

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2011.05.007

两相流分离鳃泥沙运动轨迹及加速滑移的力学分析

严跃成¹ 邱秀云² 张 翔² 龚守远³

(1. 新疆大学建筑工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 3. 新疆农业大学农学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要 利用高速摄像技术捕捉分离鳃中泥沙运动的图像,对两相流分离鳃内部水沙运动进行测试,描绘了分离鳃流场概化图像,证明分离鳃内有异重流现象发生。通过对分离鳃鳃片上的泥沙进行力学分析,推导出泥沙在鳃片上的运动轨迹,研究了泥沙的沉降特性,并给出泥沙沉降条件与结构设计参数 β 之间的关系,从力学分析的角度论证了前期物理试验中得出的结构优化参数的合理性。

关键词 泥沙运动轨迹;水沙分离;分离鳃;鳃片;泥沙沉降

中图分类号:TV14 文献标识码:A 文章编号:1006-7647(2011)05-0027-03

Mechanical analysis of sediment motion path and accelerated slip on two-phase flow separation device//YAN Yue-cheng¹, QIU Xiu-yun², ZHANG Xiang², GONG Shou-yuan³(1. College of Architecture Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 3. College of Agronomy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: The water and sediment movement in a two-phase flow separation device was tested by means of the high speed camera. The general images of flow fields in the flow separation device were depicted. The phenomenon of density flows was proved to exist in the flow separation device. Through the mechanical analysis of the sediment on the flake of the flow separation device, the sediment motion path on the flake was deduced. The settlement characteristics of the sediment were investigated. The relationship between settlement condition and structural design parameter β was also studied. The rationality of the structural optimization parameter obtained by the previous physical tests was validated by use of the mechanical analysis.

Key words: sediment motion path; water and sediment separation; flow separation device; flake; sediment settlement

两相流分离鳃是新疆农业大学邱秀云等^[1]研制的一种新型水沙分离装置,该装置适用于处理黏性高含沙水流。前期研究表明,该装置通过在浑水容器中增设倾斜的隔板(鳃片),利用物理作用使水沙产生相对运动,从而快速分离泥沙并提取清水,这是一种安全环保的取水方式。在前期试验中,朱超等^[2-5]对分离鳃的水沙分离机理进行了初步分析,研究了鳃片的形式、倾角和间距对泥沙分离效果的影响,观测记录了泥沙的沉降速度。笔者用高速摄像技术捕捉分离鳃中泥沙运动的图像对鳃管内的水沙运动进行测试,描绘了分离鳃流场概化图,再次证明“分离鳃”内有异重流现象发生。此外通过对鳃片上的泥沙作力学分析,探讨了泥沙在鳃片上的运动轨迹及滑移时的力学特性,推导出鳃片上不产生泥沙淤积的鳃片最小倾角,从理论上验证了试验结果的合理性。

1 装置及试验情况

1.1 试验装置

分离鳃是由鳃管、鳃片构成的矩形管状结构(见图1),采用透明透光率95%的有机玻璃制作,分离鳃鳃片与鳃管的宽度侧壁构成 α 倾斜角,与鳃管的长度侧壁构成 β 倾斜角。采用前期试验研究的参数,取分离鳃外轮廓尺寸为 $a=10\text{ cm}$, $b=4\text{ cm}$, $c=45\text{ cm}$,取 $\alpha=60^\circ$, $\beta=45^\circ$,分离鳃中布置5片鳃片,鳃片与矩形管两侧壁宽度之间各留1 cm宽的通道,便于清水上升和泥沙下沉。

