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

徐友宁[1, 2]，曹琰波[3]，张江华[1]，陈华清[1]，杨 敏[2]，王显炜[2]

(1. 西安地质矿产研究所，陕西 西安 710054；2. 长安大学 地球科学与资源学院，陕西 西安 710054；
3. 中国科学院 地质与地球物理研究所，北京 100029)

摘要：遵循相似性原理，采用缩尺结构，以小秦岭金矿区采矿堆排的废渣作为物源进行直斜式模拟起动试验，探讨影响和控制矿渣型泥石流起动的颗粒级配、底床坡度、临界水量等主要因子之间的定量关系。初步试验表明，颗粒级配一定时，底床坡度愈大，其起动的临界水量值愈小。含有一定水份的湿渣比干渣更易起动。对于坡面上的矿渣堆，在饱和度一定的情况下，底床坡度愈大，愈易起动。当试验中细粒物质含量占到总量的 28%时，起动所需水量最小。废渣堆质量愈大，渣堆高度愈高，矿渣愈易起动。三角形断面较其他形态断面易起动。

关键词：工程地质；矿渣型泥石流；起动研究；人工模拟试验；小秦岭金矿区

中图分类号：P 642 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－6915(2009)07－1388－08

RESEARCH ON STARTING OF MINE DEBRIS FLOW BASED ON ARTIFICIAL SIMULATION EXPERIMENT IN XIAOQINLING GOLD ORE AREA

XU Youning[1, 2]，CAO Yanbo[3]，ZHANG Jianghua[1]，CHEN Huaqing[1]，YANG Min[2]，WANG Xianwei[2]

(1. *Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources*，*Xi'an*，*Shaanxi* 710054，*China*；2. *College of Earth Science and Resources*，*Chang'an University*，*Xi'an*，*Shaanxi* 710054，*China*；3. *Institute of Geology and Geophysics*，*Chinese Academy of Sciences*，*Beijing* 100029，*China*)

Abstract：Following the principle of similarity，using reduced scale structures，taking the slag as a source for straight ramp-start simulation test，the quantitative correlations of the grain composition，slope gradient and the critical water content which are the main influential factors of mine debris flow are studied. The tests indicate when the grain composition is constant，the larger the slope gradient is，the lower the critical water content is. And it is also shown that the water-bearing slag is easier to start than the dry slag. For the slag on the slope，when the saturation is certain，as long as the slope gradient is large enough，the slag will be able to start and form debris flow. When the content of the fine material in the slag reaches 28%，the slag is the most vulnerable to start. The greater the mass of the slag is，the higher the slag heaps，and the easier the slag stars. The slagheap with triangular section is easier to start than that with other sections.

Key words：engineering geology；mine debris flow；starting study；artificial simulation experiment；Xiaoqinling gold ore area

收稿日期：2008－11－18；**修回日期**：2009－03－24

基金项目：国家自然科学基金资助项目(40872208)；国土资源大调查项目(1212010741003)

作者简介：徐友宁(1963－)，男，博士，1986 年毕业于西安地质学院地质专业，现任研究员，主要从事矿山地质环境调查方面的研究工作。E-mail：ksdzhj@sohu.com

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 引 言

矿山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员安全的一种地质灾害类型[1~11]。矿产资源开发源源不断地排放废石弃渣直至矿山闭坑，因而物源充分，堆积场所集中，从而可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[10]，加剧了泥石流的发生与危害。1994 年 7 月 11 日，暴雨引发小秦岭金矿区河南省与陕西省分界的西峪沟谷矿渣型泥石流，导致 51 人死亡、上百人失踪，直接经济损失达上亿元[3, 4]。1984 年 5 月 27 日，云南东川铜矿因民矿区黑山沟泥石流造成 121 人死亡，矿山停产半年，直接经济损失 1 100 万元[11]。1970 年 5 月 26 日，四川泸沽铁矿盐井沟采矿弃渣形成的泥石流，造成 104 人死亡、29 人受伤[11]。

矿山泥石流具有人为性、频发性、一次灾情严重等特点[7~10]，因而近年来成为防灾减灾的热点问题之一。泥石流防治的要点是不形成准泥石流体，或准泥石流体不起动形成泥石流，或对运动中泥石流体疏导以降低其灾害损失，因而从源头上设法控制准泥石流体不起动形成泥石流，就可以达到预防的目的[12]。因此研究准泥石流体如何起动，以及起动的主要因子(如颗粒级配、底床坡度、临界水量等)临界参数及其关系，可促进泥石流起动学的理论发展，同时可为泥石流预警提供基础数据。张丽萍等[5, 12~15]就泥石流人工模拟试验积累了有益的经验，其试验物源多是黏性物源，且大于 50 mm 的粗颗粒组分少。对于以粗颗粒为主、透水性能好的矿渣型泥石流的起动机制，国内外鲜有报导。这种泥石流的形成与自然泥石流和其他人工泥石流具有明显区别，本文专门对此进行了研究。

