

# 考虑壁面滑移效应的平行单裂隙辐射流瞬态水力特性研究

杜万军<sup>1</sup>, 柴军瑞<sup>2</sup>, 许增光<sup>2</sup>, 曹成<sup>2</sup>

(1. 杨凌职业技术学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 为研究平行单裂隙辐射流内部细观水力特性, 建立基于湍流 RANS  $k-\varepsilon$  计算模型。结果表明: 平行单裂隙辐射流呈现“非典型辐射流”现象, 且存在优势水力通道; 旋涡的演化束窄了水流通道, 距离优势水力通道和辐射中心越近, 流速和旋涡流强度越大; 辐射中心水压增大引起裂隙流量增加, 同时优势水力通道形成越早且越稳定, 裂隙宽度越大, 则裂隙湍流效应越显著, 但主要以径向湍流为主; 裂隙接触面重新分配优势水力通道, 降低了裂隙渗流能力, 且接触率与裂隙渗流量呈负相关; 壁面滑移对水流产生了阻碍和协助两种作用, 主要与滑移的方向和速度关系密切。入口水压、裂隙宽度、接触率和壁面滑移等综合因素对平行单裂隙辐射流水力特性的影响效应显著, 本研究可为复杂裂隙辐射流研究提供参考。

**关键词:** 平行单裂隙; 非典型辐射流; 瞬态水力特性; 优势水力通道; 壁面滑移效应

中图分类号: TV131

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)01-0136-08

## Transient hydraulic characteristics of radiation flow in a parallel single fracture considering wall slip effect

DU Wanjun<sup>1</sup>, CHAI Junrui<sup>2</sup>, XU Zengguang<sup>2</sup>, CAO Cheng<sup>2</sup>

(1. Yangling Vocational & Technical College, Yangling 712100, China; 2. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In order to study the meso-hydraulic characteristics of radiation flow in a parallel single fracture, a  $k-\varepsilon$  calculation model based on turbulence RANS is established. The simulation results show that the radiation flow in the parallel single fracture presents the characteristics of “atypical radiation flow”, and a preferential hydraulic channel is usually formed; because the evolution of the vortices narrows the flow channel, the closer to the preferential hydraulic channel or the radiation center, the stronger the flow velocity and vortex intensity become; the rise of water pressure at the radiation center leads to the increase of fracture flow, and the earlier the preferential hydraulic channel is formed and more stable it is, the wider the fracture become and the more significant the turbulence effect of the fracture is, but the fracture flow is dominated by radial turbulence; the fracture contact surface redistributes the preferential hydraulic channel, which decreases the seepage ability of the fracture, and the contact rate is negatively correlated with the fracture flow; the wall slip can be either obstructive or beneficial to the fracture flow, depending on the direction and velocity of the slip. It is found that the inlet water pressure, fracture width, contact rate and wall slip have a significant effect on the radiation flow, and these findings can provide a reference for the study of radiation flow in complex fractures.

**Key words:** parallel single fracture; atypical radiation flow; transient hydraulic characteristics; dominant hydraulic channel; wall slip effect

收稿日期: 2021-06-22; 修回日期: 2021-10-12

基金项目: 陕西省教育厅一般专项科研计划项目(21JK1000); 国家自然科学基金项目(51679197); 国家优秀青年科学基金项目(51922088); 杨凌职业技术学院 2020 年自然科学基金项目(ZK20-03)

作者简介: 杜万军(1987-), 男, 陕西宝鸡人, 硕士, 讲师, 主要从事水工结构分析及数值仿真研究。

## 1 研究背景

地下工程和石油工程中,裂隙岩体的水流特性对结构的安全稳定和石油天然气的开采意义重大,而裂隙辐射流相较于单向流更为复杂,目前研究的重点主要集中在辐射流立方定理理论和试验公式<sup>[1-2]</sup>的修正以及裂隙水流的流态分析,研究方法包括宏观试验研究和细观数值计算。在相同条件下与平行流对比,辐射流等效水力开度更小、临界雷诺数更低、非线性流程度更强<sup>[3-4]</sup>。理论推导得出的修正辐射流立方定理<sup>[5-6]</sup>可以较好地适应平行裂隙,但裂隙水流的惯性力和黏性力之间存在一定关系<sup>[7]</sup>,流态分成了黏性区和势流区两种类型。试验发现裂隙水头越高时,出现非线性流概率越高<sup>[8]</sup>,从而导致立方定理不能完全表达渗流规律。当裂隙出现旋涡流时,水流状态主要以紊流为主,随着隙宽增大,涡流范围和强度也会增大,导致立方定理夸大了实际裂隙渗流能力<sup>[9-10]</sup>。但多数学者主要以二维模型或简化三维模型来推断裂隙水流在辐射纵截面方向的水力特性,忽略了水流在辐射过程中水平与垂直维度实际存在的非对称性<sup>[11]</sup>和随机性,利用稳态计算无法解释裂隙辐射流的形成过程<sup>[12]</sup>。本文数值计算基于湍流 RANS  $k-\varepsilon$  模型并以试验得到的数据范围来确定数值模拟的裂隙宽度,考虑多因素综合分析裂隙内部瞬态水力特性,从而为辐射流的研究方向和复杂裂隙辐射流的研究提供一定的参考。

## 2 裂隙辐射流试验和数据分析

### 2.1 试验简介

采用的试验仪器为 YZS 自动控制岩石节理直剪渗流耦合系统,如图 1 所示。该仪器可直接对试件施加垂直压力、剪切力和水压力。垂直压力和剪切力由油压系统提供,水压力由液压氮气瓶和水箱提供,试验试件由  $\beta$  型高强度石膏与水按一定比例拌合后浇筑在预制模具中形成。试件尺寸(高度为

