

涡流管内三维强旋流流场数值模拟*

周少伟 姜任秋 宋福元 张 鹏 王朋涛 陈跃进 高 超
(哈尔滨工程大学动力与能源工程学院 哈尔滨 150001)

摘要: 根据流体在涡流管内流动的强旋流特点, 建立涡流管内流体流动的三维物理模型, 采用计算流体力学中 Realizable κ - ϵ 模型对涡流管内流动进行数值模拟, 得到切向、轴向与径向流速的分布规律, 并对涡流管内部流场的循环流特性进行详细分析。在此基础上, 利用量纲一分析方法将数值结果与前人的实测结果加以比较, 在一定程度上验证了模拟结果的精确性。数值结果表明, 涡流管内的流体流动呈现出复杂的三维流动状态, 从旋涡的角度来看, 有准自由涡与准强制涡的组合运动; 从轴向与切向运动的合成而言, 有外旋流与内旋流之分; 从径向与切向的综合流动分析, 则有所谓的螺旋流存在; 就径向与轴向运动的合成而言, 则有循环涡流的存在; 轴向流速包络面是内外旋气流的分界面, 内外旋气流以循环涡流的形式通过轴向零速包络面不断进行传热传质交换。

关键词: 涡流管 强旋流 三维流场 循环流 数值模拟

中图分类号: TK124

0 前言

涡流管作为一种微型制冷装置, 由于其结构简单可靠、设备紧凑、无运动部件、制造运行成本低廉、温度可调且不用氟利昂制冷剂等众多优点, 在有特殊需求的制冷领域, 有着极为广阔的应用前景^[1]。尽管涡流管结构极为简单, 但是其内部流动却相当复杂。充分地认识管内的流场, 对于认识涡流管能量分离机理, 提高涡流管的能量分离效率, 寻找更为合理的涡流管结构以及建立能准确地有效预测涡流管能量分离性能的理论计算式等, 都将具有十分重要的意义。

随着计算流体力学的发展及计算机应用的日益广泛, 应用数值方法来模拟涡流管内部的流场已经成为可能。FROHLINGS DORF 等^[2]、ALJUWAYHEL 等^[3]、SKYE 等^[4]、SMITH 等^[5]相继在这方面进行了尝试, 但是他们在数值模拟时, 往往将涡流管三维物理模型简化为二维轴对称模型, 这必将会对计算结果带来一定的误差。考虑到涡流管内流体三维强旋转的独特运行特点, 本文建立涡流管内流体流动的三维物理模型, 采用计算流体力学中 Realizable κ - ϵ 模型对涡流管内流动进行了数值模拟, 得到了相应流场的详细三维数据, 清晰地勾勒出了三维流场的大致轮廓, 从而为揭示涡流管能量分离机制及优化其工程设计提供了坚实的理论基础。

1 涡流管物理模型及网格划分

为了合理地检验数值模拟结果的准确性, 这里计算所采用的物理模型几何参数与试验模型几何参数相同。6 个切向入口喷嘴, 横断面为矩形, 长 $h=2$ mm, 宽 $b=2$ mm, 分离孔板内径 $d_c=6$ mm, 涡流室内径 $D=15$ mm, 涡流管长度 $L=119$ mm。

根据涡流管的几何结构及内部流场特点, 在建立涡流管三维物理模型的过程中, 为了使问题简化, 忽略了涡流室外的环形储气腔设置, 并将切向喷嘴引出一段距离以方便施加边界条件, 其简化后模型如图 1 所示。由文献[5-6]可知, 这些合理的简化对于计算涡流管内部的流场影响较小。

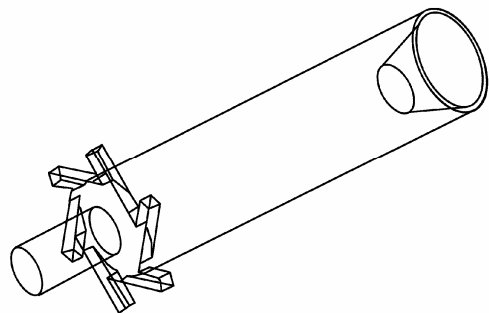


图 1 涡流管数值计算简化物理模型

网格质量的好坏, 对流场的数值模拟结果至关重要。针对涡流管内旋流流场的特性, 将计算区域进行离散化, 生成三维分区组合网格。涡流管整个计算域分成多个子区域, 分别生成网格, 一共划分了约 270 000 个非均匀的六面体网格单元, 其网格划分见图 2。这样生成的网格, 既可完整地描述流

