

管内螺旋涡流的数值模拟研究

刘 霏 骆政园 白博峰

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要 本文用数值模拟的方法研究了螺旋扭带在圆管中引发的涡流形成过程与机理, 分别用 RNG $k-\varepsilon$ 和 RSM 模型模拟计算, 并与相关文献的实验结果进行对比, 用更准确的 RSM 模型进行后续研究。在螺旋扭带中, 由于边界层分离, 先出现两个涡, 根据角动量守恒, 这两个涡的旋向与扭带旋向相反, 在主流切向速度的作用下, 这两个涡逐渐衰减, 在衰减过程中, 同样由于边界层分离, 形成与扭带旋向相同的两个涡, 这四个涡会暂时共存, 之后逐渐减弱消失, 随着流动的发展, 由于流线弯曲不稳定, 出现旋向与扭带相同的两个涡, 并一直维持此涡结构。螺旋扭带中的二次流动是在壁面切应力、科氏力和离心力综合作用下产生的。

关键词 螺旋涡; 旋流; RSM; RNG $k-\varepsilon$; 螺旋扭带

中图分类号: TK172 文献标识码: A 文章编号: 0253-231X(2011)12-2060-04

Numerical Study of Helical Vortices in a Circular Pipe

LIU Wen LUO Zheng-Yuan BAI Bo-Feng

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Shaanxi 710049, China)

Abstract The present paper describes the numerical study of the creation process and mechanism of helical vortices induced by a twisted tape inside a circular pipe. The RNG $k-\varepsilon$ and the RSM turbulence model are used, the latter is in better agreement with experimental results, so the RSM turbulence model deserves further investigation. In the region of twisted tape, firstly, as the boundary layer of twisted tape separates, two vortices appeared and strength, they rotate counter relative to the tape twist, due to the conservation law of angular momentum. The two vortices decay as the influence of tangential velocity of the main flow. During their decaying process, another two co-rotating vortices appear due to the boundary layer separation, these four vortices coexist temporarily, then they decay and disappear. As the development of the flow, two co-rotating helical vortices exist as the instability induced by streamlines deformation. Once the twisted tape ends, the co-rotating secondary vortices remain inside the straight pipe. Secondary motion induced by twisted tape inserts is based on wall shear stress, coriolis force and centrifugal force.

Key words helical vortices; swirling flow; RSM; RNG $k-\varepsilon$; twisted tape

0 引言

旋流在工程上应用广泛, 比如在强化换热、增强混合、两相分离以及物料运输等领域中。产生旋流的方法主要有切向进流、安装导流片及旋转管道等, 能产生旋流的部件称为起旋器, 不同起旋器产生的旋流流场特征不同^[1-3]。螺旋扭带结构简单、成本低、强化换热性能好, 目前研究其强化换热规律的较多^[4,5], 但对其引发的旋流的特性和影响参数等方面缺乏认识。Aidun 等^[6]实验研究了短螺旋扭带在圆管中引发的流场, 发现在扭带之后的管中心附近, 出现与扭带旋向相反的流动, 这与其他起旋器引发的流动类似(如旋转射流^[1]), 但该流动具有

周期性特点。Cazan 等^[2,7]通过向水中注入空气泡的可视化方法, 发现了稳定的双螺旋涡二次流动结构, 并用层流模型对整个流场以及螺旋涡的形成过程进行了数值模拟, 模拟结果与实验观察到的螺旋涡轴向位置有较大差异, 且实验中的雷诺数达到了 7.7×10^4 , 实际过程是湍流, 层流模型与实际情况相差较大。

已有的实验研究没有观测螺旋扭带中螺旋涡的产生过程, 而这正是研究螺旋涡形成机理及发展规律的关键。本文采用 RSM 湍流模型对螺旋扭带引发的旋流场进行数值研究, 得到了螺旋涡的形成过程,

