

阶梯-深潭系统消能研究综述

李文哲^{1,2},王兆印^{1,2},李志威¹

(1. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室,北京 100084;
2. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室,四川 成都 610041)

摘要:针对山区河流中自然形成的阶梯-深潭系统消能研究相对滞后的现状,归纳总结阶梯-深潭系统及台阶式溢洪道已有消能研究成果,从总流能量守恒方程出发,分析阶梯-深潭系统消能机理及消能率影响因素。认为台阶式溢洪道与阶梯-深潭系统的消能方式具有相似性和可比性。研究表明,在不同流量情况下,阶梯-深潭系统消能方式有显著区别,消能率存在较大差异;阶梯-深潭系统消能率的影响因素有坡降、糙率、粒径、阶梯高度和上游来流量,其中阶梯高度、坡降、糙率和粒径与消能率成正比,上游来流量与消能率成反比。认为阶梯-深潭系统消能的进一步研究需要结合大量野外调查数据,研究阶梯-深潭系统的几何特征,测量阶梯-深潭系统流场,进而得到水流能量的传递和耗散规律。

关键词:阶梯-深潭系统;山区河流;水流能量;消能;综述

中图分类号:TV131.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2014)03-0075-06

Review of energy dissipation study of step-pool system//LI Wenzhe^{1,2}, WANG Zhaoyin^{1,2}, LI Zhiwei¹ (1. State Key Laboratory of Hydro-Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Process, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: The study on the energy dissipation of step-pool system formed in mountain streams has been lagged behind. The existing research achievements about step-pool system and stepped spillway were summarized in this paper. The energy dissipation mechanism and the influential factors of energy dissipation rate of step-pool system were analyzed through the energy conservation equation. It was found that there are some similarities and comparability between the energy dissipation way of stepped spillway and that of step-pool system. There are also significant differences in the energy dissipation ways and energy dissipation rate of step-pool system under different flow conditions. The influential factors to energy dissipation rate of step-pool system are slope, roughness, particle size, step height, and upstream flow, in which the step height, slope, roughness, particle size are proportional to the energy dissipation ratio, and the upstream flow is inversely proportional to the energy dissipation. Further research on energy dissipation of step-pool system may require more field investigation data to study the geometric features of step-pool system, in order to measure the flow field of step-pool system and obtain the energy transfer and dissipation law of water flow.

Key words: step-pool system; mountain stream; water flow energy; energy dissipation; review

阶梯-深潭系统(step-pool system)是由一段陡状阶梯、一段缓坡河床以及深潭连接而成的河床形态,在河床纵坡上呈阶梯形态,是坡降较大的山区河流中常见的河床形态。根据野外勘察与前人研究,阶梯-深潭系统的发育是山区河流为维持自身稳定而做出的垂向局部形态调整,该系统使得河床阻力达到最大,经历多次洪水后演变为相当稳定的河床结构^[1]。之所以能够维持河床相对稳定,是因为由巨石组成的阶梯能够稳定河床抑制输沙,并且水流跌

落深潭会消耗大量的能量,这对于抑制河床冲刷下切和减小泥石流灾害具有重要作用。

20 世纪 80 年代以来,山区河流逐渐成为河流动力学研究的热点之一,阶梯-深潭系统作为山区河流特有的微地貌形态,受到了国内外学者的持续关注。目前,阶梯-深潭系统的研究可分为 3 个方向:①阶梯-深潭系统形态特征以及决定其形态特征的因素^[2-6];②阶梯-深潭系统的形成和破坏机理^[7-11];③阶梯-深潭系统在防灾减灾和生态修复方面的应

用^[12-14]。关于阶梯-深潭系统的流场特征与消能机能已有初步研究,如通过开展野外试验对阶梯-深潭系统几何形态和流场的测量研究消能率的变化特性及影响因素^[15-17]。尽管阶梯-深潭系统的成因、形态与稳定性已有较多成果,但由于非恒定三维水流结构的复杂性和水流跌落深潭后的掺气问题,很难进行流场计算,阶梯-深潭系统的消能问题研究比较滞后,相关实测数据和理论分析成果罕见。