* 哈尔滨工程大学校内基金资助项目(HEUF040123)。20061221 收到初稿, 20070805 收到修改稿

场特征, 又能减少划分的网格数, 减少计算内存和提高计算速度, 且在计算过程中, 采用了自适应的方法来完善计算结果的精度。

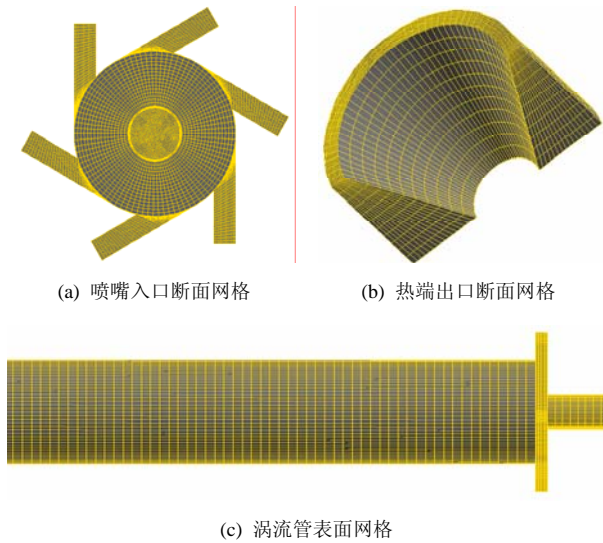


图 2 涡流管网格划分

2 流场数值计算方法及边界条件

目前, *Realizable* κ - ε 湍流模型业已有效地用于各种不同类型的流动模拟, 包括剪切流、射流以及带有旋转分离的流动。此模型的数学描述符合涡流管内流体的流动特征, 因此, 本文拟采用修正的 *Realizable* κ - ε 湍流模型来对涡流管内部的流动进行数值模拟, 其输运方程见文献[7]。

由于只研究涡流管内稳态时的可压缩强旋流流动和能量分离效应, 所以不涉及到初始条件, 只有边界条件。计算中, 给定气流入口的总压 0.366 7 MPa, 总温 296 K; 给定冷气流出口为外界大气压; 热气流出口为静压但可调, 以此来改变不同的冷气流率; 壁面处无速度滑移, 湍流脉动为零。对于气流入口、出口的湍流参数分别设定为湍流强度和水利直径。

3 计算结果与比较

模拟结果表明, 如图 3 所示, 涡流管内的流体流动为有规律的三维螺旋运动, 且冷热气流得到了明显的分离, 冷气流平均温度为 275.7 K, 热气流平均温度为 300.7 K, 与试验中的冷热出口气流温度相比(冷端温度为 271.3 K, 热端温度 303.4 K), 吻合较好。由于认识涡流管内流体流动是揭示涡流管能量分离机制的必备基本知识点之一, 因此本文在此着重针对涡流管内的流场特性及其分布加以探讨。

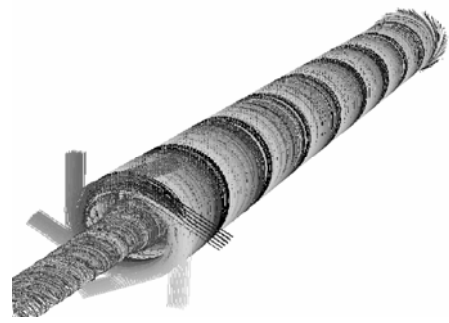


图 3 涡流管内三维流场流线图

3.1 切向速度分布

涡流管中的三维气流运动中, 切向速度具有重要的地位。不仅是因为切向速度在数值上大于其余两项速度, 更重要的是切向速度产生的离心力是涡流管内气流发生能量分离的基本前提。图 4 给出了不同轴向断面上 $z^*=z/L$ 的切向流速 u 的分布。从图 4 中可看出, 切向流速从涡流管壁面向中心轴线上随着半径的减小而增大, 在某一径向位置处达到最大值, 而后随着径向位置进一步减小, 在靠近中心轴线处降为最小。涡流管内的流场具有组合涡^[8]的特点。所有最大切向速度点形成一分界面, 且分界面可将涡流管内流场分为中心的准强制涡和外部的准自由涡。组合涡的结构一般可用下列公式表达。

