

对增阻系数法计算浆体管道阻力的研究

A Study on Calculating the Resistance of Slurry Pipeline by Increasing Resistance Coefficient Method

刘德忠(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

摘要: 本文根据扩散理论相对体积浓度 $\frac{C}{C_A}$ 的 H. M. 伊斯梅尔方程与 E. J. 瓦斯普和王绍周浆体流态判别标准, 采用刘德忠对指数 Z 算法进行浆体流态判别计算, 得出似均质浆体体积浓度 C_{1V} 和非均质浆体体积浓度 C_{2V} , 依据浆体相对体积浓度 $\frac{C}{C_A} = \frac{C_{1V}}{C_V}$, 提出 C_{1V} 粗细颗粒分界粒径概念, 并在此基础上, 提出 C_{2V} 非均质浆体体积浓度增阻概念, 对分界粒径概念和增阻概念进行定义, 推导出增阻系数法计算浆体管道阻力公式, 该公式通过我国六条长距离浆体管道工程验证, 计算结果与工程实际相近。

关键词: 相对体积浓度; 浆体管道流态判别; 似均质体积浓度; 非均质体积浓度; 粗细颗粒分界粒径; 增阻系数

中图分类号: O351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2023)06-0017-05

Abstract: This article is based on the diffusion theory of relative volume concentration H. M. The Ismail equation is combined with the flow state discrimination criteria of E. J. Vasp and Wang Shaozhou slurries, and Liu Dezhong's exponential calculation method is used to determine the flow state discrimination calculation of slurries. The volume concentration of quasi homogeneous slurries and heterogeneous slurries are obtained, and based on the relative volume concentration of slurries, the concept of coarse and fine particle boundary particle size is proposed. On this basis, the concept of heterogeneous slurry volume concentration increasing resistance is proposed, and the concepts of boundary particle size and increasing resistance are defined, Derive the formula for calculating the resistance of slurry pipelines using the drag coefficient method, which has been verified by six long-distance slurry pipeline projects in China. The calculation results are similar to the actual engineering situation.

Key words: relative volume concentration; identification of flow state in slurry pipelines; similar homogeneous volume concentration; heterogeneous volume concentration; boundary particle size between coarse and fine particles; drag coefficient

1 浆体管道流态判别

浆体由固液两相流组成, 对浆体管道阻力的影响有固相物料的密度、粒度组成和浆体浓度、浆体宾汉流型流变参数, 两相载体密度等, 在已知浆体流量管径条件下, 采用相对体积浓度 $\frac{C}{C_A}$ 的进行流态判别。

浆体相对体积浓度按 H. M. 伊斯梅尔方程计算^[1]

$$\frac{C}{C_A} = \sum \left(\frac{C}{C_A} \right)_i \Delta P_i \quad (1)$$

式中: $\frac{C}{C_A}$ 为浆体管道相对体积浓度流态判别式;

$\left(\frac{C}{C_A} \right)_i$ 为浆体中粒径 d_i 权重 ΔP_i (以小数计) 的相对体积浓度。

根据式(1)计算物料粒径 d_i 权重 ΔP_i (以小数计) 的浆体相对体积浓度 $\left(\frac{C}{C_A} \right)_i$

$$\left(\frac{C}{C_A} \right)_i = 10^{-1.8Z_i} \quad (2)$$

式中, $-Z_i$ 为悬浮指数^[2], 去掉负号的 Z_i 为沉降指数。

沉降指数为

$$Z_i = \frac{\omega_i}{k\beta V^*} \quad (3)$$

浆体中粒径 d_i 的沉速 ω_i 按表 1 刘德忠颗粒沉速公式表计算^[3]

$$V^* = V \sqrt{\frac{\lambda}{8}} \quad (4)$$

达西摩阻系数 λ 按恩菲刘德忠公式计算

[作者简介] 刘德忠(1937—), 辽宁西丰人, 教授级高级工程师, 主要从事浆体管道的试验研究和工程设计。

[引用格式] 刘德忠. 对增阻系数法计算浆体管道阻力的研究[J]. 中国矿山工程, 2023, 52(6): 17-21.

