

植物木质部导管梯状穿孔板流动阻力特性研究*

艾青林 胥芳 陈琦 陈教料 王鹏

(浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 杭州 310014)

【摘要】 简述了目前国内外植物木质部穿孔板流体建模研究概况,对穿孔板孔口流动特性进行了数学建模,利用 Fluent 软件对不同几何结构的穿孔板孔口附近的水分流动进行流场仿真,通过计算和分析仿真结果,研究了穿孔板倾斜角、导管内径、穿孔板孔数、等效孔宽对穿孔板流阻系数的影响规律。结果表明,当其他参数设定时,倾斜角增大,平均流量不变,穿孔板两侧的总压降及流阻系数先减小后增大;导管内径增大,平均流量增大,总压降减小,流阻系数减小;孔数增加,平均流量不变,穿孔板总压降增加,流阻系数也增加;等效孔宽增大,平均流量保持不变,总压降与流阻系数均减小。

关键词: 木质部 穿孔板 流动阻力特性 流阻系数

中图分类号: Q94;O35 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)08-0143-06

Flow Resistance Characteristics of Scalariform Perforation Plates in Plant Xylem Vessels

Ai Qinglin Xu Fang Chen Qi Chen Jiaoliao Wang Peng

(The Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology, Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract

Development of the flow model of scalariform perforation plates was introduced from domestic country to foreign country. The mathematics model of scalariform perforation plates was established. The simulation model of the flow in the region of scalariform perforation plates with different structures was established through Fluent software. From calculating and analyzing the simulation result, the influences of inclination angle of perforation plates, inner diameter of vessel, hole number, equivalent hole width to flow resistance coefficient were studied. The results showed that when other parameters were initialized, with the indination angle increasing, average flow was invariant, the drop of pressure on both side of perforation plates and flow resistance coefficient decreased at the beginning, and increased later. With the value of inner diameter increasing, average flow increased, the drop of pressure and flow resistance coefficient decreased. With hole number increasing, average flow was invariant, the drop of pressure and flow resistance coefficient increased. With equivalent hole width increasing, average flow was invariant, the drop of pressure and flow resistance coefficient decreased.

Key words Xylem, Perforation plates, Flow resistance characteristics, Flow resistance coefficient

引言

多年来,关于植物内部导管水分传输机理的研

究一直受到各国学者的关注^[1-2]。从微观角度分析水分在植物导管内的传输、水势的分布以及导管内压力-流量特性等逐渐成为该领域的研究热

收稿日期: 2010-11-15 修回日期: 2011-03-28

* 国家自然科学基金资助项目(30771247)

作者简介: 艾青林,副教授,博士,主要从事植物流体力学、并联机器人方面研究,E-mail: aiql@zjut.edu.cn

通讯作者: 胥芳,教授,博士,主要从事植物流体力学、机电传动及控制方面研究,E-mail: fangx@zjut.edu.cn

点^[3-10]。

植物导管由彼此邻接的许多植物细胞所组成,这些细胞又称为导管分子。导管分子的各端壁上有一个或几个穿孔,称为穿孔板。水分与无机盐在流经植物内导管时,也必须经过这些穿孔板,才能从根部被运送到颈部和叶部^[8]。

从现有文献可知,穿孔板对木质部导管水分传输影响很大^[4-8,11]。目前研究仅对梯状穿孔板进行了简单的流体建模,所建立的理论模型没有考虑穿孔板局部压力损失和流体力学特性,也没有系统地研究穿孔板结构对水分传输的影响。

事实上,不同种类的植物木质部导管内的穿孔板结构是不同的。有的穿孔板只有1个穿孔,有的穿孔板有多个穿孔。其中,与导管垂直的横壁多为单穿孔,与导管呈倾斜状态的横壁多为复穿孔^[12]。因此有必要针对不同穿孔板结构对导管内水分传输的影响进行系统研究。

本文对木质部导管梯状穿孔板流动阻力特性进行数学建模与数值模拟,分析穿孔板结构参数对导管内水分传输的影响规律,为揭示导管穿孔板附近压降及流动阻力的产生机理提供理论依据。

