

垂直管道颗粒沉降速度的影响因素

赵国彦, 林春平, 洪昌寿

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

摘要 针对深部资源开采的“高井深”问题,研究了垂直管道水力提升过程中颗粒沉降速度的影响因素。基于球形颗粒的水中沉降机理,分别建立层流区、过渡区及紊流区的颗粒沉降速度表达式,对影响沉降速度的颗粒粒径、颗粒密度及水温进行敏感性分析,并考虑颗粒形状及浓度对沉降速度的影响。结果表明,在层流区和过渡区,各因素对沉降速度影响的敏感度随颗粒密度 ρ_s 与水密度 ρ 之间比值不同而变化,当层流区 $\rho_s > 2\rho$ 及过渡区 $\rho_s > 3\rho$ 时颗粒粒径 $>$ 颗粒密度 $>$ 水温,当层流区 $\rho_s < 2\rho$ 及过渡区 $\rho_s < 3\rho$ 时颗粒密度 $>$ 颗粒粒径 $>$ 水温;在紊流区,各因素对沉降速度影响的敏感度为颗粒密度 $>$ 颗粒粒径 $>$ 水温;球形颗粒沉降速度理论值大于不规则颗粒沉降速度实际值,可采用颗粒形状系数加以修正,且在干涉沉降过程中采用 Richardson-Zaki 公式,使计算结果符合工程实际。

关键词 深部资源开采;垂直管道;水力提升;颗粒沉降速度

随着中国采矿工业的发展,浅部矿产资源逐渐枯竭,近 1/3 金属矿山在未来 10~15 年内将进入深井开采^[1],深井开采的趋势将不可避免。在向深部延伸的过程中,“高井深”制约着矿山目前常用的矿石提升运输方式,如罐笼、箕斗提升、带式输送等。此外,大部分矿山水文地质条件复杂,开采过程中涌水量大,往往需用泵排出大量地下水,排水费用高。随着科学技术的迅猛发展,泵送技术得到了极大提高;采用现代化的设备及支护手段,使大型地下硐室的开凿及支护具有经济性,从而使地下破碎、磨矿成为可能。因此,地下矿山的矿石垂直管水力提升是符合时代需要的一种可行性方案^[2,3]。

水力提升速度是颗粒水力提升系统中一个很重要的参数。在垂直管水力提升过程中,一般取颗粒沉降速度的 3 倍作为水力提升速度。若提升速度过大,则阻力损失大,造成在实际工程中出现动力浪费现象;反之提升速度不足,会使颗粒在管道中滞留导致堵管事故的发生^[4]。研究颗粒在垂直管道中的沉降速度是进行颗粒水力提升速度研究的基础,而且对于工程应用来讲,颗粒沉降速度也是非常重要的技术参数,它不仅影响颗粒在垂直管道中的浓度分布,也影响颗粒的速度分布和管道阻力损失。因此,开展垂直管道颗粒沉降速度方面的研究具有重要的工程意义。

1 球形颗粒的沉降机理

粒径为 d_s 、密度为 ρ_s 的球形颗粒在水中自由沉降过程中

的受力如图 1 所示,可以看出,作用在颗粒上的力有两种,一种是颗粒在水中的重力 G_0 ,另一种是水作用于颗粒的阻力 F_R ,则球形颗粒在静水中的运动方程为

$$G_0 - F_R = (G - F_b) - F_R = m_s a_s \quad (1)$$

即

$$\left(\frac{1}{6}\pi d_s^3 \rho_s g - \frac{1}{6}\pi d_s^3 \rho g\right) - C_D \frac{\pi d_s^2 \rho u_s^2}{4} = m_s \frac{du_s}{dt} \quad (2)$$

式中, u_s 为颗粒的沉降速度, m/s; G 为颗粒的重力, N; F_b 为颗粒的浮力, N; m_s 为颗粒的质量, kg; ρ_s 、 ρ 分别为颗粒及水的密度, kg/m³; g 为重力加速度, N/kg; d_s 为颗粒的粒径, m; a_s 为颗粒下降过程中的加速度, m/s²; C_D 为阻力系数。

