

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.040

# 植物管胞纹孔流体力学建模与流阻特性数值模拟

陈琦 胥芳 艾青林 张立彬

(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:** 植物管胞的输水率与水分在纹孔中的流动特性和规律紧密相关。为研究不同纹孔结构对流动阻力特性的影响,采用流体建模和数值模拟的方法,对带纹孔塞具缘纹孔建立了伯努利流体力学模型,讨论了纹孔各结构参数与纹孔总流阻系数之间的关系。采用低雷诺数  $k-\varepsilon$  模型以及多孔介质模型,对不同结构的具缘纹孔水分流动进行数值模拟和分析,在此基础上,利用伯努利方程求解相应的流阻系数。结果表明,塞缘的流阻最大,占纹孔总流阻的 74.7%,纹孔塞占 16.8%,纹孔缘占 8.5%。纹孔的流阻系数与纹孔直径、纹孔口直径、纹孔深度、塞缘微孔直径和孔隙率成反比,与纹孔塞直径、纹孔膜厚度成正比。纹孔塞起到控制水分流动的作用,随着纹孔塞偏离中心位置变大,纹孔的流动阻力先减小、后增大,纹孔塞越靠近纹孔口时,纹孔流动阻力越大。

**关键词:** 植物管胞; 纹孔; 多孔介质; 流体模型; 流动阻力特性; 低雷诺数  $k-\varepsilon$  模型

**中图分类号:** O35; Q94      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2016)06-0303-08

## Hydrodynamics Modeling and Flow Resistance Characteristics Simulation of Plant Tracheid Pit

Chen Qi Xu Fang Ai Qinglin Zhang Libin

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

**Abstract:** The conductivity of tracheid is closely related to the flow characteristics of water through the pit. The aim was to investigate flow resistance characteristics of border pits with different structures. The Bernoulli mathematical model of the torus-margo border pit was established based on the energy conservation law. According to the obtained mathematical model, the geometrical structures of pit, such as the pit diameter, aperture diameter, torus diameter, pore diameter and porosity of margo, were the main factors that affected the pit flow resistance characteristics. The flow through the pit was simulated with CFD software package Fluent 6.3, the pit margo was worked as porous medium, and the turbulent structure was modeled by low  $Re$   $k-\varepsilon$  model. In the simulation, the influences of various pit structures on flow distribution in the pit were studied and analyzed. Resistance of pits were varied with morphology as predicted, the pit flow resistance was inversely proportional to pit diameter, aperture diameter, pit depth and margo pore size, and the pit flow resistance was proportional to torus size and margo thickness. The results supported the hypothesis of valve effect of the pit torus, when the distance between torus and center position was increased, pit flow resistance was decreased at the beginning, and then it was increased, the pit flow resistance was increased with decrease of distance between margo and pit aperture. The research results provided theoretical basis for further study on the hydrodynamic characteristics of plant conduits.

**Key words:** plant tracheid; pit; porous medium; hydrodynamics model; flow resistance characteristics; low  $Re$   $k-\varepsilon$  model

收稿日期: 2015-12-30 修回日期: 2016-02-02

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(30771247, 51275470, 61374094)和浙江省高等学校中青年学科带头人学术攀登项目(pd2013019)

**作者简介:** 陈琦(1977—),男,博士生,主要从事植物流体力学研究, E-mail: chenqi@zjut.edu.cn

**通信作者:** 艾青林(1976—),男,教授,博士生导师,主要从事植物流体力学和并联机器人研究, E-mail: aiql@zjut.edu.cn

## 引言

具缘纹孔是裸子植物木材管胞间水分及营养物质输导的主要通道,相邻管胞之间的纹孔往往成对存在,每个管胞有几十至数百个具缘纹孔对,将管胞之间相互连接起来,构成树木中主要的物质流通体系<sup>[1]</sup>。因此,植物管胞的导水率与水分在纹孔中的流动特性和规律紧密相关,一直受到各国学者的关注<sup>[2-6]</sup>。

长期以来对植物体内水分传输的研究主要是通过植物学解剖和观测试验。由于纹孔尺寸微小、结构复杂,单凭植物生理学手段很难从微观角度探析纹孔内部复杂的流动现象和流动机理。一些学者开始利用流体建模手段辅助研究植物体内部的流动机理<sup>[7]</sup>。LANCASHIRE等<sup>[8]</sup>制作了放大的具缘纹孔实物模型进行试验,根据试验结果推导出针叶树管胞的流动阻力模型。SPERRY等<sup>[9-10]</sup>对被子植物和裸子植物的纹孔膜进行流体建模分析,得出被子植物纹孔的水流阻力约为裸子植物的3.3~44倍。SCHULTE<sup>[11]</sup>利用Comsol软件对云杉树的纹孔水分流动进行了数值模拟,计算得到纹孔的水动力阻力。还有一些研究对纹孔膜进行动力学建模,探讨纹孔在木质部栓塞修复中的作用<sup>[12-14]</sup>。目前研究仅对纹孔进行简单的流体力学建模,建立的理论模型没有考虑纹孔各组成部分的流阻特性,也没有系统地研究纹孔结构对水分传输的影响规律。

本文采用流体建模和数值模拟的方法对带纹孔塞具缘纹孔的流动阻力特性进行研究,揭示不同结构纹孔的水分流动特性及其规律,以获得对植物体内水分传输更深入的认识。

## 1 纹孔流体动力学建模

### 1.1 纹孔结构模型

常见的纹孔根据纹孔缘是否突起分为单纹孔和具缘纹孔,具缘纹孔又根据纹孔膜上是否存在纹孔塞分为均匀膜具缘纹孔和带纹孔塞具缘纹孔<sup>[2]</sup>。典型的带纹孔塞具缘纹孔结构如图1所示,图1a为纹孔透视图<sup>[15]</sup>,其中纹孔塞不透水,水分通过塞缘上的微孔流过,该类纹孔常见于裸子植物针叶类树木中。由于带纹孔塞的具缘纹孔内部结构和流动现象相比其他类型的纹孔要更复杂,本文选择带纹孔塞的具缘纹孔进行研究。

