

## 基于等分法和迭代算法的磨料射流速度模型

章文峰<sup>1,2</sup>, 卢义玉<sup>1,2\*</sup>, 汤积仁<sup>1,2</sup>, 陆晓辉<sup>1,2</sup>

(1.煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400030;  
2.重庆大学 复杂煤层瓦斯抽采国家地方联合工程实验室, 重庆 400030)

**摘要:**针对前混合磨料射流磨料速度模型中存在的磨料受力考虑不全,无法体现磨料加速度、阻力系数以及雷诺数等关键参数的变化等问题,以固液两相流理论为基础,建立了磨料在高压管路、喷嘴内的速度模型,并基于等分法和迭代算法的数值求解方法,求解了磨料速度模型。计算结果与参考文献的平均百分比误差在5%之内,验证了该算法的正确性。同时,利用该速度模型得到了磨料在高压管路和喷嘴内的速度、加速度、阻力系数以及雷诺数的变化规律:高压管路内,磨料速度随磨料运动距离的增加逐渐增大,最后无限接近于水的速度;磨料加速度和雷诺数随磨料运动距离的增加逐渐减小,最后会趋于零;而阻力系数则随磨料运动距离的增加逐渐增大。喷嘴收敛段内,磨料速度随磨料运动距离的增加逐渐增大;磨料加速度、阻力系数以及雷诺数随磨料运动距离的增加有一个先减小后增加的过程。喷嘴直线段内,磨料速度随磨料运动距离的增加逐渐增大;磨料的加速度、雷诺数和阻力系数随着磨料运动距离的增加逐渐减小。

**关键词:**磨料射流;速度模型;等分法;迭代算法;加速度;阻力系数;雷诺数

中图分类号:TP6;O35

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2018)01-0180-07

### Velocity Model of Abrasive Water Jet Based on the Bisection Method and Iterative Algorithm

ZHANG Wenfeng<sup>1,2</sup>, LU Yiyu<sup>1,2\*</sup>, TANG Jiren<sup>1,2</sup>, LU Xiaohui<sup>1,2</sup>

(1.State Key Lab. of Coal Mine Disaster Dynamics and Control (Chongqing Univ.),Chongqing 400030,China;  
2.National & Local Joint Eng. Lab. of Gas Drainage in Complex Coal Seam,Chongqing Univ.,Chongqing 400030,China)

**Abstract:** In order to solve the problems, that force analysis is not comprehensive and the results cannot reflect the change of key parameters, such as particle acceleration, drag coefficient and Reynolds number, exist in the existing velocity models of pre-mixed abrasive water jet. Based on the theory of solid-liquid two-phase flow, the velocity model of particle in the high pressure pipeline and the nozzle was established. And the particle velocity model was solved by a numerical solution based on the bisection method and iterative algorithm. The developed models were finally verified by that the model calculations and the corresponding reference data are in good agreement with less than 5% average errors. At the same time, the variations rule of velocity, acceleration, drag coefficient and Reynolds number of the abrasive in the high-pressure pipeline and nozzle have been obtained by using the velocity model: In the high pressure pipeline, the particle velocity increases with the increase of the moving distance of particle, and finally it is infinitely close to the velocity of the water. The particle acceleration and the Reynolds number decrease with the increase of the moving distance of particle, and finally become zero. The drag coefficient increases with the increase of the moving distance of particle. In the convergent section of nozzle, the particle velocity increases with the increase of the moving distance of particle. The particle acceleration, drag coefficient and Reynolds number have a process of decreasing first and then increasing with the increase of the moving distance of particle. In the straight section of the nozzle, the particle velocity increases with the increase of the moving distance of particle. and the acceleration, the Reynolds number and the drag coefficient decrease with the increase of the moving distance of particle.

**Key words:** abrasive water jet; velocity model; bisection method; iterative solution; particle acceleration; drag coefficient; Reynolds number

收稿日期:2017-03-01

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助项目(2014CB239206);国家自然科学基金资助项目(51374258);长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT13043)

作者简介:章文峰(1988—),男,博士生.研究方向:高压水射流理论及其应用. E-mail: sirixian@126.com

\*通信联系人 luyiyu@cqu.edu.cn

磨料射流是由固体颗粒(金刚砂、石英砂、陶粒等)与高速流动的水流或高压水流混合而成的液固两相介质射流<sup>[1]</sup>。因其切割破碎作业效率高、作业过程无热反应区、不发生化学反应等优点<sup>[2-3]</sup>,目前已广泛应用于石油、煤炭、机械等行业,如磨料射流油井割缝增产技术<sup>[4]</sup>、高压磨料射流割缝防突技术<sup>[5]</sup>、磨料射流抛光技术<sup>[6]</sup>等。另外,磨料射流在辅助钻进硬岩<sup>[7]</sup>以及减少隧道开挖爆破振动<sup>[8]</sup>方面也有巨大的应用潜力。磨料射流的磨蚀能力几乎全由磨料产生,在冲蚀过程中磨料动能的大小决定着冲蚀对象是否产生塑性变形和形成裂纹<sup>[9-11]</sup>。磨料的加速效率决定着磨料射流破碎结构体效率。因此,研究磨料的加速过程,对提高水对磨料的加速效率,优化喷嘴结构具有重要意义。

