

文章编号: 1673-9469(2019)04-0090-08

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.04.015

## 颗粒级配对矿渣型泥石流启动影响的机理研究

王 楷<sup>1</sup>, 朱 涛<sup>1</sup>, 苏生瑞<sup>1\*</sup>, 索蔚辰<sup>1,2</sup>

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 为了探究颗粒级配对矿渣型泥石流启动影响的机理, 以陕西省潼峪金矿区内4条泥石流沟为研究对象, 通过现场调查、室内试验和数值模拟, 揭示了颗粒级配对矿渣型泥石流启动过程的影响机理。结论如下: 随着细颗粒含量的增加, 矿渣的抗剪强度、渗透性均呈降低趋势, 且饱和状态影响程度更为显著; 借助室内实验和数值实验获得了各型级配矿渣的宏观参数和微观参数; 矿渣的颗粒级配通过改变渣体的抗剪强度和渗透性, 进而影响到矿渣受力情况和结构破坏模式, 最终来影响矿渣型泥石流的启动难易程度。

**关键词:** 矿渣型泥石流; 颗粒级配; 数值模拟; 启动机理

**中图分类号:** P642.23

**文献标识码:** A

## The Influence Mechanism of Grain Gradation on Initiation of Slag Type Debris Flows

WANG Kai<sup>1</sup>, ZHU Tao<sup>1</sup>, SU Shengrui<sup>1\*</sup>, SUO Weichen<sup>1,2</sup>

(1. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Shaanxi Xi'an 710054;

2. China Railway First Survey & Design Institute Group Co., Ltd, Shaanxi Xi'an 710054)

**Abstract:** In order to study the mechanism of the influence of particle size on the start-up of slag debris flow, we took four debris flow gullies in Tongyu gold mining area of Shaanxi Province as the research objects. Through field investigation, laboratory test and numerical simulation, we revealed the mechanism of the influence of particle size on the start-up process of slag debris flow. The main conclusions reached are as follows: with the increase of fine particle content, the shear strength and permeability of slag decrease, and the effect of saturation state is more significant; the macro and microcosmic parameters of each grading slag are obtained by laboratory and numerical experiments; the grain grading of the slag can change the shear strength and the permeability of the slag body, and then influence the stress condition and the structure failure mode of the slag, and finally influence the start-up difficulty of the slag-type debris flow.

**Key words:** slag-type debris flow; grain-size distribution; numerical simulation; mechanism of debris flow

矿渣型泥石流是矿产资源开发活动中废石弃渣不合理堆排引发的一种地质灾害类型。在矿产资源开发中, 弃渣在沟谷内不合理堆放, 会造成沟岸斜坡失稳、河道挤占、沟道内松散堆积物储量增加, 在强降雨等外界条件的影响下, 易使非泥石流沟演变为泥石流沟, 低频泥石流沟演变为高频泥石流沟,

造成严重的生命财产损失<sup>[1-3]</sup>。

国内外学者在矿山泥石流启动条件和机理研究方面取得了一些成果, 并对泥石流模型试验积累了大量的经验<sup>[4-8]</sup>。前人对矿渣型泥石流的启动机理的研究主要侧重于底床坡度、临界水量和物源矿渣力学性质改变这几个方面, 虽然对颗粒级配方面也有

收稿日期: 2019-10-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(4167020392)

作者简介: 王楷(1994-), 男, 山西运城人, 硕士研究生, 主要从事地质灾害等方面的研究。\*通讯作者: 苏生瑞(1963-), 男, 甘肃庆阳人, 博士, 教授, 主要从事地质灾害防治方面的研究。

研究,但由于早期试验条件等因素的限制,多数学者并未考虑水分下渗、细颗粒迁移以及内部应力演变,因此许多模型实验数据并不能反映矿山泥石流启动的真实情况。泥石流颗粒级配是土体的自然属性,对泥石流的启动和易发性产生重要影响,弃渣的颗粒大小级配不同在泥石流形成过程中表现特征差别极大。本文以陕西省潼峪金矿区内泥石流沟为研究对象,探究颗粒级配对渣型泥石流的启动影响机理,为矿区泥石流预警和防治提供依据。

### 1 研究区概况

研究区位于陕西省潼关县安乐镇,属暖温带大陆性季风气候,年平均降雨量 645.8 mm,最大降雨量 984.7 mm,集中在 6~9 月,区内降雨量与汇水面积均较大,汛期沟道水流量大,有利于泥石流的形成。研究区属深山峡谷型地貌,各支沟的上游汇水面积较大,且物源丰富,沟谷形态多呈“U”字型或“V”字型,地形坡度均较陡,有利于泥石流的流通。矿渣主要堆积于河道及其两侧斜坡和支沟内,母岩为片麻岩,以砾砂及块石为主并含有粉细砂,采矿废渣以砂砾石、块石为主,颗粒松散无粘结,透水性强,粒径 0.1~45 cm 不等,级配较差,堆积