1 木质部穿孔板流体建模研究概况

由于植物导管内穿孔板结构的多样性,使导管内部水分在穿孔板中的流动变得非常复杂,这给植物导管内穿孔板中水分流动建模带来一定难度。

关于植物木质部导管内的流体建模已有很多文献报道。Schulte 采用有限元软件 FIDAP 对水分流经5孔穿孔板过程进行了数值模拟^[4-5],得到了水分经过穿孔板时的压力梯度和速度分布场。但Schulte认为5孔穿孔板对导管内水分传输的阻力大概只占水分沿导管运动所受总阻力的8%。之后,Schulte对20孔穿孔板水分运动进行了数值模拟,并建立了实验物理模型进行验证^[6-7],得到的结论是穿孔板孔内的压力梯度是孔外的40倍。20孔穿孔板对导管内水分传输的阻力大概占水分沿导管运动所受总阻力的23%,而通过物理模型得到的穿孔板对流体的阻力为21%。Schulte采用的数学模型是哈根-泊肃叶方程(Hagen-Poiseuille equation),这只是一维管道流体力学中的经验公式,没有针对液体流经穿孔板孔时的流动过程进行建模。而且其所建立的实验物理模型是宏观模型,与微管道内的液体流动有很大区别。

Ventresca^[8]初步建立了导管内液体流动的Navier-Stokes方程,但是未作进一步推导,并且也未就其中参数对水分传输的影响进行分析。文中通

过FIDAP软件仿真得出,导管内的压力损失96%是由穿孔板引起的。并且在仿真时,设置的雷诺数偏大,5孔和20孔穿孔板液流的雷诺数分别设为1.50和1.49,但是植物导管内的液体流动属于慢粘流(蠕流动),雷诺数一般为0.02^[3]。

从以上结果可以看出,Schulte与Ventresca的研究结果相差较大。其他还有一些对木质部导管的水分运动进行流体力学建模的研究^[2,9-11]。

可以看出,绝大多数研究认为,水在植物导管内的微流动现象可用哈根-泊肃叶方程流动模型来描述。在流体力学中,哈根-泊肃叶方程只适用于液体在等截面水平管道中作稳定层流运动的情况,可以适用于导管分子大部分管道内的流动情况。但当水分流经穿孔板时,流道的截面与液流方向改变会产生局部压力损失,因此哈根-泊肃叶方程不适用于表征导管内穿孔板处液体的流动特性。

2 木质部穿孔板水分传输模型

被子植物导管穿孔板存在较典型的梯状结构^[12],在此研究梯状穿孔板的水分传输模型。

当植物导管的穿孔板存在多个孔时,穿孔板中的液体流动情况变得非常复杂。多孔孔板是在一个板上有很多孔,流体在通过多孔孔板前后强迫流体形成多股,多股流的形成不仅会使高压区域流体波动,而且对通过多孔孔板后的低压区影响更大,因为多股流在低压区的不规则汇合必然相互干扰、跳动,就如相干效应一样,使低压区的流场紊乱。

植物导管穿孔板液体流动现象与流体力学中多孔孔板节流情况很相似。但关于多孔孔板液流流动特性的研究相对较少^[13-14]。多孔穿孔板孔口流动特性如图1所示。

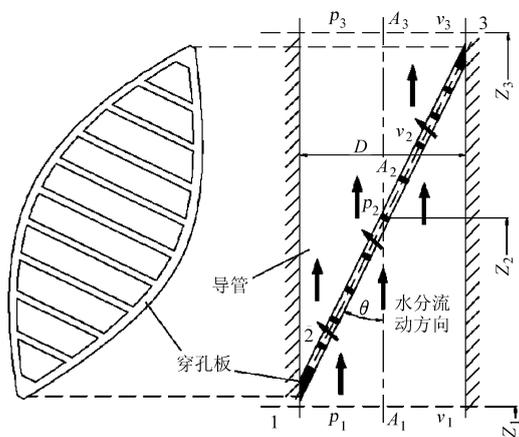


图1 梯状穿孔板孔口流动特性示意图

Fig. 1 Orifice flow characteristics of scalariform perforation plates

从图1中可以看出,液体流过截面2时,由于通

流截面、流动方向的急剧变化,将引起速度场的迅速改变,增大流体间的摩擦、碰撞以及形成漩涡,从而产生较大的局部能量损失。

图1中,截面1与截面3管径相同。截面2为穿孔板的位置,与导管中轴线呈 θ 角。以下分别对3个截面进行能量守恒分析。截面1到截面2的伯努利方程为

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + \xi_1 \frac{v_2^2}{2g} + \lambda \frac{L_1 v_1^2}{2Dg} \quad (1)$$