收稿日期: 2011-01-09; 修订日期: 2011-11-14

作者简介: 刘 霏 (1988), 女, 安徽池州人, 硕士, 主要从事多相流研究。

并对螺旋涡的形成机理进行分析。

1 模型及方法

本文研究的螺旋扭带结构参数为: 半螺距 $H=60$ mm, 扭带长度取半螺距 60 mm, 扭带厚度 $\delta=3$ mm, 螺旋扭带与圆管壁紧密接触, 圆管直径 $d=25.4$ mm, 全长 $L=18.50d$, 其中螺旋扭带后的圆管长度 $L_1=15.75d$, 采用直角坐标系, 坐标原点位于扭带尾端截面中心, z 轴为流动方向, 见图 1(a) 和图 1(b), 重力沿 x 轴负方向。做如下假设: 单相不可压缩稳定流动, 忽略流体温度的变化。网格划分采用六面体单元的结构化网格, 见图 1(c), 经过网格无关性检验后, 网格单元数为 1067879。

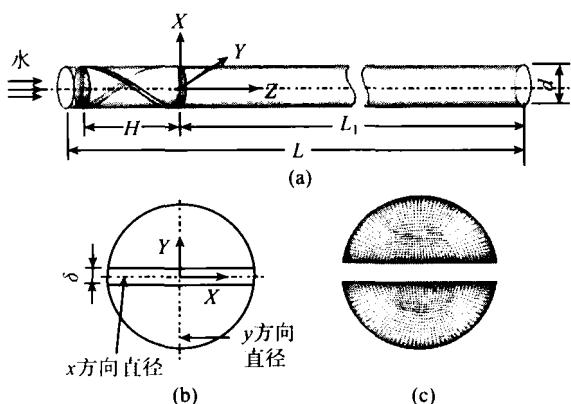


图 1 计算模型 (a) 整个长为 $18.50d$ 的计算区域;
(b) $z=0$ 截面; (c) $z=0$ 截面处结构化网格

Fig. 1 Computational domain (a) full $18.50d$ long computational domain, (b) $z=0$ cross section, (c) cross section at $z=0$ showing the structure grids

选取 RNG $k-\varepsilon$ 和 RSM 两种湍流模型计算并对比。本文模拟工质为水, 其物理性质在整个模拟过程中为常数。计算中涉及的边界条件有: 进口条件为给定进口速度 U_b 、湍流强度 I 及水力直径 D_H , U_b 根据文献 [2] 取 3.03 m/s, $I=5\%$, $D_H=d$; 出口条件按充分发展管流条件处理; 壁面边界为无滑移边界条件。采用 Fluent 软件进行求解, 动量、湍动能和耗散率方程均采用二阶迎风插值格式, 压力-速度耦合采用 SIMPLE 算法。

2 算例验证

Aidun 和 Parshen^[6] 定义了圆管中心处无量纲角速度 ω_n :

$$\omega_n = \frac{\omega_o d}{2U_b} \quad (1)$$

$$\omega_o = \lim_{r \rightarrow 0} \omega = \partial u_t / \partial r \Big|_{r=0} \quad (2)$$

其中, r 是圆管半径; ω_o 是管中心处的角速度; u_t 是切向速度, 计算过程中, 本文取 y 方向直径上的切向速度。 ω_n 反映了管中心处的切向速度变化率, 而螺旋涡会使管中心附近的切向速度发生变化, 因此 ω_n 曲线的周期值反映螺旋涡的螺距。

图 2 是沿流动方向 (z) $25\sim350$ mm 区间内每隔 5 mm 横截面上的实验及数值计算的 ω_n 对比图。实验测得 ω_n 的周期为 80 mm。RNG $k-\varepsilon$ 模型计算的周期值在 $30\sim225$ mm 区域内与实验吻合较好, 在接近管道出口区域与实验偏差很大; RSM 模型在整个流动区域的计算结果与实验值吻合良好。说明 RSM 模型更能好地捕捉螺旋涡的特征, 因此本文选用 RSM 模型开展后续的数值研究。

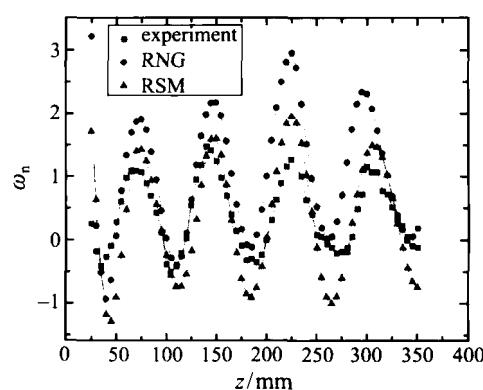


图 2 实验与不同湍流模型得到的 ω_n 值对比

Fig. 2 Comparison of ω_n values with those obtained by experiment and turbulence models

