



引文格式: 刘向东, 黄虹霖, 刘星宇, 等. 基于水槽试验的矿渣型泥石流启动特征研究: 以栾川县康山金矿区为例[J]. 西北地质, 2025, 58(1): 300-314. DOI: 10.12401/j.nwg.2023194

Citation: LIU Xiangdong, HUANG Honglin, LIU Xingyu, et al. Study on the Starting Characteristics of Mine Debris Flow Based on Flume Test: Take the Kangshan Gold Mining Area in Luanchuan County as an example[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(1): 300-314. DOI: 10.12401/j.nwg.2023194

## 基于水槽试验的矿渣型泥石流启动特征研究: 以栾川县康山金矿区为例

刘向东<sup>1</sup>, 黄虹霖<sup>1,\*</sup>, 刘星宇<sup>1</sup>, 孙建伟<sup>1</sup>, 贾煦<sup>1</sup>, 赵兴志<sup>1</sup>, 张旭晃<sup>2</sup>, 程贤达<sup>1</sup>, 孙亚柯<sup>1</sup>

(1. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 陕西 西安 710100; 2. 栾川县自然资源局, 河南 栾川 471500)

**摘要:** 矿渣型泥石流是一种以大规模的开采矿产资源产生的废石弃渣为主要物源演化形成的一种典型的人为泥石流, 具有频发性、人为性、污染性、可控性等特点。为进一步探索底床坡度、冲水流量和颗粒级配等因子对泥石流启动过程的影响和控制作用及各因子间的关系, 基于相似性原理, 采用比尺结构, 以河南省栾川县康山金矿区采矿产生的废石渣堆为主要物源进行水槽试验。通过传感器记录矿渣型泥石流形成过程中的孔隙水压力和含水率的变化情况, 并用高清摄像机观测矿渣启动形成泥石流的现象。试验结果表明: ①矿渣型泥石流主要以顶面侵蚀型、流态化型、顶面侵蚀+流态化型 3 种方式启动。②泥石流启动临界孔隙水压力与底床坡度呈负相关关系、与细颗粒含量变化关系不明显。③级配、坡度一定时, 随着冲水流量不断增大, 泥石流启动临界水量呈现先减小、后增大、再减小趋势, 并存在一个最有利于矿渣启动的冲水流量。④冲水流量、级配一定, 坡度越大, 矿渣越容易启动。⑤坡度、冲水流量一定, 细颗粒含量为 30.36% 矿渣最容易启动。研究结果进一步丰富了对矿渣型泥石流启动机理的认识, 可为矿渣型泥石流预警、防治和矿山生态修复提供参考。

**关键词:** 矿渣型泥石流; 启动特征; 水槽试验; 康山金矿区

中图分类号: P694

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)01-0300-15

### Study on the Starting Characteristics of Mine Debris Flow Based on Flume Test: Take the Kangshan Gold Mining Area in Luanchuan County as an example

LIU Xiangdong<sup>1</sup>, HUANG Honglin<sup>1,\*</sup>, LIU Xingyu<sup>1</sup>, SUN Jianwei<sup>1</sup>, JIA Xu<sup>1</sup>, ZHAO Xingzhi<sup>1</sup>,  
ZHANG Xuhuang<sup>2</sup>, CHENG Xianda<sup>1</sup>, SUN Yake<sup>1</sup>

(1. Xi'an Center of Mineral Resources Survey, China Geological Survey, Xi'an 710100, Shaanxi, China; 2. Luanchuan County Natural Resources Bureau, Luanchuan 471500, Henan, China)

收稿日期: 2023-05-29; 修回日期: 2023-10-06; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 中国地质调查局项目“熊耳山-伏牛山矿集区生态修复支撑调查”(ZD20220218), 国家科技资源共享服务平台项目“陕西典型矿床标本资源收集及馆藏标本数字化”(NCSTI-RMF20230214)联合资助。

作者简介: 刘向东(1982-), 男, 正高级工程师, 从事地质信息化、矿山生态修复等研究。E-mail: lixiangdong@mail.cgs.gov.cn。

\* 通讯作者: 黄虹霖(1996-), 男, 工程师, 从事矿山生态修复等研究工作。E-mail: 2231097363@qq.com。

**Abstract:** Mine debris flow is a typical anthropogenic debris flow formed by the evolution of waste rock and slag generated by large-scale mining of mineral resources, which has the characteristics of frequency, human nature, pollution, controllability, and so on. In order to further explore the influence and control of factors such as bottom bed slope, flushing flow and particle gradation on the start-up process of debris flow and the relationship between the factors, based on the principle of similarity, the scale structure is used to carry out flume Test with the waste rock slag pile produced by mining in Kangshan gold mining area in Luanchuan County, Henan Province. The changes of pore water pressure and water content during the formation of mine debris flow were recorded by sensors, and the phenomenon of slag initiation forming debris flow was observed with high-definition cameras. The test shows that the mine debris flow is mainly started in three ways: top erosion type, fluidization type, and top erosion fluidization type; the critical pore water pressure of the debris flow is negatively correlated with the slope of the bottom bed, and the relationship with the change of fine particle content is not obvious; when the gradation and slope are constant, as the flushing flow continues to increase, the critical water volume of the debris flow at the start of the debris flow shows, and there is a flushing flow rate that is most conducive to slag starting; The flushing flow rate and gradation are certain. The larger the slope, the easier it is for slag to start. The slope and flushing flow are certain, and the fine particle content is 30.36%. Slag is the easiest to start. The research results further enrich the mechanism research of mine debris flow initiation, and can provide reference for early warning, prevention and ecological restoration of mine debris flow.

**Keywords:** mine debris flow; starting characteristics; flume test; Kangshan gold mining area

矿渣型泥石流是山地地区矿产资源开发活动中不合理堆排废石弃渣引发或加剧的、严重危及矿山正常生产和人民生命财产安全的一种地质灾害类型(张丽萍, 2001; 康志成, 2004; 徐友宁, 2006; 杨敏, 2021)。矿渣型泥石流复杂的启动机理会严重影响对其防治对策的针对性。因此, 深入研究矿渣型泥石流的启动机理具有重要的理论和现实意义。近年来, 国内外众多专家学者通过现场调查、物理模拟和数值模拟等方法手段, 取得了一系列关于矿渣型泥石流启动机理方面的研究成果(王永清, 2006; 徐友宁, 2009; 吕学军, 2011; 李晓晨, 2014; 洪磊, 2017; 刘兴荣, 2018; 黄家华, 2023)。国外学者通常将矿渣型泥石流和采矿事故归为一类进行研究, 专门研究矿渣型泥石流的文献较少, 有学者研究认为采矿废渣启动形成泥石流主要是细颗粒在水流侵蚀作用下导致的(O Hungr et al., 2002; Berti, 2005; Gregoretti, 2008)。中国学者取得了一些对研究矿渣型泥石流启动机理可以借鉴的成果: ①通过物理模拟, 研究了物源条件、水源条件、地形条件及这些条件的组合对泥石流启动的影响和控制作用, 揭示了不同组合条件下试验研究中泥石流的启动条件、物源破坏方式和演化过程(徐友宁等, 2009; 倪化勇等, 2014; 刘兴荣等, 2018; 罗阳, 2018; 林斌等, 2019; 王锴等, 2019; 李宁等, 2020)。②通过物理模拟,

提出了基于水力类泥石流启动机理计算泥石流预警雨量阈值的方法, 并基于试验发生破坏的临界雨量修正了传统 I-D 预警模型(孟华君等, 2017; 乔建平等, 2018)。③通过数值模拟, 在泥石流危险性和风险评价基础上提出了实施风险减缓措施, 提出了泥石流治理工程效益评价方法(丛凯等, 2019; 唐亚明等, 2021)。

笔者依托中国地质调查局“熊耳山-伏牛山矿集区生态修复支撑调查”项目, 以河南省栾川县康山金矿区为研究对象, 在系统收集、整理、分析、总结已有调查资料数据的基础上, 通过野外实地调查, 获取了康山金矿区采矿废石渣堆的空间分布位置和物源特征, 在对野外现场取回的废石渣样进行粒度特征分析后, 通过室内物理模拟试验, 探究矿渣型泥石流启动机理, 探讨影响和控制矿渣型泥石流启动的矿渣颗粒级配、沟道底床坡度、启动临界水量等主要因子之间的定量关系, 分析不同影响因子作用下矿渣型泥石流的启动方式, 以期今后矿渣型泥石流启动模拟试验的开展和泥石流启动机理的深入研究提供借鉴和参考。