2 研究背景

小秦岭金矿区位于豫陕接壤的小秦岭中～低基岩山地区，面积 1 500 km^2，海拔 700～2 100 m，主体山脉呈 EW 向展布，发育的 SN 向 V 型主峪道长为 9.41～15.20 km，纵坡降比为 8%～25%，沟坡坡度为 30°～60°，其支沟纵坡降比为 15.6%～58.4%。分水岭至出山口最大相对高差达 900 m。主要地层岩性为太古界太华群片麻岩、结晶片岩夹石英岩、大理岩等坚硬岩性，抗压、抗风化能力强。矿区灌木林覆盖率达 80%左右，残坡积层厚为 20～50 mm。小秦岭山外平原区多年平均降水量为 587.4 mm，年最大降水量为 958.6 mm，日最大降雨量为 113.4 mm。日最大降雨量大于 100 mm 的情况为 10 a 一遇，大于 50 mm 的情况则为 2 a 一遇；日最大降雨量 76.19%分布在 7～9 月。目前山地没有降雨观测站，但推测其降雨量要明显高于平原区。

小秦岭金矿区是我国第二大黄金产区，主要开采石英脉型金矿，采矿排放的废石弃渣成分以斜长角闪片麻岩、石英脉岩为主，棱角明显，抗压、抗风化能力强，粒径为 1～500 mm，细粒颗粒小于 5%，空隙度大，降水入渗大，不易饱和，松散相互联结弱。自 1975 年金矿开始开采至 2005 年 10 月，仅潼关金矿区 7 条主峪道 18 条支沟堆积的具有一定规模的矿渣堆就达 944 处，总渣量超过 1 100×10^4 m^3，且每年以 30×10^4 m^3 递增。从沟口到沟脑，从山脚到山顶，矿渣堆及部分选矿尾矿渣随意堆放，在主要支沟形成重重叠叠的矿渣堆。高陡山坡和沟岔堆放的废石堆高 10～30 m，安息角为 30°～40°。实际填表调查的 298 处废渣堆中，没有拦渣稳渣护挡墙的矿渣堆数量占到了总数的 74.97%；占据河道位置 1/3 以上的矿渣堆数量占总数的 86.37%；稳定性差、极差的矿渣堆占到了总量的 71%[7]。矿渣堆易在暴雨、矿震、重力等作用下，向下滑塌进入沟道中，形成准泥石流体或泥石流。因本区采矿废渣占泥石流物源的 90%以上，故此称之为矿渣型泥石流[7](实质为水石流)。小秦岭金矿区山高坡陡，暴雨频繁，矿渣丰富，历史上多次发生重大及特大泥石流灾害，河南省灵宝市境内的文峪、枣乡峪、大湖峪，陕西省潼关县境内的西峪、东桐峪、善车峪、麻峪、太峪、蒿岔峪和潼峪及其主要支沟均是矿渣型泥石流隐患沟[10]。

3 研究方法及材料

对于一定斜坡体上的准泥石流体，其底床坡度和颗粒级配组成均为定值，该类泥石流体的起动主要取决于矿渣中水分的参与程度。当水分到达一定值(临界值)时，就会起动形成流石流。而准泥石流体起动的临界水量又会随底床坡度、颗粒级配不同

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

而异[12]。泥石流起动过程实质就是准泥石流体转化为泥石流体的过程，二者的区别在于水分作用的程度不同：当水分作用未达到临界值以前，矿渣堆是准泥石流体；当水分作用超过临界值以后，矿渣堆就起动转化为泥石流体。因此，研究矿渣堆起动形成以及探讨起动时的临界颗粒级配、底床坡度和临界水量等主要因子之间的关系，对于矿山泥石流的防灾减灾具有重要的科学价值。

小秦岭金矿区矿渣堆已成为准泥石流体。本文在野外泥石流沟地质环境调查、矿渣堆参数填表调查、典型泥石流沟解剖的基础上，采用小桐沟这一直型沟道作为人工模拟试验的原型沟，取沟谷中的矿渣作为人工模拟试验的物料，开展不同颗粒级配、沟床坡度和水量之间关系的定量试验，经回归分析确定相关函数表达式及临界参数。