文献<sup>[16]</sup>提到云杉树的具缘纹孔直径为10.0 μm,纹孔膜厚度为0.05 μm。而在文献<sup>[17]</sup>中,该植物纹孔直径达到19.0 μm,纹孔膜厚度为0.2 μm,并且观察到在植物不同部位中纹孔的结构

和尺寸变化很大。可见同一种植物中纹孔的结构参数都不一样,不同类型植物的纹孔直径、纹孔膜厚度、塞缘空隙等结构参数差异则更为显著。因此,有必要针对不同的纹孔结构对纹孔水分传输的影响进行系统研究,分析不同结构参数对纹孔流动阻力特性的影响规律。

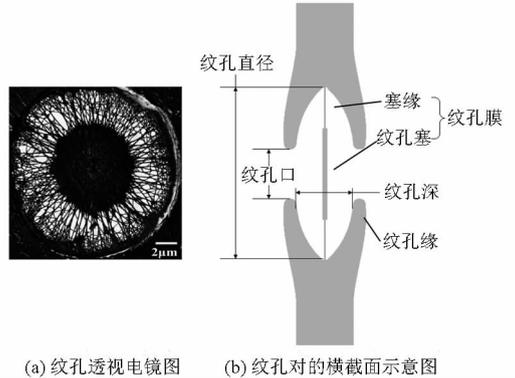


图1 带纹孔塞具缘纹孔的结构示意图

Fig.1 Schematic of torus-margo bordered pit

### 1.2 流体力学建模

以单个纹孔对中的水分流动为研究对象,纹孔口外围圆柱状区域作为进口和出口流动区域,且假定纹孔口、纹孔塞和纹孔缘截面均为规则的圆形,纹孔水分流动示意图如图2所示,图中箭头表示水分流动的方向, $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $\dots$ 、 $Z_7$ 分别表示截面1、2、 $\dots$ 、7。

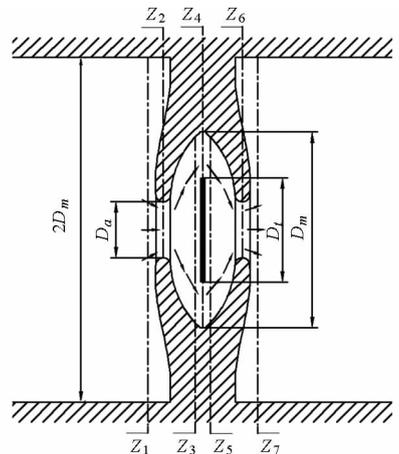


图2 纹孔水分流动示意图

Fig.2 Schematic of water flow in border pit

从图2可以看出,流体经过纹孔口时,纹孔缘的突起结构会造成流通截面的收缩,改变流体的流动方向,从而引起速度场的迅速改变,产生局部能量损失。而流体通过纹孔膜时,塞缘的多孔结构将流体分成多股流体,而多股流体在通过无数个微孔后的不规则汇合必然互相干扰跳动,增加流体间的摩擦、碰撞以及局部漩涡<sup>[18]</sup>。可见截面 $Z_2$ 、 $Z_4$ 和 $Z_6$ 类似于节流装置,水流通过后必然会产生较大的局部能量损失,从而在截面前后产生静压力差。假设通过纹孔的流体为理想的不可压缩流体,且作定常流动,

则可以用流体流动的能量守恒定律分析纹孔内流体的流动。

以纹孔口和纹孔膜为对象,分别取上、下游截面分析。图2中 $Z_2$ 为流体经过第1个纹孔口所在的截面, $Z_1$ 和 $Z_3$ 为 $Z_2$ 上、下游的截面; $Z_4$ 为纹孔膜所在截面, $Z_3$ 和 $Z_5$ 为纹孔膜 $Z_4$ 上、下游的截面; $Z_6$ 为第2个纹孔口所在的截面, $Z_5$ 和 $Z_7$ 分别为 $Z_6$ 上、下游的截面。首先对流体经截面 $Z_1$ 流至截面 $Z_2$ 进行能量守恒分析, $Z_1$ 到 $Z_2$ 的伯努利方程为

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

其中, $\xi_1 \frac{v_2^2}{2g}$ 为局部阻力损失, $\lambda \frac{L_1 v_1^2}{2Dg}$ 为沿程阻力损失。在纹孔流动中,沿程阻力相比局部阻力损失非常小,可忽略不计,则式(1)为

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

同理,对 $Z_2$ 到 $Z_3$ , $Z_3$ 到 $Z_4$ , $\dots$ , $Z_6$ 到 $Z_7$ 建伯努利方程,得到

$$\begin{cases} \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + \xi_1 \frac{v_2^2}{2g} \\ \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 = \frac{p_3}{\rho g} + \frac{v_3^2}{2g} + z_3 + \xi_2 \frac{v_3^2}{2g} \\ \vdots \\ \frac{p_6}{\rho g} + \frac{v_6^2}{2g} + z_6 = \frac{p_7}{\rho g} + \frac{v_7^2}{2g} + z_7 + \xi_6 \frac{v_7^2}{2g} \end{cases} \quad (3)$$

