

# 缩放喷管内的气固两相流动和缩放喷管长度的研究

章利特, 徐廷相

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

**摘要:** 采用一元流动理论和拉格朗日方法, 研究了用于气、固两相分离试验装置的缩放喷管内, 被气流拖曳的颗粒加速率与颗粒大小和缩放喷管长度的关系. 研究表明, 在气流参数和缩放喷管长度不变的情况下, 被气流拖曳的颗粒越大, 颗粒在缩放喷管出口处的速度就越低; 在颗粒加速率相同的情况下, 颗粒越大, 所需的喷管长度就越长. 为了更好地实现气、固两相分离, 颗粒在缩放喷管出口处的速度应该足够大, 因而缩放喷管就应该足够长.

**关键词:** 缩放喷管; 气固两相流; 颗粒加速率; 缩放喷管长度

**中图分类号:** TQ028 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253 - 987X(2004)07 - 0702 - 03

## Study on Gas-Solid Two-Phase Flow in Laval Nozzle and Laval Nozzle Length

Zhang Lite, Xu Tingxiang

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Based on one dimension flow theory and Lagrange method, the correlation of speeding rate of particles under gas flow drag with the size of particles and the length of Laval nozzle used for the gas and solid two-phase separation test apparatus was studied. It is shown that with the decrease in size of particles, their velocity at the exit of Laval nozzle increases under the conditions of both the invariable gas parameters and the same Laval nozzle length; the Laval nozzle length increases with the size of particles under the same speeding rate of particles. In order to separate gas and solid two phases completely, the velocity of particles at the exit of Laval nozzle should be high enough, therefore the Laval nozzle should be long enough.

**Key words:** Laval nozzle; gas-solid two-phase flow; particle speeding rate; Laval nozzle length

气体在缩放喷管中的流动和气、固两相在等截面管道中的流动已经有相当深入的研究, 但对截面变化的缩放喷管内的气、固两相流动还研究得不多. 在这种流动中, 气体一方面在缩放喷管中不断加速, 直至超音速; 另一方面, 还由于气、固两相之间的阻力, 气体在加速过程中, 拖曳着固体颗粒作加速运动, 而且固体颗粒对气体的阻力也影响到气流的加速流动. 所以, 在缩放喷管中的气、固两相流动是很复杂的. 本文将气、固两相分离试验装置<sup>[1]</sup>中的缩放喷管作为实例, 采用一元流动理论和拉格朗日方法, 对缩放喷管中的气、固两相流动进行定量分析,

力图获得缩放喷管中气、固两相流动参数之间及其与缩放喷管几何长度之间的关系. 气、固两相分离试验装置<sup>[1]</sup>中的缩放喷管一方面可使气体加速到超音速, 当超音速气流绕过凹钝角流动时会产生斜冲波, 从而实现气流转向; 另一方面可使固体颗粒在加速气流的拖曳下达到很高的运动速度, 当颗粒穿过斜冲波时能以很高的动量在原来的运动方向上向前运动, 从而实现气、固两相的分离. 因此, 本研究对于正确地设计以气、固两相混合物作为工质的缩放喷管, 从而更好地实现气、固两相分离是必需的.

收稿日期: 2003 - 12 - 31. 作者简介: 章利特(1979~), 男, 博士生; 徐廷相(联系人), 男, 教授, 博士生导师. 基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20020698031).

### 1 流动方程

首先假设:在缩放喷管中流动的气、固两相中的气体服从一元等熵流动基本方程,包括运动方程、连续方程、能量方程以及附加的气体状态方程等,这些基本方程有多种表达形式,可以参见各种流体力学教科书,如文献[2].

同时假设:颗粒是具有同样物理性质的圆球;颗粒之间的相互影响可以忽略;颗粒所占的体积忽略不计,颗粒的存在对气体运动没有影响;颗粒的运动是加速气流的拖曳力与颗粒的惯性力引起的.根据牛顿第二定律,经过一些推导可以得到

$$v_p \frac{dv_p}{dx} = \frac{3}{4} C_D \frac{\rho}{\rho_p d_p} (v_p - v_g)^2 \quad (1)$$

式中: $v$ 为速度; $\rho$ 为密度; $d$ 为直径;下标 P 代表固体颗粒, $g$ 代表气体; $C_D$ 为受气流马赫数  $Ma$  和气流中的颗粒雷诺数  $Re_D$  影响的阻力系数.

