

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.03.005

微型空气取水装置拉瓦尔管导流结构的 CFD 研究^{*}

蔡 申¹, 李松晶^{1,2*}, 吴海成¹, 袁 帅¹, 周礼根², 张 亮²

(1. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 江苏扬州尼尔液压科技有限公司, 江苏 扬州 225811)

摘要:针对如何从空气中高效获得可饮用淡水的问题,对一种基于吸附解吸附方法的微型空气取水装置进行了研究,提出了一种将简化拉瓦尔喷管导流结构应用于微型空气取水装置通风管路进而提高取水效率的方法。利用计算流体力学方法(CFD)对该简化拉瓦尔管导流结构参数与装置内空气流动的效果之间的关系进行了模拟仿真,并分析了喉部直径、喉部截面相对通气管路入口高度等条件对空气流量的影响。研究结果表明:简化拉瓦尔管导流结构的通气管路相比传统直筒式通气管路,其内部热空气保温性能更好,使其管路内空气平均密度更低,热压通风量更大,且由于喉部空气加速效果有利于吸附腔负压压力区域的形成,能够有效提高装置内空气流量约 50%;同时可以通过对喉部直径和高度参数的调节使装置工作状态均处于最佳流量范围内,进而提高取水效率。

关键词:拉瓦尔喷管;空气取水装置;CFD

中图分类号:TH702;TV213

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)03-0241-05

CFD simulation of Laval nozzle for micro atmospheric water generator

CAI Shen¹, LI Song-jing^{1,2}, WU Hai-cheng¹, YUAN Shuai¹, ZHOU Li-gen², ZHANG Liang²

(1. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Yangzhou Nier Hydraulic Technology Co. Ltd., Yangzhou 225811, China)

Abstract: Aiming at the problem of harvesting water efficiently from air, a micro atmospheric water generator based on hygroscopic material was studied. A Laval nozzle for micro atmospheric water generator was designed to improve efficiency. The relation between Laval nozzle structure and air flow in the generator was investigated by employing a CFD (Computational Fluid Dynamics) numerical simulation. The mass flow based on different diameter and height of nozzle “throat” was analyzed. The results indicate that utilization of Laval nozzle can keep pipe heat insulation, reducing the internal air density, and form the negative pressure area because of the air acceleration effect. Appropriate Laval nozzle can increase mass flow rate in the generator by 50%. The adjustment of Laval nozzle structure can keep the mass flow in the best range and increase work efficiency.

Key words: Laval nozzle; atmospheric water generator; CFD

0 引 言

为了解决在干旱地区难以获得可饮用淡水的问题,人类常常需要依靠从外部运输淡水,然而运输的成

本高,且水资源不便分发和携带。事实上在空气中就蕴含着丰富的水资源,即便在干旱的沙漠地区,干燥空气的相对湿度值也在 20%~30%左右,即在 1 m³ 空气中含有约 6 g~10 g 水^[1],空气取水^[2]装置也应运而

收稿日期:2017-07-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175101)

作者简介:蔡 申(1992-),男,黑龙江哈尔滨人,硕士研究生,主要从事流场分析及微流体方面的研究。E-mail:caishen777@126.com

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

生。目前发展较为成熟的空气取水方式主要包括两种类型^[3]:制冷结露法^[4-5]和吸附解吸附法^[6-7]。由于制冷结露法取水的能源利用效率较低,吸附解吸附法得到了更为广泛的应用。本研究所设计微型空气取水装置即采用吸附解吸附法。

