

对浆体管道复合流阻力的研究

Research on the Composite Flow Resistance of Slurry Pipelines

刘德忠, 周积果(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

摘要:本文概述了浆体管道复合流阻力的研究历程,在杜兰德、伊斯梅尔、瓦斯普等人研究成果基础上,依据浆体相对体积浓度 $\frac{C}{C_A} = \frac{C_{1V}}{C_V}$,提出粗细颗粒分界粒径概念,推导出浆体管道复合流阻力公式。该公式数理思路清晰,物理概念明确,公式推导严谨,计算方法简捷,可供浆体管道工程设计参考。

关键词:相对体积浓度;均质体积浓度;非均质体积浓度;粗细颗粒分界粒径;浆体管道复合流阻力

中图分类号: TD563 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2025)04-0082-05

Abstract: This article summarizes the research process of composite flow resistance in slurry pipelines. Based on the research results of Durand, Ismail, Vasp and others, and according to the relative volume concentration $\frac{C}{C_A} = \frac{C_{1V}}{C_V}$ of slurry, the concept of boundary particle size between coarse and fine particles is proposed, and the formula for composite flow resistance in slurry pipelines is derived. This formula has a clear mathematical and physical concept, rigorous derivation, and simple calculation method, which can be used as a reference for slurry pipeline engineering design.

Key words: relative volume concentration; Homogeneous volume concentration; Heterogeneous volume concentration; Boundary particle size between coarse and fine particles; Composite flow resistance of slurry pipeline

1 前言

1.1 浆体的定义

浆体是固液两相混合物,固相是天然土沙、磨细的矿砂或煤粉等被输送的固体物料,液相是载体,通常是水。

1.2 浆体的分类

早期一般按粒径大小进行浆体分类。杜兰德(Durand)在1953年对牛顿体水平管道紊流条件下的浆体流动特性与粒径大小的浆体分类^[1]如下。

(1)当固体物料粒径 $d \leq 30 \mu\text{m}$ 时,称微细颗粒,其浆体为单一均质浆体。

(2)当固体物料粒径 $d = 30 \sim 50 \mu\text{m}$ 时,称细颗粒,其浆体为伪均质浆体。

(3)当固体物料粒径时 $d = 50 \sim 200 \mu\text{m}$,称细偏粗颗粒,其浆体为伪均质与非均质过渡浆体。

(4)当固体物料粒径时 $d \geq 200 \mu\text{m}$,称粗颗粒,其浆体为非均质浆体。

2 杜兰德对浆体管道复合流阻力的研究

2.1 杜兰德对单一均质浆体阻力的研究

对粒径 $d \leq 30 \mu\text{m}$ 的微细颗粒单一均质浆体的阻力 i_k 按式(1)计算:

$$i_k = i_s \frac{\rho_k}{\rho_s} \quad (1)$$

式中: i_k 为单一均质浆体的阻力, $\text{mH}_2\text{O}/\text{m}$; i_s 为水的阻力, $\text{mH}_2\text{O}/\text{m}$; ρ_k 为单一均质浆体的密度, kg/m^3 ; ρ_s 为水密度, kg/m^3 。

设浆体体积浓度为 C_V ,固体颗粒密度为 ρ_g (kg/m^3),浆体密度 ρ_k 为

$$\rho_k = C_V \rho_g + (1 - C_V) \rho_s \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)整理得

$$\frac{i_k - i_s}{i_s C_V} = \frac{\rho_g}{\rho_s} - 1 \quad (3)$$

式(3)左边可写为

$$\frac{i_k - i_s}{i_s C_V} = \Phi \quad (4)$$

对式(4),单一均质浆体可写为

$$\Phi = \frac{\rho_g}{\rho_s} - 1 \quad (5)$$

[作者简介] 刘德忠(1937—),教授级高级工程师,主要从事浆体管道输送研究。

[引用格式] 刘德忠,周积果. 对浆体管道复合流阻力的研究[J]. 中国矿山工程,2025,54(4):82-86.