本文通过对阶梯-深潭系统的野外观测和文献调研,探讨水工结构中的台阶式溢洪道与阶梯-深潭系统消能方式的相似性和可比性,可为阶梯深潭系统消能研究提供参考。同时,对阶梯-深潭系统水流能量耗散机理进行分析,以明确影响阶梯-深潭系统消能率的关键因素,可为进一步开展阶梯-深潭系统消能机理的野外试验与理论研究奠定基础。

1 已有阶梯-深潭系统的消能研究成果

目前专门开展阶梯-深潭系统消能问题的研究文献尚未见报道,本文仅对已有文献中涉及该方面研究的内容进行归纳总结。Abraham 等^[1]以最大洪水能挟带最大石块为假设前提,通过 4 组水槽试验和 18 条发育阶梯-深潭系统的山区河流的调查研究表明,阶梯-深潭系统在阶梯均匀分布并且 $1 \leq \frac{H_s}{LS} \leq 2$ (H_s 为阶梯高度, L 为单元长度, S 为坡降) 时对水流形成最大的阻力,消耗最多的水流能量。同时给出了具有最大阻力即具有最大消能率的阶梯-深潭系统的形态特征,认为天然阶梯-深潭系统会朝着 $1 \leq \frac{H_s}{LS} \leq 2$ 的方向发育,形成最大的河床阻力和最大的稳定性。

Wyrick 等^[15]研究了 15 个阶梯-深潭系统上下游断面几何形态和流量对阶梯-深潭系统消能率的影响。研究发现,当阶梯段比较窄深、深潭段比较宽浅时,水头损失率随着 $(H+P)/H$ (H 为阶梯段总水头, P 为阶梯高度) 的增大而增大,但变化不明显,消能率总体都较高。当阶梯段比较宽浅、深潭段比较窄深时,水头损失率随 $(H+P)/H$ 变化很明显,而且当 $(H+P)/H$ 较小时,消能率很低。这说明阶梯-深潭断面形态对消能效果有着显著影响,相对开阔的深潭段对提高消能率起很大促进作用,而且随着阶梯高度的增加,阶梯-深潭系统的消能率会显著增大。

Wohl 等^[17]对 3 段发育阶梯-深潭系统的河道进行了断面流速测量和分析。测量结果表明,没有河床结构发育的河段,其平均流速大于发育阶梯-深潭的河段;发育阶梯-深潭河段的水流紊动强度远大于

没有河床结构发育的河段,这表示阶梯-深潭系统通过紊动消耗了更多的能量。同时指出深潭中紊动的主要来源为水流从阶梯跌入深潭形成的尾流和漩滚,由于深潭段近底流速和近底流速梯度都较小,河床附近流速梯度造成的紊动占深潭全部紊动的比例很小。对于没有河床结构发育的河段,紊动的主要来源为床面的肤面摩擦和小的石块形成的尾流。进一步研究认为,发育阶梯-深潭系统的河段依靠尾流和形状阻力来消能比没有发育阶梯-深潭结构的河段依靠床面肤面摩擦消能更加高效。

Wilcox 等^[16]利用三维多普勒流速仪对阶梯-深潭系统的流场进行了测量,结果表明约 2/3 的能量被消耗,且消耗的能量主要为水流的势能,动能沿程保持稳定。Hayward^[18]测量得出新西兰山区河流的阶梯-深潭系统的消耗率最高可达 93%。Marston^[19]研究得出俄勒冈州海岸地区由木头组成的阶梯-深潭系统可消耗 12% 的水流能量。

