

T型管道微通道传热和流动性能的数值分析

潘丹 陈红 刘小艳 孙杰 刘泓昭

扬州大学

[摘要] 为更好了解和分析 T 型微通道内两相流体流动和传热特性, 利用 ANSYS 模拟分析软件对模型进行三维数值模拟研究。建立 T 型管道三维模型, 取 T 型微通道竖直管道长 $9d$, 水平管道长 $15d$, 其中 $d=10\text{mm}$ 。利用软件进行有限元分析, 采用单变量原则, 采用 CFD 方法, 分别模拟了温度、压力、流速等外界条件对两相流体在 T 型管道流动的影响, 分析比较模拟结果。

[关键词] T 型微通道; 流动性能; 数值模拟

Numerical analysis of microchannel heat transfer and flow performance of T-shaped pipe

Abstract In order to better understand and analyze the two-phase fluid flow and heat transfer characteristics in T-shaped microchannel, ANSYS simulation analysis software was used to carry out three-dimensional numerical simulation research on the model. A three-dimensional model of T-type pipe was established. The vertical pipe length of t-type micro-channel was taken to be $9d$, while the horizontal pipe length was $15d$, where $d=10\text{mm}$. The software was used for finite element analysis, the univariate principle and the CFD method were used to simulate the influence of external conditions such as temperature, pressure and flow rate on the flow of two-phase fluid in t-shaped pipeline, and the simulation results were analyzed and compared.

Key words: T-type microchannel, flow performance, numerical simulation

引言

随着机电系统的提出, 电子设备逐渐趋向高性能、微小化、集成化发展, 微流体技术不断成熟。但电子设备的发展受到了散热问题的制约, 微小化使其散热更加困难, 同时, 为避免温度升高对电子设备造成的损坏, 必须不断散热。因而, 高效快速的冷却系统是其稳定运行的基本保障, 传统的冷却方式已经无法满足高密度散热要求。此类问题受到国内外研究者的广泛关注, 并研究出微通道散热冷却方式的独特优点和高效的换热性能。微通道在微型尺度下控制和操作复杂流体, 通过分析流体流动特性, 提高流体间传质、传热和反应速率。

T 型微通道是一种常见的微流控装置, 两种或多种流体通过通道进入, 流体间表面张力和粘度等因素的影响, 使通道内形成环状流、弹射流等不同的流型。而气液两相流体之间互不相溶, 具有较为明显的分界面, 分界面的形态随流体的持续流动而不断变化。T 型微通道研究对流体的流型可控, 通过调整流体速度、温度、压强等影响因素可形成不同流型; 通道内流体体积小, 传质、传热反应快; 微通道比表面积大, 流体间产生的热量释放快, 避免产出局部过热现象。

目前国内外学者已经对微通道的结构等进行了大量的研究, 比如 Giudice 和 Nonion^[1] 研究了粘度随温度变化以及粘性耗散对流动和热同时发展流动的影响。为了探寻更优的流动和传热性能, 对微通道两相流体流动特性研究较多, 然而有关于对流体流动影响因素的具体分析以及流速、温度、压力改变对整体流动性能影响的研究较少。本文在研究 T 型微通道的基础上, 利用 ANSYS 软件建立 T 型微通道的几何模型, 对微通道内两相流体的流动进行模拟仿真。在 T 型微通道气液两相流模拟中, 采用 CFD 方法进行数值模拟, 利用局部网格加密的网格划分方法, 清晰捕捉 Taylor 流中微通道壁面处的液膜, 流体的流动特性受到多方面条件的影响。模拟实验结果表明, 通道内两相流体的速度、温度和压强对两相流体流动特性有较为显著的影响。

1、物理模型

为了研究两相流体在 T 型微通道内的流动、传热特性, 以及外界因素对两相流体在 T 型微通道内流动的影响, 本文以如下 T 型微

通道为例建立模型, 如图 1 所示, 各尺寸如图。其中 $d=10\text{mm}$, 两相流体分别为气体和液体, 于该 T 型微通道模型而言, 上部通入空气, 下部通入水, 分别研究温度、压力、速度等外部因素对两相流体在该 T 型微通道内流动的影响。本文通过数值模拟研究在保持单一变量的情况下, 各外界条件对两相流体在该 T 型微通道模型中流动的影响。