截面2到截面3的伯努利方程为

$$\frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 = \frac{p_3}{\rho g} + \frac{v_3^2}{2g} + z_3 + \xi_2 \frac{v_3^2}{2g} + \lambda \frac{L_2 v_3^2}{2Dg} \quad (2)$$

其中

$$v_1 = v_3 \quad L_1 + L_2 = z_3 - z_1$$

式中 p_1, p_2, p_3 ——截面1、2、3的压力, Pa
 v_1, v_2, v_3 ——截面1、2、3的流速, m/s
 ρ ——液体密度, kg/m³
 g ——重力加速度, m/s²
 z_1, z_2, z_3 ——截面1、2、3的位置水头, m
 ξ_1, ξ_2 ——液体流经截面2前、后的局部阻力系数

λ ——沿程损失系数

L_1, L_2 ——截面2前、后管道等效长度, m

D ——导管内径, m

将式(1)、(2)左、右分别相加,得

$$\frac{p_1 - p_3}{\rho g} = z_3 - z_1 + \xi_1 \frac{v_2^2}{2g} + \xi_2 \frac{v_3^2}{2g} + \lambda \frac{(z_3 - z_1) v_3^2}{2Dg} \quad (3)$$

λ 的取值与流体粘度、流速、管道内径、管壁粗糙度等有关。 ξ_1, ξ_2 与雷诺数 Re 、穿孔板几何形状、管壁粗糙度有关。

由连续性得

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 = v_3 A_3$$

其中

$$A_1 = A_3$$

式中 A_1, A_3 ——导管内通流面积, m²

A_2 ——穿孔板通流面积, m², 即穿孔板上所有小孔面积之和

将 $v_2 = \frac{A_3}{A_2} v_3, \Delta p = p_1 - p_3$ 代入式(3)得

$$\frac{\Delta p}{\rho g} = z_3 - z_1 + \left[\xi_1 \left(\frac{A_3}{A_2} \right)^2 + \xi_2 \right] \frac{v_3^2}{2g} + \lambda \frac{(z_3 - z_1) v_3^2}{2Dg} \quad (4)$$

令 $\xi = \xi_1 \left(\frac{A_3}{A_2} \right)^2 + \xi_2$ (5)

式中 ξ ——穿孔板总流阻系数

将式(5)代入式(4)可得

$$\xi = \frac{\pi^2 D^4}{8Q^2} \left[\frac{\Delta p}{\rho} - g(z_3 - z_1) \right] - \lambda \frac{z_3 - z_1}{D} \quad (6)$$

式中 Q ——导管内平均流量, m³/s

A_2 与穿孔板上小孔个数和大小有关。穿孔板上小孔个数、孔大小、孔间隔又取决于穿孔板总面积和小孔分布的疏密程度。而穿孔板总面积则与穿孔板倾斜角 θ 和导管内径 D 有关。

因此,从式(5)可看出, ξ 与 Re 、穿孔板几何形状及尺寸、穿孔板与导管中轴线夹角、导管几何尺寸、管壁粗糙度有关。

采用文献[7]提供的数据计算得导管流体 $Re = 0.02$,此时导管内流体为层流,沿程损失系数^[15] $\lambda = \frac{64}{Re}$ 。但当流体流经截面2时,由于流场状态变化较大,并产生较大的能量损失,因此流体在截面2处很可能处于紊流状态。在紊流情况下,因局部阻碍的强烈搅动,大大加强了流体的紊动强度。此时, ξ 与 Re 无关^[16]。至于相对粗糙度,因穿孔板厚度很薄,局部阻碍范围很短,其影响较小,可忽略不计。因此,可认为导管、多孔板几何形状及尺寸是 ξ 的决定性因素。

在多孔板的流体力学中,流阻系数与节流孔个数、等效直径比、节流孔疏密度有关^[16]。等效直径比是节流孔直径同导管直径之比,而节流孔疏密度是节流孔间隔与导管直径之比。

