



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 118190347 B

(45) 授权公告日 2024. 11. 26

(21) 申请号 202410401196.9

(22) 申请日 2024.04.03

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 118190347 A

(43) 申请公布日 2024.06.14

(73) 专利权人 中国科学院力学研究所  
地址 100190 北京市海淀区北四环西路15号

(72) 发明人 袁泉子 秦翰 黄先富 赵亚溥

(74) 专利代理机构 北京科迪生专利代理有限公司 11251  
专利代理师 李薇

(51) Int. Cl.

G01M 10/00 (2006.01)

G01N 15/08 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 115684112 A, 2023.02.03

CN 115932321 A, 2023.04.07

审查员 陈琳

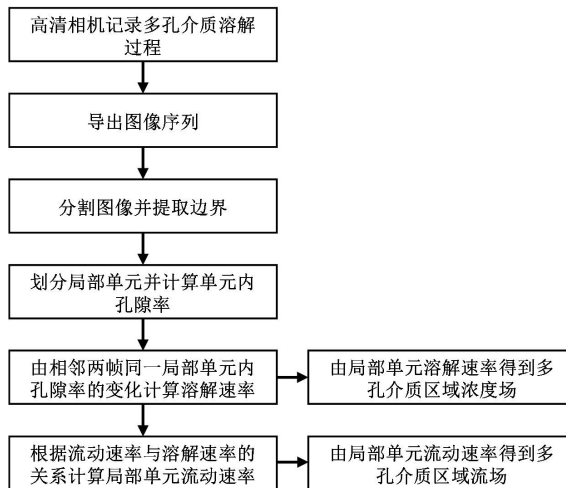
权利要求书1页 说明书4页 附图2页

(54) 发明名称

一种二维多孔介质溶解时流场和浓度场观测装置和方法

(57) 摘要

本发明提供一种二维多孔介质溶解时流场和浓度场观测装置和方法,属于微纳测量技术领域,采用高清CCD相机记录溶解过程;将拍摄的溶解过程视频导出为图像序列,将每一帧图像分割为等量等大小的若干局部单元,提取这些局部单元的固体部分形貌,根据物理公式计算出溶解过程中局部孔隙率的变化,得到孔隙率分布;根据局部单元孔隙率和内部固体部分形貌的变化,由数学公式计算出局部溶解速率,得到溶解速率分布;再由溶解速率与流动速率的物理关系计算出局部单元流动速率,得到流动速率分布;根据溶解速率和流动速率的分布,得到相应的浓度场和流场,实现对溶解过程中流场和浓度场的测量。本发明节约了实验成本,降低了实验难度。



1. 一种二维多孔介质溶解时流场和浓度场观测方法,其特征在于,使用二维多孔介质溶解时流场和浓度场观测装置进行观测,观测装置包括:多孔介质材料、注射泵、高清CCD相机、同轴光源、控制主机、液体输送软管;所述多孔介质材料包括微流控芯片及其内部多孔介质区域;所述同轴光源位于所述多孔介质区域的正上方;所述高清CCD相机位于所述同轴光源的正上方;所述注射泵与所述液体输送软管的一侧连接,所述液体输送软管的另外一侧与所述多孔介质材料的一端连接;所述高清CCD相机与注射泵和所述控制主机连接;所述控制主机位于所述高清CCD相机的一侧,用于控制相机拍摄参数和存储拍摄视频,以及控制所述注射泵的注入流量与注入速率;所述液体输送软管位于所述多孔介质材料和注射泵之间,用于将所述注射泵中的液体输送到所述多孔介质材料中;观测方法包括如下步骤:

步骤1、使用高清CCD相机记录多孔介质溶解过程,并将拍摄视频导出为图像序列,根据图像的比例尺计算出每张图片中每个像素点的大小;

步骤2、将图像序列中的每一帧图像进行分割,每帧图像中的多孔介质区域划被分为等量等大小的若干个局部单元,局部单元面积为 $S$ ;

步骤3、对于每个局部单元,提取出局部单元内部的固体部分,由像素点数量计算出固体部分边界长度 $l_s$ 和固体部分面积 $a_s$ ;

