

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.08.012

一种基于 PDMS 的微型空气取水装置研究*

王贝贝, 李 爻, 李松晶*

(哈尔滨工业大学 流体控制及自动化实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:为解决日益恶化的全球淡水危机及干旱环境中紧急用水等问题,将具有灵活表面化学性质、低渗水率和高导电性等特性的聚二甲基硅氧烷(PDMS)技术应用到空气取水装置中,设计了一种基于 PDMS 的微型空气取水装置。开展了该微型空气取水装置的结构与工作原理的研究,建立了微型空气取水装置的有限元流场分析模型,进而对空气取水装置的取水效率进行了仿真。利用 PI 电热膜加热对空气取水装置的取水效果进行了测试。实验结果表明,所制作的空气取水装置在 10 min 的解吸附时间内可以产水 0.2 ml,能够从常温常压的空气中取水,验证了该微型空气取水装置的可行性。

关键词:空气取水装置;聚二甲基硅氧烷;微流道;微型

中图分类号:TU991.1;TH702

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)08-1075-05

Micro atmospheric water generator based on PDMS

WANG Bei-bei, LI Yao, LI Song-jing

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to solve the problems of global fresh water crisis and getting water from dry surroundings, the technology of polydimethylsiloxane (PDMS), a kind of material with certain facial chemical properties, low water permeability, high electrical conductivity and other physical and chemical properties was applied to design a diminutive microfluidic atmospheric water generator which is mainly made of PDMS. Researches about the structure and the working principle of the atmospheric water generator was promoted, the finite element analysis model to simulate the fluid field of the producing process as well as the productivity of the device was built. The performance of the water generator was tested using the PI electric heating film. The experimental results indicate that the device fabricated is able to produce 0.2 ml water in ten minutes during the desorption period, capable of getting water from the air in normal temperature and pressure. Thus the feasibility of the micro atmospheric water generator is verified.

Key words: atmospheric water generator; polydimethylsiloxane (PDMS); microfluidic channels; micro

0 引 言

在干旱或不易于获得淡水的地区,直接从空气中生成淡水是获得淡水资源的重要手段之一。现有的空气取水装置可以分为两种类型^[1]:冷却结露式^[2-3]和吸附解吸式^[4-5]。

加拿大不列颠哥伦比亚省基隆拿 Element Four 公司生产的一种新型冷却结露式家用空气取水机“水

磨”可以从户外空气中转换出一定量淡水资源。但由于冷却结露式空气取水装置结构复杂体积庞大,只适用于日常应用中的固定取水场合,并且冷却结露式取水装置的取水效率以及产水量的都受到一定限制,其发展远不如吸附解吸式。Hu 等人设计了一种基于 PDMS 和微观亲水金属球的吸附解吸式空气取水装置,实验表明在金属球表面能够生成大量的小水滴。聚二甲基硅氧烷 PDMS 是一种有着弹性、透明、灵活的

收稿日期:2015-04-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175101)

作者简介:王贝贝(1992-),女,安徽蚌埠人,主要从事流场分析、微流体方面的研究。E-mail:bsheryl@163.com

通信联系人:李松晶,女,教授,博士生导师。E-mail:lisongjing@hit.edu.cn.

表面化学性质,低渗水率和高导电性等优异物化特性的柔和聚合物^[6]。

本研究在 PDMS 应用的基础上,采用吸附效果更佳的吸附材料,设计一种微型便携式取水装置,适用于野外生存和紧急救生等场合。

1 空气取水装置的结构及工作原理

本研究所设计微型空气取水装置结构图如图 1 所示。装置包括:微流道膜,吸湿材料,平膜,PI 电热膜,单向阀,收集槽以及电源等几部分。装置中微流道膜由 PDMS 制成,包含有空腔和微流道。