外旋流

$$ur^n = C_1 \quad (1)$$

内旋流

$$u = C_2 r^m \quad (2)$$

式中 n 、 m 为指数, 与涡流管的操作条件及结构参数有关, C_1 、 C_2 为常数, r 为径向位置。其中的指数与常数都随轴向断面的位置而变化。

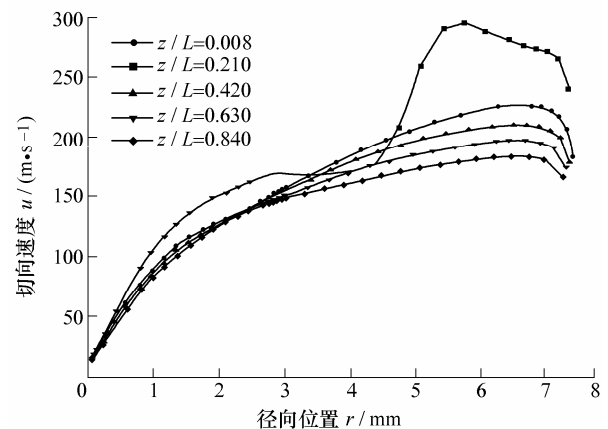


图 4 切向速度的径向分布

记切向速度最大值 u_{\max} 时的径向位置为 r_m , 由上面分析可知 r_m 为准自由涡与准强制涡的分界面, 则式(1)、(2)可分别简化为

$$u = u_{\max} (r_m / r)^n \tag{3}$$

$$u = u_{\max} (r / r_m)^m \tag{4}$$

图 4 同时说明,在喷嘴出口处的切向流速最大,发生此现象的主要原因是:当高压的压缩空气由喷嘴切向射入涡流室中,气流近似经历一绝热膨胀过程^[9],静温降为最低,流速达到最大,且最大值出现在径向位置的 0.764R 处。在内部流体强旋流的湍流粘性以及壁面摩擦效应的作用下,切向流速在随着轴向断面位置的增加而降低,切向速度的衰减有助于涡流管内气流的能量分离,所衰减的动能能够有效地转化为热能,适当加长涡流管长度能够促进能量有效地分离,但是,一味地加长涡流管并不代表能量分离效应的增加。正如文献[10]所述,在没有阻涡器的情况下,涡流管的长径比在 30~50 之间。

3.2 轴向速度分布

图 5 所示为涡流管内轴向速度分布示意图。由图 5 可以看出,涡流管中明显存在着两个轴向相反的区域,其中正、负值分别代表外旋流与内旋流方向。轴向速度由轴心沿径向方向,流动方向发生了明显的改变,在转折点处,轴向速度为零。所有这些点构成了轴向零速包络面,它是涡流管中内旋流与外旋流的分界面,它的位置决定了涡流管中冷热气流的流量与温度,在外旋流区域,轴向流速随着气流向热端出口运动的过程中逐渐减小(喷嘴附近除外),而内旋流在逆向压力梯度的作用,经历了一膨胀过程,到冷端出口处,轴向流速达到最大。轴向零速位置随着轴向位置的增加向径向内侧移动。就轴向速度绝对值而言,内旋流速度往往大于外旋流速度,且内旋流变化的程度比外旋流剧烈。