2 台阶式溢洪道与阶梯-深潭系统的消能方式比较

阶梯-深潭系统与台阶式溢洪道有一定相似之处。首先,在结构形态上它们都呈阶梯状;其次,在作用效果上,它们都能够增强阻力,消耗水流能量,减少高速水流的冲刷破坏。因此,台阶式溢洪道的一些研究成果和方法可为阶梯-深潭系统的研究提供借鉴。当然,二者也存在着一些本质区别:首先,台阶式溢洪道的坡度一般较大, 30° 以上的坡度很常见,而山区河流的阶梯-深潭系统坡度一般在 4° 左右;其次,阶梯-深潭系统会冲刷形成深潭,而台阶式溢洪道的台阶下部再接一个台阶,没有深潭形成;最后,台阶式溢洪道的阶梯一个接一个,紧凑连接,而阶梯-深潭系统则是相对独立的自然消能结构。尽管如此,结构和功能的相似使台阶式溢洪道的研究对阶梯-深潭系统消能的研究仍有借鉴意义。

台阶式溢洪道以其设计简单、施工方便、消能率高得到了广泛的应用。台阶式溢洪道能够逐个台阶制造跌水,逐级消耗下泄水流的能量,对于防止溢洪道下底面淘刷,保护下游河床稳定、减小下游消能结构尺寸有重要作用,因而得到了广泛的应用研究^[20]。相比传统的光面溢洪道,台阶式溢洪道台阶的设置,增强了水流边界的起伏度,由跌水引起大量的掺气及剧烈的紊动增强了消能效果^[21]。

台阶式溢洪道消能率的计算方法是建立上下游的总流能量方程,其消能率等于水流通过溢洪道能量的减少量除以上游水流总能量。根据试验研究,影响台阶式溢洪道消能率的主要因素包括单宽流

量、水流流态、溢洪道坡度、阶梯尺寸和溢洪道断面尺寸等^[22]。针对各影响因素对消能率的影响,人们开展了广泛的研究。研究表明,消能率随单宽流量的增大显著降低^[23]。Chanson^[23]、田嘉宁等^[24]研究表明台阶式溢洪道的消能率与相对坝高(坝高除以坝顶临界水深)成正比。Peyras 等^[25]认为消能率随着坝坡的减小而增大。

台阶式溢洪道水流流态对消能率有重要影响,不同的流动工况下,水流表现出不同的流态,其掺气形式和消能情况也会不同。水流流态可分为以下3种形式:滑行水流(skimming flow)、过渡水流(transition flow)、跌落水流(nappe flow)。滑行水流的主要特点是阶梯内部全部被水体填充且存在一个横轴漩涡,漩涡靠近主流一侧的流向与主流一致。跌落水流的主要特点是阶梯内部存在一个具有自由水面的空腔,水流表面出现较大的弯曲。过渡水流的流态位于滑行水流和跌落水流之间,部分阶梯被横轴漩涡填满,部分阶梯存在具有自由水面的空腔。Chamani 等^[26]认为跌落水流的消能率大于滑行水流。田嘉宁等^[27]在19°的台阶式溢洪道上开展试验,认为在一定的相对坝高下,各种流态的消能率相差不大。Chanson^[28]认为在较长的台阶式溢洪道中,滑行水流消耗更多的能量,但对于较短的溢洪道,跌落水流消耗更多的能量。

3 阶梯-深潭系统消能研究初探

3.1 不同流量下阶梯-深潭系统的消能方式

阶梯-深潭系统的消能率是由其几何形态和水流条件共同决定的。在给定阶梯-深潭系统几何尺寸的情况下,不同的流量对应不同的水流形态,消能率也各不相同。

在上游来流量很小的情况下,阶梯-深潭流态如图1所示。在这种小流量情况下,水流从阶梯顶部射出后受重力作用弯曲向下,几乎垂直地进入深潭中,水流进入深潭的水垫后,形成以入射点为中心的径向水流漩涡,产生强烈紊动,消耗大量能量。由阶梯下泄的急流经过水流漩涡,大部分能量都被消耗,会以缓流的形式流出深潭。流速水头相对于阶梯高度较小,这时消能率主要取决于阶梯的高度,阶梯高

