

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.2011.01.017

基于 CFD 的多孔管热风数值模拟与设计方法

王新坤, 许文博, 赵 坤, 李俊红, 许 颖

(江苏大学 流体机械工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013)

摘 要: 针对目前温室热风采暖效率较低现状, 提出将多孔管应用于温室热风采暖的设计方法。利用 Pro/E 软件完成多孔管造型, 应用 Fluent 6.2 软件并设置三维雷诺平均 Navier-Stokes 方程、RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型和 SIMPLEC 算法对多孔管内部流场进行了数值模拟。采用二分法搜索原理、数值传热学理论、流体力学和递进推法对多孔管热风采暖进行设计计算, 并运用 VB 6.0 软件对其进行编程计算, 得到了多孔管滴灌器的流态指数为 0.507, 性能良好; 当设定进、出口压力分别为 10, 0 kPa, 进、出口温度分别为 300, 278 K, 边界壁面传热系数为 0.055 时, 多孔管各出风口温度值几乎不变, 压力值沿多孔管产生压降, 约为 200 Pa。设计方法所得结果比数值模拟结果略高, 各出风口处压力值和温度值的设计曲线和模拟曲线趋势一致, 且压力值和温度值的均匀系数均大于 0.8, 满足多孔管热风流动均匀性的要求。

关键词: 多孔管; 温室采暖; 递进推法; 数值模拟; 节能

中图分类号: S277.9; S625.51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2011)01-0082-05

Numerical simulation and design method of hot air for porous pipe based on CFD

Wang Xinkun, Xu Wenbo, Zhao Kun, Li Junhong, Xu Ying

(Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: To overcome the condition that the lowly efficient use of hot air heating in greenhouse, a design method of hot air heating for a porous pipe in greenhouse was put forward. The model of a porous pipe was created by using the Pro/E, the computational fluid dynamics software Fluent 6.2 was adopted to simulate the porous pipe interior flow mechanism and performance by setting up the Reynolds averaged Navier-Stokes equations, the RNG $k-\varepsilon$ turbulent model and the SIMPLEC algorithm. By using the search principle of bisection algorithms, numeric heat transfer theory, hydrodynamics and back step method, a design method of hot air heating in a porous pipe was studied, meanwhile which was computed by making use of VB 6.0 computer language program. The results show that the flow index of emitter on the porous pipe is 0.507, the performance is fine. When the inlet pressure is 10 kPa, the outlet pressure is 0 Pa, the inlet temperature is 300 K, the outlet temperature is 278 K, the coefficient of conducting heat of the boundary is 0.055, the temperatures on the other orifice on the porous pipe were almost the same, and the pressures had the pressure-drop of about 200 Pa. The results of design were a little higher than that of numerical simulated ones, but the curves agreed with the pressure and temperature. Both the

收稿日期: 2010-03-18

基金项目: 国家 863 计划项目(2006AA100211); 江苏大学江苏省现代农业装备与技术重点实验室开放基金资助项目(NZ200808)

作者简介: 王新坤(1966—),男,陕西临潼人,研究员(xjwsk@126.com),主要从事农业高效用水理论与新技术及其推广应用研究。
许文博(1985—),男,黑龙江北安人,硕士研究生(xuwenbo168@163.com),主要从事节水灌溉理论与新技术研究。

pressure and temperature uniformity coefficients were larger than 0.8, which satisfied the need of hot air flow uniformity for a porous pipe.

Key words: porous pipe; greenhouse heating; back step method; numerical simulation; energy conservation

温室冬季生产需要消耗大量能量,能量利用效率仅为 40% ~ 50%^[1]. 为此,选择一种合理且高效的温室采暖系统,可以促进生产、节约成本. 与传统的热风采暖方式相比,热风采暖一次性投资小,安装简单,在面积较小的温室内使用的热效率较高. 利用多孔管热系统进行热风采暖,加热空间在植物冠层以下,相对整栋温室采暖而言,更加节约能源.

