

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.01.004

## 基于弹塑性理论的溃坝尾矿砂下泄冲击力研究\*

蔡 红, 吴帅峰, 魏迎奇, 严 俊, 孙黎明

(中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

**摘要:** 为确定溃坝尾矿砂下泄冲击力,以弹塑性力学为基础,从微粒弹性碰撞入手,建立单尾矿砂微粒的冲击模型,并扩展至团聚尾矿砂的冲击力求解模型,推导出均匀级配、固液耦合的冲击力计算公式。结果表明:单尾矿砂微粒可通过弹性力学理论描述碰撞过程、求解碰撞力和碰撞时间;尾矿砂团聚微粒的碰撞模型的构建应考虑液相的粘聚力、颗粒间的接触和局部力系向空间转化三个方面;冲击速度、平均粒径和含沙量对冲击力的影响均呈幂函数型增加,干密度呈线性增加,相同边界条件下,冲击速度的改变对冲击力的影响最大,平均粒径和含沙量次之,干密度影响最小,该结果代表了尾矿砂所特有的细颗粒、级配均匀所展现的特征,为尾矿砂下泄冲击计算提供理论依据。

**关键词:** 尾矿砂;下泄;冲击力;弹塑性力学

**中图分类号:** TV649    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-2132(2020)01-0029-06

## Study on Impact of Dam Break Tailings Sand based on Elastomer Collision Theory

CAI Hong, WU Shuifeng, WEI Yingqi, YAN Jun, SUN Liming

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** In order to determine the impact force of tailing sands advancing after dam-break, based on elastoplastic mechanics and starting from the elastic collision of particles, the impact model of single tailings particle is established and extended to the impact force solving model of aggregate tailing sands, in addition, the calculation formula for the impact force of uniformly-graded and solid-liquid coupling is derived. The results show that single tailings particle can describe the collision process, solve the collision force and collision time by means of elastic mechanics theory; The cohesion of liquid, the contact between particles and the transformation of local force system into space should be considered in the construction of collision model of tailings agglomerated particles; The influence of impact velocity, average particle size and sand content on impact force increases in power function, but that of dry density increases linearly, and under the same boundary conditions, the change of impact velocity has the greatest impact on impact force, average particle size and sand content are followed, and then finally the dry density, this reveals the characteristics displayed of fine particles and uniformly-graded that peculiar to tailing sands. And it provides a theoretical basis for the impact calculation of tailing sands advancing.

**Keywords:** mine tailing; draining; impact force; elastoplastic mechanics

\* 收稿日期:2018-11-30;修回日期:2019-02-15

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0804607)资助

作者简介:蔡红(1968-),女,教授级高工。主要从事土石坝、尾矿坝安全等方面的研究。Email: caihong@iwahr.com

通讯作者:吴帅峰(1988-),男,工程师,博士后。主要从事冲击动力学与大坝岩土工程等方面的研究。

Email: wusf@iwahr.com

# 引言

尾矿堆积坝是利用尾矿库中贮存的尾砂按照设计要求在初期坝以上逐级堆积而成,当尾矿库遭遇超标暴雨、库内排水系统失灵或地震等极端条件时,极易产生失稳破坏<sup>[1]</sup>。截至2017年,统计我国有尾矿库1.2万余座,绝大部分为上游式筑坝法形成的尾矿库<sup>[2]</sup>。国内外一些学者<sup>[3-4]</sup>曾对世界范围内的尾矿库进行调查和统计,发现尾矿库比水库发生溃坝的概率高出十倍以上。

溃坝尾矿砂的下泄冲击作用由浆体冲击力构成,是受灾体结构验算,包括变形、位移、抗滑、抗倾覆等计算的力学依据<sup>[5]</sup>。目前为止,尾矿砂下泄运动机理还有待进一步研究,冲击力值的准确计算亟待推进。

