

DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201703097

波纹管结构尺寸及内芯对管内液氮流动的影响

周绍华¹, 闫畅迪¹, 黄永华^{1,2}

(1.上海交通大学 制冷与低温工程研究所 上海 200240; 2.上海市低温技术与测试应用服务平台 上海 200240)

摘要: 为深入探讨更大结构尺寸范围内波纹管的液氮流动阻力特性,以量纲一的波高内径比和波距波高比为变量,通过建立波纹管内液氮流动的CFD仿真模型,考察较宽范围内波高内径比、波距波高比以及管内是否插入内芯情况下,达西摩擦因子在不同雷诺数下的变化规律,并与实验数据进行对比验证。结果表明:波纹管内流体进入波节形成漩涡是导致波纹管阻力增大的主要原因;当波高内径比和波距波高比不变时,仅改变波纹管的内径对达西摩擦因子几乎没有影响;内芯波纹管的内芯直径越大,达西摩擦因子越小;而内芯直径越小,其达西摩擦因子越接近空心波纹管。仿真结果与实验数据吻合良好。

关键词: 波纹管;CFD 仿真;波纹管阻力;达西摩擦因子;内芯

中图分类号: TB661

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2018)01-0107-07

Effect of different geometries of bellows with/without insert on internal liquid nitrogen flow

ZHOU Shaohua¹, YAN Changdi¹, HUANG Yonghua^{1,2}

(1. Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University; Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Cryogenic Technology and Service Center, Shanghai 200240, China)

Abstract: To further discover the flow resistance characteristics of liquid nitrogen in bellows in wider application range, dimensionless variables namely the ratio of wave-height over bellows-diameter (e/d) and the ratio of wave-pitch over wave-height (p/e) are introduced. CFD modeling has been conducted on the behaviors of both pressure drop and Darcy friction factor (f) at different geometries of the bellows, either with or without an insert. Effects on the f by different Reynolds numbers at certain ratios e/d or p/e in wide ranges were investigated. The results shows that the vortex forming inside the bellows trough is the main cause of the flow resistance increment. When the e/d and p/e remain unchanged, changing of the inner diameter of the bellows has little influence on the friction factor. If a rod is inserted into the bellows, the larger the rod diameter, the smaller the Darcy friction factor. When the diameter of the insert reduces to zero, the friction factor approaches that of the hollow bellows, which is consistent with the experimental results.

Keywords: bellows; simulations by CFD; resistance of bellows; Darcy friction factor; insert

波纹管既有较好的机械强度,又允许形变,可以消除因温度变化引起的热应力,也便于运输和安装,在流体管网工程、真空设施、航天低温工程等领域具有广泛应用。比如,将高温超导(HTS)电缆封装于波纹管内并使用流动的液氮进行冷却^[1-4]。液氮在波纹管内沿程压降是此类配套低温制冷系统设计的核心参数之一。波纹管内壁面几何形状的周期性变化使得管内流动与光管有很大的不同,而当在其内部插入内芯后则又明显区别于空心波纹管的情况。因此,研究常用波纹管内流体阻力特性对相关应用的设计和运行具有重要意义^[5-8]。理论上,可通

过大量实验测量获得给定结构尺寸的波纹管内流动阻力特性,但是由于波纹管规格众多,欲完成所有组合工况下的流阻测量,则费时费力,成本高昂,如果加上在波纹管内部插入芯体(电缆、管路等),则其组合工况将更加复杂。因此,采用仿真手段并在一定工况下进行实验验证是一种有效的研究方法,且可以在较大范围内更加全面地探讨波纹管流动的阻力特性。

国内外对液氮在波纹管内流动阻力特性(通常以量纲一达西摩擦因子 f 表征)开展了众多仿真研究。如日本筑波大学 Sasaki 等^[9]针对内径80 mm、外径96 mm、波距6 mm的波纹管,在分别含有60和40 mm直径内芯的情况下,进行了液氮流动数值计算,获得了内芯完全在中轴上时的关联式,并且对比了直管和波纹管以及内芯偏离中心轴不同距离时的几种情况,发现内芯偏离中轴有利于减小阻力。韩

收稿日期: 2017-03-20

基金项目: 上海交大航天先进技术联合研究中心技术创新项目(USCAST2016-32);国家自然科学基金(51676118)。

作者简介: 周绍华(1992—),男,硕士研究生;

黄永华(1978—),男,博士,研究员,博士生导师

通信作者: 黄永华, huangyh@sjtu.edu.cn

国 LG 电缆公司的 Lee 等^[10]对直径 25.5 mm 的波纹管液氮完全发展段的湍流流动进行仿真模拟,所研究的波距(p)波高(e)比 p/e 范围为 1 ~ 15,波高内径(d)比 e/d 范围为 0.039~0.118,得出压降与波高成比例变化的结论. 孙凤玉等^[11]对 5 种不同尺寸的波纹管进行了仿真计算和实验研究,仿真采用 $k-\omega$ 标准湍流模型,与实验结果对比,误差在 10% 以内,并且得出 p/e 越大,达西摩擦因子越小的结论. 李云贤等^[12]对波纹管含有直径 57 mm 内芯的过冷液氮流动阻力特性进行了仿真计算和实验研究,通过与 Fuchino 关联式^[13]进行对比后得出结论:波距越大压降越小;波高越大压降越大,且指出 Fuchino 关联式不适用波纹管通径、波高、波距变化的情况.