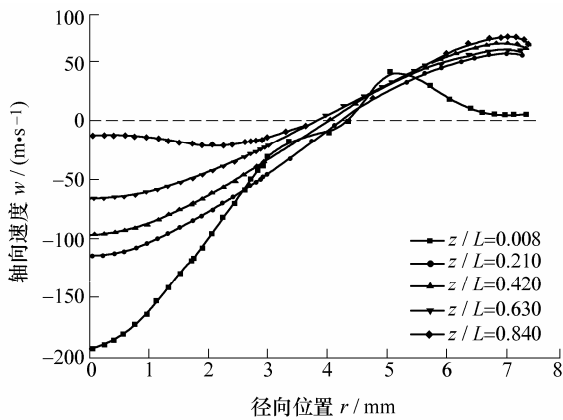


图 5 轴向速度的径向分布

3.3 径向速度分布

在涡流管内工作介质的三维运动中,相对而言,径向流动的研究不够充分,主要是由于实际测

定的困难。与其他两项速度相比,径向运动的速度较小,大约小于切向、轴向两个数量级。图 6 给出了不同轴向断面位置的径向流速分布,由图 6 可以看出,切向速度的最大位置出现在喷嘴出口处,且径向速度出现了由内向外的转折性改变,这说明了在喷嘴出口区域附近有循环涡流的存在。除了在喷嘴区域附近外,涡流管中的径向流速几乎都保持在小的数量级。在喷嘴出口处产生径向速度相对较大的主要原因是气流在切向喷嘴通道过程中所经历的近似绝热膨胀过程。通过数值模拟的方法可以获得试验中无法测出的径向速度。

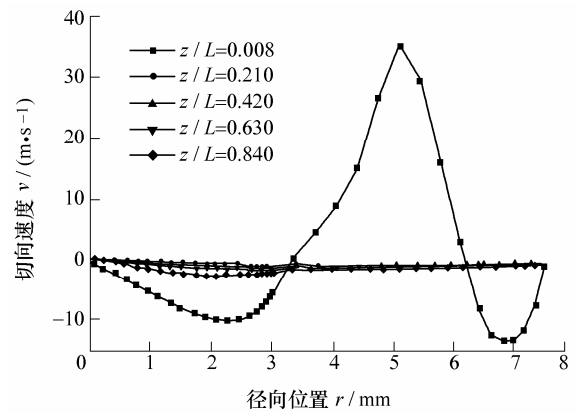


图 6 径向速度分布

3.4 循环流

如上所述,轴向零速包络面是内旋流与外旋流的分界面,气流自喷嘴切向进入而从中心分离孔板处排出,必然有部分气流通过轴向零速包络面,进入到中心空间而转化为内旋流,在内旋流向冷端运动的过程中,由于分离孔板的流通能力有限,致使部分内旋气流以循环涡流的形式转移到外旋气流中。合理地优化涡流管的结构参数,能够有效地避免涡流管中的循环流。图 7 为涡流管内流体流动的二维迹线图。计算结果表明,涡流管中的流动存在着外旋流、内旋流以及循环流。所谓涡流管中的循环流并不是相同介质的往复运动,而是流体工作介质在循环流中是不断更替的,正是这种周而复始的循环涡流影响了涡流管的能量分离效应。

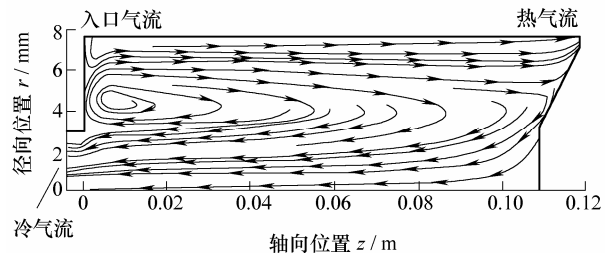


图 7 涡流管内流体流动二维迹线图

为了有效地估计出涡流管中的循环流量, 定义一质量流量积分函数如下

$$m(r) = \int_0^r 2\pi\rho_z(r)w_z(r)rdr \quad (5)$$

式中 $m(r)$ 表示在轴向位置 z 处通过以轴心为圆心, 半径为 r 的一圆形断面的质量流量, $\rho_z(r)$ 、 $w_z(r)$ 分别为轴向断面位置 z 上任意径向位置 r 处的密度与轴向速度, 正向轴速代表外旋气流方向, 负向轴速代表内旋气流方向。

图 8 给出了质量流量在量纲一轴向断面位置 $z^*=z/L=0.084$ 处沿量纲一半径 $r^*=r/R$ 的变化规律, 由图 8 可知, 质量流量积分函数曲线沿着径向方向先降低, 在径向位置 $0.57R$ 处达到最小, 此位置为循环流的中心位置, 同时也是内外旋气流分界面的位置, 它主要依赖于冷气流率以及结构参数。由式 (5) 定义和质量守恒定律可知, 所求质量流量积分的最大值 (13.15 g/s) 应是热端出口气流的质量流量, 而最小值 (4.51 g/s) 则是内旋气流的质量流量。但是在内旋气流向冷端出口运动的过程中, 由于分离孔板的流通能力有限, 迫使部分内旋气流通过轴向零速包络面, 进而转化为外旋气流, 由模拟结果得知, 冷端出口的气流质量流量为 3.86 g/s, 则以此可以得出涡流管中循环流量 $4.51-3.86=0.65$ g/s。图 8 仍可说明, 冷端出口的质量流量 $m(r)=m_c$ 直线与质量流量函数积分曲线相交于径向位置两处, 分别为 $0.47R$ 与 $0.67R$, 其中径向位置 $0.47R$ 之内的流体全部通过