1.2 试验材料和仪器

试验选用乌鲁木齐鲤鱼山天然黄土作为模型沙,其颗粒级配如下:粒径大于0.075 mm的质量分数为0.3%,粒径小于0.05 mm的质量分数为90%以

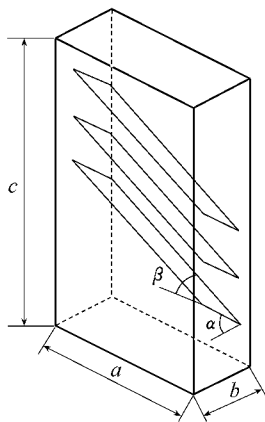


图1 两相流分离鳃示意图

上, 粒径小于 0.01 mm 的质量分数为 37% , 中值粒径为 0.015 mm 。水中含沙质量浓度取 100 kg/m^3 。

试验在四川大学国家重点实验室进行, 采用美国 REDLAKE MASD 公司生产的 HG-LE 高速摄像机捕捉分离鳃中泥沙运动的图像。试验所用的主要仪器及设备有: 数码照相机、高速摄像机、刻度尺、疝气灯、笔记本电脑。

2 试验现象及分析

2.1 分离鳃内水沙流动图像

采用高速摄影技术研究物体运动规律已有成功先例^[6-7], 但高速摄影技术在高黏性含沙水流中的应用效果还有待探索。图2为高速摄像机拍摄的分

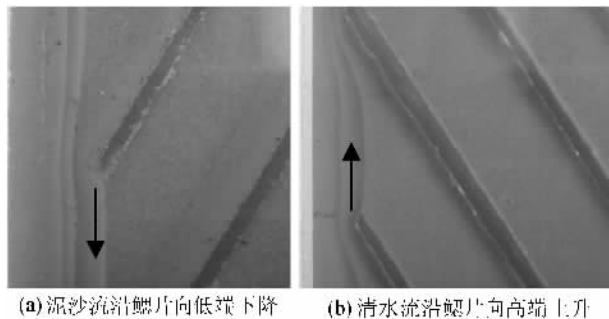


图2 两相流分离鳃水沙流动图像

2.2 分离鳃流场概化图

笔者通过分析高速摄影图像, 描绘了分离鳃流场概化图, 见图3。图3中实线表示水沙绕容器边壁作大循环的垂向异重流, 虚线表示水沙绕鳃片作小循环的横向异重流。泥浆沿鳃片上表面向低端流动, 随后进入泥沙下沉通道, 流入容器底部; 水流沿

鳃片下表面由低端向高端流动, 随后沿清水上升通道垂直向上运动, 两股水流所形成的水沙异重流一直延续到水沙完成分离。分离鳃流场概化图描绘了清水上升、浑水下降的水沙运动轨迹。

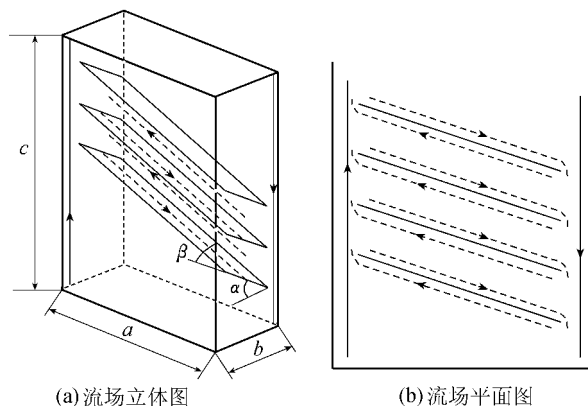


图3 分离鳃中异重流概化图

3 水沙分离的力学机理分析

3.1 泥沙在鳃片上的运动轨迹

图4中CGFD为分离鳃鳃片的倾斜平面, 它与分离鳃管壁构成三角形渠道, 泥沙在鳃片上作三维运动, 沉降到鳃片上的泥沙会沿着斜面的最大坡度滑移至三角形渠底, 再沿着三角渠底向下滑移至鳃片最低端, 进入泥沙下沉通道。

