

文章编号: 2095-6134(2016)05-0651-05

## 黏性泥石流残留层减阻机理的蛋清试验\*

宇岩<sup>1 2 3</sup>, 王钧<sup>1 2 3</sup>, 乔成<sup>1 2 3</sup>, 潘华利<sup>1 2 †</sup>

(1 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041; 3 中国科学院大学, 北京 100049)  
(2015年5月25日收稿; 2016年4月5日收修改稿)

Yu Y, Wang J, Qiao C, et al. Egg white experimental study on reduction of resistance of residual layer of debris flow [J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2016, 33(5): 651-655.

**摘要** 糙率是泥石流防治工程重要设计参数之一, 糙率大小直接影响残留层阻力大小. 为研究残留层减阻机理, 通过40组蛋清试验模拟黏性残留层, 观察玻璃球在其上的运动, 探讨黏性残留层减阻作用与糙率的关系. 在试验数据的基础上, 分析残留层糙率与残留层厚度、密度和斜坡坡度的关系, 并得出结论: 糙率与残留层厚度、密度成正比关系, 与斜坡坡度成反比关系.

**关键词** 糙率; 残留层; 蛋清; 泥石流

中图分类号: P642.23 文献标志码: A doi: 10.7523/j.issn.2095-6134.2016.05.011

### Egg white experimental study on reduction of resistance of residual layer of debris flow

YU Yan<sup>1 2 3</sup>, WANG Jun<sup>1 2 3</sup>, QIAO Cheng<sup>1 2 3</sup>, PAN Huali<sup>1 2</sup>

(1 *Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China*; 2 *Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China*; 3 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract** Roughness is an important design parameter of debris flow control engineering and it directly affects the resistance strength of the residual layer. To study the residual layer drag reduction mechanism, we simulated viscous residual layer by performing 40 groups of egg white tests. The glass ball motion on the viscous residual layer was observed and the relationship between resistance reduction of the viscous residual layer and roughness was studied. On the basis of the experimental data, the relationships of roughness with residual layer thickness, density, and slope gradient were analyzed, and the conclusions are given as follows. Roughness is proportional to the residual layer thickness and density and it is inversely proportional to the slope gradient. These results provide a theoretical basis for the future design of debris flow control project.

**Key words** roughness; residual layer; egg white; debris flow

\* 国家自然科学基金面上项目(41372331)和科技部国际科技合作专项(2013DFA21720)资助

† 通信作者, E-mail: hlpan@imde.ac.cn

泥石流爆发突然,危害严重,常给山区人民的生命、财产造成严重危害.黏性泥石流残留层是其流体通过粗糙不同的沟床后,黏附在床面上的一层泥石流流体,一般情况下厚度为 0.15~0.50 m,有时候可达 1 m 左右,会使沟床面变得光滑平顺<sup>[1]</sup>.由于黏性泥石流残留层的铺床作用,会使沟床的糙率变小,黏性泥石流运动流速加快,阻力变小<sup>[2-3]</sup>.因此,本文采用蛋清试验对黏性泥石流残留层糙率的相关物理参数进行研究.

近 30 多年来,国内外对黏性泥石流残留层的研究相对比较少,尤其是对黏性残留层减阻机理的研究.目前对黏性泥石流残留层的研究,如张军等<sup>[1]</sup>在实测数据基础上,通过曼宁公式分析泥石流速度与糙率的变化关系来解释云南蒋家沟黏性泥石流残留层的减阻作用;王裕宜等<sup>[4]</sup>通过流变试验揭示黏性泥石流流体运动的阻力特性,探讨黏性泥石流流速公式中的曼宁糙率系数的表征;吴积善等<sup>[5-6]</sup>通过大量的泥石流原型观测和简易模型试验得到黏性残留层与泥深的关系;Cui 等<sup>[7]</sup>分析在云南蒋家沟由于黏性泥石流残留层的存在,使得泥石流流体在黏性残留层上运动的速度更快,阻力相对减小的原因;游勇等<sup>[8-9]</sup>通过对云南蒋家沟残留层的变化,观察泥石流冲淤情况,求得黏性泥石流沟床冲刷深度极限值的表达式;Hu 等<sup>[10]</sup>根据云南东川站黏性泥石流观测资料,揭示黏性残留层是滚波流产生的关键因素.综上,前人均论述了黏性泥石流残留层具有减阻作用,但是减阻作用的产生具体与哪些因素有关,尚不清楚,是目前亟待解决的问题.