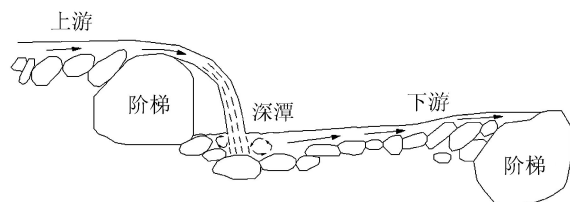


图1 小流量下阶梯-深潭流态

度越高,消能率越大,且在流量很小时,消能率普遍很高。

当上游来流量增大到一定程度时,会出现图2所示的水流形态。水流在跃下阶梯后以较大的角度跌入深潭中,在主流的上游侧会形成一个水流漩涡,主流则在水垫或床底的作用下转为沿河底向下游流动,这时主流在经过下落加速后流速很大,急流会以水跃的形式与下游的水流相衔接。在这种情况下,水流能量的消耗有3种途径:①水流在空气中裂散,受到空气阻力消耗部分能量;②入射点上游侧主流与深潭之间很大流速梯度形成的水流漩涡;③下游水跃带来的巨大能量消耗。这3种消能方式中水跃消能所占比例较大。水跃消能的消能率主要取决于水跃上游断面(即水跃开始处)弗劳德数的大小,弗劳德数越大,消能率越高,因此消能率大小仍取决于阶梯高度。

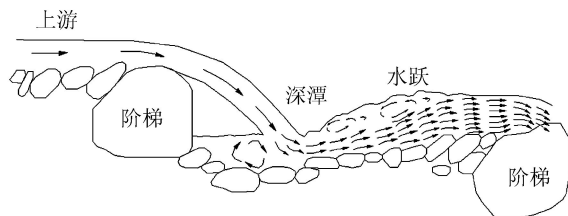


图2 中等流量下阶梯-深潭流态

当流量继续增大,会出现如图3所示的水流形态。由于流量增大很多,阶梯下游水深也变得较深,阶梯下游立面和深潭间的区域被水填满,水流不会弯曲潜入水流底部形成底流,较高速的主流位于水流表面,主流与下部深槽之间形成一个底部漩涡,形成面流。这种情况下,阶梯-深潭结构基本被淹没,能量消耗主要依靠主流和底部漩涡之间的流速差产生的强烈剪切和掺混。和小流量时的水跃消能相比,大流量下的主流掺混作用和紊动相对都不够强烈,消能率较低。

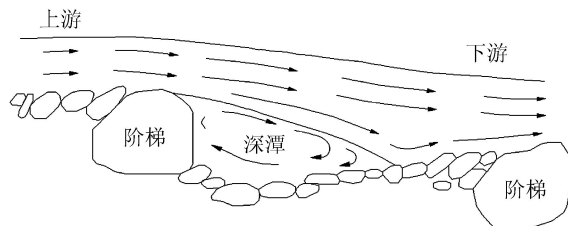


图3 大流量下阶梯-深潭流态

从以上定性分析可知,流量和阶梯高度是决定消能率大小的重要因素。随着流量的增大,阶梯-深潭系统逐渐被淹没,其形状阻力逐渐变小,消能率也逐渐减小。阶梯高度是阶梯-深潭系统重要的几何参数,阶梯高度越大,消能率越高。

3.2 阶梯-深潭系统消能率影响因素分析

运用总流能量守恒方程来进一步分析影响阶梯-深潭系统消能率的因素。阶梯-深潭系统消能概化图见图4。以深潭下游断面为基准,列出上下游断面的能量方程:

$$\frac{\alpha_1 U_1^2}{2g} + d_1 + H_s = \frac{\alpha_2 U_2^2}{2g} + d_2 + h_f \quad (1)$$

式中: U_1 、 U_2 分别为上游、下游的断面平均流速; d_1 、 d_2 分别为上游、下游的断面水深; H_s 为阶梯高度,即上下游断面河床底部高程差; α_1 、 α_2 分别为上游、下游的动能修正系数,其大小取决于断面流速分布,一般近似等于 1.0; h_f 为水头损失; g 为重力加速度。