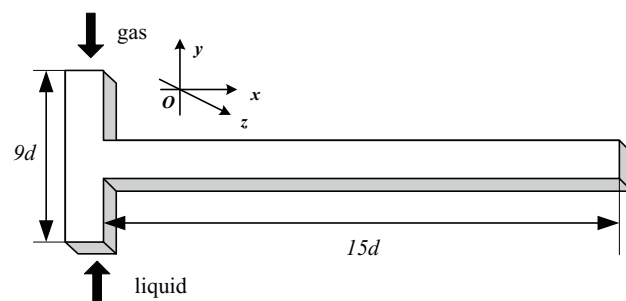


图 1 T 型微通道模型

T 型模型是 Fluent 中较为简单的两相流模型, 可利用连续方程和动量方程来求解计算。而压力项和各界面的交换系数可以耦合在一起的, 可用于模拟两相不同速度的两相流。本文工作针对三维 T 型微通道两相流进行计算, 计算中采用方形网格。

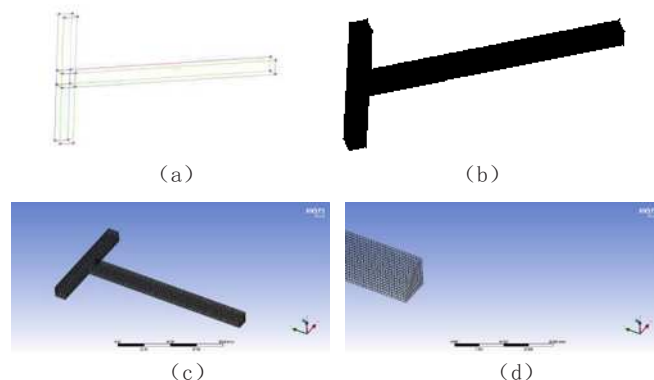


图 2 T 型管道模型网格结构划分

利用 ANSYS Fluent 进行 Block 网格拓扑建立, 使节点对齐。对网格参数进行设定, 考虑到网格过密致使后期计算超负荷, 设置边界层网格节点为 50 个, 横向节点为 800 个。选择 K- 湍流模型, 选择标准模型并设定壁面增强函数。设定能量方程, 定义气体和液体, 选择对应流域和入口方向。为方便分析对流体影响, 采用控制变量法, 逐一分析因素影响。设定气液两相流体对应的速度, 温度。设定壁面温度, 建立计算方程, 确定模拟算法, 进行初始化并开始计算。当模型收敛时, 计算自动结束, 可创建云图展示画面。

2、数值模型

2.1 模型假设

为了研究该模型内流体的流动特性计算过程, 采用 Ansys 软件, 两相流体选用水和空气。本文主要分析两相流体在 T 型微通道内的流动特性, 为简化计算, 故对模型做如下假设^[2]: 整个过程为稳态; 流体不可压缩并且为层流, 此时 N-S 方程适用; 液体和气体之间的界面不会产生滑移; 除了有加热热阻产生热量的表面外, 其余表面均绝热, 并且忽略热辐射和表面张力的影响; 保持单一变量进行研究时, 假设其他变量均为绝对常量。基于以上假设, 可知 N-S 方程和能量方程对微通道流动和传热依然适用。采用速度进口条件, 由质量守恒定律和进口无预旋的假设, 确定轴向速度, 同时进口速度均匀分布^[4]; 假定管道运行时速度恒定, 基于时均化的 N-S 方程, 标准 K- 湍流模型类确定湍流粘性系数^[5]。

2.2 边界条件

为了尽量确保模拟计算的精度和效率, 网格划分须验证网格的独立性, 以确保计算结果的精度受网格大小的影响较小。我们对深度为 10mm 的三维微通道模型在不同网格数下计算得到的努塞尔系数 N^[3] 进行了分析, 结果如表 1。

表 1 网格无关性验证

网格节点数	N	变化率 /%
48372	47.32	30.9
398234	69.38	4.1
1101718	74.14	0.59
1553268	74.26	0.47
2132750	74.66	/