80 mm,半径为 100 mm)和平行裂隙组合形式如图 2 所示。



图1 岩石节理直剪渗流耦合系统示意图

### 2.2 试验数据分析

等效裂隙宽度可以反映裂隙整体渗透能力,但图 2 中平行裂隙实际隙宽的确定难度较大,无法真实反映裂隙实际机械隙宽,所以根据试验数据按照下式<sup>[13]</sup>计算,作为数值模拟的参考依据。

$$b_h = \left( \frac{12v\Delta LQ}{gw\Delta H} \right)^{\frac{1}{3}} = \left( \frac{12\mu q}{\rho g J} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

式中: $\mu$  为动力黏性系数,  $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ ;  $q$  为单位时间过流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $J$  为渗透压力下的水力梯度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $\rho$  为流体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $g$  为当地重力加速度,  $\text{m}/\text{s}^2$ 。

试验得出的不同垂直压力和水压力下裂隙等效宽度与剪切位移关系曲线如图 3、4 所示。由图 3 可以看出,垂直压力从 50 kN 增加至 60 及 70 kN,对应隙宽计算范围分别为 0.06 ~ 0.37、0.09 ~ 0.28、0.09 ~ 0.17 mm,垂直压力越大,计算裂隙宽度越小。入口水压从 0.4 MPa 增加至 0.6 及 0.8 MPa,裂隙计算宽度范围分别为 0.08 ~ 0.22、0.08 ~ 0.27、0.08 ~ 0.28 mm,水压力越大,计算裂隙宽度越大。垂直压力决定裂隙开度,在数值模拟中主要通过隙宽来表现。由于主要考虑初期剪切过程 1s 内的瞬态时间步,故取图 3 和 4 中剪切滑移初期计算裂隙宽度范围(0.06 ~ 0.37 mm)为数值模拟裂隙宽度的参考值。

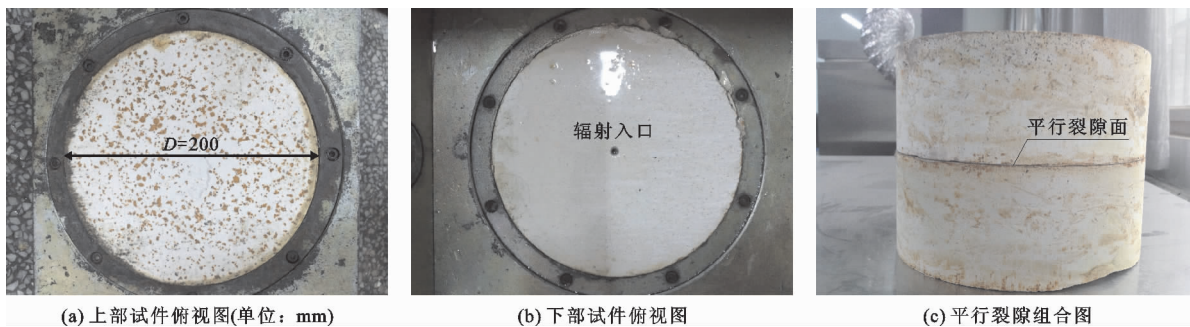


图2 平行裂隙试件图

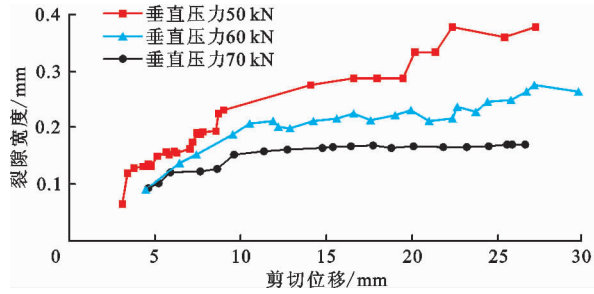


图3 不同垂直压力下裂隙等效宽度与剪切位移关系曲线

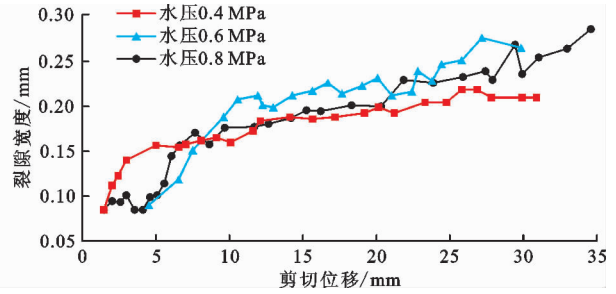


图4 不同水压下裂隙等效宽度与剪切位移关系曲线

### 3 数值计算理论基础

基于平均雷诺 RANS 方程,当实际雷诺数非常大时,流体的惯性力远大于黏性力,这种湍流问题应该按瞬态方法分析,故计算模型选择 RANS  $k-\varepsilon$  方程<sup>[14-15]</sup>,其表达式如下。

连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (2)$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho u'_i u'_j) \quad (3)$$

式中: $u_i$  和  $u_j$  为雷诺平均速度的分量, m/s;  $\rho$  为流体密度, kg/m<sup>3</sup>;  $t$  为瞬态时间, s;  $P$  为流体压强, Pa;  $u'_i$  和  $u'_j$  为脉动速度, m/s;  $\sigma_{ij}$  为应力张量分量, kg/m<sup>2</sup>。

壁面滑移边界条件<sup>[16]</sup>理论方程:

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{u}_b \cdot \mathbf{n} \quad (4)$$

$$\mathbf{L}_n - (\mathbf{L}_n \cdot \mathbf{n})\mathbf{n} = 0 \quad (5)$$

$$\mathbf{L}_n = \mathbf{L}\mathbf{n} \quad (6)$$

$$\nabla K \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (7)$$

$$\nabla \varepsilon \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (8)$$

式中: $\mathbf{u}$  为流体速度, m/s;  $\mathbf{u}_b$  为壁面移动速度, m/s;  $\mathbf{n}$  为法向单位矢量;  $\mathbf{L}_n$  为粘性力和弹性总和, kg/m<sup>2</sup>;  $\mathbf{L}$  为粘性应力张量 kg/m<sup>2</sup>;  $K$  为湍流动能, J;  $\varepsilon$  为湍流动能耗散率, %。

## 4 结果分析与讨论

### 4.1 裂隙辐射流涡流变化过程

采用进口和出口恒定压力边界条件,入口边界条件设置为辐射中心水压(以下简称中心水压),其大小根据试验工况计算,出口边界条件为充分自由发展流动,外部压力设为0,壁面设置为滑移边界条件,平行单裂隙辐射流计算模型如图5所示。由图5可看出,水流从下部试件中心注入,自辐射中心由

内向外自由流动,裂隙面处在  $xy$  平面,下部注水方向沿  $z$  轴。

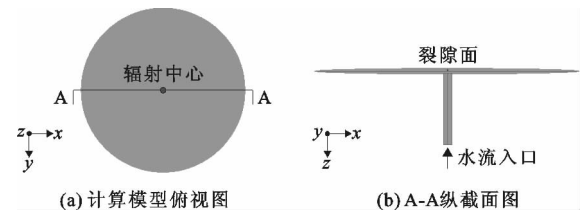


图5 平行单裂隙辐射流计算模型示意图

计算模型在恒定裂隙宽度和水压条件下进行,裂隙宽度依据试验裂隙等效宽度数量级确定计算模型裂隙宽度分别为 0.1、0.2、0.3 mm,辐射中心水压分别为  $1 \times 10^4$ 、 $3 \times 10^4$ 、 $5 \times 10^4$  Pa。计算模型模拟的平行裂隙中非典型辐射流演化过程(0 ~ 0.3 s)见图6。图6展示了完整辐射流形成与演化的5个阶段:在水流从裂隙中心高速辐射流出的初期,水流惯性力旋转力矩较小,黏滞力依然起主导作用,裂隙水流以线性流为主。当水流辐射扩散过程中惯性力逐渐大于粘滞力后,产生切向的旋转角速度,开始过渡为非线性流动<sup>[17]</sup>,继而产生大小强度不同的旋涡<sup>[18-19]</sup>,水流扩散的不稳定性影响了旋涡的成长与消失,旋涡的数量和大小决定了优势水力通道的数量和路径。旋涡直径越大,对水流通道的束窄程度越高<sup>[20]</sup>,辐射流逐步演化成具有优势水力通道的“非典型辐射流”。水流在惯性力持续作用下继续径向扩散,扰动范围和幅度影响了优势水力通道。旋涡的形成对裂隙水流的渗流路径进行了初期随机分配,旋涡的消失代表了稳定优势水力通道基本形成,在此过程中水流出现局部“摆动”状态但始终保持辐射状态流出,优势水力通道主要以线性流为主。

如图7所示,沿半径方向选取8个不同特征点位,模型计算边界条件为:中心水压为  $3 \times 10^4$  Pa,隙宽为 0.2 mm。各特征点位涡流<sup>[21]</sup>强度时程曲线见图8。分析图8可知,所有点位均产生了涡流,且涡流强度与辐射流流速呈正相关。2号和7号点位均



于两条优势水力通道轴线上(图7),其涡流强度最大,尤其是7号点较2号点所在的优势水力通道强度更高,其涡流强度最大值达到了 $98.4\text{ s}^{-1}$ ;4号点位于优势水力通道边缘,其涡流强度最大值为 $27.5\text{ s}^{-1}$ ;8号点位的涡流强度最大值为 $56.5\text{ s}^{-1}$ ,涡流强度变化不大。处于优势水力通道范围之外的旋涡的

形成与消失影响了1、3、4、5、6号点位的速度场变化,导致涡流强度连续波动变化,其平均值约为 $20\text{ s}^{-1}$ ,尤其是6号点位距离优势水力通道较远,产生的旋涡数量和强度更低,在 $0.5\text{ s}$ 之后其涡流强度一直处于 $4.2\text{ s}^{-1}$ 以下,说明优势水力通道之外一定区域的非线性流动更强。