式(4)对均质浆体和非均质浆体阻力计算均具有普遍性。

2.2 杜兰德对非均质浆体阻力的研究

杜兰德对沙密度 $\rho_g = 2\ 650\ \text{kg/m}^3$ 、粒径 $d = 200 \sim 2\ 500\ \mu\text{m}$ 、管径 $D = 25 \sim 500\ \text{mm}$ 、体积浓度 $C_V = 0.02 \sim 0.22$ 的浆体管道进行了实验^[1],提出了非均质浆体阻力因子 ψ

$$\psi = \left[\frac{gD \left(\frac{\rho_g}{\rho_s} - 1 \right)}{V^2 \sqrt{C_D}} \right] \quad (6)$$

依据式(4)和式(6),函数 $\Phi = f(\psi)$ 可写成为

$$\Phi = K\psi^n \quad (7)$$

非均质浆体杜兰德阻力公式^[1]为

$$i_k = i_s + K i_s C_V \left[\frac{gD \left(\frac{\rho_g}{\rho_s} - 1 \right)}{V^2} \right]^{1.5} C_D^{-0.75} \quad (8)$$

式中: g 为重力加速度, m/s^2 ; D 为管道内径, m ; V 为平均流速, m/s ; C_D 为固体颗粒在水中沉降阻力系数; K 为系数,杜兰德 $K = 82 \sim 150$; n 为指数,杜兰德 $n = 1.5$ 。

关于系数 K 和指数 n 尚有许多实验者的数值^[1],详见表1。

表1 系数 K 和指数 n 值表

实验者名称	K	n
波宁顺 1961年(Bonington)	150	1.5
埃利斯 1963年(Ellis)	85	1.5
蔡斯克柏格 1964(Chaskelberg)	78	1.4
科克 1964年(koch)	81	1.5
卡察斯基 1967年(Kazanskij)	134	1.4
海登等 1968年(hayden)	121	1.3

系数 K 和指数 n 因管径和颗粒不同而异,尚缺乏通用性,从表1可以看出,系数 K 和指数 n 与杜兰德数值相近,所以采用杜兰德系数 K 和指数 n 是可行的。

杜兰德对浆体管道阻力的贡献是提出了对均质浆体和非均质浆体阻力计算均适用的公式(4),给出了以水为载体的非均质浆体阻力公式(8)。

3 伊斯梅尔对浆体管道复合流阻力的研究

3.1 浆体管道相对体积浓度定义

伊斯梅尔在1952年对浆体管道流速分布和浓

度分布进行了研究,定义了浆体管道相对体积浓度 $\frac{C}{C_A}$, C 为距管内底 $0.92D$ 处的体积浓度, C_A 为距管内底 $0.5D$ 处的体积浓度。

3.2 伊斯梅尔方程

伊斯梅尔推导出计算 $\frac{C}{C_A}$ 的方程^[2]如下:

$$\frac{C}{C_A} = \sum \left(\frac{C}{C_A} \right)_i \Delta P_i \quad (9)$$

$$\left(\frac{C}{C_A} \right)_i = 10^{-\frac{1.8\omega_i}{K\beta \cdot V^*}} \quad (10)$$

ω_i 为固相粒径沉速,现在可按表2计算^[3]:

$$V^* = V \sqrt{\frac{\lambda}{8}} \quad (11)$$

达西摩阻系数 λ 可按刘德忠显函数公式^[3]计算:

$$\lambda = \frac{1.330\ 36}{\left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.738\ 5}{\text{Re}^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (12)$$

式中: $\frac{C}{C_A}$ 为浆体管道相对体积浓度; $\left(\frac{C}{C_A} \right)_i$ 为固相粒径 d_i 权重 ΔP_i (以小数计)的相对体积浓度; ω_i 为固相粒径 d_i 在载体中的沉速; K 为修正卡门常数, $K = 0.36$; β 为伊斯梅尔系数, $\beta = 1$; V^* 为摩阻流速, m/s ; V 为浆体输送流速, m/s ; λ 为达西摩阻系数。