目前,Li<sup>[11]</sup>、李宝玉<sup>[12]</sup>、陆胜国<sup>[13]</sup>等对磨料在高压管路以及喷嘴内的加速过程进行了大量的理论研究,但是在他们的研究中存在磨料受力考虑不全、将阻力系数当做常数处理等问题。左伟芹等<sup>[14]</sup>在充分考虑磨料受力、将阻力系数当做变量的基础上研究了磨料加速机制,但他们的算法比较复杂。另外,也有大量学者<sup>[15-20]</sup>利用数值模拟方法研究了磨料在喷嘴内的加速过程,不过在这些研究中,通常将磨料拟流体化处理,这与磨料在磨料射流中的真实运动情况有一定的差异。

综上所述,尽管前人对磨料射流磨料加速机理进行了大量的理论研究和数值模拟,但是仍存在以下不足:第一,模型中磨料受力考虑不全,和磨料的真实受力情况有差异;第二,反映不出与运动相关的阻力系数以及雷诺数的变化;第三,研究方法过于复杂,反映不出磨料的加速度变化。因此,提出新的研究方法,旨在反映磨料在运动过程中磨料加速度、与运动相关的阻力系数和雷诺数的磨料速度模型显得十分必要。

作者以固液两相流理论为基础,利用水在高压管路和喷嘴内的运动方程和磨料在高压管路、喷嘴内的运动方程,建立了磨料在高压管路和喷嘴内的速度模型,并提出了基于等分法和迭代算法的求解方法,求解了磨料运动方程,得出磨料在高压管路和喷嘴内运动时,磨料加速度、与磨料运动相关的阻力系数和雷诺数,以及速度的变化情况,为研究磨料射流加速机理提供新的研究方法,为提高磨料射流加速效率以及优化喷嘴结构提供一定的理论基础。

## 1 磨料在高压管路内的速度模型

### 1.1 水在高压管路内的运动方程

假设水在高压管路内的运动为1维流动且为定

常流动,忽略水在高压管路内流动时的沿程阻力损失。

高压管路的直径为 $d$ ,系统流量为 $Q$ ,水在高压管路内的速度 $V_w$ ,三者之间满足以下关系:

$$V_w = 4 \frac{Q}{\pi d^2} \quad (1)$$

### 1.2 磨料在高压管路内的运动方程

假设磨料在高压管路内的运动为1维流动,磨料为球形颗粒。磨料质量浓度约为5%,磨料对水的运动不产生影响,磨料颗粒之间不发生碰撞。

磨料在高压管路内受到惯性力 $F_D$ 、Stokes阻力 $F_S$ 、附加质量力 $F_a$ 和压强梯度力 $F_p$ 的作用。因此,磨料颗粒在高压管路内的运动微分方程为:

$$\begin{aligned} \frac{1}{6} \pi d_p^3 \rho_p \frac{dV_p}{dt} = & -\frac{1}{12} \pi d_p^3 \rho_w \left( \frac{dV_p}{dt} - \frac{dV_w}{dt} \right) + \\ & \frac{1}{8} \pi C_D d_p^2 \rho_w |V_w - V_p| (V_w - V_p) + \frac{1}{6} \pi d_p^3 \frac{dP}{dx} \end{aligned} \quad (2)$$

根据第1.1节中假设,水在高压管路内运动时,水的速度不变。同时,忽略沿程阻力损失,由伯努利方程可知,在高压管路内,水在高压管路内的压强是相同的。所以式(2)可以简化为:

$$\frac{dV_p}{dt} = \frac{3C_D \rho_w |V_w - V_p| (V_w - V_p)}{(4\rho_p + 2\rho_w) d_p} \quad (3)$$

式中: $V_w$ 和 $V_p$ 分别为水和磨料在高压管路内的速度,m/s; $d_p$ 为磨料粒径,m; $\rho_w$ 和 $\rho_p$ 分别为水和磨料的密度, $\text{kg/m}^3$ ; $C_D$ 为Stokes阻力系数,其值与雷诺数 $Re$ 有关,雷诺数的定义如下:

$$Re = \frac{\rho_w d_p |V_w - V_p|}{\mu} \quad (4)$$

式中: $\mu$ 为水的黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ; $(V_w - V_p)$ 为水与磨料速度之差,m/s。

### 1.3 求解方法

将式(3)化简可得:

$$a_p = \frac{3C_D \rho_w |V_w - V_p| (V_w - V_p)}{(4\rho_p + 2\rho_w) d_p} \quad (5)$$

