m2} \quad (1)$$

设变量 w_d 为直径大于 d 的固体颗粒质量分数,则 w_{d0} 、 w_{d1} 和 w_{d2} 可表示对应上述 3 个位置处该直径范围的颗粒质量分数,应该满足质量流量守恒式

$$Q_{m0} w_{d0} = Q_{m1} w_{d1} + Q_{m2} w_{d2} \quad (2)$$

式中: w_{d0} 、 w_{d1} 和 w_{d2} 可用 Malvern 粒度分析仪测得.联立式(1)和式(2),可以求得

$$\frac{Q_{m1}}{Q_{m0}} = \frac{w_{d0} - w_{d2}}{w_{d1} - w_{d2}} \quad (3)$$

从气固两相分离的角度讲,下标 0、1 和 2 对应位置处的颗粒又可分别称为供料颗粒、被分离颗粒和残余颗粒, Q_{m1}/Q_{m0} 就是装置的总分离效率 η_{sum} .由于选取的直径范围不同,会使相同工况下 Q_{m1}/Q_{m0} 的计算结果有所差异,所以要选取 N 个直径范围的计算结果按下式进行平均处理

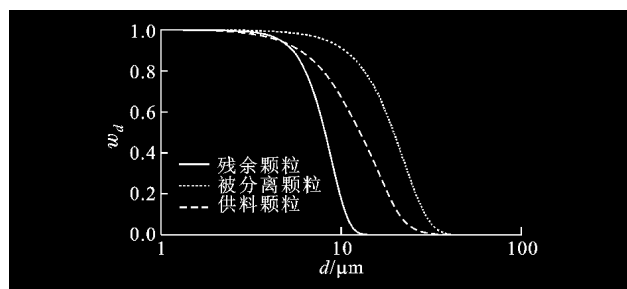
$$\eta_{\text{sum}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{Q_{m1}}{Q_{m0}} \right)_i \quad (4)$$

而直径大于 d 的固体颗粒分级分离效率 $\eta_{\text{sum}d}$ 表达式为

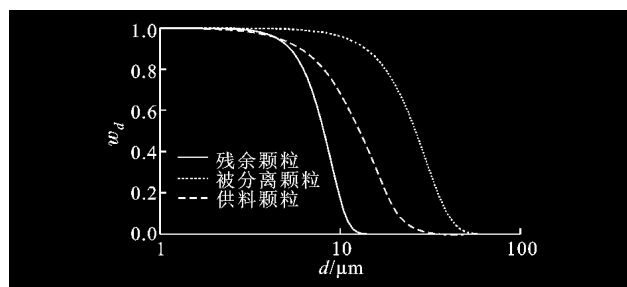
$$\eta_{\text{sum}d} = \frac{w_{d1}}{w_{d0}} \eta_{\text{sum}} \quad (5)$$

4 试验结果及分析

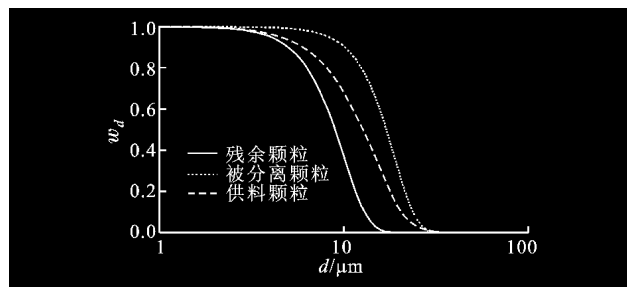
试验在室温下进行,携尘气和吸尘气出口马赫数估计值为 2.0 和 2.2.图 3 中的各条曲线都是按 Rosin-Rammler-Bennet 分布函数^[6]的形式处理得到.试验中选取的供料颗粒为 500 目的空心玻璃珠,其粒度在气固分离试验前进行了单独测定,Sauter 平均直径为 $9.84 \mu\text{m}$,被分离颗粒和残余颗粒的粒度通过在线测量得到.由图 3 的曲线可以得到 3



(a) $p_0 = 482 \text{ kPa}$



(b) $p_0 = 498 \text{ kPa}$



(c) $p_0 = 537 \text{ kPa}$

图 3 不同进口全压时的粒度测量结果

个 p_0 值所对应的不同直径 d 的颗粒质量分数 w_{d0} 、 w_{d1} 和 w_{d2} .从图 3 还可以看出,在颗粒的质量分数相同时,被分离颗粒的直径最大,供料颗粒直径次之,残余颗粒直径最小,说明相对于携尘气喷管进口而言,吸尘气通道出口集中了较大直径的颗粒,而携尘气通道出口集中了直径较小的颗粒.

