

DOI: 10.11779/CJGE2020S2039

尾矿库溃坝尾砂流下泄冲击力特性试验研究

吴帅峰¹, 严俊¹, 蔡红^{1*}, 魏迎奇¹, 杜继芳², 刘传鹏³

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100048; 2. 山东工商学院管理科学与工程学院, 山东 烟台 264005;
3. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要: 尾矿库溃坝下泄尾砂流冲击力的计算目前还未有成熟的模型或计算方法, 而直接采用泥石流的经验公式或现有的水力学计算模型并修改相应的参数不能真实反映尾砂流的冲力特性。采用尾砂流模型槽装置, 开展了不同密度的尾砂浆体、不同流速、不同埋深条件下冲击力的演化特征。试验结果表明: 冲击力在时间分布上受密度的影响规律为, 密度越大最大冲击力出现的时间越早; 冲击力在纵向空间上可分为两段, 一段为液面以下的埋深范围内, 冲击力随深度呈线性分布, 另一段为涌高部分, 冲击力呈对数型快速衰减; 尾砂流冲击力与流速、密度和埋深直接相关, 不同密度下流速与冲击力呈幂函数相关, 同时密度越大冲击力越大, 呈幂函数相关性, 埋深与冲击力呈线性关系。并以此建立了涵盖了流速、密度和埋深3因素的冲击力模型, 并设定了3个参数, 分别为扰流系数 k_1 受密度影响的冲击力调整系数 α 和受埋深对冲击力的调整系数 k_2 , 该模型能综合反映3因素的影响, 通过验证表明了模型的合理性及参数物理意义的正确性, 可为相关研究和工程应用提供一定的理论参考。

关键词: 尾矿库; 溃坝; 尾砂流; 冲击力; 模型试验

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2020)S2-0219-07

作者简介: 吴帅峰(1988—), 男, 博士(后), 高级工程师, 主要从事大坝岩土工程与冲击动力学等方面的研究工作。

E-mail: wusf@iwhr.com。

Experimental study on characteristics of impact force of tailing flow under dam break of tailing reservoir

WU Shuai-feng¹, YAN Jun¹, CAI Hong¹, WEI Ying-qi¹, DU Ji-fang², LIU Chuan-peng³

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 2. School of Management Science and Engineering, Shandong Technology and Business University, Yantai 264005, China; 3. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: At present, there is no mature model or method for the calculation of the impact force of tailing flow discharged from the dam break of tailing pond. Instead, the empirical formula for debris flow or the existing hydraulic model are directly used, and the corresponding parameters are modified. This method can not truly reflect the impact characteristics of tailing flow. The evolution characteristics of impact force under different densities of tailing slurry, different velocities and different depths of impact are studied by using the tailing flow model groove devices. The test results show that the impact force is affected by density shadow in time distribution. The higher the density is, the earlier the maximum impact force appears. In the longitudinal space, the impact force can be divided into two parts. One is the buried depth below the liquid level, the impact force is linearly distributed with the depth, the other is the surge height part. The impact force is a logarithmic fast attenuation. The impact force of tailing flow is directly related to velocity, density and buried depth, and the velocity and impact force are power function-related under different densities. At the same time, the greater the density is, the greater the impact force is the power function related. The buried depth and impact force are linear relationship. Based on this, a model for impact force covering three factors of the velocity, density and buried depth is established, and three parameters are set up, namely, the coefficient of turbulence k_1 , the coefficient of impact force adjustment α affected by the density, and the coefficient of impact force adjustment k_2 affected by the buried depth. The model can comprehensively reflect the influences of three factors. The rationality of the model and the correctness of the physical meaning of the parameters are verified, which may provide some

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0804607); 国家自然科学基金项目(U19A2049)

收稿日期: 2020-08-07

*通信作者(E-mail: caihong@iwhr.com)

theoretical reference for the related researches and engineering applications

Key words: tailings reservoir; dam break; tailing flow; impact force; model test

0 引言

截至 2018 年底, 中国现存尾矿库高达 8869 座, 其中“头顶库”1425 座, 占尾矿库总数的 16.1%, 含“病库”131 座, 占“头顶库”的 9.2%, 从等别上看, 四、五等小型尾矿库占比超过 50%^[1]。新中国成立以来, “头顶库”发生溃坝事故 21 起(共发生 38 起)约占尾矿库溃坝事故总数的 55%, 由于“头顶库”的分布位置的特殊性, 溃坝发生后往往造成巨大的生命、财产损失。在 2001—2008 年间尾矿库事故无论从事故发生起数还是伤亡人数均呈上升趋势, 于 2008 年到达高峰, 其中溃坝事故居首, 占事故总数的 58%, 2008 年发生襄汾尾矿溃坝事故后, 国家高度重视尾矿库安全管理^[2-4], 致使该类事故逐渐减小, 但仍时有发生。