冷端管排出, $0.67R$ 之外的流体则全部通过热端出口排出, 而介于此两径向位置的环形区域则为循环流的流动范围。

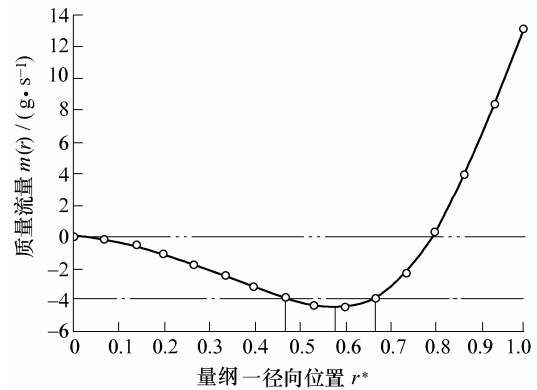


图 8 质量流量沿量纲一半径的变化规律

3.5 量纲一分析

由于试验手段的限制, 以及涡流管内部空间的狭小性, 未对涡流管内部流场精确地测试。为了合理地与前人的实测数据进行相应对比, 并考虑到不同研究者所研究的涡流管结构参数以及操作运行参数不同, 本文在此采用量纲一分析方法与前人的结果加以对比, 从中找出相似的规律, 以期来检验所模拟结果的精确性。下表给出了 BRUUN^[11]、GAO 等^[12]、TAKAHAMA^[13]和本文研究者所研究涡流管的结构参数、操作条件和内部流场位置。

表 不同研究者所研究涡流管的结构参数、操作条件和内部流场位置

作者	涡流室 直径 D/m	涡流管 长度 L/m	喷嘴等效 直径 d_n/m	喷嘴数目 N	分离孔板 直径 d_c/m	冷气流率 μ	量纲一轴 向位置 z^*	入口温度 T_i/K	入口压力 p_i/MPa
BRUUN	0.094 0	0.520	0.011 0	4	0.035 0	0.23	0.231	294.0	0.200 0
GAO 等	0.016 0	0.205	0.003 0	1	0.004 0	0.27	0.114	285.6	0.650 0
TAKAHAMA	0.052 8	7.920	0.011 0	4	0.023 5	0.50	0.003	不确定	不确定
本文	0.015 0	0.119	0.002 3	6	0.006 0	0.23	0.210	296.0	0.366 7

定义切向、轴向流速的量纲一量为

$$u^* = u/u_{\max} \quad (6)$$

$$w^* = w/u_{\max} \quad (7)$$

式中 u 、 w 分别为切向流速、轴向流速, u_{\max} 为与所取 u 、 w 在同一轴向位置上相对应的最大切向流速。由于径向速度在涡流管内的三维速度中是最难进行实测的, 已有的流场报告中往往缺少准确的径向速度分布, 且存在明显争议, 故在此不比较。

图 9 给出了多位研究者测出的量纲一切向流速沿径向位置的分布, 由图 9 可以明显地看出, 量纲一切向速度分布存在着明显的相似性, 所有研究者

得出的量纲一切向速度都沿径向位置的增大而增大, 至某一 r/R 处达到最大, 然后再增大 r/R 却逐渐下降。所模拟的量纲一切向速度最大值所在的量纲一径向位置与 BRUUN^[11]和 GAO 等^[12]的数据比较接近, 大约都在 $0.8R$ 左右, 而与 TAKAHAMA^[13]的实测数据稍有不同, 其径向位置在 $0.6R$ 左右。在轴心位置附近处, 切向速度实际已经接近于零, 而 GAO 等^[12]与 BRUUN^[11]所测出的结果却仍然很大, 这可能是由于探针精度与定位不准的缘故。所模拟的量纲一切向流速分布沿径向的发展趋势与 TAKAHAMA^[13]等的实测结果比较接近。由于不同研究者所研究的涡流管尺寸参数、喷嘴数目、布置测点位置以及所使用的探针精度不同, 导致了量纲一切向速度沿径向的发展趋势不同。

