

# 基于 FDEM-flow 的多孔水力压裂模拟

严成增<sup>1a, 1b</sup> 郑宏<sup>2a, 2b</sup>

(1.北京工业大学 a.城市与工程安全减灾省部共建教育部重点实验室; b.建筑工程学院, 北京 100124; 2.中国科学院 a.武汉岩土力学研究所; b.岩土力学与工程国家重点实验室 武汉 430071)

**摘要:**为指导水力压裂施工,用 FDEM-flow 方法对多孔水力压裂问题进行了研究。研究结果显示:当 H2 孔的水压较小时,由 H1 孔出发的裂缝几乎不朝 H2 孔偏转;当 H2 孔的水压较大时,H1 孔出发朝下扩展的裂缝,向 H2 孔偏转明显;当 H1、H3 孔同步增大水压时,H1 孔出发向下扩展的裂缝朝 H3 孔偏转,H3 孔出发向上扩展的裂缝朝 H1 孔偏转,最终在 H1 孔和 H3 孔间形成 2 条相向扩展的裂缝。上述研究结果表明:水力压裂裂缝的走向会受到相邻孔的干涉,可以通过相邻孔应力干扰控制压裂裂缝的走向;同时相邻孔的干涉,可以降低注水孔的起裂水压力,这也从侧面说明了同步压裂技术的合理性。

**关键词:** FEMDEM; FDEM-flow; 多孔水力压裂; 同步压裂; 裂缝; 应力干扰

**中图分类号:** O319.56 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-5485(2016)07-0063-05

## 1 研究背景

页岩气是一种重要的非常规天然气资源,正在改变世界能源、经济和政治格局<sup>[1]</sup>。水力压裂(在地应力测量领域,又称为水压致裂<sup>[2-3]</sup>)是页岩气开采的核心技术之一,目前常用的技术有多级压裂、清水压裂、水力喷射压裂、重复压裂和同步压裂<sup>[4]</sup>。其中,同步压裂是指 2 口或者 2 口以上的配对井同时压裂,来增大工作区的裂缝密度,形成复杂的三维裂缝网络<sup>[5]</sup>,从而提高气井产量和最终采收率。

为了指导压裂施工,需要分析同步压裂裂缝形成的力学机理,许多学者对此进行了研究。例如,侯明勋等<sup>[6]</sup>基于线弹性断裂力学,探讨了压裂流体在裂缝内存在未渗透区对裂缝扩展延伸压力的影响以及同时压裂条件下实现井间连通的可行性。陈守雨等<sup>[7]</sup>探讨了多井同步压裂井间裂缝网络连通机理及井间变应力压裂原理,给出了多井同步体积压裂的实现方法。李玉伟等<sup>[8]</sup>建立了二维诱导应力场计算解析模型,指出在同步体积压裂过程中,裂缝间存在的诱导应力场将改变原始地应力状态,裂缝延伸会发生转向,从而形成网状裂缝。单就水力压裂而言,其已涉及到流体和固体的耦合、岩体的破裂以及水嵌入到生成的裂缝等复杂问题。而同步压裂,

多个孔同时注水,涉及到裂缝的交汇,使问题变得更复杂。这使得从纯解析的角度,建立同步压裂的数学力学模型几乎是不可能的。因此,采用数值模拟研究该问题是一条不错的途径。然而,目前能够对水力压裂这一涉及流固耦合驱动下的岩体破裂问题进行模拟的方法十分有限。值得指出的是,杨天鸿和唐春安等<sup>[9]</sup>基于 RFPA 和多孔介质力学开发了 RFPA-flow 方法,为模拟水力压裂、同步压裂提供了一种解决方案。例如,李连崇等<sup>[10-11]</sup>运用该方法,对非对称孔隙压力梯度下非均匀岩石多孔水力压裂过程中的裂缝扩展模式进行了研究;其还用该方法对砂砾岩水力压裂裂缝扩展规律进行了研究<sup>[12]</sup>。除此以外,Cundall<sup>[13]</sup>提出的颗粒流方法(PFC),也是模拟水力压裂问题的较好方法,例如 Al-Busaidi 等<sup>[14]</sup>用颗粒流方法(PFC)研究水力压裂过程,同时可以模拟水力压裂过程中的声发射。不过该方法存在的问题是:采用相互粘结的圆球来模拟岩体,无论圆球怎么排列,模型初始都是有空隙的;另外,圆球是刚性的,应力应变无法直接得出,需要通过测量圆统计平均得出应力、应变,应力应变的值跟测量圆的半径等有关,物理意义不够直观。Munjiza<sup>[15]</sup>提出的 FEMDEM 方法,则不存在上述问题,它可以对岩体的变形、破坏的全过程进行模拟。该方法吸收了离散元方法的优点,又保留了连续介质力学中应