尾矿库溃坝后所产生的尾砂流冲击是造成伤亡的核心因素, 但针对此类的研究鲜有报道, 对比泥石流灾害的下泄演进、冲击力计算方法模型、建筑物的冲击响应等问题均有较全面的研究和系统性成果^[5-7], 而尾砂流的相关成果还未形成体系, 但相关学者在个案、特定条件下的尾矿溃坝灾害评估上也做出了长足的贡献。在相似试验上, 尹光志等^[8]以实体尾矿库地形建立了相似模型试验, 得到了尾砂流的下泄运动特性, 给出了冲击力随距离、时间的演化规律; Jing 等^[9]通过模型试验, 在不同尾矿浆的条件下, 通过尾矿坝溃决试验, 得出尾砂流下泄演化规律, 冲击力强度和流的变化; Wu 等^[10]以尾矿库为原型建立相似物理模型, 研究尾砂流的流动特性影响因素, 提出了对应的防护措施; Liu 等^[11]建立了漫顶溃坝的物理试验模型, 提出使用非平衡沉积过程计算溃坝过程, 并建立了用于横向侵蚀坝体的概念模型。

总结相关研究, 在模型试验上, 大多是针对某具体尾矿工程而进行的模型试验, 虽提出相关的流速、冲击力、下泄演进等规律, 但适用条件较窄; 在数值计算上大多采用泥石流的计算程序或流体模型, 未形成针对尾矿库材料特性的专用模型或程序, 仅在原有泥石流的相关计算上改动参数, 计算结果置信度不足。对此, 亟待针对尾矿砂细颗粒特性的下泄冲击相关规律性试验, 以此提出概化、量化的影响因素与条件, 逐步形成尾矿溃坝的专用模型或程序。对此, 本文开展了室内尾砂流下泄冲击特性试验, 意在研究影响冲击力的外部直接因素, 建立影响因素与冲击力的相关规律, 提出冲击力计算模型。

1 试验设计

1.1 试验装置设计

根据尾矿坝坝体结构分析, 其溃坝下泄形式与泥石流有较大差异, 泥石流冲击危害最大的为大粒径(大于 30 cm)裹挟体的冲击作用, 在黏性泥石流类型下大颗粒体积率达 40%以上; 而尾矿坝是由尾矿堆积碾压而成的, 溃坝后并无大粒径物质, 绝大多数组成物为尾矿填料, 由此形成的尾砂流冲击作用影响直接因素为密度、流速、埋深 3 个核心影响因素。对此, 本试验以此 3 个因素为变量, 采用室内模型试验方法研究在该因素影响下尾砂流的冲击力演化规律。

为满足流速、重度、埋深 3 个影响因素下的尾砂流下泄冲击力测试, 试验设计的核心思想在于: ①重度是试验材料的直观表现, 它涵盖了重度、固体物质含量、水砂比等多个内在因素, 从材料制备的角度实现重度的改变, 具体方法为在相同水量条件下掺和不同重量的尾矿砂, 实现密度变化对冲击力的影响试验。②流速是冲击力的表观影响因素, 关于动水压力的研究已有较成熟的结论, 但含颗粒物时且在不同密度下的动水压力涉及较少, 此因素与密度的影响是相互补充的, 在试验中的具体实现方法为改变上游尾砂槽的高度, 使其具备不同的流速。③埋深也是影响尾砂流下泄冲击力的关键因素之一, 静态时的埋深与压力关系相对研究较多, 但动态埋深与冲击力的关系鲜有涉及, 在试验中以控制流量的方法实现不同埋深状态下的冲击力监测。

基于满足试验对装置进行设计, 其功能性上应满足上游尾砂槽可满足高度可调, 以实现流速控制; 尾砂流下泄出口可调, 以实现流量控制; 渠道整体保证一定的坡度以实现尾砂流的流动; 设置冲击力测试的构件, 实现对不同深度冲击力的测试。整体设计图如图 1 所示, 加工后如图 2 所示, 糙率为 0.012。

