

# 中国西部矿区厚松散层的溃沙临界流速 与水沙流动特征

杨 斌<sup>1,2</sup>, 杨天鸿<sup>1,2</sup>, 徐曾和<sup>1,2</sup>, 杨 鑫<sup>1,2</sup>  
(1. 东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 以陕北榆横矿区为例, 研制全程可视化水沙两相高速流动试验装置, 开展颗粒起动试验、溃沙试验和水沙两相流动试验. 试验结果表明: 细颗粒的流失是溃沙的先决条件, 为粗颗粒的运移创造膨胀空间. 0.3~0.6 mm 风积沙颗粒之间主要以碰撞的形式传递能量, 而 0.15~0.3 mm 的风积沙颗粒之间的相互摩擦和挤压作用占优, 相比于碰撞作用能量损失较少, 相同时间内出沙量随着颗粒粒径的增大呈递减趋势. 随着轴向应力的不断增大, 风积沙所需要的溃沙临界流速也越来越大. 当风积沙粒径  $d < 0.6$  mm 时, 溃沙时渗流状态为线性层流, 临界流速为 0.03~0.4 cm/s. 单位时间内溃沙量与水力梯度成正比, 表明含水层水压力是决定溃沙灾害程度的关键因素.

**关 键 词:** 厚松散层; 突水溃沙; 临界流速; 轴向应力; 拖曳力; 体积膨胀  
**中图分类号:** TU 45      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2018)11-1648-06

## Critical Velocity of Sand Inrush and Flow Characteristics of Water-Sand in Thick Unconsolidated Formations of Mine in Western China

YANG Bin<sup>1,2</sup>, YANG Tian-hong<sup>1,2</sup>, XU Zeng-he<sup>1,2</sup>, YANG Xin<sup>1,2</sup>  
(1. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: YANG Tian-hong, E-mail: yangtianhong@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** Taking the Yuheng mine in Northern Shaanxi as an example, aeolian-sand incipience experiment and water-sand inrush experiment were expansion by high-velocity seepage and entire visual equipment of water-sand two-phase flow. The experiment results indicated that, the loss of fine particles is the precondition of water-sand inrush and creates expansive space for the coarse particle migration. The process of water-sand inrush is a physical process, when the aeolian-sand size between 0.3~0.6 mm, the energy transmits mainly in the form of particles collision. But it is different for the aeolian-sand size between 0.15~0.3 mm, because the friction and squeeze are in the dominant role, that will lose less energy compared with collision. So the variation mass of aeolian-sand inrush is inversely proportional to the particle size. The critical velocity of aeolian-sand inrush is becoming higher with the increasing of axial stress. When the aeolian-sand begins to move, the seepage state is linear laminar flow and the critical velocity is 0.03~0.4 cm/s for the aeolian-sand size  $d < 0.6$  mm. The mass of sand inrush is proportional to the hydraulic gradient in unit time. It can be deduced from this result that water pressure of aquifer is the key factor, which greatly decisive the disaster degree of water-sand inrush.

**Key words:** thick unconsolidated formation; water-sand inrush; critical velocity; axial stress; drag force; volumetric expansion

近年来西部矿区成为我国煤炭资源开发的重心.中国西部的浅埋煤层位于含水量大的第四纪冲积层下方,松散含沙层较厚、沙粒之间胶结程度较差,采动引起的突水溃沙是对安全生产的主要威胁.2012 年 11 月 17 日 15 时,陕西省神木县隆德煤矿由于打钻诱发突水溃沙事故,导致大山消失,地面下塌约 25m,造成上亿元的经济损失<sup>[1]</sup>.由于地下采煤工程的隐蔽性和不可视性,现场观测突水溃沙机理和影响因素比较困难,所以通过室内试验模拟水沙两相通过不动多孔介质(粗)骨架的渗流试验,研究水沙两相渗流机理是积极措施之一.

国内对于突水溃沙问题的研究主要是基于地下水水动力学理论以及颗粒流理论,采用室内试验、数值模拟和理论分析等方法进行研究,并以临界水力梯度作为判据.水沙通过多孔介质的渗流从更广泛的意义上是液、固两相混合流体通过多孔介质的渗流,介于液、固两相流动和多相流体流动之间.以往的研究均是將水沙混合物当作单相流体进行研究,忽略了水和沙在流动过程中的相互作用.