收稿日期: 2005-03-31; 修回日期: 2015-04-13

基金项目: 中国博士后科学基金面上项目(2015M580953); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2011CB013505, 2014CB047100)

作者简介: 严成增(1986-),男,湖南衡阳人,助理研究员,博士后,主要从事离散元有限元耦合、离散元、多物理场耦合、水力压裂、高性能并行计算以及软件工程方面的研究。(电话) 010-67391645 (电子信箱) yanchengzheng86@gmail.com。

力、应变的概念,是模拟岩体破裂的极佳方法。严成增等<sup>[16]</sup>基于 FEMDEM 框架,提出了求解流固耦合驱动下的岩体破裂问题的 FDEM-flow 方法,还用该方法研究了地应力对水力压裂的影响<sup>[17]</sup>。

本文将 FDEM-flow 方法作为研究问题的工具,对多孔水力压裂(同步增加水压力)问题进行研究。

## 2 FDEM-flow 流固耦合原理

FDEM-flow 流固耦合方法是在 FEMDEM 方法中实现的,FEMDEM 方法的基本原理是,在连续体内部划分三角形单元有限元网格,然后在相邻三角形单元的公共边上插入起粘结作用的节理单元,通过节理单元的断裂来模拟裂纹萌生、扩展及贯通。在节理单元未断裂时,通过节理单元的粘结作用来模拟连续体的变形。

该方法采用 DEM 的方式来处理三角形单元之间的相互作用,可称之为三角形单元的颗粒流方法。而 FDEM-flow 方法,充分利用了 FEMDEM 方法中三角形单元和节理单元的连接关系(如图 1),将破裂的节理单元作为流体流动的天然通道,并假定三角形单元不透水,流体流动满足立方定律,均采用非稳态计算。FDEM-flow 方法根据文献[18]提出的基于递归的水力裂隙网络搜索算法,搜索出所有与已有水力裂隙网络连通的节理,只有水力裂隙网络中的节理有流体的流动,才参与渗流部分的计算,然后依据立方定律求得各节理的水头,将流体压力施加于节理单元连接 2 条边上。流体的压力作用,会影响节理的张开和闭合,同时节理的张开或闭合又反过来影响节理中流体的流动,这就是 FDEM-flow 方法中流固耦合的基本原理,有关该方法的具体细节可参考文献[14]。

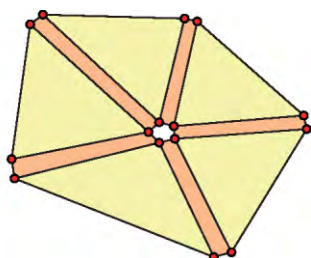


图 1 三角形单元和节理单元的连接  
Fig.1 Connection of triangular elements and joint elements

## 3 数值模型及参数

文献[19]采用室内试验,研究了圆孔内流体压力分布对裂纹扩展路径的影响,在一块岩样(152 mm×152 mm×25.4 mm)上钻了 3 个呈三角形分布的圆孔,对其中 2 个孔分别注入流体,另外 1 个孔不注

入流体,据此研究岩样在非对称流体压力作用下,岩样的裂缝扩展形态。本文以该实验为依据,所建立的计算模型,如图 2 所示,3 个孔的半径均为 4 mm, H1 孔距 H2, H3 孔的间距均为 38 mm, H2 孔距 H3 孔的间距为 45 mm,共划分了 26 566 个三角形单元。H1 孔设置了 6 mm 长引导裂缝。