综上所述,穿孔板流阻系数 ξ 与穿孔板倾斜角 θ 、导管内径 D 、节流孔个数 n 、节流孔直径、孔间隔都有关系。由于节流孔直径(此处节流孔直径由孔宽代替)与孔间隔呈反比关系,因此这里将等效孔宽 b 作为影响流阻系数变化的参数之一,即等效孔宽为节流孔宽度与孔间隔之比。

$$\xi = f(\theta, D, n, b) \quad (7)$$

大量实验结果表明,当 Re 很小时,流体流过局部阻碍后很有可能继续保持层流^[16]。因此流体在经过穿孔板之后很可能又恢复到层流状态。

关于导管中穿孔板的流阻系数 ξ 除了在少数情况下可以用理论分析法求解外,多数情况因为流动现象复杂,在数学分析上遇到很大困难,需要依靠实验来确定。由于植物内部的生长不便于对导管内的流场参数进行检测,因此本文采用数值模拟方法建立梯状穿孔板流体仿真模型,研究穿孔板倾斜角 θ 、导管内径 D 、穿孔板孔个数、等效孔宽对穿孔板流阻系数 ξ 的影响规律。

3 穿孔板流体仿真

文献[7]提到枫香树的梯状穿孔板与穿孔板倾斜角为 13° ,导管内径为 $25 \mu\text{m}$ 。而文献[11]中,该植物穿孔板倾斜角为 20° ,导管直径为 $42 \mu\text{m}$ 。可见

同一种植物中的穿孔板结构尺寸与位置都会有所不同。而不同种类植物的穿孔板倾斜角、导管内径、穿孔板孔个数、孔宽度、孔间隔等结构参数更是相差很远^[11]。

因此在分析植物导管穿孔板流动情况影响因素时,应该首先了解植物导管穿孔板流动情况中存在的一些共性问题,不一定局限于某一种特定植物的特定结构,即研究分析不同的结构参数对穿孔板流动阻力特性的影响规律。

结合文献[11]中表2的数据,在其他参数一定的情况下,分别改变穿孔板倾斜角、导管内径、孔个数、等效孔宽等结构参数,观察穿孔板流阻系数 ξ 的大小。

本文利用 Fluent 6.3 软件建立植物木质部导管穿孔板的流体仿真模型,并对仿真结果进行分析和计算。在仿真初始条件设定时,根据导管内流体在穿孔板附近为紊流状态,选择 $k-\varepsilon$ 流体计算模型,并且认为导管内的流体是基于压力、隐式、定常、不可压缩、牛顿粘性液体。导管边界上的流体为无滑移边界状态,且认为导管内流体遵循能量守恒、质量守恒、动量守恒定律。导管入口处流体初始速度设置为最大值为 0.002 m/s 的速度抛物曲线。密度与运动粘度定义为与水相同。

3.1 倾斜角

首先对倾斜角 θ 变化时的穿孔板附近流场进行了仿真。此时设定导管内径 D 为 $40 \mu\text{m}$,孔数为 20,穿孔板厚度为 $1.5 \mu\text{m}$,孔端到边缘距离为 $2 \mu\text{m}$ 。仿真模型的其他结构参数如表 1 所示。

表 1 倾斜角 θ 改变时的导管与穿孔板结构数据

Tab.1 Structure data of vessel and perforation plates with changing θ

倾斜角 $\theta/(\circ)$	孔宽 $/\mu\text{m}$	孔间隔 $/\mu\text{m}$	等效 孔宽	模型长度 $/\mu\text{m}$
10	9.45	1.97	4.8	257
15	6.34	1.32	4.8	180
20	4.80	1.00	4.8	140
30	3.29	0.68	4.8	100
40	2.56	0.53	4.8	78
50	2.14	0.45	4.8	65
60	1.89	0.40	4.8	60

由表 1 可知,导管内径和孔数一定时,随 θ 增大,孔宽与孔间隔都减小,等效孔宽则保持 4.8 不变。由于篇幅限制,仅提供 $\theta = 10^\circ$ 时的流场仿真情况,如图 2、3 所示。