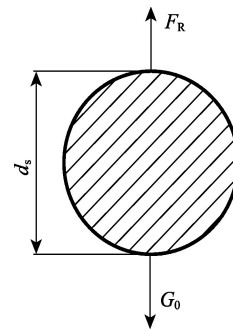


图 1 球形颗粒在水中的沉降

Fig. 1 Settlement of spherical particles in the water

颗粒在水中刚开始下沉时,由于 $G_0 > F_R$,加速下降,受到的阻力不断增大,直到作用在颗粒上的外力达到平衡,即

收稿日期:2015-05-18;修回日期:2015-10-31

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51374244)

作者简介:赵国彦,教授,研究方向为采矿工程、矿山安全、岩石力学与工程等,电子信箱:312929122@qq.com;林春平(共同第一作者),硕士研究生,研究方向为采矿工程,电子信箱:710114643@qq.com

引用格式:赵国彦,林春平,洪昌寿.垂直管道颗粒沉降速度的影响因素[J].科技导报,2016,34(2):162-166;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2016.2.026

$G_0 = F_R$ 时,颗粒等速下沉。颗粒等速下沉时的速度即称为颗粒的沉降速度^[5]。将 $du_s/dt=0$ 代入式(2)得颗粒在静水中的沉降速度为

$$u_s = \sqrt{\frac{4(\rho_s - \rho)gd_s}{3C_D\rho}} \quad (3)$$

阻力系数 C_D 是颗粒雷诺数 Re 的函数,根据颗粒雷诺数的变化情况,颗粒沉降速度的计算按阻力系数的取值可划分层流区、过渡区及紊流区分别进行计算^[6]。

当 $Re < 1$ 时为层流区,也就是常说的斯托克斯区,此区域颗粒受到的阻力为黏性阻力,将 $C_D=24/Re$ 代入式(3)得

$$u_{s1} = \frac{gd_s^2(\rho_s - \rho)}{18\mu_0} \quad (4)$$

式中, μ_0 为水的动力黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。 μ_0 与温度 t 的关系为

$$\mu_0 = \frac{0.1}{2.1482 \times [t - 8.435] + \sqrt{8078.4 + (t - 8.435)^2}} - 120$$

适用的颗粒粒径为

$$d_s < \left(\frac{18\mu_0^2}{\rho g(\rho_s - \rho)} \right)^{\frac{1}{3}}$$

当 $1 < Re < 1000$ 时为过渡区,此区域颗粒受到的黏性阻力逐渐减小,紊流阻力逐渐增大,将 $C_D=10/\sqrt{Re}$ 代入式(3)得

$$u_{s2} = 0.26d_s \left(\frac{g(\rho_s - \rho)}{\rho} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{\rho}{\mu_0} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

适用的颗粒粒径为

$$\left(\frac{18\mu_0^2}{\rho g(\rho_s - \rho)} \right)^{\frac{1}{3}} < d_s < 62 \left(\frac{\mu_0^2}{\rho g(\rho_s - \rho)} \right)^{\frac{1}{3}}$$

当 $10^3 < Re < 10^5$ 时为紊流区,此区域内颗粒受到的阻力为紊流阻力, $C_D=0.4-0.43$,平均0.415,代入式(3)得

$$u_{s3} = 1.76 \sqrt{\frac{gd_s(\rho_s - \rho)}{\rho}} \quad (6)$$

适用的颗粒粒径为

$$62 \left(\frac{\mu_0^2}{\rho g(\rho_s - \rho)} \right)^{\frac{1}{3}} < d_s < 1477.94 \left(\frac{\mu_0^2}{\rho g(\rho_s - \rho)} \right)^{\frac{1}{3}}$$

2 球形颗粒沉降速度的影响因素

由式(4)~式(6)可知,颗粒沉降速度与颗粒粒径 d_s 、颗粒密度 ρ_s 、水的密度 ρ 及黏度 μ_0 有关,而水的密度及黏度又随温度 t 的变化而变化,因此可以归结为 d_s 、 ρ_s 、 t 对颗粒沉降速度的影响。虽然从式(4)~式(6)可以得出诸如颗粒粒径增大,颗粒沉降速度增大,以及颗粒密度增大,颗粒沉降速度增大等结论,但是仅仅停留在这种程度的分析显然是不够的。为了解各影响因素对沉降速度的影响情况及程度,需要对这些影响因素进行敏感性分析^[7],使它们之间具有可比性。