目前,国内外学者在多孔管的水力计算方面作了大量的研究^[2],主要有:基于毛管水头线多段折线模型的水力特征量计算方法^[3-4]、应用计算机采用进步法或退步法逆推逐步逼近的试算方法^[5]、中孔比法^[6]和遗传算法^[7]等. 基于以上研究成果,本文采用二分法和逆推法对多孔管进行设计计算. 二分法是常用而高效的一种查找或搜索算法,可以快速方便地寻找到需要计算的目标位置;逆推法可以从多孔管末端利用已知条件向进口处层层递推,求出所需未知量.

本研究采用 Fluent 软件对多孔管进行数值模拟,计算多孔管内部的热风流动性能,分析其内部流场,同时提出一种简便的多孔管热风流动设计方法并使用辅助计算机程序 VB 6.0 快速、准确地计算,再将其计算结果与数值模拟结果进行对比,以便为今后温室多孔管热风采暖的设计、优化提供一定的参考.

1 多孔管热风数值模拟

1.1 基本参数

多孔管滴灌器选择屯河扁平滴头,材料为 DNDB7149;流道形式为迷宫式流道,迷宫流道宽 0.8 mm,进口处设有格栅,出口处设有消力池,具有消能的作用;滴灌器尺寸为 33 mm × 7.9 mm × 3.3 mm,滴灌器出口孔口直径 d 为 1 mm;多孔管长度 L 为 10 170 mm,进口直径 D 为 16 mm;滴灌器间距 l_1 为 330 mm,开口距第一个滴灌器的距离 s_1 为 450 mm,滴灌器数目 n 为 30;多孔管一端开口,另一端封闭.

1.2 网格划分

利用 Pro/E 软件对滴灌器和多孔管进行三维造

型,应用前处理器 Gambit 生成网格. 滴灌器尺寸较小,内部流道结构复杂,且不规则,所以采用非结构化四面体网格划分计算区域. 多孔管结构较为简单,出风口处镶有滴灌器,整体划分网格数量太大. 为了简化计算量,便于模拟,将多孔管和滴灌器分开进行网格划分,且在出风口处进行网格局部加密处理. 经过前期计算校核,确定滴灌器模型网格总数在 1.2×10^5 左右,多孔管(不加入滴灌器)网格总数在 1.8×10^5 左右,可得到稳定的计算结果. 网格划分如图 1 所示.

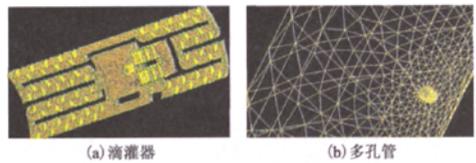


图 1 计算区域网格图

Fig. 1 Grid of calculation region

1.3 计算方法

利用 Fluent 6.2 进行数值模拟计算. 选择分离式求解器,湍流模型为 RNG $k-\varepsilon$ 模型,压力-速度耦合使用 SIMPLEC 算法,动量方程、湍动能与耗散率输运方程的离散均采用二阶迎风格式,迭代过程采用欠松弛因子进行调整^[8]. 在迭代过程中,通过检测残差图和进出口流量变化情况来判断计算是否收敛,松弛系数需要根据收敛情况作适当的调整,以便满足要求^[9].

1.4 控制方程

对于多孔管热风环境这样带有传热的流动问题,从流体力学和传热学的一般原理方程上着手研究,基本方程包括连续方程、RNG $k-\varepsilon$ 方程和能量方程.

连续方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0. \quad (1)$$

RNG $k-\varepsilon$ 模型的控制方程为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \left(\mu + \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \rho \varepsilon, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon \left(\mu + \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \left[C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3} \right] G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (3)$$

式中 $C_\mu = 0.0845$, $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39$, $C_{1\varepsilon} = 1.42$, $C_{2\varepsilon} = 1.68$, $\eta_0 = 4.377$, $\beta = 0.012$.

能量守恒方程为

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho UT) = \text{div} \left(\frac{K}{c} \text{grad } T \right) + S_T, \quad (4)$$

式中 c 为比热容; T 为温度; K 为流体的传热系数; S_T 为流体的内热源及由于黏性作用流体机械能转换为热能的部分, 简称黏性耗散项^[10].