3 计算结果及分析

首先介绍流体流经扭带区域时, 流场中涡结构的变化情况。图 3 反映了螺旋涡在螺旋扭带中的形成过程。由于扭带是对称的, 因此下面分析扭带一侧的流场结构。流体流入扭带时, 由于扭带的出现, 使流体向圆管壁流动 ($\theta=0^\circ$); 扭带是逆时针旋转的, 顺时针流动的流体减少, 同时扭带壁上的流体由于边界层分离形成涡, 涡的旋转方向为顺时针 ($\theta=10^\circ$); 由于涡的中心是低压中心, 在压力差的作用下, 周围流体会被涡卷吸进去, 与龙卷风类似。顺时针流动的流体在涡的作用下, 会全部被卷吸进涡中 ($\theta=15^\circ$); 涡的尺寸不断增大, 但是主流旋转方向与涡相反, 在主流切向速度的作用下, 顺时针旋转的涡摩擦损耗增大, 涡逐渐衰减 ($\theta=15^\circ$ 和 30°); 被卷吸的流体减少, 流体流向圆管与扭带的尖角区域, 流体在此处发生边界层分离, 形成旋转为逆时针的涡 ($\theta=55^\circ$ 和 63°); 逆时针方向旋转的涡与顺时针方向旋转的涡相

互作用不稳定，直到相互抵消而消失($\theta=90^\circ, 140^\circ$)；随着流动的发展，扭带两侧各形成一个与扭带旋向相同的涡，此后一直保持这样的涡结构($\theta=180^\circ$ 和 $z/d=1$)。

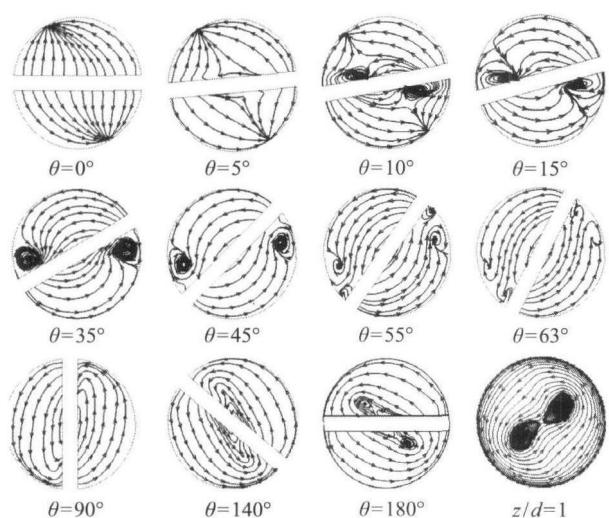


图3 螺旋扭带区域螺旋涡的形成过程

Fig. 3 Helical vortices creation process inside the twisted tape swirl

下面以上半部区域为例对涡的形成机理进行详细分析。在扭带中，出现了三种不同的涡结构：与扭带旋向相反的涡(顺时针旋转)、与扭带旋向相同及相反涡的共存、与扭带旋向相同的涡(逆时针旋转)。

首先分析在扭带入口附近顺时针旋转的涡。图4显示了扭带入口附近静压的变化。在扭带入口，流体在扭带的导流作用下，向圆管壁两边运动，压力在大部分区域分布均匀。流体主要受离心力作用，管中心附近离心力小，与其平衡的静压力也小，管中心附近压力出现负值，流体在截面上沿逆压梯度方向运动，见图4(a)。由于扭带是弯曲的，流体还受到科氏力的作用，压力与科氏力和离心力的合力相平衡，右侧圆管壁的压力高，左侧圆管中心附近的压力低，达到负值。圆管中心附近，靠近右侧的流体在压力差作用下，由高压区向低压区流动，造成流线弯曲；靠近左侧的流体，在科氏力作用下，流线向圆管壁弯曲，见图4(b)。由于流场中存在逆压梯度，扭带左侧低压区的壁面切应力逐渐减小为零，边界层分离形成涡，见图5。流道中的流体，由于惯性，有一种保持原来状态的趋势，即相对于扭带作反向旋转的趋势，根据角动量守恒，涡的旋向与扭带相反。在流场中，圆管中心附近右侧流线已经向左侧弯曲，涡形成之后，流向涡中心被涡卷吸，涡尺寸不断变大。因为扭带的位置在变化，涡相对于扭带做顺时针移动。