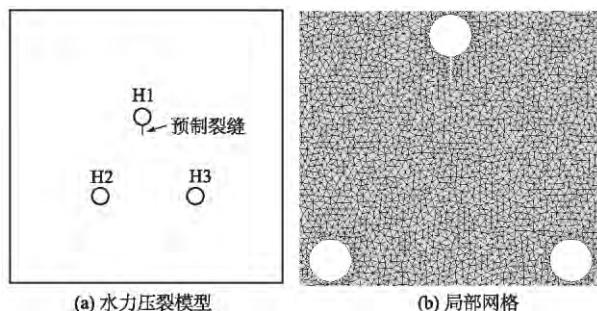


图 2 三孔水力压裂模型和局部网格

Fig.2 Model of hydro-fracturing with three holes and local meshes

考虑 2 种加载工况:第 1 种工况是, H2 孔分别保持 2, 3, 4 MPa 水压恒定, H3 孔没有水压, H1 孔的水压不断增大,随着 H1 孔的水压的增大,引导裂缝将不断扩展,据此研究非对称水压力作用对裂缝扩展的影响;第 2 种工况是, H1, H3 孔同步增大水压,以探讨同步压裂情形下的裂缝扩展。

采用的力学参数如下:弹性模量  $E$  为 10 GPa;泊松比  $\mu$  为 0.25;内摩擦角  $\varphi$  为  $30^\circ$ ;黏聚力  $c$  为 20 MPa;抗拉强度  $f_t$  为 8 MPa;水体积模量  $K_w$  为 2 200 MPa;水密度  $\rho$  为  $1\ 000\ \text{kg/m}^3$ 。

## 4 模拟结果及分析

如图 3 所示,当 H2 孔加压稳定后, H1 孔水压不断增大时,当 H2 孔的水压取较小值 2 MPa 时,裂缝朝 H2 孔的偏转并不明显。这是因为水压的非对称性较小,裂缝的偏转不明显, H1 下方的裂缝几乎是对称地通过 H1 孔和 H3 孔之间。

当 H2 孔的水压为 3 MPa 时,由于此时在 H2 孔较大的水压的作用下, H1 孔出发朝下扩展的裂缝朝 H2 孔偏转明显,且随着 H1 孔水压的增大, H2 孔也产生 2 条裂缝, H2 孔出发朝上裂缝也同样向 H1 孔偏转,且 H1 孔的水压达到 6 MPa 时,才有裂缝的产生。由此可见, H1 孔和 H2 孔水压的相互作用,使得两者之间产生相向扩展的裂缝。而 H2 孔的水压为 3 MPa 时,在 H1 孔水压的作用下,也产生了裂缝,这说明相邻孔之见的干涉可以降低起裂水压力。

当 H2 孔的水压增大为 4 MPa 时, H1 孔出发的

裂缝朝 H2 孔的偏转更为明显,且 H2 孔出发朝上扩展的裂缝径直朝 H1 孔偏转。

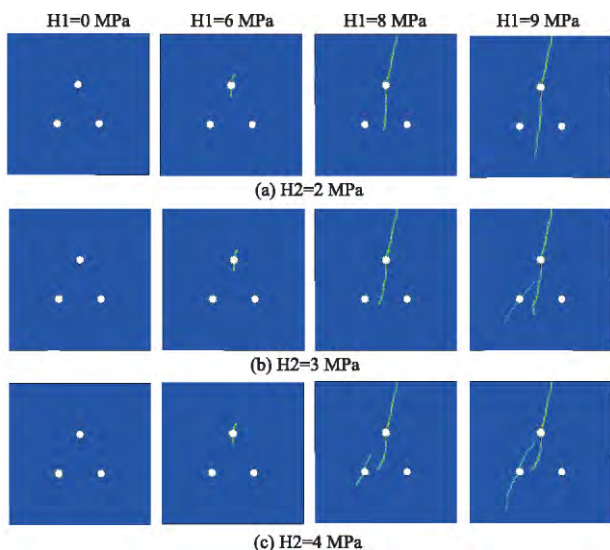


图 3 多孔水压裂缝扩展形态及水压分布  
Fig.3 Crack propagation and water pressure distribution for multi-hole hydraulic fracturing