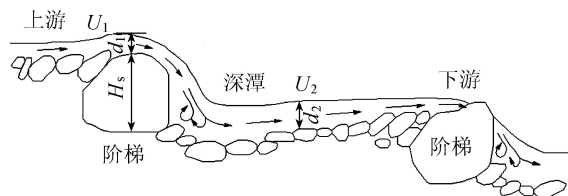


图4 阶梯-深潭系统消能概化示意图

消能率 η 的计算采用上下游断面间的能量损失除以上游段总能量,将能量方程式(1)代入消能率计算公式得到:

$$\eta = \frac{h_f}{\frac{\alpha_1 U_1^2}{2g} + d_1 + H_s} = 1 - \frac{\frac{\alpha_2 U_2^2}{2g} + d_2}{\frac{\alpha_1 U_1^2}{2g} + d_1 + H_s} \quad (2)$$

式(2)表明影响消能率的变量有 5 个,分别为 U_1 、 U_2 、 d_1 、 d_2 和 H_s ,以下对这 5 个变量分别进行分析。

a. 上游断面的 U_1 和 d_1 。仅考虑单个阶梯-深潭的情况,即阶梯-深潭上下游无其他河床结构,根据达西-魏斯巴赫公式可得

$$U_1 = \left(\frac{8gRS}{f} \right)^{0.5} \quad (3)$$

式中: S 为坡降; R 为水力半径; f 为阻力系数。 f 可利用 Keulegan^[29] 提出的公式计算:

$$\frac{1}{f^{0.5}} = 2.03 \lg \left(\frac{12.2R}{k_s} \right) \quad (4)$$

式中: k_s 为边界粗糙高度,在河床级配均匀的情况下, k_s 等于 D_{50} 或 D_{65} 。然而,在山区河流中,河床泥沙级配较宽,粗颗粒不仅形成摩擦阻力,还会形成形态阻力,因此,阶梯深潭中取 $k_s = mD_{84}$, m 为修正系数^[30]。

根据式(3)和式(4),且近似认为水力半径等于水深,可得上游断面平均流速的表达式:

$$U_1 = 5.74 (gd_1 S)^{0.5} \lg \left(\frac{12.2d_1}{mD_{84}} \right) \quad (5)$$

式(5)表明 U_1 由断面水深 d_1 、坡降 S 和粒径 D_{84} 决定, U_1 与 d_1 和 S 成正比,与 D_{84} 成反比。假定阶梯段上游来流为恒定均匀流,则上游段水深为正常水深。根据曼宁公式得 $d_1 = \left(\frac{nQ}{S^{0.5}} \right)^{1.5}$,可知 d_1 与流量 Q 和糙率 n 成正比,与坡降 S 成反比。

b. 下游断面的 U_2 和 d_2 。假设深潭下游没有河床结构,水流在流出深潭一段距离后已恢复为恒定均匀流。在实际发育阶梯-深潭系统的河流中,水流在流出深潭一段距离后,其流动逐渐恢复为由河床边界和坡降控制,假设上下游断面流动情况相同具有一定合理性。这样近似类比后,决定 U_2 和 d_2 的主要影响因素与 U_1 和 d_1 相同,不做重复分析。

c. 对阶梯-深潭消能率有重要影响的形态因素是 H_s ,其代表单个阶梯-深潭规模的大小。从式(2)可知, H_s 越大,消能率 η 就越大。在高坡降的山区河流中,河床阻力由肤面摩擦和形状阻力构成,在阶梯-深潭系统发育的情况下,形状阻力所占的比例较大。 H_s 越大,代表形状阻力越大,这样能消耗掉更多的能量。