2.1 影响因素敏感度函数

已知层流区颗粒沉降速度与影响因素的函数关系为式(4),则层流区各影响因素的敏感度函数 $S_i(x_i)$ 计算如下。

颗粒粒径的敏感度函数为

$$S_1(d_s) = \left| \frac{du_{s1}(d_s)}{d(d_s)} \right| \frac{d_s}{u_{s1}} = 2 \quad (7)$$

颗粒密度的敏感度函数为

$$S_1(\rho_s) = \left| \frac{du_{s1}(\rho_s)}{d(\rho_s)} \right| \frac{\rho_s}{u_{s1}} = \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho} \quad (8)$$

水温的敏感度函数为

$$S_1(t) = \left| \frac{du_{s1}(t)}{d(t)} \right| \frac{t}{u_{s1}} = \frac{t \left[\frac{10741 \times (2t - 16.87)}{10000 \times \sqrt{(t - 8.435)^2 + 8078.4}} + 2.1482 \right]}{2.1482 \times [t + \sqrt{(t - 8.435)^2 + 8078.4}] - 138.12} \quad (9)$$

令

$$A = \frac{10741 \times (2t - 16.87)}{10000 \times \sqrt{(t - 8.435)^2 + 8078.4}} + 2.1482$$

$$B = 2.1482 \times [t + \sqrt{(t - 8.435)^2 + 8078.4}] - 138.12$$

则式(9)可简化为

$$S_1(t) = \left| \frac{du_{s1}(t)}{d(t)} \right| \frac{t}{u_{s1}} = \frac{At}{B} \quad (10)$$

过渡区与紊流区中颗粒粒径、颗粒密度及水温的敏感度函数的求法类似,此处不一一赘述。求解结果如表1所示。

表1 不同分区各影响因素敏感度函数

Table 1 Sensitivity functions of influencing factor in different regions

分区	$S_1(d_s)$	$S_1(\rho_s)$	$S_1(t)$
层流区	2	$\frac{\rho_s}{\rho_s - \rho}$	$\frac{At}{B}$
过渡区	1	$\frac{2\rho_s}{3(\rho_s - \rho)}$	$\frac{At}{3B}$
紊流区	0.5	$\frac{\rho_s}{2(\rho_s - \rho)}$	0

2.2 影响因素敏感性分析

根据表1可知,颗粒粒径的敏感度函数在3个沉降分区内均为常数,但依次递减,相应的颗粒密度、水温的敏感度函数曲线如图2所示。

从图2可知,颗粒密度的敏感度函数 $S_1(\rho_s)$ ($i=1,2,3$)为递减函数,密度较小时,敏感度较高,随着密度的增大,敏感度逐渐降低,且 $S_1(\rho_s) > S_2(\rho_s) > S_3(\rho_s)$;水温的敏感度函数 $S_1(t)$ ($i=1,2$)为递增函数,温度越高,敏感度越高,且 $S_1(t) > S_2(t)$ 。

层流区的 $S_1(d_s)=2$,在给定区间范围内, $1.333 \leq S_1(\rho_s) \leq 3$, $0 \leq S_1(t) \leq 0.64$,所以当

$$S_1(\rho_s) = \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho} < 2$$

即 $\rho_s > 2\rho$ 时,颗粒沉降速度的最敏感因素为颗粒粒径,其次为颗粒密度,最后才是水温;当 $\rho_s < 2\rho$ 时,颗粒沉降速度的影响因素敏感程度从大到小依次为颗粒密度、颗粒粒径和水温。层流区的沉降速度曲面如图3所示。