伊斯梅尔方程为浆体管道复合流阻力的计算奠定了理论基础。

从根据伊斯梅尔方程看出,颗粒沉速 ω_i 和达西摩阻系数 λ 是主要参数,采用刘德忠颗粒沉速公式计算 ω_i ,采用刘德忠显函数达西摩阻系数公式计算 λ ,容易计算出浆体管道相对体积浓度 $\frac{C}{C_A}$,对浆体流态进行判别。

4 瓦斯普对浆体管道复合流阻力的研究

4.1 浆体管道流态判别标准

瓦斯普在1963年对煤浆管道进行实验,根据 $\frac{C}{C_A}$,提出浆体管道流态判别标准如下:

当 $\frac{C}{C_A} \geq 0.8$ 时,称为均质流态;

当 $\frac{C}{C_A} < 0.1$ 时,称为非均质流态;

当 $0.1 \leq \frac{C}{C_A} < 0.8$ 时,称为复合流态。

表2 刘德忠颗粒沉速公式表

N_d 和 N_ω 无因次数	计算	说明
标准度量粒径 d_L/m	$d_L = \frac{\left(\frac{\eta_1}{\rho_1}\right)^{2/3}}{\left[g\left(\frac{\rho_g - \rho_1}{\rho_1}\right)\right]^{1/3}}$	根据因次分析提出浆体标准度量粒径和标准度量沉速数理定义(已知常量),得出颗粒粒径数和沉速数两个无因次数。
颗粒粒径数 N_d	$N_d = \frac{d}{d_L}$	
标准度量沉 $\omega_L/m \cdot s^{-1}$	$\omega_L = \left[g\left(\frac{\rho_g - \rho_1}{\rho_1}\right)\frac{\eta_1}{\rho_1}\right]^{1/3}$	
颗粒沉速数 N_ω	$N_\omega = \frac{\omega}{\omega_L}$	
已知 N_d 求 N_ω	$N_\omega = \frac{20.5209}{N_d} \left[\left(1 + \frac{N_d^{1.5}}{0.213^{0.5} \times 4.53^2}\right)^{0.5} - 1 \right]^2$	$N_\omega = f(N_d)$
求颗粒沉速 ω	$\omega = \omega_L N_\omega$	
已知 N_ω 求 N_d	$N_d = 0.05325 N_\omega^2 \left[1 + \left(1 + \frac{36.24}{0.213^{0.5} N_\omega^{-1.5}}\right)^{0.5} \right]^2$	$N_d = f(N_\omega)$
求粒径 d_L	$d = d_L N_d$	
已知 N_d, N_ω 求 Re	$Re = N_d N_\omega$	颗粒雷诺数
已知 N_d, N_ω 求 Fr	$Fr = N_\omega N_d^{-0.5}$	颗粒佛劳德数
已知 N_d, N_ω 求 C_D	$C_D = \frac{4}{3} N_\omega^{-2} N_d$	颗粒沉降阻力系数

4.2 浆体管道阻力计算

当 $\frac{C}{C_A} \geq 0.8$ 时,非均质流态占比小,可认为全部浆体均是均质流态,均质流态阻力按下式计算:

$$i_k = \lambda_k \frac{V^2 \rho_k}{2gD\rho_s} \quad (13)$$

当 $0.1 \leq \frac{C}{C_A} \leq 0.8$ 时,复合流态阻力按瓦斯普-杜兰德公式计算。

瓦斯普将式(4)写为

$$\frac{i_k - i_1}{i_1 \sum (C_{2V})_i} = \Phi \quad (14)$$

均质浆体阻力因子 ψ 写为

$$\psi = \left[\frac{g^D \left(\frac{\rho_g}{\rho_s} - 1\right)}{V^2 \sqrt{\sum (C_{1D})_i}} \right] \quad (15)$$