## 1 研究区概况

康山金矿区地处华北陆块南缘熊耳山地区, 流域面积 22.16 km<sup>2</sup>, 海拔 1 000~1 671 m, 主体山脉呈 EW

向展布,属侵蚀构造型的中低山地貌。地表切割强烈,坡度陡峭(一般 $30^{\circ}\sim 55^{\circ}$ ),沟谷发育,呈“V”字型,局部直立呈陡崖。巨大的相对高差及陡峻的沟床比

降为水源和物源的快速汇集提供了有利的地形地貌条件,也为泥石流的形成提供了充分的势能条件。泥石流物源所在沟谷参数见表1。

表1 康山金矿区泥石流物源所在沟谷基本情况表

Tab. 1 The basic situation of the valley where the source of debris flow is located in the Kangshan gold mining area

沟谷	流域面积(km <sup>2</sup> )	最高点高程(m)	最低点高程(m)	沟谷长度(m)	相对高差(m)	纵坡降比(‰)
后木寺	1.08	1580	1235	1434	345	240.59
大南沟	0.72	1589	1235	1410	354	251.06
小北沟	0.50	1576	1203	1338	373	278.77
韭菜沟	0.43	1610	1172	1423	438	307.80
排土场	0.19	1494	1176	843	318	377.22
星星印	1.71	1614	1079	2221	535	240.88
杏树芽	0.84	1411	1052	1424	359	252.11

康山金矿区属暖温带落叶阔叶林区,雨水充沛,每年降水多集中在6~9月(图1),且多为暴雨形式出现,年平均降水量838.7 mm,年最大降水量1386.1 mm(1964年)(图2),月最大降水量179.2 mm(2021年8月),日最大降水量159.2 mm(2010年7月24日),1 h最大降水量49 mm(2019年8月21日6时),充沛的降雨为康山金矿区矿渣型泥石流的形成提供了充足的水源条件。

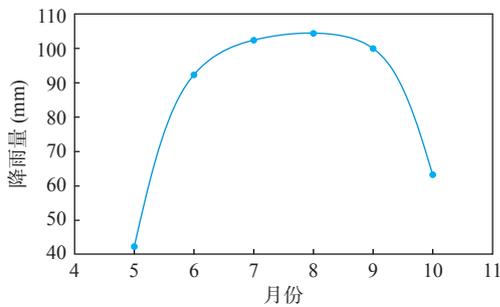


图1 研究区2015~2022年5~10月平均降雨量情况

Fig. 1 The monthly average rainfall in the study area from May to October 2015 to 2022

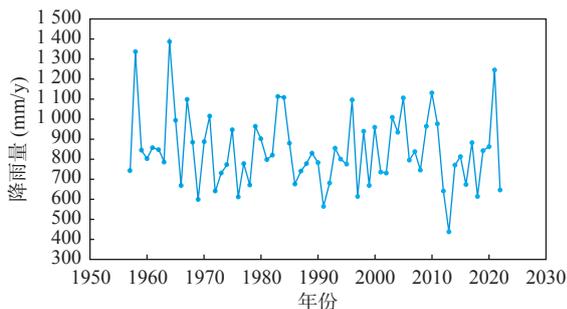


图2 栾川县1958~2022年全年降雨量情况

Fig. 2 The rainfall in Luanchuan County from 1958 to 2022

康山金矿区主要开采破碎带蚀变岩型和石英脉型金矿,采矿排放的废石弃渣岩石多呈晶质结构,条带、条纹或块状构造,裂隙不发育,质地坚硬,棱角明显,抗压、抗风化能力强,斜坡岩土体稳定性差。康山金矿区泥石流形成区的主沟道较为顺直,矿渣集中分布于沟谷上游,仅主沟上游和其中一条支沟现有采矿废石渣堆16处,方量13.15万m<sup>3</sup>;矿区内现有尾矿库4处,方量230万m<sup>3</sup>。坡面及沟道内堆放的废石渣场地形为阶梯状,外观呈一级或多级台阶状的人工堆积体(图3),台阶高度一般2~7 m,个别达数十米,渣堆坡面角 $17^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 。实地调查的16处典型废石渣堆中,47%的废石渣堆进行了植被复垦,76.5%的废石渣堆无拦渣坝、挡土墙或截排水沟,仅有23.5%的废石渣堆有拦渣坝、挡土墙或截排水沟。这为泥石流的形成提供了充足的物源条件。

栾川县历史上曾多次暴发山洪、泥石流灾害,多发生于7、8月份。其中,2010年7月24日,受强降雨影响,栾川县境内多地暴发泥石流灾害,造成直接经济损失19.8亿元,死亡68人,失踪21人。“7·24”泥石流灾害中,位于白土镇康山村的康山沟发生了矿渣型泥石流。本次研究实地调查中,在康山沟下游河床较平缓地段依然可见采矿废渣堆积体,这是康山金矿区曾经发生矿渣型泥石流的间接证据(图4)。

## 2 研究方法

### 2.1 试验装置

由于国内没有比较成熟的泥石流模型相似率研究成果(王协康,2000)。因此,本研究参照一般惯例,

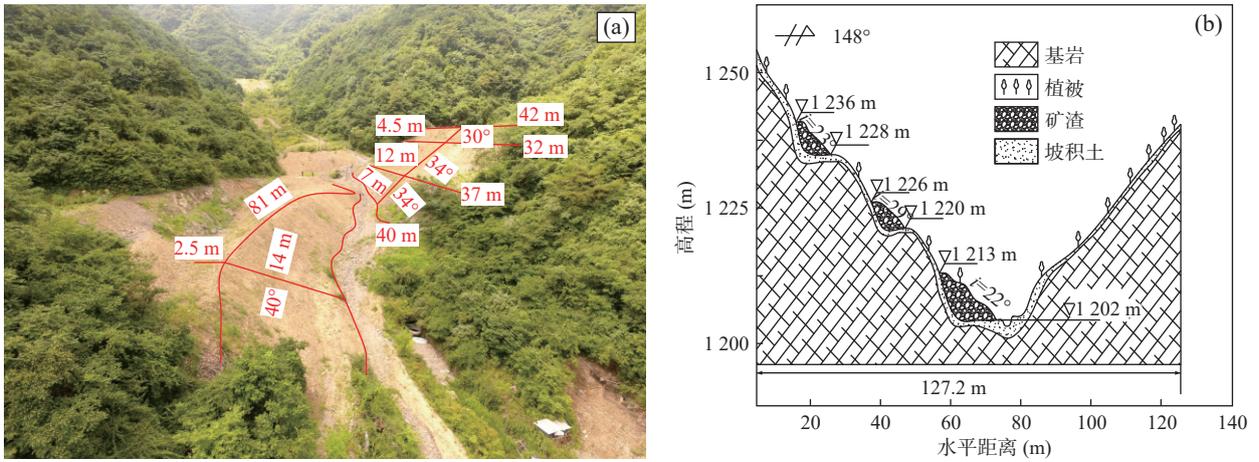


图3 典型矿渣堆积体形态参数(a)及断面剖面图(b)

Fig. 3 (a) Morphological parameters and (b) cross-sectional view of typical slag deposits



图4 康山沟历史泥石流证据照片

Fig. 4 Evidence of historical debris flow in Kangshan Gully

对水槽的几何尺寸、容重等予以保证, 结合野外实地调查结果, 最终确定以大南沟沟道横断面作为模型参考原始横断面, 沟口处渣堆厚度为原型(图 5)。根据曹琰波(2008)和李书钦(2009)推导出的各相似比的关系, 确定了本次试验的相似比(表 2)。考虑综合因素, 设计制作了水槽试验装置, 试验装置主要由试验水槽、沉砂池、供水系统、数据采集系统和水槽提升系统等