国内外学者从不同的角度出发,在尾矿砂冲击力方面进行了理论分析与实验研究尝试工作,初步得到了尾矿砂下泄运动和作用力规律。尹光志<sup>[6-7]</sup>采用相似模型试验方法,对尾矿坝溃坝后泥沙流动的过程及形成的冲击力、泥深及速度的变化情况进行研究,得出坝高是影响溃后泥沙流冲击的核心因素,测得冲击力时程曲线,并将尾矿砂的运动分为流速加速降低阶段、稳定阶段和稳定降低阶段。王永强等<sup>[8]</sup>采用正交试验的方法,以尾矿的坝高、库容、主沟坡降和弯曲系数为影响因素,探讨溃坝尾矿砂对构筑物的冲击影响,得出影响程度由大到小为坝高、冲出砂量、弯曲系数和主沟坡降。陈洪凯等<sup>[9]</sup>通过模型实验,分析得到了不同固相比下的泥砂流冲击特性,同时对实验信号采用小波去噪处理,揭示了泥砂流冲击脉动荷载概率分布特性。王强等<sup>[10]</sup>以Thornton理想弹塑性接触模型为基础,根据能量守恒定律,推导泥砂流冲击力的计算公式。并验证该理论下的计算结果较弹性冲击理论所确定的冲击力更符合实际情况。A. Armanini等<sup>[11]</sup>基于动量守恒分析研究了泥石流冲击力,提出了相应的冲击力计算公式。

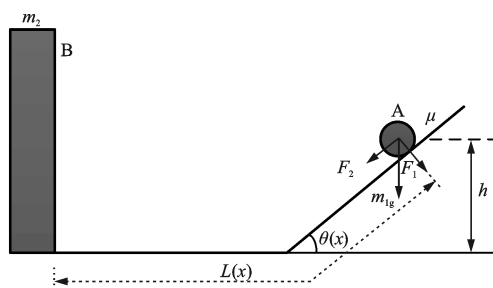
但尾矿砂具有颗粒级配均匀、重大、粒径小等特性,其下泄冲击作用机理与泥沙、泥石流、水流的冲击均不同,未针对溃坝尾矿砂下泄冲击力有系统的研究和理论认识。由此,本文以弹塑性力学为基础,从单尾矿砂颗粒的弹性碰撞冲击入手,扩展至团聚尾矿砂的冲击力求解,并对尾矿砂物理参数对冲击影响程度进行分析,为尾矿砂下泄冲击计算提供理论依据。

# 1 尾矿砂单微粒冲击模型

## 1.1 单微粒碰撞模型建立

典型尾矿砂为散粒体、微颗粒,相对于构筑物其体积可视为无限小。由此将单质点碰撞问题转化为无粘性微小颗粒对无限大平板的碰撞模型。

碰撞模型需考虑微粒的质量、下泄坡度、下泄距离、沿程摩擦等因素,在此基础上解析两弹性体的相互撞击问题,求解出撞击力、撞击时间。将尾矿砂简化为均匀球体A,质量为 $m_1$ ;构筑物简化为无限大板B,质量为 $m_2$ ;建立如图1所示的尾矿砂单微粒碰撞计算模型。



注:  $m_1$ 为球体A的质量,  $m_2$ 为平板B的质量,  $\mu$ 为摩擦系数,  $F_1$ 、 $F_2$ 为球体重力分量,  $h$ 为球体高度,  $\theta(x)$ 为坡度函数,  $L(x)$ 为长度函数

图1 单微粒碰撞计算模型

Fig.1 The single particle collision calculation model

根据尾矿砂微粒实际情况,假定 $m_2$ 无限大而 $m_1$ 无限小,求碰撞后球体的速度仅与路径长度函数 $L(x)$ 、坡度函数 $\theta(x)$ 、沿程摩擦系数 $\mu(x)$ 相关。由牛顿第二定律计算微粒A在自由下滑作用下落至物体B时的速度为:

$$V_{f_0} = \sqrt{2g \int_0^L [L(x) \sin(\theta(x)) - L(x) \cos(\theta(x)) \mu(x)] dx} \quad (1)$$