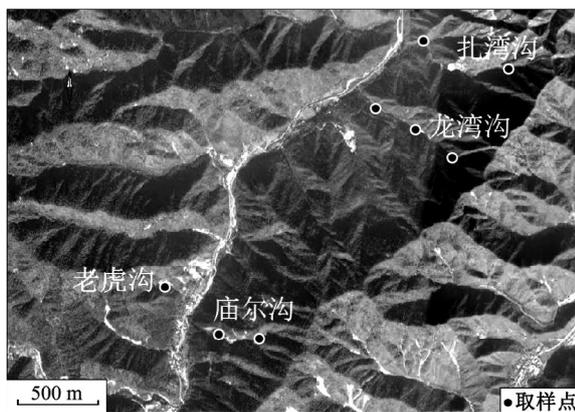


图1 研究对象分布图

Fig.1 The distribution map of study object

体厚度 3~15 m 不等。区内(图1)矿渣的任意堆放不仅形成了稳定性较差的边坡,而且沟道中的矿渣易随洪水冲出沟口,顺坡堆积,堵塞沟道,形成矿渣型泥石流灾害。根据调查,本文所选4条泥石流沟多为此种类型,研究对象及取样点分布见图1。

### 2 矿渣物理力学特性研究

#### 2.1 矿渣颗粒级配特征

矿渣作为泥石流的主要物源,其粒径级配反映了不同颗粒组成占总量的百分数,直接影响其容重、渗透性、抗剪强度以及压实性。崔鹏等<sup>[12]</sup>认为颗粒级配是决定松散堆积体结构和连接强度的主要因素,并且随着细颗粒含量的不同,其响应程度差异明显。现场调查发现,4条支沟矿渣岩性组成相近,粗颗粒( $d > 2$  mm)含量占据很大比重,细颗粒含量规律为龙湾沟最大,依次为:扎湾沟、庙尔沟、老虎沟。4条支沟矿渣粒径特征如表1,颗粒级配累积曲线见图2。

综上所述可见,矿渣粒径分布较广,4条泥石流沟小于 2 mm 的砂粒级含量分别占总量的比例为老虎沟(1.41%)、庙尔沟(8.27%)、扎湾沟(13.32%)、龙湾沟(18.50%)。不均匀系数  $C_u$  和曲率系数  $C_c$  显示,老虎沟、庙尔沟和龙湾沟的矿渣颗粒级配不良;扎湾沟矿渣级配良好。细颗粒含量具

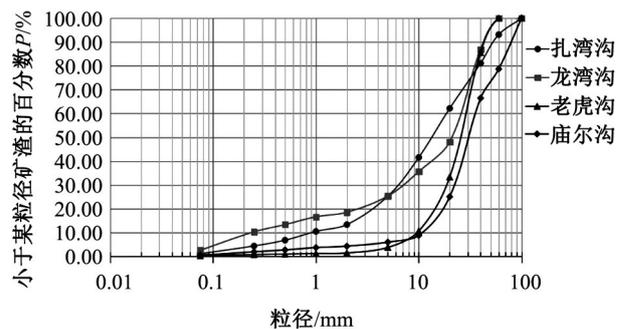


图2 研究区各泥石流沟矿渣的颗粒级配累积曲线

Fig.2 Particle gradation accumulation curve of each debris flow ditch in the study area

表1 研究区各泥石流沟矿渣颗粒级配特征分析表

Tab.1 The analysis of grading characteristics of slag particles in each debris flow ditch in the study area

试样编号	限制粒径 $d_{60}/mm$	中间粒径 $d_{50}/mm$	有效粒径 $d_{10}/mm$	不均匀系数 $C_u$	曲率系数 $C_c$
龙湾沟 (I型级配)	25.62	7.38	0.24	106.75	8.86
扎湾沟 (II型级配)	18.81	6.46	0.91	20.67	2.44
庙尔沟 (III型级配)	35.84	22.59	11.87	3.02	1.20
老虎沟 (IV型级配)	28.80	19.16	9.77	2.95	1.30

有较好的梯度性变化特征。根据《滑坡崩塌泥石流灾害调查规范》(DZ/T 0261—2014)以及孟河清<sup>[13]</sup>等对泥石流颗粒级配特征的研究,区内由矿渣为物源形成的应为大粒径、大跨度的非典型水石流。按各支沟细颗粒含量降低趋势进行颗粒级配划分,龙湾沟、扎湾沟、庙尔沟和老虎沟矿渣分别为 I 型级配、II 型级配、III 型级配和 IV 型级配。

### 2.2 矿渣抗剪强度特征

为了获得数值模拟所需参数并探究细颗粒含量对矿渣抗剪强度特征的影响,采用大型直剪仪对试样进行剪切试验,分别制备天然与饱和状态的试样,每组试样依次施加 100、200、300、400 kPa 四级垂直荷载,得出  $\sigma$ - $\tau$  关系曲线,计算得出各泥石流沟矿渣的剪切强度指标,并根据各试样细颗粒含量由小到大,绘制天然状态和饱和状态下粘聚力及内摩擦角变化趋势,如图 3。