5 部分有机组成(图 6)。

试验选用 3 个孔隙水压力和 3 个体积含水率传感器, 埋设位置见图 6。孔隙水压力传感器型号为 YTYL0101 型, 精度为 0.1% F.S; 体积含水率传感器型号为 YTDY0102 型, 精度为 0.1% F.S。数据采集方式为自动化采集, 传感器直接接入自动化数据采集系统, 通过计算机设置采集频率(3 s)实时获取孔

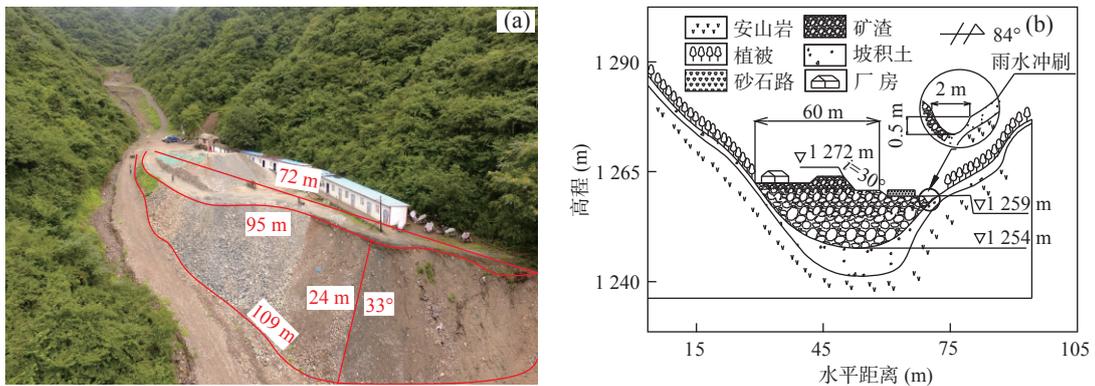


图5 大南沟沟口渣堆形态参数(a)及断面剖面图(b)

Fig. 5 (a) Morphological parameters and (b) cross-sectional view of the slag pile at the outfall of Danangou

表 2 泥石流启动水槽试验装置相似比

Tab. 2 Similar ratio of physical simulation test devices for debris flow startup

物理量	宽度	容重	应力	内聚力	泊松比	内摩擦角	雨强	流量
计算式	$C_l$	$C_r$	$C_\sigma = C_l \cdot C_r$	$C_c = C_r$	$C_\mu$	$C_\phi$	$S_p = C_l^{1/2}$	$Q = C_l^{5/2}$
相似比	100	1	100	1	1	1	10	105

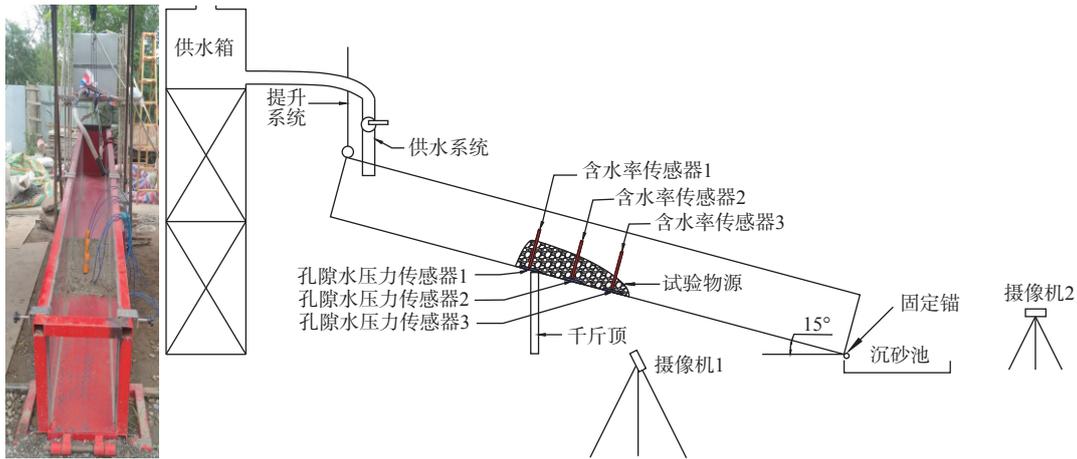


图6 泥石流启动水槽试验装置、物料铺设及传感器布置图

Fig. 6 Layout of water tank material laying and sensor for physical simulation test of debris flow startup

隙水压力和体积含水率变化特征。传感器具体参数见表3。

表 3 泥石流启动物理模拟试验所用传感器参数

Tab. 3 Parameters of sensors used in physical simulation test of debris flow startup

传感器类型	型号	规格	精度	输出信号
体积含水率	YTDY0102	0~100%	0.1%F.S	RS485数字信号
孔隙水压力	YTYL0101	100 Kpa	0.1%F.S	RS485数字信号

试验通过改变水槽坡度、冲水流量和颗粒级配，研究矿渣型泥石流启动特征，探讨影响和控制矿渣型

泥石流启动的矿渣颗粒级配、沟道底床坡度、临界水量等主要因子之间的定量关系。根据野外实际调查，研究区泥石流形成区的平均坡度为10°，结合坡度增减对泥石流形成过程的影响，最终确定以坡度为5°、8°、10°、15°和20°作为试验坡度。试验水槽长4 m，宽40 cm，侧面高50 cm，同时水槽侧壁贴有横向和纵向刻度标尺，精度为0.1 cm，以便读取水槽的刻度和试验过程影像，获取泥石流启动特征。试验过程中采用控制阀和瞬时流量计定量控制流量作为泥石流启动过程中清水流量值(L/s)，以模拟地表径流冲刷破坏矿渣堆的情况。试验条件参数见表4。

表 4 泥石流启动物理模拟试验条件参数

Tab. 4 Debris flow startup physical simulation test parameters

试验水槽条件			试验参数设计	
长度尺寸 (cm)	断面尺寸 (cm)	物料堆放 (cm)	水槽坡度 (°)	颗粒级配 (细颗粒含量, %)
400	50×40	70×50×10	5, 8, 10, 15, 20	7, 15, 20, 25, 30, 35, 40

为更贴近实际情况，本试验装置设计有清水流通区、物源区、泥石流形成区和堆积区。其中，清水流通区长210 cm，物源区长70 cm(矿渣样堆积体厚度10 cm)，泥石流形成区长120 cm。为减小边界效应对试验结果的影响和便于从水槽侧面观察水流对采矿废渣的冲刷过程，水槽两侧安装钢化玻璃，整个试验

过程中在水槽正面和侧面各架设一台高清摄像机，对试验现象进行实时记录。试验水槽参数见图7。

### 2.2 试验材料

试验材料取自研究区大南沟沟口附近坑口采矿废渣堆，经过晾晒、过筛和颗粒分析，获得了该处矿渣的颗粒级配和试验材料颗粒级配(图7)。前人研究

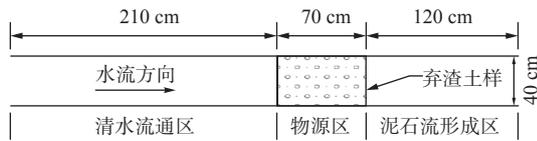


图7 泥石流启动物理模拟试验水槽参数

Fig. 7 Parameters of the water tank for the physical simulation test of debris flow startup

成果表明, 废石渣堆颗粒粒径  $d=2\text{ mm}$  对泥石流的区分具有重要意义(费祥俊, 2004)。因此, 将粒径小于  $2\text{ mm}$  的颗粒视为细颗粒, 大于  $2\text{ mm}$  的颗粒视为粗颗粒。为了减小尺寸效应的影响, 直径大于  $60\text{ mm}$  的块石被剔除, 其细颗粒含量占采取的矿渣总量的  $7\%$ , 干渣容重  $18.24\text{ KN/m}^3$ , 孔隙度为  $0.31$ 。试验材料颗粒级配见图 8。由于研究区采矿废渣堆密实度、细颗粒含量及内摩擦角的不同, 使得渣堆在外力条件下剪切破坏存在差异, 这些特征将影响到矿渣型泥石流的启动方式和机理。