式中, $L(x)$ 为A物体路径函数; $\theta(x)$ 为沿程路径夹角函数; $\mu(x)$ 为沿程摩擦系数。

此时转化为求解两弹性体的相互撞击问题,求解出撞击力和撞击时间。

## 1.2 单微粒碰撞过程解析

碰撞发生后,形成以O点为中心,发生挤压力为F的作用,并在此作用下发生局部变形,形成一个圆形接触面。此时,接触面半径远小于球A的半径R,

采用弹性半无限体结果讨论局部变形,如图2所示。

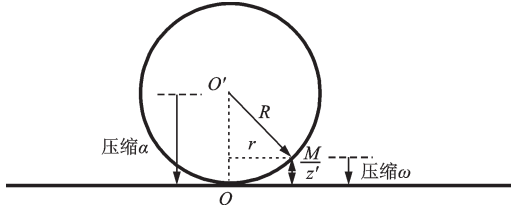


图2 碰撞接触局部变形

Fig.2 Local deformation of impact contact

设 $\alpha$ 为压缩后圆心 $O'$ 与板接触的压缩距离,碰撞过程无相对滑动,此时点 $M'$ 与板接近距离也为 $\alpha$ 。

设 $\omega$ 为 $M'$ 沿 $Z'$ 方向的位移,于是 $M'$ 与板距离减少为: $\alpha - \omega$ 。当点 $M'$ 压至板上时,有:

$$\omega = \alpha - \frac{r^2}{2R} \quad (2)$$

式中, $R$ 为微粒半径; $r$ 为压缩后弹性圆半径; $\alpha$ 为压缩距离。

根据物理特性,碰撞接触面为一个圆面,以此圆面为求解压力的图形,如图3所示。

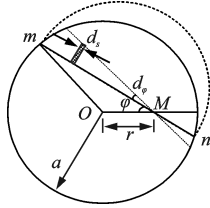


图3 接触压缩圆求解面

Fig.3 Contact compression circle of slution surface

$M$ 点为 $M'$ 接触完成时, $M'$ 在板上点的位置,按弹性力学半空间变力垂直压力 $q$ 的解答,该位移为:

$$\omega = \left( \frac{1 - \partial\mu_1^2}{\pi\partial E_1} + \frac{1 - \partial\mu_2^2}{\pi\partial E_2} \right) \iint q d_s d_\varphi \quad (3)$$

式中, $\partial\mu_1, \partial\mu_2$ 为微粒、板的泊松比; $\partial E_1, \partial E_2$ 为微粒、板的弹性模量; $q$ 为弹性力学半空间变力垂直压力; $d_s$ 为弦 $mn$ 上任一点变形后引起的长度微增量; $d_\varphi$ 为压缩使弦 $mn$ 位置改变所产生的角位移微增量。

令  $k_1 = (1 - \partial\mu_1^2) / \pi\partial E_1$ ,  $k_2 = (1 - \partial\mu_2^2) / \pi\partial E_2$ ,  $\beta = r^2 / 2R$ ;并将式(2)代入式(3),得:

$$\alpha - \beta r^2 = (k_1 + k_2) \iint q d_s d_\varphi \quad (4)$$

式中, $q$ 为压力分布函数,为碰撞过程求解目标函数。

为满足式(4),由弹性力学可知,压力 $\partial q$ 可用过此点的弦为半圆的高度代表压力大小。令 $\partial q_0$ 表示

接触圆圆心处 $O$ 的压力,则:

$$\lambda = \frac{\partial q_0}{a} \quad (5)$$

式中, $\lambda$ 为常数因子压力比例尺。

此时,圆内任一点压力等于过弦 $mn$ 的半球面高度在该点的高度 $h$ 和 $k$ 的乘积,则:

$$\int q d_s = \frac{\partial q_0}{a} \int h d_s = \frac{\partial q_0}{a} \cdot A \quad (6)$$

式中, $A$ 为以弦为半圆面积,即  $A = \frac{\pi}{2} [a^2 - (r \cdot \sin\varphi)^2]$ 。

将式(6)代入式(4)可得:

$$(k_1 + k_2) \frac{\pi^2 \partial q_0}{4a} (2a^2 - r^2) = \alpha - \beta r^2 \quad (7)$$

为使式(7)成立,则需:

$$\left. \begin{aligned} (k_1 + k_2) \frac{\pi^2 \partial q_0 a}{2} &= \alpha \\ (k_1 + k_2) \frac{\pi^2 \partial q_0}{4a} &= \beta = \frac{r^2}{2R} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

接触面上板所承受的总压力为:

$$\partial F = \iiint_{\Omega} q d_{\Omega} \quad (9)$$

式中, $\Omega$ 为变形球体的体积,则:

$$\partial q_0 = \frac{3\partial F}{2\pi a^2} \quad (10)$$

式(10)代入式(8)求得碰撞压缩圆半径为:

$$a = \left[ \frac{3}{4} R \left( \frac{1 - \partial\mu_1^2}{\partial E_1} + \frac{1 - \partial\mu_2^2}{\partial E_2} \right) F \right]^{1/3} \quad (11)$$