$$\lambda = \frac{1.33036}{\left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.7385}{\text{Re}^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (5)$$

$$\text{Re} = \frac{VD\rho}{\eta} \quad (6)$$

式中： ω_i —浆体中粒径 d_i 的沉速，按表 1 恩菲刘德忠粒径沉速公式计算； K —修正卡门常数， $K=0.36$ ； β —伊斯梅尔系数， $\beta=1$ ； V^* —摩阻流速，m/s； V —浆体输送设计流速，m/s； D —管道内径(m)； λ —达西摩阻系数； ε —管道内壁粗糙度，mm，直缝新钢管 $\varepsilon=0.0508\sim 0.0540$ mm； Re —全部浆体宾汉体雷诺数； η —全部浆体浆体宾汉体刚度系数， $\eta=f(C_V)$ 由试验得出 (Pa·s)； ρ —全部浆体浆体密度，kg/m³； λ_1 、 Re_1 、 η_1 、 ρ_1 是似均质部分对应的参数。

表 1 刘德忠颗粒沉速公式表

N_d 和 N_ω 无因次数	计算公式	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	$N_d = \frac{d}{d_L}$	
标准度量沉速 ω_L (m/s)	$\omega_L = \left[g\left(\frac{\rho_g - \rho_1}{\rho_1}\right)\frac{\eta_1}{\rho_1}\right]^{1/3}$	
颗粒沉速数 N_ω	$N_\omega = \frac{\omega}{\omega_L}$	
颗粒雷诺数 Re	$\text{Re} = N_d N_\omega$	把颗粒雷诺数分为粒径数和沉速数的积
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	$N_d = 0.05325 N_\omega^2 \left[1 + \left(1 + \frac{36.24}{0.213^{0.5} N_\omega^{-1.5}}\right)^{0.5} \right]^2$	$N_d = f(N_\omega)$
求颗粒粒径 d_L	$d = d_L N_d$	

浆体中似均质体积浓度 C_{1V} 为

$$C_{1V} = \sum C_V \Delta P_i \left(\frac{C}{C_A}\right)_i \quad (7)$$

式中： C_V —全部浆体浆体体积浓度； C_{1V} —似均质浆体体积浓度。

浆体中非均质浆体体积浓度 C_{2V} 为

$$C_{2V} = \sum C_V \Delta P_i \left(1 - \frac{C}{C_A}\right)_i \quad (8)$$

式中： C_{2V} —非均质体积浓度。

已知似均质体积浓度 C_{1V} ，似均质浆体密度 ρ_1 为

$$\rho_1 = \rho_g C_{1V} + (1 - C_{1V})\rho_s \quad (9)$$

式中： ρ_g —物料密度，kg/m³； ρ_s —水密度，kg/m³。

通过浆体管道流态判别计算得到 $\frac{C}{C_A}$ 和

$\left(\frac{C}{C_A}\right)_{0.95}$ ，具体流态判别如下：

(1) 在 $\frac{C}{C_A} \geq 0.8^{[1]}$ ， $\left(\frac{C}{C_A}\right)_{0.95} \geq 0.5^{[2]}$ ，浆体管道为似均质流态，此时浆体管道流态为似均质流态，该流态物料为细颗粒，浆体全部是载体，长距离浆体管道应采用似均质流态。

(2) 在 $0.1 \leq \frac{C}{C_A} \leq 0.8$ ，或 $\frac{C}{C_A} \geq 0.8$ ，且 $\left(\frac{C}{C_A}\right)_{0.95} \leq 0.5$ ，浆体管道为复合流态，此时浆体中似均质部分细颗粒来输送非均质部分粗颗粒，多数尾矿浆体管道为复合流态。

(3) 在 $\frac{C}{C_A} \leq 0.1$ 时，浆体管道为非均质流态，该流态物料为粗颗粒，载体为水。浆体管道输送比较少见。

通过流态判别计算可得出以下浆体相对体积浓度

$$C_{1V} + C_{2V} = C_V \quad (10)$$

$$\frac{C}{C_A} = \frac{C_{1V}}{C_{1V} + C_{2V}} = \frac{C_{1V}}{C_V} \quad (11)$$

