

利用强迫流示踪反演地下岩溶的空间维度

强天元 刘建刚 刘泉

(河海大学 地球科学与工程学院,南京 211100)

摘要:利用 Fluent 有限差分数值模拟软件,模拟饱水空间强迫流示踪中搅拌桨转速对示踪曲线的影响。试验结果表明:封闭岩溶洞穴流场中投源点处示踪剂浓度历时曲线转折点的出现时间随水动力条件的提升而提前,在一维岩溶洞穴中,与转折点对应的示踪剂浓度随水动力条件的提升而降低,二、三维岩溶洞穴中则会出现转折点对应的示踪剂浓度随水动力条件的提升而升高;在二、三维岩溶洞穴中,当水动力强度较小时,示踪剂运移的速率与水动力条件关系不大,且随其提升而稳定提升,当水动力强度较大时,示踪剂运移的速率则随水动力条件的提升呈非线性提升。故通过对强迫流示踪曲线形状的分析可以推断出地下岩溶洞穴的大致空间维度。

关键词:岩溶洞穴;强迫流示踪;数值模拟;示踪剂浓度历时曲线

中图分类号:P641

文献标识码:A

Estimation of the spatial dimension of underground karst cave basing on forced flow tracer experiment method

QIANG Tianyuan, LIU Jiangang, LIU quan

(School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Jiangsu Nanjing 211100, China)

Abstract: This paper discuss the numerical simulation of impeller rotational speed's impact to force flow trace experiment. Final tracer concentration duration curves indicate that the in the flow field of karst caves, the time inflection points appear on tracer concentration duration curve are brought forward as the hydrodynamic condition is promoted, and in 1D karst caves, tracer concentrate correspond to inflection points reduce along with the ascension of the hydrodynamic condition, in 2,3D karst caves, it may rise the phenomenon that tracer concentrate correspond to inflection points rise along with the ascension of the hydrodynamic. In 2,3D karst carves, when hydrodynamic intensity is small, the tracer's migration has little to do with the hydrodynamic conditions and increase steadily as the hydrodynamic conditions promote, when hydrodynamic intensity is large, tracer migration rate rise in nonlinear as the hydrodynamic conditions promote. Therefore, through the analysis of the force flow tracer curve's shape can roughly deduce the underground karst cave's spatial dimension.

Key words: karst cave; force flow trace experiment; numerical simulation; concentration duration curve

示踪剂探测法是在投源点(井、孔等)进行示踪剂投放,在其他不同的观测点(井、孔、泉水等)进行示踪剂浓度观测,从而获得投源点和接收点之间地下水介质的特征^[1-5]。强迫流示踪试验法由刘建刚等首先提出^[6-7],是对传统示踪剂探测法的改进,目前已在对地下岩溶洞穴体积的计算

中验证了其适用性。本文首次全程利用 Fluent^[8]对强迫流示踪试验进行模拟,模拟中以不同维度饱水空间代表形状不同的孤立洞穴,通过有限差分法计算强迫流示踪中水动力条件对示踪曲线形状的影响,从而获得在水动力条件改变时示踪曲线形状的变化规律。