从式(5)可以看出,磨料在高压管路内运动时,磨料加速度不是定值,求出该方程的显式解是非常困难的。为此提出了基于等分法和迭代算法的近似求解磨料速度的方法,即将磨料的运动距离等分为一定数量的线段,假设磨料在每一等分段内运动时磨料加速度是一常数,利用每一段的终点速度又是下一分段的起点速度这一特点,同时,磨料在开始运动时的初始速度已知,利用迭代求解的方法,求出磨料在整个运动距离的速度。

具体思路如下:将磨料运动距离 $L$ 等分为 $n$ 段,每一小段的距离为 $s=L/n$ 。在每一小段内,假设磨料加速度是一常数,利用每一段内的起点速度,即可求得每一段的终点速度。假设,在第 $i$ 段内,磨料的起始速度为 $V_{pi}$ ,磨料在终点的速度为 $V_{pi+1}$ ,磨料的加速度为 $a_{pi}$ ,那么,它们之间满足以下关系:

$$V_{pi+1}^2 - V_{pi}^2 = 2a_{pi}s \quad (6)$$

在迭代过程中,磨料加速度 $a_{pi}$ 的表达式为

$$a_{pi} = \frac{3\rho_w C_{Di} |V_w - V_{pi}| (V_w - V_{pi})}{(4\rho_p + 2\rho_w)d_p} \quad (7)$$

结合式(6)和(7)可得,磨料速度在迭代过程中的表达式为:

$$V_{pi+1} = \sqrt{\frac{3\rho_w C_{Di} |V_w - V_{pi}| (V_w - V_{pi})}{2\rho_p + \rho_w} s + V_{pi}^2} \quad (8)$$

式中, $C_{Di}$ 对应着在第 $i$ 段起点时的阻力系数,阻力系数 $C_D$ 的值是由雷诺数 $Re$ 决定的。在迭代过程中,雷诺数 $Re_i$ 的表达式为:

$$Re_i = \frac{\rho_w d_p |V_w - V_{pi}|}{\mu} \quad (9)$$

式中,雷诺数 $Re$ 与阻力系数 $C_D$ 之间的取值见表1<sup>[21]</sup>。

表1 雷诺数 $Re$ 与阻力系数 $C_D$ 取值关系

Tab.1 Drag coefficient equations

$Re$	$C_D$
$Re \leq 0.1$	$24.0/Re$
$0.1 < Re \leq 1.0$	$22.73/Re + 0.0903/Re^2 + 3.69$
$1.0 < Re \leq 10.0$	$29.1667/Re - 3.8889/Re^2 + 1.222$
$10.0 < Re \leq 100.0$	$46.5/Re - 116.67/Re^2 + 0.6167$
$100.0 < Re \leq 1000$	$98.33/Re - 2778.0/Re^2 + 0.3644$
$1000.0 < Re \leq 5000$	$148.62/Re - 4.75 \times 10^4/Re^2 + 0.357$
$5000.0 < Re \leq 10000.0$	$-490.546/Re + 57.87 \times 10^4/Re^2 + 0.46$
$10000.0 < Re \leq 50000.0$	$-1662.5/Re + 5.4167 \times 10^6/Re^2 + 0.5191$
$Re > 50000.0$	0.44

由表1可知,当 $Re_i$ 时,即可确定 $C_{Di}$ 。

因为磨料从磨料罐经混合腔进入高压管路时速度为0 m/s,所以磨料射流初始速度为0 m/s,将其代入迭代方程,即可求出磨料在高压管路内的速度、加速度、雷诺数以及阻力系数。

## 2 磨料在喷嘴内的速度模型

使用的喷嘴为圆锥收敛型喷嘴,该类型喷嘴加工简单,加速效果较好,其结构如图1所示。收敛角为 $\theta$ ,收敛段长度和直线段长度分别为 $L_1$ 和 $L_2$ ,喷嘴总长

为 $L$ ,喷嘴出口直径为 $D$ 。因为该类型喷嘴包含收敛段和直线段,因此研究磨料在喷嘴内的运动过程分为磨料在收敛段和直线段内两个运动过程。

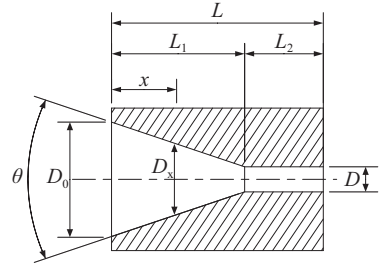


图1 喷嘴结构示意图

Fig.1 Configuration of nozzle

### 2.1 水在喷嘴收敛段内的运动方程

假设水在喷嘴收敛段内的运动为1维流动且为定常流动,忽略水在收敛段内流动时的沿程阻力损失。

系统流量为 $Q$ ,根据喷嘴结构关系,可得收敛段内任意位置 $x$ 处的水速为:

$$V_w = \frac{4Q}{\pi \left( D + 2(L_1 - x) \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \right)^2} \quad (10)$$