通过对式(10)和式(11)的分析，提出动态粗细颗粒分界粒径概念和 C_{2V} 非均质浆体体积浓度增阻概念。

2 粗细颗粒分界粒径的定义

设物料粒径为 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，该粒径是细颗粒似均质粒径的最大粒径 d_{1m} 。

当物料粒径 $d_i \leq d_{1m}$ 时，所有细颗粒的 d_i 体积浓度 $(C_{1V})_i$ 构成似均质体积浓度 C_{1V} ，即：

$$C_{1V} = \sum (C_{1V})_i \quad (12)$$

当物料粒径 $d_i \geq d_{1m}$ 时，所有粗颗粒的 d_i 体积

浓度 $(C_{2V})_i$ 构成非均质体积浓度 C_{2V} ,即:

$$C_{2V} = \sum (C_{2V})_i \quad (13)$$

d_{1m} 是粗细颗粒的分界,也是似均质体积浓度和非均质体积浓度分界,定义粗细颗粒分界粒径有助于对非均质阻力计算研究的深化。

3 浆体管道阻力计算

浆体管道阻力 i_k 按下式计算

$$i_k = i_1 + \Delta i_2 \quad (14)$$

式中, i_1 为 C_{1V} 细颗粒似均质浆体管道阻力; Δi_2 为 C_{2V} 粗颗粒非均质浆体管道阻力; Δi_2 为是增阻的主因。

C_{1V} 细颗粒似均质浆体管道阻力 i_1 按下式计算

$$i_1 = \lambda_1 \frac{V^2 \rho_1}{2gD \rho_s} \quad (15)$$

4 增阻系数的定义及对增阻系数公式的推导

4.1 增阻系数的定义

C_V 全部浆体管道阻力 i_k 除以 C_{1V} 细颗粒似均质浆体管道阻力 i_1 ,定义为增阻系数,符号为 k_2 。

因为,式(14)变为

$$k_2 i_1 = i_1 + \Delta i_2 \quad (16)$$

将式(16)各项除以 i_1 得

$$k_2 = 1 + \frac{\Delta i_2}{i_1} \quad (17)$$

$$\Delta i_2 = i_1 (k_2 - 1) \quad (18)$$

式(17)说明增阻系数 k_2 是 Δi_2 的函数,式(18)说明 Δi_2 是 k_2 的函数,二者互为函关系。

对式(16)分析:当极细物料浆体所有颗粒 $d_i \leq d_{1m}$ 时, $\frac{\Delta i_2}{i_1} = 0, k_2 = 1$,如巴新瑞木镍钴矿,135 km 红

土矿浆体管道就是 $\frac{\Delta i_2}{i_1} = 0, k_2 = 1$ 。对中高浆体浓度

而言由于 $\Delta i_2 \ll i_1, \frac{\Delta i_2}{i_1} \rightarrow 0, k_2 \rightarrow 1$,由此得出增阻系数 $k_2 \geq 1$ 。

4.2 增阻系数公式的推导

根据 $i_1 = \lambda_1 \frac{V^2 \rho_1}{2gD \rho_s}$,当 $d_i \leq d_{1m}$ 时,在其基础上补充 $f_1(d_{1m}, \omega_{1m}, \rho_g, \rho_1)$ 条件函数,将 i_1 写为

$$i_1 = \lambda_1 \frac{V^2 \rho_1}{2gD \rho_s} f_1(d_{1m}, \omega_{1m}, \rho_g, \rho_1) \quad (19)$$

当 $d_i \geq d_{1m}$ 时,我们取该段粗颗粒加权平均粒径

d_{2p} 及沉速 ω_{2p} 导出 $f_2(d_{2p}, \omega_{2p}, \rho_g, \rho_1)$ 被比较条件函数, $k_2 i_1$ 为

$$k_2 i_1 = \lambda_1 \frac{V^2 \rho_1}{2gD \rho_s} f_2(d_{2p}, \omega_{2p}, \rho_g, \rho_1) \quad (20)$$