Shirvanian 等<sup>[2]</sup>和 Ookawara 等<sup>[3]</sup>利用 FLUENT 有限元软件研究了管道内水沙的运动规律.Wang 和 Ni 等基于固液两相流理论研究了水平方管内水沙两相流动特征以及颗粒浓度的分布形式<sup>[4-6]</sup>.上述对于水沙两相流的理论研究主要是对河流以及管道中的水沙两相运动规律的研究.由于试验设备的限制,不能够观察突水溃沙的全程,不能实现水沙精确的分相测量,缺少对于突水溃沙临界流速、高水力梯度条件下水沙两相流动特征的研究.

本文以榆横矿区为例,研制全程可视化水沙两相高速流动试验装置,研究溃沙临界流速与粒径、应力、渗流状态的关系,得出该地区水沙两相流动规律、水沙相互作用机理及能量传递机理,提出突水溃沙灾害的临界流速判据.为煤矿开采过程中突水溃沙灾害的预测与防治提供科学依据.

# 1 试验装置及测试方法

## 1.1 试验装置

本试验采用东北大学自主研发的水沙两相高速流动试验装置,试验设备及原理图见文献<sup>[7]</sup>.

对于水沙两相混合流动试验,要研究其运动机理,必须得到水、沙分相流速,分相测量装置如图 1 所示,容器 1 中预先盛满水,当水沙混合流体

进入容器 1 中,沙颗粒沉降堆积在容器底部并替换出等体积的水,水通过容器 1 的溢流口进入容器 2,由电子天平进行实时测量,可以得到单位时间内水的质量增量,被水密度与过流断面的面积除,就能得到水的流动速度(比流量).电子天平读数的变化反映了进入容器 1 中风积沙的质量与排出的等体积水质量之差,由此可以得到沙的运动速度.

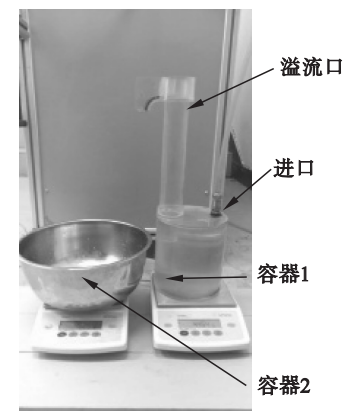


图 1 固液两相分相测量装置  
Fig. 1 Solid-liquid two-phase phase separation measuring device

## 1.2 试验材料

陕北榆横矿区特有的地表风积沙地貌与发达的地表水系是造成高强度、大规模开采条件下发生突水溃沙灾害的主要原因.风积沙的密度为 2.62 g/cm<sup>3</sup>,通过高频振筛机筛分后可知该地区风积沙主要颗粒粒径为 0.15 ~ 0.6 mm,其中 0.15 ~ 0.3 mm 粒径的颗粒质量分数为 58.84%,0.3 ~ 0.6 mm 粒径的颗粒质量分数为 39.84%,粒径小于 0.15 mm 颗粒质量分数仅为 1.6%.由于试验样本比较少,所以增加了颗粒形状、表面粗糙度与风积沙相似,密度为 2.65 g/cm<sup>3</sup>,粒径为 0.6 ~ 1.0 和 1.0 ~ 2.0 mm 的海沙(图 2).

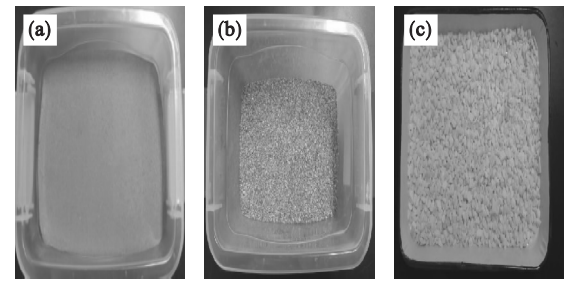


图 2 试验材料  
Fig. 2 Experimental materials  
(a)—风积沙;(b)—海沙;(c)—石英砂.