### 2.2 磨料在喷嘴收敛段内的运动方程

假设磨料在喷嘴收敛段内的运动过程为1维流动,磨料为球形颗粒。磨料质量浓度约为5%,磨料对水的运动的不产生影响,磨料颗粒之间不发生碰撞。

磨料在喷嘴收敛段内受到惯性力 $F_D$ 、附加质量力 $F_a$ 、Stokes阻力 $F_S$ 、压强梯度力 $F_p$ 的作用。因此,磨料颗粒在喷嘴收敛段内的运动微分方程为:

$$\frac{1}{6}\pi d_p^3 \rho_p \frac{dV_p}{dt} = -\frac{1}{12}\pi d_p^3 \rho_w \left( \frac{dV_p}{dt} - \frac{dV_w}{dt} \right) + \frac{1}{8}\pi C_D d_p^2 \rho_w |V_w - V_p| (V_w - V_p) + \frac{1}{6}\pi d_p^3 \frac{dP}{dx} \quad (11)$$

式中: $dP/dx$ 为沿射流方向的压强梯度,Pa·s;其他参数定义与第1.2节中的参数相同。

### 2.3 求解方法

对式(11)进行化简,得到:

$$a_p = \frac{\rho_w}{2\rho_p + \rho_w} \frac{dV_w}{dt} + \frac{3\rho_w C_D |V_w - V_p| (V_w - V_p)}{(4\rho_p + 2\rho_w)d_p} + \frac{2}{2\rho_p + \rho_w} \frac{dP}{dx} \quad (12)$$

假设水为不可压缩,且忽略喷嘴内流场液相的重力势能。将喷嘴收敛段长度 $L_1$ 等分为 $n$ 段,每一小段的距离为 $s=L_1/n$ 。在第 $i$ 段内,假设第 $i$ 段起点处水的速度为 $V_{wi}$ ,压力为 $P_i$ ,磨料的速度为 $V_{pi}$ ,终点处水的速度为 $V_{wi+1}$ ,压力为 $P_{i+1}$ ,磨料速度为 $V_{pi+1}$ ,磨料的加速度为 $a_{pi}$ 。根据质量守恒定律和伯努利方程可知:

$$P_{i+1} - P_i = \frac{1}{2}\rho_w V_{wi}^2 - \frac{1}{2}\rho_w V_{wi+1}^2 \quad (13)$$

所以在第*i*段内,压强梯度可以表示为:

$$\frac{dP}{dx} = \frac{\rho_w (V_{wi}^2 - V_{wi+1}^2)}{2s} \quad (14)$$

由于假设水在喷嘴内的流动属于定常流动,因此水的速度可以用位置*x*的函数表示,在第*i*段内,有:

$$\frac{dV_w}{dt} = V_w \frac{dV_w}{dx} = V_{wi} \frac{V_{wi+1} - V_{wi}}{s} \quad (15)$$

$$V_{pi+1} = \sqrt{2\left(\frac{\rho_w}{2\rho_p + \rho_w} V_{wi+1} \frac{V_{wi} - V_{wi+1}}{s} + \frac{3\rho_w C_{Di} |V_{wi} - V_{pi}| (V_{wi} - V_{pi})}{(4\rho_p + 2\rho_w) dp}\right) s + V_{pi}^2} \quad (17)$$

式中,  $C_{Di}$ 的求法与第1节中的内容类似,其取值与雷诺数 $Re$ 有关。

雷诺数 $Re$ 在迭代过程中的表达式为:

$$Re_i = \frac{\rho_w d_p |V_{wi} - V_{pi}|}{\mu} \quad (18)$$

磨料在收敛段内的初始速度为磨料从高压管路进入喷嘴收敛段时的速度,将其代入即可求出收敛段内磨料的速度。

#### 2.4 磨料在喷嘴直线段内的速度模型

假设水在喷嘴直线段内的运动过程为1维流动且为定常流动,忽略水在喷嘴直线内流动时的沿程阻力损失,磨料在喷嘴直线段内的运动过程为1维流动。磨料为球形颗粒。磨料质量浓度约为5%,磨料对水的运动不产生影响,磨料颗粒之间不发生碰撞。

因为直线段的结构与高压管路的结构类似,两者的横截面积都保持不变,水的速度也保持不变,磨料受到惯性力 $F_D$ 、Stokes阻力 $F_S$ 、附加质量力 $F_a$ 、压强梯度力 $F_p$ 的作用,磨料在喷嘴直线段内的运动与磨料在高压管路内的运动相似,该算法与磨料在高压管路内相同,在此不再赘述。

### 3 算例对比及实证分析

假设系统流量为80 L/min,磨料密度为 $2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,磨料粒径为0.85 mm,水的密度为 $1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,水的黏度为 $1.14 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,高压管路的内径为25 mm,喷嘴收敛段长度为15 mm,喷嘴直线段长度为11 mm,收敛角为 $14^\circ$ ,喷嘴出口直径为3 mm。

实际过程中,高压管路较长,先观察磨料在一定长度的高压管路内的运动情况。磨料从磨料罐经混合腔进入高压管路时的初始速度为0 m/s,选取磨料运动距离为1 m,将磨料运动距离等分10 000段( $n=10\ 000$ ),将上述参数代入第1节中的式(6~9),得到磨料在高压管路内运动时,水的速度、磨料速度、磨