如图 4 所示,是 H2 孔加压稳定后,H1 孔水压不断增大,FDEM-flow 方法模拟得到裂缝及水压分布与试验结果的对比。当 H2 孔水压较小时,模拟结果与试验结果较好地吻合,从 H1 孔出发向下扩展的裂缝,均朝 H2 孔发生了较小幅度的偏转。

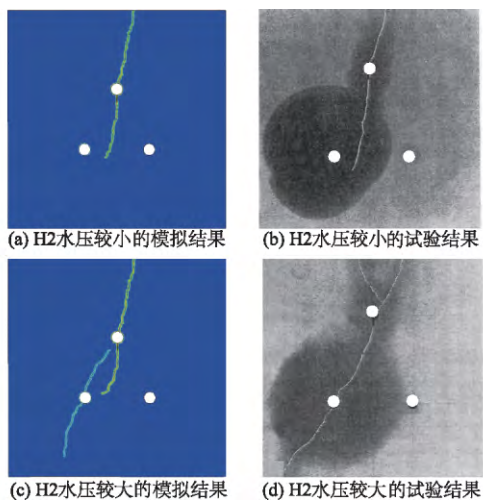


图 4 多孔水力压裂模拟结果和试验结果<sup>[19]</sup>的比较  
Fig.4 Comparison between hydro-fracturing simulation results and experimental<sup>[19]</sup> results

当 H2 孔水压较大时,FDEM-flow 方法模拟的结果和实验结果,有一些偏差,但两者的基本趋势是一致的,从 H1,H2 出发的裂缝相向扩展,模拟的结果显示 2 个裂缝没有交汇,而实验的结果显示 2 条相向扩展的裂缝出现了交汇。可能的原因为,除了裂缝只能沿着边界扩展外,目前的 FDEM-flow 方法假定流体只在裂隙中流动,岩石本身不透水,导致不能

考虑岩石内的孔隙压力和孔隙压力梯度的作用。

如图 5 所示,当 H1,H3 孔水压同步增大时,由于 H1 孔预制裂缝的存在,H1 孔出发的裂缝,最初沿着预制裂缝的方向向下扩展(水压为 5.8 MPa 以前),扩展一定长度后,裂缝开始弯向 H3 孔扩展;同时 H3 孔出发的向上扩展的裂缝,最初是竖直向上扩展,随后也偏向 H1 孔扩展,最终在 H1 孔和 H2 孔之间形成 2 条相向扩展的裂缝。这进一步说明,可以通过相邻孔的干涉,来控制裂缝的走向。

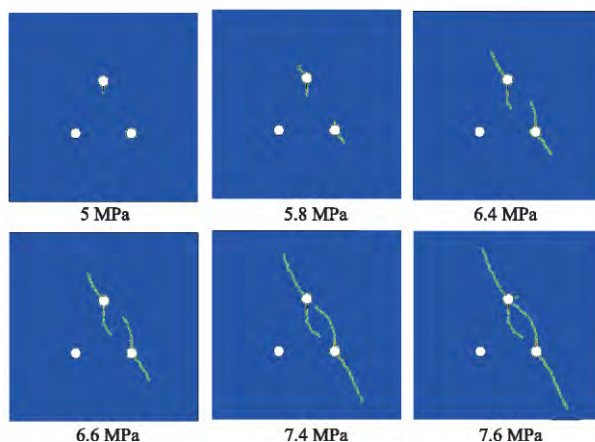


图 5 H1 和 H3 孔水压同步增大时的裂纹扩展形态及水压分布

Fig.5 Crack propagation and pressure distribution when pressures in hole H1 and H3 increase synchronously

如图 6 所示,为 H1,H3 孔同步增大水压时,FDEM-flow 方法模拟结果与实验结果比较。从图中可知,两者的裂纹扩展形态有一些差别,模拟结果,从 H1 孔和 H3 孔出发相向扩展的裂缝没有交汇,而实验结果显示,从 H1 孔和 H3 孔出发的 2 条裂缝出现了交汇,但两者的基本趋势是一致的。即分别从 H1,H3 孔出发的裂缝均相向扩展,并且都朝对方孔发生偏转。导致模拟结果与实验结果不一致的原因,除了裂缝只能沿着边界扩展外,可能为目前的 FDEM-flow 方法不考虑岩石本身的渗透性,无法考虑岩石内的孔隙压力和孔隙压力梯度的作用所致。