受生活启发,发现鸡蛋清呈半透明状,一旦铺床之后,对在其上运动的物体具有明显减阻作用,同黏性泥石流残留层的减阻现象十分相似.因此,本文通过 40 组蛋清试验模拟玻璃球在黏性泥石流残留层上的运动,在试验数据的基础上,分析残留层相关参数(残留层厚度、密度和斜坡坡度)变化对糙率的影响.

## 1 模型试验装置及试验材料

为探讨黏性残留层糙率与残留层厚度、密度和斜坡坡度的关系,采用室内模拟试验,试验装置采用图 1 所示的玻璃槽,该仪器尺寸 45.5 cm × 10 cm × 11 cm(长×宽×高),水槽长 29 cm,废物回收槽长 16.5 cm,可调节坡度(1°、2°、3°和 4°).

试验材料:15 个鸡蛋清制作黏性液体;1 颗直径 1 cm 蓝色玻璃球.

仪器设备:摄像机一部(记录小玻璃球在不同坡度、不同密度的黏性液体中运动情况);电子秤一台(测量蛋清的质量);秒表一个(记录小球在不同密度黏性液体中运动的时间);直尺一个(测量小球在不同坡度、不同厚度的黏性液体中小球的运动位移);蛋清分离器一个(用于蛋清分离);1 000 mL 烧杯 1 个(用于测量黏性液体的体积);搅拌棒一根.

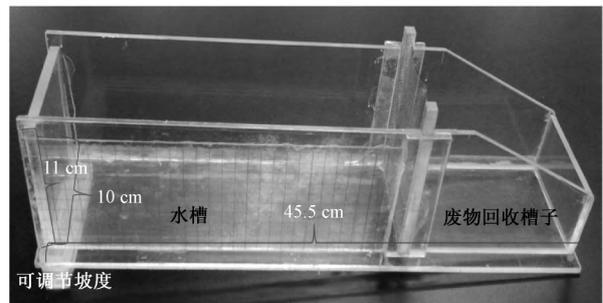


图 1 蛋清试验装置

Fig. 1 Equipment of egg white test

## 2 试验步骤与方法

根据上述的试验装置、试验材料以及仪器设备,本文采用蛋清模拟黏性泥石流残留层试验的步骤如下:

1) 制作蛋清液体,用蛋清分离器将蛋清与蛋黄分离,蛋清放入烧杯中;

2) 用电子秤测量蛋清的质量,烧杯测得蛋清的体积,根据式(1)计算蛋清的密度

$$\rho = m/V; \quad (1)$$

3) 将玻璃槽子的坡度设置为 1°;

4) 分别用 10、25、50、100、200 mL 体积蛋清液体铺床,铺床平均厚度分别为 0.034、0.086、0.172、0.345、0.690 cm,将玻璃球从初始位置释放,记录运动时间和位移;

5) 将水槽分别变换为 2°、3°、4°时,重复上述步骤 1) 至 4);

6) 变换密度,将清水与蛋清按 1:1 比例调和成体积分别为 10、25、50、100、200 mL 的黏性液体进行铺床,重复上述步骤;

7) 根据上述试验步骤与试验结果,可以记录在不同斜坡坡度(1°、2°、3°和 4°)、不同密度(1.01 和 1.02 g/mL)、不同体积(10、25、50、100

和 200 mL) 黏性液体铺床后,玻璃球运动的时间和位移. 由此可以应用速度公式 (2) 求解玻璃球运动的平均速度.

$$V = s/t. \tag{2}$$

再根据曼宁速度公式 (3) [1], 可求解铺有黏性液体的玻璃槽的糙率 (公式 (4)).

$$U_c = (1/n_c) H_c^{2/3} I^{1/2}, \tag{3}$$

$$n_c = (1/U_c) H_c^{2/3} I^{1/2} \tag{4}$$

最后根据糙率公式, 计算在不同斜坡坡度

(1°、2°、3° 和 4°)、不同密度 (1.01 和 1.02 g/mL)、不同体积 (10、25、50、100 和 200 mL) 黏性液体铺床情况下糙率值, 进而可以探讨糙率值随斜坡坡度、残留层密度和厚度的变化关系.