料加速度、雷诺数以及阻力系数,计算结果如图2~4所示。

$$a_{pi} = \frac{\rho_w}{2\rho_p + \rho_w} V_{wi+1} \frac{V_{wi} - V_{wi+1}}{s} + \frac{3\rho_w C_{Di} |V_{wi} - V_{pi}| (V_{wi} - V_{pi})}{(4\rho_p + 2\rho_w) dp} \quad (16)$$

同样地,可以得到磨料速度在迭代过程中的表达式为:

料加速度、雷诺数以及阻力系数,计算结果如图2~4所示。

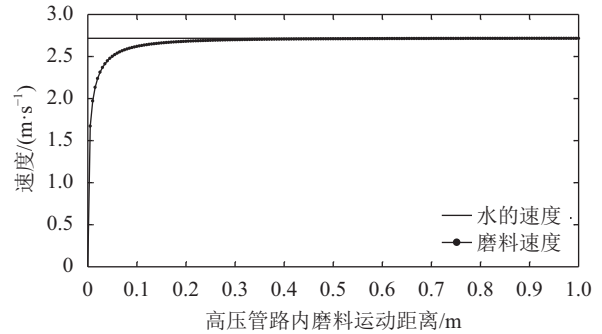


图2 高压管路内磨料与水的速度分布

Fig.2 Velocity distribution of the abrasive and water in the high pressure pipeline

从图2中可以看出,磨料速度在高压管路内是一直增加的,而且磨料速度增加幅度随着运动距离的增加逐渐减小,最后磨料速度增幅几乎为零。在本例中,磨料经过0.1 m加速后,其速度达到水速的96%;经过0.3 m加速后,磨料速度基本和水速相等;之后磨料速度无限接近于水的速度。

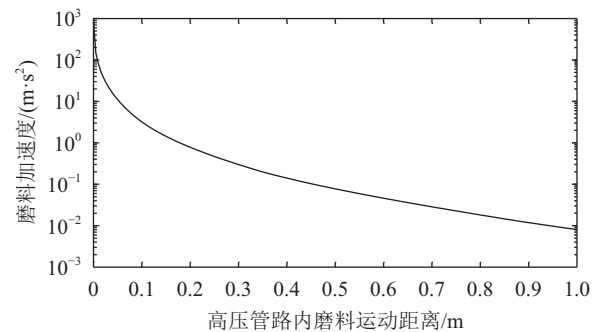


图3 高压管路内磨料加速度分布

Fig.3 Distribution of the acceleration of abrasive in the high pressure pipeline

从图3中可以看出,高压管路内磨料加速度随磨料运动距离的增加逐渐减小,而且减小幅度随着运动距离的增加逐渐减小,磨料加速度的变化与图2中



磨料速度的变化一致。究其原因这是由于磨料速度的增加,磨料速度与水的速度差逐渐减小,磨料加速度逐渐减小,最后磨料速度与水的速度无限接近,磨料加速度逐渐趋于零。

图4是磨料在高压管路内运动时的雷诺数 $Re$ 和阻力系数 $C_D$ 的变化趋势。

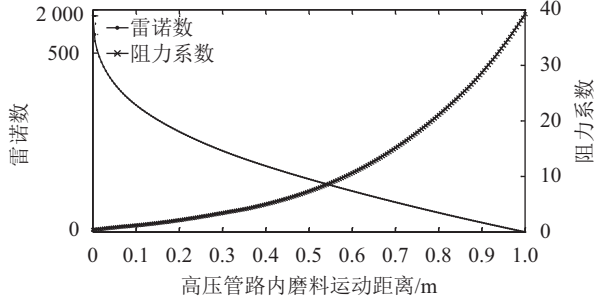


图4 高压管路内雷诺数与阻力系数变化

Fig.4 Change of Reynolds number and drag coefficient in the high pressure pipeline

从图4中可以发现,无论是雷诺数还是阻力系数都不是一个定值,由于雷诺数与水速度和磨料速度之差的绝对值成正比,随着磨料运动距离的增加,磨料速度增大,水速和磨料速度之差的绝对值随之减小,因此雷诺数随着磨料运动距离的增加而减小,最终雷诺数会趋于零。另外,从图4中还可以发现,磨料在加速过程中,阻力系数是变化的,阻力系数随着磨料运动距离的增大随之增大。因此,在研究磨料加速机理时,不可将阻力系数 $C_D$ 当做一个常数处理。

磨料在高压管路加速完后进入喷嘴。从前面的分析可知,磨料进入喷嘴收敛段时的初始速度无限接近高压管路内水的速度相等。在本例中,磨料从高压管路进入喷嘴收敛段时速度为2.716 m/s,所以,磨料在喷嘴收敛段内运动时的初始速度为2.716 m/s。喷嘴收敛段长度为15 mm,磨料运动距离即为15 mm,将磨料运动距离等分1500段( $n=1500$ ),将上述参数代入第2节中的迭代公式中,得到磨料在喷嘴收敛段内运动时,水的速度、磨料速度、磨料加速度、雷诺数以及阻力系数,计算结果如图5~7所示。