将式(20)除以式(19)得增阻系数函数式为

$$k_2 = \frac{f_2(d_{2p}, \omega_{2p}, \rho_g, \rho_1)}{f_1(d_{1m}, \omega_{1m}, \rho_g, \rho_1)} \quad (21)$$

式中, ω_{1m} 为沉速; d_{2p} 为粗颗粒加权平均粒径; ω_{2p} 为粗颗粒加权平均沉速。

式(21)主要参数是粒径和沉速,对粒径和沉速受力分析如下:

颗粒球体在浆体中沉降的有效重力为 F_1 为

$$F_1 = \frac{\pi}{6} d^3 g (\rho_g - \rho_1) \quad (22)$$

式中, ρ_g 为颗粒密度; d 为球体直径; $\frac{\pi}{6} d^3$ 为球体体积; ρ_1 为浆体密度。

牛顿绕流阻力 F_2 为

$$F_2 = \frac{C_D \pi}{4} d^2 \frac{\rho_1 \omega^2}{2} \quad (23)$$

式中, ω 为颗粒沉速; C_D 为绕流阻力系数; $\frac{\pi}{4} d^2$ 为垂直沉速方向的球体颗粒面积为。

将式(23)除以式(22)得

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{\omega^2}{\frac{4}{3C_D} \left(\frac{\rho_g}{\rho_1} - 1 \right) gd} \quad (24)$$

对式(24)两边开方并进行量纲分析得 Fr

$$Fr = \dim \frac{\sqrt{F_2}}{\sqrt{F_1}} = \frac{\omega}{\sqrt{\left(\frac{\rho_g}{\rho_1} - 1 \right) gd}} \quad (25)$$

式中, Fr 为颗粒 d 与沉速 ω 的佛罗德数。

已知分界粒径 d_{1m} 和沉速 ω_{1m} ,得出分界粒径佛罗德数为

$$Fr_1 = \frac{\omega_{1m}}{\sqrt{gd_{1m} \left(\frac{\rho_g}{\rho_1} - 1 \right)}} \quad (26)$$

已知粗颗粒加权平均粒径 d_{2p} 和粗颗粒加权平均沉速 ω_{2p} ,得出粗颗粒加权平均粒径佛罗德数为

$$Fr_2 = \frac{\omega_{2p}}{\sqrt{gd_{2p} \left(\frac{\rho_g}{\rho_1} - 1 \right)}} \quad (27)$$

对于高中浓度浆体管道,增阻系数 k_2 为

$$k_2 = \frac{f_2(Fr_2)}{f_1(Fr_1)} = \left(\frac{Fr_2}{Fr_1}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (28)$$

式中,指数 n 为

$$n = 0.88 \times \ln \left[\frac{Fr_2}{Fr_1} \right] + 5.5 \quad (29)$$

已知增阻系数,浆体管道阻力 i_k 为

$$i_k = i_1 k_2 = \lambda \frac{V^2 \rho_k}{2gD \rho_s} \left(\frac{Fr_2}{Fr_1}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (30)$$

5 对增阻系数法浆体管道阻力计算公式的验证

采用增阻系数法计算浆体管道阻力公式对贵州瓷福磷精矿管道、山西太原尖山铁精矿管道、云南昆明大红山铁精矿管道、内蒙包头白云鄂博铁精矿管道、四川攀枝花市新白马铁精矿管道、巴布亚新几内亚红土矿管道进行验证^[4-5],具体管道阻力数据详见表2。