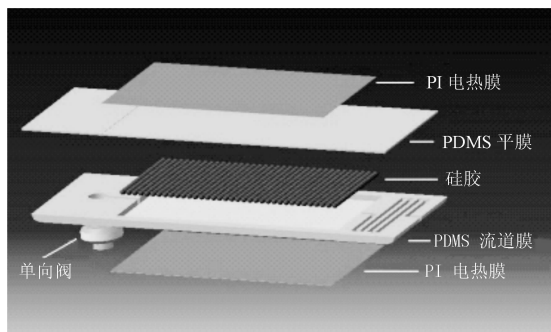


图 1 空气取水装置的结构图

吸湿材料选用有机高分子类吸湿材料,并对其中的分子筛、硅胶和氧化铝 3 种材料的吸湿性能进行了测试如图 2 所示。经过比较得出,硅胶是目前研究的吸附剂中最适宜应用于吸附解吸式空气取水的吸湿材料。水蒸汽在微流道膜上的微流道内冷凝成水滴,并沿着微流道流出。平膜由 PDMS 薄膜材料加工而成,用来与微流道膜形成密闭的空腔并使吸湿材料能够从空气中吸收水。PI 电热膜($6\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$)用来在解吸附过程中加热硅胶。单向阀用来限制水和空气的流动方向。

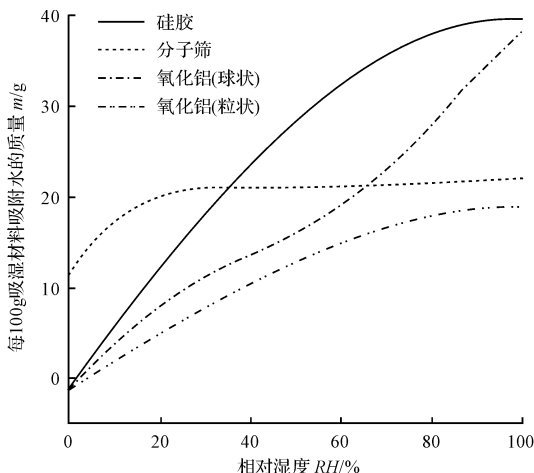


图 2 分子筛、硅胶和氧化铝吸湿性能比较

1.1 吸湿材料

本研究所采用的吸湿材料为硅胶,是一种结构仿

似硬海绵的高度多孔固体吸附材料。

硅胶的表面如图 3 所示。

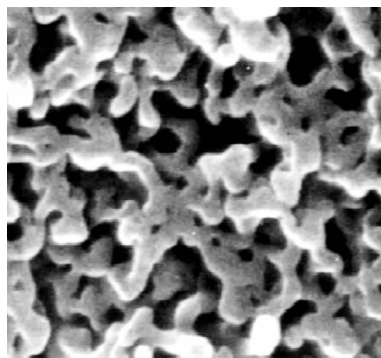


图 3 硅胶的表面

它具有由无数微尺度孔洞形成的巨大内表面积和一个能够提供连接内部微尺度孔洞与材料外表面通道的毛细管道系统。

硅胶的吸附特性可以从图 2 中得出。吸水量在相对湿度到达 60% 以前基本随其线性增加,之后吸水量缓慢增长直到相对湿度达到 100% 时保持稳定在 40% 左右。在绝大多数非干旱情况下大气相对湿度在 30% ~ 100% 之间,这说明硅胶在例如大气这样的环境中具有相对优良的吸水性能。

当具有较高相对湿度的气流经过硅胶时,水汽将被硅胶从气流中吸收。但是当硅胶被加热时,水分将从硅胶中解吸附出来并汇入气流中。当硅胶被加热到 373.15 K 时所含水的质量将小于 3%。^[7]在正常情况下,硅胶不能完成其他物质的吸附和解吸附转化,故而溶于水的物质将不能存在于被吸附的水中,并且将会在解吸附时被排除掉。这些性质使得硅胶成为可以提供直接饮用淡水空气取水装置的合适材料。