2 模拟结果及其分析

对滴灌器边界条件进行设置. 气体进口温度为 300 K, 出口温度为 278 K, 进口压力在 1 ~ 10 kPa 范围内, 出口压力为 0 kPa, 得到滴灌器流量 - 压力变化曲线, 见图 2. 图 2 中 q_{mi} 为滴灌器质量流量, p_i 为压力值.

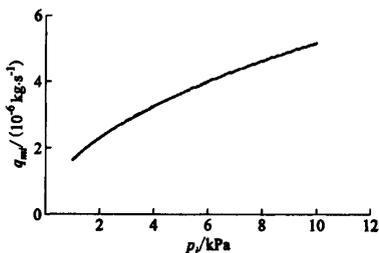


图2 滴灌器流量 - 压力曲线
Fig. 2 Pressure-flux of emitter curve

由此得到流量 - 压力计算式为 $q_{mi} = 5 \times 10^{-8} x^{0.507}$. 流态指数为 0.507, 具有较好的消能效果^[11], 且由于气体在滴灌器内运动剧烈, 通过时间很短, 温度变化不明显, 基本保持在 300 K 左右, 故可忽略温度的变化.

对多孔管设置边界条件: 进口温度为 300 K, 出口温度为 278 K, 进口压力为 10 kPa. 需要采用较好的保温材料对多孔管进行保温处理, 暂取塑料传热系数为模拟参数, 边界壁面传热系数设为 0.055, 壁面外温度为 278 K. 可以得出各出风口处压力值和温度值, 见图 3.

由图 3 可知, 多孔管压力变化较为明显, 从进口到出口处压力变化近 200 Pa, 且压力值呈递减趋势;

每相邻两孔口之间管段的压降较为均匀; 温度值几乎保持在 299 K 左右, 与进口温度近似, 故可认为在多孔管热风流动中, 温度损失几乎可以忽略不计.

3 多孔管热风流体力学计算

3.1 热风流动特点

由于气体具有特殊的黏温特性、焦耳 - 汤姆逊效应、膨胀功与摩擦功相等的特殊性质, 所以在计算方法上必须采取特殊处理手段.

(1) 输气多孔管单位长度的压降和摩阻损失不是常数, 随压力的变化而变化;

(2) 输气多孔管的温降计算, 由于其膨胀功与摩擦功相等, 因此不考虑摩阻损失的增温作用;

(3) 在压降计算中, 高差与摩阻损失不是独立因素, 两者互为因果, 且都会影响压降的大小.

3.2 计算内容

以一条带有迷宫流道滴灌器的多孔管作为热风流动计算对象, 通过分析滴灌器的流量 - 压力关系, 设置适当的多孔管进口压力和进口温度, 从而推导出各个滴灌器的压力、温度和流量值. 通过计算均匀系数来检验多孔管热风流动是否符合设计要求.

3.3 基本计算公式

滴灌器质量流量为

$$q_{mi} = k p_i^x, \quad (5)$$

达西摩阻系数^[12] 公式为

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{0.27a}{D} + \frac{5.62}{Re^{0.9}} \right), \quad (6)$$

多孔管沿程压力损失公式^[13] 为

$$\Delta p_i = \frac{0.8114 \lambda q_{mi}^2 Z p_0 T}{D^5 \rho_0 \rho T_0} \times s_i, \quad (7)$$

多孔管各管段压力值为

$$p_i = p_{i-1} + \Delta p_i, \quad (8)$$

多孔管各管段质量流量值为

$$q_{mi} = q_{m(i-1)} + q'_{m(i-1)}, \quad (9)$$

多孔管各管段温度值^[13] 计算为

$$\begin{aligned} \frac{\lambda_l}{D} 0.023 Re_l^{0.8} Pr_l^{0.3} \pi D s_i (T_{\text{管}} - T_i) = \\ \frac{1}{4} \pi D^2 \rho_0 u_{rc} (T_{i-1} - T_i). \end{aligned} \quad (10)$$

以上式中 q_{mi} 为滴灌器质量流量, kg/s; q'_{mi} 为末端孔口滴灌器质量流量, kg/s; k 为滴灌器流量系数; p_i 为各滴灌器的压力值, Pa; x 为滴灌器流态指数; λ 为达西摩阻系数; a 为管道的绝对粗糙度, mm; D 为多孔