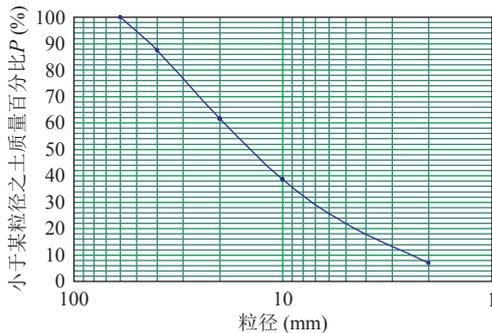


图8 试验材料颗粒级配图

Fig. 8 Particle gradation diagram of test material

### 3 结果分析

分别在 5 种坡度、15 种冲水流量和 7 种细颗粒含量的条件下进行了共计 25 组试验(表 5)。

#### 3.1 试验现象

通过对试验现象的观察分析发现, 不同水槽坡度、不同冲水流量和不同细颗粒含量条件下, 泥石流的启动过程不同, 分别为:

##### (1) 顶面侵蚀型启动方式。

水槽坡度分别为  $5^\circ$ 、 $8^\circ$  的两组试验, 冲水流量为  $1.99\text{ L/s}\sim 5.95\text{ L/s}$  的 8 组试验, 细颗粒含量为  $20\%\sim 40\%$  的 5 组试验, 表现为该类启动方式。由于水槽坡度较小, 或冲水流量较大, 或试验材料细颗粒含量较高, 试验开始后在径流作用下, 水流在堆积体上部快

表 5 泥石流启动物理模拟试验结果汇总

Tab. 5 Summary of physical simulation test results of debris flow initiation

试验组次	冲水流量 (L/s)	底床坡度 ( $^\circ$ )	细颗粒含量 (%)	启动方式
D01	0.82	10	7	顶面侵蚀+流态化
D02	0.88	10	7	顶面侵蚀+流态化
D03	1.19	10	7	顶面侵蚀+流态化
D04	1.24	10	7	顶面侵蚀+流态化
D05	1.40	10	7	顶面侵蚀+流态化
D06	1.45	10	7	流态化
D07	1.48	10	7	流态化
D08	1.99	10	7	顶面侵蚀
D09	2.07	10	7	顶面侵蚀
D10	2.32	10	7	顶面侵蚀
D11	2.43	10	7	顶面侵蚀
D12	2.97	10	7	顶面侵蚀
D13	3.10	10	7	顶面侵蚀
D14	3.52	10	7	顶面侵蚀
D15	5.95	10	7	顶面侵蚀
D16	1.48	5	7	顶面侵蚀
D17	1.48	8	7	顶面侵蚀
D18	1.48	15	7	流态化
D19	1.48	20	7	顶面侵蚀+流态化
D20	1.48	10	15	流态化
D21	1.48	10	20	顶面侵蚀
D22	1.48	10	25	顶面侵蚀
D23	1.48	10	30	顶面侵蚀
D24	1.48	10	35	顶面侵蚀
D25	1.48	10	40	顶面侵蚀

速汇集, 水流在堆积体顶面形成束流快于在堆积体内部的下渗, 在堆积体顶部坡面束流的作用下, 堆积体下部表层细颗粒首先被带走, 随后侵蚀作用由堆积体表面向内部、下部向上部发展, 最后引起上部堆积体的揭底启动形成泥石流, 其启动过程见图 9。

##### (2) 流态化型启动方式。

水槽坡度分别为  $10^\circ$ 、 $15^\circ$  的 2 组试验, 冲水流量为  $1.45\text{ L/s}$ 、 $1.48\text{ L/s}$  的 2 组试验, 细颗粒含量为  $7\%$ 、 $15\%$  的 2 组试验, 表现为该类启动方式。分别在水槽坡度、冲水流量适中或细颗粒含量较低条件下, 试验开始后在径流作用下, 水流在堆积体的下渗速率与其在顶部表面形成束流的速率相当, 在堆积体顶部表面形成径流的同时, 堆积体含水量不断增加, 逐步达到饱和状态。随着水流的入渗作用, 堆积体下部开始失稳, 坡脚首先向下滑动, 逐渐堆积体上部发生整体失稳, 在水流的参与下, 并呈流态化迅速形成泥石流, 其启动过程见图 10。



图9 D24组次试验泥石流启动过程

Fig. 9 Debris flow start-up process of sub-test D24



图10 D07组次试验泥石流启动过程

Fig. 10 Debris flow start-up process of sub-test D07

### (3) 顶面侵蚀+流态化型启动方式。

水槽坡度为 20° 的 1 组试验, 冲水流量为 0.82~1.40 L/s 的 5 组试验, 表现为该类启动方式。在水槽坡度较大或冲水流量较小试验条件下, 试验开始阶段在径流作用下, 水流不断渗入堆积体, 从堆积体下部坡脚有水渗出时堆积体并未达到饱和状态, 此时在堆积体顶部表面形成径流, 并逐渐侵蚀表层堆积体, 坡脚首先出现滑动, 随着含水量的升高, 堆积体整体达到饱和状态, 开始呈现大面积流态化现象, 形成泥石流。其形成过程见图 11。

## 3.2 试验现象分析

### (1) 顶面侵蚀型启动方式。

分析 D24 组试验数据, 得出顶面侵蚀型泥石流孔隙水压力和体积含水率变化特征(图 12)。

结果显示, 该类泥石流的孔隙水压力和体积含水率曲线呈现以下几方面特征: ①在径流作用下, 随着水流在堆积体上部快速聚集, 在堆积体顶部表面迅速形成径流, 堆积体的体积含水率和孔隙水压力呈现逐渐增加趋势。②随着堆积体下部表层颗粒被水流不断冲走, 下部的体积含水率先达到峰值, 此时下部堆积体启动, 该处孔隙水压力随即下降, 并逐渐消散。③侵蚀作用由堆积体下部向中上部继续发展, 中部和上部堆积体含水率继续增加到一定程度时, 导致中上部堆积体揭底启动形成泥石流, 孔隙水压力随即下降, 并逐渐消散。

综合此类启动模式的试验条件、启动现象及孔隙水压力变化特征, 顶面侵蚀型启动主要是由于坡面径流的形成快于内部下渗速率, 导致渣堆中细颗粒先被带走, 粗颗粒重新排列。由于渣堆颗粒之间无黏结, 当受力平衡被打破, 骨架颗粒的抗力小于水的地表径流冲刷力和骨架颗粒自身重力时, 渣体就会显示出一层层被剥离, 被水流带走的现象。

### (2) 流态化型启动方式。

分析 D07 组试验数据, 得出流态化型泥石流孔隙水压力和体积含水率变化特征(图 13)。

结果显示, 该类泥石流的孔隙水压力及体积含水率曲线表现出明显的上升和下降特征, 但其下降过程未出现与顶面侵蚀型类似的过程, 而是呈现出同步变化趋势。其数据变化主要分为两个阶段: ①在渗透作用下, 体积含水率和孔隙水压力急速上升到峰值, 含水率峰值表现为堆积体中部小、堆积体上部和下部大, 这与堆积体的触水顺序、堆积形态和体量有关, 而孔

隙水压力的峰值大小则与堆积体坡面形态有关。

②在堆积体呈现流态化现象启动后, 含水率传感器暴露在空气中, 水量迅速流失, 体积含水率降至初始数值, 而孔压则是由上部至下部依次回落至初始状态, 说明启动后堆积体含水量迅速下降, 而孔压则是由堆积体上部转移到了下部, 堆积体流态化启动时呈现整体失稳自上而下滑动, 抬高了坡脚部分的坡面高度, 导致堆积体下部的孔压会有一个短暂的稳定过程且大于上部和中部的孔压值。

综合此类启动模式的试验条件、启动现象及孔隙水压力变化特征, 流态化型启动方式主要是由于矿渣颗粒被水流渗透破坏而形成的。此类启动方式的渣堆细颗粒含量都较少, 坡面径流和内部入渗速率相当, 即渣堆是经历了一个从上到下完全贯通饱和的过程。坡脚在达到饱和后, 率先在水流的推动作用整体坍塌、移动。而上部渣堆在整体已达到饱和的情况下, 由于坡脚渣堆的失稳, 致使其失去底部支撑力, 在蓄积的水流压力和已经贯通其中的内部径流推动下, 整体发生坍塌、移动, 形成大流量、大重度的泥石流。