综上,国内外对有无内芯波纹管的流动阻力特性均有研究,且大多给出了自己的关联式. 本文将这些关联式汇总于图 1. 由图 1 可发现,它们相互之间总体上吻合性差,甚至部分还存在矛盾性. 另一方面,文献中所述波纹管的波高和波距范围相对较小,且以波高、波距绝对值作为变量进行研究,对于其他尺寸波纹管的参考价值不高. 本文采用 CFD 仿真与实验验证相结合的方法,以 e/d 、 p/e 量纲一的数为变量,更加全面地探讨更大结构尺寸范围内波纹管的液氮流动阻力特性.

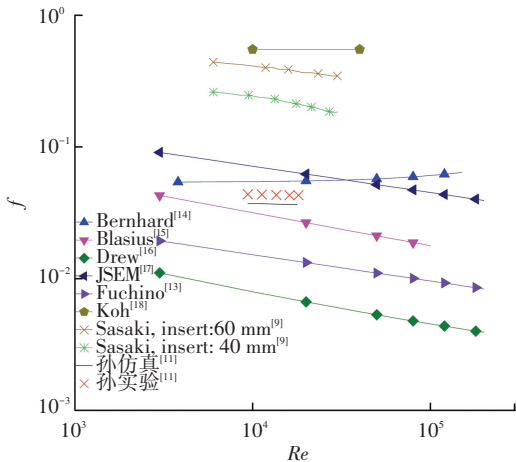


图 1 不同文献中的摩擦因数-雷诺数关系
Fig.1 Friction factor vs. Reynolds in literature

1 仿真计算模型与验证

1.1 波纹管结构及 CFD 模型

建立的波纹管物理几何模型如图 2 所示,其中波高为 e ,波距为 p ,外径为 D ,内径为 d . 在每个波节内壁面中,规定面向液氮来流的一侧为波节迎面,另一侧为波节背面. 图 2 中虚线框表示波纹管内有、无内芯插入的两种情况.

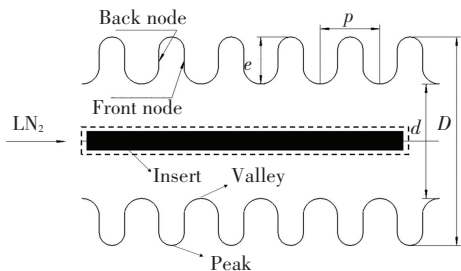


图 2 波纹管 LN₂ 流动模型

Fig.2 Model of LN₂ flow in bellows with/without an insert

流体力学计算方法上采用“可实现”(Realizable) $k-\varepsilon$ 模型^[18]. 其中与雷诺应力相关的量与湍流的物理特性相一致,比如雷诺剪切应力项满足施瓦兹不等式 $(\overline{u_i' u_j'})^2 \leq \overline{u_i'^2} \overline{u_j'^2}$. 可实现 $k-\varepsilon$ 模型和标准 $k-\varepsilon$ 模型相比,主要有两点不同:首先,可实现 $k-\varepsilon$ 模型对于湍流黏度增加了一个方程;其次,对于耗散率 ε ,增加了一个从精确的均方涡度波动输运方程改进而来的输运方程. 可实现 $k-\varepsilon$ 模型的优势在于它能够较精确地预测平面和圆形射流扩散作用. 而且对处理旋流转动、强逆压梯度的边界层流动、流动分离和二次流有很好的表现. 该特性对于波纹管流动而言,十分适用.

压力速度耦合方式选用 simple 算法,压力、动量均选用二阶迎风格式,收敛判据为各项残差均小于 10^{-6} .

1.2 网格划分

可实现 $k-\varepsilon$ 模型主要适用于充分发展的湍流段,而在与壁面接触以及邻近的层流边界层中(尤其是在波纹管的波节内),湍流 Re 数很低,必须考虑分子黏性的影响. 为了提高仿真准确性,需要采用增强壁面函数对低雷诺数区域进行处理.

在划分网格时,以 $y^+ = (\rho u_i y / \mu)$ 表示第一层节点与壁面之间的无量纲距离. 对于增强壁面函数,临近壁面处取 $y^+ \leq 1$,第一层节点在层流底层内,并且至少布置 10 个网格节点,以 15~20 层为佳. 在近壁面以外区域, y^+ 取 30~300. 为了防止 y^+ 出现在 5~30,在选择增强壁面条件时,勾选压力梯度效应项,以修正可能由于网格 y^+ 过渡而导致的计算精度问题.

由于波纹管整体上为圆柱形对称结构,可以使用绕中心对称轴旋转的方式建立 2D 网格模型. 采用四边形结构网格,并采取多层分区块方法,使得边界和波节内等低雷诺数区域到管中心 ($y = 0$) 高雷诺数区域有平滑的过渡,在保证满足 y^+ 条件的同时,还能有高网格质量. 最终生成的网格如图 3 所示. 计算模型中网格行列式值均 >0.8 ,且 >0.9 的网格数占总数的 98.8%.

