

The Numerical Simulation of the Spun Lace

Heng Zhang¹, Xiaoming Qian^{1,2}

¹ school of textiles Tianjin Polytechnic University Tianjin, China

² Key Laboratory Advanced Textile Composites Tianjin Polytechnic University, Tianjin, China

Email: m-esp@163.com, qianxiaoming@tjpu.edu.cn

Abstract: This paper according to the spun lacing technology, set up the numerical model based on the simplified water jetting model, and the blended two-phase flow as the multiphase flow model. This paper simulation the water needle after the water jetting from the water needle plate, This paper also study the intensity and the turbulence intensity of the water needle under the $100 \times 10^5 \text{pa}$.

Keywords: Spun lace; Fluent; Numerical model

水刺水针的数值模拟研究

张恒¹, 钱晓明^{1,2}

¹天津工业大学, 天津, 中国, 300160

², 先进复合材料教育部重点实验室, 天津, 中国, 300160

Email: m-esp@163.com, qianxiaoming@tjpu.edu.cn

摘要: 本文根据水刺加固工艺, 将简化的水刺水针模型作为研究模型, 以混合两相流模型作为多相流模型, 对水刺水针自水针板喷射出来后, 在空气中的水针形成过程进行模拟, 并研究了在 $100 \times 10^5 \text{pa}$ 水刺压力下的水刺水针的速度分布、湍流强度分布。

关键词: 水刺; Fluent; 数值模型

1 引言

水刺法又称水力缠结法、水力喷射法、射流喷网法^[1], 它是一种独特的、新型的非织造布加工技术, 它是利用高速高压的水流, 通过喷嘴将压力转变为高度聚集的水射流对纤网进行连续冲击^[2], 纤网中纤维在水针直接冲击力和反射力的双重作用下发生位移、穿插、抱合、缠结, 形成无数的机械结合, 而达到加固纤网的目的^[3]。

水刺水针自水针板中喷射过程在流体力学上面属于水与空气的分相流流动的非淹没性射流^[4], 运动机理较为复杂, 借助 Fluent 思想和计算机仿真能方便有效地分析射流的动静态特性, 这种可视化方法不仅能使流场定性的呈现, 而且能定量地捕捉到流场各处的速度、压力和各耦合强度等重要参数^[5]。

国内外一些学者^[6]对水刺水针射流过程有了一些基础性的研究, 对于水刺水针的能量和水刺过程中纤维的缠结机理有了很好的研究。

本文根据水刺加固工艺, 将简化的水刺水针模型作为研究模型, 以混合两相流模型作为多相流模型, 对水刺水针自水针板喷射出来后, 在空气中的水针形成过程

进行模拟, 并研究了不同水刺压力下的水刺水针的速度分布、湍流强度分布。

2 数值模拟

2.1 物理模型的建立与网格划分

在水刺过程中水刺水针在几百万甚至上千万帕的压力作用下以自由流线的方式自水针板中喷射而出, 在流体力学中属于孔口出流现象, 水刺水针在垂直于流动的任一截面内速度会存在差异, 但是为便于实际的应用研究, 可以认为水射流从喷水板水孔垂直射向相距很近的纤网平面, 计算域边界设置如图所示, 压力入口也就是喷水孔直径为 $100 \mu\text{m}$, 在水针喷射方向上(横向)即压力出口设定为 130mm , 纵向设定为 130mm 。水针喷射压力设定为 $100 \times 10^5 \text{Pa}$ 。

2.2 控制方程

流体流动要受物理守恒定律的支配, 基本的守恒定律包括: 质量守恒、动量守恒、能量守恒 以及紊流输送方程。



Figure 1. Curve: spunlace Physical model
图 1. 水刺物理模型

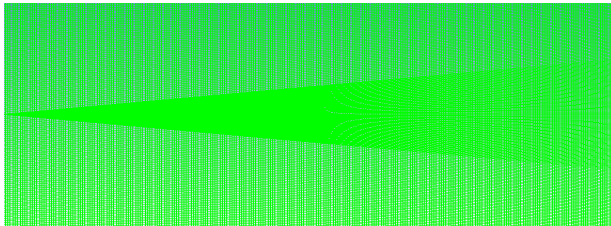


Figure 2. Curve: Mesh diagram
图 2. 网格划分示意图

连续性方程与动量方程是数值模拟中的基本方程。任何流动问题都必须满足质量守恒定律，即单位时间内流体微元体中质量的增加，必须同一时间间隔内流入该微元体的净质量。按照这一定律，可以得出质量守恒方程(mass conservation equation)^[7]。

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

因为水针为不可压、定常流体， $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ ，式可以简化为

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

ρ 是密度， t 是时间， u 、 v 、 w 是速度矢量在 x 、 y 、 z 方向的分量。

动量守恒方程可以表述为微元体中流体的动量对时间的变化率等于外界作用在该微元体上的各种力之和。按照这一定律，可以得出动量守恒方程(momentum conservation equation)^[7]。

水刺水针属于牛顿流体范畴，粘性应力与流体的变形率成正比。

$$\tau_{xy} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial y} + \lambda \text{div}(\mathbf{u}) \quad (3)$$

$$\tau_{yz} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial z} + \lambda \text{div}(\mathbf{u}) \quad (4)$$

$$\tau_{zx} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial x} + \lambda \text{div}(\mathbf{u}) \quad (5)$$

式中， μ 是动力粘度， λ 是第二粘度，一般可取 $\lambda = -2/3\mu$ 。代入基本方程中可得：

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad} u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_x \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad} v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_y \quad (7)$$

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad} w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w \quad (8)$$