试验遵循相似性原理，采用缩尺结构(1/120)制作小型直斜式试验槽(长 245 cm、宽 40 cm、深 25 cm)及供水水箱(长 45 cm、宽 36 cm、高 48 cm)(见图 1)。考虑到试验槽的宽度，剔除了直径大于 50 mm 的块石。按照维诺格拉多夫(1980 年)观点，将泥石流物质中细粒物质直径定位为＜1 mm，剔除大粒径后的小桐沟矿渣物料中，试验用细粒物质占总量的 20%(见图 2)，散渣干密度为 1.94 g/cm^3，孔隙度为 0.36。

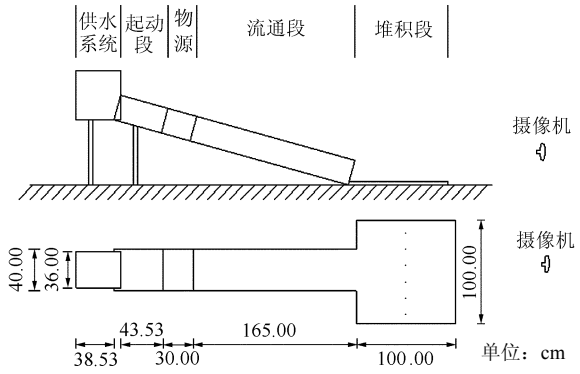


图 1　试验装置示意图

Fig.1　Sketch of testing device

4　试验结果及分析

4.1　底床坡度对泥石流起动的影响

底床坡度是影响准泥石流体由位能转化为动能的重要因素。一般来说，泥石流沟床比降愈大，愈有利于泥石流的发生。在物源一定的情况下，本文探讨了泥石流起动的底床坡度与临界水量的关系。

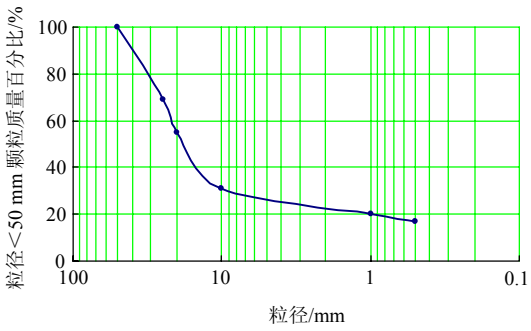


图 2　试验用矿渣颗粒级配曲线

Fig.2　Grain composition curve of tested slag

4.1.1　散粒干渣在径流供水条件下的起动

试验采用图 2 所示级配散粒干渣 27 kg，以 10 cm 的厚度堆置于底床光滑的矩形流槽起动段，供水径流速度为 1.9 L/s。在其他条件相同的情况下，试验结果见表 1。

表 1　底床坡度与临界水量的关系

Table 1　Relation between slope gradient and critical water quantity

试验编号	底床坡度/(°)	临界水量/L
1	5	15.10
2	10	10.53
3	15	8.40
4	17	6.97
5	20	4.70

对表 1 数据进行回归分析，可得如下关系式：

$$\theta + 3.691\ 8S - 0.102S^2 - 37.757 = 0 \quad (R = 0.921\ 8) \tag{1}$$

式中：R 为相关系数，θ 为底床坡度，S 为径流供水条件下临界水量。

试验表明，底床坡度越大，准泥石流体起动的临界水量越小；反之，底床坡度愈小，所需临界水量愈多，并且存在一个最小坡度角 4.35°及最低水量值 3.14 L，即当坡度大于 4.35°或水量大于 3.14 L 时，准泥石流体就可能起动形成泥石流。

4.1.2　含水 5%的矿渣在径流供水条件下的起动

在与上述试验相同的条件下，仅将散粒干渣变成含水量为 5%的湿渣进行相同的试验，结果(见表 2)表明，对于一定含水量的矿渣，底床坡度越大，临界水量越小。

对表 2 所示数据进行回归分析，得如下关系式：

$$\theta + 3.27S - 0.093\ 6S^2 - 33.199 = 0 \quad (R = 0.943\ 7) \tag{2}$$

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 2　含水量 5%的矿渣起动时底床坡度与临界水量关系

Table 2　Relation between slope gradient and critical water quantity when the slag starts with water content of 5%