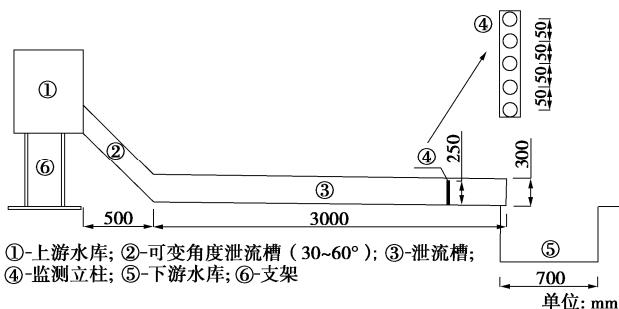


图 1 试验装置设计图

Fig. 1 Design drawing of test devices



图 2 试验装置加工图

Fig. 2 Processing drawing of test devices

本试验关注流速、密度和埋深外部条件对冲击力影响规律, 与相似模型试验不同, 本试验中调整相应的影响因素值即可得到冲击力的变化, 最终得到因素与结果的对应规律, 由此不再考虑比尺的缩放。

1.2 试验材料

试验采用历史上发生过尾矿溃坝事件的襄汾尾矿坝库内留置尾砂, 现场开挖 2 m 深后取出尾砂进行相关物理力学试验, 通过颗粒分析、相对质量密度试验得出尾矿砂的颗粒级配曲线、相对密度值等, 对尾矿砂进行了土样分类。

尾矿砂的颗粒级配曲线见图 3 所示, 试验得出土样的粗粒含量在 76%~85%, 粉粒含量在 5%~7%, 黏粒含量在 10%~17%, 胶粒含量在 2%~7%, 属于细粒土质砂中的黏土质砂 (SC)。土样综合粗细包线和平均线各个特征粒径累计含量见表 1 所示。

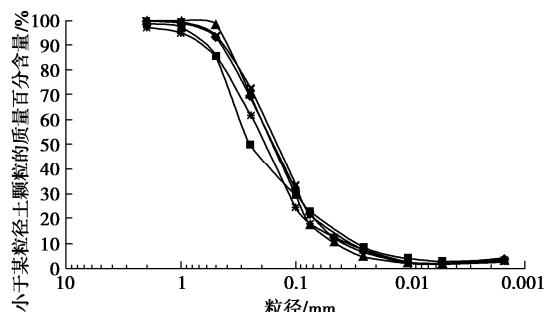


图 3 襄汾尾矿砂颗粒级配曲线

Fig. 3 Grain-size distribution curves of Xiangfen tailings particles

表 1 尾矿砂粒径累计含量

Table 1 Accumulated contents of characteristic particle size of tailings sand (%)

包线类型	颗粒粒径/mm					
	2	0.5	0.25	0.075	0.005	0.002
综合细包线	100	100	75	24	17	7
综合粗包线	97	84	50	15	10	2
综合平均线	100	90	57	20	12	5

测得尾矿砂含水率平均值 4.81%, 干密度平均值 2.49 g/cm^3 , 湿密度平均值 2.61 g/cm^3 。土样相对密度在 2.98~3.06, 平均值 3.03。对尾矿砂进行抗剪强度试验得出黏聚力为 16 kPa, 摩擦角为 25.3° 。

1.3 试验过程

在固定体积水中加入不同质量的尾矿砂来控制尾

砂流的密度, 试验采用了 5 种密度, 控制标准为从水的密度逐步增大到失去流动性, 该密度范围为 $1.0 \sim 1.5 \text{ g/cm}^3$, 流速范围为 $0.2 \sim 3 \text{ m/s}$, 埋深 $5 \sim 20 \text{ cm}$, 尾砂流在不同密度下对应的试验控制参数如表 2 所示。其中密度 1.0 g/cm^3 为清水冲击, 为验证试验装置、采集设备及试验结果的可靠性。

表 2 尾砂流试验控制参数

Table 2 Control parameters of tailings flow tests

密度 $/(g\cdot cm^{-3})$	水砂比	含砂量 $/(g\cdot cm^{-3})$	重度 $/(kN\cdot m^{-3})$	流速 $/(m\cdot s^{-1})$	最大埋深 /cm
1.0	1 : 0	0	9.80	0.5~3	20
1.1	5.58 : 1	0.17	10.78	0.2~1.5	20
1.2	2.59 : 1	0.33	11.76	0.2~1.5	20
1.3	1.59 : 1	0.50	12.74	0.2~1.5	20
1.4	1.09 : 1	0.67	13.72	0.2~1.5	20
1.5	0.80 : 1	0.84	14.70	0.2~1.5	20