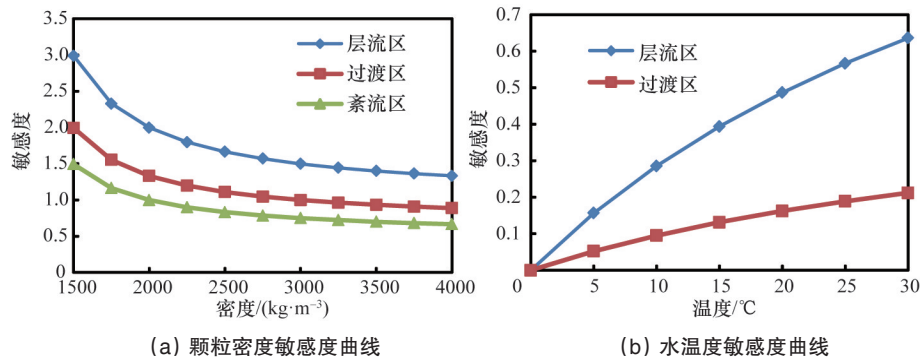


图2 影响因素敏感度函数曲线

Fig. 2 Sensitivity function curves of influencing factors

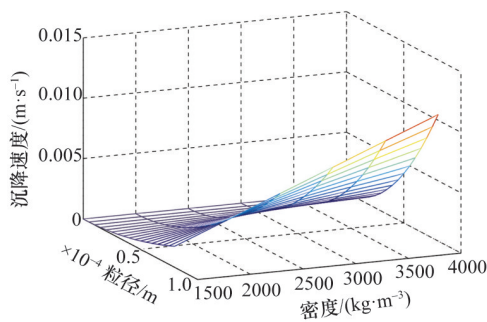


图3 层流区沉降速度曲面

Fig. 3 Settling velocity surface of laminar flow

过渡区的 $S_2(d_s)=1$, 在给定区间范围内 $0.89 \leq S_2(\rho_s) \leq 2$, $0 \leq S_2(t) \leq 0.22$, 所以当

$$S_1(\rho_s) = \frac{2\rho_s}{3(\rho_s - \rho)} < 1$$

即 $\rho_s > 3\rho$ 时, 颗粒沉降速度的最敏感因素为颗粒的粒径, 其次为颗粒密度, 最后才是水温; 当 $\rho_s < 3\rho$ 时, 颗粒沉降速度的影响因素敏感程度从大到小依次为颗粒密度、颗粒粒径和水温。

过渡区的沉降速度曲面如图4所示。

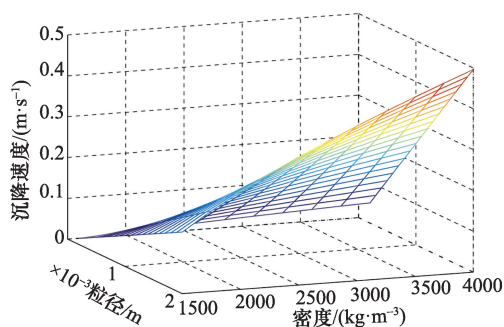


图4 过渡区沉降速度曲面

Fig. 4 Settling velocity surface of transition zone

紊流区的 $S_3(d_s)=0.5$, 在给定区间范围内, $0.67 \leq S_3(\rho_s) \leq 1.45$, $S_3(t) = 0$, 所以颗粒沉降速度的影响因素敏感程度从大到小依次为颗粒密度、颗粒的粒径和水温。

从图2(b)可以看出, 层流区水温对颗粒沉降速度的敏感

度, 大于过渡区水温对颗粒沉降速度的敏感度, 这是因为在层流状态下, 颗粒表面受到的阻力为水流对颗粒的黏性阻力。在紊流状态下受到的阻力为紊流阻力, 与流体的黏性无关, 所以几乎不受温度的影响, 所以紊流区的水温敏感度函数的值为0。从层流状态过渡到紊流状态的过程中, 颗粒表面受到的黏性阻力逐渐减小, 紊流阻力逐渐增大, 沉降速度受温度变化的影响较小。

根据颗粒在水中沉降速度的数值计算^[8]可知, 在层流区, 密度为 $1500 \sim 2000 \text{ kg/m}^3$, 粒径为 $1 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-5} \text{ m}$ 的颗粒, 沉降速度随密度的变化为3.03, 随粒径的变化为2.515; 密度为 $2000 \sim 2500 \text{ kg/m}^3$, 粒径为 $1 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-5} \text{ m}$ 的颗粒, 沉降速度随密度的变化为2, 随粒径的变化为2.515。这与上述层流区参数敏感性分析得出的结论是一致的, 同样的, 在过渡区和紊流区也可以得到相应的结论。