碰撞接触面分布压力为:

$$\partial q_0 = \left[ \frac{6}{\pi^3} \frac{1}{R_0^2} \frac{\partial F}{\left( \frac{1 - \partial\mu_1^2}{\partial E_1} + \frac{1 - \partial\mu_2^2}{\partial E_2} \right)} \right]^{1/3} \quad (12)$$

碰撞接触面最大压缩量为:

$$\alpha = \left[ \frac{9}{16R} \left( \frac{1 - \partial\mu_1^2}{\partial E_1} + \frac{1 - \partial\mu_2^2}{\partial E_2} \right)^2 \partial F^2 \right]^{1/3} \quad (13)$$

式(11)~(13)中含有共同的未知数碰撞力 $\partial F$ ,对此求解碰撞力即可完成解析。

### 1.3 碰撞力求解过程

令  $k = k_1 + k_2$ , 将式(14)改写为:  $\alpha = (9\partial F^2 k^2 / 16R)^{1/3}$ , 可得:

$$\partial F = \frac{4\sqrt{R}}{3(k_1 + k_2)} \alpha^3 = n \cdot \alpha^3 \quad (15)$$

式中,  $n = \frac{4\sqrt{R}}{3(k_1 + k_2)}$

由碰撞瞬间力与加速度关系求得:

$$a_r = \frac{\partial v_r}{\partial t} = \frac{\partial^2 \alpha}{\partial t^2} = \frac{\partial v_1}{\partial t} + \frac{\partial v_2}{\partial t} = -\partial F \left( \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \right) \quad (16)$$

式中,  $\partial v_r$  为碰撞瞬间速度的偏微分量。

式(15)代入式(16), 得:

$$\frac{\partial \alpha^2}{\partial t^2} = -\frac{n \cdot \alpha^{\frac{3}{2}}}{U} \quad (17)$$

式中,  $U = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$

式(17)两端乘以  $\partial \alpha$  后积分, 得:

$$\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial \alpha}{\partial t} \right)^2 - v_{r0}^2 \right] = -\frac{2n \cdot \alpha^{\frac{5}{2}}}{5U} \quad (18)$$

式中,  $v_{r0}$  为碰撞开始的瞬间的相对速度。

压缩结束瞬间时, 速度为 0, 即  $\frac{\partial \alpha}{\partial t} = 0$ , 此时压缩量达到最大, 为:

$$\partial \alpha_{\max} = \left( \frac{5U}{4n} \cdot v_{r0}^2 \right)^{\frac{2}{5}} \quad (19)$$

式中,  $v_{r0}$  为碰撞接触前微粒的速度。

由式(1)、(19)代入式(13)可求得最大碰撞力, 平均碰撞力和碰撞过程时间如下:

$$\left. \begin{aligned} \partial F_{\max} &= 2.265 \left( \frac{\sqrt{R}}{3k} \right)^{\frac{2}{5}} \cdot m_1 \cdot v_{r0}^{-\frac{6}{5}} \\ \partial \bar{F} &= 1.231 \left( \frac{\sqrt{R}}{3k} \right)^{\frac{2}{5}} \cdot m_1 \cdot v_{r0}^{-\frac{6}{5}} \\ \partial \tau &= 2.94 \left( \frac{5m_1}{4n} \right)^{\frac{2}{5}} \cdot v_{r0}^{-\frac{1}{5}} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

式中,  $k = k_1 + k_2$ ,  $k_1 = 1 - \partial \mu_1^2 / \pi \partial E_1$ ,  $k_2 = 1 - \partial \mu_2^2 / \pi \partial E_2$ ,

$\beta = r^2 / 2R$ ,  $n = \frac{4\sqrt{R}}{3(k_1 + k_2)}$ ,  $\partial \mu_1$ 、 $\partial \mu_2$  为微粒、板的泊松比,  $\partial E_1$ 、 $\partial E_2$  为微粒、板的弹性模量,  $v_{r0}$  为碰撞接触前微粒的速度,  $m_1$  为微粒质量。