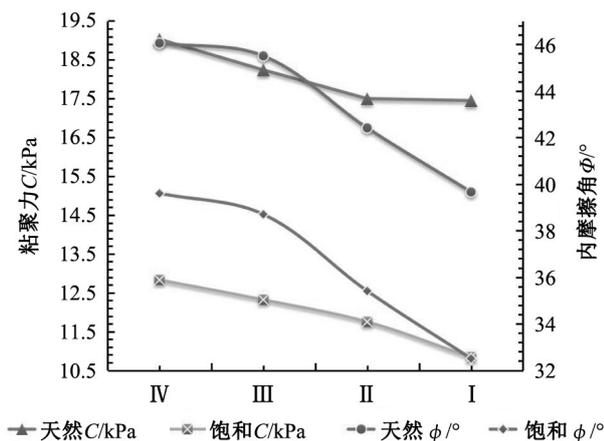


图 3 矿渣抗剪强度变化趋势  
Fig.3 The change trend of slag shear strength

结果表明,随着试样中细颗粒含量的增加,天然状态下和饱和状态下内摩擦角  $\phi$  和粘聚力  $C$  均明显呈降低趋势,且天然状态均大于饱和状态。对比前述筛分结果,老虎沟和庙尔沟试样的粗粒含量相近且均大于 90%,细颗粒含量较低,粗颗粒形成骨架结构,表现为内摩擦角较大;扎湾沟和龙湾沟试样的细颗粒含量增大,但粗颗粒依然占据了很大比例,细颗粒将骨架间的孔隙部分填充,粗颗粒间连接作用减弱,内摩擦角和粘聚力均降低较为明显。对比不同级配下渣体的抗剪强度变化,细颗粒含量大的矿渣抗剪强度较低,而饱和状态下对矿渣的抗剪强度影响更为明显,在暴雨饱和状态下更易启动成为泥石流。

### 2.3 矿渣渗透特征

王裕宜<sup>[11]</sup>等研究表明,渗透系数对于探究泥石流启动的模型具有很大的实际意义。使用 TSH051 型自循环达西渗透测定仪对研究区不同级配矿渣样品做渗透试验,探究细颗粒的存在对渣体渗透性的影响规律,得到细颗粒含量与渗透系数的关系如图 4。

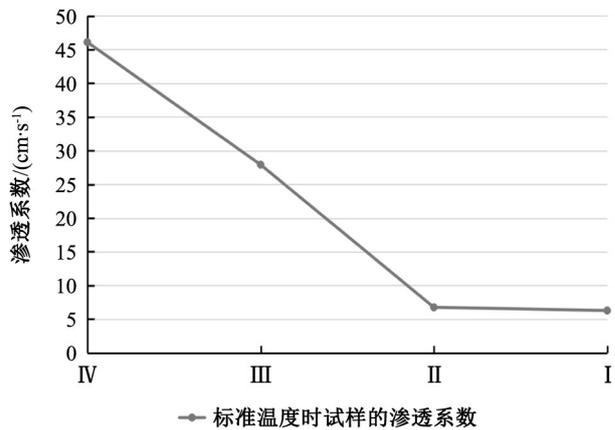


图 4 渗透系数变化趋势  
Fig.4 The change trend of permeability coefficient

对比分析图 4 与颗粒级配特征可得:整体上矿渣的渗透系数与其细颗粒含量呈负相关,粗颗粒含量相近,渗透系数也较为相似。区内泥石流沟矿渣的渗透系数:老虎沟最大,依次为庙尔沟、扎湾沟、龙湾沟。研究区矿渣粗颗粒含量均大于 80%,有的甚至高于 90%,具有高渗透性,排泄能力较强。细颗粒含量大的下渗程度小,容易形成部分饱和;细颗粒含量小的下渗程度大,颗粒间孔隙会形成泄水通道,使水分快速通过。在暴雨状态下,降水快速流通而很难产生静水压力,水流冲刷主要产生动水压力为颗粒迁移提供启动动能,易发生内部侵蚀而引发深层性整体破坏;细颗粒含量增加会主要集中在底部,降低下部的渗透性,产生局部静水压力,影响渣体的剪切特性,渣体表层与内部受力不同,可能出现分层破坏。

为了更为直观深入地揭示颗粒级配对矿渣型泥石流启动的影响机理,采用 PFC 2D 数值模拟的方法对暴雨饱和状态下的矿渣型泥石流启动过程进行模拟。本次试验采用控制底床坡度和水源补给为不变量,通过改变物源区矿渣的颗粒级配,模拟泥石流在暴雨饱和工况下的形成过程,从位移特征、速度特征、应力演变三个方面分析模拟结果,分析颗粒级配对矿渣型泥石流的启动影响机理。