3 颗粒形状对沉降速度的影响

球形颗粒只是为了研究方便而假想的一种理想颗粒, 在水力提升过程中基本上是不存在的。与球形颗粒相比, 不规则颗粒的表面积大, 表面粗糙而且不对称, 在沉降过程中受到的阻力比球形颗粒大。对于不规则颗粒沉降速度的计算, 可在球形颗粒沉降速度的基础上乘以颗粒的形状系数加以修正^[9], 即

$$u'_s = S_f \cdot u_s = \frac{c}{\sqrt{ab}} \cdot u_s \quad (11)$$

式中, S_f 为颗粒形状系数; a 、 b 、 c 分别为不规则颗粒3个相互垂直轴的长度, 且 $a > b > c$, m 。

卵石颗粒的实际沉降速度^[10]如表2所示。

卵石颗粒实际沉降速度、不规则颗粒理论计算沉降速度和等粒径球形颗粒沉降速度的曲线如图5所示。可以看出, 不规则颗粒的沉降速度明显小于等粒径球形颗粒的沉降速度, 如果直接采用球形颗粒的沉降公式计算不规则颗粒的沉降速度, 偏差非常大, 使得设计的水力提升系统参数不合理, 管道阻力损失增加, 造成动力浪费现象; 而考虑颗粒形状系数的理论计算沉降速度与不规则的实际沉速近似相等, 如颗

粒粒径 7.45×10^{-3} m 的卵石其实际沉降速度为 0.377206 m/s, 考虑颗粒形状系数的理论计算沉降速度为 0.372821 m/s, 相对误差仅为 $(0.377206 - 0.372821) / 0.377206 = 1.16\%$, 除极个别数据的相对误差在 6%~8% 外, 绝大部分数据的相对误差均小于 6%, 因此, 采用形状系数对沉降速度进行修正是符合工程实际的。

表 2 卵石颗粒的实际沉降速度
Table 2 The settling velocities of gravel particles

颗粒粒径/m	形状系数	沉降速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
0.00745	0.60011	0.377206
0.00841	0.60302	0.395757
0.00968	0.64143	0.480000
0.01299	0.80082	0.624658
0.01570	0.60246	0.538583
0.01626	0.73178	0.660870
0.01845	0.67504	0.658748
0.02293	0.67817	0.692292
0.02407	0.63074	0.720000
0.02630	0.57565	0.667317
0.02781	0.77171	0.898039
0.02912	0.62112	0.708808
0.03094	0.64108	0.836107
0.03235	0.69154	0.936605
0.03471	0.58933	0.821279
0.03601	0.66371	0.886452

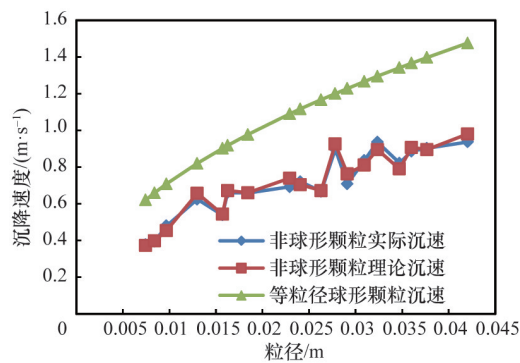


图 5 不同情况下沉降速度与粒径关系曲线

Fig. 5 Settling velocity and particle diameter curves under different conditions

4 颗粒浓度对沉降速度的影响

当管道中颗粒浓度很小时, 颗粒在液体中沉降的过程中彼此干扰很小, 可以看成是自由沉降。当颗粒浓度增大到一定程度时, 颗粒的相互干扰趋于严重, 成为干涉沉降。现有研究认为, 当颗粒质量分数大于 3% 时, 即可认为是干涉沉降^[11]。

颗粒浓度主要通过以下两方面对沉降速度产生影响:

1) 颗粒在管道中下沉时, 将会引起周围水流的运动, 如果存在其他颗粒, 由于边界与颗粒都是坚实不容易发生变形的, 所以颗粒附近水流会受到边界与颗粒的阻尼作用而不能自由流动, 颗粒浓度越大, 阻尼作用越大, 这样就相当于增加了液体的黏滞性, 从而使颗粒沉降速度小于单颗粒沉降时的速度。