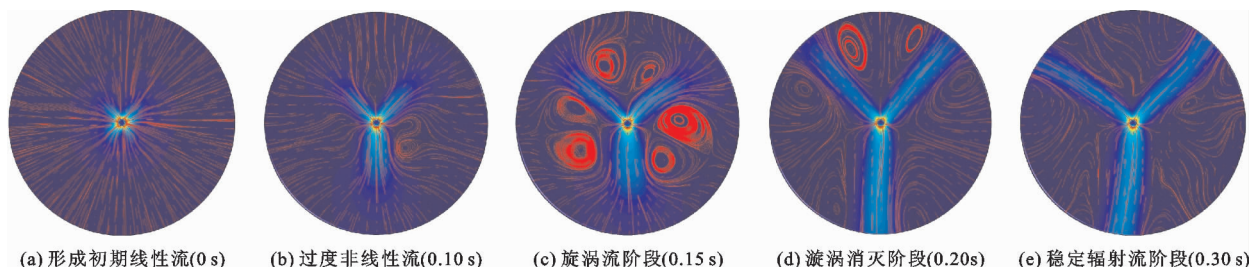


图6 平行裂隙中非典型辐射流演化过程

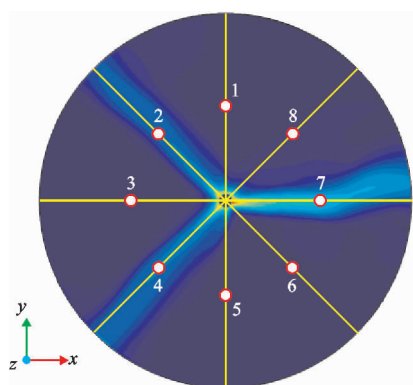


图7 裂隙面特征点位分布示意图

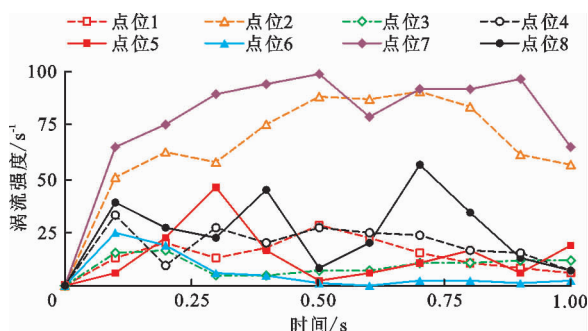


图8 各特征点位涡流强度时程曲线

## 4.2 中心水压和裂隙宽度对裂隙水力特性的影响分析

4.2.1 中心水压对裂隙水力特性的影响 不同中心水压下裂隙渗流量与涡量时程曲线如图9所示。由图9可看出,中心水压越大,形成优势水力通道所需时间越短、横向稳定性越高,裂隙渗流量也越大,且渗流量均表现为先增大再减小后趋于平稳的趋势。中心水压分别为 $1 \times 10^4$ 、 $3 \times 10^4$ 、 $5 \times 10^4\text{ Pa}$ 时,渗流量最大值依次为 $23.9$ 、 $51.8$ 、 $72.0\text{ cm}^3/\text{s}$ ,涡流

强度最大值依次为 $57.8$ 、 $188.3$ 、 $241.1\text{ s}^{-1}$ ,主要原因在于水流辐射初期,旋涡促进了水力通道的变化和湍流效应的产生,优势水力通道流线增密,湍流范围和强度增大引起辐射能量消耗,导致渗流量和涡量出现降低。当形成稳定的水力通道后,水流非线性和湍流强度降低,渗流通道相对稳定,裂隙渗流量分别维持在 $22.1$ 、 $41.4$ 、 $57.1\text{ cm}^3/\text{s}$ 左右。

不同裂隙宽度下非线性流形成时间与中心水压关系曲线见图10。由图10可看出,各裂隙宽度均表现出中心水压越大,则裂隙面形成非线性流动的时间越短的规律,但不同裂隙宽度对非线性流动的响应程度存在差异,当中心水压持续增大超过 $3 \times 10^4\text{ Pa}$ 后,非线性流在 $0.1\text{ s}$ 内基本形成,此时裂隙宽度的变化对非线性流动几乎不产生影响。优势水力通道使水流的渗流路径固定,从流线分布可知(图6),稳定的优势水力通道主要以线性渗流为主,非线性渗流主要集中在优势水力通道不稳定区域或者其形成初期。中心水压对非线性流动形成的时间存在阈值,其大小需要根据实际裂隙面的特征和工况来确定。

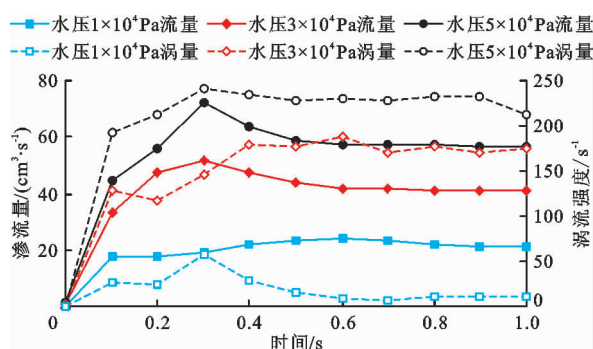


图9 不同中心水压下裂隙渗流量与涡量时程曲线

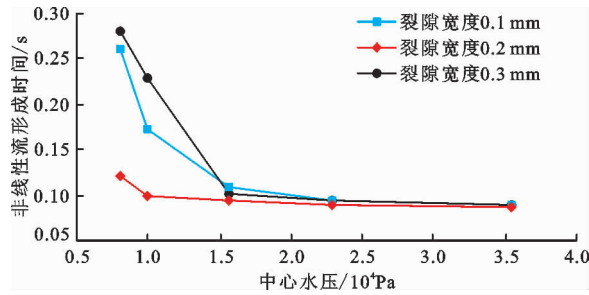


图 10 不同隙宽非线性流形成时间与中心水压关系曲线

4.2.2 裂隙宽度对裂隙水力特性的影响 裂隙宽度在 1 mm 及以下时,纵截面方向水力特性差异不大。为了解纵截面维度的水力特性,预测隙宽对辐射流的影响效应,分别在 3、2、1、0.2 mm 隙宽和  $3 \times 10^4$  Pa 中心水压下进行模拟计算,计算得出的 3、2、1 mm 裂隙宽度纵截面流速等值线云图如图 11 所示。隙宽对优势水力通道的影响主要表现在水流湍流效应和有效宽度两方面,裂隙机械隙宽越小,水流在纵截面方向非线性程度越小,湍流强度越低。由图 11 可看出,速度场在纵截面的梯度分布主要以径向为主,隙宽从 3 mm 减小至 1 mm 时,最大径向流流速相应从 1.52 m/s 增至 3.96 m/s,增幅为 1.6 倍。