试验编号	底床坡度/(°)	临界水量/L
6	10	9.72
7	15	6.80
8	17	6.48
9	20	4.05
10	25	3.24

对于给定的底床坡度值，一定含水量的湿渣比干渣要易于起动形成泥石流，但在降水量不大的情况下，对起动影响不显著。

4.1.3　散粒干渣在径流供水及喷淋共同作用下的起动

散粒干渣在径流供水(流速 1.9 L/s)及模拟喷淋降雨同时作用下的试验结果(见表 3)表明，底床坡度越大，临界水量越小，但下降不显著。

表 3　径流供水及模拟喷淋降雨同时作用下底床坡度与临界水量的关系

Table 3　Relation between slope gradient and critical water quantity under conditions of runoff and simulated spray

试验编号	底床坡度/(°)	临界径流水量/L	临界喷淋水量/L
11	10	8.42	0.68
12	15	5.80	0.69
13	17	4.84	0.70
14	20	4.05	0.82
15	25	3.04	1.28

对表 3 所示数据进行回归分析，得如下关系式：

$$S_1 = 0.017\ 5\theta^2 - 0.933\ 5\theta + 16.508\quad (R = 0.900\ 1) \tag{3}$$

式中：S_1 为径流供水及模拟喷淋降雨同时作用下的临界水量。

试验结果与含水量为 5%的散渣在径流条件下的试验结果接近，但有前期降雨作用下，矿渣更容易起动一些。

4.2　水分对泥石流起动的影响

降雨在泥石流形成过程中扮演者着重要的角色，其作用归结为水的作用：一方面使土体含水量增加，其黏聚力、内摩擦角降低，自重增加；另一方面降雨在地面形成径流，对坡面、沟谷中的矿渣堆形成了冲刷作用。

4.2.1　不同饱和度的矿渣堆起动试验

采用 13.5 kg 散粒干渣制作不同饱和度的浆体，试验研究泥石流起动的临界坡度。结果(见表 4、图 3)表明，矿渣中水的饱和度越大，其起动的临界坡度越小，基本呈直线减小。当细粒泥浆首先流出时为第一临界坡度(θ_1)，当矿渣浆体开始起动的坡度即为第二临界坡度(θ_2)，混合浆体全部参与起动时为第三临界坡度(θ_3)[12]。本文主要研究第二临界坡度。

表 4　不同饱和度的矿渣堆起动的临界底床坡度

Table 4　Critical slope gradients when the slagheaps with different saturations start

试验编号	物源状态	饱和度	临界坡度/(°)		
			θ_1	θ_2	θ_3
16	干渣	0.0		32	34
17	浆体	0.3		30	33
18	浆体	0.6	16	26	30
19	浆体	0.8	14	22	27
20	浆体	0.9		22	26
21	浆体	1.1		19	24
22	浆体	1.2	14	17	22
23	浆体	1.5	8	16	22

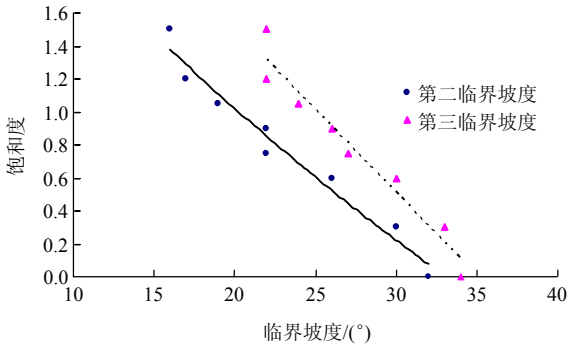


图 3　临界坡度与矿渣堆饱和度的关系

Fig.3　Relation between critical slope gradient and saturation of slagheap

经回归分析，第二临界坡度 θ_2 与饱和度 S_r 的试验数据符合如下关系式：

$$S_r = 0.000\ 7\theta_2^2 - 0.113\ 1\theta_2 + 3.017\ 2\quad (R = 0.966\ 1) \tag{4a}$$

或

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$\theta_2 = 1.570\ 2S_r^2 - 14.204S_r + 32.887 \quad (R = 0.966\ 1) \tag{4b}$$

对于坡面上的矿渣堆，其饱和度愈大，愈易起动形成泥石流。而试验编号为 16 的干渣堆表明的是松散层滑塌转化为泥石流的起动模式(见表 4)。

4.2.2 不同径流速度下矿渣堆的起动

固定底床坡度为 17°，将 27 kg 散粒干渣以 10 cm 的厚度堆置于流槽起动区，测定不同径流速度下泥石流起动临界水量。试验结果表明，当径流速度 v<2 L/s 时，径流速度越大，所需临界水量越小(见表 5、图 4)；当径流速度 v>2 L/s 时，流速越大，临界水量也越大，且基本呈直线关系。