步骤4、根据图像中局部单元内的固体部分面积,计算出局部单元的孔隙率 $\varepsilon = (S - a_s) / S$ ,用同样的方式计算出所有局部单元的孔隙率,从而得到整个多孔介质区域内孔隙率的分布情况;

步骤5、根据所述图像序列中相邻两帧图像同一局部单元内固体部分面积的变化,计算出局部单元的溶解速率 $v_s = 2(a_s^i - a_s^{i+1}) / t(l_s^i + l_s^{i+1})$ ,其中 $i$ 表示图像序列中的第 $i$ 帧, $t$ 表示相邻两帧的时间间隔,用同样的方式计算出所有局部单元的溶解速率,从而得到整个多孔介质区域内的溶解速率分布情况,进而得到浓度场;

根据局部单元内的溶解速率 $v_s$ ,以及溶解速率与流动速率间的关系 $v_f = \alpha \sqrt{v_s}$ ,得到局部单元内的流动速率,用同样的方式计算出所有局部单元内的流动速率,从而得到整个多孔介质区域内流动速率的分布情况,进而得到流场;其中, $\alpha$ 为溶解常数,通过实验测出。

## 一种二维多孔介质溶解时流场和浓度场观测装置和方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于微纳测量技术、流场可视化领域,具体涉及一种二维多孔介质溶解时流场和浓度场观测装置和方法。

### 背景技术

[0002] 在流体力学、化学工程、环境科学、生物医学等领域,流体的行为和物质的传输是许多自然和工业过程的核心。例如,在航空航天领域,了解飞行器周围的气流模式对于设计更高效、更稳定的飞行器至关重要。在化工生产过程中,监控和控制反应器内的浓度分布可以确保产品质量和生产安全。在环境科学中,追踪和预测污染物在大气或水体中的扩散路径对于环境保护和污染治理具有指导意义。

[0003] 流场和浓度场可视化技术的发展为这些领域提供了强大的工具。通过可视化技术,研究人员可以直观地观察流体流动的路径、速度和压力分布,以及物质在流体中的扩散、混合和反应过程。这种直观的信息有助于他们更好地理解流体动力学原理,发现新的现象和规律,并据此优化设计方案、改进工艺流程或制定更有效的控制策略。

[0004] 传统的流场可视化方法包括烟线、染料注入、油膜和粒子图像测速(PIV)等,这些技术通过引入可见标记物或粒子来观察流体流动的模式。这些方法的主要优势在于直观性强,能够直接观察到流动的路径和结构。然而,它们属于接触式测量,对流场本身有一定影响,且难以实现实时连续监测(CN117451316A、CN115943881A)。现代流场可视化技术则趋向于使用光学方法,如激光诱导荧光(LIF)、激光多普勒测速(LDV)和全息技术。这些方法可以提供三维流场的详细信息,并能够实现非接触式测量,降低了对流体流动的干扰,但是对于有颗粒的流动测量效果不理想。特别是PIV和LDV技术,它们能够提供流速场的矢量信息,但成本较高,且对实验条件有特定要求。在浓度场测量方面,传统方法如滴定法和光谱吸收法因操作简便、成本低廉而被广泛应用。滴定法通过化学反应的终点来确定溶液中特定成分的浓度,而光谱吸收法则依据物质对特定波长光的吸收程度来进行测量。这些方法虽然实用,但是它们往往只能提供瞬时的或局部的浓度信息,且对某些物质的检测灵敏度有限。现代浓度场测量技术,如质谱法、电化学传感器和光学方法(包括拉曼光谱、荧光光谱和光纤传感器),提供了更高的灵敏度和选择性。质谱法能够准确地识别和定量多种组分,而电化学传感器则适用于快速检测和连续监测。光学方法则因其非侵入性和能够提供实时数据而备受青睐。尽管如此,这些技术可能需要专业的设备和训练,且在复杂的流体环境中可能会受到干扰(CN1043786A、CN1478927A)。此外,目前还没有方法能够实现对流场和浓度场非接触式的同时测量。因此,针对上述技术问题,如何研发一种二维多孔介质中复杂流动溶解过程的流场和浓度场测量的装置和方法,具有重要的现实意义。

### 发明内容

[0005] 针对现有技术中存在的问题,本发明提供一种二维多孔介质溶解时流场和浓度场观测装置和方法,该方法通过图像序列,将观测区域划分为多个局部单元,计算出相应的流