拉瓦尔喷管是一种先收缩后扩张的喷管结构,主要应用于超声速喷气发动机、火箭发动机等^[8-10],用于调节流经喷管的气流参数。

本研究将拉瓦尔喷管结构简化后应用于微型空气取水装置中来提高装置内部空气流量,进而提高取水效率,并对装置内部空气流动情况进行 CFD 模拟^[11]研究。

1 微型空气取水装置结构与原理

1.1 微型空气取水装置结构与空气流动原理

本研究设计了一种杯型微型空气取水装置,其杯体结构示意图如图 1 所示。

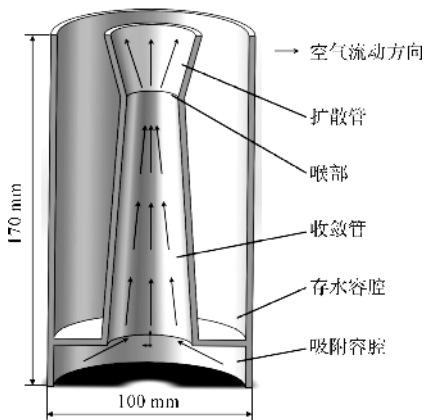


图 1 微型空气取水装置杯体结构图

该杯体包括吸附容腔、存水容腔、拉瓦尔喷管式通气管道(包括收敛管、喉部、扩散管)。杯体材料选择绝热性能好、耐高温、无毒害的有机材料。吸附容腔内装有吸湿剂,可选用高效吸湿材料如卤素盐复合吸湿剂^[12-13]、MOF801^[14]等。

该装置工作过程分为两个阶段。在吸附阶段,利用电热膜加热通气管道内空气,由于烟囱效应^[15]会使装置内空气产生稳定单向流动(如图 1 所示),且主动通风驱动力与装置内外气体密度差成正比关系。该驱动力促使外部空气流经吸附剂,其中的水蒸气被吸附剂吸收保存。当吸附趋于饱和后进入解吸附工作阶段,解吸附电热膜将加热吸附剂使其保存的水分释放出来,较热的水蒸气沿通气管道向上至液化位置并被

引导至存水容腔。该工作过程需多次循环以便获得足够量的水。由上述工作过程可知,装置内空气流动情况将直接决定取水的效率,在吸附阶段,若流量过小则吸附需要时间长,若流量过大则不利于空气中水分被充分吸附;在解吸附阶段,若流量过小则解吸附产生的水蒸气无法被高效传递至液化位置,若流量过大则不利于解吸附过程保温和液滴的形成。故装置最佳空气流量的控制非常重要。

1.2 拉瓦尔管结构在该装置中的应用

典型拉瓦尔喷管结构包括收敛管、喉部、扩散管 3 个部分,本研究将其结构用于微型空气取水装置通气管道。为了便于量化分析并便于后期杯体的制造,将曲线型拉瓦尔喷管简化为直线型。相比传统直筒管形状,其优势主要包括两方面:(1)利于通气管内气体保温,使烟囱效应中内外密度差值增大,增大通气管入口和出口处压力差;(2)利于通气管内气体局部加速,使装置下方吸附容腔处产生一较大负压力,进而使更多外部空气流入吸附剂。

两种效果共同提高装置内空气流量进而提高取水效率。

2 流体计算域数值建模

CFD 模拟分析具有成本低、速度快、具有模拟真实条件的能力等优点,在实验前进行充分的模拟分析有助于实验方案的确立,提高实验成功率。

2.1 计算域模型

本研究基于 ANSYS Workbench 平台分析了拉瓦尔喷管结构参数对空气流量的影响。笔者通过 DM 模块设计几何模型,抽取流体计算域,通过 ICEM CFD 模块设置网格要求、进行网格划分,最后利用 Fluent 模块进行计算方法和边界条件的设定并进行计算。