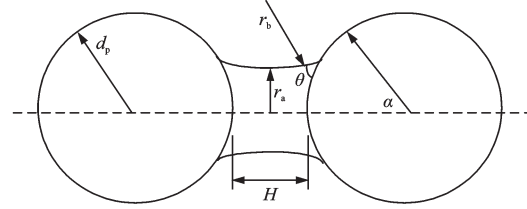
## 2 尾矿砂团聚微粒冲击模型

### 2.1 湿颗粒间黏聚作用力

溃决尾矿砂通常伴随水的掺和作用, 呈固液耦合的状态, 液相的存在使颗粒间除了重力、接触力外, 还有液桥力的作用, 形成尾矿砂颗粒团聚的效应, 并呈现一定黏性。黏性力使颗粒间不易分离,

形成的团聚效应在冲击过程中较松散颗粒产生更大的破坏力。由此, 从微观建立湿颗粒间的液桥力再过渡至宏观的含沙量、密度等对冲击力的影响。此处的尾矿砂状态为粘稠状, 宏观表现有水分的存在。

液桥力主要是由气-液相界面的表面张力和液桥内外的压力差引起的, 粒子相对运动时受液桥力的黏滞作用, 液桥力产生模型如图 4 所示。



注:  $d_p$  为相邻颗粒间的半径,  $r_b$  为外部液桥的边界距离,  $\theta$  为液桥与颗粒夹角,  $r_s$  为液桥中心半厚,  $H$  为液桥净宽度

图 4 微粒之间的液桥作用

Fig.4 Liquid bridge between particles

将静态液体桥力视为无量纲液桥体积和颗粒距离的函数, 可由下式计算<sup>[12]</sup>:

$$F_s = 2\pi r_a \eta + \Delta P \pi r_a^2 \quad (21)$$

式中,  $r_a$  为液桥的颈半径;  $\eta$  为液体表面张力;  $\Delta P$  为液桥内外压差。

由 Young-Laplace 公式可得:

$$\Delta P = \eta \left( \frac{1}{r_b} - \frac{1}{r_a} \right) \quad (22)$$

式中,  $r_b$  为液桥表面的曲率半径。

分析液桥力与液桥体积  $V$  及颗粒间分离距离  $H$  的关系, 在  $H = 0$ ,  $\theta = 0$  时, 公式(21)改写为:

$$F_s(V) = 2\pi \eta d_p (1 + \sin^2 \alpha) \quad (23)$$

Tomas 得到液桥润湿角与颗粒的液含量关系:

$$\sin^2 \alpha = \frac{4.125}{\pi} \sqrt{\varphi \varepsilon} \quad (24)$$

进而得到液桥力的计算公式:

$$F_s(V) = 2\pi \eta d_p \left( 1 + \frac{4.125}{\pi} \sqrt{\varphi \varepsilon} \right) \quad (25)$$

式中,  $\varphi$  为液体体积分率, 即液桥体积与颗粒体积的比值;  $\varepsilon$  为动床层空隙率, 取 0.5。

### 2.2 团聚颗粒间的接触作用力

基于弹性力学和线黏弹性模型<sup>[13]</sup>对尾矿砂微粒之间的接触力和叠合量进行分析和求解。微粒间的法向和切向接触力使用线性黏弹性力学模型

对球颗粒之间的叠合量和接触力进行分析和求解。其中,法向接触力为:

$$F_n = k_n h_{ij} + c_n v_n \quad (26)$$

式中,  $k_n$  为接触的法向刚度系数;  $h_{ij}$  为接触弹性压缩量;  $c_n$  为法向黏性阻尼系数;  $v_n$  为法向相对速度。各参数计算方法为:由赫兹弹性接触理论得到  $k_n$  取值,由弹性力学计算得到  $h_{ij}$ 。

$$\left. \begin{aligned} k_n &= \frac{4}{3} \cdot \frac{E_1 \cdot E_2}{E_2 \cdot (1 - \mu_1^2)(1 - \mu_2^2)} \sqrt{\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}} \\ h_{ij} &= \left( \frac{15}{16} \pi^2 k \rho v_0^2 \right)^{2/5} D \\ C_n &= -\frac{2 \ln v \sqrt{m k_n}}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2 v}} \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

式中,  $E_1, E_2$  为微粒弹模;  $R_1, R_2$  为微粒接触面曲率;  $D$  为微粒粒径;  $\bar{m}$  为平均质量;  $v$  为碰撞恢复系数。