### (3) 顶面侵蚀+流态化型启动方式。

分析 D19 组试验数据, 得出顶面侵蚀+流态化型泥石流孔隙水压力和体积含水率变化特征(图 14)。

结果显示, 试验开始后, 堆积体含水率也会有一个升降过程, 但总体持续时间上要大于流态化方式启动时间, 主要具有以下 3 方面特征: ①堆积体形成顶部表面径流和底面径流, 此时含水率传感器和孔压传感器会先后达到峰值, 但在坡脚部分因坡面径流和底面径流作用先达到饱和状态并受到一定的冲蚀作用下先行启动后, 坡脚部分的含水率传感器会突降至初始状态, 此位置的孔压传感器也会稳定下来, 位于中部和上部的孔压传感器因表层已启动会有一个突降的现象。②当坡脚启动后水流在堆积体内部继续入渗, 表层以侵蚀下切形式继续启动, 此过程中上部堆积体的含水率会逐渐下降, 堆积体中部逐渐达到饱和状态, 体积含水率会有一个微小的抬升, 而后开始下降, 而 3 个位置的孔压传感器数值则会相对稳定在一个状态持续到试验结束。③此种启动方式下, 传感器的数据在堆积体启动结束前会有一个相对稳定的过程。

综合此类启动模式的试验条件、启动现象及孔隙水压力变化特征, 顶面侵蚀+流态化型启动方式主要是由于矿渣颗粒同时被水流渗透和径流冲蚀破坏而

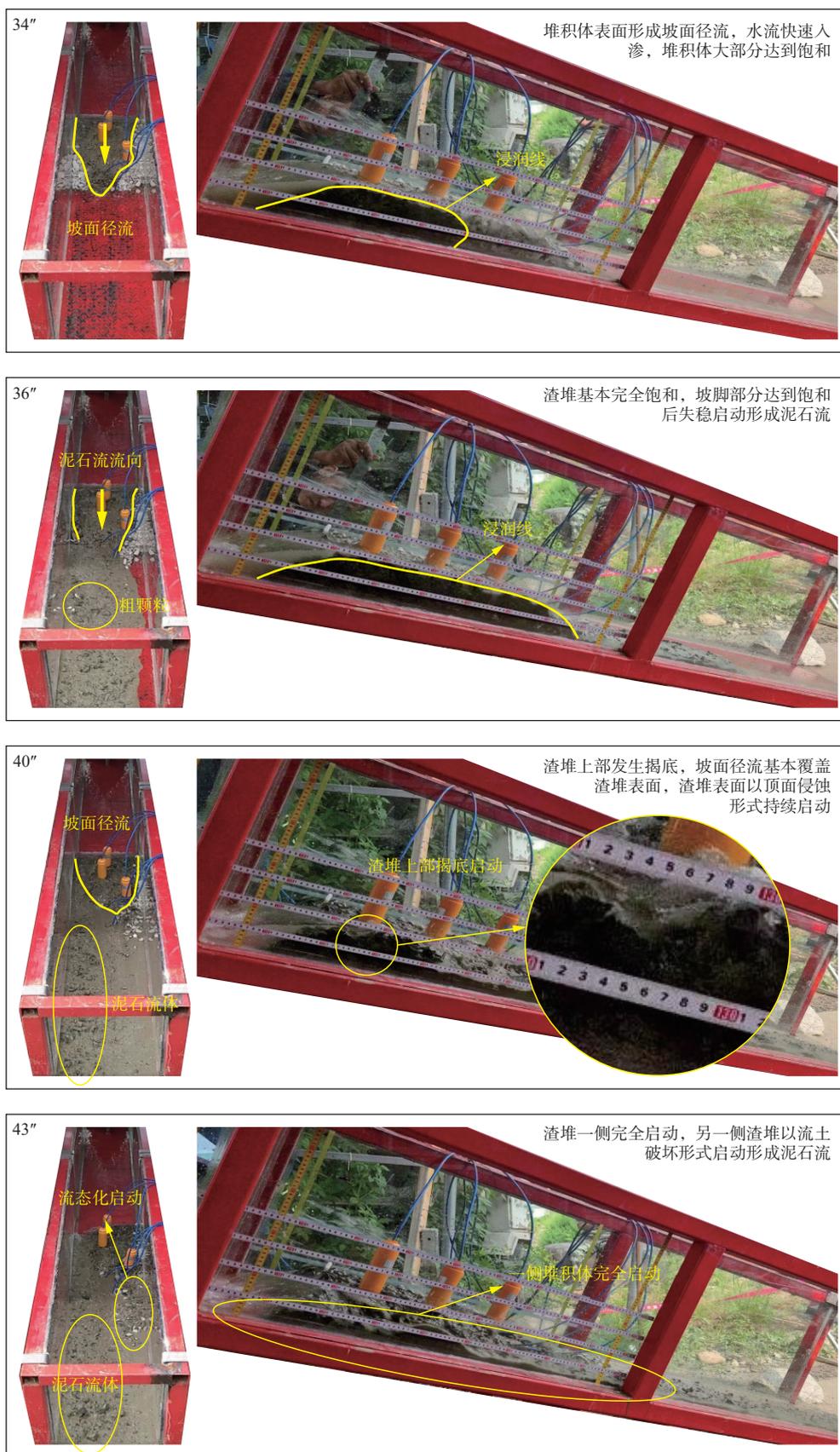


图11 D19 组次试验泥石流启动过程

Fig. 11 Debris flow start-up process of sub-test D19

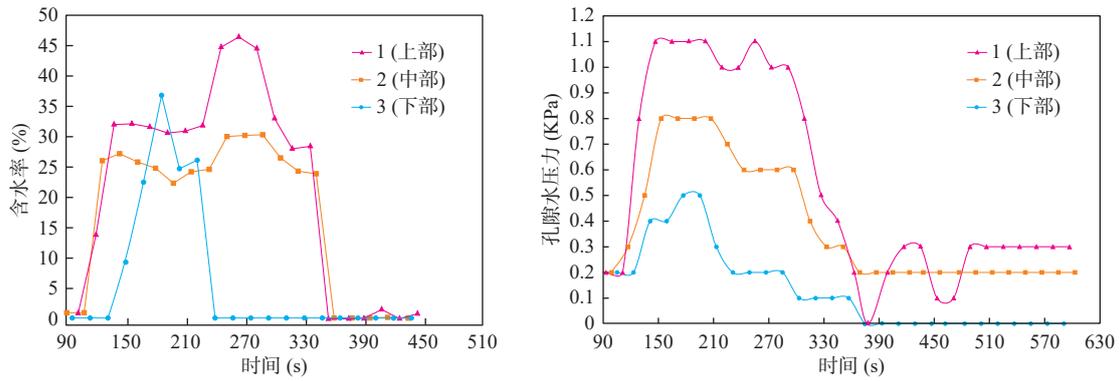


图12 D24组次试验体积含水率和孔隙水压力变化过程

Fig. 12 Variation process of volumetric water content and pore water pressure in D24 sub-test

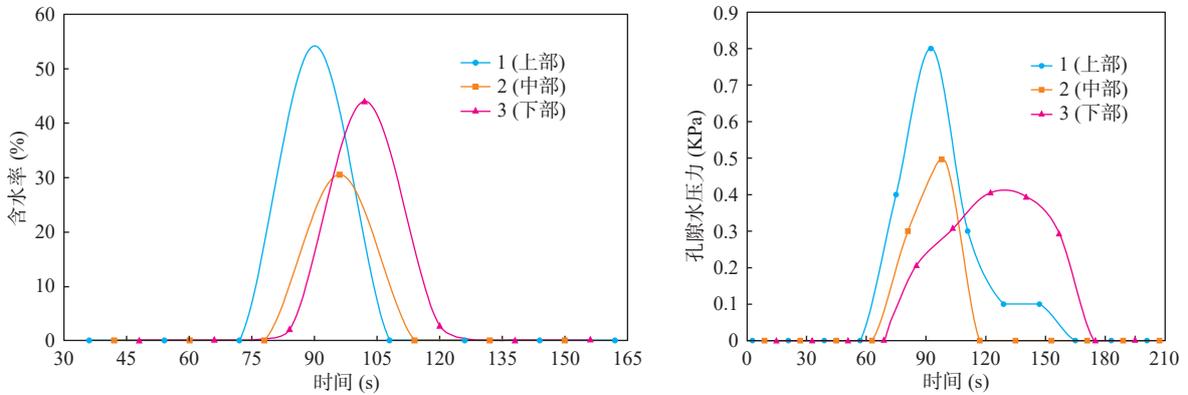


图13 D07组次试验体积含水率和孔隙水压力变化过程

Fig. 13 Variation process of volumetric water content and pore water pressure in D07 sub-test