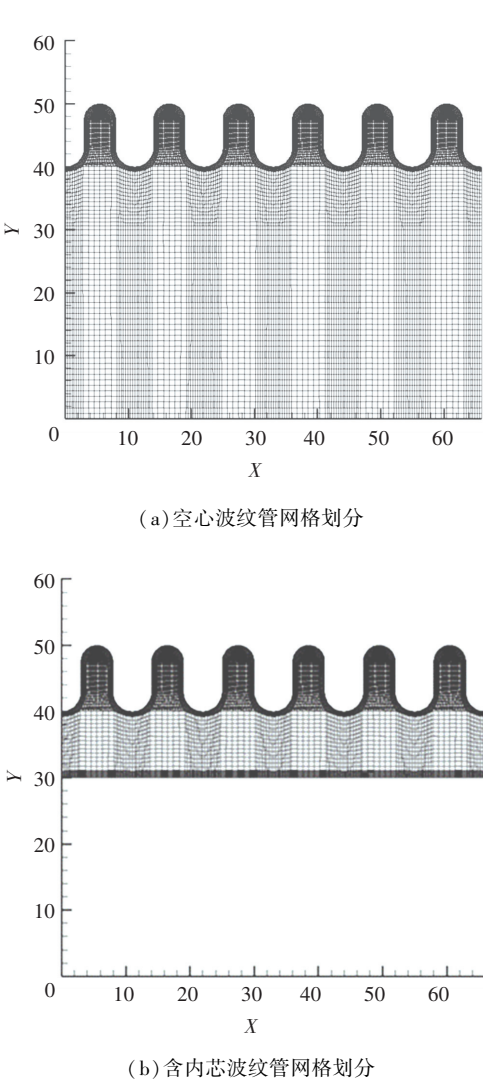


图 3 波纹管网格示意图

Fig.3 Computational domain meshing of bellows

本文通过壁面函数法,将网格数为 15 万、30 万、60 万的网格分别用于波纹管 ($d = 8.5\text{ mm}$ 、 $e = 1.7\text{ mm}$ 、 $p = 3\text{ mm}$) 计算。在雷诺数为 40 000 时,15 万与 30 万的网格计算结果偏差大,约 8.3%,而当网格数高于 30 万时,网格生成的数量与计算结果的相关性很小,30 万和 60 万网格相差 $< 1.2\%$,可以认为网格数为 30 万时已达到网格无关性要求。为了节省计算资源,各案例均选取 30 万计算网格。

1.3 仿真模型的验证

首先对上述仿真模型进行验证,建立与实验使用波纹管几何参数 ($d = 8.5\text{ mm}$ 、 $e = 1.7\text{ mm}$ 、 $p = 3\text{ mm}$) 一致的波纹管模型,进行仿真并与实验结果^[19]对比。将仿真结果处理为达西摩擦因子 f ,如图 4。

由图 4 可见,仿真结果与实验结果吻合良好,在雷诺数 20 000~50 000 时,两者偏差 $< 10\%$,在实验误差以内。基本可认为上述仿真方法能够满足大雷诺数范围内的波纹管内液氮流动的研究需要。

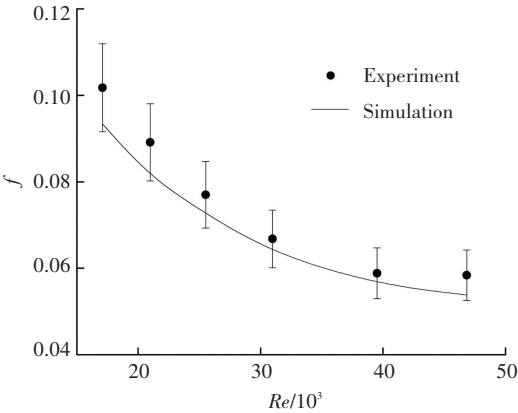


图 4 本文仿真结果与实验数据^[19]对比

Fig.4 Comparison between numerical results and experimental results^[19]

2 波纹管内液氮流阻特性仿真结果

2.1 不同规格空心波纹管内的流动

针对内径 d 分别为 40、60、80 这 3 种规格的波纹管,选取波高内径比 e/d 分别为 1/12、1/8、1/4,波距波高比 p/e 分别为 0.75、1.00 和 1.50,进行排列组合,并开展仿真计算。根据市场上实际波纹管产品的调研可知,上述参数组合基本上覆盖了常用规格波纹管的几何结构范围。