式中  $p_1, p_2, \dots, p_7$ ——截面1、2、 $\dots$ 、7的压力, Pa  
 $\rho$ ——流体密度, kg/m<sup>3</sup>  
 $g$ ——重力加速度, m/s<sup>2</sup>  
 $v_1, v_2, \dots, v_7$ ——截面1、2、 $\dots$ 、7的流速, m/s  
 $z_1, z_2, \dots, z_7$ ——截面1、2、 $\dots$ 、7位置水头, m  
 $\xi_1$ ——液体经 $Z_1$ 至 $Z_2$ 的局部阻力系数,  $\xi_2, \xi_3, \dots, \xi_6$ 同理

式(3)中各方程相加,得

$$\frac{p_1 - p_7}{\rho g} = z_7 - z_1 + \xi_1 \frac{v_2^2}{2g} + \xi_2 \frac{v_3^2}{2g} + \xi_3 \frac{v_4^2}{2g} + \xi_4 \frac{v_5^2}{2g} + \xi_5 \frac{v_6^2}{2g} + \xi_6 \frac{v_7^2}{2g} \quad (4)$$

式中 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_6$ 与雷诺数 $Re$ 、纹孔各部分结构的几何形状、壁面粗糙度有关。

由连续性方程可得

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 = \dots = v_7 A_7 \quad (5)$$

式中 $A_1, A_2, A_3, A_5, A_6, A_7$ ——截面1、2、3、5、6、7的通流面积, m<sup>2</sup>

$A_4$ ——截面4的通流面积,为纹孔塞缘上所有微孔面积之和, m<sup>2</sup>

$Z_1$ 与 $Z_7$ 直径相等,为纹孔直径的2倍;考虑到 $Z_3$ 和 $Z_5$ 截面接近 $Z_4$ 截面,可认为截面直径等于纹孔直径,则由直径关系可得出 $A_1 = A_7 = 4A_3 = 4A_5$ ,设 $\Delta p = p_1 - p_7$ ,并将式(5)代入式(4)得

$$\frac{\Delta p}{\rho g} = \frac{v_1^2}{2g} \left[ (\xi_1 + \xi_5) \left( \frac{A_1}{A_2} \right)^2 + \xi_3 \left( \frac{A_1}{A_4} \right)^2 + 16(\xi_2 + \xi_4) + \xi_6 \right] + z_7 - z_1 \quad (6)$$

纹孔总流阻系数计算公式为

$$\xi = (\xi_1 + \xi_5) \left( \frac{A_1}{A_2} \right)^2 + \xi_3 \left( \frac{A_1}{A_4} \right)^2 + 16(\xi_2 + \xi_4) + \xi_6 \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)得

$$\xi = \frac{\pi^2 D_m^4}{8Q^2} \left[ \frac{\Delta p}{\rho} - g(z_7 - z_1) \right] \quad (8)$$

式中  $D_m$ ——纹孔直径, m

$Q$ ——纹孔的平均流量, m<sup>3</sup>/s

$A_1$ 与纹孔直径 $D_m$ 有关。 $A_2$ 与纹孔口直径 $D_a$ 有关。 $A_4$ 由塞缘的总面积、塞缘上的微孔直径 $d$ 和微孔个数 $n$ 共同决定,而塞缘面积又取决于纹孔直径 $D_m$ 和纹孔塞直径 $D_i$ 。

因此,由式(7)可以看出,单个纹孔的总流阻系数 $\xi$ 与纹孔直径、纹孔口直径、纹孔膜的形状构成以及雷诺数和纹孔壁面粗糙度等因素有关。雷诺数与通流截面直径有关,而壁面粗糙度和沿程阻力相对纹孔膜等局部结构的影响较小,可忽略不计,因此,可以认为纹孔膜、纹孔塞和纹孔口的大小,以及塞缘上微孔的大小和孔个数等几何结构是影响纹孔流动系数的主要因素。式(7)可以看成与 $D_m, D_a, D_i, n$ 和 $d$ 相关的多元微分方程,即

$$\xi = f(D_m, D_a, D_i, n, d) \quad (9)$$

对于其他类型的纹孔,如单纹孔和均匀纹孔膜的具缘纹孔等纹孔类型,结构比带纹孔塞具缘纹孔更为简单,并且只是在纹孔缘、纹孔膜等结构参数上具有不同的取值,文中的流体力学建模方法对其他类型的纹孔仍然适用。

综合上述分析可以看出,纹孔流阻系数 $\xi$ 的精确解很难通过直接求解微分方程得到,涉及到的一些流动参数需要试验来确定,考虑到纹孔内流动现象复杂难以对纹孔两侧的压力、流量等流动参数进行测量,本文通过数值模拟的方法建立纹孔的流体仿真模型,获取试验难以得到的纹孔的压降、流量、速度和压力分布等流场参数。

## 2 数值模拟

### 2.1 多孔介质模型构建

纹孔膜上的塞缘是由植物纤维组成的具有很多

微孔的网状薄膜,直接建模与求解传输方程非常困难。考虑到纹孔塞缘多为均匀的网状多孔结构,将塞缘看作多孔介质,均匀且各项同性,采用多孔介质模型来模拟塞缘部分的压力损失。VALLI 等<sup>[19]</sup>曾用多孔介质模型模拟均匀的纤维薄膜层,结果证明多孔介质方法可以较准确地预测薄膜层的流动阻力。

在考察多孔介质模型压力损失时,通过 N-S 方程中源项  $S_\phi$  定义多孔介质对流体的流动阻力,即塞缘的压力损失。该源项  $S_\phi$  由 Darcy 粘性阻力项和惯性损失项组成,即

$$S_\phi = \frac{1}{\alpha} \mu u + \frac{1}{2} C_2 \rho |u| u \quad (10)$$

式中  $\frac{1}{\alpha}$ ——多孔介质渗透率,也称粘性阻力系数

$u$ ——流体速度, m/s

$C_2$ ——惯性阻力系数

$\mu$ ——动力粘度, Pa·s

在设置多孔介质时,粘性阻力系数与惯性阻力系数是 2 个重要的参数,其参数的正确与否决定模拟的精度,采用 Ergun 模型求解粘性阻力系数与惯性阻力系数<sup>[20]</sup>,公式为