场和浓度场,该观测方法为非接触式测量,操作便捷,成本低廉。

[0006] 为达到上述目的,本发明采取的技术方案为:

[0007] 一种二维多孔介质溶解时流场和浓度场观测装置,包括:多孔介质材料、注射泵、高清CCD相机、同轴光源、控制主机、液体输送软管;所述多孔介质材料包括微流控芯片及其内部多孔介质区域;所述同轴光源位于所述多孔介质区域的正上方;所述高清CCD相机位于所述同轴光源的正上方;所述注射泵与所述液体输送软管的一侧连接,所述液体输送软管的另外一侧与所述多孔介质材料的一端连接;所述高清CCD相机与注射泵和所述控制主机连接;所述控制主机位于所述高清CCD相机的一侧,用于控制相机拍摄参数和存储拍摄视频,以及控制所述注射泵的注入流量与注入速率;所述液体输送软管位于所述多孔介质材料和注射泵之间,用于将所述注射泵中的液体输送到所述多孔介质材料中。

[0008] 本发明还提供一种二维多孔介质溶解时流场和浓度场观测方法,包括如下步骤:

[0009] 步骤1、使用高清CCD相机记录多孔介质溶解过程,并将拍摄视频导出为图像序列,根据图像的比例尺计算出每张图片中每个像素点的大小;

[0010] 步骤2、将图像序列中的每一帧图像进行分割,每帧图像中的多孔介质区域划被分为等量等大小的若干个局部单元,局部单元面积为 $S$ ;

[0011] 步骤3、对于每个局部单元,提取出局部单元内部的固体部分,由像素点数量计算出固体部分边界长度 $l_s$ 和固体部分面积 $a_s$ ;

[0012] 步骤4、根据图像中局部单元内的固体部分面积,计算出局部单元的孔隙率 $\varepsilon = (S - a_s) / S$ ,用同样的方式计算出所有局部单元的孔隙率,从而得到整个多孔介质区域内孔隙率的分布情况;

[0013] 步骤5、根据所述图像序列中相邻两帧图像同一局部单元内固体部分面积的变化,计算出局部单元的溶解速率 $v_s = 2(a_s^i - a_s^{i+1}) / t(l_s^i + l_s^{i+1})$ ,其中 $i$ 表示图像序列中的第 $i$ 帧, $t$ 表示相邻两帧的时间间隔,用同样的方式计算出所有局部单元的溶解速率,从而得到整个多孔介质区域内的溶解速率分布情况,进而得到浓度场;

[0014] 根据局部单元内的溶解速率 $v_s$ ,以及溶解速率与流动速率间的关系 $v_f = \alpha \sqrt{v_s}$ ,得到局部单元内的流动速率,用同样的方式计算出所有局部单元内的流动速率,从而得到整个多孔介质区域内流动速率的分布情况,进而得到流场;其中, $\alpha$ 为溶解常数,通过实验测出。

[0015] 与现有技术相比,本发明的有益效果为:

[0016] 本发明利用高清CCD相机记录局部单元内的变化,根据孔隙率、溶解速率以及流动速率间的关系计算得到流场和浓度场。

[0017] 首先,该方法操能够实现对一个区域内流场和浓度场的同时测量;其次操作便捷成本低廉,仅需使用高清相机清晰记录溶解过程即可,不需要示踪粒子、激光器、电化学传感器等操作复杂、价格高昂的材料和设备;再次,该方法在不接触流体和流场的情况下,完成了多孔介质中复杂流动溶解过程的流场和浓度场测量,准确性更高。

### 附图说明

[0018] 为了更加清晰地说明或现有技术中的技术方案,下面将对实施例或现有技术描述中所需使用的附图作简单介绍。

[0019] 图1为本发明中的一种二维多孔介质溶解时流场和浓度场观测装置示意图。

[0020] 其中,1、高清CCD相机;2、同轴光源;3、多孔介质材料;4、注射泵;5、控制主机;6、液体输送软管。

[0021] 图2为本发明中多孔介质材料发生溶解时,同一局部区域相邻两帧的变化示意图。

[0022] 其中,a表示多孔介质区域,b和c表示所述多孔介质区域中某一部分的示意图,b1-b7表示七个毗陵的局部单元,浅色的六边形区域表示所述局部单元的范围,每个局部单元中的深色部分表示固体部分。