## 1.3 试验方案与方法

1) 颗粒起动试验(图 3).采用下部填装沙

样,上覆钢珠,在两端施加轴压的条件下,测定沙粒起动流速,即溃沙临界流速. 试验装样时为了减小“粮仓效应”<sup>[8]</sup>对轴压效果的影响,沙柱的高度控制在 100 mm,小于直径的两倍,并在有机玻璃装样筒内壁涂抹一层薄薄的凡士林,减小壁面效应. 在沙样与钢珠间添加多孔板,防止钢珠沉入沙中,上部钢珠强度大且填装密实,认为是不可压缩多孔介质,所以轴压柱塞向下移动的距离完全是沙柱的压缩量. 沙粒粒径范围:0.075 ~ 0.15 mm, 0.15 ~ 0.3 mm, 0.3 ~ 0.6 mm, 0.6 ~ 1 mm, 1 ~ 2 mm, 2 ~ 2.36 mm 共 6 组. 轴向应力设置为:0, 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 1.8 MPa 共 6 级.

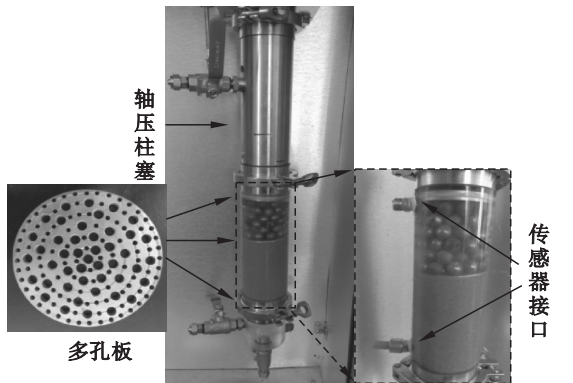


图 3 风积沙起动试验

Fig. 3 Experiment of aeolian-sand incipience

2) 溃沙试验(图 4). 预先将粒径为 2.36 ~ 4.75 mm 的石英砂填入长为 200 mm 的有机玻璃管中作为骨架,其孔隙率为 0.46. 然后再将粒径为 0.075 ~ 0.6 mm 的风积沙填入长为 322 mm 的有机玻璃管中,沙样的孔隙率为 0.34. 用石英砂骨架模拟破碎岩体突水通道,风积沙模拟含沙含水层,石英砂和风积沙之间用多孔板分隔. 研究其在不同水力梯度下的出沙量,实测水力梯度为 1.02, 2.04, 3.06, 4.08, 5.10.

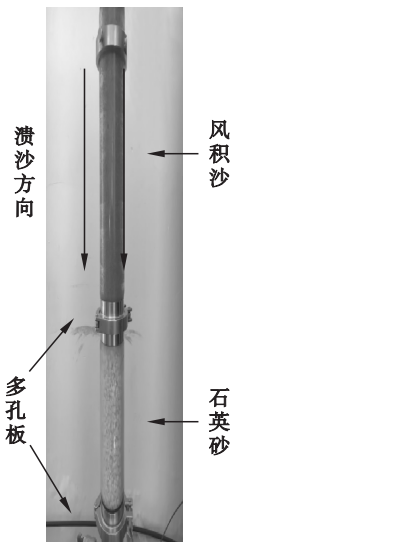


图 4 溃沙试验

Fig. 4 Experiment of sand inrush

3) 水沙两相流动试验(图 5). 在长为 322 mm 的有机玻璃管中,分别装填粒径为 0.15 ~ 0.3 和 0.3 ~ 0.6 mm 的风积沙作两次试验. 采用由下进水、由上出水的方式研究水沙两相流动机理. 具体试验方案见表 1.

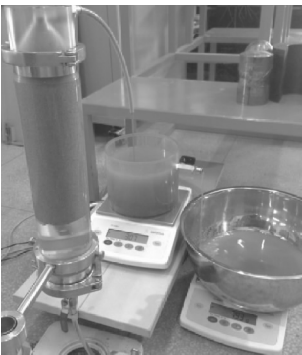


图 5 水沙两相流动试验

Fig. 5 Experiment of two-phase flow constituted by water and sand

表 1 试验方案设计  
Table 1 Experimental scheme

试验类型	试验组数	风积沙 粒径/mm	沙样初始 高度/mm	初始孔 隙率 $\varphi$
颗粒起 动试验	6	0.075 ~ 0.15	100	0.36
		0.15 ~ 0.3		0.34
		0.3 ~ 0.6		0.34
		0.6 ~ 1.0		0.45
		1.0 ~ 2.0		0.42
		2.0 ~ 2.36		0.43
溃沙试验	5	0.075 ~ 0.6	322	0.34
水沙两相 流动试验	2	0.15 ~ 0.3	322	0.40

每次试样装填完毕后,抽真空 20 min,然后打开进水截止阀,采用由底部向上逐层饱和的方法,令水缓慢地进入试样,在进水过程中保持真空泵运转以维持真空度不变,以保证颗粒间的空气和颗粒表面的气泡完全被水置换,颗粒表面被水完全浸润. 试验时水温基本恒定在 20 ℃ 左右,流体动力黏滞系数  $\mu$  取  $1.01 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ .

2 试验结果及分析

2.1 溃沙临界流速与粒径、应力、渗流状态的关系

在没有发生突水时,承压含水层风积沙在围压与自重作用下紧密压实,此时风积沙颗粒堆具



有静态性质,风积沙颗粒在重力、上层沙颗粒的压力、下层沙颗粒的支持力、静摩擦力等力的作用下保持现有的形态,能够抵抗一定的应力而不发生屈服和变形. 突水发生时,还要受到水的浮力、拖曳力、渗透压力以及动摩擦力等力的作用. 拖曳力是溃沙的主要动力,随着突水速度逐渐增大,拖曳力也越来越大,当拖曳力增加到一定程度后,破坏了颗粒之间通过力链(或拱)形成的力的网络,颗粒开始运动. 风积沙的粒径非常小,所以颗粒起动速度即为溃沙临界速度. 试验中不断增加试样上游水压力,水的流速随之增加,通过有机玻璃管可以观察到沙粒群首先发生体积膨胀,其次是颗粒在水流拖曳力的作用下产生翻滚运动,逐渐进入上覆钢珠堆积的多孔介质中,此时的流速视为溃沙的临界流速.

由图 6 可知,对于同一种粒径,随着轴向应力不断增大,风积沙颗粒之间镶嵌咬合越紧密,阻止风积沙颗粒运动的关键力即摩擦阻力逐步增大,风积沙所需要的起动流速也越来越大. 值得注意的是  $0 \sim 0.075\text{ mm}$  风积沙颗粒的起动速度随着轴压的增大先不变再减小最后趋于稳定,起动流速在  $0.33 \sim 0.029\text{ mm/s}$  之间,这是由于该粒径范围的风积沙非常细小,饱水堆积状态下非常密实,沙柱整体压缩性差,很小的扰动就会使其悬浮在水中.

对于相同轴压条件下,从小颗粒风积沙到大颗粒海沙,随着颗粒自重应力的增加,起动所需要的拖曳力也越来越大,起动流速逐步增大. 从雷诺数可以看出,当沙粒径  $d < 0.6\text{ mm}$  时,颗粒运动时渗流状态为线性层流,临界流速为  $0.03 \sim 0.4\text{ cm/s}$ ,临界雷诺数为  $0.29 \sim 1.8$ ; 当  $2.36\text{ mm} > d > 0.6\text{ mm}$  时,颗粒运动时渗流状态符合紊流,临界流速为  $3 \sim 11\text{ cm/s}$ ,此时临界雷诺数变化范围比较大,为  $20 \sim 240$ .

## 2.2 含水层水压力对溃沙的影响

溃沙试验中通过有机玻璃管可以观察到,当渗流速度很小时(大约  $0.3\text{ mm/s}$ ),水流就开始携带着粒径为  $0 \sim 0.075\text{ mm}$  的风积沙流经石英砂骨架突水通道到达出口处,导致出口处水流变浑浊,随着水流中含沙比越来越大,风积沙的孔隙率逐渐增大. 陆坤权等认为局部颗粒堆积密度的降低即体积膨胀是颗粒流动的前提<sup>[9]</sup>,  $0 \sim 0.075\text{ mm}$  粒径范围风积沙的流出,为大颗粒风积沙运动提供了膨胀空间. 这是一个由量变到质变

的物理过程. 可见,细颗粒的流失是溃沙的先决条件,且细颗粒的含量影响着溃沙量和溃沙范围. 现场可以通过观察巷道渗水的浑浊程度,提前采取相应的防治措施.