2) 颗粒在管道中下沉时, 带动了周围液体, 使之也一起向下运动。水流在与颗粒一起运动过程中, 受到管道壁约束, 则根据水流连续定律可知, 管道中与颗粒一起下降的部分水流必然会同时引起相同体积水流向上运动, 回流流体增加的阻力开始减慢颗粒的下沉, 且颗粒间的相互阻尼使每个颗粒的沉降速度都降低。体积浓度越大, 颗粒的沉降速度越低。

考虑这两方面因素对颗粒沉降速度的影响, 采用比较广泛的 Richardson-Zaki 公式对干涉沉降速度 u_s^* 进行计算, 计算公式^[12]为

$$\frac{u_s^*}{u_s} = (1 - C_v)^m \quad (12)$$

式中, C_v 为颗粒体积浓度, %; 指数 m 为颗粒雷诺数的函数。

对于指数 m 的计算, 许多专家学者都进行过相关研究^[13-16], 其中佐藤博等提出的计算模型, 因准确度高, 在所有区域中均可使用, 且计算的相对误差小于 6%^[17], 而得到广泛应用。该计算模型为

$$m = 2.33 \frac{Re^*(\alpha + Re^*)}{Re^*(\alpha + Re^*) - \frac{8\sqrt{3}\alpha\beta}{Re}} \quad (13)$$

式中, $Re^* = \sqrt{\alpha^2 + 8\sqrt{3}\alpha\beta/Re}$; α 、 β 为 Swanson 形状系数。 α 、 β 的计算式为

$$\begin{cases} \alpha = 0.2701e^{0.9233k_a} \\ \beta = 15.12e^{-1.043k_a} \end{cases} \quad (14)$$

式中, k_a 为面积指数, $k_a = bc/d_c^2$; d_c 为颗粒等价直径, m。

5 结论

1) 颗粒沉降速度影响因素的敏感程度, 在层流区和过渡区, 随颗粒密度 ρ_s 与水密度 ρ 之间比值不同而不同, 当层流区 $\rho_s > 2\rho$ 及过渡区 $\rho_s > 3\rho$ 时, 颗粒粒径 > 颗粒密度 > 水温; 当层流区 $\rho_s < 2\rho$ 及过渡区 $\rho_s < 3\rho$ 时, 颗粒密度 > 颗粒粒径 > 水温。在紊流区, 颗粒沉降速度的影响因素敏感度为颗粒密度 > 颗粒粒径 > 水温, 但水温对沉降速度几乎不造成影响。

2) 参考卵石颗粒沉降实验数据, 发现如果直接采用球形颗粒沉降速度计算不规则颗粒沉降速度会产生很大偏差, 而用颗粒形状系数加以修正后, 理论计算值与实际值的相对误差小于 6%, 符合工程实际。

3) 干涉沉降过程中, 由于颗粒间的相互阻尼以及管道壁、颗粒对水流的阻尼, 颗粒浓度会增大流体的黏性, 加大颗粒下沉过程中受到的阻力, 且浓度越大, 颗粒沉降速度越小,

对此,可采用Richardson-Zaki公式求解干涉沉降速度。

综上所述,由于不同影响因素下的颗粒沉降速度是不同的,因此在实际应用中,要根据拟提升颗粒及流体的具体情况,分析各影响因素下的颗粒沉降速度,为确定管道水力提升速度和水力提升系统优化设计提供科学依据。

参考文献(References)