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{150}{D_p^2} \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \quad (11)$$

$$C_2 = \frac{1.75}{D_p} \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \quad (12)$$

式中  $\varepsilon$ ——孔隙率

$D_p$ ——多孔介质固体颗粒平均等效直径, m

## 2.2 计算模型及网格划分

由于木质部中流体的雷诺数  $Re$  较小,一般情况下流动状态为层流<sup>[7]</sup>。但当流体流经纹孔膜时,受到塞缘多孔结构截流扰动的影响,会产生较大的能量损失,局部可能存在湍流。因此在计算模型选择时,采用低雷诺数  $k-\varepsilon$  两方程湍流模型对纹孔流动进行数值模拟分析。

采用商用流体力学计算软件 Fluent 6.3 建立纹孔通道流动的三维 CFD 模型,并进行了分析。计算模型如图 3 所示,包括流体进口、出口、塞缘多孔介质层和纹孔腔内流域等部分,为减小边界的影响,分别选择两侧纹孔口外围圆柱状区域为进、出口流动区域,取圆柱区域的直径为  $2D_m$ ,长度为  $D_m$ 。

考虑到纹孔中的纹孔缘和纹孔膜上小孔结构的不规整性,对计算区域整体进行四面体或六面体混合单元的非结构网格划分。预计流体在纹孔膜前后速度梯度比较大,因此对纹孔膜及其前后网格进行细化。而在纹孔缘突起处,界面曲率变化较大,预计流体法相和切向速度梯度均会较大,对纹孔缘附近垂直于壁面方向的网格尺寸也进行了细化(图 3b)。

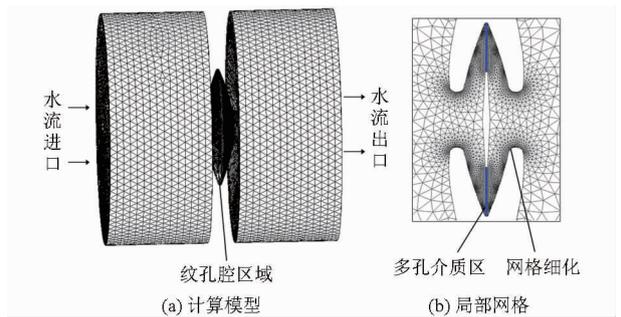


图3 计算模型和局部网格划分示意图

Fig. 3 Schematic of computational model and local mesh

以纹孔进出口压降预测精度为依据,进行了网格无关性检验,当预测的压降差异在 1% 以内时,可认为网格数对计算结果已没有影响。

## 2.3 边界条件

通过纹孔的流体看作基于压力、隐式、定常、不可压缩的黏性液体,设定密度为  $998.2 \text{ kg/m}^3$ ,运动黏度为  $1.002 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。采取光滑无滑移壁面条件,进口设置为速度入口,流体初始速度设置为最大值  $10^{-4} \text{ m/s}$  的速度抛物曲线,出口采用压力出口(表压为零)。

## 2.4 仿真计算

首先通过数值模拟计算出纹孔的总压降和流量,分析纹孔内流场、速度和压力分布情况,得出各部分结构流阻在纹孔总流阻中占的比重。分别改变各部分尺寸参数建立对应的模型,计算出流阻系数随纹孔直径、纹孔口大小、纹孔塞直径、纹孔膜等参数的变化规律。最后讨论了纹孔塞不同位置对纹孔流动阻力的影响。

## 3 计算结果与讨论

### 3.1 各组成部分流阻分析

具缘纹孔仿真模型的结构参数为:纹孔直径  $15.0 \mu\text{m}$ ,纹孔口直径  $4.3 \mu\text{m}$ ,纹孔塞直径  $7.5 \mu\text{m}$ ,纹孔深  $3.6 \mu\text{m}$ ,纹孔膜厚度  $0.2 \mu\text{m}$ ,纹孔膜孔隙率 0.44,纹孔膜微孔平均直径  $0.4 \mu\text{m}$ 。其中纹孔口、纹孔塞、纹孔膜、纹孔深度等参数的统计平均值引自文献[12]和[15],纹孔膜微孔直径和纹孔膜厚度引自文献[12],对于带纹孔塞的具缘纹孔,其纹孔膜厚度和微孔直径即塞缘的厚度和微孔直径。

为分析纹孔缘、纹孔塞和塞缘等部分的结构对纹孔流动的影响,在最初的计算模型中只建立纹孔通道而没有纹孔缘和纹孔膜,如图 4a 所示,流体通过纹孔通道中心速度比两侧流速大,由于通道口较大,流体流速较为缓和。