管直径, mm; T 为实际温度值, K; p 为实际压力值, Pa; s_i 为滴灌间距, mm; q_m 为实际流量值, kg/s; L 为多孔管长度, mm; p_0, T_0, ρ_0 各为标准状态下气体的压力、温度和密度; Z 为压缩因子; λ_f 为导热系数; Re_f 为雷诺数; Pr_f 为普朗特数; $T_{管}$ 为管壁温度; u_f 为气体流速。

3.4 计算步骤

这里不考虑坡降的影响。首先确定已知条件, 然后依次从末端滴灌器处向进口处递推, 完成整条多孔管的压力、温度和流量的计算^[14]。

(1) 确定已知条件: 多孔管进口温度 T_{in} , 进口压力 p_{in} , 长度 L , 滴灌器间距 l_i , 入口距第 1 个滴灌器的距离 s_{in} , 滴灌器质量流量指数 k 和流态指数 x 。

(2) 设 $p' = p_{in}, p'' = 0$, 则 $p_0 = (p' + p'')/2$ 。

(3) 由式(5) 计算末端滴灌器质量流量, 并设 $q_{m1} = q'_{m0}$ 。

(4) 由式(6), (7) 计算 λ 和末端两端滴灌器间管段的压降 Δp_i 。

(5) 由式(8), (9) 分别计算 p_i, q_{m1}, q_{m2} 。

(6) 重复步骤(2) - (5), 由多孔管末端向进口递推, 可计算所有滴灌器的压力值 p_i 和流量值 q_m 。

(7) 由式(10) 可推得各滴灌器处温度值 T_i 。

(8) 若 $p'_{in} - p_{in} \leq \varepsilon$, 则计算结束。否则, 若 $p'_{in} < p_{in}$, 令 $p'' = p_0$; 若 $p'_{in} > p_{in}$, 令 $p' = p_0$, 重复(2) - (8) 的步骤。其中 ε 为设定的计算精度。

3.5 校验

利用均匀系数校验压力、流量和温度控制指标。均匀系数不应低于 0.8。式(11), (12) 为均匀系数计算公式:

$$C_{up} = 1 - \frac{\overline{\Delta p}}{\bar{p}} \quad C_{uq_m} = 1 - \frac{\overline{\Delta q_m}}{q_m} \quad C_{uT} = 1 - \frac{\overline{\Delta T}}{\bar{T}}, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \overline{\Delta p} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |p_i - \bar{p}| \quad \overline{\Delta q_m} = \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |q_{mi} - \bar{q}_m| \quad \overline{\Delta T} = \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |T_i - \bar{T}|, \quad (12) \end{aligned}$$

以上式中 C_u 为多孔管均匀系数; $\overline{\Delta p}, \overline{\Delta q_m}, \overline{\Delta T}$ 为压力、流量和温度平均偏差; p_i, q_{mi}, T_i 为压力、流量和温度计算值; $\bar{p}, \bar{q}_m, \bar{T}$ 为压力、流量和温度平均值。

3.6 计算结果与分析

本算例以多孔管基本参数为条件, 采用 VB 6.0

计算机语言编程进行计算, 得出压力值和温度值, 其中系数取值 $Z = 1, \lambda_f = 0.055, c = 1.412, Pr_f = 0.7$ 。数值模拟结果与设计计算结果对照见图 3。

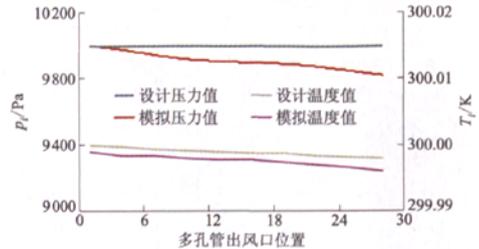


图3 多孔管压力与温度曲线

Fig. 3 Based on design program pressure and temperature curve on lateral

由图3可知, 由于进口压力为 10 kPa, 气体在多孔管内的运动速度较快, 每经过一处滴灌器即损失掉一部分压力, 曲线呈下降趋势; 在不考虑多孔管内外气流温度影响的前提下, 压力损失几乎可以忽略不计; 气体温度受多孔管内气体互作用力和较高压力的影响下, 温度沿运动方向呈递减趋势, 温降不明显。经校核, 压力、温度均匀系数均大于 0.8, 符合要求^[12]。