综上所述,影响阶梯-深潭系统消能率的主要因素包括上游来流量 Q 、坡降 S 、糙率 n 、粒径 D_{84} 和阶梯高度 H_s 。随着 Q 的增大,河道中突出的大石块逐渐被淹没,边界形成的阻力和边界突触造成的水流翻滚导致的能量消耗会大量减少,因此消能率会随着流量的增加而减小。随着 S 的增大,水深会减小,在缓流情况下水深减小对应着断面单位能量的减小,这样阶梯-深潭的消能率会增加;另一方面,随着 S 的增大,阶梯-深潭系统会更加发育,尺寸会更大,从而提高消能率。随着 n 的增大,肤面摩擦消耗能量增大,因而效率增大,但由于阶梯-深潭系统的消能主要依靠形态阻力作用下水流的掺混和漩滚摩擦, n 对于阶梯-深潭消能率影响不大。由于粒径的增大会使得形成较大阶梯-深潭系统的可能性增大,故 D_{84} 增大,消能率会提高。而 H_s 对消能率的影响从式(2)中看是显而易见的,随着 H_s 的增大,消能率会显著提高。

4 结 语

在山区河流中,阶梯-深潭系统能够最大限度地增加河床阻力,其消能作用是维持河床稳定的关键原因。阶梯-深潭系统的消能作用在于增大河床的形状阻力,使水流在由阶梯跌入深潭的过程中产生强烈的漩涡,剧烈的掺混和紊动伴随着强烈的附加切应力,从而使水流部分机械能很快地转化为热能。阶梯-深潭系统与台阶式溢洪道具有相似的结构特

征和水流特征,台阶式溢洪道消能研究成果对于阶梯-深潭系统的消能研究有借鉴意义。阶梯-深潭消能率与坡降、糙率、粒径和阶梯高度成正比,与上游来流量成反比。另外,阶梯-深潭系统阶梯巨石的组合方式对于阶梯-深潭系统的消能率也有着较大影响。各种因素对于阶梯-深潭系统消能率的影响研究还需要大量的野外调查和流场测量,特别是利用先进的流速测量仪器对于阶梯-深潭系统流场进行测量,分析水流能量传递过程和能量耗散机理,这对于揭示阶梯-深潭系统消能机理和优化阶梯-深潭系统设计有重要意义。

参考文献:

- [1] ABRAHAMS A D, LI G, ATKINSON J F. Step-pool stream: adjustment to maximum flow resistance [J]. *Water Resources Research*, 1995, 31 (10): 2593-2602.
- [2] CHIN A, WOHL E E. Toward a theory for step-pools in stream channels [J]. *Progress in Physical Geography*, 2005, 29 (3): 275-296.
- [3] CHARTRAND S M, JELLINEK M, WHITING P J, et al. Geometric scaling of step-pools in mountain streams: observations and implications [J]. *Geomorphology*, 2011, 129: 141-151.
- [4] CHARTRAND S M, WHITING P J. Alluvial architecture in headwater streams with special emphasis on step-pool topography [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2000, 25: 583-600.
- [5] CURRAN J C, WILCOCK P. Characteristic dimensions of the step-pool bed configuration: an experimental study [J]. *Water Resources Research*, 2005, 41, W02030. doi: 10.1029/2004WR003568.
- [6] CHIN A. The morphologic structure of step-pools in mountain streams [J]. *Geomorphology*, 1999, 27: 191-204.
- [7] WHITTAKER J G, JAEGGI M N R. Origin of step-pool systems in mountain streams [J]. *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, 1982, 108 (6): 758-773.
- [8] CHURCH M, ZIMMERMANN A. Form and stability of step-pool channels: research progress [J]. *Water Resources Research*, 2007, 43, W03415. doi: 10.1029/2006WR005037.
- [9] WEICHERT R B, BEZZOLA G R, MINOR H. Bed morphology and generation of step-pool channels [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2008, 33: 1678-1692.
- [10] LENZI M. Step-pool evolution in the Rio Cordon, Northeastern Italy [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, 26: 991-1008.
- [11] TUROWSKI J M, YAGER E M, BADOUX A, et al. The

impact of exceptional events on erosion, bedload transport and channel stability in a step-pool channel [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34: 1661-1673.