为减少计算量并便于观察,笔者取实际模型的 1/4 为几何计算域,网格划分如图 2 所示。

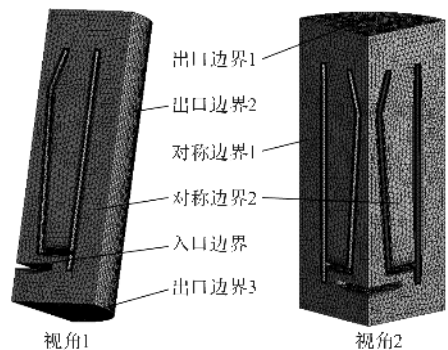


图 2 计算域网格划分

2.2 Fluent 参数设置

装置内空气流动过程是一个热流耦合过程。流动过程选择湍流模型中的标准 $k-\omega$ 湍流模型,其模型常数取 $C_{\mu}=0.09$; $C_{1s}=1.44$; $C_{2s}=1.92$,近壁处理采用 Scalable 壁面函数,采用该函数对于任意细化的网格,能给出一致的解,有助于提高计算精度。传热过程选中能量方程选项。流体介质选择理想空气条件,由于烟囱效应原理基于空气温度变化引起的密度变化,需引入空气密度与温度的关系。取空气介质参数比热 $C_p=1\,012\text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$,空气导热系数 $\lambda=0.024\,2\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,空气动力粘度 $\mu=1.789\,4\text{e}^{-5}\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$,空气摩尔质量设置为 $M=28.959\text{ g/mol}$ 。在环境设置设置 Z 轴方向重力场 g 值为 -9.81 。

本研究设置加热膜温度条件为唯一输入条件,计算域顶面、底面、侧面均设置为压力出口边界条件,温度设置为 293 K 。两对称面均采用对称边界条件。其他参数保持默认。

3 数值计算结果与分析

由于吸附和解吸附工作阶段内部空气流动原理相同,所得结果相似,以下分析均以解吸附阶段为例。

3.1 拉瓦尔管结构提高空气流量效果分析

本研究设置解吸附电热膜稳态工作温度为 393 K ,保持通气管路进口和出口直径为 40 mm 不变(下同),在管路中设置一简化拉瓦尔管结构,对比装置内温度场图如图 3 所示。