1.2 PDMS

PDMS 是一种有着弹性、透明、灵活的表面化学性质,低渗水率和高导电性等优异物化特性的柔和聚合物。PDMS 的性能使其成为微型化多层微流道系统和生物研究的理想平台。单层和多层的微流道系统都是直接由 PDMS 合成而来的,需要设施包括搅拌器,气动开关和阀,以及光学元件。生物学上基于 PDMS 的微型设备用途包括免疫分析,蛋白质和 DNA 的分离以及细胞的分类和操纵^[8]。由于本身的黏附性较好,刻有微结构的 PDMS 基片可以与同种材质或多种不同材质的盖片例如硅、玻璃,实现可逆或不可逆封接;固态 PDMS 透明性好而能与其他微流体检测装置想兼容,便于肉眼观测;因为其无毒,透气性高、生物兼容性好,制作工艺简单、材料及加工成本低,可批量生产,而适用于本空气取水装置。

1.3 工作原理

装置工作原理、空气取水装置结构图如图 4、图 5 所示。

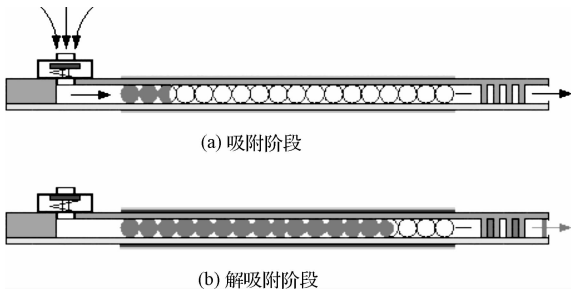


图 4 工作原理

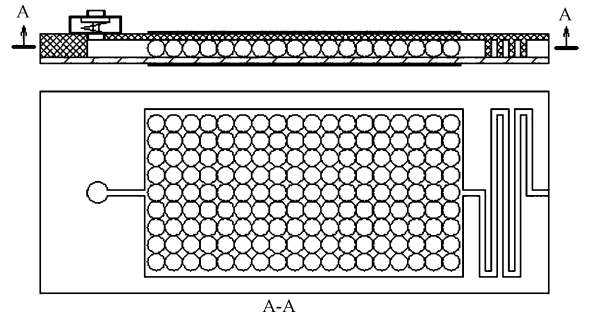


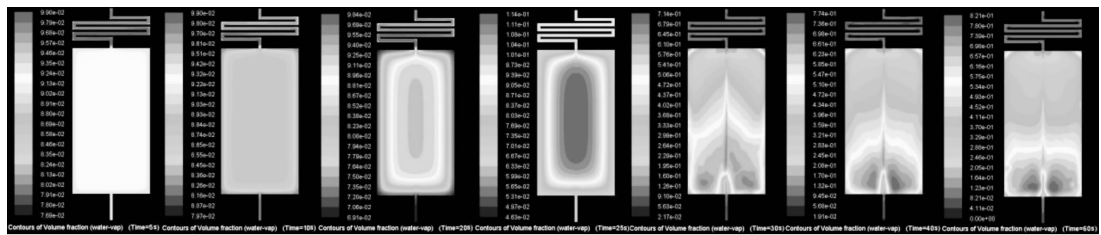
图 5 空气取水装置结构图

在吸附阶段,气流经单向阀进入空气取水装置中,气流中的水蒸汽被硅胶吸收。在解吸附阶段,硅胶被 PI 电热膜加热并释放出水蒸汽。水蒸汽在微流道中被冷凝成液滴,同时由于热空气的膨胀,液滴被压出流道^[9]。