### 3 试验结果与分析

本文根据玻璃球在不同斜坡坡度、不同密度和不同体积黏性液体上的运动, 将试验总共划分为 10 组 40 次试验, 试验数据见表 1.

表 1 试验数据

Table 1 Experimental data

编号	坡度/(°)	密度/(g/mL)	体积/mL	位移/cm	时间/s	编号	坡度/(°)	密度/(g/mL)	体积/mL	位移/cm	时间/s
1	1	1.02	10	0.7	0.71	21	1	1.01	10	7.5	2.41
2	2	1.02	10	12.7	2.52	22	2	1.01	10	28	3.81
3	3	1.02	10	21.2	5.02	23	3	1.01	10	28	1.41
4	4	1.02	10	28	3.62	24	4	1.01	10	28	1.31
5	1	1.02	25	1.5	0.61	25	1	1.01	25	6.5	2.51
6	2	1.02	25	12.3	5.92	26	2	1.01	25	23.1	2.61
7	3	1.02	25	23	25.75	27	3	1.01	25	28	2.11
8	4	1.02	25	28	6.22	28	4	1.01	25	28	1.31
9	1	1.02	50	0.2	0.81	29	1	1.01	50	1.8	1.01
10	2	1.02	50	4.2	1.91	30	2	1.01	50	19.5	3.41
11	3	1.02	50	18.8	3.71	31	3	1.01	50	28	3.51
12	4	1.02	50	28	7.12	32	4	1.01	50	28	3.01
13	1	1.02	100	0.1	0.71	33	1	1.01	100	1.7	0.81
14	2	1.02	100	6.7	3.02	34	2	1.01	100	12.1	2.22
15	3	1.02	100	12.7	2.81	35	3	1.01	100	28	2.21
16	4	1.02	100	28	10.63	36	4	1.01	100	28	2.41
17	1	1.02	200	0	0	37	1	1.01	200	0.7	0.51
18	2	1.02	200	2.1	2.41	38	2	1.01	200	13.5	5.42
19	3	1.02	200	12.3	8.92	39	3	1.01	200	28	5.92
20	4	1.02	200	12.4	3.51	40	4	1.01	200	28	4.01

为方便对比, 我们应用摄像机对小玻璃球的位移进行跟踪拍摄, 图 2 至图 4 记录了小球在不同斜坡坡度、不同残留层密度和厚度上的运动情况. 由图 2 至图 4 可知, 当坡度、厚度相同, 密度不

同时, 密度越大, 速度越小, 糙率越大; 当坡度、密度相同, 厚度不同时, 厚度越大, 速度越小, 糙率越大; 当厚度、密度相同, 坡度不同时, 坡度越大, 速度越大, 糙率越小.