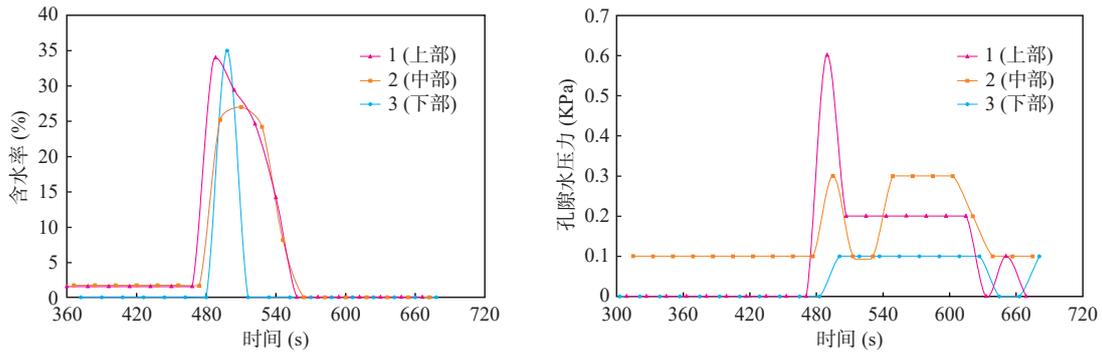


图14 D19组次试验体积含水率和孔隙水压力变化过程

Fig. 14 Variation process of volumetric water content and pore water pressure in D19 sub-test

形成的。此类启动方式的渣堆细颗粒含量都较少,冲水流量也不大,水流在渣堆内部的渗透速率要大于其形成坡面径流的速率。由于冲水流量较小,矿渣颗粒之间的孔隙又较大,故水流会在渣堆内部由上至下逐步渗透使渣堆达到饱和状态,降低了渣堆颗粒间的剪切力在渣堆完全饱和后,渣堆由下至上开始由发生局部的坍塌到整体揭底启动形成泥石流。同时,在渣堆

表面形成坡面径流带走渣堆中的细颗粒形成浑浊的泥流,增加了对渣堆表层颗粒的冲击力,带动渣堆由表向里层层剥蚀启动。

### 3.3 孔隙水压力分析

通过对泥石流不同启动方式传感器数据的观察与分析发现,无论是何种启动方式孔隙水压力都会有一个突变升高的过程,当孔隙水压力达到峰值时松散

堆积物开始启动。通过对相同冲水流量(1.48 L/s)下不同坡度和不同细颗粒含量的孔隙水压力进行分析得出(图 15、图 16), 水槽坡度越大, 泥石流启动所需的外动力越小, 相应的泥石流启动孔隙水压力也随之减小。在坡度为 5°时, 启动孔隙水压力最大, 为 1 KPa; 坡度为 20°时, 启动孔隙水压力最小, 为 0.5 KPa。在相同坡度、不同级配条件下, 启动孔隙水压力与细颗粒含量变化关系不明显。

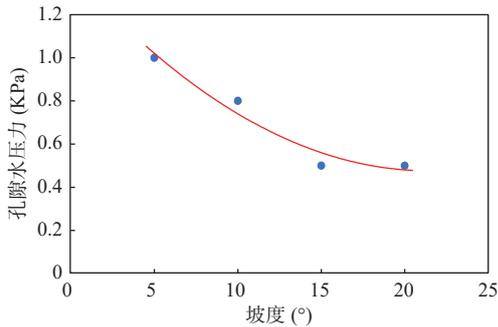


图 15 泥石流启动临界孔压与坡度变化关系图

Fig. 15 The relationship between the critical pore pressure and slope change at the start of debris flow

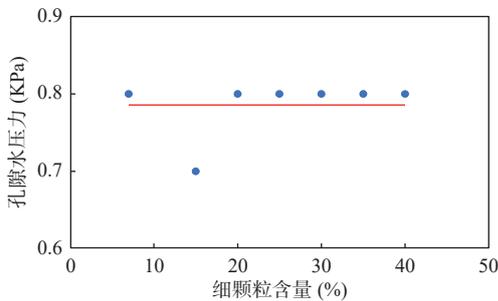


图 16 泥石流启动临界孔压与细颗粒含量变化关系图

Fig. 16 The relationship between the critical pore pressure and the content of fine particles at the start of debris flow

### 3.4 不同冲水流量条件下泥石流启动分析

本组别试验为 D01~D15 组, 各组次试验相同的条件是: 固定底床坡度为 10°, 采用图 3 所示级配散粒干渣 40 kg, 以 10 cm 厚度、70 cm 长度堆置于底床具有一定粗糙度的矩形水槽物源区, 同时在试验材料底部等间距(间隔 20 cm)埋设 3 组孔隙水压力传感器, 在试验材料顶部表面等间距(间隔 20 cm)插入 3 组体积含水率传感器。在上述试验条件下, 通过改变每次试验冲水流量, 测定不同冲水流量条件下泥石流启动临界水量。试验结果见表 6、图 17。

对表 6 所示试验数据进行回归分析, 得到如下关系式:

表 6 不同冲水流量条件下泥石流启动临界水量

Tab. 6 Critical water volume for debris flow initiation under different flushing flow conditions

试验组次	物源状态	细颗粒含量 (%)	底床坡度 (°)	冲水流量 (L/s)	临界水量 (L)
D01	散粒干渣	7	10	0.82	42.94
D02	散粒干渣	7	10	0.88	39.56
D03	散粒干渣	7	10	1.19	34.31
D04	散粒干渣	7	10	1.24	33.21
D05	散粒干渣	7	10	1.40	30.22
D06	散粒干渣	7	10	1.45	28.51
D07	散粒干渣	7	10	1.48	26.46
D08	散粒干渣	7	10	1.99	28.71
D09	散粒干渣	7	10	2.07	29.71
D10	散粒干渣	7	10	2.32	31.35
D11	散粒干渣	7	10	2.43	31.64
D12	散粒干渣	7	10	2.97	33.22
D13	散粒干渣	7	10	3.10	28.54
D14	散粒干渣	7	10	3.52	27.58
D15	散粒干渣	7	10	5.95	17.85

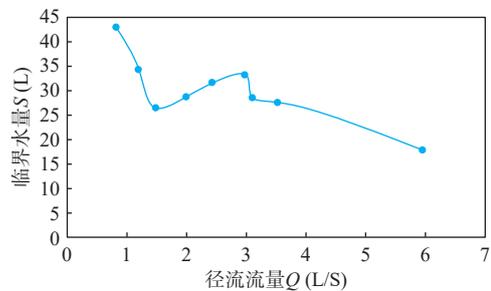


图 17 冲水流量与临界水量的关系

Fig. 17 Relationship between flushing water flow and critical water volume

$$S = \begin{cases} 17.117Q^2 - 60.315Q + 80.504 \\ (R = 0.9541, Q < 2L/s) \\ 20.312Q - 3.2614Q^2 + 1.6532 \\ (R = 0.9962, 2L/s < Q < 3L/s) \\ 1.6167Q^2 - 19.09Q + 74.219 \\ (R = 0.9475, Q > 3L/s) \end{cases} \quad (1)$$

