

粗化层形成过程中水沙特性试验

王宪业, 黄 尔, 杨青远, 王协康, 刘兴年

(四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要 通过水槽试验, 对卵砾石粗化层形成和破坏时近底水流结构特性和输沙率变化过程进行测量。结果表明, 随着河床粗化程度的增加, 近底水流结构紊动强度增大, 时均流速沿水深分布偏离对数律。粗化层形成与再破坏过程中, 推移质输沙率均以指数形式衰减, 床沙中细颗粒的减少使粗化的历时增加, 峰值增大。

关键词 输沙率, 粗化层, 水流结构, 卵砾石河床, 水沙特性试验

中图分类号: TV14 文献标识码: A 文章编号: 1006-7647(2007)S2-0059-04

我国西南山区卵砾石河道河床质级配宽, 由于特定的来水来沙条件, 造成其河床组成粒径粗, 在水流作用下极易形成粗化保护层。河道粗化层的形成与破坏对河道推移质输沙率的影响较大, 呈现阵发性、脉动性、间隙性特征。研究卵砾石河床的粗化层形成与破坏机理具有重要的理论价值和实践意义。卵砾石推移质的运动过程, 研究者常常从床面可动与不可动层^[1-2]、床沙粗化与细化^[3-4]及床面暴露度等研究概念着手, 探讨其运动规律。Paintal^[5]利用 MERCER 绝对暴露度观点, 假设暴露度分布为均匀分布, 提出了考虑暴露度及其分布的泥沙起动概率计算方法。韩其为等^[6]提出了相对暴露度的概念, 并假设它服从均匀分布。刘兴年等^[7-8]在平衡输沙实验中对暴露度进行了实测, 倾向于认为暴露度并非均匀分布。何文社等^[9]回顾了对暴露度研究的现状及存在的问题, 提出了一种定义暴露度的方法及其计算式, 同时得到了计算暴露度及暴露度系数的表达式。

由于卵砾石推移质运动主要取决于近底水流结构的变化, 如张启卫^[10]指出粗细颗粒之间的隐爆作用是由于大颗粒泥沙背流面的漩涡和大颗粒泥沙突出于河床上受到水流有效作用而引起。方红卫^[11]结合水流底速的脉动用暴露度作为河底边界随机组成的特征量。孙志林等^[12-13]基于床沙分布的随机特性, 运用统计理论建立了反映非均匀沙起动特点的起动流速公式, 导出了粗化过程中输沙率随时间

呈指数衰减规律变化的计算公式。郭志学等^[14]通过泥沙颗粒只在小范围对水流结构有影响的假定, 推导了以粒径为参变量的水流流速公式。

许全喜等^[15]考虑非均匀沙的起动特点, 用概率论与力学分析相结合的方法, 提出了同时预报粗化层级配与冲刷深度的多步预报模式。刘金梅等^[16]以床沙交换速率为基础, 探讨了床沙粗化对不平衡输沙的影响。王协康等^[17]以试验为基础, 分析了河床粗化稳定床面高度变化统计量与水流阻力的关系。

由上述分析可知, 目前对于粗颗粒的泥沙过程, 主要从床面特征、起动流速、输沙率等方面进行独自研究, 而将其综合考虑的研究并不多见。本文将以卵砾石输沙过程的典型试验, 即粗化层形成与破坏着手, 通过观测床面近底水流紊动特征与输沙率脉动变化过程, 力图揭示其相互作用机理。

1 试验概况

试验在四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室长 16 m、宽 0.40 m、深 0.50 m 的变坡水槽中进行, 采用 2 mm、3 mm、5 mm、10 mm 泥沙依不同比例混合铺设于槽底。本次试验共有 5 组, 组次 2、3、4 分别以组次 1、2、3 的粗化床面为初始床面, 其中组次 1、2 和 3 流量相同, 但水深稍有不同, 组次 4 和 5 具有相同的流量, 但床沙组成及床面初始形态存在一定的差异, 组次 5 的床沙组成及级配与前 4