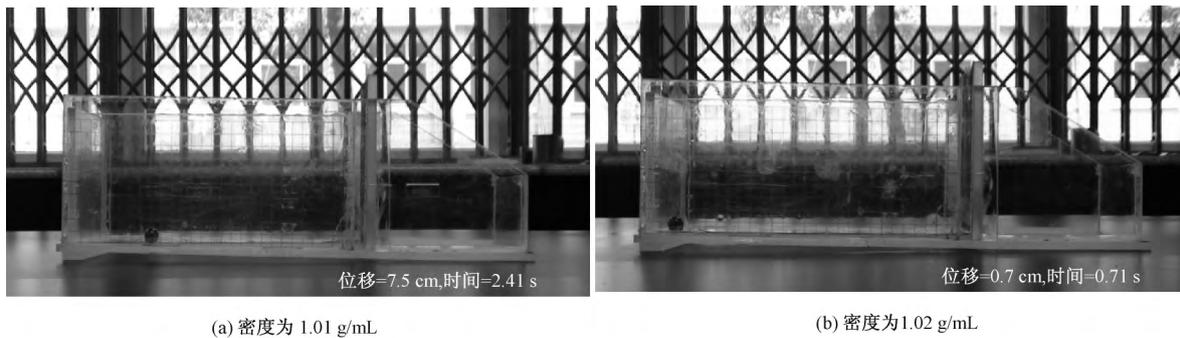
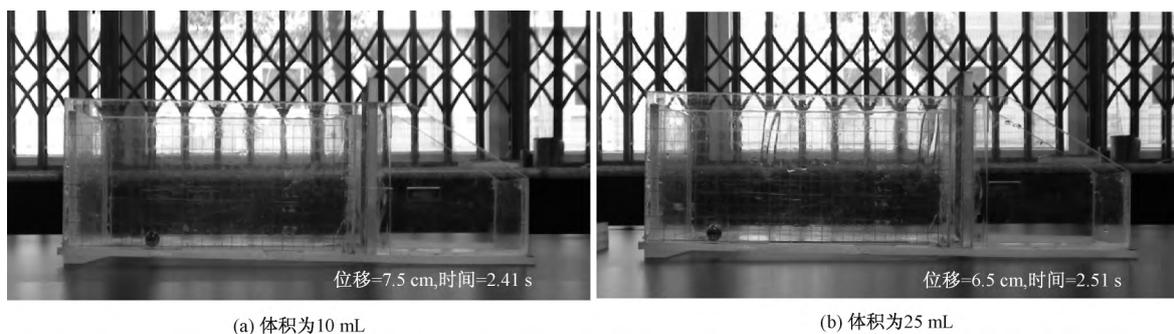
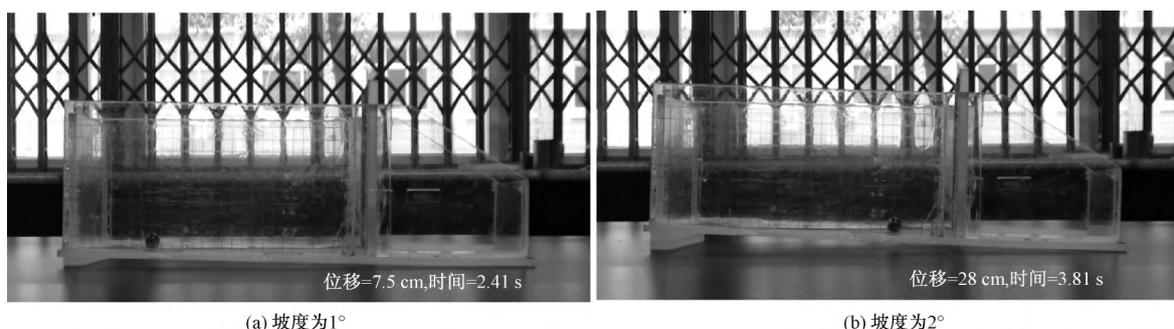


图 2 当坡度 1°、体积 10 mL 液体铺床时, 玻璃球运动情况  
Fig. 2 Movement of the glass ball when the slope is 1° and volume of liquid making bed is 10 mL



(a) 体积为 10 mL

(b) 体积为 25 mL

图 3 当坡度  $1^\circ$ 、密度为  $1.01 \text{ g/mL}$  液体铺床时 玻璃球运动情况Fig. 3 Movement of the glass ball when the slope is  $1^\circ$  and the density is  $1.01 \text{ g/mL}$  in liquid making bed(a) 坡度为  $1^\circ$ (b) 坡度为  $2^\circ$ 图 4 当密度为  $1.01 \text{ g/mL}$ 、体积  $10 \text{ mL}$  液体铺床时 玻璃球运动情况Fig. 4 Movement of the glass ball when density is  $1.01 \text{ g/mL}$  and volume of liquid making bed is  $10 \text{ mL}$ 