在不同控制参数下对冲击力进行测试, 在测桩柱上沿高度安置 5 个冲击力传感器, 传感器的间距为 5 cm, 共测试 20 cm 深度内的冲击力变化值。

试验时为保证在某一控制参数下持续监测冲击压力, 在试验槽的下方设置下游水库, 并采用泥浆泵将流进下游水库内的尾砂流抽至上游水库形成循环, 每组控制参数的冲击压力测试时间控制在 10 min 左右。图 4 为清水状态下冲击力与流速之间的关系, 从图中可看出流速的增加, 产生的冲击压力也随之增加, 与流速呈非线性的关系, 该关系与理论值具有较高的一致性。确定出糙率在 0.012 时, 正面冲击作用下的绕流阻力系数为 1.55, 冲击力与流速关系为 $p=0.5 \times 1.55 \rho v^2$ 。

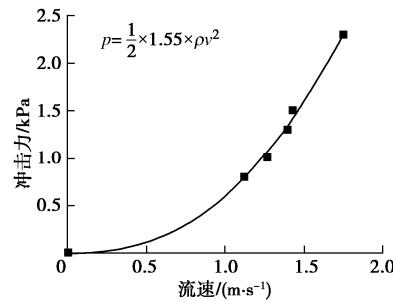


图 4 清水冲击力与流速间的关系

Fig. 4 Relationship between impact force of clean water and velocity

2 试验测试与结果分析

2.1 尾砂流的冲击力时空分布特征

不同密度的尾砂流, 测压立柱空间范围内的冲击力上升形式也不同, 最大冲击力出现的时间也不同, 如图 5 列出了流速在 0.9 m/s 时各密度下的冲击力时程曲线。从图 5 中可以看出, 随着密度的提高, 冲击力从出现到上升至最大值所需时间缩短, 曲线上升段的

平均斜率不断增大。低密度情况下, 如密度为 1.1 g/cm^3 , 冲击力在上升过程中波动较为剧烈, 并表现出振荡随机性, 而高密度时, 如密度为 1.5 g/cm^3 , 冲击力直接上升至最大值并保持较稳定的冲击力, 波动性较小。这表明, 高密度尾砂流的冲击力往往出现在与构筑物接触的瞬间, 而低密度的尾砂流由于水砂分离程度较大, 使得水与砂的冲击力分离作用, 从而使得冲击力在上升过程中出现震荡。冲击力紊乱的时间长短也反映了尾砂流内部颗粒的不规则运动情况, 如颗粒间的相互碰撞、摩擦、沉浮等, 当密度上升到一定程度后形成悬浮状态, 此时水砂并不分离, 水作为尾砂流浆液的组成物质, 此状态下的尾砂流冲击作用最强, 破坏力最大。

表 3 列出了不同试验控制参数下, 平均最大冲击力、流速、埋深的监测值。

表 3 尾砂流冲击特性试验结果

Table 3 Test results of impact characteristics of tailings flow

密度 $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	流速 $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	动压力/kPa			
		5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
1.1	0.30	0.33	0.78	1.23	1.82
	0.32	0.45	0.86	0.96	1.58
	0.39	0.52	1.08	1.07	1.62
	0.50	0.61	1.12	1.22	1.68
	0.56	0.72	1.27	1.27	1.93
	0.70	1.00	1.42	1.52	2.17
	0.90	1.51	2.09	2.21	2.71
	1.10	2.22	2.75	2.87	3.39
	1.15	2.43	2.98	3.09	3.65
	0.23	0.48	0.69	1.13	2.17
1.2	0.30	0.64	0.94	1.41	2.15
	0.33	0.83	1.13	1.99	2.52
	0.50	1.12	1.66	2.10	2.78
	0.65	1.44	2.02	2.35	3.10
	0.71	1.75	2.25	2.88	3.46
	0.90	2.22	2.83	3.16	3.88
	1.11	2.97	3.48	3.90	4.72
	1.24	3.62	4.75	4.58	5.40
	0.30	0.81	1.09	1.37	2.72
	0.50	1.49	1.89	2.20	3.35
1.3	0.70	2.11	2.75	3.20	3.68
	0.79	2.32	2.94	3.48	4.11
	0.91	2.92	3.39	4.18	4.62
	1.11	3.77	4.20	5.01	5.58
	1.21	4.61	5.20	6.49	6.25
	0.22	0.85	1.24	1.56	1.77
1.4	0.30	1.17	1.67	1.94	2.11
	0.37	1.50	2.06	2.23	2.67
	0.50	2.22	2.65	3.09	3.32
	0.69	3.27	3.95	4.54	4.98
	0.30	1.48	2.10	2.69	3.04
1.5	0.50	2.76	3.46	4.28	4.54
	0.61	3.17	3.91	4.67	6.08
	0.71	4.21	4.75	5.43	6.92
	0.93	5.97	6.55	7.47	8.58
	1.05	6.96	7.58	8.06	9.87
	1.12	8.28	8.81	9.50	11.97