组不同,试验水沙条件见表1。

表1 粗化层形成和破坏的试验条件

组次	各粒径床沙所占比例/%				床面 比降/ %	流量/ (L·s ⁻¹)	平均水 深/cm	粗化历 时/h
	2 mm	3 mm	5 mm	10 mm				
1	50		25	25	1.00	24.9	10.4	5.67
2	50		25	25	0.80	24.9	9.2	5.17
3	50		25	25	0.58	24.9	8.0	2.00
4	50		25	25	0.18	40.9	14.9	2.83
5		40	30	30	1.00	40.9	14.8	9.20

注 组次2 3 4的床面分别为组次1 2 3粗化后的形态。

试验测试段在水槽中段,有效试验段长4.5 m,底坡降1%,上游铺设1.0 m长的2 cm颗粒过渡段以调节水流,试验中各组次保持过渡段颗粒并不起。槽首设置阀门及静水池,测试段尾部设置漏斗用于接沙,水槽导轨上安置声学多普勒流速仪(Acoustic Doppler Velocimeter—ADV),布设4个断面测试冲刷稳定后的水流结构,分别位于离拦沙坎位置1.5 m(断面1)2.0 m(断面2)2.5 m(断面3)和3.0 m(断面4),每个断面有4条垂线,分别离槽壁5 cm(垂线1),15 cm(垂线2)25 cm(垂线3),35 cm(垂线4),见图1。每组试验冲刷床面以尼康全站仪(Nikon—DTM)测量地形。

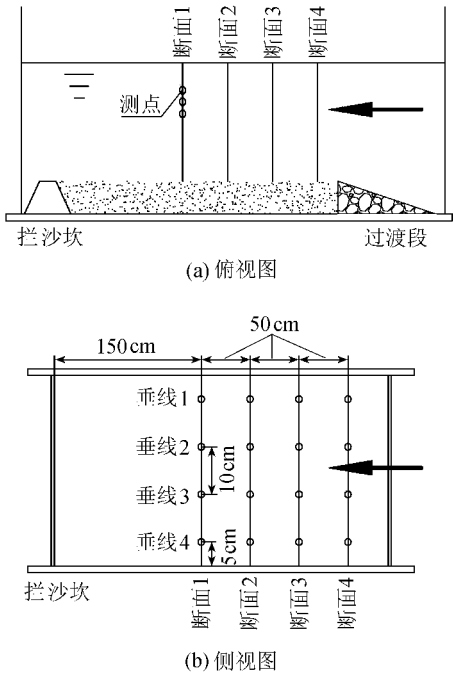


图1 试验测试布置

试验开始时,先由尾部注水到一定深度,然后稍将尾门开启,确保床面泥沙不受冲刷。当水位高出床面一定的高度,再缓慢地开大尾门以形成试验段均匀流。在试验过程中,冲刷初期每5 min接沙1次,后期基本为每10 min接沙1次,当床面在这一水流条件下输沙率趋于零且变化不大时,认为床面达到粗化稳定,以ADV仪器在4个断面相应的垂线上测试三维流速,最后将水放空,待床面沙样较干