1 强迫流示踪数值模型

1.1 几何模型

岩溶洞穴的大小及钻孔揭露洞穴的位置具有一定的随机性,本文将岩溶洞穴设计为三种维度的六面体,溶洞与钻孔位置设计如图1所示。

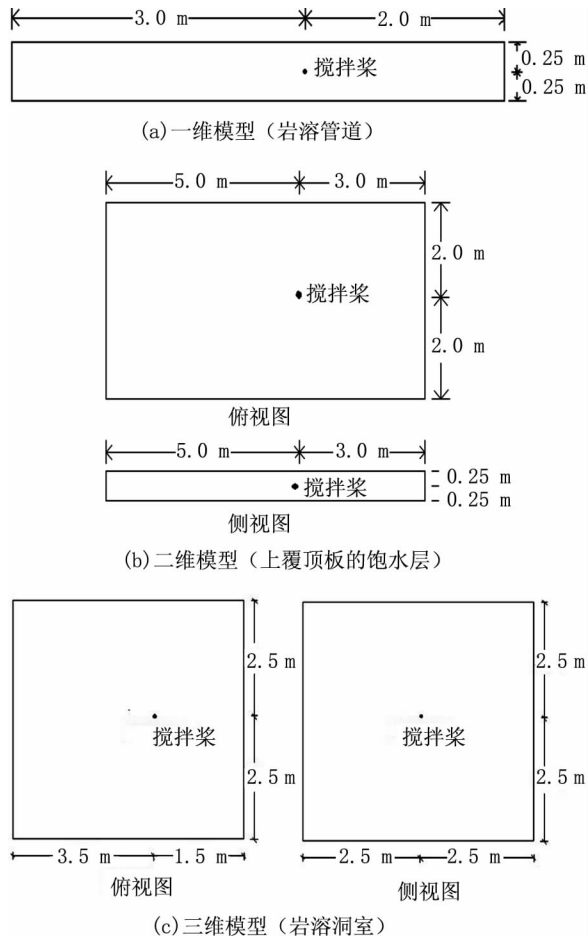


图1 模拟实验模型尺寸及搅拌桨位置的设计

Fig.1 The design of the simulation models' size and impeller position

模型中均采用直四叶搅拌桨提供强迫水流,桨叶尺寸为 $0.4\text{ m} \times 0.15\text{ m} \times 0.003\text{ m}$ 。

1.2 水动力条件

在已建立好的流场模型中,设置搅拌桨本身及其周围水体的运动状态为绕轴旋转,以模拟搅拌桨的运转,一、三维模型中设计转速为 $4 \sim 12$ 转/s(间隔为 2 转/s),二维模型中设计转速为 $2 \sim 12$ 转/s(间隔为 2 转/s)。

2 模拟结果分析

前人研究表明,示踪剂到达每个(或与投源点等距的每组)洞穴的开阔壁面后,均可使投源点的示踪剂浓度历时曲线产生一个转折点,以三维模型为例,当转速为 8 r/s 时,示踪剂浓度历时曲线如图2所示。

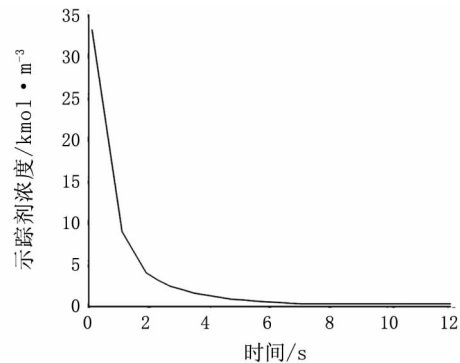
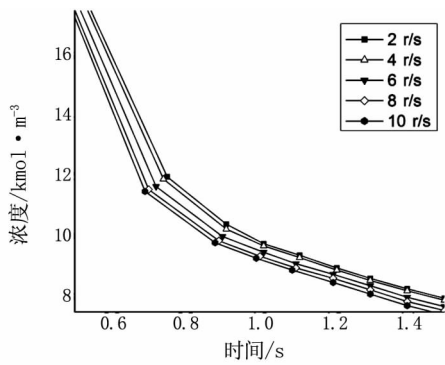


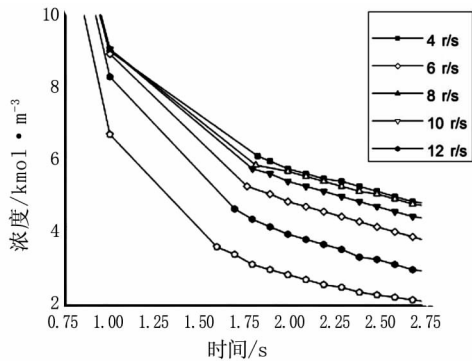
图2 转速为 8 r/s 时三维模型的示踪剂浓度历时曲线
Fig.2 3D model's tracer concentration duration curve under 8 r/s

图2表明,对该模型进行数值计算所得的浓度历时曲线,在浓度达到稳定前一共出现了两个转折点,与示踪剂到达开阔壁面后均可使投源点的示踪剂浓度历时曲线产生转折点的理论非常吻合。通过对不同搅拌桨转速下各维度的岩溶洞穴浓度场进行数值计算,得到投源点示踪剂浓度历时曲线如图3所示:

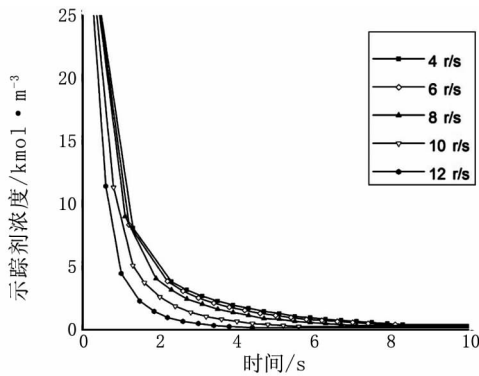
可见在一维封闭流场模型的试验组中,投源点处示踪剂浓度历时曲线的转折点出现时间随搅拌桨转速的提升而提前,相应的示踪剂浓度则随搅拌桨转速的提升而降低;在二、三维封闭流场模型的试验组中,投源点处示踪剂浓度历时曲线的第一、二转折点出现时间均随搅拌桨转速的升高而提前,转折点对应的示踪剂浓度在搅拌桨转速较低的情况下,出现随搅拌桨转速的提升而升高的现象,且在三维封闭流场模型中,该现象出现得最早;在二、三维封闭流场模型试验中,搅拌桨转速较低时,转速提升对示踪剂扩散的影响与一维封闭流场模型试验结果相近,而搅拌桨转速较高时,搅拌桨转速的提升对示踪剂扩散影响越发显著。以上对应关系说明在强迫流示踪试验组中对曲线组之间的形状差异、转折点的出现规律进行综合分析是可以反演出封闭流场模型的空间维度的。



(a) 一维流场模型中投源点示踪剂浓度历时曲线集合



(b) 二维流场模型中投源点示踪剂浓度历时曲线集合(局部)



(c) 三维流场模型中投源点示踪剂浓度历时曲线集合

图3 不同搅拌桨转速下各维度模型中投源点的示踪剂浓度历时曲线集合

Fig.3 Tracer concentration duration curves under different impeller speed

就越短,对应的投源点示踪剂浓度就越大,但在较高转速条件下,示踪剂到达壁面时对应的投源点示踪剂浓度会随搅拌桨转速的提升而降低。

2) 当饱水岩溶洞穴内的搅拌桨转速较低时,示踪剂运移速率与搅拌桨转速关系不大,示踪剂扩散的主要方式是自由扩散,而一旦搅拌桨提供的射流速度超过示踪剂的自由扩散速率,示踪剂运移速率就会随搅拌桨转速的提升而显著提升(前提是强迫水流受壁面阻挡影响较小,如在二、三维流场中)。

3) 通过对地下岩溶洞穴进行多次强迫流示踪试验,并对所得试验曲线组直间的形状差异、转折点出现规律的综合分析可大致反推出地下岩溶洞穴的空间维度。

参考文献:

[1] 杨立铮,刘俊业. 试用示踪剂浓度-时间曲线分析岩溶管道的结构特征[J]. 成都地质学院学报,1979(4):44-49.

[2] 梅正星. 用示踪曲线分析岩溶通道的展布[J]. 工程勘察,1988(1):36-38.

[3] 张祯武. 岩溶地下水管流场类型与示踪曲线对应关系的研究[J]. 工程勘察,1991(1):211-219.

[4] 张祯武,吕文星. 岩溶水管流场与分散流场示踪识别研究[J]. 工程勘察,1997(3):42-45.

[5] 刘建刚,陈建生,陈亮. 综合示踪方法探测复杂堤基渗流[J]. 地质与勘探,2002,38(2):94-96.

[6] 刘建刚,余鹏. 岩溶洞穴的强迫流示踪实验模型与数值模拟[J]. 应用基础与工程科学学报,2013,21(2):307-316.

[7] 刘建刚,王伟. 连通双岩溶洞穴系统强迫流示踪实验与洞穴体积计算方法[J]. 应用基础与工程科学学报,2015,23(3):431-438.

[8] 滕丽娟,张志伟,武燕蕾. 湍流模型下双柱绕流升阻力系数数值模拟[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2009,26(2):51-54.

(责任编辑 王利君)

3 结论

1) 搅拌桨转速越大,示踪剂到达壁面的时间