尾砂流在测试立柱上的纵向分布分为 2 段, 阶段 1 为液面以下的埋深范围, 阶段 2 为尾砂流由于立柱

的阻碍作用引起的碰撞涌起, 尾砂流速度瞬间减小, 并改变原始的运动轨迹, 在高速下冲击形成飞溅。图 6 展示了密度在 1.5 g/cm^3 时冲击力的纵向空间分布, 整体规律为在埋深范围内底部的冲击力最大, 但低密度时埋深以下的冲击力增大值线性相关性较好, 而高密度情况下, 埋深以下的冲击力增大量提高, 有非线性增加的趋势。尾砂流的涌高随流速增大而升高, 根据相关研究成果表明^[22], 在涌高部分冲击力迅速衰减, 低密度时呈对数衰减形式, 密度逐渐增大时, 其衰减速率逐渐减小, 最终接近直线。

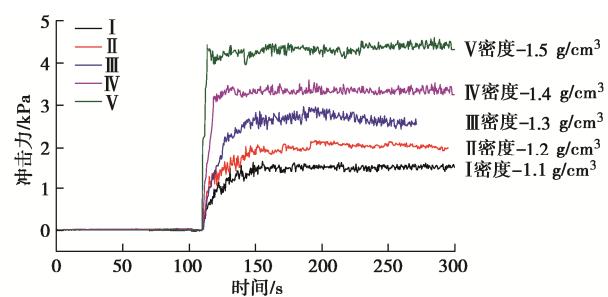


图 5 不同密度下的冲击力时程曲线

Fig. 5 Time-history curves of impact force under different densities

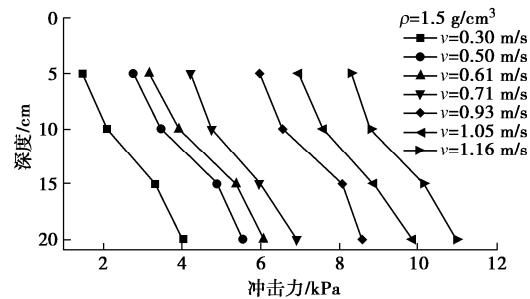


图 6 深度与动压力间的关系

Fig. 6 Relationship between depth and dynamic pressure

2.2 冲击力影响因素分析

考虑流速、密度、埋深三因素对尾砂流的冲击力影响关系需对 3 个因素进行解构分析, 先获取单个因素的影响关系, 然后再合并综合考虑。图 7 给出了不同密度下流速与冲击力间的关系, 可以看出均呈幂函数相关, 根据拟合结果的待定系数(表 4)可得, 在密度增加的影响下, 前置相乘系数项数值渐增, 幂次系数在 $1.1 \sim 1.5$ 浮动, 并无直接相关性。在此基础上分析密度与冲击力间的关系, 如图 8 所示, 在相同流速下密度越大冲击力越大, 呈幂函数相关性, 不同流速下的线型几乎一致, 拟合后的待定系数其前置相乘系数项数值渐增, 而幂次系数在 $4.2 \sim 4.7$ 浮动, 呈单调增加趋势。对此可以断定, 流速和密度两因素对尾砂流冲击力可用幂函数建立数学模型。

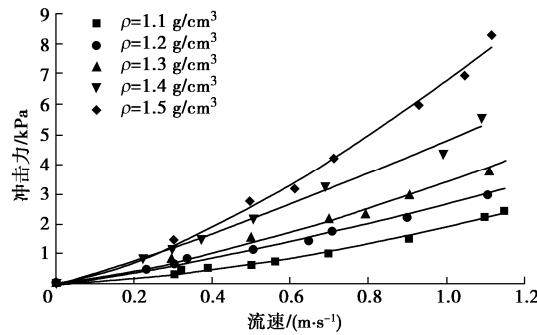


图 7 不同密度下流速与冲击力间的关系

Fig. 7 Relationship between velocity and impact force under different densities

根据图 6 所示并结合图 8、9 可得冲击力与深度呈较明显的线性关系, 如在密度为 1.1 g/cm^3 时, 尽管有不同流速的影响, 但整体上均能以线性关系表达; 当密度提升至 1.5 g/cm^3 时, 15 cm 以下的冲击力增量较大, 线性相关的程度虽稍弱, 但仍符合该趋势。随深度的增量约为该重度下的静水压力。