可以看出, 随着网格数量的增加, 努塞尔系数 N 逐渐增大并且趋于稳定。当网格数量达到 48372, 398234, 1101718, 1553268 时, 相应的 N 变化率分别为 30.9%, 4.1%, 0.59%, 0.47%。因此考虑到计算量和精度, 本文选取 1101718 的网格数量进行模拟计算。

2.3 数值方程

由于流体的通道当量半径极小, 且入口流速不高, 故认为本文所涉及流体为理想流体。

①: 连续方程: 取一个 $\Delta \rho V = \Delta \rho_x \Delta y \Delta z$ 的流体体积元

由于物质在运动中质量守恒, 则有

$$\frac{1}{\Delta m} \cdot \frac{d}{dt}(\Delta m) = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \frac{1}{\Delta V} \frac{d}{dt}(\Delta V) = 0 \quad (1)$$

$$U_A = \frac{dx}{dt}, U_B = \frac{d(x+\Delta x)}{dt}, A \text{ 与 } B \text{ 的速度差为}$$

$$\Delta U_x = U_B - U_A = \frac{d(x+\Delta x)}{dt} - \frac{dx}{dt} = \frac{d(\Delta x)}{dt}$$

可得:

$$\lim_{\Delta x, \Delta y, \Delta z \rightarrow 0} \left(\frac{1}{\Delta V} \cdot \frac{d}{dt}(\Delta V) \right) = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z}$$

代入上式得:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = 0$$

可得:

$$\frac{d\rho}{dt} + \text{div}(\rho v) = 0 \quad (2)$$

②: 动量守恒方程:

$$\rho \frac{d\mathbf{u}}{dt} = \rho \mathbf{f}_N + \frac{\partial \tau_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_z}{\partial z} - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3)$$

其中 \mathbf{u} 为速度向量, p 为压强。

③: 当量密度与动力粘性系数

$$\rho = \rho_1 + (\rho_2 - \rho_1) V_2 + f(\tau) \quad (4)$$

$$\mu = \mu_1 + (\mu_2 - \mu_1) V_2 + g(\tau) \quad (5)$$

$f(\tau)$ 与 $g(\tau)$ 为惩罚系数, 当温度变化时, 密度与粘性随之改变。

3、模拟分析

3.1 初始条件

通道充满空气, 无水, 且流体皆处于静止状态。微通道入口设定为速度入口, 入口温度为 333 K, 出口边界为标准大气压。

在微通道的入口处:

速度: ① 0.3 (m/s), ② 0.4 (m/s), ③ 0.5 (m/s);

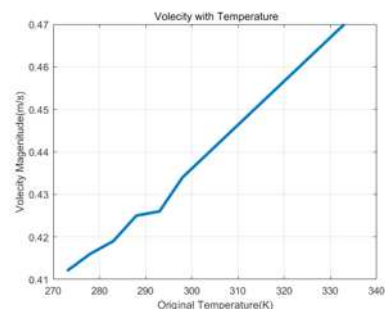
温度: ① 273K, ② 278K, ③ 283K, ④ 288K;

压强: 出口边界为标准大气压。

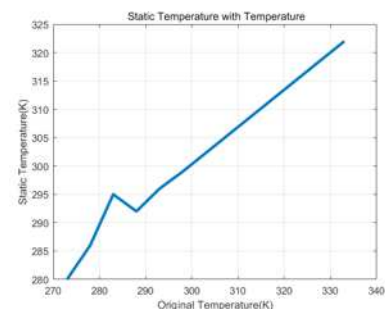
3.2 速度、温度因素分析

对速度、温度变化下流体的流动情况进行详细分析, 综合速度变化下流体流动情况的分析, 控制入口流体速度为 0.3m/s, 出口压强为标准大气压, 在无法设置温度周期变化的情况下, 在 0 摄氏度 -30 摄氏度之间选择温度 273K、278K、283K、288K、293K、298K 对流体温度、速度和压强的影响。