表 1 为不同 p_0 值时的气固两相总分离效率计算列表,其中 w_{d0} 、 w_{d1} 和 w_{d2} 的值可以从图 3 的相应

表 1 不同 p_0 时的气固两相总分离效率计算列表

p_0/kPa	直径范围/ μm	w_{d0}	w_{d1}	w_{d2}	Q_{m1}/Q_{m0}	$\eta_{\text{sum}}/\%$
482	≥ 11.1	0.611	0.881	0.081	0.662 50	67.28
	≥ 9.63	0.709	0.922	0.227	0.693 53	
	≥ 8.31	0.788	0.949	0.472	0.662 47	
498	≥ 11.1	0.611	0.946	0.074	0.615 83	64.10
	≥ 9.63	0.709	0.964	0.201	0.665 79	
	≥ 8.31	0.788	0.977	0.450	0.641 37	
537	≥ 11.1	0.611	0.863	0.243	0.593 55	57.83
	≥ 9.63	0.709	0.917	0.418	0.583 17	
	≥ 8.31	0.788	0.951	0.582	0.558 27	

分布曲线中查得. 根据式(3)和式(4)可以得到 p_0 为 482、498 和 537 kPa 时气固两相总分离效率分别为 67.28%、64.1% 和 57.83%. 当 p_0 为 482 kPa 时, 分离区域(见图 1)为亚音速流动. 当 p_0 为 537 kPa 时, 分离区域前部 1/3 为超音速流动, 通过斜冲波过渡到后部的亚音速流动, 此斜冲波不利于粒子的分离, 因此在试验的压力范围内, 随着 p_0 的增加, 总分离效率有减小的趋势。

由表 2 可以发现: 3 个 p_0 值下试验装置对直径在 15 μm 以上的颗粒的分离效率分别为 100%、96% 和 100%; 直径在 8.31 μm 的颗粒的分离效率分别为 80.52%、79.49% 和 75.73%; 随着颗粒直径的增大, 分离效率也不断升高。

表 2 不同 p_0 值时的气固分级分离效率列表

直径范围 / μm	$\eta_{\text{solid}}/\%$		
	$p_0=482\text{ kPa}$	$p_0=498\text{ kPa}$	$p_0=537\text{ kPa}$
>15.0	100	100	96
12.9~15.0	95.95	88.71	74.99
11.1~12.9	72.07	44.72	44.80
9.63~11.1	46.55	21.08	29.82
8.31~9.63	22.10	7.92	21.42
>8.31	80.52	79.49	75.73

5 结 论

所建立的试验系统工作正常, 调节测量方便, 运行安全可靠. 室温下喷管进口全压分别为 482、498 和 537 kPa 时, 超音速气固两相分离试验装置对

Sauter 平均直径为 9.84 μm 的空心玻璃珠的总分离效率分别为 57.83%~67.28%, 直径在 15 μm 以上的颗粒的分离效率为 96%~100%, 直径大于 8.31 μm 颗粒的分离效率为 75.73%~80.52%, 表明颗粒直径越大, 气固两相分离效率越高. 由此可见超音速气固两相分离方法是可行的. 该项技术可以应用在需要进行气固两相分离、并且能够提供超音速气流的场合。

参考文献:

- [1] 徐廷相, 章利特, 辛杨. 高温高压气体除尘新概念[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(7): 690-692, 745. Xu Tingxiang, Zhang Lite, Xin Yang. New dedusting concept of high temperature and high pressure gases[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(7): 690-692, 745.
- [2] 徐廷相. 一种高温高压气体除尘方法: 中国, ZL 200310118995.3[P]. 2006-06-28.
- [3] 章利特. 基于斜冲波理论的气固两相分离技术及应用[D]. 西安: 西安交通大学能源与动力工程学院, 2007.
- [4] Zhang Lite, Gao Tieyu, Xia Qingfeng. Condition analysis of the steady gas-gas interface existence and the separation of gas and solid in supersonic gas phase flows[J]. World Journal of Engineering, 2006, 3(2): 91-102.
- [5] 陆厚根. 粉体工程导论[M]. 上海: 同济大学出版社, 1993: 34-42.
- [6] 魏诗榴. 粉体科学与工程[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2006: 40-47.

(编辑 王焕雪)

[文摘预登]

甲醇缸内直喷复合导流分层燃烧系统的优化研究

李本正, 陈岳, 宫艳峰, 刘圣华, 李彧, 黄勇成

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

综合缸内直喷发动机壁面引导、喷雾引导和气流引导分层燃烧系统的特点, 在一台柴油机改造的火花点火发动机上, 开展了甲醇缸内直喷复合导流分层燃烧的研究. 对影响燃烧系统性能的导流面位置、火花塞伸出缸盖距离、涡流比、供油提前角、点火提前角、喷油器启喷压力、喷油嘴型式等主要参数进行了优化. 优化后的甲醇发动机可以实现过量空气系数为 2.23 的分层燃烧, 在 1 500 r/min 时扭矩为 135 N·m(是同工况下原柴油机的 65.5%), 热效率达到 29.7%, 较好地实现了分层燃烧系统的优化匹配。