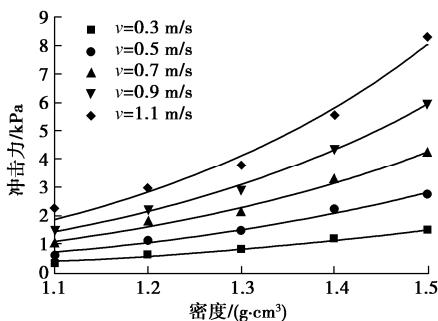


图 8 不同流速下密度与冲击力间的关系

Fig. 8 Relationship between density and impact force under different velocities

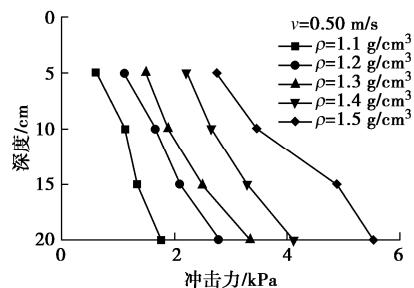


图 9 埋深与冲击力间的关系

Fig. 9 Relationship between buried depth and impact force

2.3 尾砂流冲击力模型的建立

根据冲击力影响因素分析所的结果, 下泄尾砂流冲击力与密度和流速均成幂函数正相关趋势, 与深度呈线性正相关趋势, 对此可建立以幂函数为基础的冲击力模型:

$$p = f(v, \rho, h) \quad , \quad (1)$$

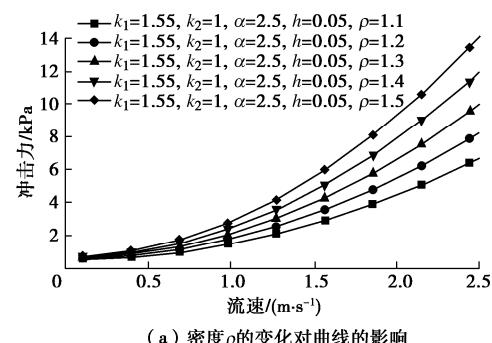
且冲击力与密度的幂次是单调增大趋势, 由此建立冲击力模型公式:

$$p = \frac{1}{2} k_1 \rho^\alpha v^2 + k_2 \gamma h \quad . \quad (2)$$

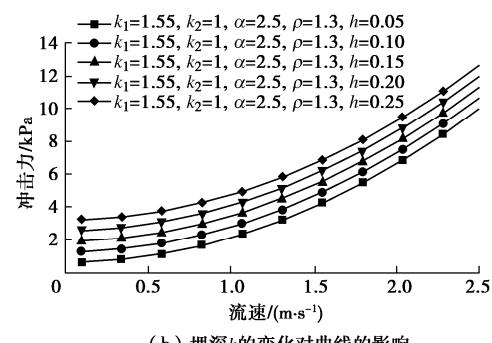
为解构冲击力模型各参数的和流速、密度、埋深在模型中的影响模式, 通过固定其他参数值, 变化需解构的参数值方法, 分析对模型曲线的影响及发展趋势。首先以流速为常态自变量, 在此基础上分别考虑密度 ρ , 系数 k_1 , α 和埋深 h 的变化对曲线形态的影响, 其中式 (2) 第二项为线性累加的关系, 对此只考虑某一参数的变化即可表示该项的整体影响关系, 此处选择影响因素埋深 h 。

当仅有密度改变时, 对模型曲线的影响如图 10 (a) 所示, 密度增加略使曲线起始值增大, 曲线的切线斜率在整个应变速率范围内也平稳增大, 曲线略微抬升, 表明冲击力的发展速率增大。当仅有埋深改变时, 对模型曲线的影响如图 10 (b) 所示, 不影响曲线的曲率与形态, h 增大, 曲线整体抬升, 表明埋深的增加是作为附加项作用于尾砂流冲击力的发展中, 埋深越大, 附加冲击力越高。

参数 k_1 的变化对曲线的影响如图 10 (c) 所示, 该参数不影响曲线的起始值, 但会改变曲线的曲率即影响不同流速下的冲击力值, 由此该参数物理意义定义为不同外部条件下的扰流系数。参数 α 与 k_1 类似, 但其影响效果较为明显, 作为密度项的幂次参数, 其物理意义在于不同密度下的冲击力影响调整。参数 k_2 与 h 的影响是相同的模式, 其物理意义在于调整埋深对冲击力的影响。