从图5中可以看出:在喷嘴收敛段内,水和磨料的速度都在急剧增大。在0~10 mm范围内,水和磨料的速度增幅基本相似,两者的增幅都不大,进入10~15 mm范围内,水和磨料的速度都在急剧增加,磨料速度的增幅没有水的增幅大。

图6反映喷嘴收敛段内磨料加速度变化。从图6中可以看出,磨料进入收敛段后,其加速度有一个先减小后增加的过程。在0~1.63 mm之内,磨料加速度处于一个减小过程,减小幅度随着运动距离的增加而减小;而在1.63~15 mm之内,磨料加速度处于增

加过程,而且增幅随着运动距离的增加逐渐增大。由于磨料加速度都是正值,磨料在收敛段内一直处于加速状态。

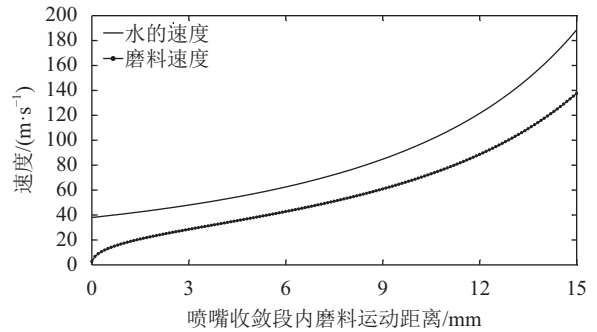


图5 喷嘴收敛段内磨料与水的速度分布

Fig.5 Velocity distribution of the particle and water in the convergent section of the nozzle

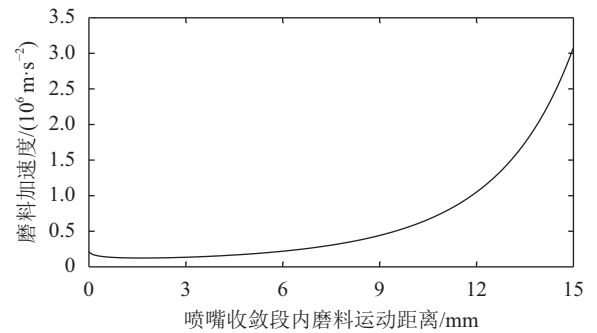


图6 喷嘴收敛段内磨料加速度曲线

Fig.6 Distribution of the acceleration of particle in the convergent section of the nozzle

图7是喷嘴收敛段内雷诺数与阻力系数随运动距离的变化曲线。从图7中可以看出:雷诺数和阻力系数的变化趋势一致,都是随着运动距离的增加,先减小后增大的过程。两者在4.25 mm位置处,出现最小值。

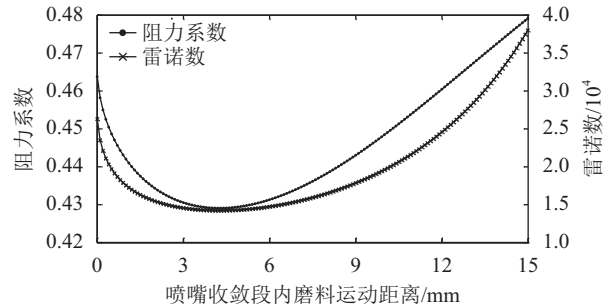


图7 喷嘴收敛段内雷诺数与阻力系数变化曲线

Fig.7 Change of Reynolds number and drag coefficient in the convergent section of the nozzle

磨料在喷嘴收敛段加速完后,进入喷嘴直线段内。磨料在直线段时的初始速度为磨料在喷嘴收敛段末端时的速度,直线段内长度为11 mm,磨料运动

距离即为11 mm,将磨料运动距离等分为1 100( $n=1\ 100$ ),将其代入式(6~9)求出直线段内水的速度、磨料速度、磨料加速度、雷诺数以及阻力系数,计算结果如图8~10所示。

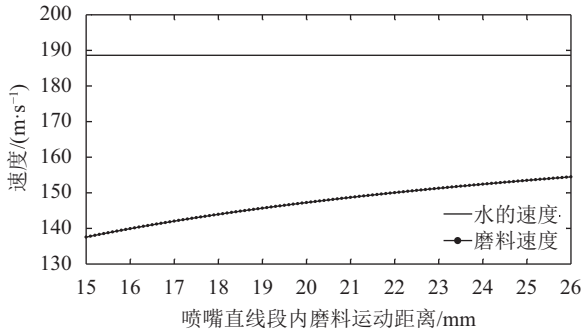


图8 喷嘴直线段内磨料与水的速度分布

Fig.8 Velocity distribution of the particle and water in the straight section of the nozzle

