

基于 FloMASTER 的金属流体介质阻力特性建模研究

杨彬¹ 王广基² 李俊峰¹ 张伟¹ 司鹏昆³

1 中广核研究院有限公司

2 因博信息科技(上海)有限公司

3 大亚湾核电运营管理有限责任公司

DOI:10.32629/pe.v4i3.21104

[摘要] 本文对液态金属流体介质的流动特性进行了调研和仿真研究。首先对比了不同管道阻力理论模型,并基于测试的直管道和弯管的压降数据对模型进行了验证。并基于试验数据对Blasius公式进行了修正,使新的模型与测试数据的偏差尽量小。完成模型修正和验证后,本文基于FloMASTER软件开发了直管道和弯管的一维阻力模型元件。经过对比验证,仿真结果与测试数据的偏差小于8%,精度达到了工程设计的要求,这为该液态金属流体介质在其他阻力部件中的流阻模型开发奠定了基础。

[关键词] 液态金属流体; 仿真研究; 阻力特性

中图分类号: TK **文献标识码:** A

Modeling of resistance characteristics of liquid metal based on FloMASTER

Bin Yang¹ Guangji Wang² Junfeng Li¹ Wei Zhang¹ Pengkun Si³

1 China Nuclear Power Technology Research Institute Limited CO., LTD.

2 Empowertech Information Technology CO. LTD.

3 Daya Bay Nuclear Power Operations and Management CO., LTD.

[Abstract] This paper investigates and simulates the flow characteristics of a liquid metal media. Firstly, different theoretical models of pipe resistance were compared, and the models were validated based on pressure drop data from tested pipe and bend. Therefore, based on experimental data, this article has revised the Blasius equation to minimize the deviation between the new model and the test data. After completing the model correction and verification, this article developed one-dimensional resistance components for pipe and bend based on the software FloMASTER. After validation, the deviation between the simulation results and the test data is only about 8%, and the accuracy meets the requirements of engineering design. This built the foundation for the development of flow resistance models for liquid metal fluid media in other resistance components.

[Key words] Liquid metal; simulation; Flow resistance

1 引言

目前国际范围内正在研究和开发的第四代反应堆,其设计的主要目的包括:提高燃料的利用率降低核废料产量,提高安全性降低风险,提高热效率降低建设和运营成本。第四代核能系统国际论坛(GIF)初步确定了六种候选反应堆类型,其中熔盐反应堆(MSR)、钠冷快中子反应堆(SFR)和铅冷快中子反应堆(LFR)均采用了液态金属作为冷却剂或燃料。本文研究的金属共熔合金是由44.5%的A金属和55.5%的B金属组成,因其低中子吸收率与低熔点(123.5℃)及良好的导热性被用作快堆冷却剂,该液态合金的超高沸点(1670℃)也使得其相较于液体钠合金具有更好的安全性。虽然该液态合金对水和空气的反应性较低,不会在与空气和水接触后迅速反应甚至燃烧,但具有辐射安全问题、材料

兼容性问题及流动特性方面的问题。

在液态金属流体介质方面的研究,该液态金属介质以低温低压、大比热、低粘度被用于反应堆冷却剂。在该液态金属的研究领域,绝大部分是针对一回路中的换热以及泵的工作特性进行研究,但在流动阻力方面,却鲜有文献。由于该合金的特殊物性,传统的阻力模型并不适用,需要针对该介质开发出新的阻力模型为系统设计提供帮助。

根据《OECD/NEA合金手册》(2015版)^[1],可知,该液态金属合金液态下的物性参数如下表所示。

反应堆的冷却效率除了与材料本身的比热容热导率等特性相关,还与流速相关,流速由压降和阻力系数决定。本文主要研究在300℃下该液态金属的阻力特性,通过测量不同速度下的该

液态金属流经管道管件的压差,并结合已有公式总结出阻力系数与雷诺数相关的数学表达式。

表1 介质物性

热物性参数	参数表达式 (T为开氏温度)
密度, kg/m ³	$\rho = 11065 - 1.293 * T$
热导率, (W/(m * K))	$\lambda = 3.284 + 1.617 \times 10^{-2} * T - 2.305 \times 10^{-6} * T^2$
比热容, (J/kg * K)	$C_p = 164.8 - 3.94 \times 10^{-2} * T + 1.25 \times 10^{-5} * T^2 - 4.56 \times 10^5 * T^{-2}$
动力粘度, (Pa * s)	$\mu = 4.94 \times 10^{-4} * e^{7543/T}$
热膨胀系数, (K ⁻¹)	$\alpha = 1/(8558 - T)$