图 2 为过导管中轴线、垂直穿孔板的截面内速

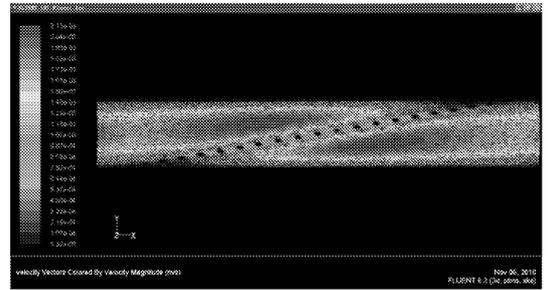


图 2 速度分布场

Fig.2 Velocity distribution

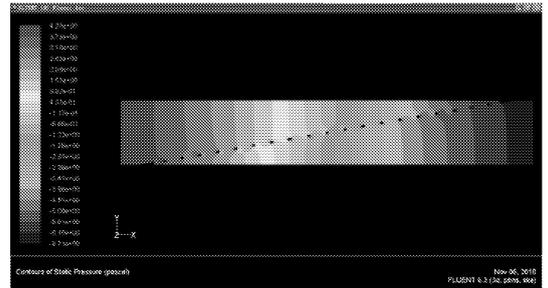


图 3 压力分布场

Fig.3 Pressure distribution

度分布场。图 3 为该截面内压力分布场。从图 2 可以看出,流体流经穿孔板之前,流速沿导管呈径向梯度分布,且中心流速最大,向两侧逐渐递减,此时呈现出明显的层流状态。流体流经穿孔板时,流动方向变化很大,流速减慢(几乎为原来的 50%),流体被穿孔板分成多股小流体,之后又发生交汇、碰撞、摩擦,因此穿孔板及其附近的流体呈现出很明显的紊流状态,并会产生漩涡。流体在经过穿孔之后又恢复成层流状态。图 3 压力分布场显示,穿孔板附近的压降明显,约为 10.8 Pa ,穿孔板两端的压力分布均匀,压降很小。

通过 Fluent 仿真可计算出总压降 Δp 和导管平均流量 Q ,再根据式(6)则可以算出穿孔板流阻系数 ξ ,如表 2 所示。

表 2 θ 改变时的 Q 、 Δp 、 ξ 计算值

Tab.2 Q , Δp , ξ with changing θ

倾斜角 $\theta/(\circ)$	平均流量 $Q/\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	总压降 $\Delta p/\text{Pa}$	流阻系数 ξ
10	1.2571×10^{-12}	10.8844	6419.1657
15	1.2571×10^{-12}	8.0869	5421.2860
20	1.2571×10^{-12}	7.3598	6352.3852
30	1.2571×10^{-12}	7.5390	9092.5707
40	1.2571×10^{-12}	8.6740	12668.5344
50	1.2571×10^{-12}	10.8205	17727.5184
60	1.2571×10^{-12}	13.5274	23428.6338

由表 2 可知,导管内径和孔数一定时,随着 θ 变化,导管内的平均流量是一定的。因为设置导管进

口速度都一样,而导管内径一定时,平均流量不变。后面的平均流量均是如此计算。但是随着 θ 增大,穿孔板两侧的总压降先减小,约下降 32.4%,之后逐渐增大,压降最大值比最小值大 83.8%。随着穿孔板倾斜角 θ 变大,穿孔板流阻系数 ξ 开始时约减小 15.5%,之后则一直增大,最大值比最小值大 332.1%。这是因为当 θ 最小时,穿孔板的倾斜程度最大,流体在流经穿孔板时,流动方向和流动速度变化也最大,总压降也较大,这时会产生较多的能量损失。在 θ 刚开始增大时,穿孔板倾斜程度变小,此时能量损失也减小,压降减小,流阻系数也减小。但当 θ 进一步增大,穿孔板面积迅速减小,穿孔板上总的通流面积也减小,当流量一定时,流速就会增加,从而使穿孔板两侧压降增大,流阻系数增大。

3.2 导管内径

设定倾斜角 θ 为 20° ,孔数为 20,穿孔板厚度为 $1.5 \mu\text{m}$ 。仿真模型的其他结构参数如表 3 所示。

表 3 D 改变时的导管与穿孔板结构数据

Tab. 3 Structure data of vessel and perforation plates with changing D

导管内径 / μm	孔宽 / μm	孔间隔 / μm	等效 孔宽	模型长度 / μm	孔端到边缘 距离/ μm
20	2.4	0.5	4.8	85	1.5
40	4.8	1.0	4.8	140	2.0
60	7.2	1.5	4.8	195	3.0
80	9.6	2.0	4.8	250	3.0
100	12.0	2.5	4.8	305	3.0