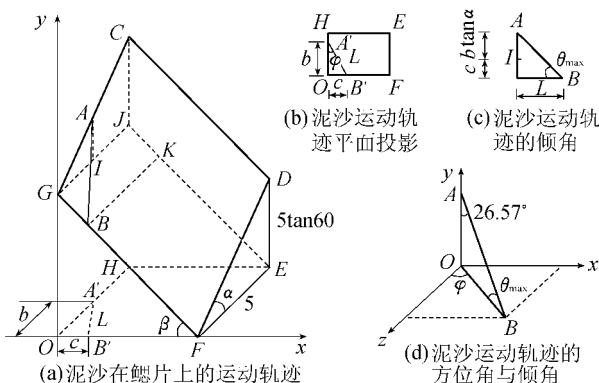


图4 鳃片上任意一点泥沙运动轨迹

取鳃片上 A 点(任意点)泥沙分析, 泥沙沿着通过 A 点的最大倾角所对应的路径滑入三角渠底 B 点, L 为泥沙运动轨迹 AB 的平面投影, c 和 b 为平面投影 L 的2个分量, θ 为泥沙的运动轨迹 AB 与水平面的倾角, 轨迹 AB 的平面投影 $L = \sqrt{b^2 + c^2}$, 倾角 $\theta = \arctan[(c + b \tan \alpha) / \sqrt{b^2 + c^2}] = \arctan[(c + 1.732b) / \sqrt{b^2 + c^2}]$, 为求最大的滑移倾角, 对 $\theta = f(c)$ 取极值: $\frac{d\theta}{dc} = 0$, 求得 $c = 0.58b$, 即 $c = 0.58b$ 时, 最大倾角 $\theta_{\max} = 63.434^\circ$, 平面上的方位角 $\varphi = \arctan(c/b) = 30.11^\circ$

根据上述分析, 推导出的泥沙运动轨迹如图4

所示, A 点处泥沙先沿着 AB 路径滑移到三角形渠底,再沿着 BF 路径滑移到鳃片最低端,然后垂直下沉,AB 路径倾角为 63.434°,BF 路径倾角为 45°。

3.2 泥沙在鳃片上滑移的力学分析

根据现有的泥沙资料^[8-11]可知,如果水中的泥沙颗粒足够细,泥沙颗粒之间的公共吸附水膜会将它们连接起来,这种作用叫凝聚作用,泥沙颗粒凝聚后形成较大的絮团,当水中泥沙质量浓度超过某一数值时絮团会结成蜂窝状,形成一个连续的空间网状结构,此时泥沙沉降速度将大幅度降低。分离鳃前期研究工作表明^[2],分离鳃鳃片的存在会破坏泥沙的网状结构,使泥沙分散成大小不等的絮团下沉。

泥沙最小絮团粒径是泥沙单元体受力分析的依据,为确定泥沙最小絮团的当量粒径,笔者做了如下试验:分别取泥沙下沉通道宽度为 1 mm、2 mm、3 mm 和 5 mm 进行试验,结果表明,泥沙下沉通道发生淤堵的临界宽度为 1 mm,由此推断泥沙最小絮团的当量粒径大于 1 mm,故取 2 mm 当量粒径的泥沙絮团为研究对象。

假设鳃片上的泥沙絮团为球状体,沿鳃片斜面向下滑移,其有效重力 G' 可分解为沿鳃片斜面的下滑力和垂直斜面的正压力,泥沙在运动过程中,还受到水的阻力 F_D 与鳃片底部摩擦力 F_f 及斜面支撑力 F_R 作用,如图 5 所示。

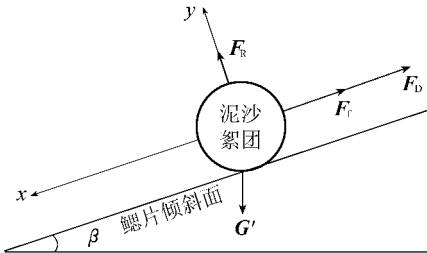


图 5 泥沙絮团受力示意图

泥沙絮团上各种作用力的计算公式如下:

$$F_D = C_D \frac{\pi d^2}{4} \frac{\rho \omega^2}{2} \tag{1}$$

$$G' = \frac{\pi d^3}{6} (\rho_s - \rho) g \tag{2}$$

$$F_R = G' \cos \beta \tag{3}$$

$$F_f = f F_R \tag{4}$$

式中: d 为泥沙絮团当量粒径,取 $d = 2 \text{ mm}$; ω 为斜面上泥沙运动的瞬时速度,测得 $\omega = 15 \text{ mm/s}$; ρ_s 、 ρ 分别为泥沙絮团及水的密度, $\rho_s = 1\,720 \text{ kg/m}^3$; C_D 为阻力系数,其值与泥沙的雷诺数有关,水温 $T = 22.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 时运动黏滞系数 $\nu = 0.9514 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$,求得泥沙雷诺数 $Re = 31.5$,由文献^[12]查得 $C_D = 3.9$; g 为重力加速度, m/s^2 ; f 为摩擦因数,由试验测得泥