[0023] 图3为本发明的一种二维多孔介质溶解时流场和浓度场观测方法的流程图。

### 具体实施方式

[0024] 现结合附图对本发明的具体实施方式作进一步说明。

[0025] 实施例1

[0026] 如图1所示,本发明涉及的一种二维多孔介质溶解时流场和浓度场观测装置包括高清CCD相机1、同轴光源2、注射泵4、多孔介质材料3、控制主机5、液体输送软管6。

[0027] 所述多孔介质材料3包括微流控芯片以及多孔介质区域,所述多孔介质区域位于微流控芯片内部;

[0028] 所述注射泵4将溶液注入到所述多孔介质材料3中,使多孔介质区域发生溶解;

[0029] 所述同轴光源2位于所述多孔介质区域的正上方;

[0030] 所述高清CCD相机1位于所述同轴光源2的正上方,用于记录所述多孔介质区域的溶解过程;

[0031] 所述控制主机5位于所述高清CCD相机1左侧,用于控制相机拍摄参数和存储拍摄视频,以及控制所述注射泵4的注入流量与注入速率;

[0032] 所述液体输送软管6位于所述多孔介质材料3和注射泵4之间,用于将所述注射泵4中的液体输送到所述多孔介质材料3中。

[0033] 使用高清CCD相机1记录多孔介质区域的溶解过程,将记录视频导出成图像序列。

[0034] 所述图像序列中,每张图像划分为同样数量同样大小的若干局部单元,局部单元面积为 $S$ 。

[0035] 所述局部单元中,固体部分以及流体区域被分割提取,并计算出相应区域的边界长度 $l_s$ 和固体部分面积 $a_s$ 。

[0036] 所述局部单元的孔隙率可以根据局部单元中流体区域的面积与局部单元面积的比值得到 $\varepsilon = (S - a_s) / S$ 。

[0037] 如图2所示为所述多孔介质区域中某一局部区域在溶解过程中的相邻两帧示意图。其中,a表示多孔介质区域,b和c表示所述多孔介质区域中某一部分的示意图,b1-b7表示七个毗陵的局部单元,浅色的六边形区域表示所述局部单元的范围,每个局部单元中的深色部分表示固体部分。虚线表示溶液流动方向。

[0038] 根据所述图像序列中相邻两帧图像同一局部单元内流体部分区域和固体部分区域的变化,可以计算出所述局部单元内的溶解速率 $v_s = 2(a_s^i - a_s^{i+1}) / t(l_s^i + l_s^{i+1})$ ,其中 $i$ 表示图像序列中的第 $i$ 帧, $t$ 表示相邻两帧的时间间隔,由此可以得到所述多孔介质区域的溶解速率分布。

[0039] 所述局部单元内的溶解速率以及流动速率 $v_f$ 和溶解速率的关系 $v_f = \alpha \sqrt{v_s}$ ,可以计算出所述局部单元内的速率分布。最后根据若干局部单元内的所述流动速率和所述反应速率,可以得到整个所述多孔介质区域的流场和浓度场。其中 $\alpha$ 为溶解常数,可通过实验测出。

[0040] 实施例2

[0041] 如图3所示,本发明的一种二维多孔介质溶解时流场和浓度场观测方法包括如下步骤:

[0042] 步骤1、溶解过程记录:使用高清CCD相机1(4K)记录多孔介质区域(10\*5毫米)溶解过程,并导出溶解过程中的图像序列;

[0043] 步骤2、将图像中的多孔介质区(10\*5毫米)域划分为若干个局部单元(边长160微米的正六边形,也可以是其他形状),经过后处理,分割出局部单元的固体部分,提取所述固体部分的边界和形貌,计算出所述固体部分的边界长度 $l_s$ 和固体部分面积 $a_s$ ;

[0044] 步骤3、根据所述局部单元内的固体部分面积,计算出局部单元的孔隙率 $\epsilon$ ,从而得到整个所述多孔介质区域内孔隙率的分布情况;