表 5　不同径流速度下矿渣堆起动的临界水量

Table 5　Critical water quantity when slagheap starts at different runoff velocities

试验编号	径流速度/(L • s^{-1})	临界水量/L
24	0.083	长时间不起动
25	0.490	11.7
26	1.307	8.0
27	1.806	7.2
28	2.010	7.6
29	2.694	9.1
30	4.220	11.9

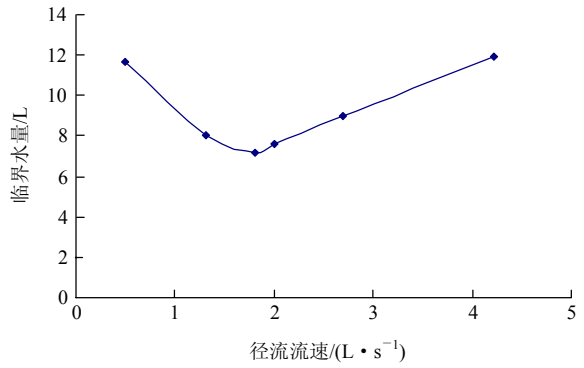


图 4　径流速度与临界水量的关系

Fig.4　Relation between runoff velocity and critical water quantity

回归分析表明，径流速度和临界水量之间的关系可以表示为

$$S_2 = \begin{cases} 2.223\ 1v^2 - 8.523\ 6v + 15.343 \\ \qquad (R=1,\ v<2\ \text{L/s}) \\ 1.938\ 1v + 3.734\ 7 \\ \qquad (R = 0.999\ 7,\ v\geqslant 2\ \text{L/s}) \end{cases} \tag{5}$$

式中：S_2 为不同径流速度下的临界水量。

当 v<2 L/s 时，存在一个最有利于泥石流起动的径流速度 1.92 L/s；当 v≥2 L/s 时，需要很大雨强才能使泥石流起动，实际上一般很难达到这样大的雨强。因此在该组试验中，在给定 v = 1.92 L/s 的情况下，可视为矿渣起动的径流雨量的下限值。

4.3　颗粒级配对泥石流起动的影响

4.3.1 干散矿渣中细粒物质含量对临界水量的影响

泥石流物源中，细粒物质的多少对泥石流体性质影响极大[12]。将 27 kg 散粒干渣以 10 cm 的厚度堆置于底床光滑的矩形流槽起动区，固定底床坡度为 17°统一按 0.6 L/s 的径流速度供水。在其他试验条件相同情况下，结果(见表 6、图 5)表明，临界水量与细粒物质含量呈抛物线关系，存在一个最小临界水量值和细粒物质含量值。当细粒物质含量达到这一最小值前，细粒物质含量愈大，其临界水量起动愈小。也就是说矿渣中粗粒物质愈多，其起动的临界水量值愈大。这一认识可定性解释潼关金矿区沟谷矿渣量巨大，物质松散，看似容易形成泥

表 6　矿渣中细粒物质含量对临界水量的影响

Table 6　Effect of fine material content in slag on critical water quantity

试验编号	矿渣干密度/(g • cm^{-3})	细粒物质含量/%	临界水量/L
31	1.72	5	15.5
32	1.85	10	13.0
33	1.85	15	10.0
34	1.94	20	9.2
35	1.94	25	7.1
36	2.00	30	6.8
37	2.08	35	8.9
38	2.12	40	9.6