后,采用全站仪进行床面地形测量。

2 试验结果分析

2.1 床面特征

每组试验开始时,床面泥沙排列较松散,输沙率很大,并产生明显的分选输移。由于试验初始床沙组成及形态稍有不同,组次1和组次5在冲刷前期分选现象比较一致,即较细颗粒先起动,而较粗颗粒基本不动,当细颗粒减少使粗颗粒暴露度增加时,颗粒位置稍作局部调整以增大其稳定性。随着较细颗粒大量冲刷,床面降低,在上游首先形成以最大颗粒为锚石、较粗颗粒相互支承的稳定结构即粗化层,再逐渐向下游发展,当较细颗粒组成的沙波从下游消失时,输沙率大为减少,整个试验段粗化层即告形成,偶有小颗粒从这一粗颗粒背后移向另一粗颗粒的隐蔽区。试验期间,床面并非平行下切,起始时上游刷深,而下游床面受上游来沙补充几乎不变,水面反而有所抬高,比降减缓,粗化层形成后,床面普遍刷深,水面相应降低,冲刷深度由上游向下游发展,如图2(a)所示。粗化层形成后将水放干,取样做粒度分析,取样深度确定在顶部出露而位置最低的最大颗粒底部平面。在组次2,3和4,试验基础是在形成粗化层后再作一次粗化层破坏,并重新形成稳定形态的冲刷过程,由于前期床面粗化层及稳定形态的形成,床沙表层为较多的粗颗粒聚集,其输沙过程,首先是先床沙稳定层突然破坏,形成较大的推移质输沙量,床面刷深,当床面地形出现较大尺度的起伏变化时,其泥沙输移才出现缓慢递减,输沙率大为减少,最终形成相对稳定的床面形态。