依据式(14)和式(15),函数 $\Phi = f(\psi)$ 可写为

$$\Phi = K\psi^{1.5} \quad (16)$$

瓦斯普-杜兰德复合流阻力公式为

$$i_k = i_1 + Ki_1 \left[\frac{g^D \left(\frac{\rho_g}{\rho_1} - 1\right)}{V^2} \right]^{1.5} \sum (C_{2V})_i (C_{1D})_i^{-0.75} \quad (17)$$

$$i_1 = \lambda_1 \frac{V^2 \rho_1}{2gD\rho_s} \quad (18)$$

达西摩阻系数 λ_1 必须用 C_{1V} 均质浆体的密度 ρ_1 和刚度系数 η_1 得出的达西摩阻系数。

瓦斯普对浆体管道的贡献是提出了浆体管道相对体积浓度 $\frac{C}{C_A}$ 判别标准,得出了全部均质流态阻力公式(13)和复合流态阻力公式(17)。该公式已在美国1970年440 km黑迈萨(Black Mesa)煤浆管道工程、美国1971年27 km卡拉沃拉斯(Calavaras)石灰石管道工程、澳大利亚1967年85 km萨维奇河(Savage river)铁精矿管道工程、巴西1977年396 km萨马柯(Samarco)铁精矿管道工程、巴西1977年120 km瓦勒普(Valep)磷精矿管道工程及巴布亚新几内亚1972年27 km布干维尔(Bougainville)铜精矿管道等工程中应用。

5 刘德忠对浆体管道复合流阻力的研究

5.1 浆体管道流态判别标准

我国浆体管道专家王绍周对长距离浆体管道除应遵循瓦斯普 $\frac{C}{C_A} \geq 0.8$ 外,还应补充 d_{95} 的相对体积

浓度即 $\left(\frac{C}{C_A}\right)_{0.95} \geq 0.5$ 的条件^[4-6], 考虑 $\frac{C}{C_A}$ 和 $\left(\frac{C}{C_A}\right)_{0.95}$ 两个数轴的关系, 浆体管道流态判别标准如下:

1) 似均质流态判别标准为

$$\begin{cases} \frac{C}{C_A} \geq 0.8 \\ \left(\frac{C}{C_A}\right)_{0.95} \geq 0.5 \end{cases} \quad (19)$$

满足上述条件定义时为均质流态, 该流态中为细颗粒, 此时浆体接近均质流态, 为了与单相均质流态相区别, 称为似均质流态, 长输管道输送应采用该流态。

2) 非均质流态判别标准为

$$\frac{C}{C_A} \leq 0.1 \quad (20)$$

当满足上述条件定义时为非均质流态, 该流态粒径为粗颗粒, 载体为水。浆体管道输送比较少见。

3) 复合流态判别标准为

$$\begin{cases} 0.1 \leq \frac{C}{C_A} < 0.8 \\ \text{或} \left\{ \frac{C}{C_A} \geq 0.8 \text{ 且 } \left(\frac{C}{C_A}\right)_{0.95} < 0.5 \right. \end{cases} \quad (21)$$

当满足上述条件定义为复合流态, 此时浆体管道细颗粒似均质部分来输送粗颗粒非均质部分的组合流态称复合流态, 多数尾矿浆体管道为复合流态。

5.2 浆体管道阻力计算

5.2.1 粗细颗粒分界粒径定义

通过流态判别计算可得出以下浆体相对体积浓度关系式为

$$\frac{C}{C_A} = \frac{C_{1V}}{C_V} \quad (22)$$

根据式(22)分析, 作者提出粗细颗粒分界粒径概念。

1) 粗细颗粒分界粒径的定义

固相粒径为 d_i , 以小数计权重为 ΔP_i , 以 $\sum_{i=0}^{i=1} \Delta P_i$ 为纵坐标, 以 d_i 为横坐标, 绘制 $\sum_{i=0}^{i=1} \Delta P_i = f(d_i)$ 粒径累积曲线, 在纵坐标上依据浆体相对体积浓度 $\frac{C}{C_A}$, 在横坐标上查出对应的粒径, 定义为粗细颗粒分界粒径, 它是似均质浆体粒径最大值, 符号为 d_{1m} 。