以 $d = 80$ 、 $e/d = 1/8$ 、 $p/e = 1$ 结构的波纹管为例,其内液氮流动仿真计算结果如图 5 和图 6 所示。从第一个波节开始,液氮到达波谷时会紧贴波节背面(定义见图 2)绕流进入波节内,其后脱离波节背面,即边界层分离。脱离后的流体中会有一部分冲击到波节迎面前改变流动方向,顺着波节曲面回流,进而在波节内部的下区域形成漩涡;且该漩涡的产生使得靠近波峰的液氮受到扰动,产生的剪切力有可能引发另一个漩涡,如图 5 所示。对比图 5(a) 和 5(b) 发现,随着雷诺数的增大,边界层分离发生的位置逐渐靠前,进入波节内的液体减少,从而使得波节对管内流体达西摩擦因子的影响减弱。对比图 5(c) 和 5(a) 可知,当波距增加时,管内液体更易流入波节内,漩涡发展更加充分,即单个波节对流动阻力的影响增大。此外,根据图 6(b) 和 6(c) 所示,液氮在波节的中心点区域附近速度为零,并在液氮冲击波节迎面前附近产生相对高压压力区域(见图 6(a)),规定入口处基准面压力为 0。

引起波纹管内达西摩擦因子增大的原因主要有 3 个:1) 在波纹管每个波节背面附近,液氮会产生边界层分离现象。该区域内产生了较大的压降和速度梯度,形成流动阻力和能量损失;2) 边界层分离后的流体向波纹管下游发展,冲击到波节迎面,流型发生改变,再一次产生阻力;3) 由于冲击改变方向的流体在波节内形成漩涡,对波纹管的边界层造成扰

动. 当波距较短时,因冲击改变方向的流体在波节内的发展将被限制,不能形成漩涡;当波距增加时,液氮紧贴波节背面流动的距离会延长,进入波节内的液体增多,且因冲击改变方向的流体有较大的发展空间,从而形成的漩涡也增大,相应地,达西摩擦因子增大;当波距继续增大并达到一定值时,波纹管

内流动的液氮将一直紧贴波节内壁面流动,不再发生边界层的分离;此后若继续增大波距,只会增加波节内液氮与管壁贴合的区间长度,波节对达西摩擦因子的影响几乎不变.

图 7 给出了 3 种波高内径比 e/d 分别固定不变时,改变波距波高比 p/e 对达西摩擦因子的影响.