加入纹孔缘后模型的流场如图 4b 所示,在纹孔

口处水流因流动截面缩小速度急剧增大,没有纹孔膜的影响,纹孔腔内水分只在纹孔口径大小的水平流域内流动,相邻纹孔缘间的大部分水分没有参与到流动中来。

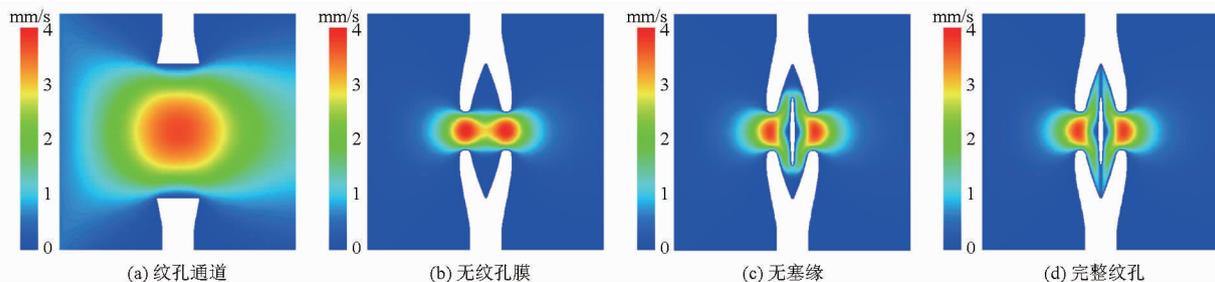


图4 纹孔中流体的速度分布云图

Fig.4 Velocity distribution contours of flow through pit

最后,在计算模型中加入塞缘组成完整的带纹孔塞具缘纹孔,从图4d可以看到流体充满了整个纹孔腔,这是由于塞缘起到了截流的作用,流体不能快速从局部小孔通过而被迫流向纹孔膜的远端,从而带动纹孔腔中的水分都参与到流动中。纹孔的流动阻力损失可以用纹孔模型的进、出口压降来衡量。当模型中只有纹孔通道,没有纹孔缘、纹孔塞和塞缘等结构时,纹孔的压降很小,这表明纹孔通道的流阻非常小。随着模型中加入纹孔缘、纹孔塞和塞缘,纹孔压降逐渐增大,根据计算得到的压降分析纹孔各部分的结构流阻,纹孔通道的沿程损失很小,可忽略不计,无纹孔膜模型的压降视为纹孔缘造成的压力损失;纹孔塞带来的压力损失可以由无塞缘模型的压降减去无纹孔膜模型的压降得到;塞缘造成的压力损失则由完整纹孔模型的压降减去无塞缘模型的压降得到。各组成部分的压降除以纹孔总压降反映出该结构在纹孔总流阻中占的比重,计算结果如表1所示。

表1 纹孔各结构流阻比重

Tab.1 Fraction of resistance to different components of bordered pit

组成部分	压降/Pa	占总流阻比例/%
纹孔缘	26.7	8.5
纹孔塞	52.8	16.8
塞缘	234.1	74.7

### 3.2 纹孔结构对流动阻力的影响

在带纹孔塞具缘纹孔结构参数的基础上,改变纹孔各结构的尺寸,通过数值模拟计算出纹孔两侧的总压降  $\Delta p$  和平均流量  $Q$ ,再根据式(8)计算出纹孔总流阻系数  $\xi$ ,分析纹孔各结构尺寸参数变化对流动阻力的影响。

#### 3.2.1 纹孔直径

对不同直径纹孔的流动进行了仿真。改变纹孔

在模型中加入纹孔塞后,因受到纹孔塞的阻碍,流体经纹孔缘和纹孔塞的间隙从纹孔塞周围流过,图4c流场的速度分布显示,大部分流体只在靠近纹孔塞不到50%的纹孔腔区域内流动。

直径  $D_m$  的大小,对纹孔尺寸进行等比缩放。计算结果如表2所示。

表2 纹孔直径对流动阻力的影响

Tab.2 Influence pit diameter on pit flow resistance

纹孔直径 $D_m/\mu\text{m}$	平均流量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	压降 $\Delta p/\text{Pa}$	纹孔总流阻 系数 $\xi$
10.0	$1.57 \times 10^{-14}$	468.8	$3.76 \times 10^8$
12.0	$2.26 \times 10^{-14}$	390.8	$3.13 \times 10^8$
15.0	$3.53 \times 10^{-14}$	313.6	$2.51 \times 10^8$
18.0	$5.10 \times 10^{-14}$	272.4	$2.18 \times 10^8$
21.0	$6.93 \times 10^{-14}$	236.8	$1.90 \times 10^8$

由表2可知,随着纹孔直径增大,通过纹孔的平均流量增大,总压降明显减小,流阻系数也减小,减小约49.5%。这表明,随着纹孔直径增大,纹孔口和纹孔膜的过流面积就会增加,当流速不变时,纹孔内平均流量将增大,同时使纹孔的压降与流阻系数减小。

#### 3.2.2 纹孔口直径

在其他结构参数不变的情况下,改变纹孔口直径  $D_a$  的计算结果如表3所示。

表3 纹孔口直径对流动阻力的影响

Tab.3 Influence of aperture diameter on pit flow resistance

纹孔口直径 $D_a/\mu\text{m}$	平均流量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	压降 $\Delta p/\text{Pa}$	纹孔总流阻 系数 $\xi$
2.1	$3.53 \times 10^{-14}$	604.4	$4.84 \times 10^8$
3.0	$3.53 \times 10^{-14}$	390.4	$3.13 \times 10^8$
4.3	$3.53 \times 10^{-14}$	313.6	$2.51 \times 10^8$
5.7	$3.53 \times 10^{-14}$	273.2	$2.19 \times 10^8$
7.2	$3.53 \times 10^{-14}$	243.2	$1.95 \times 10^8$

由表3可知,其他结构参不变,纹孔口直径变化时,纹孔的平均流量是一定的(因为设置的入口流速都一样,而纹孔直径不变时,平均流量不变)。随着纹孔口增大,纹孔的总压降和流阻系数减小,流阻

系数减小约 59.8%。这是因为随着纹孔口增大,意味着纹孔缘突起结构变短,流体流通过纹孔口时局部阻力损失减少,这就使纹孔的总压降与流阻系数都减小。

根据前文的方法计算出纹孔缘的流阻占纹孔总流阻的比重,在纹孔口直径较小时,纹孔缘的流阻占纹孔总流阻的 44.9%,随着纹孔口直径增大,纹孔缘的流阻只占到总流阻的 1.3%。