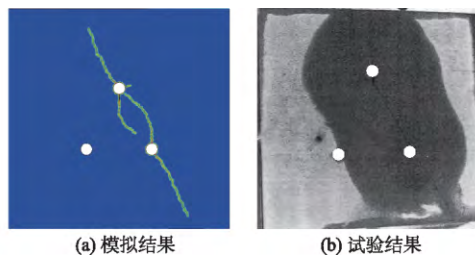


图 6 H1 和 H3 孔同步加压模拟结果和试验结果<sup>[19]</sup>的比较

Fig.6 Comparison between simulation results and experimental results<sup>[19]</sup> of multi-hole hydro-fracturing when pressures in hole H1 and H3 increase synchronously

## 5 结 论

综合上面的讨论可以得出如下结论:

(1) 本文用 FDEM-flow 方法,对多孔水力压裂问题进行了研究。当 H2 孔的水压较小时,由 H1 孔出发的裂缝几乎不朝 H2 孔偏转;当 H2 的水压较大时,H1 孔出发朝下扩展的裂缝,向 H2 孔偏转明显。

(2) 当 H1,H3 孔同步增大水压时,H1 出发向下扩展的裂缝朝 H3 孔偏转,H3 孔出发向上扩展的裂缝朝 H1 孔偏转,最终在 H1 孔和 H3 孔之间形成 2 条相向扩展的裂缝。

(3) 水力压裂裂缝的走向会受到相邻孔的干涉,可以通过相邻孔的应力干扰控制压裂裂缝的走向,同时相邻孔的干涉可以降低注水孔的起裂水压力,这也从侧面说明了同步压裂技术的合理性。

### 参考文献:

- [1] 张宏学,刘卫群.页岩气开采的相关实验、模型和环境效应[J]. 岩土力学,2014,35(S2):85-100.
- [2] 韩晓玉,黄孝泉,李永松,等.乌东德水电工程河谷地应力场分布规律[J]. 长江科学院院报,2015(11):34-39.
- [3] 赵国平,陈文华,马鹏,等.水压致裂法地应力测试在水电工程中的应用[J]. 长江科学院院报,2013,30(11):77-82.
- [4] 唐颖,张金川,张琴,等.页岩气井水力压裂技术及其应用分析[J]. 天然气工业,2010,(10):33-38.
- [5] 崔青.美国页岩气压裂增产技术[J]. 石油化工应用,2010,(10):1-3.
- [6] 侯明勋,王德新,王水林,等.同时压裂条件下实现井间连通方法探讨[J]. 岩土力学,2003,24(4):561-564.
- [7] 陈守雨,杜林麟,贾碧霞,等.多井同步体积压裂技术研究[J]. 石油钻采工艺,2011,(6):59-65.
- [8] 李玉伟,艾池,张博文,等.同步体积压裂对井间裂缝特性的影响[J]. 断块油气田,2013,20(6):779-782,DOI:10.6056/dkyqt201306025.
- [9] 杨天鸿,唐春安,朱万成,等.岩石破裂过程渗流与应力耦合分析[J]. 岩土工程学报,2001,23(4):489-493.
- [10] 李连崇,唐春安,杨天鸿,等.FSD耦合模型在多孔水压致裂试验中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2004,(19):3240-3244.
- [11] 李连崇,杨天鸿,唐春安,等.岩石水压致裂过程的耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报,2004,22(7):1060-1066.
- [12] 李连崇,李根,孟庆民,等.砂砾岩水力压裂裂缝扩展规律的数值模拟分析[J]. 岩土力学,2013,34(5):1501-1507.
- [13] Itasca Consulting Group Ltd. User Manual of PFC Code [K]. Minneapolis, USA: Itasca Consulting Group Ltd., 2011.
- [14] AL-BUSAIDI A, HAZZARD J F, YOUNG R P. Distinct Element Modeling of Hydraulically Fractured Lac du Bonnet Granite [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2005, 110(B6): 1-14.
- [15] MUNJIZA A. The Combined Finite-discrete Element Method [M]. London: John Wiley & Sons, Ltd., 2004: 29-32.
- [16] 严成增,郑宏,孙冠华,等.模拟水压致裂的二维 FDEM-flow 方法[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(1):67-75.
- [17] 严成增,郑宏,孙冠华,等.基于 FDEM-flow 研究地应力对水力压裂的影响. 岩土力学,2016,37(1):237-246.
- [18] 严成增,孙冠华,郑宏,等.二维 FEM/DEM 爆炸气体驱动下的岩体破裂. 岩土力学,2015,36(8):2419-2425.
- [19] BRUNO M S. Pore Pressure Influence on Tensile Fracture Propagation in Sedimentary Rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1991, 28(4):261-273.