2 理论模型

2.1 模型调研

根据调研,可能适用于该金属流体阻力模型有Colebrook White模型;Slissky模型(1983);Churchill模型,是基于Colebrook White提出的显式,适用于Re在2000-4000的过渡区^[2];Altshul模型,适用于水力平滑管道中Re大于等于10000的情况下;基于Colebrook White的显示表达式Swamee-Jain,以及Blasius模型。

2.2 实验数据分析

在实验中,主要以DN50的管道为对象开展了不同流速的实验,实验流速分别为0.07m/s-0.95m/s,每间隔0.07m/s一组数据。实验时,该金属流体介质的温度保持恒定,为270℃。实验时,管道长度取100倍管径的长度作为实验段进行压差测量,实验装置原理图如下所示。

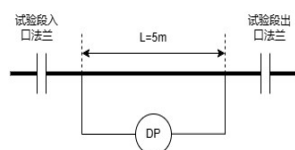


图1 圆管流阻实验原理图

实验数据如表2所示:

表2 实验数据与计算结果

流量 Q	压降 P	计算 Re	试验 f
m ³ /h	Pa	-	*100
0.508	259	18602	11.62
0.967	497	35334	6.19
1.508	768	54976	3.91
2.000	1196	72940	3.46
2.510	1775	91491	3.26
2.999	2444	109257	3.14
3.506	3241	127705	3.05
4.012	4132	146197	2.97
4.510	5139	164733	2.92
4.999	6333	182637	2.93
5.499	7746	20668	2.96
6.018	9282	219744	2.96
6.510	10788	237960	2.94
6.653	10715	243328	2.81

根据上表中的实验数据,结合伯努力方程,计算出不同流速下的摩擦系数f,摩擦系数的演化公式如下:

$$f = \frac{2\Delta P D}{L \rho U^2} \quad (1)$$

本文调研了不同阻力模型,Churchill模型的误差最大,有几倍的差异;Altshul模型、Slissky模型、Blasius模型和White模型也有较大的误差,低流速时误差较大,高流速时误差均在35%以上。总体来看,上述理论模型均不能够较精确地对该金属流体流阻进行表达。

从上图中可以看出,在低流速时(<0.2m/s),摩擦系数与雷诺数近乎线性关系,适用于在光滑管壁中的层流模型,与White Brook公式的分段类似,该公式中管道阻力模型可表述为:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2)$$

在高流速时(>0.2m/s),摩擦系数随雷诺数变化较小,适用于光滑管壁中的湍流模型,管道阻力模型表达式较为精简的是Blasius公式^[3],如下:

$$f = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad (3)$$

White公式中的层流摩擦系数公式和Blasius公式的拟合逼真度不高,需对方程中的系数进行重新标定。

相似规律在大管径管道冰浆流动阻力特性研究中也有体现,在该文章中介质为非牛顿流体冰浆低雷诺数下的阻力系数远大于Blasius公式,而在高雷诺数时阻力系数与Blasius公式相符。本文进一步对Blasius公式进行改进以达到符合液体金属的形式,采用拟合的方法对阻力模型进行修正。

2.3 模型修正

在流体力学及相关工程领域中,将传统经验公式中的固定参数替换为依赖于几何尺度(如管径、通道宽度或半径)的函数形式,已成为提高模型适用性和预测精度的重要手段。各领域在应用自适应摩擦模型时,核心思想均为:利用无量纲分析将传统经验公式中的固定参数转化为与关键几何尺度相关的函数;通过大规模数据采集和回归拟合,确定参数函数的具体形式;利用敏感性分析与不确定性传播方法,量化模型预测的误差范围。

本文的自适应阻力模型主要涉及三个变量,即摩擦系数f,雷诺数Re以及管径D,允许模型根据雷诺数的变化自适应地调整参数,从而提高了模型在不同流动条件下的预测精度。相比传统的固定参数模型,自适应阻力模型能够更准确地捕捉流体动力学特性,提供更可靠和适用范围更广的预测结果。