### 3.2.3 纹孔塞直径

在其他结构参数不变的情况下,改变纹孔塞直径  $D_i$  的计算结果如表 4 所示。

表 4 纹孔塞直径对流动阻力的影响

Tab. 4 Influence of torus diameter on pit flow resistance

纹孔塞直径 $D_i/\mu\text{m}$	平均流量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	压降 $\Delta p/\text{Pa}$	纹孔总流阻 系数 $\xi$
4.5	$3.53 \times 10^{-14}$	253.2	$2.03 \times 10^8$
5.9	$3.53 \times 10^{-14}$	278.0	$2.23 \times 10^8$
7.4	$3.53 \times 10^{-14}$	313.6	$2.51 \times 10^8$
8.9	$3.53 \times 10^{-14}$	378.8	$3.03 \times 10^8$
10.4	$3.53 \times 10^{-14}$	486.4	$3.90 \times 10^8$

由表 4 可知,纹孔塞大小不影响纹孔的平均流量。但是随着纹孔塞直径增大,纹孔的总压降和流阻系数明显增大,流阻系数增大约 92.2%。这是因为随着纹孔塞变大,在纹孔膜直径一定的情况下,纹孔缘面积减小,通过纹孔缘的过流面积就减小,而当平均流量不变时,流经纹孔膜的速度就会增加,局部阻力损失增大,从而使纹孔的压降增加,流阻系数增大。

在纹孔塞直径较小时,纹孔塞的流阻只占纹孔总流阻的 10.0%,随着纹孔塞直径增大,纹孔塞的流阻最大可占纹孔总流阻的 23.1%。

### 3.2.4 纹孔深度

纹孔深度为 2 个相邻纹孔缘之间的距离,纹孔深度决定纹孔腔大小,直接影响到水分在纹孔中的流动效率。在其他结构参数不变的情况下,改变纹孔深度  $h$ ,计算结果如表 5 所示。

表 5 纹孔深度对流动阻力的影响

Tab. 5 Influence of pit depth on pit flow resistance

纹孔深度 $h/\mu\text{m}$	平均流量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	压降 $\Delta p/\text{Pa}$	纹孔总流阻 系数 $\xi$
1.8	$3.53 \times 10^{-14}$	676.8	$5.42 \times 10^8$
2.6	$3.53 \times 10^{-14}$	438.8	$3.51 \times 10^8$
3.6	$3.53 \times 10^{-14}$	313.6	$2.51 \times 10^8$
4.6	$3.53 \times 10^{-14}$	288.4	$2.31 \times 10^8$
5.8	$3.53 \times 10^{-14}$	252.8	$2.02 \times 10^8$

由表 5 可知,纹孔深度增大时,纹孔的平均流量

不变。随着纹孔深度变大,纹孔的总压降和流阻系数减小,流阻系数减小约 62.7%。这是因为随着纹孔深度变大,纹孔缘和纹孔膜之间的间隙变大,整个纹孔腔体变大,使得纹孔内的流动变得平缓,局部阻力损失减少,使纹孔的压降减小,流阻系数减小。

### 3.2.5 塞缘厚度

在其他结构参数不变的情况下,改变纹孔塞缘厚度的计算结果如表 6 所示。

表 6 塞缘厚度对流动阻力的影响

Tab. 6 Influence of thickness of margo on pit flow resistance

塞缘厚度 $T_m/\mu\text{m}$	平均流量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	压降 $\Delta p/\text{Pa}$	纹孔总流阻 系数 $\xi$
0.10	$3.53 \times 10^{-14}$	274.8	$2.20 \times 10^8$
0.15	$3.53 \times 10^{-14}$	302.8	$2.42 \times 10^8$
0.20	$3.53 \times 10^{-14}$	313.6	$2.51 \times 10^8$
0.25	$3.53 \times 10^{-14}$	339.2	$2.72 \times 10^8$
0.30	$3.53 \times 10^{-14}$	354.8	$2.84 \times 10^8$

由表 6 可知,随着塞缘厚度的增加,纹孔平均流量不变,纹孔的总压降和流阻系数增大,流阻系数增大约 29.1%。这是因为随着塞缘厚度增大,塞缘上的纤维数量变多,流体通过纹孔塞缘的多孔区域受到的阻力变大,使纹孔的总压降和流阻系数增大。

### 3.2.6 塞缘孔隙率和微孔直径

图 5 给出了纹孔流阻系数随塞缘上微孔平均直径和孔隙率的变化规律。可以看出,微孔直径一定的情况下,随着孔隙率的增大,纹孔的流动阻力越小;而在孔隙率一定的情况下,微孔直径越小,流阻系数越大。这是因为塞缘截面的孔隙率增大,流体可通过的有效截面积增大,受到的结构阻力减小,从而提高水分的输导率。当孔隙率一定时,虽然塞缘上微孔的总面积不变,但是随着微孔直径变小,小孔的数量必然增多,水流需要通过更多且更小的孔道,必然增加水分的流动阻力,从而也降低了纹孔的水分输导率。

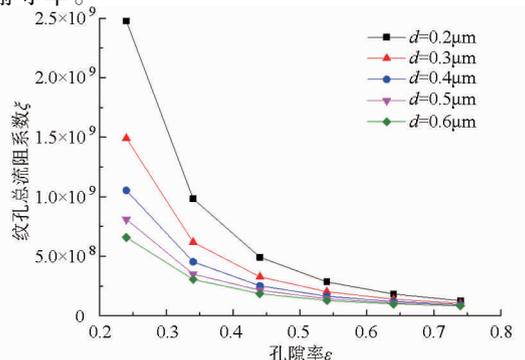


图 5 塞缘微孔直径和孔隙率对流阻的影响

Fig. 5 Influence of diameter of pore and porosity of margo on pit flow resistance