试验结果表明, 当  $Q < 2$  L/s 时, 冲水流量越大, 临界水量越小, 存在一个最有利于泥石流启动的冲水流量 1.76 L/s; 当  $2$  L/s  $< Q < 3$  L/s 时, 冲水流量越大, 临界水量越大, 存在一个最大临界水量 33.28 L; 当  $Q > 3$  L/s 时, 随着冲水流量增大, 临界水量又会减小, 最终趋于平稳, 在冲水流量达到 5.95 L/s 时后临界水量基

本稳定在 17.87 L 附近。

### 3.5 不同底床坡度条件下泥石流启动分析

本组别试验为 D16、D17、D07、D18、D19, 各组次试验相同的条件是: 试验采用图 3 所示级配散粒干渣 40 kg, 以 10 cm 厚度、70 cm 长度堆置于底床具有一定粗糙度的矩形水槽物源区, 同时在试验材料底部等间距(间隔 20 cm)埋设 3 组孔隙水压力传感器, 在试验材料顶部表面等间距(间隔 20 cm)插入 3 组体积含水率传感器, 冲水流量 1.48 L/s。通过改变底床坡度, 测定不同底床坡度条件下泥石流启动的临界水量。试验结果见表 7、图 18。

表 7 不同底床坡度条件下泥石流启动临界水量

Tab. 7 Critical water volume for debris flow initiation under different bed slope conditions

试验组次	物源状态	细颗粒含量 (%)	底床坡度 (°)	冲水流量 (L/s)	临界水量 (L)
D16	散粒干渣	7	5	1.48	71.23
D17	散粒干渣	7	8	1.48	53.44
D07	散粒干渣	7	10	1.48	26.46
D18	散粒干渣	7	15	1.48	19.27
D19	散粒干渣	7	20	1.48	15.01

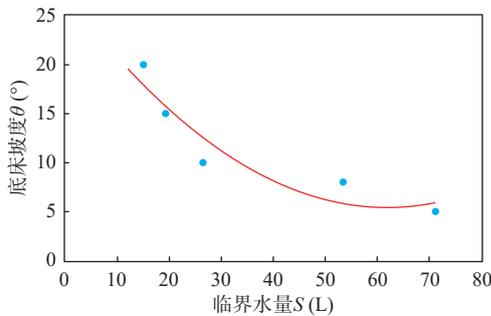


图 18 底床坡度与临界水量的关系

Fig. 18 The relationship between the slope of the bed and the critical water volume

对表 7 所示试验数据进行回归分析, 得到如下关系式:

$$S = 0.377 \theta^2 - 13.184\theta + 128.53 \quad (R = 0.9505) \quad (2)$$

式中:  $\theta$  为底床坡度;  $S$  为临界水量;  $R$  为相关系数。

试验结果表明, 底床坡度越大, 泥石流启动所需临界水量越少; 反之, 底床坡度越小, 临界水量越多, 并且存在一个最小坡度 5.59°和最小临界水量 13.48 L, 即当坡度大于 5.59°或临界水量大于 13.48 L 时, 可能启动形成泥石流。

### 3.6 不同颗粒级配条件下泥石流启动分析

本组试验为 D07、D20、D21、D22、D23、D24、D25 组, 各组次试验相同条件是: 试验采用图 3 所示级配散粒干渣 40 kg, 以 10 cm 厚度、70 cm 长度堆置于底床具有一定粗糙度的矩形水槽物源区, 同时在试验材料底部等间距(间隔 20 cm)埋设 3 组孔隙水压力传感器, 在试验材料顶部表面等间距(间隔 20 cm)插入 3 组体积含水率传感器, 固定底床坡度为 10°, 统一以 1.48 L/s 流量供水。通过改变底床颗粒级配, 测定不同颗粒级配条件下泥石流启动的临界水量。试验结果见表 8、图 19。

表 8 不同颗粒级配条件下泥石流启动临界水量

Tab. 8 Critical water volume for debris flow initiation under different particle gradation conditions

试验组次	物源状态	底床坡度 (°)	细颗粒含量 (%)	冲水流量 (L/s)	临界水量 (L)
D07	散粒干渣	10	7	1.48	26.40
D20	散粒干渣	10	15	1.48	18.84
D21	散粒干渣	10	20	1.48	17.36
D22	散粒干渣	10	25	1.48	15.20
D23	散粒干渣	10	30	1.48	14.93
D24	散粒干渣	10	35	1.48	16.00
D25	散粒干渣	10	40	1.48	16.21

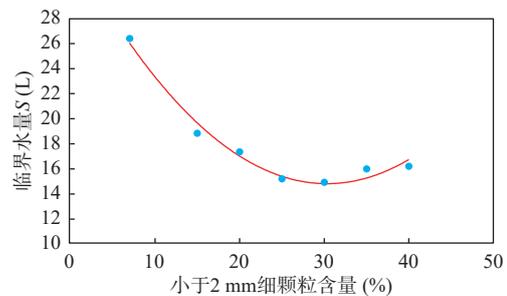


图 19 细颗粒含量与临界水量的关系

Fig. 19 Relationship between fine particle content and critical water amount

对表 8 所示试验数据进行回归分析, 得到如下关系式:

$$S = 0.0206m^2 - 1.2508m + 33.788 \quad (R = 0.9812) \quad (3)$$

式中:  $m$  为细颗粒含量;  $S$  为临界水量;  $R$  为相关系数。

试验结果表明, 临界水量与试验材料细颗粒含量呈二次函数关系, 而且当细颗粒含量达到 30.36% 时最有利于泥石流启动。当试验材料细颗粒含量达到这一数值前, 细颗粒含量越大, 启动时的临界水量越

少。也就是说,粗颗粒含量越大,启动时的临界水量越多。

本次实验所得不同冲水流量、底床坡度、级配条件下矿渣型泥石流启动临界关系与前人(徐友宁等,2009)研究成果具有趋势一致性,验证了研究成果的可靠性,且在其研究基础上进一步完善了较大冲水流量(极端降雨情况)下矿渣型泥石流启动临界条件的关系。

## 4 结论

(1)不同试验条件下,泥石流分别以不同方式启动:包括顶面侵蚀型、流态化型、顶面侵蚀+流态化型3种启动方式。

(2)不同启动方式下,矿渣堆积体内部孔隙水压力和体积含水率数据表现出不同的变化特征,泥石流启动临界孔隙水压力与底床坡度呈负相关关系,坡度为 $5^{\circ}$ 时,启动孔隙水压力最大,为1 KPa,坡度为 $20^{\circ}$ 时,启动孔隙水压力最小,为0.5 KPa;在相同坡度、不同级配条件下,泥石流启动孔隙水压力与细颗粒含量变化关系不明显。

(3)矿渣型泥石流启动临界水量随着冲水流量不断增大,呈现先减小、后增大、再减小趋势,冲水流量为1.76 L/s时最有利于泥石流启动;底床坡度越大、细颗粒含量越高,泥石流启动临界水量越少,当坡度大于 $5.59^{\circ}$ 或临界水量大于13.48 L时,有利于泥石流的启动,当细颗粒含量为30.36%时最有利于泥石流启动。

致谢:该项研究得到中国地质调查局西安地质调查中心侯光才研究员、徐友宁研究员、朱立峰正高级工程师,长安大学曹琰波副教授,中国地质调查局西安矿产资源调查中心张江华正高级工程师的悉心指导和栾川县自然资源局、栾川县气象局、栾川县金兴矿业有限责任公司的大力支持。同时,各位审稿专家认真审阅了本文,并提出了宝贵的修改意见,在此一并表示感谢。

## 参考文献(References):

曹琰波. 矿渣型泥石流启动机理试验研究[D]. 西安:长安大学, 2008.

CAO Yanbo. Experimental Study on Starting Mechanism of Slag

Debris Flow [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.

丛凯,李瑞冬,毕远宏. 基于FLO-2D模型的泥石流治理工程效益评价[J]. 西北地质, 2019, 52(3): 209-216.

CONG Kai, LI Ruidong, BI Yuanhong. Benefite Valuation of Debris Flow Control Engineering based on the FLO-2D Model[J]. Northwesten Geology, 2019, 52(3): 209-216.

费祥俊,舒安平. 泥石流运动机理与灾害防治[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.

FEI Xiangjun, SHU Anping. Mechanism of Debris Flow Movement and Disaster Prevention[M]. Beijing: Tsinghua University Publishing House, 2004.