在不同裂隙宽度下,分别取优势水力通道和非优势水力通道特征点位各 1 个,计算得出的各点位  $z$  方向的流速分量时程变化曲线如图 12 所示,裂隙水流在  $z$  方向的流速分量表示水流辐射过程存在湍流效应并出现上下振动。由图 12 可看出,裂隙宽度越大,则湍流上下振幅越大,当裂隙优势水力通道稳定后,振动逐渐削弱,湍流强度降低。隙宽从 0.2 mm 增大到 3 mm 时,相应的  $z$  方向流速分量从 0.003 4 cm/s 增大至 0.088 0 cm/s。由于优势水力通道外区域非线性和湍流效应显著,振动幅度反而更强烈。当裂隙宽度小于 0.2 mm 数量级时, $z$  方向流速分量趋于 0,主要是由于隙宽的减小降低了水流纵截面方向的湍流效应。

在 3、2、1 mm 裂隙宽度下分别取纵截面方向 5 cm 半径范围内的三维截线各 2 段,计算线上速度矢量分布如图 13 所示。由图 13 可看出,裂隙宽度越大,截线整体平均流速越小,由于裂隙壁面剪切滑移的影响,未处在优势水力通道和剪切滑移方向不一致的裂隙纵截面速度分布差异不大,且速度值较小。1 mm 裂隙宽度的径向速度最大位置分别在距下部裂隙面 0.30 和 0.70 mm 处;2 mm 裂隙宽度的最大流速出现在距下部裂隙面 0.30 mm 处,3 mm 裂隙宽度的最大流速分别在距下部裂隙面 2.15 和 0.56 mm 处,主要是由于纵截面湍流效应的存在导致了速度场的分布规律性不强,裂隙宽度越小,则速度梯度越不明显。

### 4.3 裂隙面接触对辐射流水力特性的影响分析

4.3.1 接触面对优势水力通道的影响 由于光滑裂隙面接触区域的复杂性和随机性,文中将接触面简化为圆形<sup>[22]</sup>,接触面无水流通过。图 14 为裂隙接触面不同接触率下稳定辐射流速度场与流线分布的模拟结果。由图 14 可看出,接触面扰乱了初始形成的优势水力通道,其面积越大,主导优势水力通道的能力越高。裂隙接触率的增大提升了优势水力通道的稳定性,未完全形成的优势水力通道被接触面重新分割、分配,流线出现回绕、偏离,并随着接触面积的增大进一步固定,一部分水流沿圆形接触面外围绕流而产生了次生旋涡,类似水流绕圆柱流动<sup>[23]</sup>,进而发生二次旋涡流。惯性力驱使优势水力通道水流末端出现连续摆动现象,新生旋涡的形成诱导了裂隙面接触区域径向远端优势水力通道的进一步演化。与无接触裂隙面对比发现,接触区域破坏了自然优势水力通道,接触面积的增大使裂隙水流在瞬态辐射流出过程中进一步束窄渗流通道,尤其在 36.0% 的接触率下,旋涡的产生主要在径向流的远端,其范围和数量均有所降低,接触面重新规划水流路径,形成新的稳定优势水力通道。

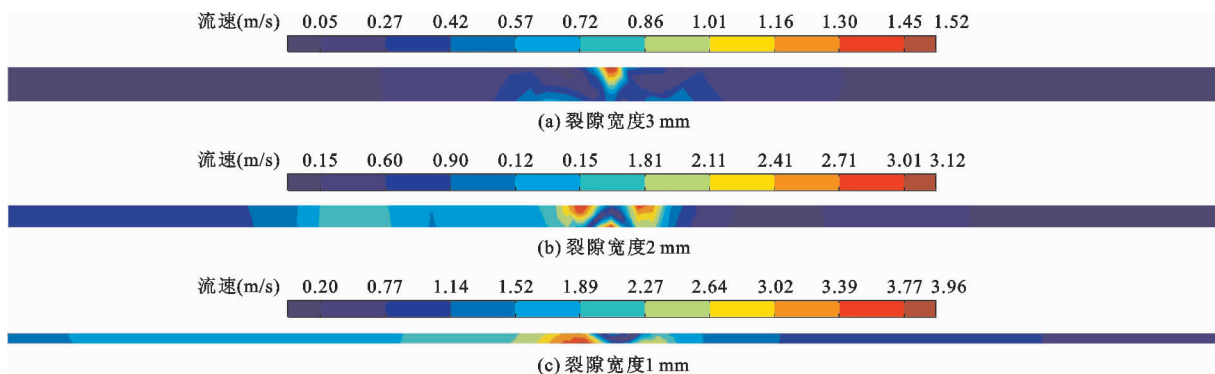


图 11 3、2、1 mm 裂隙宽度的纵截面流速等值线云图



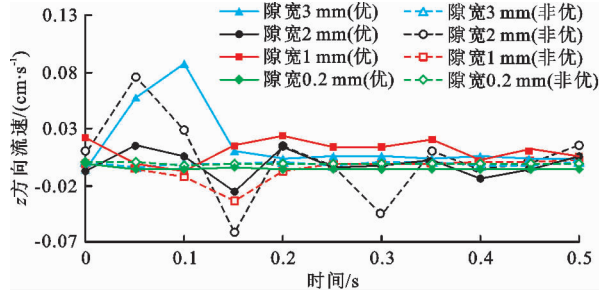
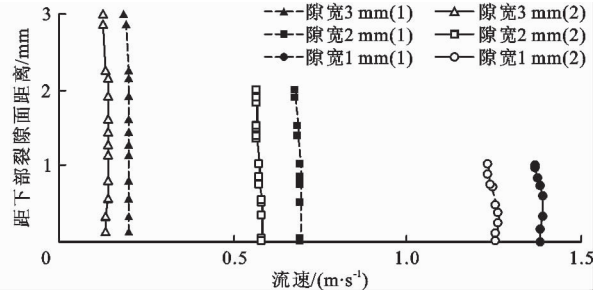
图12 不同裂隙宽度 $z$ 方向速度分量时程变化曲线