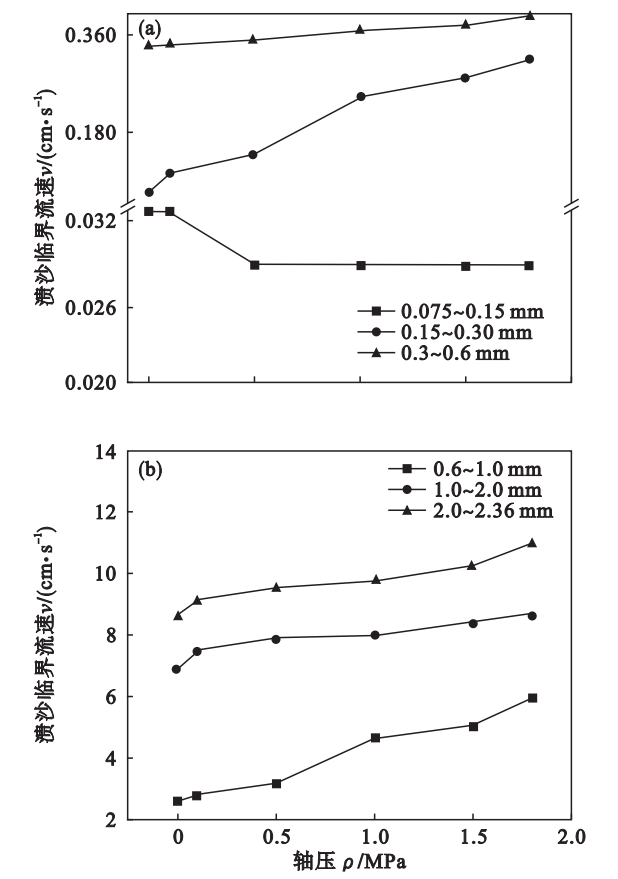


图 6 不同粒径范围沙的轴向应力与溃沙临界流速关系  
Fig. 6 Relationship between the axial stress and velocity of aeolian-sand inrush for different particles size range  
(a)— $0.075 \sim 0.6\text{ mm}$ ; (b)— $0.6 \sim 2.36\text{ mm}$ .

图 7 为风积沙在不同压力梯度下出沙量随时间变化曲线,由图可知在同一压力梯度条件下,出沙量与时间呈线性关系,可见溃沙过程中很快就达到了水沙两相稳定流动. 水力梯度为 1.02 和 2.04 时 90 s 的出沙量占总量的 20% ~ 40%,而水力梯度为 4.08 和 5.10 时出沙量占总量的 70% ~ 100%,这是一个阶跃性变化,且单位时间内溃沙量与水力梯度成正比,水力梯度越大,溃沙量越多,表明含水层水压力是决定溃沙灾害程度的关键因素,含沙量大、速度快是高水压溃沙的特点. 初始水力梯度越大,溃沙发生越迅速,带来的灾难也越严重,因此实际工程中含水层水压力可以作为实时监测和预报突水溃沙灾害的前兆信息.

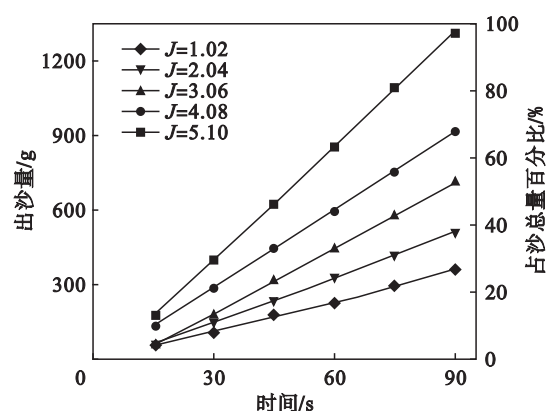


图 7 不同水力梯度条件下溃沙量变化规律  
Fig. 7 Variation mass of sand inrush with different hydraulic gradients

2.3 水沙两相流动机理

图 8 中两组试验均是在水力梯度为 3.57 条件下进行的. 粒径范围为 0.15 ~ 0.3 mm 的风积沙溃沙试验中, 沙的流速基本大于水的流速, 表明沙对水的流动具有促进作用, 而 0.3 ~ 0.6 mm 的试验结果正好与 0.15 ~ 0.3 mm 相反, 水的流动速度比沙的速度要大很多, 沙对水的流动起到阻碍作用. 从颗粒流的角度解释这种现象可以认为 0.3 ~ 0.6 mm 风积沙颗粒之间主要以碰撞