黄家华,冯文凯. 台风暴雨矿渣型泥石流形成机制与动力特征——以兴宁乌石坑沟泥石流为例[J]. 地质论评, 2023, 69(4): 1387-1397.

HUANG Jiahua, FENG Wenkai. Formation Mechanism and Dynamic Characteristics of Mine-Slag Debris Flow in Typhoon Rainstorm: Take Wushikeng Gully in Xingning as an Example[J]. Geological Review, 2023, 69(4): 1387-1397.

洪磊,马润勇,章晓余. 青海加吾矿区玛日当沟泥石流启动机理研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(2): 472-479.

HONG Lei, MA Runyong, ZHANG Xiaoyu. Starting Mechanism of Debris Flow at Maridang Gully in Jiawu Gold Mine in Qinghai Tibetan Plateau[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(2): 472-479.

康志成,李焯芬,马嵩乃,等. 中国泥石流研究[M]. 北京:科学出版社, 2004: 56-59.

KANG Zhicheng, LI Chuofen, MA Ainai, et al. Research on Debris Flow in China[M]. Beijing: Science Press, 2004: 56-59.

吕学军,倪化勇,徐如阁等. 四川峨边县蒋沟矿渣侵蚀泥石流成因与特征[J]. 水土保持研究, 2011, 18(03): 83-87.

LV Xuejun, NI Huayong, XU Ruge, et al. Formation and Characteristics of Mine-Slag Debris Flow from Jianggou Ravine in Ebian County Sichuan Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(03): 83-87.

李晓晨. 矿山排土场泥石流形成机理及其防治对策[J]. 化工矿物与加工, 2014, 43(5): 37-39.

LI Xiaochen. The Formation Mechanism of Debris Flow in Mine Dumps and its Prevention and Control Strategies[J]. Industrial Minerals & Sprocessing, 2014, 43(5): 37-39.

李宁,唐川,龚凌枫,等. 急陡沟道泥石流启动特征模型试验研究——以汶川县福堂沟为例[J]. 地质学报, 2020, 94(2): 634-647.

LI Ning, TANG Chuan, GONG Lingfeng, et al. An Experimental Study of Starting Characteristics of Steep Channel Debris Flow: A Case Study of the Futang Gully in the Wenchuan County[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(2): 634-647.

李书钦,高建恩,邵辉,等. 选沙对水力侵蚀比尺模拟试验侵蚀过程相似的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 6-10.

LI Shuqin, GAO Jian'en, SHAO Hui, et al. Influence of Sand Selection on Erosion Process in Hydraulic Erosion Scale Simulation

- Test[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(3): 6-10.
- 林斌, 张友谊, 罗珂, 等. 沟道松散物质起动模型试验及冲出量预测——四川省以北川青林沟为例[J]. *人民长江*, 2019, 50(5): 113-118+126.
- LIN Bin, ZHANG Youyi, LUO Ke, et al. Model Test of Channel Loose Material Starting and Prediction of Rush Amount: A Case Study of Qinglin Gully in the Beichuan County, Sichuan Province[J]. *People's Changjiang*, 2019, 50(5): 113-118+126.
- 刘兴荣, 崔鹏, 王飞, 等. 不同粒径级配条件下工程弃渣泥石流启动机理研究[J]. *工程地质学报*, 2018, 26(6): 1593-1599.
- LIU Xingrong, CUI Peng, WANG Fei, et al. Study on the Threshold Motion Mechanism of Engineering Slag Debris Flow with Different Particle Size Grading Conditions[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(6): 1593-1599.
- 罗阳. 攀枝花徐家沟矿渣型泥石流起动机理及防治对策研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
- LUO Yang. Research on Starting Mechanism and Prevention Countermeasures of Slag Debris Flow in Xujia Gully, Panzhihua [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- 孟华君, 姜元俊, 张向营. 基于模型试验的震区沟道泥石流阈值研究[J]. *人民黄河*, 2017, 39(7): 80-85+95.
- MENG Huajun, JIANG Yuanjun, ZHANG Xiangying. Study on Threshold of Debris Flow in Seismic Zone Based on Model Test[J]. *People's Yellow River*, 2017, 39(7): 80-85+95.
- 倪化勇, 唐川. 中国泥石流起动物理模拟试验研究进展[J]. *水科学进展*, 2014, 25(04): 606-613.
- NI Huayong, TANG Chuan. Advances in the Physical Simulation Experiment on Debris Flow Initiation in China[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(04): 606-613.
- 乔建平, 李明俐, 杨宗佶, 等. 基于模型试验的泥石流坡面物源启动预警模型[J]. *水科学进展*, 2018, 29(1): 64-72.
- QIAO Jianping, LI Mingli, YANG Zongji, et al. Early Warning Model of Debris Flow Slope Source Based on Model Test[J]. *Progress in Water Science*, 2018, 29(1): 64-72.
- 唐亚明, 武立, 冯凡, 等. 泥石流风险减缓措施及经济决策——以山西吉县城北沟为例[J]. *西北地质*, 2021, 54(4): 227-238.
- TANG Yaming, WU Li, FENG Fan, et al. Risk Mitigation Measures and Economic Decisions on Debris Flow: Taking Begou of Jixin County, Shanxi Province as an Example[J]. *Northwestern Geology*, 2021, 54(4): 227-238.
- 王永清, 宋卫东, 杜翠凤, 等. 金属矿山井下泥石流发生机理分析[J]. *金属矿山*, 2006(8): 62-67.
- WANG Yongqing, SONG Weidong, DU Cuifeng, et al. Mechanism Analysis of Mud-Rock Flow Occurrence in Underground Metal Mines[J]. *Metal Mine*, 2006(8): 62-67.
- 王锴, 朱涛, 苏生瑞, 等. 颗粒级配对矿渣型泥石流启动影响的机理研究[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2019, 36(4): 90-97.
- WANG Kai, ZHU Tao, SU Shengrui, et al. The Influence Mechanism of Grain Gradation on Initiation of Slag Type Debris Flows[J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2019, 36(4): 90-97.
- 王协康, 方铎. 泥石流模型试验相似律分析[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2000(3): 9-12.
- WANG Xiekang, FANG Duo. Similarity Law Analysis of Debris Flow Model Test[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2000(3): 9-12.
- 徐友宁, 曹琰波, 张江华, 等. 基于人工模拟试验的小秦岭金矿区矿渣型泥石流起动研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(7): 1388-1395.
- XU Youning, CAO Yanbo, ZHANG Jianghua, et al. Research on Starting of Mine Debris Flow based on Artificial Simulation Experiment in Xiao Qingling Gold Ore Area[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(7): 1388-1395.
- 徐友宁, 何芳, 袁汉春, 等. 中国西北地区矿山环境地质问题调查与评价[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
- XU Youning, HE Fang, YUAN Hanchun, et al. Investigation and Evaluation of Mine Environmental Geology in Northwest China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006.
- 杨敏, 徐友宁. 小秦岭金矿区矿渣型泥石流成因机理及防治对策[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2021.
- YANG Min, XU Youning. Formation Mechanism and Prevention Countermeasures of Slag Debris Flow in Xiaqingling Gold Ore Area[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2021.
- 张丽萍, 唐克丽. 矿山泥石流[M]. 北京: 地质出版社, 2001: 1-9.
- ZHANG Liping, TANG Keli. Mine Debris Flow[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2001: 1-9.
- Berti M, Simoni A. Experimental evidences and numerical modeling of debris flow initiated by channel runoff[J]. *Landslides*, 2005, 2(3): 171-182.
- Gregoretti C, Fontana D G. The triggering of debris flow due to channel-bed failure in some alpine headwater basins of the Dolomites: analyses of critical runoff[J]. *Hydrol Process*, 2008, 22(13): 2248-2263.
- Hungr O, Dawson R F, Kent A, et al. Rapid flow slides of coal mine waste in British Columbia, Canada[A]. In: Evans S G, DeCraf J V (eds.). *Catastrophic landslides: Effects, occurrence and mechanisms: Boulder, Colorado*[M]. Geological Society of America Reviews in Engineering Geology, 2002, 15: 191-208.