图13 不同裂隙宽度截线上速度矢量分布

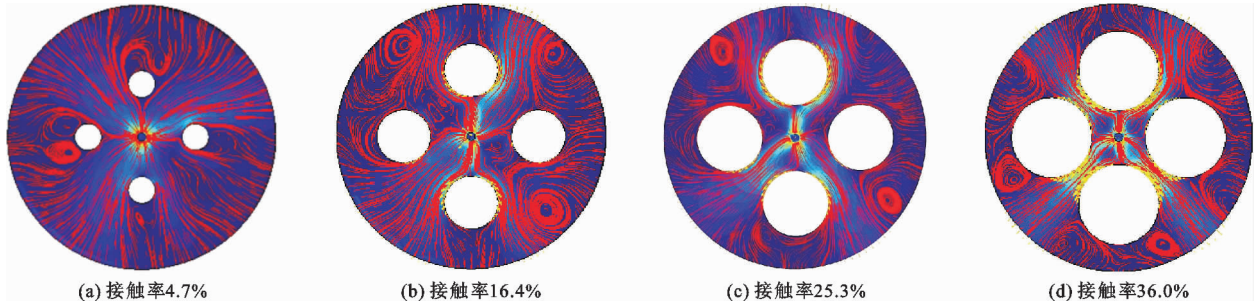


图14 裂隙接触面不同接触率下稳定辐射流速度场与流线分布

4.3.2 接触率与裂隙渗流量的关系 在模型计算边界条件为中心水压  $3 \times 10^4$  Pa、隙宽 0.2 mm 下, 计算裂隙面接触率与裂隙渗流量的关系, 结果如图 15 所示。由图 15 可看出, 裂隙面接触率从 0 增加到 36% 的过程中裂隙渗流量逐渐减小。当接触率为 0 时, 0.2 s 时刻的瞬态渗流量激增至最大值  $47.1 \text{ cm}^3/\text{s}$ , 0.2 ~ 0.3 s 之间出现突降, 降幅达 23.4%, 随着接触率的增大这一降幅逐渐减小。其主要原因在于, 自然优势水力通道初期受接触面干扰, 水流辐射流出受阻, 甚至局部产生回流, 即使形成了新的优势

水力通道, 但也在一定程度上削弱了水流辐射能力。接触率增大使非线性流动强度降低, 渗流量降幅减缓, 优势水力通道更稳定。

图 16 为不同中心水压和隙宽下接触率与渗流量关系曲线。由图 16 可看出, 在裂隙面接触率增大的过程中, 不同中心水压和裂隙宽度条件下的渗流量均表现出明显的递减趋势, 但线性程度不高, 裂隙宽度越小, 接触率对渗流量的影响程度越低, 其中裂隙宽度为 0.1 mm 时接触率对渗流量的影响程度最低; 水压越小, 接触率对渗流量的影响程度也越低。

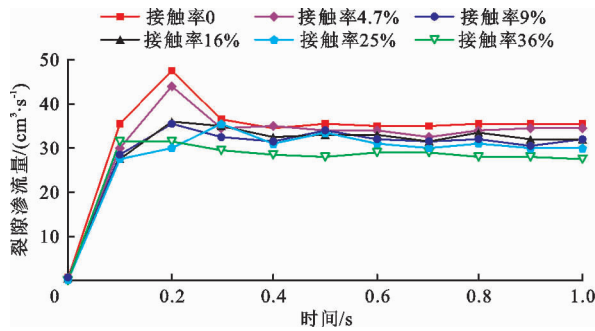


图15 裂隙面接触率与裂隙渗流量关系曲线

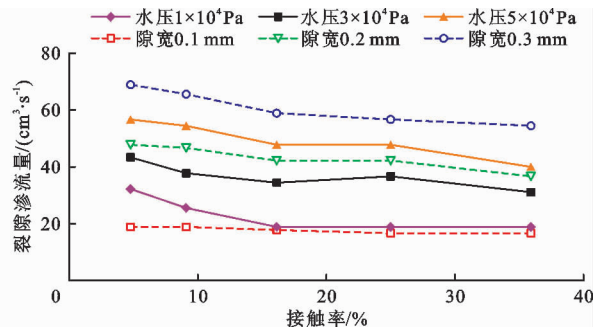


图16 不同中心水压和隙宽下接触率与渗流量关系曲线

#### 4.4 壁面滑移效应对裂隙水力特性的影响分析

裂隙面剪切滑移效应对水流产生阻碍和协助两种作用。由于隙宽较小, 剪切滑移在一定程度上削弱了水流黏滞力和惯性力的主导地位, 从而降低了其辐射能力。在瞬态时间步为 0.5 s、裂隙宽度为 0.2 mm 和中心水压为  $3 \times 10^4$  Pa 的条件下, 计算壁