水刺水针的射流流场的雷诺数 Re 为 4450~15518，处于高湍流状态，因此采用标准的 $K-\epsilon$ 方程模型，标准的 $K-\epsilon$ 方程的湍动能 K 和湍动耗散率 ϵ 方程可以表示为：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + G_\epsilon - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (10)$$

G_k 是由于平均速度梯度引起的湍动能 K 的产生项， G_b 是由于浮力引起的湍动能 K 的产生项， Y_M 是可压缩湍流脉动膨胀对总湍动耗散率 ϵ 的影响。 μ_t 为湍动粘度

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (11)$$

$$I = 0.16(Re_{D_w})^{-\frac{1}{8}} \quad (12)$$

Re —雷诺系数

D_w —水力直径，一般等于喷水孔孔径大小等于喷水孔孔径大小。

3 数值模拟结果与分析

在水刺加固过程中，纤维缠结效果的与水针能量密切相关，而水针能量又与水刺遍数、水流量、水针压力、喷水孔直径等密切相关，前人^[1]已经得出水针能量与各因素之间的经验公式

$$E = 3.65 * 10^{-4} [y * p * q / (s * b)] / n \quad (13)$$

其中 y 代表喷水孔数, p 代表水刺压力, q 代表水流量, s 代表纤网前进速度, b 代表纤网重量, n 代表水刺头数。

本文对喷水孔直径为 $100\mu\text{m}$, 水刺压力为 $100 \times 105\text{Pa}$ 时水刺水针进行数值模拟分析, 图 3 为水刺水针自喷水孔中喷射出去 6.55×10^{-3} 秒时刻的水刺水针速度分布图。其模拟的出口速度达到 141m/s^2 与经验公式相符合, 在一段距离后流束扩大, 这是由于射流在空气中高速运动, 空气对流束产生巨大的摩擦力与阻力, 射流表面开始断裂、破碎并渗入空气, 并随着流束的继续前进, 破裂不断产生的结果。

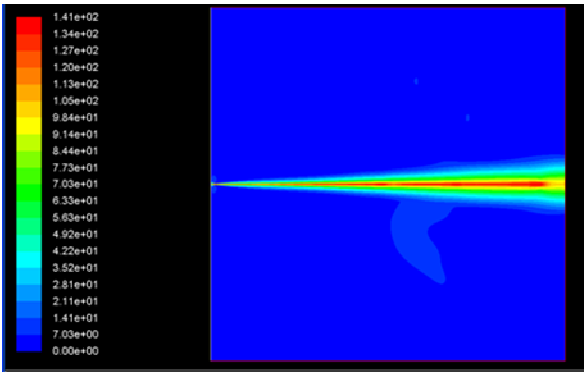


Figure 3. Curve: Velocity Graph
图 3. 速度分布示意图

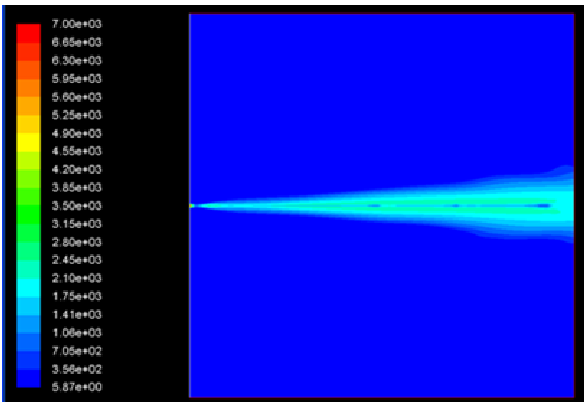


Figure 4. Curve: Turbulence intensity Graph
图 4. 湍流强度分布示意图

图 4 为水刺水针自喷水孔中喷射出去 6.55×10^{-3} 时刻的水刺水针的湍流强度分布图, 可以看出水刺水针在空中飞跃一段距离湍流强度急剧加大。这与其速度分布图的结果相一直。

4 结论

对于水刺水针的数值模拟较好的体现了水刺水针的在空气中喷射的情况, 模拟结果与理论相符合。水刺水针作为非淹没射流进行了两相流分析, 射流的主要部分是水与空气组成的两相混合介质, 水针直径的大小直接影响其对纤维的作用方式, 对水刺水针的数值模拟有助于研究水刺过程中纤维的缠结机理。

References (参考文献)

- [1] Chengbing Guo. Nonwoven[M]. Beijing:Chian Textile & Apparel Press, 2002:112-130.
郭秉臣. 非织造布学[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2002. 112-130
- [2] Mbwana Suleiman Ndar, Xiangyu Jin, et al. Splitting of islands-in-the-sea fibers (PA6/COPET) during hydroentangling of nonwovens[J]. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 2007,2:1-9.
- [3] Mbwana Suleiman Ndar. The Role of Impact Force and Inclined Water Jets on the Performance of Hydroentangled Fabric[D]. Donghua University. 2008. 1-21
- [4] Fujun Wang. Computational Fluid Dynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004:153-183
王福军. 计算流体力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社. 2004:153-183.
- [5] Guolai Yang, Wenhui Zhou, Fei Liu. Simulation of flow field of high -pressure water – jet from nozzle with F L U ENT [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2008, 34(2):49-52
杨国来, 周文会, 刘肥. 基于 F L U ENT 的高压水射流喷嘴的流场仿真[J]. 兰州理工大学学报, 2008, 34(2):49-52
- [6] Davies S, Recent developments in technical nonwovens, Technical Textiles International, June 1996, pp20~23.
- [7] H.k Versteeg, W. Malalasekera, An introduction to computational Fluid Dynamics: the Finite Volume Method. Wiley, New York,1995.