分析纹孔各结构的流阻可以得出,在纹孔塞缘孔隙率为 0.24,微孔直径为  $0.6\ \mu\text{m}$  时,纹孔的流动阻力主要来自塞缘,占纹孔总流阻的 98.3%,此时纹孔缘和纹孔塞的流阻几乎可忽略。随着孔隙率和微孔直径的增大,塞缘透水性增大,流阻下降,纹孔缘和纹孔塞阻力所占比重增大,当塞缘的孔隙率和微孔直径达到最大值时( $\varepsilon = 0.74, d = 0.6\ \mu\text{m}$ ),塞缘的阻力所占比重下降到 24.4%,纹孔缘的阻力占 25.6%,此时,纹孔塞的阻力占了纹孔总流阻的 50%。

### 3.3 纹孔塞位置对流动阻力的影响

以上纹孔流阻特性的分析都是假定纹孔膜处在纹孔腔的中心位置。实际上,构成纹孔塞缘的植物纤维具有弹性,当纹孔膜两侧的压力差超过一定值时,压力会将纹孔膜推向压力低的一侧,并且在压力足够大时,纹孔塞就会把纹孔口堵塞起来<sup>[16]</sup>。可见纹孔膜所处的位置还会影响到纹孔的水流特性。

假设纹孔塞受力不变形,塞缘上的纤维受力均匀且有足够拉伸强度不断裂,纹孔塞移动方向垂直于纹孔塞平面。在带纹孔塞具缘纹孔结构参数的基础上,对不同的纹孔塞偏离中心距离  $y$  时的纹孔流动进行建模,在实际计算中,纹孔膜(塞缘)的孔隙率不变,塞缘上微孔大小随着塞缘面积增大而等比例增大。

图 6 给出了纹孔塞处于不同位置时纹孔阻力压降的变化。随着纹孔塞偏移中心距离变大,纹孔流动的阻力压降先是小幅度减小,约减小 0.4%,之后开始逐渐增大,纹孔塞接近纹孔缘时压降急剧增大,在无限接近纹孔缘时阻力压降达到无限大。这是因

为当纹孔膜开始偏移时(图 7b),塞缘受到拉伸,面积变大,塞缘上小孔也增大,此时流体流经纹孔膜的能量损失减小,压降减小,但随着纹孔塞进一步偏移(图 7c~7g),纹孔塞和纹孔缘间距变小,纹孔腔的过流面积减小,当流量一定时,流速就会增加,引发的能量损失大于纹孔膜上小孔变大所减少的流阻损失,从而使纹孔两侧压降增大。当纹孔塞偏移至靠近纹孔缘时,流场中出现明显的瓶颈效应(图 7g),此时流动阻力进一步增大。以上结果印证了文献[16]提到的,具缘纹孔的纹孔塞具有阀门的作用,水流很快时,水流压力会把纹孔塞推向一面,纹孔塞就会把纹孔口堵塞起来,使得流动阻力增大,进而起到减缓水流的效果。

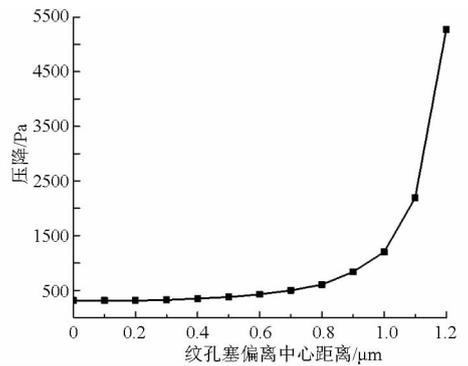


图 6 纹孔塞位置对阻力特性的影响

Fig. 6 Influence of torus positions on pit flow resistance

## 4 结论

(1)建立了纹孔水分流动的伯努利流体动力学模型,分析得出纹孔直径、纹孔口直径、纹孔塞直径以及塞缘微孔直径和孔隙率等参数是影响纹孔流阻

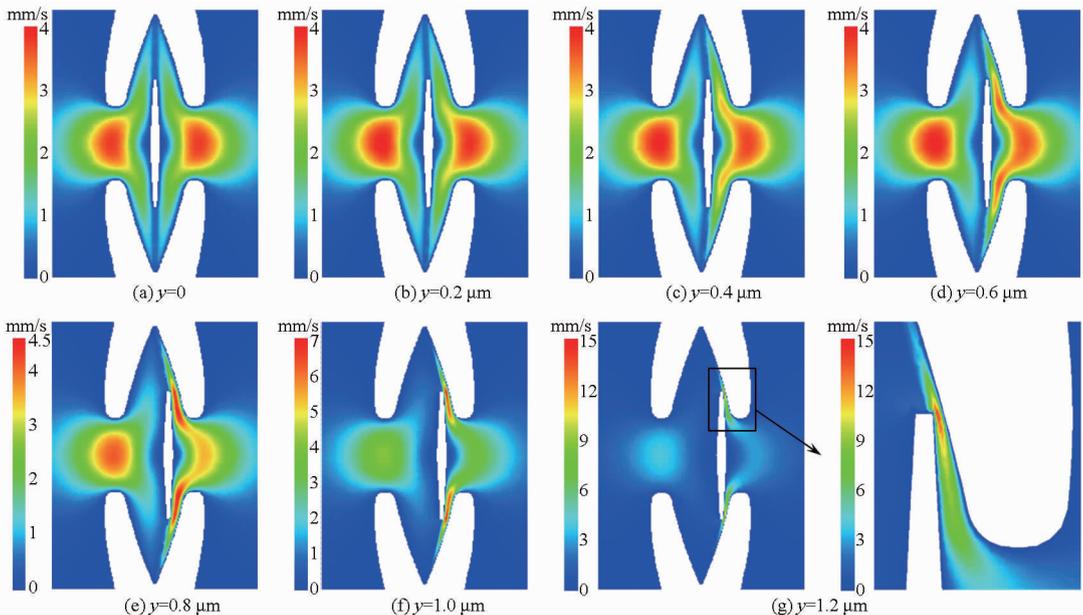


图 7 纹孔塞处于不同位置时的速度分布云图

Fig. 7 Velocity distribution contours of flow through pit with torus at different positions