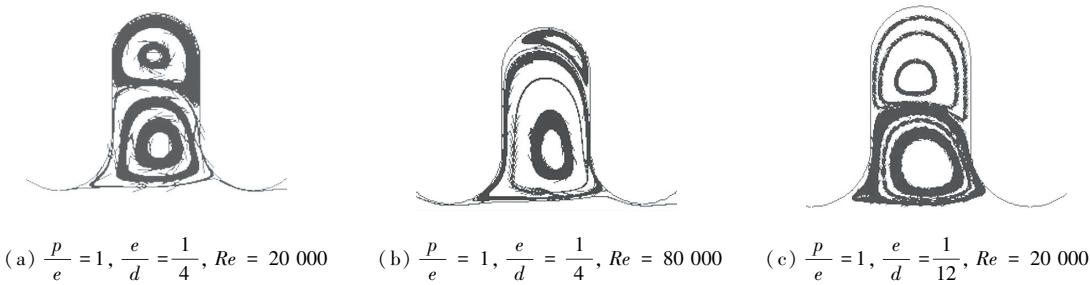


图 5 波节内流线对比
Fig.5 Streamline in the waves

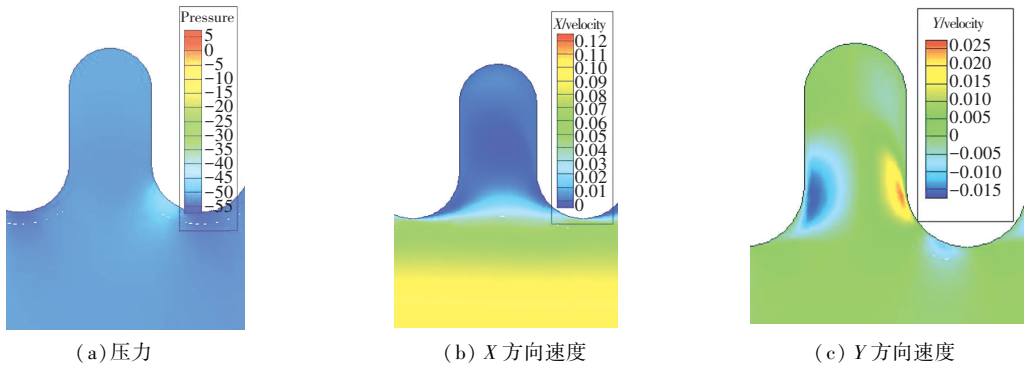


图 6 波节内流动情况云图概览
Fig.6 Contour in the waves of the bellows

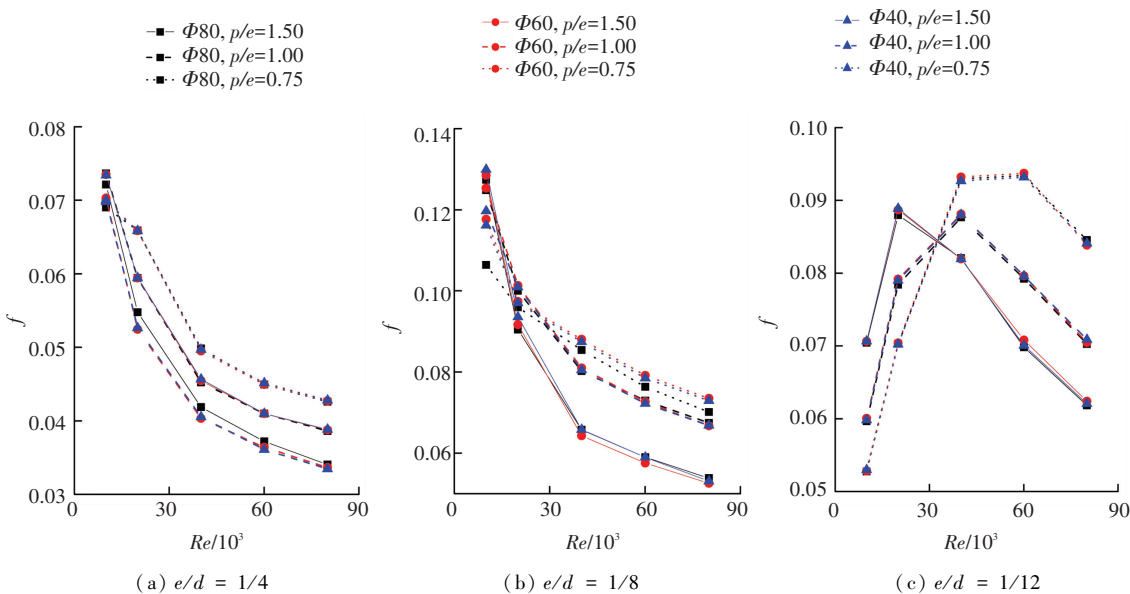


图 7 e/d 固定时, p/e 变化对达西摩擦因子的影响
Fig.7 Affection of p/e on f

在充分发展段,若 e/d 不变,达西摩擦因子随着 p/e 的增大而减小. 这是由于在高雷诺数的充分发展

湍流段,边界层较为稳定,中心的湍流对数区受到波纹管起伏表面的影响较小,阻力主要来自边界层,因

此 p/e 越大(波节越少),边界层受到的影响就越小,即达西摩擦因子随着 p/e 的增大而减小. 当 e/d 为 $1/4$ 和 $1/8$ 时,如图 7(a) 和(b),达西摩擦因子随着雷诺数的增大而减小;而当 e/d 为 $1/12$ 时,达西摩擦因子随着雷诺数的增大先上升后下降. 这是由于在雷诺数较低的湍流过渡阶段,稳定的对数区和边界层都未形成, p/e 的增大(波距增大) 会使更多的液体进入波节内形成更大的漩涡从而对波节外的流动造成的影响要大于因 p/e 的减小(波节增多) 对流动造成的影响. 当 e/d 为 $1/12$ 时,进入充分发展湍流时的雷诺数要大于前两种情况,这是由于该种情况下的波距小,单位长度内波节数量多,湍流越容易受到扰动的

原因.

图 7 还表明,相同雷诺数下, p/e 越大,进入波节的液体也越多,因此雷诺数对达西摩擦因子的影响也会相对显著,即随着 p/e 的增大,达西摩擦因子随雷诺数的变化斜率增大. 此外,当 p/e 和 e/d 固定时,不同内径的波纹管达西摩擦因子曲线几乎互相重合,可以得出结论:即在所研究的范围内,内径对达西摩擦因子几乎没有影响.

由于达西摩擦因子几乎不受到管内径的影响,下文取同一内径 80 mm 的波纹管进行比较. 图 8 给出了在 p/e 不变的情况下改变 e/d 对达西摩擦因子的影响.