沙与鳃片材料之间的摩擦因数 $f = 0.577$ 。
对泥沙絮团沿斜面 x 方向进行受力分析:

$$\sum F_x = G' \sin \beta - F_D - F_f \tag{5}$$

$$a_x = \frac{\sum F_x}{m} \tag{6}$$

式中: $\sum F_x$ 为泥沙絮团所受到的沿斜面方向的合力, N ; a_x 为泥沙沿斜面运动的加速度, m/s^2 ; m 为泥沙絮团的质量, kg 。

由式(1)~(6)计算所得结果见表 1。

表 1 计算结果及鳃片斜面倾角变化时泥沙的运动状态

$\beta(^{\circ})$	$\sum F_x / 10^{-6} \text{ N}$	$a_x / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	泥沙的运动状态
45	7.440	0.1700	加速下滑
35	1.603	0.0370	微加速下滑
32	-0.177	-0.0040	接近匀速(临界状态)
30	-1.367	-0.0312	减速或淤积

计算结果表明, $\beta = 32^{\circ}$ 是泥沙滑移的临界状态。当 $\beta < 32^{\circ}$ 时泥沙会在鳃片上停留或淤积,无法沉入鳃管底部。

目前所选用的分离鳃鳃片倾角 $\alpha = 60^{\circ}$, $\beta = 45^{\circ}$,泥沙在此鳃管中滑移的 2 条路径倾角分别为 63.434° 和 45° ,均大于 32° ,因此不会出现泥沙在鳃片上淤积的情况。

4 结 语

对鳃片上的泥沙进行运动机理分析,描绘了泥沙在鳃片上的运动轨迹:沉入鳃片的泥沙以 63.434° 的倾角下滑至三角形渠底,再以 45° 的倾角沿三角形渠底滑移至鳃片最低端,然后进入泥沙下沉通道并垂直下沉。理论分析与试验所得流场概化图的泥沙运动轨迹相同。

通过对鳃片上的泥沙进行力学分析,推导出泥沙在鳃片上不产生淤积时所需的鳃片最小倾斜角度为 32° 。目前所选用的分离鳃鳃片倾角 $\alpha = 60^{\circ}$, $\beta = 45^{\circ}$,结构布置形式符合泥沙的滑移条件,不会出现泥沙在鳃片上淤积的情况。从力学分析角度论证了物理试验中所得出的结构优化设计参数的合理性,即鳃片倾角 β 的取值范围以 $45^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 为宜。

参考文献:

[1] 邱秀云,龚守远,严跃成,等.一种新型水沙分离装置的研究[J].新疆农业大学学报,2007,30(1):68-70.
[2] 朱超,邱秀云,严跃成.垂向异重流式水沙分离鳃水沙分离机理浅析[J].水利水电科技进展,2009,29(5):20-23.

(下转第 42 页)

铺装结构在各种雨型情况下的产流时刻均最晚,也就是说,处理 B_2 能够最大限度地推迟地表产流发生的时间,减轻区域排水压力的能力也最大。铺装系统储水量柱状图反映了透水铺装结构内各层及基层土壤的总体综合蓄水能力,从图中可以看出,各种铺装形式均有较好的蓄水效果,数值差异不大, B_2 铺装结构略占优势。由此可见, B_2 铺装结构最有利于下渗雨水和削减径流。