4 结论

通过对多孔管热风流动数值模拟和设计计算, 得到以下结论:

(1) 得到滴灌器流量 - 压力关系式, 流态指数较好, 流量系数较低, 在保证进口压力和温度恒定的情况下, 可以得到较好的出口压力和温度, 满足温室作物采暖的基本要求。

(2) 对多孔管热风流动进行数值模拟, 单条多孔管设置目标流量, 分别求得压力和温度的曲线图, 由多孔管内热风流动特性可知, 多孔管沿程压降和温降较小, 且整条多孔管的温度和压力较为均匀。各出风孔口压力值与温度值和进口处相比基本保持不变。

(3) 通过理论公式推导, 设计出了多孔管热风流动的计算方法, 并用 VB 6.0 编程计算。由计算结果可知, 计算值与进口处压力值和温度值十分接近, 损失较小, 效率较高。

(4) 利用多孔管进行温室热风采暖, 可以有效节约能源, 对节能减排具有重要意义。本研究为今后多孔管热风温室采暖的深入研究, 可在基础理论依

据上提供参考。

参考文献 (References)

- [1] Xie Shouyoug, Li Xiwen, Yang Shuzi, et al. Algorithm of heating temperature for Chongqing's winter greenhouses[J]. *Journal of Chongqing University: English Edition*, 2007, 6(1): 50 - 54.
- [2] Burt C M. *Selection of Irrigation Methods for Agriculture* [M]. US: ASCE, 2000.
- [3] Wu I P. Energy gradient line approach for direct hydraulic calculation in drip irrigation design [J]. *Irrigation Science*, 1992, 13(1): 21 - 29.
- [4] 洪明, 李援农, 邵莉芳, 等. 低压 PE 滴灌毛管水头损失试验[J]. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(3): 232 - 235.
Hong Ming, Li Yuannong, Shao Lifang, et al. Experimental analysis of head losses in PE laterals under low pressure trickle irrigation [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2007, 25(3): 232 - 235. (in Chinese)
- [5] Kang Yaohu, Yuan Baozhong, Nishiyama S. Design of microirrigation laterals at minimum cost [J]. *Irrigation Science*, 1998, 18(3): 125 - 133.
- [6] Barragan J, Wu I P. Simple pressure parameters for micro-irrigation design [J]. *Biosystems Engineering*, 2005, 90(4): 463 - 475.
- [7] Srinivasa R K, Nagesh K D. Irrigation planning using genetic algorithms [J]. *Water Resources Management*, 2004, 18(2): 163 - 176.
- [8] Zella L, Kettab A. Numerical methods of microirrigation lateral design [J]. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*, 2002, 6(4): 231 - 235.
- [9] 王福军, 王文娥. 滴头流道 CFD 分析的研究进展与问题 [J]. *农业工程学报*, 2006, 22(7): 188 - 192.
Wang Fujun, Wang Wen'e. Research progress in analysis of flow passage in irrigation emitters using Computational Fluid Dynamics techniques [J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(7): 188 - 192. (in Chinese)
- [10] Mizyed N. Numerical analysis to solve the hydraulics of trickle irrigation units [J]. *Irrigation and Drainage Systems*, 2002, 16(1): 53 - 68.
- [11] 李云开, 杨培岭, 任树梅. 滴灌灌水器流道设计理论研究若干问题的综述 [J]. *农业机械学报*, 2006, 37(2): 145 - 149.
Li Yunkai, Yang Peiling, Ren Shumei. General review on several fundamental points of design theory about flow path in drip irrigation emitters [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2006, 37(2): 145 - 149. (in Chinese)
- [12] 王绍周. *管道运输工程* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [13] 杨世铭, 陶文栓. *传热学* [M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [14] 王新坤. 基于二分法的滴灌毛管水力设计 [J]. *排灌机械*, 2007, 25(6): 27 - 30.
Wang Xinkun. Hydraulic design of micro-irrigation laterals based on bisection method [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2007, 25(6): 27 - 30. (in Chinese)

(责任编辑 张文涛)