### 3 矿渣型泥石流启动过程的数值模拟分析

#### 3.1 模拟参数的确定

由于计算模型需要输入的是碎屑物的细观参数，而室内试验仅能获得矿渣的宏观物理力学参数<sup>[12]</sup>，为了准确快速地确定细观参数，对各模型进行了直

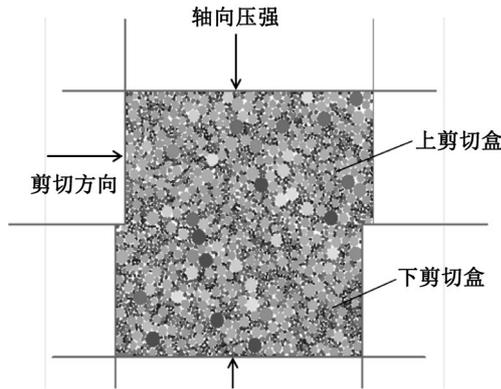


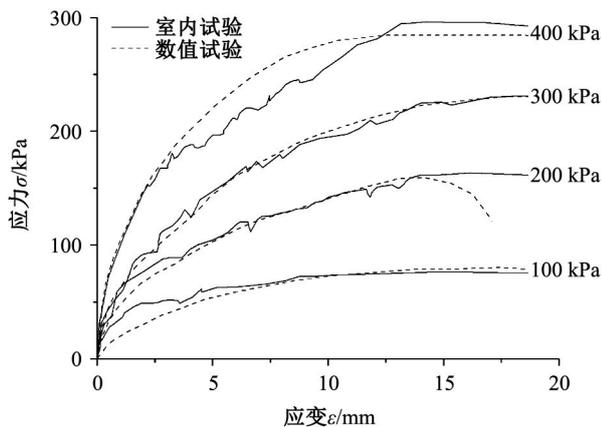
图 5 直剪试验数值模型

Fig.5 The test numerical model of direct shear

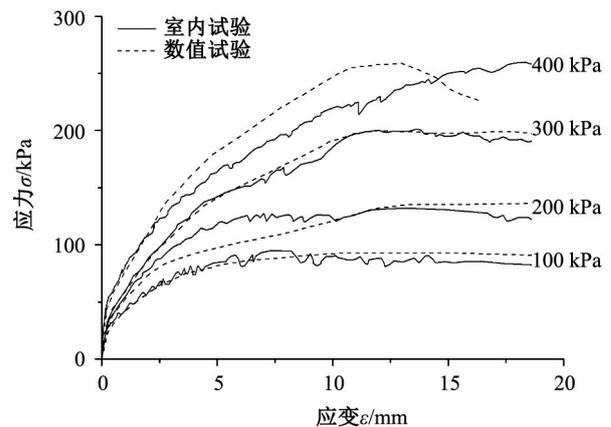
剪数值试验。通过直剪数值试验来模拟室内矿渣的大型直剪试验，刚性墙来模拟剪切盒(图 5)，并引入能较好模拟颗粒间抗拉、抗剪和承受弯矩等黏性土力学特征的平行黏结模型。在不同竖向荷载下进行多次验算，记录试验数据并绘制应力应变曲线，直到与室内试验的曲线拟合结果基本一致为止，如图 6，将该数值试验取表 2 中的细观参数作为模型中的参数。

#### 3.2 数值模型的构建

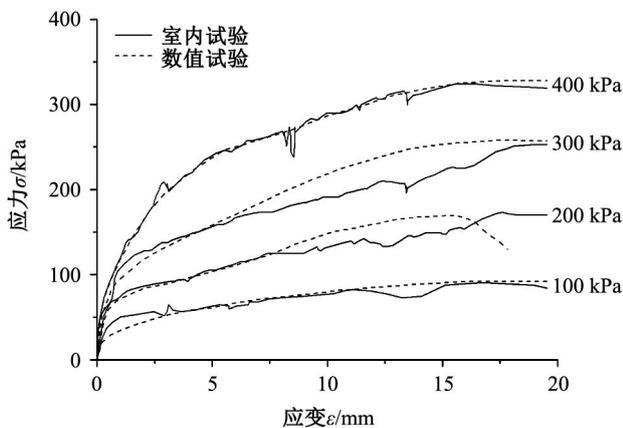
由于各支沟矿渣岩性相近，龙湾沟具备较为明显的泥石流沟基本特征，因此选取龙湾沟纵剖面作为数值模拟的模型(图 7)，在模型中建立了实线为渣堆的边界；虚线为原始地面线作为边界条件来限制边界球体的位移和速度；渣堆和下伏基岩自由接触。根据四种颗粒级配在矿渣范围内生成颗粒，生成完毕后删除边界，使其在重力作用下达到天然状态下的稳定，分别生成颗粒 12 510 个、10 284 个、



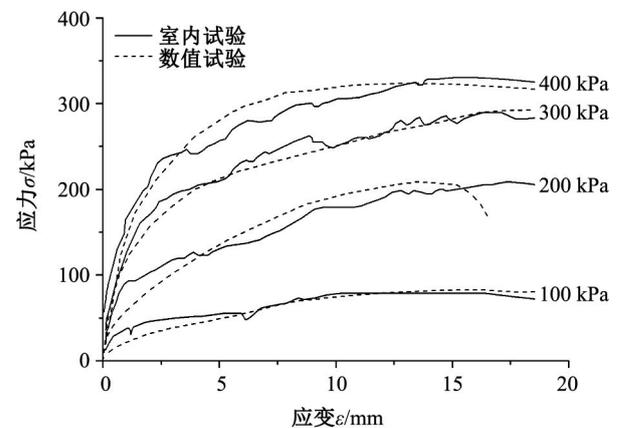
(a) I 型级配



(b) II 型级配



(c) III 型级配



(d) IV 型级配

图 6 饱和状态各级配应力应变曲线

Fig.6 The change curves of stress and strain in saturated state

表2 细观参数统计表  
Tab.2 Metric parameter statistics table

名称	法向刚度 (N·m <sup>-1</sup> )	切向刚度 (N·m <sup>-1</sup> )	法向强度 /MPa	切向强度 /MPa	内摩擦角 /°	摩擦系数
I型级配	1 × 10 <sup>8</sup>	1 × 10 <sup>7</sup>	0.4	0.8	32.50	0.25
II型级配	1 × 10 <sup>8</sup>	1 × 10 <sup>7</sup>	0.8	1.0	35.40	0.27
III型级配	1 × 10 <sup>8</sup>	1 × 10 <sup>7</sup>	1.2	1.8	38.70	0.31
IV型级配	1 × 10 <sup>8</sup>	1 × 10 <sup>7</sup>	0.9	1.6	39.60	0.32