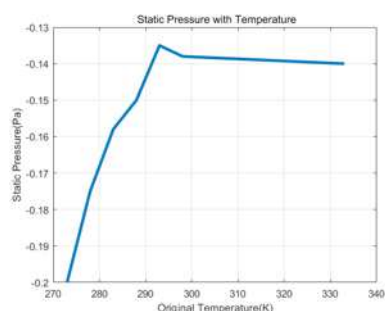
通过比较 0 摄氏度 -30 摄氏度区间下的气液两相流体的流动情况可知, 在控制通道入口处的速度不变时, 管道壁面温度的变化会引起管内流体流动的改变, 温度增高, 促进流体流通, 提高流动效果, 对系统有利。选取模拟云图中节点处的速度、温度、压力为分析对象, 流体各处温度、各处速度、各处压力随壁面温度线性递增。可见图 3。



(a) 速度变化



(b) 温度变化



(c) 压力变化

图 3 T 型管道内速度、温度、压力变化

(下转第 71 页)

神经发育迟滞、癫痫、视听觉异常和摄食功能障碍等。这种损害是不可逆转的，但同时也不会再发展。造成脑瘫的发病原因十分复杂，新生儿体重、早产等都可能造成脑瘫，脑瘫患者运动、动作和姿势异常站立和行走时足不能放平，尖足、双下肢交叉呈剪刀步态，或四肢活动不协调，双上肢屈曲、手紧握，双下肢内收，踝关节趾屈，使用不用类型、功能的矫形器可以辅助脑瘫患者加强关节运动，比如动态踝足矫形器 (DAFO)，可以增加肌肉的弹性与伸缩性，并且脚保持轻度外翻和背伸位。

(2) 脊柱裂：又分为隐性脊柱裂、脊柱膨出、先天性脊髓畸形，脊柱裂会导致下肢偏瘫，中国妇幼保健中心和中日优生优育协会调查结果显示：中国是世界上神经管畸形儿（如无脑儿、脊柱裂等）出生率较高的国家，使用矫形器进行辅助治疗对神经管畸形儿成长是非常必要的。同时在进行髋关节置换、脊柱突出、肌腱移位等手术恢复治疗时，使用矫形器进行辅助治疗也有一定疗效。

(3) 关节炎：又分为退行性关节炎和类风湿性关节炎。退行性关节炎通常表现为随着年龄的增长，关节间的软骨组织逐渐退化；到软骨组织完全丧失时，由于缺失了这一缓冲层，骨头就会互相磨损，从而带来关节处的疼痛、肿胀和炎症。类风湿性关节炎是一种全身性的自身免疫病，其特征是慢性的炎性关节病变，并伴有全身多个系统受累。未经系统治疗的类风湿性关节炎可反复迁延多年，最终导致关节畸形、功能丧失。这两类患者可以通过对脚矫形以达到减小脚的受力的治疗目的。

(4) 其他病症包括糖尿病、脊髓损伤、脑血管意外、重型颅脑损伤、周围神经损伤、骨折、脱位和韧带损伤、屈肌腱、伸肌腱损伤等等都可以通过矫形器进行辅助治疗。

6 结论

矫形器有着悠久的历史，但由于受到社会和科学技术发展水平的限制，矫形技术真正迅速发展还是在 20 世纪，不断由低级简单向

高级复杂方向发展，其进程大约为 20 年一个阶段。20 世纪 40-50 年代为传统矫形器的时代，20 世纪 60-70 年代为推广普及及组件化矫形器的时代，20 世纪 80-90 年代为广泛推广应用新材料和计算机技术的时代。21 世纪是人工智能、仿生控制的年代，建立在 CT、MRI、3D 打印技术基础上的计算机辅助设计制造技术必将取代传统的方法，根据个性化需求来支撑或恢复人体活动能力，更有效的解决患者临床康复需求。