当颗粒雷诺数  $Re_D < 3 \times 10^5$  时,阻力系数的表达式<sup>[3]</sup>为

$$C_D = \frac{24}{Re_D} (1 + 0115 Re_D^{01687}) + 0142 / (1 + 4125 \times 10^4 Re_D^{-1116}) \quad (2)$$

$Re_D$  由下式表示

$$Re_D = \frac{\rho |v_g - v_p| d_p}{\mu} \quad (3)$$

式中: $\mu$ 为动力粘性系数.

由试验确定的  $Ma = 0175 \sim 4120$  时的阻力系数表达式<sup>[4]</sup>为

$$C_D = \exp\{ a_2 (\ln Re_D)^2 + a_1 \ln Re_D + a_0 \} \quad (4)$$

式中:系数  $a_0, a_1, a_2$  是由马赫数和一系列系数决定的表达式.

### 2 计算结果分析

有了一元等熵流动基本方程和方程(1)~方程(4),就可以先计算出给定热力参数下缩放喷管的喉部和出口面积,并根据缩放喷管通流面积的变化规律计算出缩放喷管内部各截面上气、固两相的流动参数.计算采用了自行编制的程序.

气、固两相分离试验装置<sup>[1]</sup>中的缩放喷管如图 1 所示.计算该喷管时所用的热力参数为:气体流量  $G$  为 01205 2 kg/s;进口压力  $p_0$  为 11115 MPa;进口温度  $T_0$  为 1 000 K;出口压力  $p_1$  为 01101 MPa.

缩放喷管的进口收缩段由半径为  $R_0$  的 4 块平圆弧面所组成,收缩段的长度  $L_1$  为 24 mm,喉部是

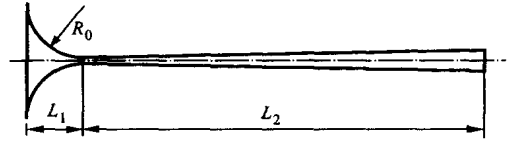


图 1 缩放喷管示意图

边长  $B_{cr}$  为 12 mm 的正方形,即喉部面积  $A_{cr}$  为 144  $mm^2$ .缩放喷管的出口面积  $A_1$  为 29314  $mm^2$ ,即出口面积与喉部面积之比  $f = A_1/A_{cr} = 2104$ .扩张段在垂直于纸面方向上的厚度始终与正方形喉部的边长  $B_{cr}$  相同,即等于 12 mm.因此,在扩张段的扩张角一定时,扩张段截面积的逐步增加只是通过扩张段高度的逐步增加来实现的.显然,对于给定的扩张段长度  $L_2$  来说,扩张段的横截面积与气体流动方向位置的关系可以用下列关系式表示

$$A(x) = \begin{cases} \{ B_{cr} + 2[L_1 - (2L_1x - x^2)^{1/2}] \}^2 & 0 \leq x \leq L_1 \\ [2(x - L_1) \tan \theta + B_{cr}] B_{cr} & L_1 < x \leq L_2 \end{cases} \quad (5)$$

其中  $\tan \theta = \frac{1}{2L_2} \left( \frac{A_1}{B_{cr}} - B_{cr} \right)$  (6)

式中: $x$ 是以喷管进口为起点的气流位置,即喷管的轴向位置.

在计算中,假设密度为  $\rho_p = 1\ 000\ kg/m^3$  的颗粒,在缩放喷管进口处以垂直于缩放喷管轴线方向喷入,即颗粒在缩放喷管进口处的速度为 0.

#### 2.1 不同直径的颗粒在加速气流中的拖曳

计算结果如图 2 所示,在气体(曲线 0)加速气流的拖曳下,不同直径颗粒的加速运动如图 2 中曲线 1、2、3 和 4 所示.由图 2 可知,不同直径的颗粒在加速运动时的滑移速度是不同的:颗粒直径越大,滑移速度也越大;在喷管收缩段内由于气流加速很快,颗粒也加速很快,滑移速度也迅速增加.对于给定直

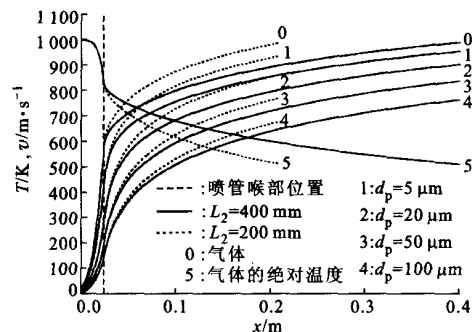


图 2 气流在缩放喷管中膨胀加速时对颗粒的拖曳

径的颗粒而言,当气流膨胀到喷管喉部以后的扩张段内时,在实用的喷管长度范围内,滑移速度变化很小.在喷管出口处,气流速度达到最大值,颗粒速度也在变化很小的滑移速度下达到相应的最大值,此时颗粒具有足够大的动量.