切向接触力采用增项形式表达:

$$F_s^{(t)} = F_{se}^{(t-\Delta t)} + k_s v_s \Delta t + c_s v_s \quad (28)$$

式中,  $F_{se}^{(t-\Delta t)}$  为  $t - \Delta t$  时刻两接触体间切向弹性力;  $k_s$  为接触的切向刚度系数,  $k_s = 1/(2(1 + \mu))$ ;  $c_s$  为切向黏性阻尼系数,取值范围为  $0.67 \sim 1^{[13]}$ ;  $v_s$  为接触处的切向相对速度。

### 2.3 局部力坐标向空间坐标的转化

上述颗粒间的液桥力和法、切向作用力为局部坐标系下的接触力,在求解宏观整体作用力时需将局部坐标系下的力通过矩阵转换至全局坐标系下,局部坐标的建立规则为,以任意模型  $O$  的球心为原点,  $O$  指向接触点为  $x$  轴,过  $O$  点与全局坐标系  $X-Y$  平面平行的直线位  $y$  轴,  $z$  轴由右手螺旋法则确定,局部坐标系与全局坐标系的关系如图5所示。

全局坐标系各作用力物理量的对应关系:

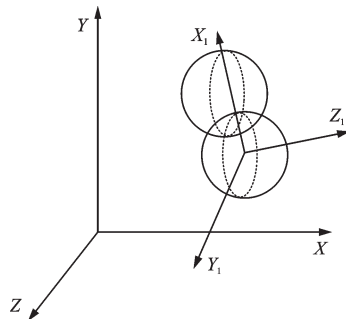


图5 局部与全局坐标系转换关系

Fig.5 Conversion relations between local and world coordinates

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} l_x & m_y & n_z \\ -m_y/\sqrt{l_x^2+m_y^2} & -l_x/\sqrt{l_x^2+m_y^2} & 0 \\ -l_x n_z/\sqrt{l_x^2+m_y^2} & -m_y n_z/\sqrt{l_x^2+m_y^2} & \sqrt{l_x^2+m_y^2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (29)$$

式中,  $l_x, m_y, n_z$  为  $X_1$  轴在全局坐标系下的方向余弦。

$$l_{ic} = \sqrt{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2 + (z_c - z_i)^2}, \quad l_x = (x_c - x_i)/l_{ic}, m_y = (y_c - y_i)/l_{ic}, n_z = (z_c - z_i)/l_{ic}.$$

在全局坐标系下,团聚效应的群集尾矿砂冲击力计算:

$$\left. \begin{aligned} F_{\max} &= \iiint_{\Omega} \partial F_{\max}(V, n) d\Omega \\ \bar{F} &= \iiint_{\Omega} \partial \bar{F}(V, n) d\Omega \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

求得:

$$\left. \begin{aligned} F_{\max} &= \frac{\sqrt[3]{7}}{24} \pi^2 \rho \Omega^3 D^{-1/5} v_0^{11/5} k^{-2/5} \eta \sqrt{\varphi \varepsilon} \\ \bar{F} &= \frac{\sqrt[3]{2}}{29} \pi^2 \rho \Omega^3 D^{-1/5} v_0^{11/5} k^{-2/5} \eta \sqrt{\varphi \varepsilon} \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

式中,  $\Omega$  为碰撞接触面积;  $\varphi$  表示为含砂率;  $\eta$  为液体表面张力;其余符号同前所述。

### 3 参数影响研究

从式(31)中可得,最大冲击力与尾矿砂密度、粒径、冲击速度、含砂率直接相关,为揭示各参数对冲击力影响程度,在相同作用面积和相同尾矿砂体积量情况下,以该4类参数为交叉变量计算冲击力。计算参数见表1,各参数的改变对冲击力的影响计

表1 冲击力计算参数取值

Table 1 The Value of Impact Force Calculating Parameters

干密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	平均粒径/ mm	冲击速度/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	含沙量/%
1.8	0.02	4	50
1.9	0.04	8	55
2	0.06	12	60
2.1	0.08	16	65
2.2	0.10	20	70
2.3	0.12	24	75
2.4	0.14	28	80
2.5	0.16	32	85
2.6	0.18	36	90
2.7	0.20	40	95