参考文献：

- [1] 周璟. 国际假肢矫形学会课程认证对我国假肢矫形专业教育的启示 [J]. 中国康复, 2013,28(4):261-263.
- [2] 金德闻. 从第 11 届 ISPO 世界大会看假肢矫形学的新进展 [J]. 中国康复医学杂志, 2004,19(10):765-767.
- [3] 英瑞克·普普林. 发展中国家假肢矫形器应用的现状和未来 [J]. 中国康复医学杂志, 2003(18):7-8.
- [4] 王少军. 支具矫形技术在国内陆续开展 [J]. 骨与关节损伤杂志, 1993,8(2):112.
- [5] 方新. 中国假肢矫形教育发展对策 [J]. 中国康复, 2006,21(3):211-212.
- [6] 张晓玉. 国际 P-0 二级技术员培训及考试的规范和实施 [J]. 中国康复, 2000,15(9):184-185.
- [7] 张晓玉. ISPO 对假肢—矫形器专业人员的分类、培训及考试简介 [J]. 假肢与矫形器, 1996, 4 :21 -23.
- [8] 赵辉三. 肢残康复 20 年：假肢矫形器服务的发展与挑战 [J]. 中国矫形外科杂志, 2007,15(7):481-483.
- [9] 孙磊. 假肢与矫形器技术的现状与发展趋势 [J]. 中国矫形外科杂志 :2013,21(2):107-108.
- [10] 李子木. 浅谈假肢与矫形器技术及发展展望 [J]. 中国医疗器械信息 :2019(9):32-33.

(上接第 66 页)

确定壁面温度，T 型微通道内的温度与两相流体的速度和压力呈正分布，即温度越高的区间，两相流体的速度与压力越高，在 50 摄氏度时，由于两相流体的物体状态受温度影响较显著，从而出行温度分布越高的区间，两相流体的速度与压力越低。

3.3 压力因素分析

在 T 型微通道中，两种流体入口处的速度夹角呈 90°。若仅分析 x 方向上压力的变化情况难以全面地分析压力对 T 型微通道的影响。因此，必须对 y 方向上的压力变化情况进行进一步的分析。压力不仅沿 x 方向变化，在 y 方向上也存在变化，随着流动时间的不断增加，y 方向上的界面逐渐向 y 轴的反方向迁移，同时压力逐渐降低，相界面两侧的压力差不断减小，最终压力达到一个较高的水平且压力值基本恒定，由图 3 (c) 所示。当 T 型微通道混合区内 x 和 y 方向的压力都已经基本稳定时，表明微通道混合区已经完全被液体充满。

4、结论

本文详细讨论了温度变化下两相流体在 T 型微通道的流动特性。通过控制单一变量法，利用 ANSYS 模拟，了解了外界条件如温度、压力、速度等因素如何影响两相流体在 T 型微通道的流动。

(1) 流体各处温度、各处速度、各处压力随壁面温度线性递增。

(2) 在壁面温度不超过某一临界值时，T 型管内两相流体的流速与压力在温度变化下呈正分布，即温度越高，T 型管内两相流体的流动与传热特性越好。但超过某一临界温度值时，这一结论将不

适用。

(3) 温度增高，速度增大，压强增大，促进流体流通，提高流动效果，对 T 型管道微通道传热和流动性能有利。

(4) 随着流动时间的不断增加，通道 x、y 方向压力变化，相界面两侧的压力差在不断减小。

(5) 当 T 型微通道混合区内 x 和 y 方向的压力都已经基本稳定时，微通道混合区完全被液体充满。

参考文献：

- [1] S.Dei Giudice, C.Nonino and S.Savino Effects of vis-cous dissipation and temperature dependent viscosity in thermally and simultaneously developing laminar flows in microchannels Int. J.Heat Mass.Transfer 28 (2007) 15-27.
- [2] 陆向迅, 徐斌, 吴建, 王洋, 薛宏. 矩形微通道内液体流动与传热的数值模拟研究 [J]. 节能技术 .2008(02):103-108.
- [3] 范贤光, 黄江尧, 许英杰. 凹槽型微通道传热与流动性能的数值分析 [J]. 半导体光电 .2020(02):232-241.
- [4] 陆斌斌, 刘厚林, 谈明高, 刘琨. 双流道泵内非正常固液两相流的数值分析 [J]. 农机化研究 .2009(05):34-37.
- [5] 潘兵辉. 低压蒸汽管道气液两相流数值分析 [J]. 化工设计 .2019,29(6):35-37.