## 2.2 喷管长度对颗粒最大速度的影响

比较图2中不同扩张段长度( $L_2$ 为200 mm和400 mm)的缩放喷管的计算结果可以清楚地看到,同样大小的固体颗粒,在长度不同的缩放喷管中被气流拖曳加速时,尽管喷管出口处的气流速度相同,而颗粒在喷管出口处能被拖曳到的最大速度却不一样.以直径为50  $\mu\text{m}$ 的颗粒为例,气流在2种喷管出口的速度同为998 m/s,在 $L_2$ 为400 mm的喷管中,颗粒在喷管出口处的速度达到了847 m/s,而在 $L_2$ 为200 mm的喷管中,颗粒在喷管出口处的速度只有784 m/s.

图3详细给出了喷管出口处气流和颗粒的速度与喷管长度和颗粒大小之间的关系.由图3可以看到以下几点.

(1)在喷管出口气流速度相同的情况下,对于相同直径的颗粒而言,随着缩放喷管扩张段长度的增加,开始时曲线很陡,表示喷管出口处的颗粒速度增加很快;随后曲线逐步趋于平缓,表示喷管出口处的颗粒速度增加变慢;当缩放喷管扩张段长度继续增加时,曲线就变得很平缓了,表示喷管扩张段长度的增加对喷管出口处颗粒速度的影响变小了.此时,用增加喷管长度的办法来增加喷管出口处的速度的效果就变差了.

(2)在喷管出口气流速度相同的情况下,对于相同的喷管扩张段长度而言,颗粒越小,曲线越陡,表示喷管出口处的颗粒速度增加越快,曲线出现明显变缓的趋势也越早.图3中给出的等颗粒加速率(指缩放喷管扩张段长度每变化1 mm时颗粒速度的变化值)曲线也清楚地说明了喷管出口处颗粒速度的增加与喷管长度的关系.显然,在相同的颗粒加速率下,颗粒越大,喷管应该越长.

## 3 结论

(1)当气、固两相在缩放喷管内流动时,随着气相的膨胀加速,固体颗粒在气流拖曳力的作用下,也

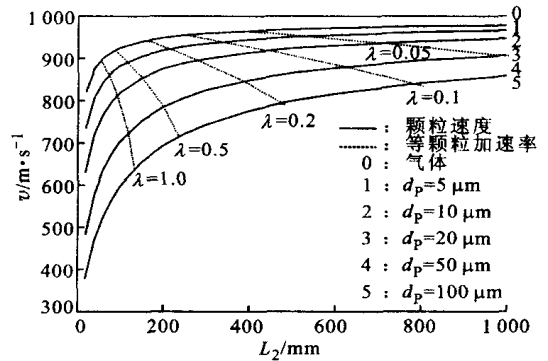


图3 气流和颗粒在缩放喷管出口处的速度与缩放喷管扩张段长度和颗粒大小的关系

不断地加速,在缩放喷管出口处达到最大值.缩放喷管越长,同样大小的颗粒达到的最大速度也越高,但由于气流与颗粒之间的滑移,相同位置上的颗粒速度永远低于气流速度.

(2)在缩放喷管收缩段保持不变时,颗粒在缩放喷管出口处的速度大小取决于颗粒的大小、缩放喷管扩张段的长度,以及气流在缩放喷管出口处的速度;当缩放喷管扩张段的长度和气流在缩放喷管出口处的速度一定时,颗粒越大,缩放喷管出口处的速度就越低.

(3)对于同样大小的颗粒,颗粒加速率随着缩放喷管扩张段长度的增加而减小,因此过长的缩放喷管扩张段对颗粒加速的效果就不会太明显.在颗粒加速率相同时,颗粒越小,缩放喷管扩张段的长度就越短.

## 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.
- [2] 江宏俊. 流体力学[M]. 北京:高等教育出版社, 1985. 8 - 13.
- [3] 沈天耀,林建忠. 叶轮机械的气固两相流基础[M]. 北京:机械工业出版社, 1994. 2 - 31.
- [4] Bailey A B. Sphere drag coefficient for subsonic speeds in continuum and free2model flows[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1974, 65(2): 401 - 410.

(编辑 王焕雪)