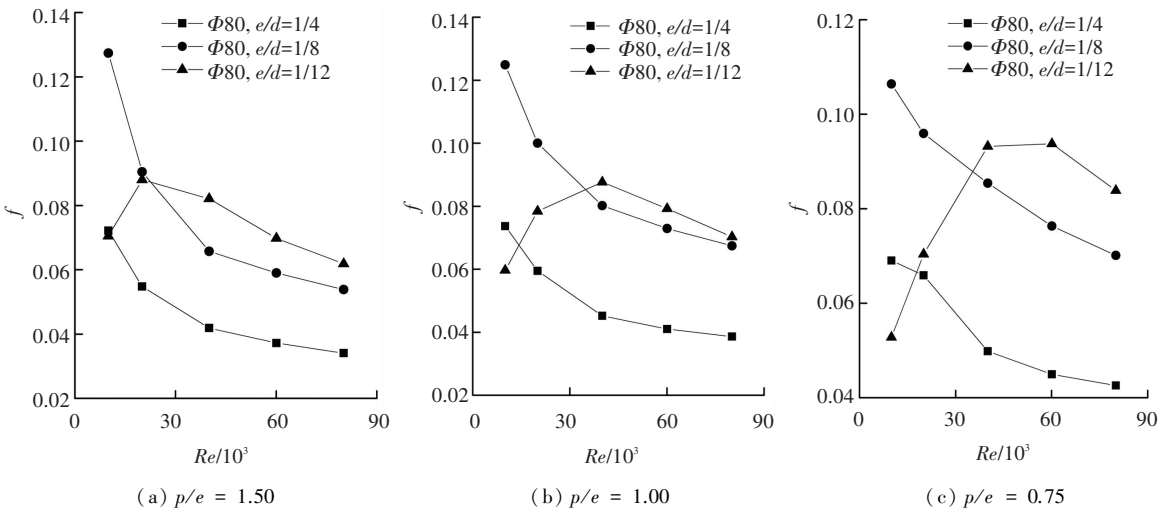


图 8 p/e 固定时, e/d 变化对达西摩擦因子的影响

Fig.8 Affection of e/d on f

雷诺数在40 000~80 000时,达西摩擦因子随波高的增加而减小;这是由于在 p/e 固定时,波高增加,则波距变大,且在充分发展段阻力主要来自边界层,因此波距变大,波节越少,边界层受到的影响就越小. 在雷诺数为10 000 ~ 40 000 时, e/d 为 $1/4$ 的波纹管达西摩擦因子仍然小于 e/d 为 $1/8$ 的波纹管,而 e/d 为 $1/12$ 的波纹管发生流动过渡现象,达西摩擦因子从最小上升到最大. 同时,波高越高,达西摩擦因子在40 000 ~ 80 000 随着雷诺数的变化越缓慢. 因此,在雷诺数继续上升时,达西摩擦因子曲线有相交的趋势. 可预测在高雷诺数下,会出现达西摩擦因子随着波高增大而增大的趋势.

2.2 含内芯不同规格波纹管内的流动

实际应用中有时需在波纹管内插入芯体,因此有必要研究含内芯波纹管的管内流动阻力特性.

考虑在直径为 80 mm、波高和波距均为 10 mm 的波纹管,分别插入直径为 60、40、20 mm 的内芯,研究不同内芯直径对达西摩擦因子的影响. 如

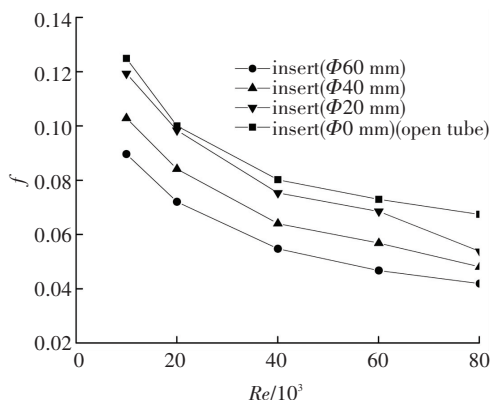
图 9 可见,不同内芯直径(包括空心波纹管,即 $d_i = 0$) 时, Re 与 f 的关系曲线趋势相近.

在相同 Re 下,内芯越细,达西摩擦因子越大,但是在相同流量下的压降却越小. 达西摩擦因子 f 仅与雷诺数 Re 和管壁相对粗糙度有关;在 Re 相同时,空心波纹管内的液氮流动两侧均为粗糙度很大的波纹管壁面结构;假设插入的内芯直径足够大,则管内液氮流动可以简化成在一侧为光管壁面,一侧为波纹管壁面的夹层空间内的流动;且随着内芯变细,流动特性与空心波纹管越来越接近. 光滑内芯的插入,实际上等效于降低了管内液氮流动的综合相对粗糙度,且内芯直径越大,该相对粗糙度越低,从而达西摩擦因子越小. 在波纹管外径不变的情况下,由达西公式和体积流量计算公式 $Q = vA$ 联立,可得

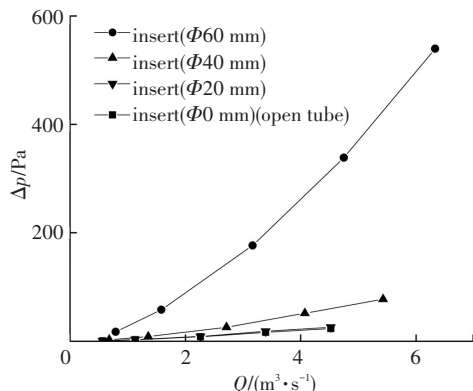
$$\Delta p = 2f\rho \frac{L}{d_i} \frac{Q^2}{A^2}.$$

流动阻力和液体流通横截面积 $(1/4)\pi(d^2 - d_i^2)$ 的平方与水力直径 $(d - d_i)$ 的乘积成反比,即与内芯

直径成正比. 因而, 内芯直径越大, 压降越大, 如图 9 所示.



(a) 内芯直径对达西摩擦因子的影响



(b) 内芯直径对管道压降的影响

图 9 含内芯波纹管仿真结果

Fig.9 Numerical data of bellows with an insert

3 仿真结果可推广性验证

为了考察以上仿真结果的实用性和可推广性, 进一步将仿真计算结果与实验结果进行对比.