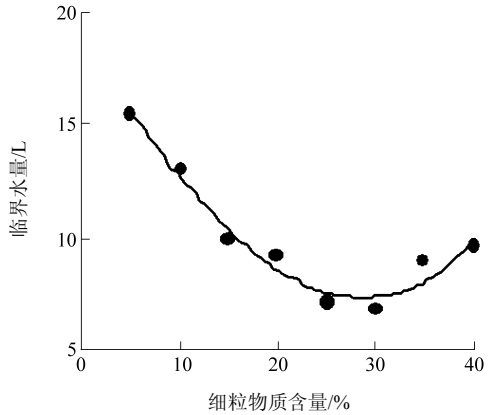


图 5　细粒物质含量与临界水量关系

Fig.5　Relation between fine material content and critical water quantity

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

石流但实质上并不容易起动的现象，其原因之一就是废石渣中细粒物质少(原矿渣中细粒物质含量约为 5%)，孔隙度高，雨水易通过，起动的临界水量较大。

4.3.2 浆体状态下矿渣中细粒物质含量对临界坡度的影响

将 13.5 kg 散粒干渣制作为饱和度为 0.9 的浆体，并以 10 cm 的厚度堆置于底床光滑的矩形流槽起动区，改变细粒物质的含量。试验结果表明，浆体和散粒干渣相似，也存在一个最小临界坡度值 20.5°，临界坡度与颗粒级配呈抛物线关系。对于第二临界坡度(θ_2)，当细粒物质含量达到某一最小值前，临界坡度随细粒物质含量增大而减小；当细粒含量大于这一最小值时，临界坡度随细粒物质含量增大而增大(见表 7、图 6)。

表 7　矿渣中细粒物质含量与临界坡度关系

Table 7　Relation between fine material content in slag and critical slope gradient

试验编号	密度/(g • cm^{-3})	细粒物质含量/%	临界坡度/(°)		
			θ_1	θ_2	θ_3
39	1.72	5		30	38
40	1.85	10		26	32
41	1.90	15		23	32
42	1.94	20	12	24	35
43	1.97	25	10	21	30
44	2.00	30		20	31
45	2.08	35	20	20	40
46	2.12	40	18	25	37

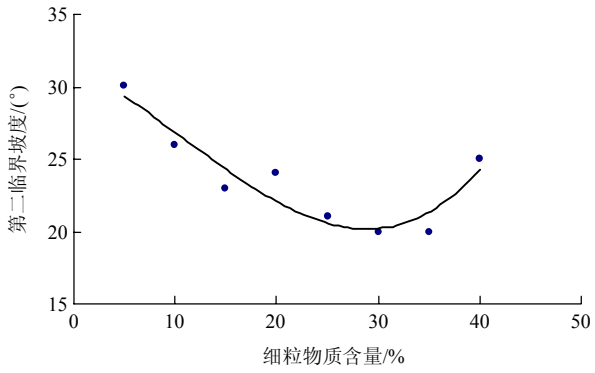


图 6　矿渣中细粒物质含量与第二临界坡度关系

Fig.6　Relation between fine material content in slag and the second critical slope gradient

根据所获数据，经回归分析可知，第二临界坡度 θ_2 和细粒物质含量 C 之间的关系符合下式：

$$\theta_2 = 183.33C^2 - 100.83C + 34.625 \quad (R = 0.891) \quad (6)$$

4.4 其他影响因素

4.4.1 矿渣堆质量对于起动的影响

底床坡度固定为 17°，将散粒干渣以 10 cm 的厚度堆置于底床光滑的矩形流槽起动区，统一按 0.6 L/s 的径流速度供水。试验结果(见表 8)表明，矿渣堆质量越大，所需临界水量越大，越难起动。

表 8　矿渣堆质量与临界水量的关系

Table 8　Relation between slagheap mass and critical water quantity

试验编号	矿渣堆质量/kg	临界水量/L
47	13.5	7.20
48	27.0	11.7
49	40.5	26.9

4.4.2 矿渣堆堆积高度对起动的影响

将 13.5 kg 散粒干渣制成饱和度为 0.9 的浆体，分别以厚 5，10，15 cm 的浆体形式置于底床光滑的矩形流槽起动区，缓慢抬升流槽，测定不同堆积高度下泥石流起动的临界坡度。试验结果(见表 9)表明，矿渣堆积的高度越大，起动的临界坡度就越小。

表 9　矿渣堆堆积高度与临界坡度的关系

Table 9　Relation between slagheap height and critical slope gradient

试验编号	堆积高度/cm	临界坡度/(°)		
		θ_1	θ_2	θ_3
50	5	15	24	40
51	10		22	31
52	15		21	27

根据试验所得数据经回归分析，第二临界坡度 θ_2 与堆积高度 h 的关系符合下式：

$$\theta_2 = 0.02h^2 - 0.7h + 27 \quad (R = 1) \quad (7)$$

4.4.3 矿渣堆堆积断面形态对矿渣堆起动的影响

(1) 散粒试验：13.5 kg 的散粒干渣在相同底床坡度(17°)及径流速度(0.6 L/s)供水条件下的试验结果(见表 10)表明，三角形断面的矿渣堆最容易起动，矩形断面最难起动，梯形断面则介于两者之间。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 10　矿渣堆断面形态与临界水量之间的关系