在主流切向速度的作用下，涡逐渐衰减，见图3($\theta=30^\circ, 45^\circ$)。

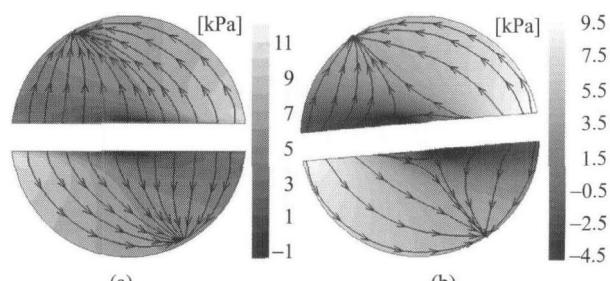


图4 静压与流线图 (a) $\theta=0^\circ$; (b) $\theta=5^\circ$

Fig. 4 Static pressure and streamlines
(a) $\theta=0^\circ$; (b) $\theta=5^\circ$

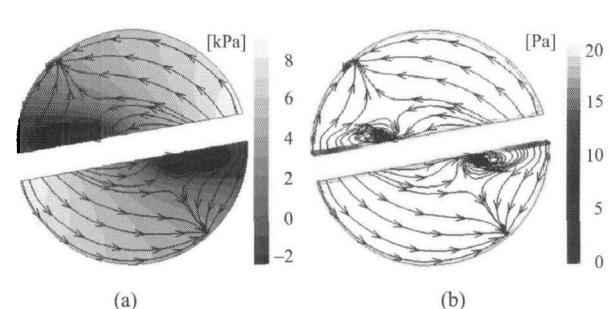


图5 $\theta=10^\circ$ 截面处的流场
(a) 静压与流线图; (b) 壁面切应力与流线图

Fig. 5 Flow field at $\theta=10^\circ$ (a) static pressure and streamlines; (b) wall shear stress and streamlines

顺时针旋转的涡在衰减过程中，周围出现了逆时针旋转的涡。随着顺时针旋转的涡的衰减，离心力减小，低压区回到管中心附近，见图6(a)。随着扭带的旋转，顺时针旋转的涡与扭带壁面越来越远，流体流到尖角区发生边界层分离，尖角区壁面切应力为零，见图6(b)，形成逆时针旋转的涡，与顺时针旋转的涡共存，由于这两个涡的旋向相反，相互之间的摩擦损失很大。当这两个旋向相反的涡强度相当时，会相互抵消而消失，见图3($\theta=90^\circ$)。

图7展示了螺旋涡的形成机理。流体沿着扭带发展一段距离后，在科氏力的作用下，原来在圆管中心的低压区移动到左上方。在压差的作用下，流体向低压区流动，流线向低压区弯曲，见图7(a)。低压区附近的流体流线都发生了大幅度的弯曲变形，流动失稳，形成涡。从切向速度图7(b)可以看出，在低压中心流线弯曲处，靠近管壁的切向速度显著增大，靠近管中心处显著减小，与涡的性质类似。此时径向速度较大，不可忽略，见图7(c)。从涡量图7(d)可以看出，涡量主要集中在低压区域，由于该区流线

发生弯曲, 改变了切向及径向速度场, 涡量较大。从以上可以看出, 螺旋扭带中的二次流动是在壁面切应力、科氏力和离心力综合作用下产生的。

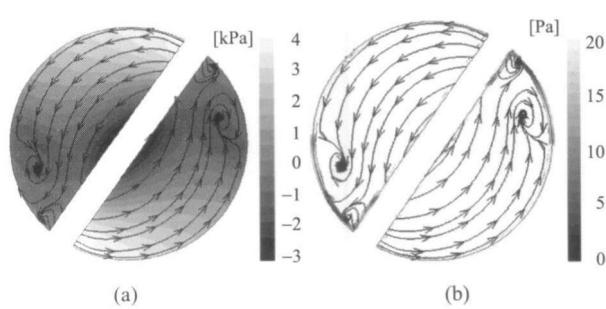


图 6 $\theta = 55^\circ$ 截面处的流场
(a) 静压与流线图; (b) 壁面切应力与流线图
Fig. 6 Flow field at $\theta=55^\circ$ (a) static pressure and streamlines, (b) wall shear stress and streamlines