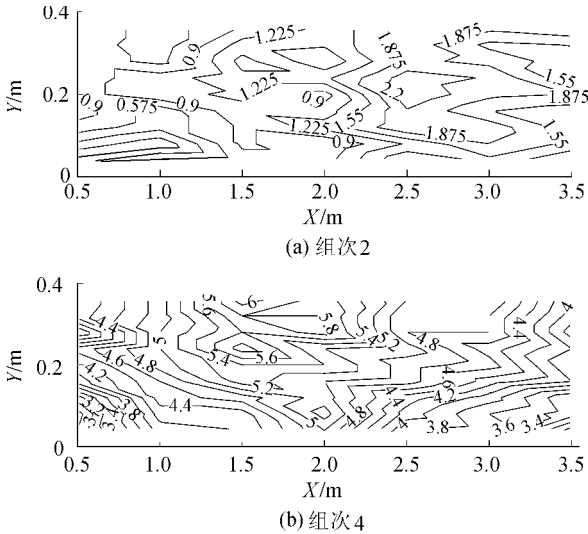


图2 粗化稳定后床面冲刷深度

观察各组次河床粗化稳定后冲刷深度等值线图(图2),图中数值表示河床相对于拦沙坎被冲刷的深度。结果表明:组次1沿水流方向的各处冲刷深

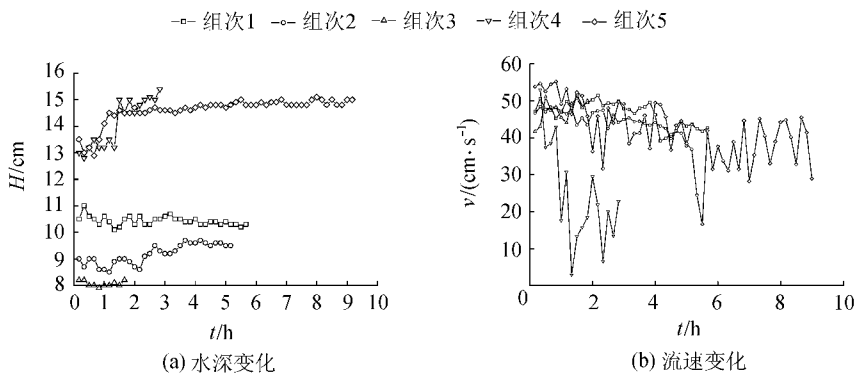


图3 粗化过程中水流水深及流速随时间变化情况

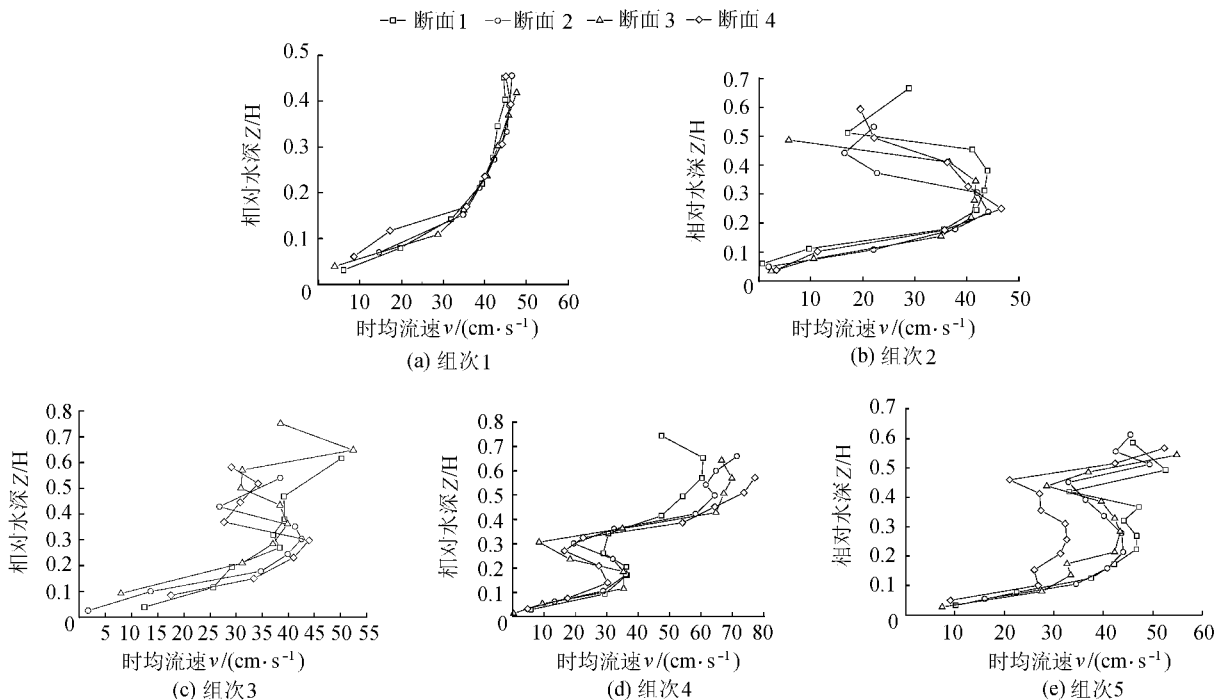


图4 各试验组次测试断面时均流速分布

度变幅较小,组次2冲刷深度由上游向下游发展,总体冲刷加深,组次3中上游河床出现了阶梯-深潭地貌,组次4上下游冲刷程度差别不大,中游出现较大冲刷(见图3b))。组次5中随着床沙组成中粗颗粒比重的增加,其床面调整变率与组次1较为接近,但平均冲刷深度有了较大的增加。

2.2 水流结构

2.2.1 粗化中水流结构的变化

试验过程中,动态追踪断面Ⅰ(离挡沙坎2m)距床面约3cm处时均流速的波动情况及水深变化情况。图3(a)为各组次粗化过程中断面2的水深变化情况,组次1、2、3在该断面处水深变化基本不大,伴随着组次4床面阶梯-深潭的出现和组次5细颗粒比重增大,床面在前2h内急剧变化,然后趋于稳定。图3(b)为一固定位置处时均流速随粗化历时的变化过程,由此可以看出,由于上游来流流量不变,随着床面的不断被冲刷,时均流速反映出与水深

变化相反的趋势,即水深变大,流速减小。

2.2.2 粗化后水流结构的特征

图4为各试验组次测试断面上流速沿相对水深的分布。组次1,流速特征符合一般对数流速分布规律,当相对水深(Z/H)在0.2~0.4之间,流速维持于42.0 cm/s ,随着床沙粗化及水流平均水深由10.4cm调至9.2cm,组次2的平均流速稍有增大,但其变化趋势与组次1相近,随着粗化稳定形态的再一次调整,平均水深为8.0cm,流速分布情况组次1和组次2有所不同,近床面区域出现了流速随相对水深增加而减少的趋势。组次4和组次5,在相同的水流条件下流量为0.0409 m^3/s ,水深分别为14.9cm和14.8cm,流速分布出现了S形曲线的形式,当相对水深 Z/H 分别约为0.3和0.5时,流速出现了极小值,在该位置以下,出现流速极大值,组次4和组次5的垂线平均流速分别约为35.0 cm/s 和45.0 cm/s 。究其原因,粗化稳定形态的流速特征