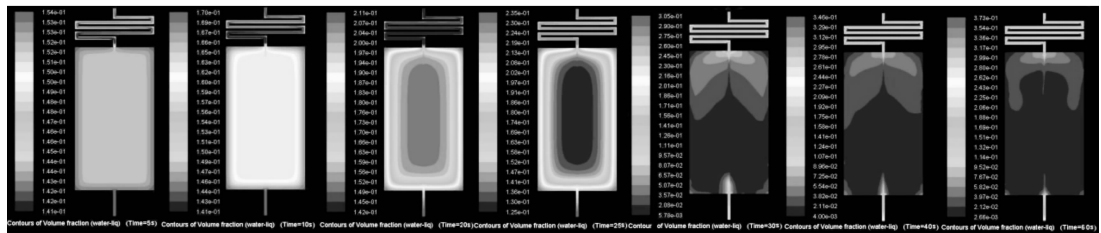
2 空气取水装置的仿真分析

为分析本研究空气取水装置的工作特性,笔者选

择用有限元分析方法对取水装置的吸附和解吸附过程进行仿真。本研究建立 3D 模型并选用在中间横截面(图 5 中的面 A-A)上的液态水与水蒸汽的体积分数作为分析变量。仿真分析结果如图 6 所示。在解吸附过程的最初 25 s,吸附腔内水蒸汽的体积分数是增长的。之后从 30 s~60 s,随着水蒸汽逐渐在微流体管道中被冷凝成液滴,吸附腔内水蒸汽体积分数减少。整个解吸附过程中,在吸附腔内的液态水体积分数不断减少而在微流道中液态水体积分数则是一直增加的。



(a) 解吸附阶段 5 s、10 s、25 s、30 s、40 s 及 60 s 时水蒸气体积分数等势线



(b) 解吸附阶段 5 s、10 s、25 s、30 s、40 s 及 60 s 时液态水体积分数等势线

图 6 仿真分析结果

计算出出口处液态水流速,并由式(1)可知,解吸附过程中空气取水装置的取水流量为 0.027 5 g/min:

$$q_m = \sum_s \rho \cdot v_n \cdot A \quad (1)$$

式中: q_m —流量, g/min; ρ —密度, g/ml; v_n —流速, mm/min; A —面积, mm^2 。

3 空气取水装置的试验

3.1 空气取水装置的制备

利用 PDMS 材料的特性,本研究使用软刻蚀技术对空气取水装置进行加工,软刻蚀技术简图如图 7 所

示。另外一种常用的微流道系统加工办法是多层堆积 3D 打印技术^[10-11]。

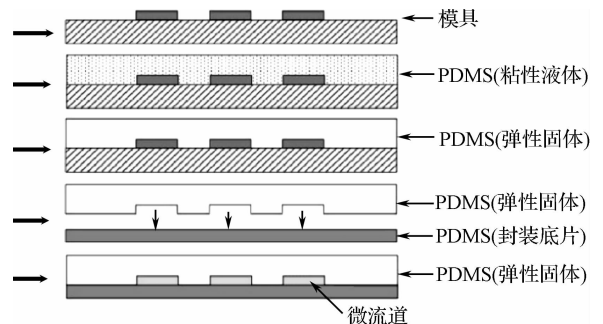


图 7 软刻蚀技术简图

3.1.1 制模

获取模具的一种常用方法是使用具有高分辨率的玻璃作为光掩膜的刻蚀技术。

3.1.2 刻蚀

利用软印法进行 PDMS 微流控芯片的微加工过程是这样的,首先是设计出 PDMS 微流控芯片的结构,其次是加工出符合设计要求的模具 (Master), 然后是利用复模法得到上有微流道的 PDMS 薄片,最后是封装过程。PDMS 由固化剂和基体材料两种成分合成得到。固化剂中的硅烷基与基体材料中的乙烯基发生反应形成交联的高弹性固体。利用复模法得到上有微流道的 PDMS 薄片需要将固化剂和基体材料混合均匀后倾倒在模具面上。液体 PDMS 预聚物能高精度 (数 10 nm) 地刻蚀出模具的形状。

3.1.3 封装

PDMS 的一个优良特性是其具有可逆或不可逆的与自身或其他表面密封的特性。加工空气取水装置利用的是 PDMS 不可逆密封性能。不可逆密封时应当将待密封的表面暴露在等离子清洗机中。两表面必须在氧化后快速 (< 1 min) 接触。