Table 10　Relation between cross-section shape of slagheap and critical water quantity

试验编号	断面形态	临界水量/L
53	矩形	11.70
54	梯形	10.50
55	三角形	6.27

(2) 浆体试验：在与散粒试验条件相同的条件下，采用饱和度为 0.9 的浆体进行试验。结果表明，三角形断面的矿渣堆最易起动，与散粒干渣试验结论一致(见表 11)。

表 11　矿渣堆断面形式与临界坡度的关系

Table 11　Relation between cross-section shape of slagheap and critical slope gradient

试验编号	断面形态	临界坡度/(°)		
		θ_1	θ_2	θ_3
56	矩形	-	25	32
57	梯形	-	26	32
58	三角形	-	22	27

4.4.4 底床粗糙程度对起动的影响

在径流速度(0.6 L/s)、坡度(17°)相同的条件下，散粒干渣矿渣堆在粗糙底床上起动的临界水量大于光滑底床的临界水量(见表 12)。而饱和度为 0.9 的浆体试验结果(见表 12)表明，在粗糙底床上矿渣堆起动的临界坡度略大于光滑底床的临界坡度。

表 12　底床特征对泥石流启动的影响

Table 12　Impaction of initiation by the characteristic of the slope bed

底床特征	散粒试验临界水量/L	浆体试验临界坡度/(°)		
		θ_1	θ_2	θ_3
光滑	10.5	-	25	32
粗糙	11.7	-	26	38

5　结　论

(1) 在本试验条件下，颗粒级配一定时，底床坡度越大，其起动的临界水量值越小。含有一定水量的矿渣或具有前期降雨时，其起动比干渣更容易。

(2) 无论散渣还是浆体矿渣，细粒物质含量占总量 28%左右时，其起动时所需临界水量最小。

(3) 矿渣物源质量愈大，渣堆高度愈高时，矿渣堆愈易于起动。三角形断面的矿渣堆最易起动，光滑底床上矿渣堆较粗糙底床容易起动。

由于人工试验装置所限，试验中采用较为光滑密度板作为底床，没有考虑下垫面的粗糙程度、水分下渗情况，是一种较为理想状态下的起动状况，因而起动的临界条件反映了最易起动的情景。加之试验剔除了粒径大于 50 mm 的块石，因此试验所需水量应是最小的临界水量。要模拟的矿山泥石流沟条件要比试验条件复杂得多，因此本文试验结论可看作是为矿渣型泥石流起动过程提供了定性和半量化信息，具有一定的参考价值。今后需要进一步高仿真模拟实地沟谷环境条件，开展原位试验，才能够得出相对准确的信息，为矿山泥石流预警预报积累基础数据。

参考文献(References)：

[1] 钟敦伦，严润群，陈精日. 初论矿山泥石流[C]// 中国科学院成都地理研究所编. 泥石流论文集(1). 重庆：科学技术文献出版社重庆分社，1981：43－49.(ZHONG Dunlun，YAN Runqun，CHEN Jingri. Preliminary study on mine debris flows[C]// Institute of Geographic Sciences，Chengdou，Chinese Academy of Sciences ed. Disquisition on Debris Flows(Vol. 1). Chongging：Chongqing Department of Scientific and Technical Documents Publishing House，1981：43－49.(in Chinese))

[2] 谢　洪，游　勇，钟敦伦. 长江上游一场典型的人为泥石流[J]. 山地研究，1994，12(2)：125－128.(XIE Hong，YOU Yong，ZHONG Dunlun. A typical man-made debris flow in the upper reaches of Changjiang River[J]. Mountain Research，1994，12(2)：125－128.(in Chinese))

[3] 李昭淑. 陕西潼关金矿'94 人工泥石流灾害研究[J]. 灾害学，1995，10(3)：51－56.(LI Zhaoshu. A study on the mud-rock flow disaster in 1994 in the gold mine area of Tongguan，Shaanxi[J]. Journal of Catastrophology，1995，10(3)：51－56.(in Chinese))

[4] 刘世建，谢　洪，韦方强，等. 小秦岭金矿区人为泥石流[J]. 山地学报，1996，14(4)：259－263.(LIU Shijian，XIE Hong，WEI Fangqiang，et al. A man-caused debris flow in Xiaoqinling gold mining region[J]. Mountain Research，1996，14(4)：259－263.(in Chinese))