通过 Fluent 仿真计算出 Δp 与 Q ,根据式(6)算出流阻系数 ξ ,结果如表 4 所示。

表 4 D 改变时的 Q 、 Δp 、 ξ 计算值

Tab. 4 Q , Δp , ξ with changing D

导管内径 $D/\mu\text{m}$	平均流量 $Q/\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	总压降 $\Delta p/\text{Pa}$	流阻系数 ξ
20	3.1471×10^{-13}	17.064 2	18 715.687 0
40	1.2571×10^{-12}	7.359 8	6 352.385 2
60	2.8295×10^{-12}	5.511 2	3 715.422 1
80	5.0287×10^{-12}	4.787 6	2 166.464 6
100	7.8561×10^{-12}	4.319 2	704.269 9

由表 3 可知,倾斜角与孔数一定时,导管内径增大,孔宽与孔间隔都增大,等效孔宽保持 4.8 不变。由表 4 可知,导管内径增大,平均流量增大,总压降减小约 74.7%,流阻系数减小约 96.2%。这是因为当导管内径增大时,由于穿孔板上孔数一定,穿孔板上过流面积增大。当流速一定时,导管内平均流量将增大,同时使得导管的压差与流阻系数也减小。

3.3 穿孔板孔数

设定导管内径 D 为 $40 \mu\text{m}$,倾斜角 θ 为 20° ,穿孔板厚度为 $1.5 \mu\text{m}$,模型长度为 $140 \mu\text{m}$,孔端到边缘距离为 $2 \mu\text{m}$ 。其他仿真结构参数如表 5 所示。

表 5 孔数改变时的导管与穿孔板结构数据

Tab. 5 Structure data of vessel and perforation plates with changing hole number

孔数	孔宽/ μm	孔间隔/ μm	等效孔宽
5	18.71	3.90	4.8
10	9.52	1.98	4.8
15	6.38	1.33	4.8
20	4.80	1.00	4.8
25	3.84	0.80	4.8

通过 Fluent 仿真计算出相应的 Δp 与 Q ,再根据式(6)算出流阻系数 ξ ,结果如表 6 所示。

表 6 孔数改变时的 Q 、 Δp 、 ξ 计算值

Tab. 6 Q , Δp , ξ with changing hole number

孔数	平均流量 $Q/\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	总压降 $\Delta p/\text{Pa}$	流阻系数 ξ
5	1.2571×10^{-12}	5.568 1	2 775.931 6
10	1.2571×10^{-12}	5.984 4	3 606.917 6
15	1.2571×10^{-12}	6.627 2	4 890.025 5
20	1.2571×10^{-12}	7.359 8	6 352.385 2
25	1.2571×10^{-12}	7.641 4	6 914.533 4

由表 5 可知,导管内径与倾斜角一定时,孔数增大,孔宽与孔间隔减小,等效孔宽则保持 4.8 不变。

由表 6 可知,穿孔板孔数增加对导管平均流量没有影响。但孔数增加,穿孔板总压降增大约 37.2%,流阻系数增大约 149.1%。这是因为,孔数越多,孔宽就会减小,穿孔板的过流面积就会减小,而当导管内平均流量不变时,流体流经穿孔板的速度就会增加,使得压降增加,流阻系数增大。

3.4 等效孔宽

设定导管内径 D 为 $40 \mu\text{m}$,倾斜角 θ 为 20° ,孔数为 20,穿孔板厚度为 $1.5 \mu\text{m}$,模型长度为 $140 \mu\text{m}$,孔端到边缘距离为 $2.0 \mu\text{m}$ 。仿真模型的其他结构参数及仿真参数计算值如表 7、8 所示。

表 7 等效孔宽结构参数表

Tab. 7 Structure data of perforation plates with changing equivalent hole width

孔宽/ μm	孔间隔/ μm	等效孔宽
3.2	2.52	1.27
4.0	1.76	2.27
4.8	1.00	4.80
5.0	0.81	6.17
5.2	0.62	8.39

表8 等效孔宽改变时的 Q 、 Δp 、 ξ 计算值Tab.8 $Q, \Delta p, \xi$ with changing equivalent hole width

等效孔宽	平均流量 $Q/\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	总压降 $\Delta p/\text{Pa}$	流阻系数 ξ
1.27	1.2571×10^{-12}	9.953 0	11 528.731 3
2.27	1.2571×10^{-12}	8.341 3	8 311.579 9
4.80	1.2571×10^{-12}	7.359 8	6 352.385 2
6.17	1.2571×10^{-12}	6.925 2	5 484.870 1
8.39	1.2571×10^{-12}	6.739 8	5 114.788 9