2) 对固相粒径 d_i 的分析

当 $d_i \leq d_{1m}$ 时, 所有细颗粒的 d_i 体积浓度构成似均质体积浓度 C_{1V} , $d_i \leq d_{1m}$ 和 C_{1V} 应按似均质流态计算阻力。

当 $d_i \geq d_{1m}$ 时, 所有粗颗粒的 d_i 体积浓度构成非均质体积浓度 C_{2V} , $d_i \geq d_{1m}$ 和 C_{2V} 应按非均质流态计算阻力。

以 d_{1m} 区分浆体似均质流态和非均质流态有利于浆体管道阻力计算的深化。

5.2.2 复合流态浆体管道阻力公式的推导

复合流态浆体管道阻力按下式计算:

$$i_k = i_1 + \Delta i_2 \quad (23)$$

式中, i_k 为 C_V 浆体管道阻力, $\text{mH}_2\text{O}/\text{m}$; i_1 为 C_{1V} 似均质浆体管道阻力, $\text{mH}_2\text{O}/\text{m}$; Δi_2 为 C_{2V} 非均质浆体阻力, $\text{mH}_2\text{O}/\text{m}$ 。

设增阻系数为 k_z , 可将式(23)写成下式:

$$k_z i_1 = i_1 + \Delta i_2 \quad (24)$$

将式(24)等号两边除以 i_1 得:

$$k_z = 1 + \frac{\Delta i_2}{i_1} \quad (25)$$

当固相粒径 $d_i \leq d_{1m}$ 时, $\frac{\Delta i_2}{i_1} = 0, k_z = 1$ 。

当固相粒径 $d_i \geq d_{1m}$ 时, $\frac{\Delta i_2}{i_1} \geq 0, k_z \geq 1$ 。

k_z 的大小取决于 $d_i \geq d_{1m}$ 粗颗粒的数值。

颗粒沉降的受力分析:

设固相颗粒密度为 ρ_g , 球体直径为 d , 球体体积为 $\frac{\pi}{6}d^3$, 浆体密度为 ρ_1 , 颗粒球体在浆体中沉降的有效重力为 F_1, F_1 按下式计算:

$$F_1 = \frac{\pi}{6}d^3g(\rho_g - \rho_1) \quad (26)$$

设固相颗粒沉速为 ω , 绕流阻力系数为 C_D , 垂直沉速方向的球体颗粒面积为 $\frac{\pi}{4}d^2$, 牛顿绕流阻力为 F_2, F_2 按下式计算:

$$F_2 = \frac{C_D \pi}{4}d^2 \frac{\rho_1 \omega^2}{2} \quad (27)$$

将式(27)除以式(26)得:

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{\omega^2}{\frac{4}{3C_D} \left(\frac{\rho_g}{\rho_1} - 1\right)gd} \quad (28)$$

对式(28)两边开方并进行量纲分析得出佛罗德数 Fr :

$$Fr = \dim \frac{\sqrt{F_2}}{\sqrt{F_1}} = \frac{\omega}{\sqrt{\left(\frac{\rho_g}{\rho_1} - 1\right)gd}} \quad (29)$$

已知分界粒径 d_{1m} 和沉速 ω_{1m} , 写出分界粒径佛劳德数如下:

$$Fr_1 = \frac{\omega_{1m}}{\sqrt{gd_{1m} \left(\frac{\rho_g}{\rho_1} - 1\right)}} \quad (30)$$

已知粗颗粒加权平均粒径 d_{2p} 和沉速 ω_{2p} , 写出粗颗粒加权平均粒径佛劳德数如下:

$$Fr_2 = \frac{\omega_{2p}}{\sqrt{gd_{2p} \left(\frac{\rho_g}{\rho_1} - 1\right)}} \quad (31)$$

d_{2p} 粗粒径增阻系数可成下式

$$k_z = \left(\frac{Fr_2}{Fr_1}\right)^{\frac{1}{n}} \frac{\rho_k}{\rho_s} \quad (32)$$

$$i_k = \lambda_1 \frac{V^2}{2gD} \left(\frac{Fr_2}{Fr_1}\right)^{\frac{1}{n}} \frac{\rho_k}{\rho_s} \quad (33)$$

$$n = 0.88 \times \ln \left(\frac{Fr_2}{Fr_1}\right) + 4.5 \quad (34)$$

式(33)就是复合流态浆体管道阻力公式。

6 结论

作者概述了浆体管道复合流阻力的研究历程, 杜兰德通过理论推导得出具有普遍意义的式(4), 通过实验研究提出了半理论半经验复合流阻力式(8)。伊斯梅尔方程奠定浆体管道复合流阻力计