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[5] 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[J]. Beijing：Geological Publishing House，2001：1－9.(in Chinese))

[6] 陈廷方，崔 鹏，刘岁海，等. 矿产资源开发与泥石流灾害及其防治对策[J]. 工程地质学报，2005，13(2)：179－182.(CHEN Tingfang，CUI Peng，LIU Suihai，et al. Anthropogenic debris flow disasters and mitigation countermeasures in mineral resources exploitation in China[J]. Journal of Engineering Geology，2005，13(2)：179－182.(in Chinese))

[7] 徐友宁，陈社斌，何 芳，等. 潼关金矿区矿渣型泥石流灾害及防治对策[J]. 山地学报，2006，24(6)：667－671.(XU Youning，CHEN Shebin，HE Fang，et al. Mullock type debris flow hazards and suggestions for prevention in Tongguan gold mine area[J]. Journal of Mountain Science，2006，24(6)：667－671.(in Chinese))

[8] 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，2006，33(2)：89－92.(XU Youning，CHEN Shebin，LI Yujing，et al. Potentiality degree assessment of slag mudslide geo-hazard on the gold mine area in Tongguan，Shaanxi Province[J]. Hydrogeology and Engineering Geology，2006，33(2)：89－92.(in Chinese))

[9] 徐友宁，陈社斌，袁汉春，等. 潼关金矿区矿渣型泥石流潜势度熵权评价[J]. 地质科技情报，2006，25(5)：101－104.(XU Youning，CHEN Shebing，YUAN Hanchun，et al. Entropy weight assessment on slag mudslide potentiality parameter in the Tongguan gold mine area[J]. Geological Science and Technology Information，2006，25(5)：101－104.(in Chinese))

[10] 徐友宁，何 芳，陈华清. 西北地区矿山泥石流分布及特点[J]. 山地学报，2007，25(6)：729－736.(XU Youning，HE Fang，CHEN Huaqing. Mine debris flow and its distribution in Northwestern China[J]. Journal of Mountain Science，2007，25(6)：729－736.(in Chinese))

[11] 康志成，李焯芬，马蔼乃，等. 中国泥石流研究[M]. 北京：科学出版社，2004：56－59.(KAN Zhicheng，LEE C F，MA Ainai，et al. Research on debris flow in China[M]. Beijing：Science Press，2004：56－59.(in Chinese))

[12] 崔 鹏，柳素清，唐邦兴，等. 风景区的泥石流研究与防治[M]. 北京：科学出版社，2005：25－48.(CUI Peng，LIU Suqing，TANG Bangxing，et al. Research and prevention of debris flow in scenic spots[M]. Beijing：Science Press，2005：25－48.(in Chinese))

[13] 何淑芬，吕 娟，刁惠芳. 西藏波密县古乡沟泥石流模型试验中的模型砂配制[J]. 山地学报，2007，25(6)：747－752.(HE Shufen，LU Juan，DIAO Huifang. Sediment sample preparation for simulation experiment of debris flow in Guxiang Gully，Tibet[J]. Journal of Mountain Science，2007，25(6)：747－752.(in Chinese))

[14] 陈晓清，崔 鹏，冯自立，等. 滑坡转化泥石流起动的人工降雨试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2006，25(1)：106－116.(CHEN Xiaoqing，CUI Peng，FENG Zili，et al. Artificial rainfall experimental study on landslide translation to debris flow[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2006，25(1)：106－116.(in Chinese))

[15] 丛威青，潘 懋，李铁锋，等. 降雨型泥石流临界雨量定量分析[J]. 岩石力学与工程学报，2006，25(增 1)：2 808－2 812.(CONG Weiqing，PAN Mao，LI Tiefeng，et al. Quantitative analysis of critical rainfall-triggered debris flow[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2006，25(Supp.1)：2 808－2 812.(in Chinese))

下期内容预告

下期《岩石力学与工程学报》主要发表下列内容的文章：

(1) 水电工程爆破振动安全判据及应用中的几个关键问题；

(2) 岩爆实验碎屑分类及其研究方法；

(3) 基于能量原理的卸围压试验与岩爆判据研究；

(4) 深埋隧洞爆破开挖损伤区检测及特性研究；

(5) 宁德核电站核岛基坑爆破开挖安全；

(6) 大理岩 I－II 复合型动态断裂的实验研究；

(7) 大断面隧道爆破开挖围岩损伤范围试验研究及数值计算；

学术论坛：

(8) 地震边坡破坏机制及其破裂面的分析探讨。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net