的主要因素。本文对带纹孔塞具缘纹孔的流体力学建模方法适用于其他不同结构的纹孔。

(2) 计算结果表明, 塞缘的流阻最大, 占纹孔总流阻的 74.7%, 纹孔塞占 16.8%, 纹孔缘占 8.5%。纹孔的结构对流动阻力影响比较大, 纹孔直径越大, 纹孔的流动阻力就越小; 纹孔口越小, 纹孔的流动阻力越大; 纹孔塞尺寸越大, 纹孔流动阻力越大; 纹孔

膜越厚, 纹孔流动阻力也越大; 纹孔腔深度越深, 则纹孔阻力越小; 随着塞缘的微孔大小和孔隙率越大, 纹孔的流动阻力越小。

(3) 纹孔膜所处的位置影响纹孔的水流特性, 随着纹孔塞偏离中心位置变大, 纹孔的流动阻力先减小、后增大, 当纹孔塞越靠近纹孔口, 纹孔流动阻力越大, 说明纹孔塞起到控制水分流动的作用。

#### 参 考 文 献

- 1 佟永萍, 赵广杰. 杉木管胞具缘纹孔膜超微构造[J]. 林业科学, 2007, 43(8): 151 - 153.  
TONG Yongping, ZHAO Guangjie. Structure of bordered pit membrane of *Cunninghamia lanceolata* tracheid[J]. Forest Research, 2007, 43(8): 151 - 153. (in Chinese)
- 2 TYREE M T, ZIMMERMANN M H. Xylem structure and the ascent of sap[M]. 2nd ed. Berlin: Springer, 2002.
- 3 PITTERMANN J, SPERRY J S, HACKE U G, et al. Torus-margo pits help conifers compete with angiosperms[J]. Science, 2005, 310(5756): 1924.
- 4 LUCAS W J, GROOVER A, LICHTENBERGER R, et al. The plant vascular system: evolution, development and functions[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2013, 55(4): 294 - 388.
- 5 STROOCK A D, PAGAY V V, ZWIENIECKI M A, et al. The physicochemical hydrodynamics of vascular plants[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2014, 46: 615 - 642.
- 6 HACKE U G. Functional and ecological xylem anatomy[M]. Berlin: Springer, 2015.
- 7 RAND R H. Fluid mechanics of green plants[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1983, 15: 29 - 45.
- 8 LANCASHIRE J R, ENNOS A R. Modelling the hydrodynamic resistance of bordered pits[J]. Journal of Experimental Botany, 2002, 53(373): 1485 - 1493.
- 9 SPERRY J S, HACKE U G. Analysis of circular bordered pit function I. Angiosperm vessels with homogenous pit membranes[J]. American Journal of Botany, 2004, 91(3): 369 - 385.
- 10 HACKE U G, SPERRY J S, PITTERMANN J. Analysis of circular bordered pit function II. Gymnosperm tracheids with torus-margo pit membranes[J]. American Journal of Botany, 2004, 91(3): 386 - 400.
- 11 SCHULTE P J. Computational fluid dynamics models of conifer bordered pits show how pit structure affects flow[J]. New Phytologist, 2012, 193(3): 721 - 729.
- 12 DOMEK J C, LACHENBRUCH B, MEINZER F C. Bordered pit structure and function determine spatial patterns of air-seeding thresholds in xylem of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*; Pinaceae) trees[J]. American Journal of Botany, 2006, 93(11): 1588 - 1600.
- 13 DELZON S, DOUTHE C, SALA A, et al. Mechanism of water-stress induced cavitation in conifers: bordered pit structure and function support the hypothesis of seal capillary-seeding[J]. Plant, Cell & Environment, 2010, 33(12): 2101 - 2111.
- 14 TIXIER A, HERBETTE S, JANSEN S, et al. Modelling the mechanical behaviour of pit membranes in bordered pits with respect to cavitation resistance in angiosperms[J]. Annals of Botany, 2014, 114(2): 325 - 334.
- 15 VALLI A, KOPONEN A, VESALA T, et al. Simulations of water flow through bordered pits of conifer xylem[J]. Journal of Statistical Physics, 2002, 107(1 - 2): 121 - 142.
- 16 HACKE U G, JANSEN S. Embolism resistance of three boreal conifer species varies with pit structure[J]. New Phytologist, 2009, 182(3): 675 - 686.
- 17 SCHULTE P J, HACKE U G, SCHOONMAKER A L. Pit membrane structure is highly variable and accounts for a major resistance to water flow through tracheid pits in stems and roots of two boreal conifer species[J]. New Phytologist, 2015, 208(1): 102 - 113.
- 18 艾青林, 胥芳, 陈琦, 等. 植物木质部导管梯状穿孔板流动阻力特性研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(8): 143 - 148, 110.  
AI Qinglin, XU Fang, CHEN Qi, et al. Flow resistance characteristics of scalariform perforation plates in plant xylem vessels [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 143 - 148, 110. (in Chinese)
- 19 VALLI A, HYV ÄLUOMA J, JÄSBERG A, et al. Pressure drop for low Reynolds-number flows through regular and random screens[J]. Transport in Porous Media, 2009, 80(2): 193 - 208.
- 20 张烨, 李长友, 马兴灶, 等. 干燥机粮层通风阻力特性数值模拟与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 216 - 221.  
ZHANG Ye, LI Changyou, MA Xingzao, et al. Experiment and numerical simulation of layer resistance parameters in dryer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 216 - 221. (in Chinese)