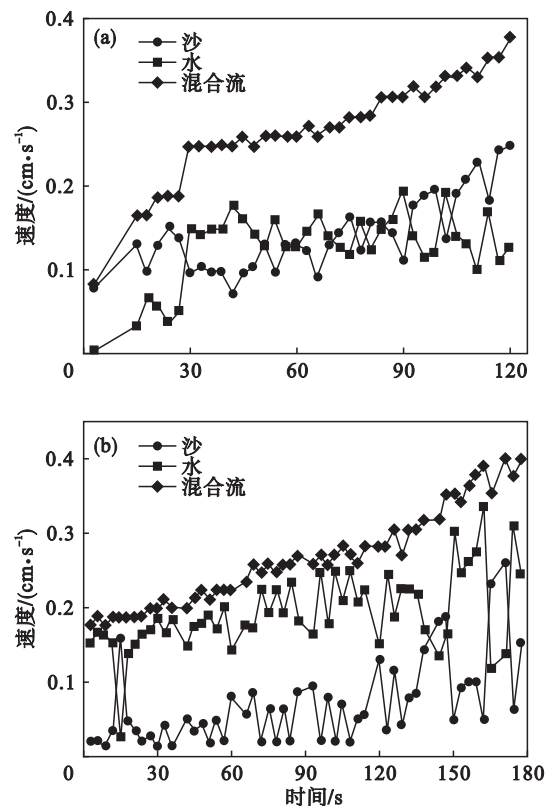


图 8 风积沙和水两相流动速度随时间变化曲线  
Fig. 8 Curves of aeolian-sand and water flow rate changing with time  
(a)—0.15 ~ 0.3 mm; (b)—0.3 ~ 0.6 mm.

的形式传递能量,正是这种非弹性碰撞导致颗粒速度的突变,其本质是稀疏流和密集流交替出现,而沙粒间隙中水流的存在对沙粒碰撞起着阻尼作用. Wang 等认为颗粒群之间的相互作用除了碰撞以外,还有颗粒之间的相对滑动及相互挤压作用<sup>[5]</sup>. 0.15 ~ 0.3 mm 风积沙溃沙试验中,沙柱在上游水压作用下整体被托起来了(图 5),颗粒之间形成了一种类似于“液桥力”<sup>[10]</sup>,颗粒之间的相互摩擦和挤压作用占优,相比于碰撞作用能量损失较少,其本质是持续的密集流,所以相同时间内出沙量与颗粒粒径呈反比的趋势(图 9).

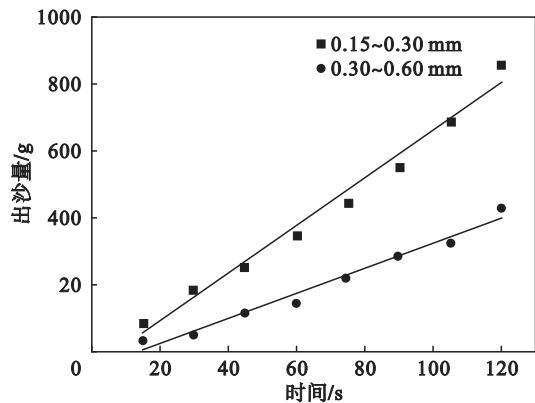


图 9 不同粒径风积沙出沙量随时间变化曲线  
Fig. 9 Curves of mass of aeolian-sand inrush with time for different particle size

3 结 论

- 1) 当粒径大于 0.075 mm 时,随着轴向应力的不断增大,风积沙溃沙临界流速也越来越大. 对于粒径小于 0.075 mm 的风积沙,轴压对其溃沙临界流速的影响可以忽略.
- 2) 相同轴压条件下,从小颗粒风积沙到大颗粒海沙,溃沙临界流速逐步增大. 当沙粒径  $d < 0.6$  mm 时,发生突水溃沙瞬时渗流状态为线性层流,临界流速为 0.03 ~ 0.4 cm/s,临界雷诺数为 0.29 ~ 1.8;当  $2.36 > d > 0.6$  mm 时,颗粒运移时渗流状态符合紊流,临界流速为 3 ~ 11 cm/s,此时临界雷诺数变化范围比较大,为 20 ~ 240.
- 3) 突水溃沙灾害发生时,粒径为 0.3 ~ 0.6 mm 风积沙颗粒之间主要以碰撞的形式传递能量,而 0.15 ~ 0.3 mm 的风积沙颗粒之间形成了一种类似于“液桥力”,颗粒之间的相互摩擦和挤压作用占优,相比于碰撞作用能量损失较少,相同时间内出沙量随着颗粒粒径的增大而减少.

(下转第 1657 页)