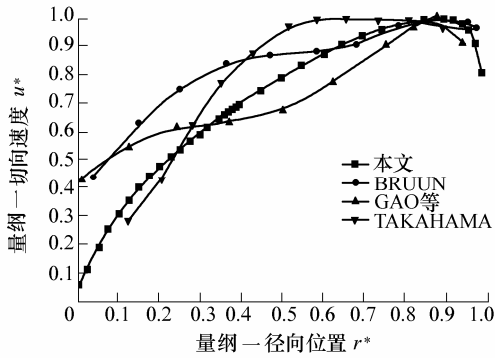


图 9 量纲一切向流速沿径向位置分布

不同研究者的量纲一轴向流速沿径向的变化情况如图 10 所示。一般地，同一断面上的最大轴向流速往往小于最大切向流速^[14]，正如图 10 所示，约为 $0.4u_{\max}$ 左右。由图 10 可以明显看出，所有研究者轴速方向都发生了明显改变，即明显地存在着外旋流与内旋流，而 GAO 等^[12]所测出的轴速方向沿径向变化时发生了两次改变。在轴心附近处，流速方向为正向，这说明涡流管冷端出口处发生了明显的回流现象。不同研究者所研究的涡流管内部流体轴向流动的转折点不同，BRUUN^[11]与 GAO 等^[12]所研究的轴向流速方向转折点分别在径向位置 $0.7R$ 、 $0.62R$ 处，利用计算流体力学所模拟的量纲一轴向流速沿径向变化的趋势基本上与 TAKAHAMA^[13]的实测结果相一致，轴速方向的转折点都在径向位置 $0.56R$ 处。

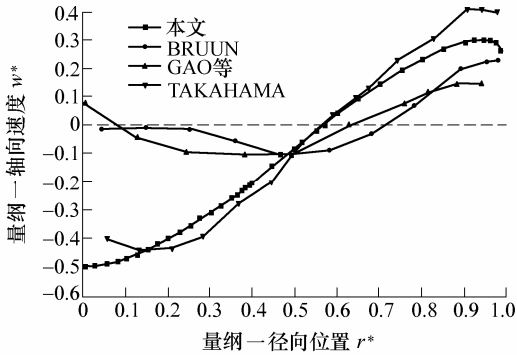


图 10 量纲一轴向流速沿径向位置分布

4 结论

(1) 涡流管内的可压缩气体呈现出复杂的三维流动状态，针对涡流管内流体流动的强旋流特点，采用 Realizable $\kappa-\epsilon$ 湍流模型对涡流管内的流场进行了数值模拟，清晰地勾勒出涡流管内流体复杂的流动状态：从旋涡的角度来看，有准自由涡与准强制涡的组合运动；从轴向与切向运动的合成而言，有外旋流与内旋流之分；从径向与切向的综合流动

分析，则有所谓的螺旋流存在；就径向与轴向运动的合成而言，则有循环涡流的存在；轴向流速包络面是内外旋气流的分界面，内外旋气流以循环涡流的形式通过轴向零速包络面不断进行传热传质交换。通过式(5)可合理地估算出涡流管中的循环流质量流量。

(2) 从数值模拟结果来看，虽然未对涡流管内部的流场进行精确测试，但是所模拟出的冷热气流温度值与试验值吻合较好，且使用了量纲一的分析方法将切向、轴向流速与前人的实测结果相比较，一定程度上验证了 Realizable $\kappa-\epsilon$ 湍流模型的可靠性。实际上涡流管内的三维强旋转流具有明显的各向异性湍流特点，而 Realizable $\kappa-\epsilon$ 湍流模型是基于同样的涡粘性假设，对涡流管内部的流场所预报的结果是有限的，因此为了反映强旋流场内雷诺应力各项异性特点，尝试采用高阶湍流模型方程，即雷诺应力模型对涡流管内流场进行数值模拟的方法将颇具挑战性。