面滑移速率对裂隙渗流量和截点流速的影响, 选取裂隙面内部三维截点, 设置裂隙壁面水平和垂直共 5 种滑移速率组合, 分别为: ①  $v_x = 0.5 \text{ m/s}$ ,  $v_z = 0.5 \text{ m/s}$ ; ②  $v_x = 0 \text{ m/s}$ ,  $v_z = 0 \text{ m/s}$ ; ③  $v_y = 0.5 \text{ m/s}$ ; ④  $v_x = 0.5 \text{ m/s}$ ; ⑤  $v_x = 1.0 \text{ m/s}$ , 其中  $v_x$ 、 $v_y$ 、 $v_z$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的滑移速率分量, 不同组合计算结

果如图 17 和 18 所示。分析图 17 和 18 可知,  $x$  方向滑移速率为 0.5 和 1.0 m/s 以及  $y$  方向滑移速率为 0.5 m/s 时的裂隙渗流量总体变化相对较小, 但均有波动(图 17);  $z$  方向的壁面滑移挤压效应减小了裂隙水力开度, 同时增大了流速, 导致裂隙面整体渗流量出现短暂升高, 当优势水力通道与壁面滑移方

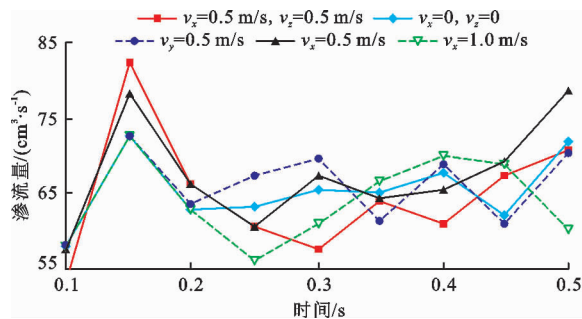


图 17 不同壁面滑移速率下裂隙渗流量时程曲线

向一致或者夹角较小时, 壁面滑移在该方向给予水流“协助”作用; 当优势水力通道与壁面滑移方向夹角较大时, 则形成“阻碍”作用, 产生纵截面方向的速度分量, 引起水流纵向波动和能量耗散, 尤其是  $x$  方向滑移速率分别在 0.5 和 1.0 m/s 时, 流速波动最大幅度约达 1.0 m/s(图 18)。

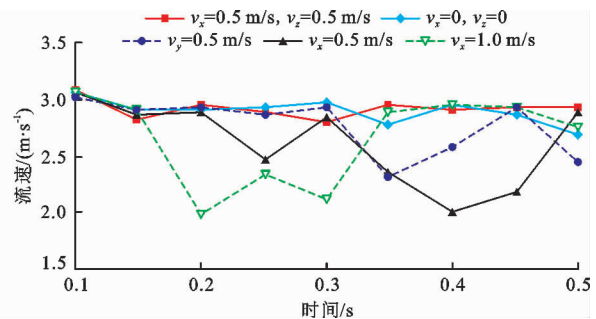


图 18 不同壁面滑移速率下裂隙截面流速时程曲线

## 5 结 论

(1) 光滑单裂隙辐射流呈现“非典型辐射流”特征, 且存在优势水力通道现象, 其形成和演化与水流辐射过程产生的瞬态水流惯性效应和旋涡效应关系密切, 同时受到辐射中心水压、裂隙宽度、裂隙接触率、壁面滑移效应等影响。

(2) 裂隙渗流量与辐射中心水压和裂隙宽度呈正相关。辐射中心水压越大, 则形成“非典型辐射流”和优势水力通道的瞬态时间越早; 距离辐射中心和优势水力通道越近, 则流速和涡流强度越大; 裂隙水流湍流效应主要以径向为主, 但随着裂隙宽度的增大, 纵向湍流效应逐渐显现, 导致水流纵截面方向振动幅度增大, 优势水力通道稳定后湍流效应逐渐削弱。

(3) 裂隙接触面对水流分布起到分割和重新分配的作用, 并诱导优势水力通道二次演化, 接触率越大, 则裂隙渗流量越小, 约束渗流通道的能力越强, 优势水力通道越稳定。

(4) 裂隙壁面滑移效应对水流产生了协助和阻碍两种作用, 水流方向与滑移方向一致或夹角较小时促进水流辐射流出, 否则会形成壁面剪切作用, 产生纵截面速度分量, 扰乱稳定的优势水力通道并引起纵向波动。壁面法向滑移挤压裂隙宽度, 会进一步提升辐射流出强度, 降低纵向湍流效应。

### 参考文献:

[1] 丁林楠. 单裂隙岩体力学和渗流特性试验研究[D]. 西

安: 西安理工大学, 2019.

- [2] 罗吉鹏, 柴军瑞, 许增光, 等. 单裂隙辐射流渗流试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(3): 211-215.
- [3] 蒙学礼, 蒙发强, 李涣森, 等. 裂隙岩体非线性渗流特性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(4): 121-125.
- [4] 王者超, 郑天, 杨金金, 等. 岩体裂隙平行流与辐射流渗流特性研究[J/OL]. 岩土力学, 2020(S2): 1-8[2021-10-12]. DOI:10.16285/j.rsm.2019.2113.
- [5] 杨金宝, 柴军瑞, 许增光, 等. 基于修正立方定律对单裂隙辐射流剪切耦合的研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(1): 217-225+231.
- [6] 曹成, 柴军瑞, 覃源, 等. 结构面破坏时单裂隙变形及渗流规律研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(9): 139-147.
- [7] ZHANG Zhenyu, NEMCIK JAN. Fluid flow regimes and nonlinear flow characteristics in deformable rock fractures[J]. Journal of Hydrology, 2013, 477(1): 139-151.
- [8] 李崑, 王者超, 毕丽平, 等. 辐射流条件下裂隙岩体渗透性表征单元体尺寸与等效渗透系数[J]. 岩土力学, 2019, 40(2): 720-727.
- [9] CAO Cheng, XU Zengguang, CHAI Junrui, et al. Mechanical and hydraulic behaviors in a single fracture with asperities crushed during shear[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18(11): 1277.
- [10] 王敏, 李铭华. 剪切条件下单裂隙细观流动特性研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(1): 79-84+127.
- [11] 胡少华, 周佳庆, 陈益峰, 等. 岩石粗糙裂隙非线性渗流特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(1): 48-56.
- [12] 高传昌, 高余鑫, 孙龙月. 基于标准  $k-\varepsilon$  紊流模型的泵站进水管路水力特性研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40