(编辑:刘运飞)

## Simulation of Multi-hole Hydraulic Fracturing Using FDEM-flow Method

YAN Cheng-zeng<sup>1,2</sup>, ZHENG Hong<sup>3,4</sup>

(1. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 4. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** In order to instruct construction of hydraulic fracturing, with the proposed FDEM-flow method, we studied multi-hole hydraulic fracturing. When the pressure of hole H2 is small, crack starting from hole H1 hardly deflects toward hole H2; when water pressure of H2 is large, crack starting from H1 propagates to H2 obviously;

while when pressures of H1 and H3 increase synchronously , crack extended downward from hole H1 deflects towards hole H3 , and crack starting from hole H3 develops towards hole H1 , and finally , two opposing propagation cracks form between H1 and H3. Results show that , direction of hydraulic fracturing cracks will be interfered by adjacent holes , hence the direction can be controlled through adjusting the pressure of adjacent holes; while the initiation water pressure that crack begins to occur can be reduced through the adjacent interference , which validated the rationality of synchronous hydraulic fracturing technology.

**Key words:** FEMDEM; FDEM-flow; multi-hole hydraulic fracturing; synchronous fracturing; fracture; stress interference

=====

( 上接第 50 页)

limits , there are few investigation and reports about the unique ecological environment conditions in the source area. According to monitoring data of water quality obtained from scientific investigations in the source area in 2012 , 2014 and 2015 , we analyze conventional monitoring indicators and water quality indexes such as organic and metal pollutants. On the basis of the analysis , we discuss the spatial-temporal distribution of water quality in the source area in recent years. Results show that firstly , water quality of rivers in the source area are good , and water quality belongs to I type or II type in most regions; secondly , influenced by sediment contents of water body and regional geological conditions , water quality indexes vary among rivers in different regions in the source area; furthermore , water quality shows a small inter-year variation with a similar fluctuation; in comparison with the background values of other rivers in China and abroad , values of water quality in the source area are basically within the range of background values of river; finally , organic pollutants such as phthalic acid esters are detected in surface water samples of the source area. The results are important for further study on the water ecology of Changjiang source area.

**Key words:** source area of Changjiang River; water quality; organic pollutant ; heavy metal; temporal and spatial distribution

=====

( 上接第 54 页)

are expounded. Key technologies including information gathering network and communication , temporal GIS , geo-hazard monitoring and warning based on multiple models are analyzed and introduced. The system with multiple layers adopts highly scalable structure and flexible deployment. GIS , virtual simulation , and WEB asynchronous service based on multi-user concurrent are also employed. Through the system , functions of information gathering , communication , management , analysis , decision-making , and warning are integrated. The system is applied to Danjiangkou reservoir as a trial. Finally , the research provides reference for the scientific management of geological hazards and emergency response.

**Key words:** geological hazard; monitoring and warning; 3-D simulation; GIS; Danjiangkou reservoir

=====

( 上接第 62 页)

stepped spillway decreased dramatically along the flow path , and specific energy on stepped spillways first increased and then remained constant. The change of specific energy determines the gross head and low stable specific energy reflects better energy dissipation. Two dimensionless parameters of stable specific energy and its influencing factors were obtained through dimensional analysis and a good power function law was found between the two dimensionless parameters based on the data from test and related literature , with the correlation coefficient between 0.9949 and 0.9972. An empirical formula for calculating the residual energy and gross dissipation rate was put forward to provide references for related design.

**Key words:** stepped spillways; flow energy characteristics; specific energy of water flow; dimensional analysis; dissipation rate