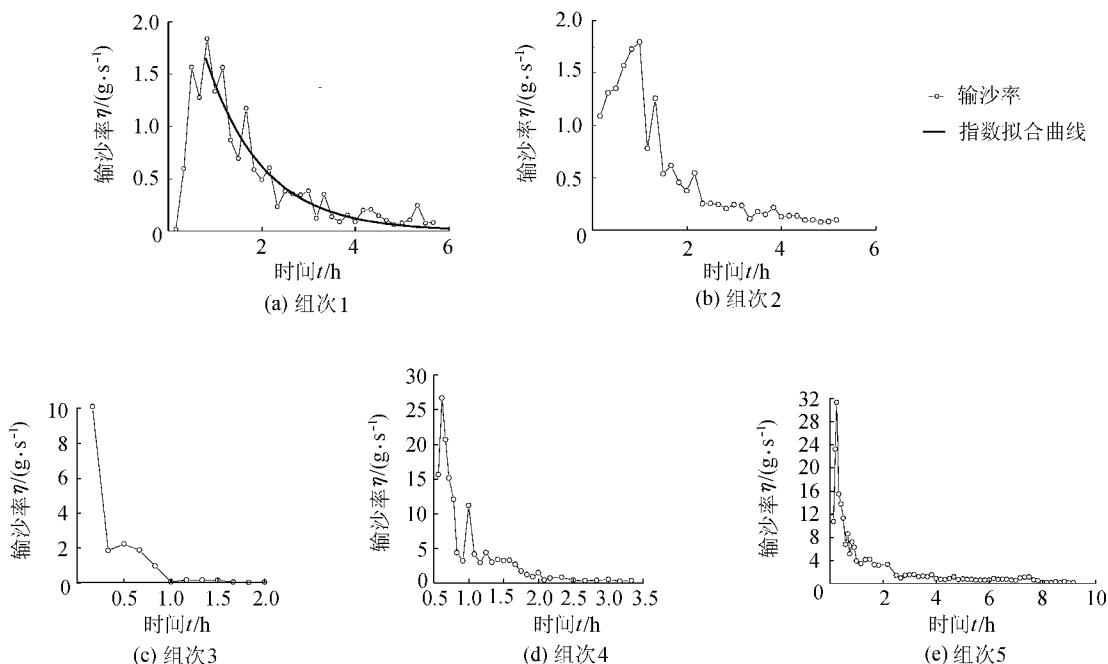


图5 各组次输沙强度

与其前期粗化程度及其水沙条件极其相关,而流速分布偏离对数分布的现象说明河床的进一步粗化使粗颗粒的暴露程度增加,在近床面处水流受到泥沙颗粒的影响也加剧,水流的阻力已经由肤面摩擦力为主向形状阻力为主转变,在粗糙颗粒的边缘水流出现了绕流和漩涡,伴随着水流的强烈紊动,近底水流结构呈现出流速三维化,并沿水深向水面发展,结果导致时均流速减小。正是在近壁区域,水流结构对于泥沙的运动有积极的作用,但不巧的是这个区域的水沙特性也难以观测。