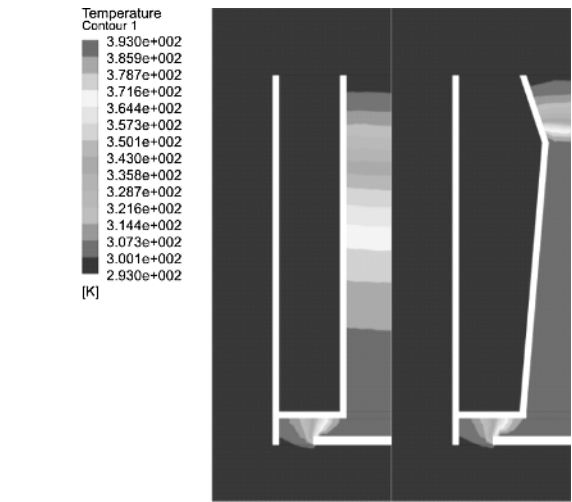


图3 拉瓦尔管结构对通风管内温度分布影响

由图可见:该结构使通风管保温能力大大提高。对比装置内压力场图如图 4 所示。

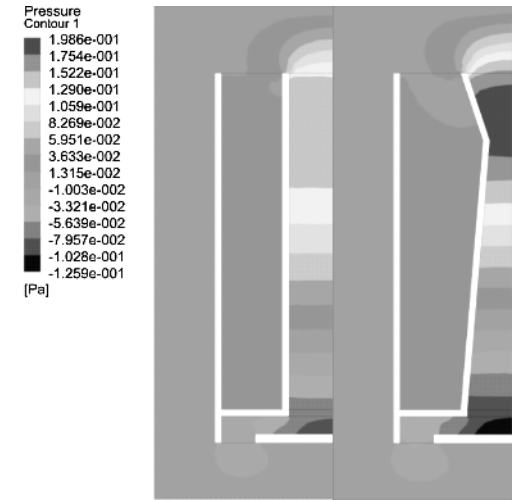


图4 拉瓦尔管结构对通风管内压力分布影响

由图可见:由于该结构使管内空气局部加速,使装置吸附容腔中产生一较大负压。在两因素共同作用下,空气流量由 5.80 mg/s 提高至 9.43 mg/s 。

3.2 喉部直径对流量的影响

本研究设置拉瓦尔喷管喉部相对通气管入口高度为 120 mm 不变,分别设置喉部直径为 12 mm 、 16 mm 、 20 mm 、 24 mm 、 28 mm 、 32 mm 、 36 mm ,并在解吸附电热膜稳态温度为 353 K 、 373 K 、 393 K 3 种工作状态下,分别作拉瓦尔管喉部直径与通风管出口截面流量关系图,如图 5 所示。

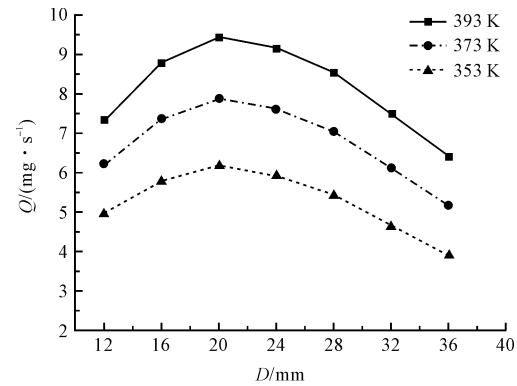


图5 拉瓦尔管喉部直径与通风管出口截面流量关系

分析图 5 可知:在 3 种温度工作状态下,拉瓦尔管喉部直径与通风管出口截面流量产生相似的关系:喉部直径过大或过小时,提高流量的效果均不佳,在喉部直径为 20 mm 时流量最大,达到 9.43 mg/s (393 K),且喉部直径从 16 mm 变化至 28 mm 对流量影响不大。相同结构下,电热膜工作温度越高空气

流量越大,该现象可由烟囱效应原理解释,装置内外空气温度差越大对应密度差也越大,主动通风能力更强。

本研究分别对比 393 K 温度下喉部直径为 12 mm、20 mm、28 mm、36 mm 4 种情况的温度分布,如图 6 所示。

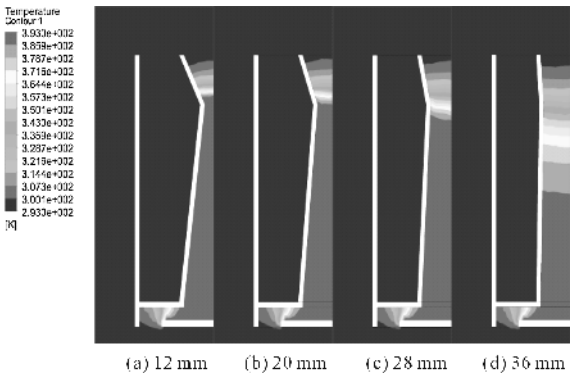


图 6 拉瓦尔管喉部直径对温度分布影响

压力分布如图 7 所示。

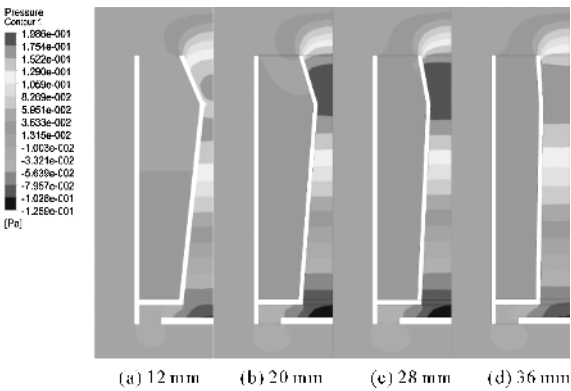


图 7 拉瓦尔管喉部直径对压力分布影响

对于 20 mm 和 28 mm 两种喉部直径的拉瓦尔管,其内部温度与压力分布几乎相同,故流量也所差无几。12 mm 直径过小,尽管管内温度保持效果很好,但过小的喉部直径限制了空气流出,吸附容腔无法形成理想的负压区。36 mm 直径则过大,管内空气散热过快使通气管进出口压力差约减至理想情况的一半。所以两种情况的空气流量值相对 20 mm 直径对应流量峰值均有较大差距。