算的理论基础。瓦斯普根据 $\frac{C}{C_A}$ 定义了浆体管道流态判别标准, 将浆体体积浓度 C_V 分解为 C_{1V} 和 C_{2V} , 并提出了当 $\frac{C}{C_A} \geq 0.8$ 时, 浆体阻力按均质流态的式(13)计算, 当 $0.1 \leq \frac{C}{C_A} < 0.8$ 时, 浆体阻力按瓦斯普—杜兰德复合流阻力式(17)计算。

刘德忠根据王绍周 $\left(\frac{C}{C_A}\right)_{095} \geq 0.5$ 条件, 补充完善了瓦斯普浆体管道流态判别标准, 根据 $\frac{C}{C_A} = \frac{C_{1V}}{C_V}$ 定义了粗细颗粒分界粒径 d_{1m} , 推导出复合流阻力公式(33), 该公式概念清晰, 推导严谨, 计算简捷, 可供浆体管道工程设计参考。

[参考文献]

- [1] 日本浆体输送研究会编著. 浆体与密封容器输送技术手册[M]. 恩菲翻译组译. 冶金工业出版社, 1990.
- [2] E. J. 瓦斯普. 固体物料的浆体管道输送[M]. 黄河水利委员会科研所译. 郑州: 黄河水利出版社, 1980.
- [3] 中国工程建设标准化协会. 浆体长距离管道输送工程设计标准. T/CECS 98—2019.
- [4] 王绍周. 粒状物料的浆体管道输送[M]. 海洋出版社, 1998.
- [5] 王辉, 段文权, 刘敬智, 等. 膏体料浆管输送过程中颗粒迁移行为研究[J]. 绿色矿冶, 2024, 40(6): 1-12.
- [6] 刘德忠. 红土矿类浆体管道水力计算[J]. 中国有色冶金, 2020, 49(3): 63-66.

(上接第81页)

制闭锁解除权限, 并利用区块链存证操作记录, 确保其可追溯性; 构建闭锁系统的数字孪生模型, 提前预判信号偏差并自动校准, 结合 5G + 边缘计算技术, 实现闭锁状态的毫秒级云端同步与远程诊断, 为实时干预提供有力支持。

[参考文献]

- [1] 宋方贵, 乔洋, 朱广傲. 高庄煤矿副井安全门机电一体化的探索[J]. 煤矿机械, 2019(5): 92-93.
- [2] 金武飞, 曹云翔, 王海波, 等. 基于 PLC 的平开式自动矿井安全门的设计[J]. 工业控制计算机, 2011(5): 127-128.
- [3] 覃佩文. 矿用斜井安全门的设计与控制[J]. 大众科

技, 2012(1): 47-48.

- [4] 刘伟, 朱建安, 刘志忠, 等. 煤矿竖井摆动式安全门的研制[J]. 煤矿机电, 2007(2): 94-95.
- [5] 刘伟. 上摆折叠式矿井安全门开启状态防自落方法研究[J]. 煤矿机械, 2013(1): 201-202.
- [6] 许伟, 孟宪之. 竖井机械闭锁安全门的应用[J]. 科技论坛, 2007: 12.
- [7] 刘伟, 刘思琪, 李向远, 等. 双层罐笼提升摆折式安全门的设计[J]. 煤矿机械, 2015(8): 206-207.
- [8] 徐德强, 王成礼. 微机控制自动安全门的推广应用[J]. 煤炭科技, 2008(2): 82-83.
- [9] 韦根远. 斜井自动安全门设计与安装[J]. 大众科技, 2014(1): 76-77.