2.3 推移质输沙率

图5描绘了不同试验组次推移质输沙过程的累积变化过程。该图表明,各粗化试验中,其输沙总量在清水冲刷的前期(约1h)基本保持较大的变化率。可以看出,无论是初次粗化还是再次粗化,河床是通过颗粒和颗粒之间位置的调整逐渐达到稳定的,不同的是前期的输沙峰值在初次粗化中是由于泥沙颗粒的排列松散造成的,在二次粗化中表现为前期粗化层的突然破坏。通过资料分析,在前1h的冲刷过程中,试验组次1~5的输沙强度分别为4.99 kg/h, 5.37 kg/h, 6.44 kg/h, 21.46 kg/h 和 24.99 kg/h,比较可知,组次1、2和3尽管其粗化程度有差异,但在相同的流量 $0.0249 \text{ m}^3/\text{s}$ 且平均水深相差不大的情况下,输沙强度的差异较小,粗化的历时也较接近。而组次4和5在相同的流量 $0.0409 \text{ m}^3/\text{s}$,但平均水深分别为14.9 cm和14.8 cm时,前期粗化和床沙组成不同,对冲刷初期的累积输沙强度影响不大,但就床面稳定形态形成的冲刷总量及历时有

所影响,如其稳定历时分别为2.8 h和9.2 h,而冲刷总量分别约为35.0 kg和75.0 kg。在清水冲刷过程中,平均输沙率呈指数衰减。水流强度越大,则泥沙起动概率越大,从而输沙率衰减越快。

3 结 语

本试验测试了不同水沙组合卵石床面在清水冲刷条件下的粗化床面形态、水流结构及其相应的卵石推移质输移过程。试验分析表明,粗化—破坏—再粗化的过程中推移质输沙率均符合指数衰减规律,随着床面粗化程度的增加,粗颗粒在床面的暴露程度和排列使近底水流结构的紊动明显增强,流速三维化发展加剧,流速分布明显偏离对数分布,其深刻机理有待于进一步探讨。

参考文献:

- [1] 彭凯, 陈远信. 非均匀沙起动问题[J]. 成都科技大学学报, 1986(2): 20-25.
- [2] 杨美卿, 王桂仙. 卵石夹沙河流动床泥沙数学模型研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1998(1): 19-22.
- [3] 杨铁笙, 杨美卿. 河床粗化过程的水槽试验研究[A]. 全国泥沙基本理论研究学术讨论会论文集[C]/北京: 中国水利学会泥沙专业委员会, 1992: 186-200.
- [4] 刘兴年, 曹叔尤, 黄尔, 等. 粗化过程中的非均匀沙起动流速[J]. 泥沙研究, 2000(4): 10-18.
- [5] PAINTAL A S. A stochastic model of bed load transport[J]. Hyd Res, 1971, 8(4): 527.
- [6] 韩其为, 何明民. 泥沙起动规律及起动流速[M]. 北京: 科学出版社, 1999.

(下转第82页)

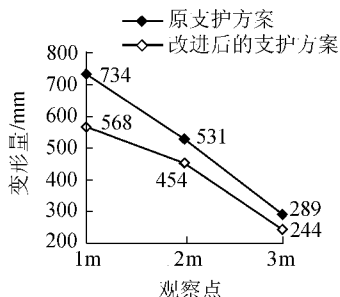


图8 改进前后巷道煤柱表面变形量的比较

图7为深基点位移观测。在超前支承压力作用下窄煤柱变形主要发生在2m深的范围内,尤其以1m深范围内的煤体向巷道内的移动量最大,深2~3m之间各点位移差值较小,表明窄煤柱内部稳定,在工作面超前采动范围内窄煤柱是稳定的,保持了对顶板的支撑。

图8为改进前后巷道煤柱表面变形量的比较。可以看出改进方案有效控制了煤柱的变形量,相对于3m深部基点,巷道煤柱表面变形量由734mm减小到568mm;相对于2m深部基点,巷道煤柱表面变形量由531mm减小到454mm;相对于1m深部基点,巷道煤柱表面变形量由289mm减小到244mm。观测结果说明锚杆和锚索联合支护进一步加固了巷道围岩,充分发挥岩体的自身支承作用,从而有效地控制了岩石的变形和位移。