3.3 喉部高度对流量的影响

本研究设置拉瓦尔喷管喉部直径为 20 mm 不变,分别设置喉部截面相对通风管入口高度为 80 mm、90 mm、100 mm、110 mm、120 mm、130 mm、140 mm,并在解吸附电热膜稳态温度为 353 K、373 K、393 K 3 种工作状态下分别作拉瓦尔管喉部截面高度与通风管出

口截面流量关系,如图 8 所示。

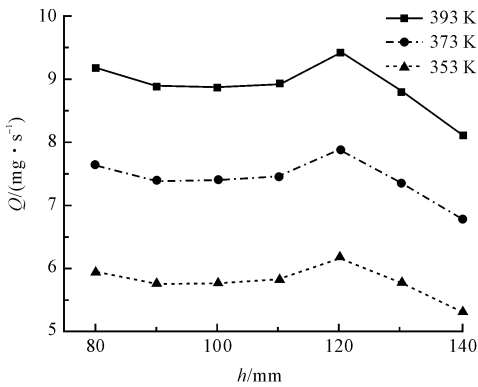


图 8 拉瓦尔管喉部截面高度与通风管出口截面流量关系

分析图 8 可知:在 3 种温度工作状态下拉瓦尔管喉部截面高度与通风管出口截面流量产生相似的关系:在喉部截面高度为 120 mm 时流量最大,且喉部高度从 80 mm 变化至 130 mm 对流量影响不大,但当高度提高至 140 mm 时流量产生较大衰减。

本研究分别对比 393 K 温度下喉部截面高度为 80 mm、100 mm、120 mm、140 mm 4 种情况的温度分布如图 9 所示。

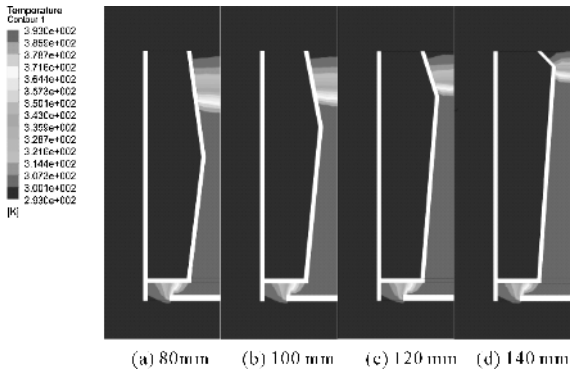


图 9 拉瓦尔管喉部截面高度对温度分布影响

压力分布如图 10 所示。

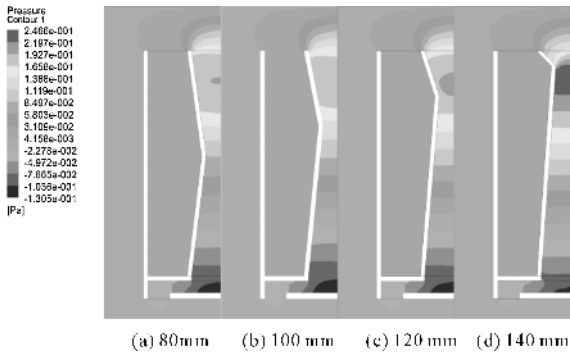


图 10 拉瓦尔管喉部截面高度对压力分布影响

对于 80 mm、100 mm 和 120 mm 3 种喉部高度

的拉瓦尔管,其内部温度与压力分布几乎相同,故流量也所差无几。140 mm 高度过大,导致扩散管部分扩张角过大,影响了管内空气流速和负压力区域形成。

4 结束语

本研究提出了将简化拉瓦尔管导流结构应用于吸附式微型空气取水装置以提高取水效率的方法。利用 CFD 方法构建了仿真模型并对不同喉部直径和喉部截面高度影响装置内空气流动的效果进行数值模拟并得到了以下结论:

(1)简化拉瓦尔管导流结构的通气管路相比传统直筒式通气管路,其内部热空气保温性能更好,使其管路内空气平均密度更低,内外空气密度差更大,且由于喉部空气加速效果有利于吸附腔负压压力区域的形成,能够有效提高装置内空气流量约 50% ;

(2)通过控制喉部直径和喉部截面高度可以调整吸附阶段和解吸附阶段流经吸附剂的空气流速与流量,使装置工作效率达到最优。一般情况下,喉部直径设置为通气管进出口直径的 0.5 至 0.7 倍,喉部截面高度设置为通气管总高度的 0.6 至 0.8 倍时,空气流量处于理想范围内。

参考文献 (References) :

- [1] 王海峰,雷加强,李生字,等. 塔里木沙漠公路防护林的温度和湿度效应研究[J]. 科学通报,2008,53(S2):33-42.
- [2] HAMED A M, ALY AA, ZEIDAN E S. Application of solar energy for recovery of water from atmospheric air in climatic zones of saudi arabia[J]. **Natural Resources**,2011,2(1):8-17.
- [3] 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.

- [4] 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.
- [5] 张欣茹,姜泽毅,张欣欣,等. 新的淡水水源—空气取水[J]. 水资源保护,2007,23(3):60-62,79.
- [6] NORGAAD T, DACKÉ M. Fog-basking behavior and water collection efficiency in Namib desert darkling beetles[J]. **Frontiers in Zoology**,2010,7(1):1-8.
- [7] 季建刚,黎立新,蒋维钢. 一种新的空气取水方法—吸附式空气取水研究[J]. 节能,2002(10):34-36.
- [8] EDWARD T, CURRAN. Scramjet engines: the first forty years[J]. **Journal of Propulsion and Power**,2001,17(6):1138-1148.
- [9] VEREVKIN A A. Flow of a dispersed phase in the laval nozzle and in the test section of a two-phase hypersonic shock tunnel[J]. **Journal of Applied Mechanics and Technical Physics**,2008,49(5):789-798.
- [10] 杨海威,赵 阳. 拉瓦尔型微喷管性能的 DSMC 模拟[J]. 固体火箭技术,2007,30(2):106-109,119.
- [11] 宋世慧,卢洪超,邵万珍. 车用液力缓速器设计及 CFD 流体仿真分析[J]. 液压气动与密封,2016(11):10-13.
- [12] 胡余生,徐 瑞,黄艳芳,等. 基于 CFD 方法的滚动转子压缩机性能分析[J]. 流体机械,2017(1):38-42.
- [13] 杨 凡,袁艳平,张海全,等. 复合吸附剂 $\text{CaCl}_2/\text{MWNT}$ 低湿环境下吸附性能的实验研究[J]. 材料导报,2016(S1):13-16.
- [14] KIM H, YANG S, RAO S R, et al. Water harvesting from air with metal-organic frameworks powered by natural sunlight[J]. **Science**,2017,356(6336):430-434.
- [15] KHANAL R, C Lei. Solar chimney—a passive strategy for natural ventilation[J]. **Energy and Buildings**,2011,43(8):1811-1819.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

蔡 申,李松晶,吴海成,等. 微型空气取水装置拉瓦尔管导流结构的 CFD 研究[J]. 机电工程,2018,35(3):241-245.

CAI Shen, LI Song-jing, WU Hai-cheng, et al. CFD simulation of Laval nozzle for micro atmospheric water generator[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2018,35(3):241-245.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>