### 3.1 糙率与残留层密度的关系

根据表 1 中的监测数据, 绘制在坡度为  $3^\circ$ 、厚度分别为  $0.690$ 、 $0.345$ 、 $0.172$ 、 $0.086$  和  $0.034 \text{ cm}$  条件下, 糙率与密度间关系曲线, 如图 5(a) 所示. 从图 5(a) 可以看出, 当坡度为  $3^\circ$ 、厚度为  $0.690$ 、 $0.345$ 、 $0.172$ 、 $0.086$  和  $0.034 \text{ cm}$  时, 随着密度增大, 糙率逐渐增大; 反之, 随着密度减小, 糙率逐渐减小. 这说明在坡度和厚度相同情况下, 糙率与密度呈正相关关系.

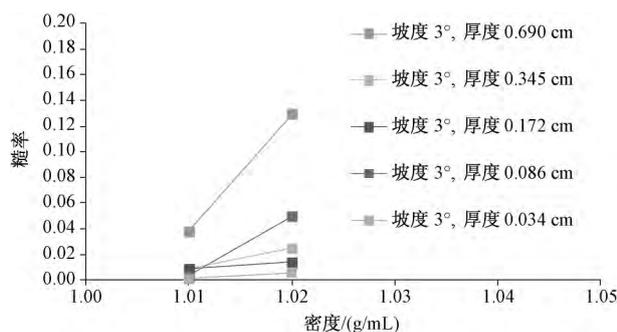
### 3.2 糙率与残留层厚度的关系

根据表 1 中的监测数据, 绘制在坡度为  $2^\circ$ 、密度分别为  $1.01$  和  $1.02 \text{ g/mL}$  条件下, 糙率与厚

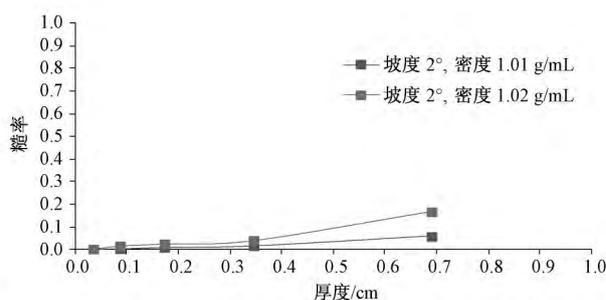
度间的关系, 如图 5(b) 所示. 从图 5(b) 可以看出, 当坡度为  $2^\circ$ 、密度分别为  $1.01$  和  $1.02 \text{ g/mL}$  时, 随着厚度增厚, 糙率逐渐变大; 反之, 随着厚度逐渐变薄, 糙率也逐渐减小. 这说明在坡度和密度相同情况下, 糙率与厚度呈正相关关系.

### 3.3 糙率与斜坡坡度的关系

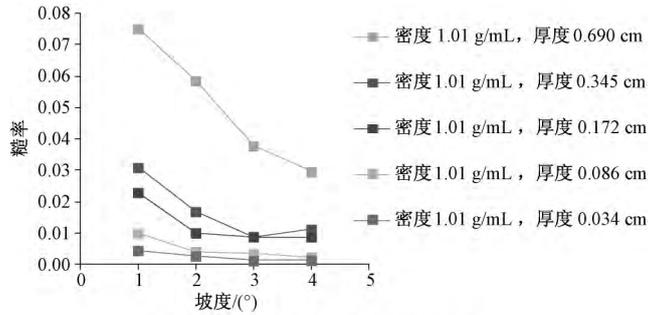
根据表 1 中的监测数据, 绘制密度分别为  $1.01$  和  $1.02 \text{ g/mL}$ 、厚度分别为  $0.690$ 、 $0.345$ 、 $0.172$ 、 $0.086$  和  $0.034 \text{ cm}$  条件下, 糙率与坡度间关系曲线, 如图 5(c) 所示. 从图 5(c) 可以看出, 当密度为  $1.01 \text{ g/mL}$ 、厚度为  $0.690$ 、 $0.345$ 、 $0.172$ 、 $0.086$  和  $0.034 \text{ cm}$  时, 随着坡度逐渐增大,