参 考 文 献

- [1] 丁永钢, 侯予, 熊联友. 涡流管的应用[J]. 低温工程, 2004(1): 56-59.
- [2] FROHLINGS DORF W, UNGER H. Numerical investigations of the compressible flow and the energy separation in the Ranque-Hilsch vortex tube[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1999, 42(3): 415-422.
- [3] ALJUWAYHEL N F, NELLIS G F, KLEIN S A. Parametric and internal study of the vortex tube using a CFD model[J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(3): 442-450.
- [4] SKYE H M, NELLIS G F, KLEIN S A. Comparison of CFD analysis to empirical data in a commercial vortex tube[J]. International Journal of Refrigeration, 2006, 29(1): 71-80.
- [5] SMITH E, POMGJET P. Numerical prediction of vortex flow and thermal separation in a subsonic vortex tube[J]. Journal of Zhejiang University, Science A, 2006, 7(8): 1406-1415.
- [6] BEHERA U, PAUL P J, KASTHURI RENGAN S, et al. CFD analysis and experimental investigations of Ranque-Hilsch vortex tube[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(10): 1961-1973.
- [7] 王福军. 计算流体力学——CFD 软件原理与应用[M].

北京: 清华大学出版社, 2004.

- [8] 吴介之, 马晖扬, 周明德. 涡动力学引论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993.
- [9] AHLBORN B, KELLER J U, STAUDT R, et al. Limits of temperature separation in a vortex tube[J]. J. Physics. D: Appl. Phys., 1994, 27(3): 480-488.
- [10] 曹勇. 小流量涡流管特性的理论与实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [11] BRUUN H H. Experimental investigations on the energy separation in vortex tubes[J]. Journal Mechanical Engineering Science, 1969, 11(6): 567-583.
- [12] GAO C M, BOSSCHAART K J, ZEEGERS J C, et al. Experimental study on a simple Ranque-Hilsch vortex tube[J]. Cryogenics, 2005, 45(3): 173-183.
- [13] TAKAHAMA H. Studies on vortex tubes ((1) Experiments on efficiency of energy separation (2) On profiles of velocity and temperature)[J]. Bulletin of JSME, 1965, 8(31): 433-440.
- [14] TAKAHAMA H, YOKOSAWA H. Energy separation in vortex tubes with a divergent chamber[J]. Transactions of the ASME, 1981, 103(5): 196-203.

NUMERICAL SIMULATION OF THREE-DIMENSIONAL FLOW FIELD WITH STRONG SWIRL IN VORTEX TUBE

ZHOU Shaowei JIANG Renqiu SONG Fuyuan
ZHANG Peng WANG Pengtao
CHEN Yuejin GAO Chao
(College of Power and Energy Engineering,
Harbin Engineering University, Harbin 150001)

Abstract: In order to understand the flow behavior inside the tube distinctly, a three-dimensional physical model of vortex tube is constructed according to flow's movement characteristic and three-dimensional flow field with strong swirl inside the tube is simulated by the usage of practical "Realizable $\kappa\text{-}\varepsilon$ " turbulent numerical model. From the simulated velocity field, the distributions of tangential, axial and radial velocity as well as the recirculating flow patterns are investigated. In addition, the strategy of non-dimensional comparisons between numerical results and previous experimental data is applied to validate numerical data indirectly. Satisfactory agreements are observed between them. The numerical results show that flow motion inside the vortex tube presents extraordinary complicated behavior. The swirling flow inside the vortex tube consists of two regions with an outer region of quasi-free vortex flow surrounding an inner region of quasi-forced vortex flow. From view of the composition of axial and swirl motion, the flow inside the tube consists of periphery flow and inner flow. With radial and swirl motion considered, the helical flow exists inside the vortex tube. There is also a recirculating flow inside the tube when the composite motion of radial and axial movement are analyzed. The peripheral and inner flows exchange heat and mass through the enveloping surface of zero axial velocity in the form of recirculating flow because the enveloping surface of zero axial velocity is the interface between peripheral and inner flow.

Key words: Vortex tube Strong swirl

Three-dimensional flow field

Recirculating flow Numerical simulation

作者简介: 周少伟, 男, 1981 年出生, 博士研究生。主要研究方向为传热传质学。发表论文 4 篇。

E-mail: hrbgczsw@163.com