- [12] LENZI M. Stream bed stabilization using boulder check dams that mimic step-pool morphology features in northern Italy [J]. *Geomorphology*, 2002, 45: 243-260.
- [13] YU Guoan, WANG Zhaoyin, ZHANG Kang, et al. Restoration of an incised mountain stream using artificial step-pool system [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2010, 48 (2): 178-187.
- [14] 王兆印, 漆力健, 王旭昭. 消能结构防治泥石流研究-以文家沟为例 [J]. *水利学报*, 2012, 43 (3): 253-263. (WANG Zhaoyin, QI Lijian, WANG Xuzhao. Debris flow control with dissipation structure-experience from Wenjiagou [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43 (3): 253-263. (in Chinese))
- [15] WYRICK J R, PASTERNAK G B. Modeling energy dissipation and hydraulic jump regime responses to channel nonuniformity at river steps [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113, F03003. doi: 10.1029/2007JF000873.
- [16] WILCOX A C, WOHL E E, COMITI F, et al. Hydraulics, morphology, and energy dissipation in an alpine step-pool channel [J]. *Water Resources Research*, 2011, 47, W07514. doi: 10.1029/2010WR010192.
- [17] WOHL E E, THOMPSON D M. Velocity characteristics along a small step-pool channel [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2000, 25: 353-367.
- [18] HAYWARD J A. Hydrology and stream sediments in a mountain catchment [D]. Christchurch: University of Canterbury, 1978.
- [19] MARSTON R A. The geomorphic significance of log steps in forest streams [J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 1982, 72: 99-108.
- [20] 王承恩, 张建民, 李贵吉. 阶梯溢洪道的研究现状及展望 [J]. *水利水电科技进展*, 2008, 28 (6): 89-94. (WANG Chenen, ZHANG Jianmin, LI Guiji. Trends of current research on the stepped spillway [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2008, 28 (6): 89-94. (in Chinese))
- [21] 张志昌, 曾东洋, 刘亚菲. 台阶式溢洪道滑行水流水面线和消能效果的试验研究 [J]. *应用力学学报*, 2005, 22 (1): 30-36. (ZHANG Zhichang, ZENG Dongyang, LIU Yafei. Experimental research on the presented water-surface curve of skimming flow on stepped spillways and energy dissipation [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2005, 22 (1): 30-36. (in Chinese))
- [22] 陈群, 戴光清, 朱分清, 等. 影响阶梯溢流坝消能率的因素 [J]. *水利发电学报*, 2003 (4): 95-104. (CHEN Qun, DAI Guangqing, ZHU Fenqing, et al. Factors of influence on the energy dissipation ratio of stepped spillways [J].