上述几何参数组合下的仿真结果已覆盖了绝大部分常用规格波纹管范围, 虽然仿真结果也仅进行了有限工况的计算, 但由于采用了量纲一方法, 因此具有较好的通用性. 对于任一几何结构尺寸并未出现在上述仿真数据点上的实际波纹管, 可以在上述仿真结果的基础上进行内插计算. 以实验用波纹管 ($d = 8.5 \text{ mm}$ 、 $e = 1.7 \text{ mm}$ 、 $p = 3 \text{ mm}$) 为例, 所得的仿真结果与液氮实验结果^[19]的对比验证如图 10 所示.

在空心波纹管中, 随着雷诺数的增加, 两者误差逐渐减小, 雷诺数 $< 20\,000$ 时, 误差 $< 30\%$; 雷诺数在 $20\,000 \sim 50\,000$ 时, 误差 $< 10\%$. 由光管水实验可知, 在较低雷诺数下, 阀门和入口管等对流动都存在较大影响, 从而影响到实验结果的精度. 由图 10 可知, 含有内芯 ($d_i = 5 \text{ mm}$) 的实验用波纹管的达西摩擦因子仿真曲线与实测实验值吻合度较高.

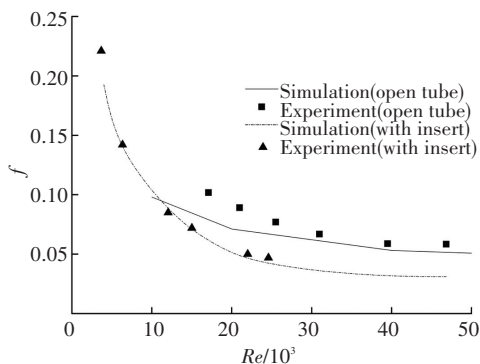


图 10 空心及含内芯波纹管仿真结果与实验结果^[19]的比较
Fig.10 Comparison of simulation results and experimental results^[19] of bellows with/without an insert

图 11 对本文仿真结果与以往文献研究结果进行了比较, 研究对象为文献[11]中的空心波纹管 ($d = 12.70 \text{ mm}$ 、 $e = 3.45 \text{ mm}$ 、 $p = 3.32 \text{ mm}$) 和文献[9]中插入内芯的波纹管 ($d = 80 \text{ mm}$ 、 $e = 8 \text{ mm}$ 、 $p = 6 \text{ mm}$ 、 $d_i = 60 \text{ mm}$).

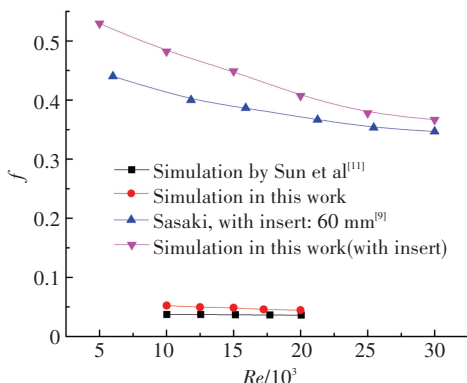


图 11 空心及含内芯波纹管仿真结果与文献[9]、[11]结果的比较
Fig.11 Comparison of simulation results and literature results [9], [11] of bellows with/without an insert

可以看出: 随着雷诺数的增高, 本文仿真结果与研究文献中的仿真结果的达西摩擦因子的总体变化趋势一致, 特别是空心波纹管的数据吻合性较好. 对于有内芯插入的情况, 当雷诺数低于 $20\,000$ 时, 存在 $12\% \sim 25\%$ 的偏差; 但当雷诺数高于 $20\,000$ 时, 两者偏差不超过 10% .

总体上, 可认为本文仿真结果可以推广应用到较大结构尺寸范围及有或无内芯两种情况的波纹管液氮流动阻力特性计算, 为常用低温流体的波纹管设计选取提供了理论依据.

4 结 论

本文从 e/d 和 p/e 量纲一变量的角度, 对大结构尺寸范围内波纹管中液氮的流动阻力特性和含内芯情况进行了 2D 建模和仿真分析. 仿真结果表明:

1) 波纹管流体进入波节形成漩涡是导致波

纹管阻力较大的主要原因. 考察量纲一下波纹管几何结构尺寸对流动阻力的影响.

2) 当 e/d 和 p/e 固定时, 仅改变波纹管的内径对达西摩擦因子几乎没有影响. 在低雷诺数下, e/d 不变时, 波距越大, 波纹管达西摩擦因子越大; 高雷诺数下, 波距越大, 达西摩擦因子越小.

3) 在 p/e 不变时, 高雷诺数下, e/d 越大, 达西摩擦因子越小; 低雷诺数下, e/d 较小时, 管内湍流发生转捩, 使得达西摩擦因子从最小逐渐上升至最大.

4) 对于含内芯的波纹管, 内芯直径越大, 达西摩擦因子越小; 内芯直径越小, 达西摩擦因子越接近空心波纹管.

5) 通过典型结构及工况下与文献数据的对比发现, 本文模型获得的仿真结果与文献结果吻合良好, 表明其可以推广应用到大结构尺寸范围及有、无内芯插入两种情况下的各类波纹管内液氮流动阻力特性计算, 对低温波纹管应用的实际工程设计具有参考价值.