经过对不同公式的验证,本文采用管道的阻力表达式采用 $f=aRe^b$ 的形式,误差是比较小的。因此,要推演的内容是确定公式中的a、b系数,而这两个系数均为与雷诺数有关的变量函数,即 $a=f_1(D)$ 、 $b=f_2(D)$

经如下几步进行两个函数的确定:

(1)采用控制变量法拟合某一流量(雷诺数)时的阻力系数,得到某个管径下的系数 $a[1]$ 和 $b[1]$;

(2)重复(1)的拟合工作,得到系数向量 $a[i]$ 和 $b[i]$;

(3)针对系数向量 $a[i]$,构建与管径 D 的关联式,即确定 $a=f_1(D)$ 的具体表达式:

$$a = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 D}{1 + \alpha_3 D + \alpha_4 D^2} \quad (4)$$

(4)针对系数向量 $b[i]$,构建与管径 D 的关联式,即确定 $b=f_2(D)$ 的具体表达式:

$$b = \frac{\beta_1 + \beta_2 D}{1 + \beta_3 D + \beta_4 D^2} \quad (5)$$

(5)即,通过将系数 a 和系数 b 单独与管径分别进行拟合,从而得到系数与雷诺数的函数表达式,从而将多个方程进行整合,得到该金属介质流动的摩擦系数表达式如下:

$$f = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 D}{1 + \alpha_3 D + \alpha_4 D^2} \cdot \frac{\beta_1 + \beta_2 D}{Re^{1 + \beta_3 D + \beta_4 D^2}} \quad (6)$$

式中, α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 、 β_1 、 β_2 、 β_3 、 β_4 为通过数据拟合得到的系数。可以看出 a 、 b 系数的数学表达式形式为rational类型,该自适应模型可计算出液体金属在任意直管管径下雷诺数对应的摩擦系数。针对上述方程在不同流动状态下再次进行简化,可得简化公式,分别如下。

在低流速时($<0.2\text{m/s}$),摩擦系数与雷诺数近乎线性关系,适用于在光滑管壁中的层流模型,管道阻力模型可表述为:

$$f = \frac{2250}{Re} \quad (7)$$

在高流速时($>0.2\text{m/s}$),摩擦系数随雷诺数变化较小,适用于光滑管壁中的湍流模型,管道阻力模型可表达式为与Blasius公式类似的形式,如下:

$$f = \frac{0.264}{Re^{0.181}} \quad (8)$$

综上所述,该液态金属流体介质的阻力模型可以表述为 $f=aRe^b$, a 、 b 取值为:

$Re < 60000$, $a=2250$, $b=-1$;

$Re > 60000$, $a=0.264$, $b=-0.181$ 。

除此之外,本实验还包括其他管件的流阻实验,通过数据验证发现其中弯头、三通可等效为阻力系数相似的不同管径直管,从而能够得到简化公式。

3 仿真元件开发

基于上述的实验条件及理论模型,适用于 300°C 下的该液态金属直管道元件开发,以用于金属介质的各种系统的仿真设计计算。本项工作基于FlomASTER软件,进行二次开发完成,开发了基于上述修正模型的管道阻力模型和弯管模型。

3.1 控制方程线性化

FlomASTER软件通过求解流动方程的线性方程组来求得某

一元件的压力、流量、流速等参数。在进行元件开发时,需要将该元件的压力-流量方程组进行等效处理,具体方程形式如下。

$$\dot{m}_1 = A_1 P_1 + A_2 P_2 + B_1$$

$$\dot{m}_2 = A_3 P_1 + A_4 P_2 + B_2$$

其中, A 、 B 均为以该元件的输入参数计算推导所得的系数,其中 B 是源项流量。在系统求解时,采用矩阵求解,因此,上述线性方程组为矩阵表达式形式。方程组中的流量和压力的关系式基于达西阻力公式进行推导:

$$P_1 - P_2 = K \frac{\rho U^2}{2} \quad (9)$$

$$U = \frac{\dot{m}}{\rho A} \quad (10)$$

由上式可得:

$$P_1 - P_2 = \frac{K \dot{m} |\dot{m}|}{2 \rho A^2} \quad (11)$$

管道和弯管元件均为两接口元件,进出口流量相等,数值为相反数,上式可演化为:

$$\dot{m}_1 = \frac{2 \rho A^2}{|\dot{m}_1| K} (P_2 - P_1) \quad (12)$$

$$\dot{m}_2 = \frac{2 \rho A^2}{|\dot{m}_2| K} (P_1 - P_2) \quad (13)$$

由此,可得 A 、 B 系数分别如下:

$$A_1 = -\frac{2 \rho A^2}{|\dot{m}_1| K} \quad A_2 = -A_1 \quad B_1 = 0$$

$$A_3 = -A_1 \quad A_4 = A_1 \quad B_2 = 0$$

管道的阻力系数为摩擦系数的函数如式(6)所示。

3.2 元件开发与测试验证

表3 管道仿真模型阻力测试结果

直径	流量	Re	f 实测值	f 仿真值	误差
mm	m ³ /h	-	*100	*100	%
50	0.508	18602	11.62	11.96	-0.45
	0.967	35334	6.19	6.30	1.77
	1.508	54976	3.91	4.05	0.08
	2.000	72940	3.46	3.47	-2.93
	2.510	91491	3.26	3.33	-1.12
	2.999	109257	3.14	3.23	-0.70
	3.506	127705	3.05	3.14	-0.55
	4.012	146197	2.97	3.06	-0.34
	4.510	164733	2.92	3.00	-0.90
	4.999	182637	2.93	2.94	-3.04
	5.499	20668	2.96	2.89	-5.66
	6.018	219744	2.96	2.84	-7.26
	6.510	237960	2.94	2.80	-7.97
	6.553	243328	2.81	2.79	-3.61

通过将管道元件参数预留接口,并将上述公式通过代码运算的实现,开发出该液态金属管道元件,并在FloMASTER软件中进行新开发的直管道元件进行测试与验证对比。该新元件的输入输出参数、计算方法、适用范围及图标均可进行自定义。建立与试验条件相同的模型进行仿真测试,仿真模式包括稳态瞬态和换热,输入参数为管长、管径和粗糙度,输出参数主要为压降、流量和摩擦系数。对不同流速下的流动阻力进行计算,并与实测结果进行对比,如表3所示。

以直径50mm的直管为例,在高雷诺数的情况下当流量从0.5 m³/h左右以0.5 m³/h的间隔逐渐增大到6.5 m³/h左右,摩擦系数从接近12逐渐降低至2.8左右,实验数据与仿真计算结果的误差最大为7.97%始终不超过10%。

4 结论

本文对该液态金属流体介质的流动阻力模型进行了分析和对比,得出了各个模型的误差范围,并结合实验数据对White公式和Blasius模型进行修正,得到了修正的阻力模型,该模型具有较好的计算精度,基于修正的阻力预测模型,在FloMASTER软件中开发了直管道、弯管等元件模型,并得到了较高的仿真精度。通过本文的工作,得出如下结论:

(a)通过Colebrook White公式的计算可以看出,该液态金属流体介质的流动阻力特性与水是不同的,需对阻力模型进行

修正;(b)修正的自适应阻力模型具有更高的计算精度和适用范围;(c)基于FloMASTER软件开发的管道模型具有较高的仿真精度,能够较好地还原实验数据;(d)基于FloMASTER软件开发的适用于该液态金属流体介质的元件库为将来金属充排系统的性能设计计算,乃至其他系统的设计计算,奠定了良好的理论基础。

[参考文献]

[1]OECD Nuclear Energy Agency.(2007).Handbook on Lead-Bismuth Eutectic Alloy and Lead: Properties,Materials Compatibility,Thermal-Hydraulics and Technologies.OECD/NEA.

[2]Colebrook,C.F.,& White,C.M.(1937).Experiments with fluid friction in roughened pipes. Proceedings of the Royal Society of London.Series A,Mathematical and Physical Sciences,161(905),367-381.

[3]Blasius,H.(1913).Das Ähnlichkeitsgesetz bei Reibungsvorgängen in Flüssigkeiten.Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens,131,1-41.

作者简介:

杨彬(1982-),男,汉族,江苏省人,高级工程师,硕士,核电系统热工水力分析。