- [1] 吴超. 金属矿山的安全与环境科技发展问题研究[J]. 有色金属科学与工程, 2012, 3(5): 1-7.
Wu Chao. Safety and environment technology development of metallic mines[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2012, 3(5): 1-7.
- [2] 高林, 韩克峰. 矿山地下开采矿石水力提升技术[J]. 山东冶金, 1996, 18(4): 1-5.
Gao Lin, Han Kefeng. The technology of ore lifted by water-power for mining from underground[J]. Shandong Metallurgy, 1996, 18(4): 1-5.
- [3] 凌胜, 贾炳国. 井下矿石水力提升的可行性[J]. 有色金属: 矿山部分, 1993(5): 16-19.
Ling Sheng, Jia Bingguo. The feasibility of underground ore hydraulic lifting [J]. Nonferrous Metals: Mining, 1993(5): 16-19.
- [4] 李衡. 深海采矿水力提升系统粗颗粒运动规律模拟研究[D]. 北京: 清华大学, 2003.
Li Heng. Simulation of coarse particles motions in hydraulic lifting pipe of deep seabed mining system[D]. Beijing: Tsinghua University, 2003.
- [5] 佟庆理. 两相流动理论基础[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1982: 45-46.
Tong Qingli. Theoretical basis of two-phase flow [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1982: 45-46.
- [6] 费祥俊. 浆体与粒状物料输送水力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994: 74-76.
Fei Xiangjun. The slurry and granular materials mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994: 74-76.
- [7] Saltelli A, Ratto M, Tarantola S, et al. Sensitivity analysis for chemical models[J]. Chemical Reviews, 2005, 105(7): 2811-2828.
- [8] 刘同友. 充填采矿技术与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001: 82-83.
Liu Tongyou. Filling Mining Technology and its Application[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001: 82-83.
- [9] 瓦斯普. 固体物料浆体管道输送[M]. 黄河水利委员会科研所译. 北京: 水利出版社, 1980: 45-46.
Wasp E J. The solid material slurry pipeline transportation[M]. The Yellow River Conservancy Commission Research Institute. Beijing: Water Conservancy Press, 1980: 45-46.
- [10] 姜龙. 粗颗粒垂直管水力提升速度与浓度的实验研究[D]. 北京: 清华大学, 2005.
Jiang Long. Experiment study on lifting velocity and concentration of coarse particles for vertical hydraulic lifting[D]. Beijing: Tsinghua University, 2005.
- [11] 申焱华, 毛纪陵, 凌胜. 垂直管道固液两相流的最小提升水流速度[J]. 北京科技大学学报, 1999, 21(6): 519-523.
Shen Yanhua, Mao Jiling, Ling Sheng. Minimum lifting water velocity of solid-liquid two-phase flow in vertical pipe[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 1999, 21(6): 519-523.
- [12] Richardson J F, Zaki W N. Sedimentation and fluidization: Part II[J]. Transactions of the Institution Chemical Engineers, 1954, 32(1): 35-53.
- [13] 夏震寰, 汪岗. 无粘性均质颗粒在细颗粒悬浮液中的沉降[J]. 泥沙研究, 1982(1): 14-23.
Xia Zhenhuan, Wang Gang. The settling of non-cohesive particles in a flocculated suspension[J]. Journal of Sediment Research, 1982(1): 14-23.
- [14] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 62-66.
Qian Ning, Wan Zhaohui. The sediment transport mechanics [M]. Beijing: Science Press, 1983: 62-66.
- [15] Wallis G B. One-dimensional two-phase flow[M]. New York: McGraw-Hill, 1969. 179-183.
- [16] Maude A D, Whitmore R L. A generalized theory of sedimentation[J]. British Journal of Applied Physics, 1958, 9(12): 477-482.
- [17] 赵利安. 大颗粒浆体管内流动规律研究[D]. 辽宁: 辽宁工程技术大学, 2011.
Zhao Li'an. Study on flow law of large particle slurry in pipeline[D]. Liaoning: Liaoning Technical University, 2011.

Influencing factors for particles settling velocity in vertical pipes

ZHAO Guoyan, LIN Chunping, HONG Changshou

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract For the issue of "greater well depth" faced by deep mining activities, the influencing factors on the settling velocity of particle in the hydraulic lifting system have been studied. Based on the settlement mechanism of spherical particle in water, the settling velocity expressions of laminar area, transition area and turbulent area are respectively determined. A sensitivity analysis is carried out in terms of particle size, particle density and water temperature, and the influence of particle shape and its concentration on the settling velocity is discussed. The results show that in the laminar area and transition area, the sensitivities of particle size, particle density and water temperature to the settling velocity vary with the ratio of particle density to the water's; That in the turbulent area, the sensitivities of those influencing factors exhibit as particle density>particle size>water temperature; And that the actual settling velocities of irregular particles are less than those theoretical values of the spheroidal particle of same size. To make the results better fit engineering practice, the particle shape factor is employed to amend the differences between the theoretical values and the actual ones, and Richardson-Zaki formula is adopted in the hindered settling process.

Keywords deep mining; vertical pipe; hydraulic lifting; settling velocity

(责任编辑 韩星明)