参考文献

[1] JIN J X, GRANTHAM C, DOU S X. Electrical application of high T_c superconducting saturable magnetic core fault current limiter[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1997, 7(2): 1009-1012. DOI: 10.1109/77.614678.

[2] JIN J X, XIN Y, WANG Q L. Enabling high-temperature superconducting technologies toward practical applications[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014, 24(5): 5400712. DOI: 10.1109/TASC.2014.2346496.

[3] 信赢, 任安林, 洪辉. 超导电缆[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013. XIN Ying, REN Anlin, HONG Hui. Superconducting cable[M]. Beijing: Electric Power Press of China, 2013.

[4] 金建勋, 游虎, 姜在强, 等. 高温超导电缆发展及其应用概述[J]. 南方电网技术, 2015, 9(12): 17-28. JIN Jianxun, YOU Hu, JIANG Zaiqiang, et al. Development and application overview of high temperature superconducting cable[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(12): 17-28.

[5] JIN J X, ZHANG C M, HUANG Q. DC power transmission analysis with high T_c superconducting cable technology[J]. Nature Sciences, 2006, 1(1): 27-32.

[6] MIYOSHI K, MUKOYAMA S, TSUBOUCHI H. Design and production of high- T_c superconducting power transmission cable[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2001, 11(1): 2363-2366. DOI: 10.1109/77.920336.

[7] CHO J, SIM K D, BAE J H. Design and experimental results of a 3 phase 30 m HTS power cable[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2006, 16(2): 1602-1605. DOI: 10.1109/TASC.2005.864321.

[8] 戴少涛, 林良真, 林玉宝. 75 m 三相交流高温超导电缆的研制[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(12): 91-96. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2007.12.017. DAI Shaotao, LIN Liangzhen, LIN Yubao. Development of 75 m long three-phase high temperature super conducting power cable[J]. Proceedings of The Chinese Society for Electrical Engineering, 2007, 27(12): 91-96. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2007.12.017.

[9] SASAKI A, IVANOV Y, YAMAGUCHI S, LN₂ circulation in cryopipes of superconducting power transmission line[J]. Cryogenics, 2011, 51(9): 471-476. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2011.05.002.

[10] LEE C H, KIM C D, KIM K S, et al. Performance of heat transfer and pressure drop in superconducting cable former[J]. Cryogenics, 2003, 43(10): 583-588. DOI: 10.1016/S0011-2275(03)00167-X.

[11] 孙凤玉, 张鹏, 王如竹, 等. 高温超导电缆用波纹管内液氮流动特性的数值研究[J]. 低温与超导, 2007, 35(5): 376-380. DOI: 10.16711/j.1001-7100.2007.05.003. SUN Fengyu, ZHANG Peng, WANG Ruzhu, et al. Study of the flow characteristics of the sub-cooled liquid nitrogen in corrugated tubes used for HTS power cable[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2007, 35(5): 376-380. DOI: 10.16711/j.1001-7100.2007.05.003.

[12] 李云贤, 李振明, 方进, 等. 超导电缆波纹管内过冷液氮流动阻力特性研究[J]. 低温工程, 2013, 197(4): 29-32. LI Yunxian, LI Zhenming, FANG Jin, et al. Flow resistance characteristics of sub-cooled liquid nitrogen in corrugated pipes of superconducting cables[J]. Cryogenics, 2013, 197(4): 29-32.

[13] FUCHINO S, TAMADA N, ISHII I, et al. Hydraulic characteristics in superconducting power? transmission cables[J]. Physica C: Superconductivity, 2001, 354(1/2/3/4): 125-128. DOI: https://doi.org/10.1016/S0921-4534(01)00063-6.

[14] BERNHARD D M, HSIEH C K. Pressure drop in corrugated pipes[J]. Journal of Fluids Engineering, 1996, 118: 409-410.

[15] BLASIUS H. Mitteilungen über forschungsarbeiten auf dem gebiete des ingenieurwesens[M]. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1913: 1-4, 131.

[16] DREW T S, KOO E C, MCADAMS W H. The friction factor in clean, round pipes[J]. Transactions of the American Institute of Chemical Engineers, 1932, 28(56): 55-72.

[17] JSME. JSME data book: Heat transfer[M]. 4th Edition. Tokyo: Ma-ruzen, 1991: 255.

[18] KOH D, YEOM H, HONG Y, et al. Performance tests of high temperature superconducting power cable cooling system[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2004, 14(2): 1746-1749. DOI: 10.1109/TASC.2004.831066.

[19] 闫畅迪, 黄永华, 喻志广, 等. 带芯波纹管内液氮流动压降特性的实验研究[J]. 制冷技术, DOI: 2016, 36(3): 1-5. 10.3969/j.issn.2095-4468.2016.03.101 YAN Changdi, HUANG Yonghua, YU Zhiguang, et al. Experimental investigation on the pressure drop characteristics of liquid nitrogen flow in bellows with an insert[J]. Refrigeration Technology, 2016, 36(3): 1-5. DOI: 2016, 36(3): 1-5. 10.3969/j.issn.2095-4468.2016.03.101.

(编辑 杨 波)