利用软光刻技术加工出 PDMS 材料的平膜,框架和微流道并在其上打一个用来安装单向阀的直径 3 mm 的孔。本研究将直径大约 2 mm 的硅胶颗粒放入框架中的吸附腔内并用薄膜将微流道和框架结构不可逆密封,安装单向阀并在其周围涂抹 PDMS 将其固定,将两片 PI 电热膜封装到取水装置的两侧,完成封装。

3.2 空气取水装置的实验测试

空气取水装置的实验测试如图 8 所示。外部电源对 PI 电热膜供电,使得空气取水装置的工作环境温度保持在 80 °C 左右。在解析附开始阶段,解吸附过程中总产水体积如图 9 所示,在收集管道中可观测到凝结的水珠。解吸附过程持续大约 10 min,取水量总体积略大于 0.2 ml,实验结果与仿真的结果相一致。

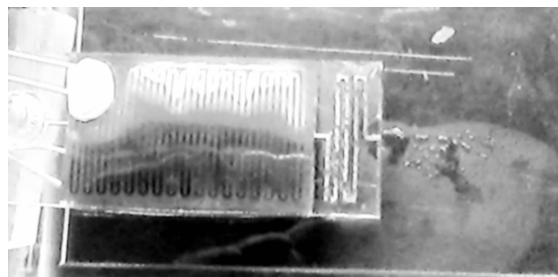


图 8 装置试样在解吸附两分钟时产水效果



图 9 解吸附过程中总产水体积

与否至关重要。如果装置出现漏气的情况,除了高湿度高压水蒸气会从该处流失以外,由于该处气压降低等原因,高温水蒸气会在该处成水珠,而不会按照设计通过在微流道中冷凝,移动到收集装置,对装置的收集效率影响很大。

4 结束语

基于新型材料 PDMS 本研究设计了一种吸附解析式微型空气取水装置,并对该空气取水装置的结构及工作原理进行了详细描述。利用有限元分析方法仿真了该装置的工作过程及取水效率,并通过实验进行了验证。

研究表明,空气取水装置能够在 10 min 的解析附过程中收集淡水约 0.2 ml,与有限元理论分析结果 0.027 5 g/min 相一致。由于测量条件的限制,无法对实验过程中取水速率进行测量。对于实验测试结果与理论分析的误差分析,一方面是实验测试的不精确;另一方面,在实验过程中装置密封性对取水效率有较大影响。

参考文献 (References) :

- [1] 耿浩清,石成君,苏亚欣. 空气取水技术的研究进展[J]. 化工进展,2011,30(8):1664-1669.
- [2] 田甲申,张鑫喆,马国远. 太阳能驱动超疏水冷表面凝结制水装置的研制[J]. 制冷技术,2014(5):45-48.
- [3] ZHANG X R, JIANG Z Y, ZHANG X X, et al. A new source of fresh water: water extraction from air[J]. **Water Resources Protection**,2007(23):17.
- [4] 赵惠忠,李莹莹,魏存,等. 吸附式太阳能水管空气取水的特性研究[J]. 可再生能源,2014,32(3):259-264.
- [5] NORGAAD T, DACKE M, Fog-basking behavior and water collection efficiency in namib desert darkling beetles [J]. **Front. Zool.**,2010(7):1-8.
- [6] 边风根,曾莉,严兆华. 聚二甲基硅氧烷弹性体的表面改性及生物相容性[J]. 南昌大学学报(理科版),2014(6):14.