4 结 论

a. 现场实测数据证明改进后的支护方案即顶板锚索及煤柱帮底角锚杆联合加固技术能有效控制厚煤层沿空掘巷围岩变形,减小了断面收缩率及扩大了通风断面,从而改善了巷道维护状况。

b. 采动对工作面前方巷道(沿空掘巷)的影响范围在100m左右,明显影响范围在工作面前方40m左右,剧烈影响范围在工作面前方20m左右。

c. 在超前支承压力作用下窄煤柱变形主要发生在2m深的范围内,尤其使1m深范围内巷道内的移动量较大,2~3m深度之间各点位移差值较小。

参考文献:

[1] 王卫军,侯朝炯,柏建彪,等.综放沿空巷道顶煤受力变形分析[J].岩土工程学报,2001,23(2):209-211.
 [2] 何满潮,黄福昌,闫吉太.世纪之交软岩工程技术现状与展望[M].北京:煤炭工业出版社,1999.
 [3] 吴健.我国综放开采15年回顾[J].中国煤炭,1999,25(1/2):9-16.
 [4] 张农,侯朝炯,王培荣.深井煤巷锚杆支护技术研究[J].岩石力学与工程学报,1999,18(4):437-440.
 [5] 侯朝炯,郭励生,勾攀峰,等.煤巷锚杆支护[M].徐州:中国矿业大学出版社,1999.

国矿业大学出版社,1999.

[6] 张农,侯朝炯,等.综放沿空巷道高性能锚杆支护技术[J].煤炭科学技术,2000(专集):21-24.
 [7] 王卫军,侯朝炯,柏建彪,等.综放沿空巷道底板受力变形分析及底鼓力学原理[J].岩土力学,2001,22(3):319-322.
 [8] 陈炎光,钱鸣高.中国煤矿采场围岩控制[M].徐州:中国矿业大学出版社,1994.
 [9] WANG Wei-jun, HOU Chao-jiong. Study of mechanical principle of floor heave of roadway driving along next goaf in fully mechanized of mechanical principle of floor heave of roadway driving along next goaf in fully mechanized sublevel caving face[J]. Journal of Coal Science & Engineering (China), 2001, 7(1):13-17.
 [10] JACHSON M J. Tomographic imaging of coal pillar conditions: observation and implication[J]. Int J Roch Min Sci & Geomech Abste, 1996(33):279-290.

(收稿日期:2006-09-25 编辑:高建群)

(上接第62页)

[7] 刘兴年.非均匀沙推移质输沙率及其粗化稳定[D].成都科技大学,1986.
 [8] 刘兴年,黄尔,曹叔尤,等.宽级配推移质输沙特性研究[J].泥沙研究,2000(4):14-17.
 [9] 何文社,杨具瑞,方铎,等.泥沙颗粒暴露度与等效粒径研究[J].水利学报,2000(11):44-48.
 [10] 张启卫.非均匀沙起动流速[C]//全国泥沙基本理论研究学术讨论会论文集.北京:建材工业出版社,1992:157-167.
 [11] 方红卫.不均匀沙组成及起动[J].水利学报,1994(4):43-49.
 [12] 孙志林.非均匀沙分级起动规律研究[J].水利学报,1997(10):25-32.
 [13] 孙志林,孙志锋.粗化过程中的推移质输沙率[J].浙江大学学报:理学版,2000,27(4):449-453.
 [14] 郭志学,方铎,曹叔尤,等.近底水流结构对非均匀沙起动影响的研究[J].四川大学学报:工程科学版,2002,34(6):24-27.
 [15] 许全喜,张小峰,谈广鸣.河床冲刷粗化多步预报模式研究[J].水科学进展,1999,10(1):42-47.
 [16] 刘金梅,王士强,王光谦.河流冲刷过程中表层床沙粗化对不平衡输沙的影响[J].水科学进展,2000,11(3):22-24.
 [17] 王协康,郭志学,方铎,等.泥石流入汇影响主河床冲刷粗化稳定试验研究[J].泥沙研究,2000(8):18-21.

(收稿日期:2007-01-17 编辑:高建群)