(a) 密度ρ的变化对曲线的影响



(b) 埋深h的变化对曲线的影响

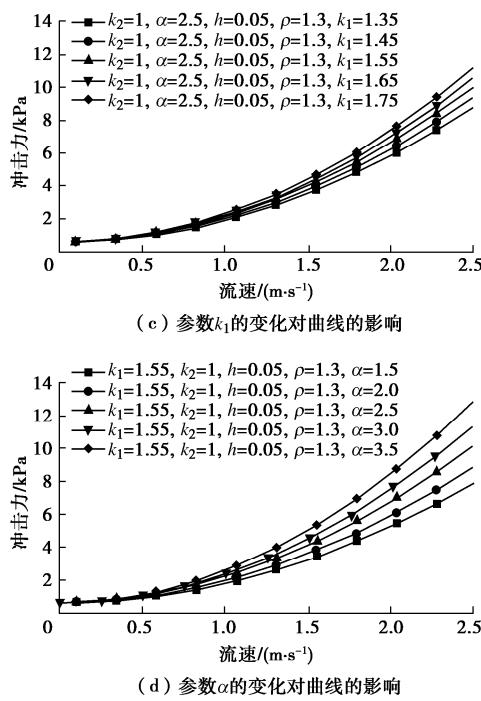


图 10 模型参数变化对曲线的影响

Fig. 10 Influences of model parameters on curves

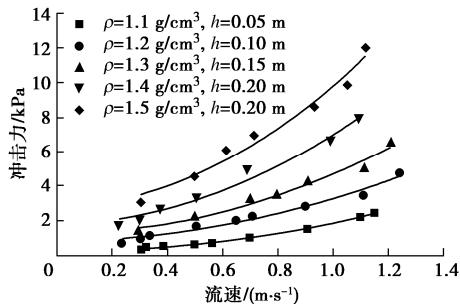


图 11 冲击模型拟合曲线

Fig. 11 Fitting curves of impact model

采用该冲击模型对表 3 中的试验结果进行拟合，选用不同密度、不同埋深下的数据来综合验证模型验证适用性，拟合结果如图 11 所示，各参数取值和拟合相关性如表 4 所示。

表 4 冲击模型拟合结果取值

Table 4 Values of fitting results impact model

密度 $\rho/(g\cdot cm^{-3})$	埋深 h/m	k_1	α	k_2	相关系数
1.1	0.05	1.65	7.24	0.69	0.99
1.2	0.10	1.80	5.47	0.69	0.97
1.3	0.15	1.92	4.81	0.66	0.96
1.4	0.20	2.43	4.28	0.69	0.97
1.5	0.20	2.65	4.07	0.67	0.97

从表 4 可以看出，不同密度和埋深下模型对试验数据的拟合相关性都大于 0.9，效果较好，能够综合反映流速、密度、埋深对冲击力的影响关系。由表 4 可得，参数 k_1 虽密度增加而增大，随密度增加而减小， k_2 基本不变，与密度和埋深关联性不大。经参数物理意义的确定和拟合验证说明该冲击力模型物理意义明

确，能反映尾砂流在不同流速、密度、埋深等外部影响因素下冲击力特性。

2.4 模型验证

为验证本模型的推广适用性与合理性，以文献[12]中的试验数据为对象，采用本文模型进行拟合验证。该文献描述了密度在 $1.7 \sim 2.1 g/cm^3$ 条件下的泥砂石流下泄冲击力与密度、埋深的时空分布特征，与本文的模型应用范围一致性较强。文献试验结果与模型计算结果如表 5 所示，试验冲击力与模型计算冲击力对比十分接近，同时参数 k_1 ， k_2 ， α 的取值规律与物理意义相符，表明该模型有较好的适用性。

表 5 文献实验结果与模型计算结果对比

Table 5 Comparison between model results and experimental data of Reference [12]

序号	试验数据			
	密度 $/(g\cdot cm^{-3})$	流速 $/(m\cdot s^{-1})$	平均埋深 /m	冲击力 /kPa
1	1.7	3.85	0.09	65.48
2	1.8	3.74	0.09	59.14
3	1.9	3.57	0.09	64.75
4	2.0	3.05	0.09	63.15
5	2.1	2.78	0.09	67.75
序号	模型参数及结果			
	k_1	α	k_2	冲击力/kPa
1	2.81	2.17	0.68	66.91
2	2.91	1.83	0.69	60.79
3	3.04	1.81	0.68	63.07
4	3.25	2.05	0.68	63.82
5	3.38	2.21	0.68	68.60