9 181个和9 433个。对于泥石流,为了记录渣堆不同位置运动特征,分别在渣堆前中后部共设置7个监测球,如图8。

### 3.3 模型在饱和条件下启动过程

泥石流的启动阶段实际上是矿渣的二次运动堆积过程,由于底部较上部更为密实,使得底部颗粒的速度低于顶部,在局部形成了一个隆起的高度,对应了泥石流运动过程中常见的“龙头”现象,在这里认为泥石流龙头现象在产生时已经开始了启动。以前期建立的天然状态下的模型为基础,在暴雨饱和条件下达到水力启动,将渣堆的细观参数调整至饱和状态,并对四种级配采用相同的启动冲力,统计启动过程中的各项特征,分析颗粒级配对矿渣型泥石流启动影响的机理。



图7 数值模型墙体  
Fig.7 The numerical model wal

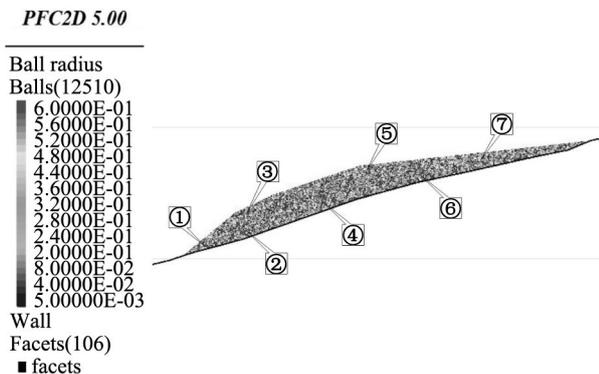


图8 监测球布设位置  
Fig.8 The placement position of monitor ball

### 3.3.1 泥石流颗粒的位移特征

结合图9及表3可见,四种级配的矿渣边坡均发生了二次堆积,产生明显的“龙头”现象。I型与II型级配启动所需时间较短,颗粒最大位移相似且较低,“龙头”总长较长,最大堆积高度较低;III型与IV型级配形成的泥石流龙头长度相对较短,但颗粒最大位移较大,堆积高度较高,随细颗粒减少形成时间逐渐增长。其中I型级配细颗粒含量最高,但启动时间反而比II型级配长,这与徐友宁<sup>[6]</sup>所提出的存在一个临界细粒物质含量值的观点相照应。当细粒物质含量达到这一临界值前,细粒物质含量愈大,泥石流越易启动。可见在其他启动条件相同的情况下存在一个最有利于矿渣型泥石流启动的颗粒级配,当细颗粒含量过高或者过低,都不利于泥石流的启动。

### 3.3.2 泥石流颗粒的速度特征

根据7处监测球记录的速度(图10),坡脚位置的1号监测球先于其他部位产生加速度,且启动之后速度高于其他位置,加速度最大;2号和3号监测球位置启动加速度仅次于坡脚位置;4号和5号监测球速度曲线基本一致;6号与7号位于渣堆尾部,启动加速度最小。I型、II型和III型级配的7处监测球在启动过程的速度均出现了极值,而后速度迅速降低并趋于稳定,这是由于在形成泥石流龙头时,隆起的颗粒阻碍了中后部的运动,导致速度降低;IV型级配的整体运动状态也符合这个规律,但1号监测球并没有出现速度上的极值,原因是由于缺少细颗粒,在运动时粒间接触较少,位于坡脚处的1号监测球并未参与到龙头的堆积过程中,而是一直沿沟道运动,因此速度一直在增大。

### 3.3.3 颗粒间应力演变

数值模型的初始接触应力能够清晰地反映渣堆颗粒间接触应力链的传导体系。粗颗粒之间的接触应力明显大于细颗粒且数量较多,彼此之间互相传递接触应力,支撑了整个渣堆的骨架结构,而细颗