3 结 论

a. 第 1 组试验结果表明,采用无砂混凝土作为透水地面铺装的垫层,具有比中砂、砂砾料好的透水效果,无砂混凝土强度较高,便于满足相应的承载力要求,中砂垫层与透水混凝土相比具有造价低、施工简单的优点。

b. 第 2 组试验结果表明,透水混凝土和单级配碎石都具有较好的透水能力、较大的孔隙率、孔径,透水砖面层下面采用无砂混凝土+单级配碎石的铺装结构时,透水地面的径流削减与错峰和增加入渗效果最突出。

c. 综合分析认为,从增加渗透能力和削减径流的角度出发,透水地面的铺装结构宜采用“透水砖面层+无砂混凝土+单级配碎石”的结构形式,各个建构层的厚度可根据设计降雨重现期、径流量或峰值的控制要求通过相关计算确定。

参考文献:

[1] 丁跃元,陈建刚,张书函.北京城市雨洪利用现状与发

(上接第 29 页)

[3] 朱超,邱秀云,刘艳.“垂向异重流式水沙分离鳃”鳃片型式对水沙分离的影响研究[J].新疆农业大学学报,2008,31(6):72-75.
[4] 朱超,邱秀云,孙鑫.“垂向异重流式分离鳃”鳃片倾角对水沙分离影响的试验研究[J].人民黄河,2009,31(7):86-87.
[5] 朱超,邱秀云,孙鑫,等.“垂向异重流式水沙分离鳃”鳃片间距对水沙分离的影响研究[J].新疆农业大学学报,2009,32(2):78-81.
[6] 胡春宏,惠遇甲.高速摄影技术在泥沙研究中的应用[J].泥沙研究,1990,3(1):61-66.
[7] 张法星,许唯临,杨朝晖,等.采用高速摄像和数字图像处理技术求解强紊动明渠水流自由面[J].四川大学学报:工程科学版,2007,39(2):61-65.
[8] 王兴奎,邵学军,李丹勋.河流动力学基础[M].北京:中国水利水电出版社,2002.
[9] 陈洪松,邵明安.细颗粒泥沙的絮凝沉降特性[J].水利

展探讨[C]//北京市水务局.北京水资源可持续利用国际研讨会论文集.北京:中国水利水电出版社,2007:201-204.
[2] 潘安君,张书函,陈建刚,等.城市雨水综合利用技术研究与应用[M].北京:中国水利水电出版社,2010:1-11.
[3] 车武,李俊奇.城市雨水利用技术与管理[M].北京:中国建筑工业出版社,2006:1-8.
[4] 王波.透水性铺装与生态回归——城市广场生态物理环境优化[M].东营:石油大学出版社,2004:1-7.
[5] LEGRET M, COLANDINI V, Le MARC C. Effects of a porous pavement with reservoir structure on the quality of runoff water and soil[J]. The Science of the Total Environment, 1996, 28: 335-340.
[6] COLANDINI V, MICHEL L, YVES B. Metallic pollution in clogging materials of urban porous pavements[J]. Water Science and Technology, 1995, 33(1): 57-62.
[7] JC/T 945—2005 透水砖[S].
[8] DB11/T 685—2009 城市雨水利用工程技术规程[S].
[9] DB11/T 686—2009 透水砖路面施工与验收规程[S].
[10] 陈建刚,张书函,丁跃元,等.基于雨洪利用的不同下垫面降雨产流规律研究[J].水利水电技术,2007(11):81-85.
[11] 侯立柱,冯绍元,张书函,等.透水砖铺装地面垫层结构对城市雨水入渗过程的影响[J].中国农业大学学报,2006(4):51-55.
[12] 岑国平,沈晋,范荣生,等.城市地面产流的试验研究[J].水利学报,1997,38(10):47-52.

(收稿日期 2010-10-13 编辑:高建群)

学报,2002,33(5):356-359.
[10] 钱宁,万兆惠.泥沙运动力学[M].北京:科学出版社,1983.
[11] 张瑞瑾.河流泥沙动力学[M].北京:中国水利水电出版社,2000.
[12] 日本土木学会.水力公式集:下册[M].铁道部科学研究院水工水文研究室,译.北京:人民铁道出版社,1976.

(收稿日期 2010-12-31 编辑:高建群)