3 结论

通过对不同密度、流速、埋深下的尾砂流冲击试验，结合冲击力时空分布特征和最大冲击力监测数据，得出以下 4 点结论。

(1) 尾砂流下泄冲击力在时间上受密度影的影响规律为，密度越大最大冲击力出现的时间越早，高密度尾砂流的冲击力往往出现在与构筑物接触的瞬间，而低密度的尾砂流形成的冲击力在上升过程中出现震荡。

(2) 冲击力在空间上可分为两段，一段为液面以下的埋深范围内，冲击力随深度呈线性分布；另一段为液面以上的涌高部分，该部分冲击力呈对数型快速衰减，并受密度的影响，密度越大衰减速率越慢，最终会接近直线形式衰减。

(3) 尾砂流冲击力与流速、密度和埋深直接相关，不同密度下流速与冲击力呈幂函数相关，同时密度越大冲击力越大，呈幂函数相关性，埋深与冲击力呈线性关系。

(4) 建立了尾砂流冲击力模型，该模型涵盖了流速、密度和埋深的影响，并设定了 3 个参数，分别为

外部条件影响下的扰流系数 k_1 , 受密度影响的冲击力调整系数 α , 受埋深对冲击力的调整系数 k_2 。该模型能综合反映尾砂流冲击的各影响因素。

参考文献:

- [1] 张家荣, 刘建林, 朱记伟. 我国尾矿库事故统计分析及对策建议[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2016, 38(6): 682 - 685. (ZHANG Jia-rong, LIU Jian-lin, ZHU Ji-wei. Statistical analysis and countermeasures of tailings accident in China[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2016, 38(6): 682 - 685. (in Chinese))
- [2] 吴宗之, 梅国栋. 尾矿库事故统计分析及溃坝成因研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(9): 70 - 76. (WU Zong-zhi, MEI Guo-dong. Statistical analysis of tailings pond accidents and cause analysis of dam failure[J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(9): 70 - 76. (in Chinese))
- [3] 闪淳昌, 张振东, 钟开斌, 等. 襄汾“9·8”特别重大尾矿库溃坝事故处置过程回顾与总结[J]. 中国应急管理, 2011(10): 13 - 18. (SHAN Chun-chang, ZHANG Zhen-dong, ZHONG Kai-bin, et al. Review and summary of the disposal process of Xiangfen "9.8" extremely serious tailings dam break accident[J]. China Emergency Management, 2011(10): 13 - 18. (in Chinese))
- [4] 殷跃平. 山西襄汾县塔山矿区尾矿溃决泥流灾难[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(4): 70 - 148. (YIN Yue-ping. Debris flow disaster caused by tailings outburst in Tashan mining area, Xiangfen County, Shanxi Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008, 19(4): 70 - 148. (in Chinese))
- [5] HU Kai-heng, CUI Peng, GE Yong-gang. Building destruction patterns by august 8, 2010 Debris flow in Zhouqu, Western China[J]. Journal of Mountain Science, 2012, 30(4): 484 - 490.
- [6] ZOU Qiang, GUO Xiao-jun, ZHU Xing-hua, et al. Hazard characteristics and causes of “7·10” debris flow along highways in the upper reaches of minjiang river[hazard characteristics and causes of “7·10” debris flow along highways in the upper reaches of minjiang river[J]. Journal of Mountain Science, 2014(6): 747 - 753.
- [7] IVERSON R M. Scaling and design of land slide and debris-flow experiments[J]. Geomorphology, 2015, 244: 9 - 20.
- [8] 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(增刊 2): 3830 - 3838. (YIN Guang-zhi, JING Xiao-fei, WEI Zuo-an, et al. Experimental study of similar simulation of tailings dam-break[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S2): 3830 - 3838. (in Chinese))
- [9] JING F X. Research on the movement mechanism of pulp surging from tailings dam-break[J]. Advanced Materials Research, 2012, 516-517: 997 - 1000.
- [10] WU T, QIN J. Experimental study of a tailings impoundment dam failure due to overtopping[J]. Mine Water & the Environment, 2018, 37(2): 272 - 280.
- [11] LIU L, ZHANG H W, ZHONG D Y, et al. Research on tailings dam break due to overtopping[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(6): 675 - 681.
- [12] 刘道川, 游勇, 杜杰, 等. 泥石流冲击力的时空分布特征[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(3): 17 - 25. (LIU Dao-chuan, YOU Yong, DU JIE, et al. Spatio-temporal distribution of the impact force of debris flow[J]. Advanced Engineering Ences, 2019, 51(3): 17 - 25. (in Chinese))

(编校: 孙振远)