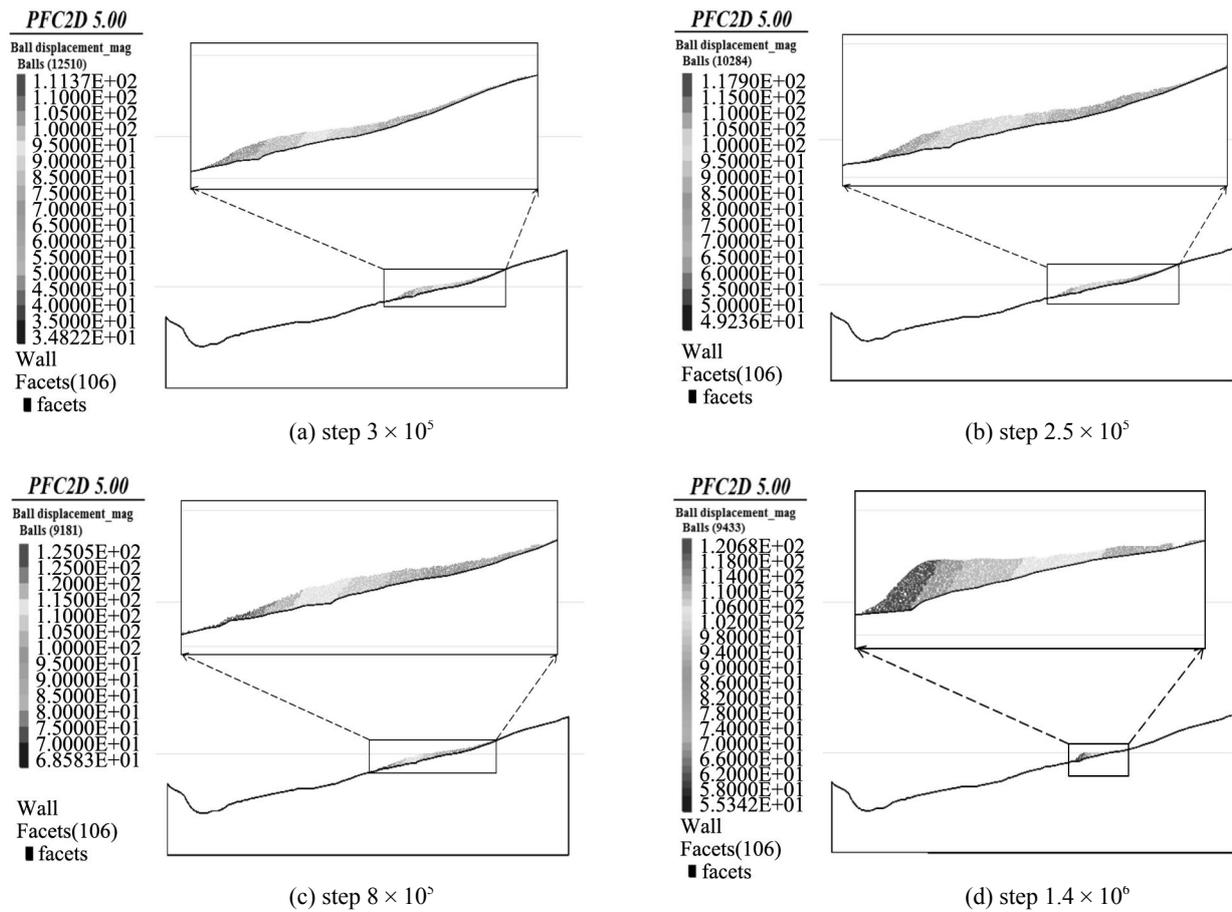


图 9 启动阶段颗粒位移云图

Fig.9 The particle displacement cloud map of start-up phase

表 3 位移特征统计表

Tab.3 Statistics of displacement characteristics

级配类型	龙头产生时间 $T_1$ (步长 $\times 10^4$ )	颗粒最大位移 $S_1$ /m	最大堆积高度 $H_1$ /m	“龙头”总长 $L_1$ /m
I	30	113	6	175
II	25	117	7	147
III	80	125	7.5	129
IV	140	120	14	82

粒则很少参与到完整的接触应力链体系当中，只是与周围的颗粒存在着一些接触应力。

泥石流在启动之时，如图 11。颗粒之间的接触应力与原始状态相比，完整性均遭到了破坏，普遍表现为表层应力链的断裂，随着渣体中粗颗粒含量增加，对渣堆底部的接触应力影响越来越大，应力链愈发不完整。I 型和 II 型级配的渣堆中的粗颗粒依然起到了对骨架的支撑作用，只有表层和局部出现应力链断开的情况，整体的应力链较为完整。相比之下 III 型与 IV 型级配的细颗粒含量较低，缺少细颗粒的连接作用，表现为 III 型级配的颗粒间存在多

处孔隙，应力链出现了多处中断；IV 型级配颗粒之间已经无法形成骨架结构，应力链几乎完全失效。渣堆的启动过程破坏模式表现出成层分块的特征，坡脚首先失稳滑动，坡面先于坡底产生破坏滑动，且在一定范围内细颗粒含量越高，这种现象越明显。

#### 4 颗粒级配对启动过程影响机理分析

可见：矿渣中黏粒成分极低，粘聚力也相应较低，在一定范围内随着细颗粒含量的增大，内摩擦角和渗透性均有不同程度的减小趋势，且饱和状态

下降低更为显著。颗粒级配相似的矿渣其抗剪强度和渗透性也较为接近。在数值模拟过程中，细颗粒含量高的矿渣，由于细颗粒迅速填充粗颗粒移动产生的空隙，较快地发生结构的破坏，在短时间开始启动，启动过程中表现出较完整的应力链。然而细颗粒含量高于某个临界值时，在其他启动条件相同的情况下启动难度会有所增加。而细颗粒含量低的矿渣，具有较高的抗剪强度，加之高渗透性在渣堆内部形成了排泄的通道，内部较小而颗粒最先发生迁移，发生内部掏蚀破坏，在启动动力有限的条件下需要经历更长时间的冲刷掏蚀作用，才能使得颗粒间的孔隙逐渐增大至破坏整体骨架结构，进而引发泥石流，而这种泥石流一旦启动便会具有较高的运动速度。