由表7和表8可知,导管内径、倾斜角及孔数一定时,孔宽增大,孔间隔减小,等效孔宽不断增大,此时平均流量保持不变,总压降减小约32.3%,流阻系数减小约55.6%。这是因为当孔宽增大、孔间隔减小时,穿孔板的过流面积就会增加,而此时如果平均流量不变,那么流体通过穿孔板的流速就会减小,这就使得总压降与流阻系数都减小。

4 结论

(1)建立了木质部梯状穿孔板孔口流动特性的

伯努利数学模型,分析了影响穿孔板流阻系数的各种因素,得出穿孔板倾斜角 θ 、导管内径 D 、穿孔板孔个数、等效孔宽是影响导管内部穿孔板流阻系数的主要因素。

(2)利用Fluent软件对不同结构的梯状穿孔板孔口附近水分流动进行了仿真建模,并对仿真结果进行了分析与计算,得到了水分通过穿孔板附近时的压力分布图、速度分布图以及导管内平均流量、穿孔板两侧压降、流阻系数等重要流场参数。

(3)仿真结果表明,当其他参数设定时, θ 增大,平均流量不变,穿孔板两侧的总压降及流阻系数先减小后增大;导管内径增大,平均流量增大,总压降减小,流阻系数减小;孔数增加,平均流量不变,穿孔板总压降增加,流阻系数也增加;等效孔宽增大,平均流量保持不变,总压降与流阻系数均减小。

(4)在实际情况中,导管的穿孔板结构各式各样,本文中的梯状穿孔板只是其中较典型的结构形态。对于其他结构的穿孔板是如何影响导管水分传输的,需要按照具体情况进行建模和理论分析。

参 考 文 献

- 1 万贤崇,孟平.植物体内水分长距离运输的生理生态学机制[J].植物生态学报,2007,31(5):804~813.
Wan Xianchong, Meng Ping. Physiological and ecological mechanisms of long-distance water transport in plants; a review of recent issues[J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(5): 804~813. (in Chinese)
- 2 徐鉴君.植物生长、发育、演化动力学过程的数学-物理模型研究[J].力学进展,2006,36(2):161~169.
Xu Jianjun. Mathematical-physical modeling of dynamical process of plant's growth, development and evolution[J]. Advances in Mechanics, 2006, 36(2): 161~169. (in Chinese)
- 3 Rand R H.绿色植物的流体力学[J].力学进展,1983,13(4):475~484.
Rand R H. Flow mechanics of plant[J]. Advances in Mechanics, 1983, 13(4):475~484. (in Chinese)
- 4 Schulte P J, Castle A L. Water flow through vessel perforation plates—a fluid mechanical approach [J]. Journal of Experimental Botany, 1993, 44(7): 1 135~1 142.
- 5 Schulte P J, Castle A L. Water flow through vessel perforation plates—the effects of plate angle and thickness for *Liriodendron tulipifera* [J]. Journal of Experimental Botany, 1993, 44(7): 1 143~1 148.
- 6 Schulte P J, Gibson A C, Nobel P S. Water flow in vessels with simple or compound perforation plates [J]. Annals of Botany, 1989, 64(2): 171~178.
- 7 Schulte P J. Water flow through a 20-pore perforation plate in vessels of *Liquidambar styraciflua* [J]. Journal of Experimental Botany, 1999, 50(336): 1 179~1 187.
- 8 Ventresca J J, Culbreth W G. Computational assessment of fluid flow in plant xylem [C] // ASME Fluids Engineering Division Annual Summer Meeting, 1996, 4: 619~624.
- 9 Zimmermann M H. Xylem structure and the ascent of sap [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1983.
- 10 褚佳强,焦潍莘,徐鉴君.稳定生长的细长植物单根对水分吸收的数学模型研究[J].中国科学G辑:物理学 力学 天文学,2008,38(3):289~309.
Chu Jiaqiang, Jiao Weiping, Xu Jianjun. Mathematical modelling study for water uptake of steadily growing plant root [J]. Science in China Series G—Physics Mechanics & Astronomy, 2008, 38(3):289~309. (in Chinese)
- 11 Christman M A, Sperry J S. Single-vessel flow measurements indicate scalariform perforation plates confer higher flow resistance than previously estimated [J]. Plant, Cell and Environment, 2010, 33(3): 431~443.