实验过程中还发现,装置的密封性对实验的成功

- [7] SAMUEL K S, GEORGE M W. Microfluidic devices fabricated in poly (dimethylsiloxane) for biological studies[J]. **Electrophoresis**,2003(24) :3563-3576.
- [8] NG K C, CHUA H T, CHUNG C Y, et al. Experimental investigation of the silica gel-water adsorption isotherm characteristics [J]. **Applied Thermal Engineering**, 2001 (21) : 1631-1642.
- [9] JESSAMINE M K, IRINA G, ABRAHARM D, et al. Components for integrated poly (dimethylsiloxane) microfluidic systems [J]. **Electrophoresis**,2002(23) :3461-3473.
- [10] MCDONALD J C, GEORGE M W. Poly (dimethylsiloxane) as a material for fabricating microfluidic devices [J]. **Accounts of Chemical Research**,2002,35(7) :491-499.
- [11] HU W, LIU W, ZHU F, et al. The fabrication of PDMS-based functional surface mimicking the namib desert beetle back for collecting water vapor in the air [C] // Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS), 2014 9th IEEE International Conference on IEEE,2014:417-421.

[编辑:洪炜娜]

本文引用格式:

王贝贝,李 爻,李松晶.一种基于 PDMS 的微型空气取水装置研究[J]. 机电工程,2015,32(8):1075-1079.

WANG Bei-bei, LI Yao, LI Song-jing. Micro atmospheric water generator based on PDMS [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015,32(8) : 1075 - 1079.

《机电工程》杂志;http://www.meem.com.cn

(上接第 1074 页)

研究过程中发现还有不足之处,即只讨论了机器人的工作空间和安装方式,没有讨论机器人的灵活性,没有对机器人的路径进行优化,在今后的研究中,笔者将重点研究该类机器人的灵活性,以完善机器人的设计。

参考文献 (References) :

- [1] 戴 光. 压力容器安全工程 [M]. 北京:中国石化出版社, 2010.
- [2] 丁训慎. 核电站蒸汽发生器在役检查的遥控装置和专用工具 [J]. 核电工程与技术. 2000,13(1) :44-49.
- [3] PHILIPPE D, GÉRARD P. An Overview of the Remote Handling Technologies Developed for Nuclear Hazardous Environments in France [C] // 1st Joint Emergency Preparedness and Response/Robotic and Remote Systems Topical Meeting. Salt Lake City, UT, USA; [s. n.], 2006: 381-388.
- [4] 王立权. 核电站蒸汽发生器检修机器人设计及运动学分析 [J]. 机器人, 2009,31(1) :61-66.
- [5] CHEN Jin-qiu. Structural Optimization of robots and 3D Modeling of robot Workspace [D]. Ph. D. Thesis, The University of Memphis, 2005.
- [6] TSAI, Y. C. SONI, A. H. Workspace Synthesis of 3R, 4R, 5R AND 6R Robots [J]. **Mechanism & Machine Theory**, 1983,20(6) :555-563.
- [7] 王才东,吴建荣. 六自由度串联机器人构型设计与性能分析 [J]. 机械设计与研究, 2013,29(3) :9-12
- [8] 吴建荣. 蒸汽发生器检修机器人样机研制及其关键技术研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学动力与核能工程学院, 2009
- [9] 刘成良. 基于计算机图形学的机器人臂部构型分析及工作空间仿真研究 [J]. 机电工程, 2002,19(3) :44-48.
- [10] 熊有伦. 机器人学 [M]. 北京:机械工业出版社, 1993.
- [11] XIAO Hua, ZHANG Hui, Configuration Design and Kinematic Analysis of A Sealed Container-oriented Robot with Six Degrees of Freedom [C] // Proceedings of the Fourth International Joint Conference on Advances in Engineering and Technology 2013. India; Elsevier India, 2013:766-770.
- [12] 罗庆生,肖中阳,鲁 盼,等. 可穿戴式腰背部治疗仪的机构设计及其运动学分析 [J]. 机电工程, 2014, 31(12) :1547-1550,1554.
- [13] 蔡 蒂,谢存禧. 基于蒙特卡洛法的喷涂机器人工作空间分析及仿真 [J]. 机械设计与制造, 2009(3) :161-162.

[编辑:李 辉]