- (5):106-113.
- [13] 杜万军. 单裂隙辐射流耦合特性参数分析及数值模拟[D]. 西安:西安理工大学,2015.
- [14] LANGER S, SWANSON R C. On boundary-value problems for RANS equations and two-equation turbulence models[J]. Journal of Scientific Computing, 2020, 85(1): 20.
- [15] BASSI F, GHIDONI A, PERBELLINI A, et al. A high-order discontinuous Galerkin solver for the incompressible RANS and  $k-\varepsilon$  turbulence model equations[J]. Computers & Fluids, 2014, 98: 54-68.
- [16] 甘德清, 闫泽鹏, 薛振林, 等. 考虑壁面滑移效应的充填料浆管道输送阻力研究[J]. 金属矿山, 2020(9): 26-32.
- [17] 何丽娟, 吴心伟, 王 荻, 等. 基于 Fluent 的涡流管性能及三维强漩流流动的数值模拟[J]. 太阳能学报, 2020, 41(11): 143-148.
- [18] 李思成, 吴 迪, 崔光耀, 等. 低雷诺数沟槽表面湍流/非湍流界面特性的实验研究[J]. 力学学报, 2020, 52(6): 1632-1644.
- [19] 冯喜平, 赵胜海, 李进贤, 等. 不同湍流模型对旋涡流动的数值模拟[J]. 航空动力学报, 2011, 26(6): 1209-1214.
- [20] 张 鑫. 粗糙单裂隙渗流与岩体应力特性分析[D]. 西安:西安理工大学, 2019.
- [21] 姜谔男, 郑 帅, 申发义, 等. 不同接触状态的环向单裂隙渗透特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(S2): 529-535.
- [22] 程友良, 汪 辉, 赵洪嵩. 超临界雷诺数下旋转圆柱绕流的三维大涡[J]. 可再生能源, 2017, 35(7): 1094-1100.
- [23] TANG Yuezhaoh, WANG Yang, WANG Wanhui, et al. Analysis of the wave propagation and the flow characteristics around cylinder due to dam break water[J]. Marine Science Bulletin, 2020, 22(2): 23-35.

(上接第135页)

- [3] 陈仕明, 印经经. 复合土工膜在水库除险加固工程中的应用[J]. 中国水运(下半月), 2017, 17(12): 190-191.
- [4] 王艳丽, 刘 晶, 王永明, 等. 复合土工膜与防渗墙连接的大型剪切试验研究[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(4): 75-80.
- [5] CEN Weijun, HE Haonan, LI Dengjun. Influence of geomembrane defect on seepage property of earth-rock dams and measures of seepage control[J]. Water Resource. 2017, 37(3): 61-65.
- [6] 中华人民共和国水利部. 土工合成材料测试规程: SL 235—2012[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2012.
- [7] 徐 超, 廖星樾, 叶观宝, 等. 土工合成材料界面摩擦特性的室内剪切试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1285-1289.
- [8] 童 军, 胡 波, 龚壁卫, 等. 复合土工膜砂砾料界面摩擦特性研究[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(3): 73-76.
- [9] 杜常博. 土工格栅-尾矿复合体界面力学特性及工程应用[D]. 辽宁工程技术大学, 2020.
- [10] DEMBICKI E, ALENOWICZ J. Determination of frictional properties of geotextile[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1987, 6(4): 307-314.
- [11] 何水清, 高鹏飞. 土工合成材料层间摩擦试验研究[J]. 中国矿业, 2021, 30(S1): 385-390.
- [12] 姜海波. 土石坝坝体、坝基和水库库区土工膜防渗体力学特性及渗透系数研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2011.
- [13] 束一鸣, 吴海民, 姜晓桢. 中国水库大坝土工膜防渗技术进展[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(S1): 1-9.
- [14] 岑威钧, 温朗昇, 和浩楠. 水库工程防渗土工膜的强度、渗漏与稳定若干关键问题[J]. 应用基础与工程科学学报, 2017, 25(6): 1183-1192.
- [15] 邵 杰, 王恒诗, 单兰涛, 等. 复合土工膜在小水库防渗中的应用[J]. 中国水利, 2019, 1123(8): 44-45.
- [16] 王 琦, 臧光文. 横山水库除险加固工程的安全论证——土工膜与结构面摩擦试验[J]. 岩土力学, 2003(S1): 83-85.
- [17] 束一鸣. 我国水库大坝土工膜防渗工程进展[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5): 20-26.
- [18] 张 冬. 防渗土工膜与坝体垫层材料的接触剪切本构模型[J]. 水电能源科学, 2015, 33(11): 69-71.
- [19] 陈 丹, 王 军, 夏姝珺. 堆石坝防渗土工膜界面力学特性的直剪试验方法探索[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(1): 130-133.
- [20] 彭 凯, 殷彦高, 王国辉, 等. 土工膜在江坪河水电站工程中的应用[J]. 水力发电, 2020, 46(6): 53-56+85.