现象显著。

(3) 同时限制甲烷化反应和积碳反应,在反应温度 500 K、压力比 $p_{\text{sys}}/p_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 1.1 时,水相重整甲醇、乙酸、乙二醇可得到 H_2 选择性分别为 74.98%、66.64%、71.38%,接近热力学最大平衡选择性

75.00%、66.67%、71.43%,且 3 种原料转化率均大于 99%。

(4) 生物油水相重整制氢动力学研究时需在设计控制积碳率、消除甲烷化反应以及提高转化率之间寻找平衡。

参 考 文 献

- 1 Wang D, Montane D, Chornet E. Catalytic steam reforming of biomass-derived oxygenates: acetic acid and hydroxyacetaldehyde [J]. *Applied Catalysis A: General*, 1996, 143(2): 245 ~ 270.
- 2 Chen Z, Elnashaie S S E H. Economics of the clean fuel hydrogen in a novel autothermal reforming process [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2005, 44(13): 4 834 ~ 4 840.
- 3 Cortright R D, Davda R R, Dumesic J A. Hydrogen from catalytic reforming of biomass-derived hydrocarbons in liquid water [J]. *Nature*, 2002, 418(6901): 964 ~ 967.
- 4 Kunkes E L, Simonetti D A, West R M, et al. Catalytic conversion of biomass to monofunctional hydrocarbons and targeted liquid-fuel classes [J]. *Science*, 2008, 322(5900): 417 ~ 421.
- 5 Lwin Y, Daud W R W, Mohamad A B, et al. Hydrogen production from steam-methanol reforming: thermodynamic analysis [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2000, 25(1): 47 ~ 53.
- 6 Faungnawakij K, Kikuchi R, Eguchi K. Thermodynamic analysis of carbon formation boundary and reforming performance for steam reforming of dimethyl ether [J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 164(1): 73 ~ 79.
- 7 Xie F Z, Chu X W, Hu H R, et al. Characterization and catalytic properties of Sn-modified rapidly quenched skeletal Ni catalysts in aqueous-phase reforming of ethylene glycol [J]. *Journal of Catalysis*, 2006, 241(1): 211 ~ 220.
- 8 Luo N, Cao F, Zhao X, et al. Thermodynamic analysis of aqueous-reforming of polyols for hydrogen generation [J]. *Fuel*, 2007, 86(12 ~ 13): 1 727 ~ 1 736.
- 9 Luo N, Zhao X, Cao F, et al. Thermodynamic study on hydrogen generation from different glycerol reforming processes [J]. *Energy Fuels*, 2007, 21(6): 3 505 ~ 3 512.
- 10 Walas S M. 化工相平衡 [M]. 韩世钧,等译. 北京:中国石化出版社,1985.
- 11 Green D W, Perry R H. *Perry's chemical engineers' handbook* [M]. 8th ed. Now York: McGraw-Hill, 2008.
- 12 Tang H Q, Kitagawa K. Supercritical water gasification of biomass: thermodynamic analysis with direct Gibbs free energy minimization [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2005, 106(3): 261 ~ 267.
- 13 Peng D Y, Robinson D B. A new two-constant equation of state [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1976, 15(1): 59 ~ 64.

(上接第 148 页)

- 12 赵云云,田汝岭. 木质部管状分子的结构及发生[J]. *生物学通报*, 1997, 32(3): 8 ~ 10.
Zhao Yunyun, Tian Ruling. Structure of vessel element in plant xylem[J]. *Bulletin of Biology*, 1997, 32(3): 8 ~ 10. (in Chinese)
- 13 Gan Guohui, Riffat S B. Pressure loss characteristics of orifice and perforated plates[J]. *Experimental thermal and fluid science*, 1997, 14(2): 160 ~ 165.
- 14 赵天怡,张吉礼. 多孔孔板水节流特性试验及数学模型[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2007, 39(10): 1 606 ~ 1 609.
Zhao Tianyi, Zhang Jili. Experimental study on water throttling model of multi-hole orifice[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2007, 39(10): 1 606 ~ 1 609. (in Chinese)
- 15 林建忠,阮晓东,陈邦国,等. 流体力学[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- 16 李靖. 水利空化多孔孔板流体力学特性研究[D]. 天津:天津科技大学,2009.
Li Jing. Research on fluid dynamical characteristics of multi-hole orifice plate in hydraulic cavitation[D]. Tianjin: Tianjin Science and Technology University, 2009. (in Chinese)