表2 对增阻系数法计算六条长距离管道阻力的验表

序号	参数名称	符号及单位	瓷福磷管道	尖山铁管道	大红山铁管道	白云鄂博铁管道	新白马铁管道	巴新红土矿管道
1	年运量	Ga(万 t/a)	200	200	230	550	280	321
2	年小时数	t _h (h/a)	7 920	7 992	7 920	7 992	7 992	7 500
3	小时运量	Gh(t/h)	252.5	250.3	290.4	688.2	350.4	428.0
4	物料密度	ρ _g (kg/m ³)	3 000	4 760	4 950	4 920	4 650	3 280
5	浆体重量浓度	C _w	0.60	0.65	0.65	0.65	0.65	0.18
6	浆体体积浓度	C _v	0.333	0.281	0.273	0.274	0.285	0.062 7
7	浆体密度	ρ _v (t/m ³)	1 667	2 055	2 078	2 074	2 042	1 143
8	浆体流量	Q(m ³ /h)	252.5	187.3	215.0	510.4	264.0	2 080.3
9	钢管内径	D(mm)	201.2	211.8	224.2	330.2	254.0	610.0
10	浆体流速	V(m/s)	2.21	1.48	1.51	1.66	1.45	1.98
11	相对体浓	C/C _A	0.95	0.950	0.972	0.959	0.979	0.998
12	d ₉₅ 相对体浓	(C/C _A) _{dm}	0.774	0.856	0.927	0.881	0.941	0.996
13	似均质体浓	C _{1v}	0.315 8	0.266 0	0.263 2	0.262 7	0.279 3	0.062 7
14	非均质体浓	C _{2v}	0.016 5	0.013 9	0.007 7	0.011 3	0.006 1	0.000 1
15	C _{1v} 浆体密度	ρ ₁ (t/m ³)	1 632	2 000	2 040	2 030	2 019	1 143
16	C _{1v} 刚度系数	η ₁ (Pa·s)	0.008 77	0.006 20	0.006 04	0.008 75	0.008 68	0.006 14
17	C _{1v} 雷诺数	Re	82 551	100 849	114 513	126 805	85 511	224 523
18	C _{1v} 达西系数	λ	0.019 9	0.019 2	0.018 8	0.018 1	0.019 6	0.016 0
19	C _{1v} 浆体阻力	i ₁ (H ₂ O m/m)	0.040 2	0.020 2	0.020 0	0.015 5	0.016 6	0.006 0
20	加权平均粒径	d _{2p} (μm)	173.8	94.2	58.4	75.2	75.2	11.7
21	粗细分界粒径	d _{1m} (μm)	146.2	63.5	52.4	64.8	66.2	11.7
22	加权粒径沉速	ω _{2p} (m/s)	2.51E-03	2.11E-03	9.12E-04	1.02E-03	9.55E-04	8.42E-05
23	分界粒径沉速	ω _{1m} (m/s)	1.80E-03	9.83E-04	7.36E-04	7.61E-04	7.28E-04	8.42E-05
24	d _{2p} 佛罗德数	Fr ₂	0.066 4	0.059 2	0.031 9	0.031 4	0.030 8	0.005 8
25	d _{1m} 佛罗德数	Fr ₁	0.051 9	0.033 5	0.027 2	0.025 3	0.025 0	0.005 8
26	佛罗德数比	Fr ₂ /Fr ₁	1.278 7	1.764 8	1.172 2	1.241 3	1.232 1	1.000 0
27	指数	n	5.72	6.0	5.64	5.69	5.68	5.5
28	增阻系数	k ₂	1.044	1.099	1.029	1.039	1.037	1.000
29	浆体阻力	i _{1m} (H ₂ O m/m)	0.041 9	0.022 2	0.020 5	0.016 1	0.017 2	0.006 0
30	管道长度	L(m)	44 410	102 147	171 000	138 000	96 000	135 000
31	首端高程	H ₁ (m)	1 250	1 351	670	1 624	1 350	680
32	末端高程	H ₂ (m)	820	825	1 895	1 079	1 514	8
33	剩余水头	h	50	50	50	50	50	5
34	安全系数	k	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
35	扬程	H(m)	1 592	1 582	6 841	1 602	2 342	206
36	泵站数	l	1	1	3	1	1	1
37	刘计算泵压力	P _刘 (MPa)	15.3	16.5	23.6	17.1	23.9	1.27
38	最大操作压力	P _{操作} (MPa)	14.5	14.7	24.5	15.3	23.4	1.27
39	38/37	P _刘 /P _{操作}	1.056	1.124	0.962	1.116	1.020	1.00

从表2可以看出,采用增阻系数法计算六条长距离管道阻力见序号29,计算压力见序号37,最大操作压力见序号38,38/37分别是1.056、1.124、0.962。1.116、1.020、1.000,平均值为1.0464,最大为1.1243,最小值为0.962,计算结果相近。