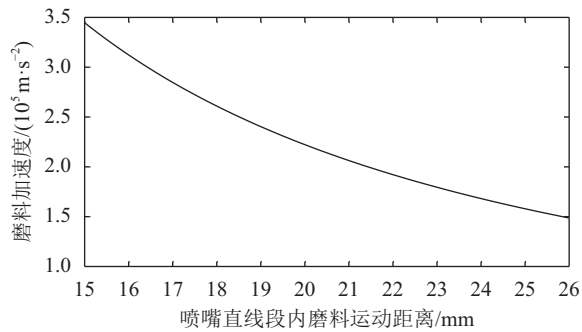


图9 喷嘴直线段内磨料加速度曲线

Fig.9 Distribution of the acceleration of particle in the straight section of the nozzle

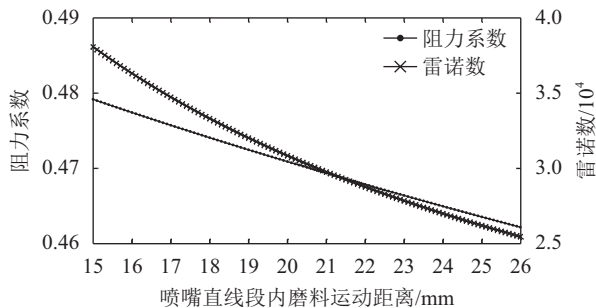


图10 喷嘴直线段内雷诺数与阻力系数变化曲线

Fig.10 Change of Reynolds number and drag coefficient in the straight section of the nozzle

从图8~10可以看出:磨料在直线段内运动时,磨料速度、磨料加速度、阻力系数以及雷诺数随着磨料运动距离的变化规律。在直线段内,磨料的速度随着运动距离的增加逐渐增大,但是磨料速度增幅随着运动距离的增加逐渐减小。因为在直线段内,磨料的加速度随着运动距离的增大逐渐减小,使得磨料速度的增幅逐渐减小。雷诺数和阻力系数的变化趋势与磨料加速度的变化趋势一致,也是随着运动距

离的增加而逐渐减小。

为了验证本文提出的速度模型和求解方法,利用本文的方法结合文献[14]中的算例条件,计算得到喷嘴内水和磨料速度分布,并与文献[14]中的计算结果进行了对比,计算结果对比如图11所示。

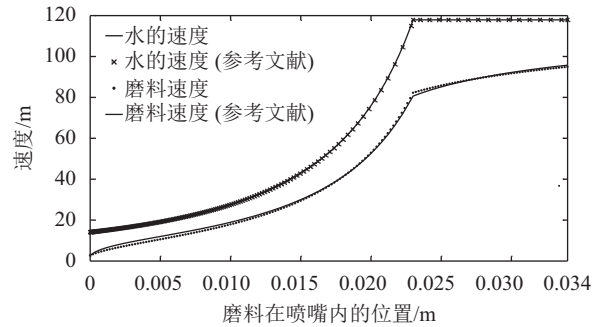


图11 计算结果对比图

Fig.11 Comparison of calculated results with reference data

从图11中可以看出,本文所用的方法得到的水的速度曲线与文献[14]中的水的速度曲线两者重合,表示水的速度是相同的。图11中,点画线对应的是利用本文所用方法计算得到的磨料速度曲线,而磨料速度实线对应文献[14]中的磨料速度曲线。对比发现,本文模型计算得到的磨料速度与文献[14]中的磨料速度无论是变化趋势还是大小基本保持一致。利用数学统计方法,进一步分析发现,本文计算得到的磨料速度与文献[14]中磨料速度之间的标准偏差为0.778 m/s,平均误差百分比约为4.99%。从而验证了本模型和求解方法的正确性。

## 4 结论

针对前混合磨料射流磨料速度模型中存在的磨料受力考虑不全、无法体现磨料加速度、阻力系数以及雷诺数等问题,以固液两相流为基础,建立了磨料在高压管路、喷嘴内的速度模型,并提出了基于等分法和迭代算法的求解方法,求解磨料速度模型。计算结果与参考文献的平均百分比误差在5%之内,吻合较好,验证了该算法的正确性。

高压管路内,磨料速度随磨料运动距离的增加逐渐增大,最后会无限接近于水的速度;磨料加速度与雷诺数的变化趋势一致,都随磨料运动距离的增加逐渐减小,最后会趋于零。而阻力系数则随着磨料运动距离的增加逐渐增大。