[0045] 步骤4、如图2所示,根据相邻两帧图像中同一局部单元内固体部分面积的变化,计算出所述局部单元的溶解速率 $v_s = 2(a_s^i - a_s^{i+1}) / t(l_s^i + l_s^{i+1})$ ,其中 $i$ 表示图像序列中的第 $i$ 帧, $t$ 表示相邻两帧的时间间隔,从而得到整个所述多孔介质区域内的溶解速率分布情况,既浓度场;

[0046] 根据所述局部单元内的溶解速率 $v_s$ ,以及溶解速率与流动速率间的关系 $v_f = \alpha \sqrt{v_s}$ ,可以得到所述局部单元内的流动速率,从而得到整个所述多孔介质区域内流动速率的分布情况,既流场。

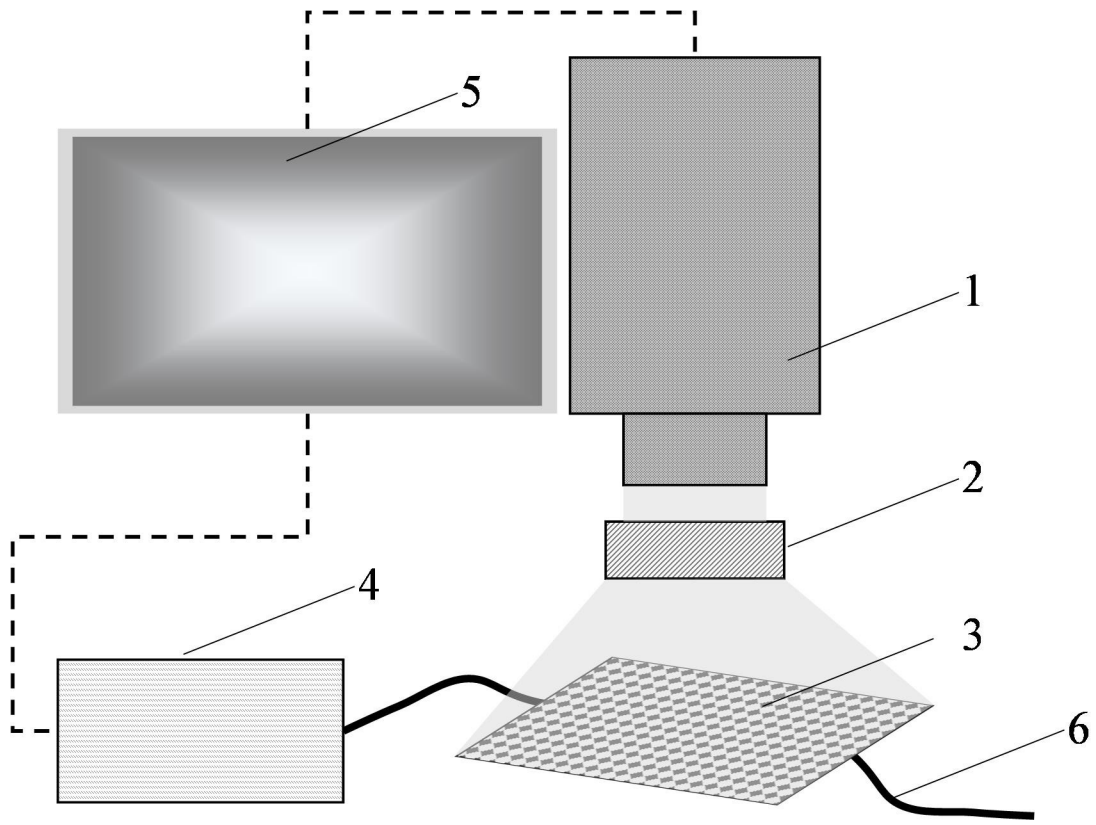


图1

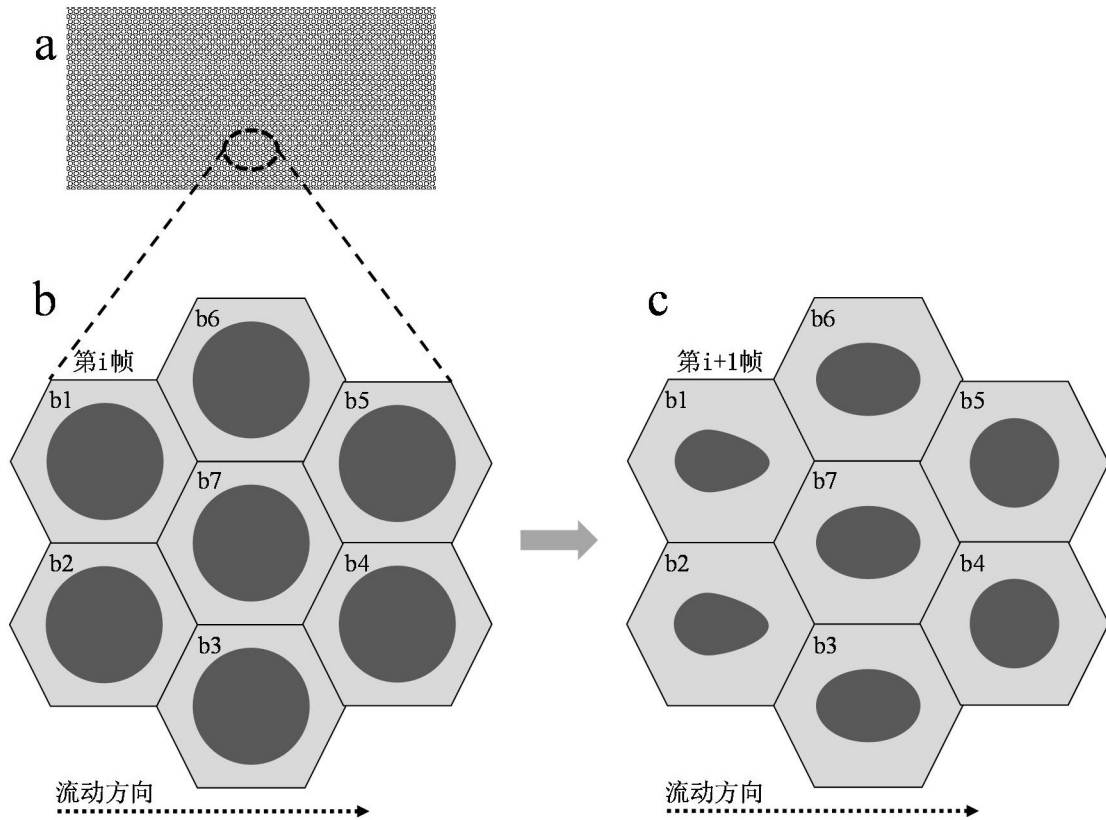


图2

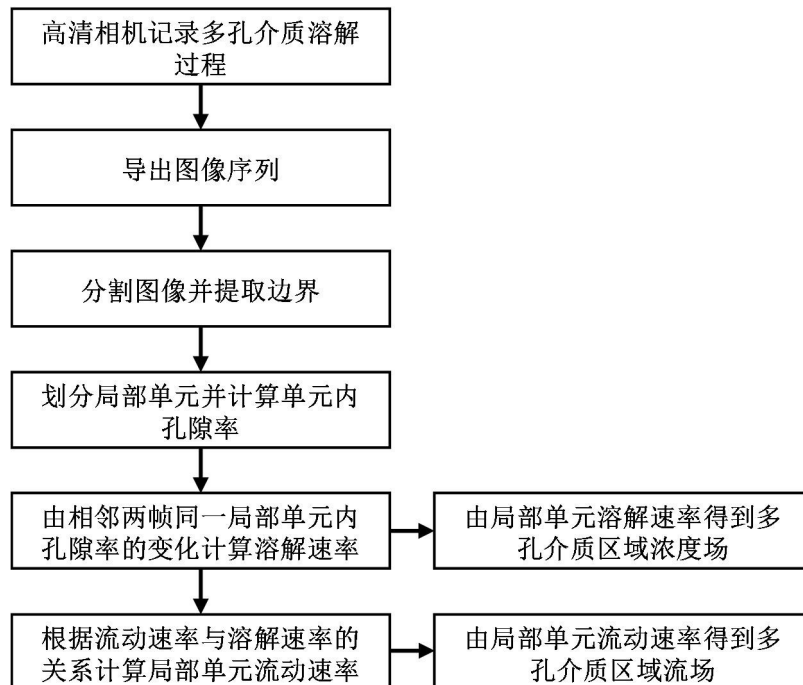


图3