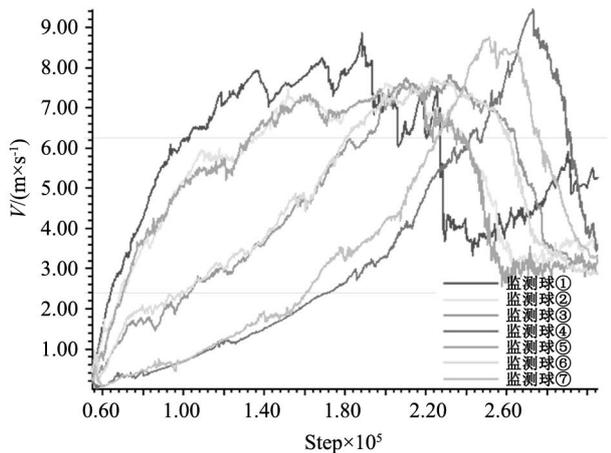
矿渣在天然状态下自然沉积，造成矿渣架构不均，渗透性和受力情况也不同，但各级配型矿渣均

产生分层破坏现象，细颗粒含量高的更为显著，而且最先启动的部位均为坡脚。细颗粒含量低的矿渣，高渗透性导致动水压力集中于中下部进行冲蚀，趋向于由内而外延伸的全面性破坏。而随着底部细颗粒含量的增加，细颗粒沉积降低了下部渗透性，在矿渣上部最先形成饱和带，显著降低其抗剪强度，动水压力集中作用于表层，使表层较早地发生启动，呈现出由浅至深的渐进型破坏。

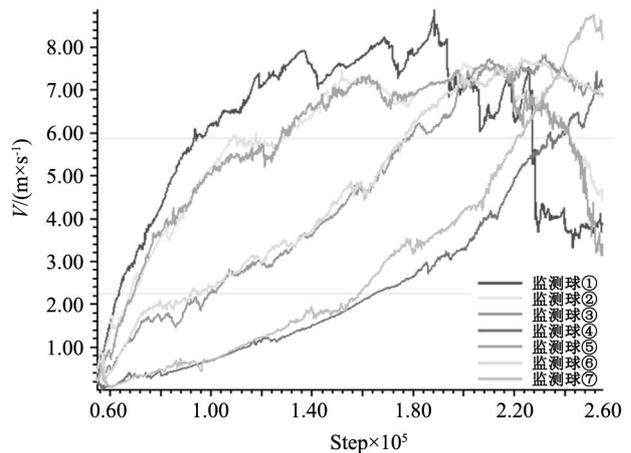
### 5 结论

1) 潼峪金矿区内 4 条泥石流沟矿渣粒径分布较广，从粉粒到碎石均存在。实验表明，随着矿渣中细颗粒含量增加，矿渣的渗透系数和抗剪强度逐渐降低，且饱和状态下的影响更为显著。