喷嘴收敛段内,磨料速度随着磨料运动距离的增加逐渐增大;磨料加速度、阻力系数以及雷诺数的变化趋势一致,都随着磨料运动距离的增加有一个先减小后增加的过程。

喷嘴直线段内,磨料随着运动距离的增加逐渐

增大;磨料的加速度、雷诺数和阻力系数三者的变化趋势一致,都随着磨料运动距离的增加而逐渐减小。

### 参考文献:

- [1] Momber A W, Kovacevic R. Principles of abrasive water jet machining[M]. London: Springer, 1998.
- [2] Tang Jiren, Lu Yiyu, Sun Huijuan. Study on visual BP neural network cutting model for abrasive water jet[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Edition), 2013, 45(3): 164–170. [汤积仁, 卢义玉, 孙惠娟. 磨料水射流切割可视化 BP 神经网络模型研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45(3): 164–170.]
- [3] Zuo Weiqin, Lu Yiyu, Zhao Jianxin, et al. The novel idea of experiment study on the wear mechanism of nozzles[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Edition), 2012, 44(1): 196–201. [左伟芹, 卢义玉, 赵建新, 等. 实验研究喷嘴磨损规律的新方法[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(1): 196–201.]
- [4] Liu H T. Hole drilling with abrasive fluid jets[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 32(9/10): 942–957.
- [5] Lin Baiquan, Lu Youchuan, Li Baoyu, et al. High-pressure abrasive hydraulic cutting seam technology and its application in outbursts prevention[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 9(9): 959–963. [林柏泉, 吕有厂, 李宝玉, 等. 高压磨料射流割缝技术及其在防突工程中的应用[J]. 煤炭学报, 2007, 9(9): 959–963.]
- [6] Yan B H, Tsai F C, Sun L W, et al. Abrasive jet polishing on SKD61 mold steel using SiC coated with Wax[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 208(1/2/3): 318–329.
- [7] Lu Y, Tang J, Ge Z, et al. Hard rock drilling technique with abrasive water jet assistance[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2013, 60(2): 47–56.
- [8] Kim J G, Song J J. Abrasive water jet cutting methods for reducing blast-induced ground vibration in tunnel excavation[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2015, 75: 147–158.
- [9] Neilson J H, Gilchrist A. An analytical and experimental investigation of the velocities of particles entrained by the gas flow in nozzles[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1968, 35(3): 549–559.
- [10] Stevenson A N J, Hutchings I M. Scaling laws for particle velocity in the gas-blast erosion test[J]. Wear, 1995, 181(95): 56–62.
- [11] Li H Z, Wang J, Fan J M. Analysis and modelling of particle velocities in micro-abrasive air jet[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2009, 49(11): 850–858.
- [12] Li Baoyu, Guo Chuwen, Lin Baiquan. Theory and method of designing abrasive water-jet nozzle in safety cutting[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(2): 251–254. [李宝玉, 郭楚文, 林柏泉. 用于安全切割的磨料水射流喷嘴设计理论和方法[J]. 煤炭学报, 2005, 30(2): 251–254.]
- [13] Lu Guosheng, Gong Liehang, Wang Qiang, et al. Research on acceleration mechanism of abrasive in pre-mixed abrasive water-jet[J]. Journal of PLA University of Science & Technology, 2006, 7(3): 275–280. [陆国胜, 龚烈航, 王强, 等. 前混合磨料水射流磨料颗粒加速机理分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2006, 7(3): 275–280.]
- [14] Zuo Weiqin, Wang Xiaochuan, Hao Fuchang, et al. Research on acceleration mechanism of abrasive in pre-mixed abrasive water-jet based on iterative algorithm[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2016, 40(4): 104–109. [左伟芹, 王晓川, 郝富昌, 等. 基于迭代算法的磨料颗粒加速机制研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(4): 104–109.]
- [15] Long X, Ruan X, Liu Q, et al. Numerical investigation on the internal flow and the particle movement in the abrasive waterjet nozzle[J]. Powder Technology, 2017, 314: 635–640.
- [16] Lin Xiaodong, Lu Yiyu, Tang Jiren, et al. Numerical simulation of abrasive particles acceleration process in pre-mixed abrasive water jet[J]. Journal of Vibration & Shock, 2015, 34(16): 19–24. [林晓东, 卢义玉, 汤积仁, 等. 前混合式磨料水射流磨料粒子加速过程数值模拟[J]. 振动与冲击, 2015, 34(16): 19–24.]
- [17] Hou R, Huang C, Zhu H. Numerical simulation of multiphase flow field in abrasive waterjet machining[J]. International Journal of Abrasive Technology, 2013, 6(1): 40–57.
- [18] Feng Y, Wang J, Liu F. Numerical simulation of single particle acceleration process by SPH coupled FEM for abrasive waterjet cutting[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 59(1): 193–200.
- [19] Gong W, Wang J, Na G. Numerical simulation for abrasive water jet machining based on ALE algorithm[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 53(1/2/3/4): 247–253.
- [20] Mostofa M G, Kil K Y, Hwan A J. Computational fluid analysis of abrasive waterjet cutting head[J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2010, 24(1): 249–252.
- [21] Morsi S A, Alexander A J. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1972, 55(2): 193–208.

(编辑 黄小川)

引用格式: Zhang Wenfeng, Lu Yiyu, Tang Jiren, et al. Velocity model of abrasive water jet based on the bisection method and iterative algorithm[J]. Advanced Engineering Sciences, 2018, 50(1): 180–186. [章文峰, 卢义玉, 汤积仁, 等. 基于二分法和迭代算法的磨料射流速度模型[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(1): 180–186.]