6 结论

本文依据浆体相对体积浓度 $\frac{C}{C_A} = \frac{C_{IV}}{C_V}$,提出 C_{IV}

粗细颗粒分界粒径概念,在此基础上,提出 C_{2V} 非均质浆体体积浓度增阻概念,对分界粒径概念和增阻系数概念进行定义,以分界粒径作标准,筛选出有增阻作用的粗颗粒。以似均质阻力 i_1 作标准,定义了增阻系数概念,简化了浆体管道阻力研究途径。该两个定义两个标准抓住了浆体管道阻力研究的主要矛盾。通过对颗粒沉降的受力分析,得出细颗粒似均质分界粒径及粒径沉速和粗颗粒非均质加权平均

径及粒径沉速的佛罗德数,推导出增阻系数法计算浆体管道阻力公式,该公式通过对我国六条长距离工程实例的验证,计算结果与实际工程最大操作压力接近。

[参考文献]

- [1] 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.
- [2] 王绍周. 粒状物料的浆体管道输送[M]. 北京:海洋出版社,1998.
- [3] 中国有色金属工业协会. 尾矿设施设计规范:GB50863—2013[S]. 北京:中国计划出版社,2013.
- [4] 付新民,封志强,郝艳霞. 基于CAESAR II分析浆体泵出口在环境温度下的管道布置[J]. 有色设备,2021(1):28-31.
- [5] 梁新民,王怀勇,江国建,等. 高浓度全尾砂充填料浆流变特性及管路输送沿程阻力损失研究[J]. 中国矿山工程,2022,51(3):47-53.
- (上接第16页)
- [4] 崔旭阳,胡南燕,叶义成,等. 降雨影响下的动态加权贝叶斯尾矿库溃坝风险评估[J]. 中国矿业,2022,31(6):93-100.
- [5] 胡航,彭磊,王光进,等. 强降雨洪水条件下尾矿库溃坝灾害影响[J]. 有色金属工程,2022,12(7):132-138+147.
- [6] 吕松峰,张慧颖,王新华,等. 基于MatDEM的三维实际地形尾矿库溃坝数值模拟[J]. 铀矿冶,2022,41(2):155-163.
- [7] 付搏涛,李钢,张红,等. 基于GDEM-PDyna的尾矿库溃坝三维数值模拟分析研究[J]. 中国安全生产科学技术,2023,19(2):71-77.
- [8] 张家荣,刘建林. 中国尾矿库溃坝与泄露事故统计及成因分析[J]. 中国铝业,2019,43(4):10-14.
- [9] 刘斯宇. 米易县地表水环境质量现状评价与分析[J]. 新型工业化,2021,11(5):52-53.
- [10] 阮德修,胡建华,周科平,等. 基于FLO^{2D}与3DMine耦合的尾矿库溃坝灾害模拟[J]. 中国安全科学学报,2012,22(8):150-156.
- [11] 王立娟. 基于多源数据耦合的尾矿库地灾危险源监测与风险评估[D]. 成都:成都理工大学,2019.
- [12] 袁克阔,王义杰,徐拴海,等. 强触变性水泥基浆液研发及基本性能测定[J]. 煤炭科学技术,2018,46(7):75-80.
- [13] 许远瑶,乔永安. 溃坝水流计算的几个问题[J]. 人民黄河,1983(6):30-33.
- [14] 务境飞. 尾矿堆积坝溃口演变规律及溃坝模拟[D]. 南昌:南昌大学,2020.
- [15] 李炜. 水利计算手册(第二版)[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.
- [16] 廖威林,周小文. 尾矿砂流变特性及其对溃坝尾砂下泄影响研究[J]. 地下空间与工程学报,2015,11(S1):282-287.
- [17] 周彩霞,李世男. 复杂地基条件下尾矿坝的稳定性分析[J]. 有色冶金节能,2019,35(2):45-49.
- [18] 宋会彬,郑学鑫,刘金勇. 中线式尾矿筑坝法关键技术[J]. 有色设备,2022,36(4):21-25.