(a) 坡度、厚度相同条件下, 糙率与密度关系



(b) 坡度、密度相同条件下, 糙率与厚度关系



(c) 密度、厚度相同条件下, 糙率与坡度关系

图 5 糙率与密度、厚度和坡度关系

Fig. 5 Relationships of roughness with density , thickness , and slope gradient

糙率呈减小趋势; 反之, 随着坡度逐渐减小, 糙率呈增大趋势. 这说明在密度和厚度相同情况下, 糙率与坡度呈负相关关系.

### 4 结论

本文在通过直观图像对比后, 同时试验数据表 1 中的监测数据进行量化分析, 结果表明监测数据分析结果与直观图像对比结果具有相同的相关关系. 本文主要得到如下结论:

1) 当坡度、厚度相同, 密度不同时, 密度越小, 糙率越小, 即糙率与密度成正相关关系, 其关系可以用数学式表示为: 糙率  $\propto$  密度.

2) 当坡度、密度相同, 厚度不同时, 厚度越大, 糙率越大, 即糙率与厚度成正相关关系, 其关系可以用数学式表示为: 糙率  $\propto$  厚度.

3) 当密度、厚度相同, 坡度不同时, 坡度越大, 糙率越小, 即糙率与斜坡坡度成负相关关系, 其关系可以用数学式表示为: 糙率  $\propto \frac{1}{\text{坡度}}$ .

4) 综合上述 1)、2)、3) 的结论, 可得到残留层糙率与厚度、密度和斜坡坡度间的数学关系可表示为: 糙率  $\propto \frac{\text{密度} \times \text{厚度}}{\text{坡度}}$ .

### 参考文献

[ 1 ] 张军, 吴积善, 游勇, 等. 粘性泥石流残留层的形成及减

阻作用: 以云南蒋家沟泥石流为例 [J]. 山地学报, 2003, 2( 21 ): 223-227.

[ 2 ] Yin Y, Cheng Y, Liang J, et al. Heavy-rainfall-induced catastrophic rockslide-debris flow at Sanxicun, Dujiangyan, after the Wenchuan Ms 8.0 earthquake [J]. Landslides, 2016, 13( 1 ): 9-23.

[ 3 ] Takahashi T. Debris flow mechanics, prediction and countermeasures [M]. Boca Raton: CRC Press, 2014.

[ 4 ] 王裕宜, 詹钱登, 韩文亮, 等. 粘性泥石流体的应力应变特性和流速参数的确定 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 1( 14 ): 9-13.

[ 5 ] 吴积善, 张军, 程尊兰, 等. 粘性泥石流残留层与泥深的关系分析 [J]. 山地学报, 2003, 21( 4 ): 487-492.

[ 6 ] 吴积善, 张军, 程尊兰, 等. 粘性泥石流的泥深与残留层关系及其确定 [J]. 泥沙研究, 2003 ( 6 ): 7-12.

[ 7 ] Cui P, Chen X, Wang Y, et al. Jiangjia Ravine debris flows in south-western China [M]. Berlin: Springer Heidelberg, 2005: 565-594.

[ 8 ] 游勇, 程尊兰. 粘性泥石流阵性运动对沟床冲淤演变的影响: 以云南东川蒋家沟为例 [J]. 防灾减灾工程学报, 2006, 25( 2 ): 146-151.

[ 9 ] Chen X, You Y, Chen J, et al. Characteristics of a drainage channel with staggered indented sills for controlling debris flows [J]. Journal of Mountain Science, 2014, 11( 5 ): 1 242-1 252.

[ 10 ] Hu K, Hu C, Li Y, et al. Characteristics and mechanism of debris-flow surges at Jiangjia Ravine [C] // 5th international conference on debris-flow hazards mitigation: mechanics, prediction and assessment. Casa Editrice Università La Sapienza, Roma. 2011: 211-217.