算结果如图6所示。

各参数的改变对冲击力的影响计算结果如图6所示。

由图6可得,冲击速度、平均粒径和含沙量对冲击力的影响均呈幂函数型增加,干密度呈线性增加;相同边界条件下,冲击速度的改变对

冲击力的影响最大,平均粒径和含沙量次之,干密度影响最小。由此计算而得的影响程度次序与泥石流有显著差别,泥石流冲击力计算中,首要考虑大块石含量及其粒径<sup>[14]</sup>,此计算结果代表了尾矿砂所特有的细颗粒、级配均匀所展现的特征。

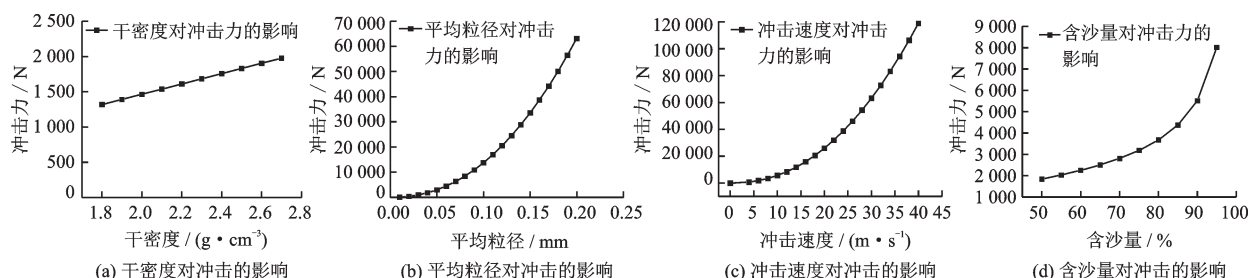


图6 参数的改变对冲击力的影响

Fig.6 The influence of parameter change on impact force

## 4 结 论

以弹塑性力学为基础,从单尾矿砂颗粒的弹性碰撞冲击入手,扩展至团聚尾矿砂的冲击力求解,并对尾矿砂物理参数对冲击影响程度进行了分析,得出以下结论:

(1)单尾矿砂微粒可通过弹性力学理论描述碰撞过程、求解碰撞力和碰撞时间。

(2)尾矿砂团聚微粒的碰撞模型的构建应考虑液相的黏聚力、颗粒间的接触和局部力系向空间转化三个层面。

(3)尾矿砂冲击力模型所计算的结果表明,相同边界条件下,冲击速度的改变对冲击力的影响最大,平均粒径和含沙量次之,干密度影响最小,该结果代表了尾矿砂所特有的细颗粒、级配均匀所展现的特征。

## 参考文献:

[1] 张力霆.尾矿库溃坝研究综述[J].水利学报,2013,44(5):594-600.  
Zhang L T. Summary on the dam-break of tailing pond [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(5): 594-600. (in Chinese)

[2] 徐宏达.我国尾矿库病害事故统计分析[J].工业建筑.2001,31(1):69-71.  
Xu H D. Statistical analyses of tailing reservoir disease

accidents in China[J]. Industrial Construction, 2001,31(1):69-71. (in Chinese)

[3] Agurto-Detzel. H, Bianchi. M, Assumpo. M, et al. The tailings dam failure of 5 November 2015 in SE Brazil and its preceding seismic sequence[J]. Geophysical Research Letters, 43(10):4 929-4 936.

[4] Lemphers N. Could the Hungarian tailings dam tragedy happen in Alberta[Z].www.pembina.org/Oct.12, 2010.

[5] 何思明,李新坡,吴永.考虑弹塑性变形的泥石流大块石冲击力计算[J].岩石力学与工程学报,2007,26(8):1 664-1 669.  
He S M, Li X P, Wu Y. Calculation of impact force of out runner blocks in debris flow considering elastoplastic deformation[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007,26(8):1 664-1 669. (in Chinese)

[6] 尹光志,敬小非,魏作安,等.尾矿坝溃坝相似模拟试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(增2):3 830-3 838.  
Yiin G Zh, Jing X F, Wei Z A, et al. Experimental study of similar simulation of tailings dam-break [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010,29(Sup 2):3 830-3 838. (in Chinese)

[7] 敬小非,尹光志,魏作安,等.尾矿坝垮塌机制与溃决模式试验研究[J].岩土力学,2011,32(5):1 377-1 384, 1 404.  
Jing X F, Yin G Zh, Wei Z A, et al. Model experimental study of collapse mechanism and broken mode of tailings dam [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5): 1 377-1 384,1 404. (in Chinese)

(下转第62页)