- Journal of Hydroelectric Engineering, 2003 (4): 95-104. (in Chinese))
 - [23] CHANSON H. Hydraulics of stepped spillways: current status[J]. Journal Hydraulic Engineering, 2000, 126(9): 636-637
 - [24] 田嘉宁, 天津岩夫, 李建中, 等. 台阶式溢洪道各流况的消能特性[J]. 水利学报, 2003, 33(4): 35-39. (TIAN Jianing, QHTSU I, LI Jianzhong, et al. The characters of energy dissipation under different flow on stepped spillways [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 33(4): 35-39. (in Chinese))
 - [25] PEYRAS L, ROYET P, DEGOUTTE G. Flow and energy dissipation over stepped gabion weirs [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1992, 118(5): 707-717.
 - [26] CHAMANI M R, RAJAJRATNA M N. Discussion about jet flow on stepped spillways [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, 121(5): 446-448.
 - [27] 田嘉宁, 李建中, 天津岩夫, 等. 台阶式溢洪道的消能问题[J]. 西安理工大学学报, 2002, 18(4): 346-350. (TIAN Jianing, LI Jianzhong, QHTSU I, et al. The research on energy dissipation on stepped spillways [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2002, 18(4): 346-350. (in Chinese))
 - [28] CHANSON H. Discussion about jet flow on stepped spillways [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, 121(5): 441-442.
 - [29] KEULEGAN G H. Laws of turbulent flow in open channels [J]. Journal of Research of the National Bureau of Standards, 1938, 21: 707-741.
 - [30] HEY R D. Flow resistance in gravel-bed rivers [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1979, 105: 265-279. (收稿日期: 2013-05-14 编辑: 骆超)
- +++++
- (上接第 19 页)
- [6] SAMMIS C G. Non-linear fracture mechanics model for spallation and coupling of nuclear explosions detonated in hard rock [R]. Los Angeles: University of Southern California, 1998.
 - [7] LEI Xinglin, NISHIZAWA O, MOURA A, et al. Hierarchical fracture process in brittle rocks by means of high-speed monitoring of ae hypocenter [J]. Journal of Acoustic Emission, 2005, 23: 102-122.
 - [8] CHIAIA B, BORRIBRUNETTO M. Multiscale modelling of stick-slip transition of rough (fractal) surfaces [C]//5th International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials. Vancouver, Canada: Materials Science Forum, 2007: 2594-2600.
 - [9] BORRIBRUNETTO M, CARPINTERI A, CHIAIA B. The effect of scale and criticality in rock slope stability [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2004, 37(2): 117-126.
 - [10] DAVID W F, SCOTT R P. Contamination of silicic magmas and fractal fragmentation of xenoliths in Paleocene plutons on Kodiak Island, Alaska [J]. The Canadian Mineralogist, 2007, 45(1): 107-129.
 - [11] WANG Lianguo, WU Yu, MIAO Xiexing, et al. Mechanism of water-inrush from fault induced by mining near the working face [J]. Journal of Coal Science & Engineering (China), 2007, 13(4): 393-395.
 - [12] SAHIMI M, REZA R T M, BAHRAMINASAB A, et al. Propagation and localization of acoustic and elastic waves in heterogeneous materials: renormalization group analysis and numerical simulations [J]. Acta Mechanica, 2009, 205(1): 197-222.
 - [13] BAHRAMINASAB A, MEHDI V A S, SHAHBAZI F, et al. Renormalization group analysis and numerical simulation of propagation and localization of acoustic waves in heterogeneous media [J]. Physical Review B: Condensed Matter and Materials Physics, 2007, 75(6): 1-13.
 - [14] 高召宁, 姚令侃, 徐光兴. 岩石破坏过程的自组织特征与临界条件研究 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2009, 41(2): 91-95. (GAO Zhaoning, YAO Lingkan, XU Guangxin. Study on self-organized characteristics and criticality condition in the course of rock failure [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science edition, 2009, 41(2): 91-95. (in Chinese))
 - [15] 吴国雄, 丁王飞, 张洋, 等. 沥青混凝土路面开裂破坏的渗流模型分析 [J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2009, 28(6): 1016-1020. (WU Guoxiong, DING Wangfei, ZHANG Yang, et al. Percolation model of asphalt concrete pavement crack damage [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2009, 28(6): 1016-1020. (in Chinese))
 - [16] 何超, 吕绪良, 高福银, 等. 二维导电点渗流参数的重整化群法计算 [J]. 应用科学学报, 2010, 28(2): 170-174. (HE CHAO, LÜ Xuliang, GAO Fuyin, et al. Calculation of 2D site percolation parameters of electrical conductivity using renormalization group method [J]. Journal of Applied Sciences, 2010, 28(2): 170-174. (in Chinese))
 - [17] GU Peiying, DENG Chang, TANG Lei. Determination of local damage probability in concrete structure [C]//2012 International Conference on Modern Hydraulic Engineering. Nanjing, China: China Association of Hydraulic Engineering Education, 2012: 489-493. (收稿日期: 2013-06-18 编辑: 周红梅)