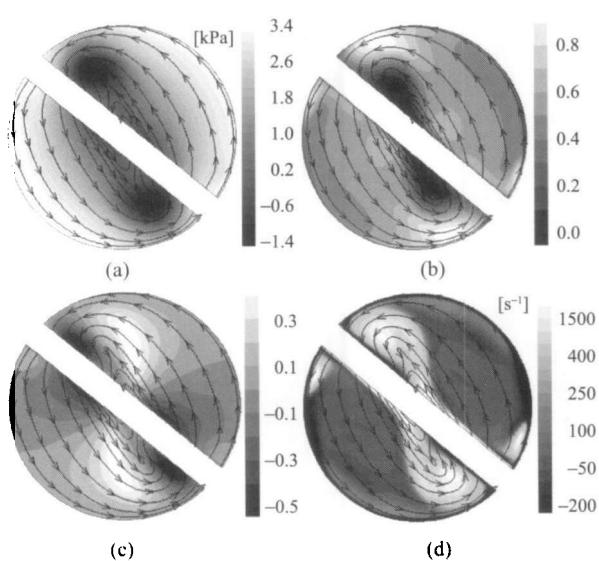


图 7 $\theta = 140^\circ$ 截面处的流场 (a) 静压与流线图; (b) 无量纲切向速度 (u_t/U_b) 与流线图; (c) 无量纲径向速度 (u_r/U_b) 与流线图; (d) 涡量的轴向分量与流线图
Fig. 7 Flow field at $\theta = 140^\circ$ (a) static pressure and streamlines, b) dimensionless tangential velocity (u_t/U_b) and streamlines, (c) dimensionless radial velocity (u_r/U_b) and streamlines, (d) vorticity of axial component and streamlines

4 结 论

螺旋扭带中的二次流动是在壁面切应力、科氏力和离心力综合作用下产生的。螺旋涡在扭带中的形成过程如下: 首先在扭带两侧因边界层分离各形成一个涡, 由于角动量守恒, 这两个涡的旋转方向与扭带旋向相反, 然后这两个涡发展并衰减; 在这两个涡的衰减过程中仍因为边界层分离形成并发展成与扭带旋向相同的两个涡, 接着在这四个涡强度相当时, 会相互抵消而消失; 最后流动发展一段时间后, 在科氏力及离心力作用下, 流线弯曲失稳, 形成两个与扭带旋向相同的螺旋涡, 这两个涡发展稳定, 并在后面的流场中一直保持这样的涡结构。

致 谢 中船重工集团公司第 703 研究所颜晓江硕士为改善本文的网格质量提供了帮助, 特致感谢。

参 考 文 献

- [1] Facciolo L, Alfredsson P H. The Counter-Rotating Core of a Swirling Turbulent Jet Issued From a Rotating Pipe Flow [J]. Physics of Fluids, 2004, 16(9): 71–73
- [2] Cazan R, Aidun C K. Experimental Investigation of the Swirling Flow and the Helical Vortices Induced by a Twisted Tape Inside a Circular Pipe [J]. Physics of Fluids, 2009, 21: 1–9
- [3] Dlamini M F, Powell M S, Meyer C J. A CFD Simulation of A Single Phase Hydrocyclone Flow Field [J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2005, 105: 711–718
- [4] Dewan A, Mahanta P, Raju K, et al. Review of Passive Heat Transfer Augmentation Techniques [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2004, 218(7): 509–527
- [5] Abu-Khader M M. Further Understanding of Twisted Tape Effects as Tube Insert for Heat Transfer Enhancement [J]. Heat Mass Transfer, 2006, 43: 123–134
- [6] Aidun C K, Parsheh M. Spatially Periodic Reversing Core in a Twisted-Finn Generated Swirling Pipe Flow [J]. Physics of Fluids, 2007, 19: 1–4
- [7] Cazan R. Dynamics of Swirling Flows Induced by Twisted Tapes in Circular Pipes [D]. Georgia: Georgia Institute of Technology, 2010