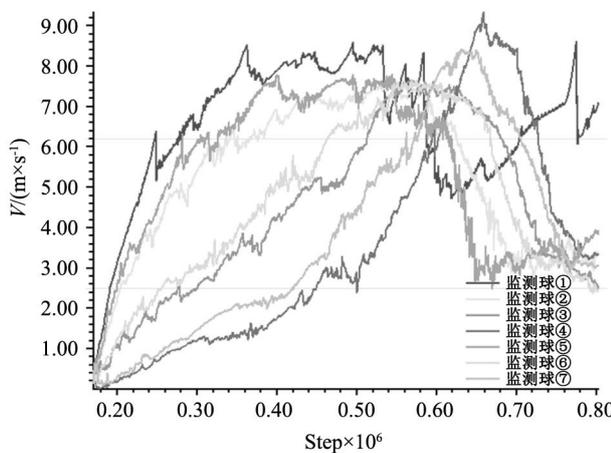
2) 在控制其他启动条件相同的情况下，当细粒



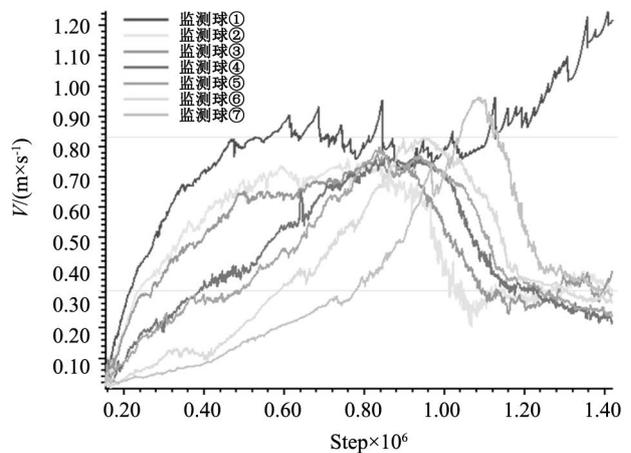
(a) step  $3 \times 10^5$



(b) step  $2.5 \times 10^5$



(c) step  $8 \times 10^6$



(d) step  $1.4 \times 10^6$

图 10 颗粒速度监测曲线图

Fig.10 The curve of particle speed monitoring

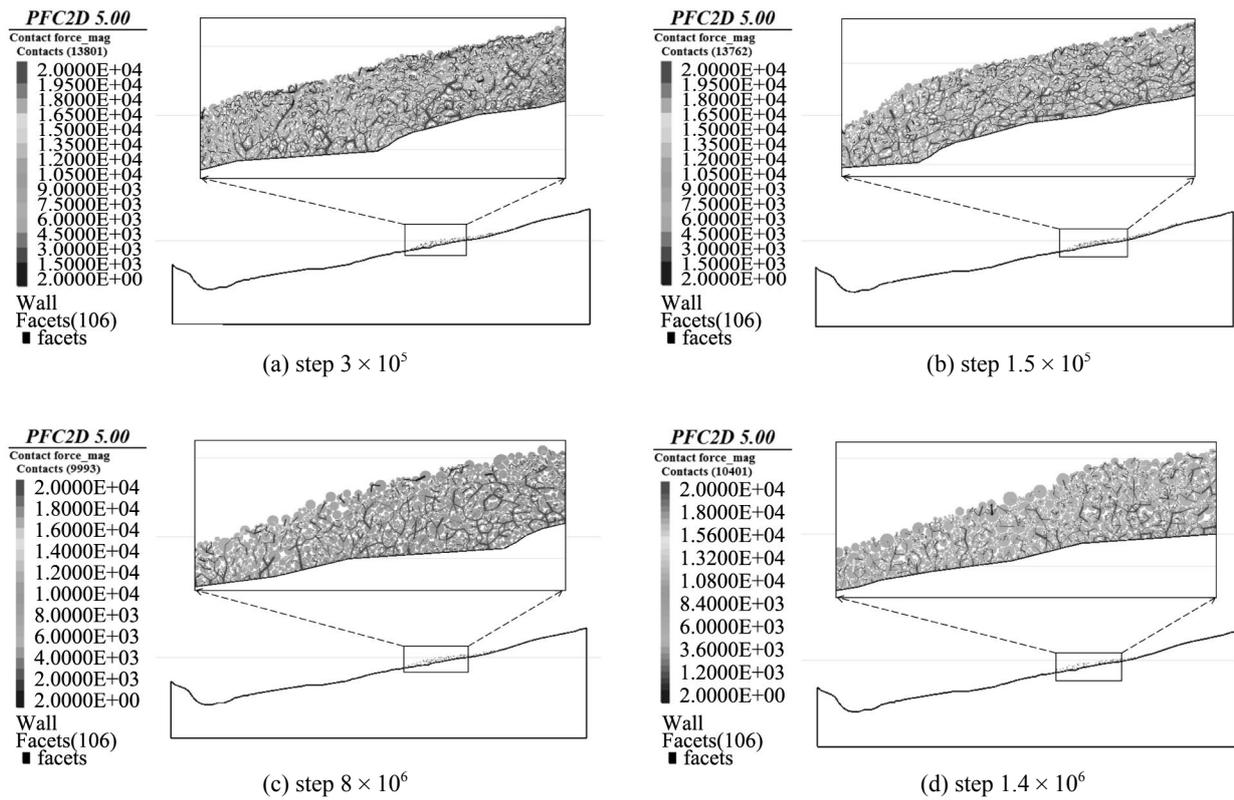


图 11 启动阶段颗粒接触应力云图

Fig.11 The particle contact stress cloud diagram of start-up phase

物质含量达到某一临界值前，细粒物质含量愈大，泥石流越易启动；不同颗粒级配矿渣型泥石流在启动过程中均呈现成层分块的特征，且坡脚处先于其他位置启动，细颗粒含量高的呈现由浅至深的渐进型破坏，而细颗粒含量低的则由内而外延伸的全面性破坏；启动过程中细颗粒含量高的矿渣相对细颗粒含量低的应力链更为完整，应力传递更为连续。

3) 矿渣的颗粒级配通过影响矿渣的抗剪强度、渗透性进而影响到矿渣内部受力情况，造成渣体结构破坏模式不同，最终来影响泥石流的启动难易程度。

参考文献：

[1] 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所. 中国泥石流 [M]. 北京：商务印书馆，2000.  
 [2] 徐友宁，陈社斌，李育敬，等. 陕西潼关金矿区泥石流潜势度评价 [J]. 水文地质工程地质，2006(2)：89-92.  
 [3] 徐友宁，武征，赵志长. 西北地区不同类型矿产开发环境地质问题及其产生的主要原因 [J]. 西北地质，2002 (1)：45-51.  
 [4] 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启动研究 [J]. 岩石力学与工程学报，2009，28(7)：1388-1395.  
 [5] 徐友宁，陈华清，张江华，等. 小秦岭金矿区 7-23 蒿岔峪泥石流成灾模式及启示 [J]. 地质通报，2015，34(11)：2001-2008.  
 [6] 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.  
 [7] 崔鹏. 泥石流启动机理研究 [D]. 北京：北京林业大学，1990.  
 [8] 崔鹏. 泥石流启动条件及机理的实验研究 [J]. 科学通报，1991，21：1650-165.  
 [9] 崔鹏，柳素清，唐邦兴，等. 风景区泥石流研究与防治 [M]. 北京：科学出版社，2005.  
 [10] 孟河清. 水石型泥石流河工模型试验方法 [J]. 泥沙研究，1989(4)：67-75.  
 [11] 王裕宜，邹仁元，刘岫峰. 泥石流启动与渗透系数的相关研究 [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报，1997(4)：77-83.  
 [12] 马秋娟，唐阳，宿辉. 泥石流启动过程试验与数值模拟研究 [J]. 科学技术与工程，2015，15(25)：7-10.

(责任编辑 李新)