

流出分支管道引起的三维磁流体动力学效应研究*

许增裕 潘传杰 魏文浩 陈晓琼 张延续

(核工业西南物理研究院 成都 610041)

摘要 介绍在液态金属实验回路上开展分支管道接口引起的三维(3D)磁流体动力学(MHD)效应研究所取得的结果,包括分支管道阀门开、闭两种状态下的流速分布和三维MHD压降效应修正项;并讨论了二维MHD效应和部分区域流速未全展开对实验结果的影响。

关键词 磁流体动力学, 流速分布, 三维效应

中图分类号 TL6

目前,核聚变领域最富有挑战性的课题是研制出高性能的电绝缘涂层管道和弄清二维(2D)三维(3D)磁流体动力学(MHD)效应;它包括管道几何形状变化(截面缩小、扩大和分支管道)、微裂纹、流速分布和瞬变磁场(不正常停堆)等引起的效应。在50年代到70年代,理论研究方面取得了长足进展^[1-5]。70年代以后,随着计算机的发展,主要进展出现在近似计算方面^[6-11]。然而,由于磁流体的复杂性和实验条件的限制,尤其是二维(2D)三维(3D)效应的实验数据还很少^[7,12,13],分支管道的MHD效应实验结果尚未见报道,圆形管道的流速分布尚没有完整的实验数据;而且MHD压降理论值与实验值相差10%—25%,何种原因尚未深究。本文介绍利用国际合作渠道提供的仪器和国内液态金属回路的特点(实验段外面在垂直于磁场方向和流速方向的一区域空间不受限制,便于安装测流速分布探头)开展的三维磁流体动力学效应实验研究。

1 实验设备

实验在我国专门研究磁流体动力学效应的液态金属回路上进行^[14]。其最大磁场强度为2T;均匀磁场空间为80mm×170mm×700mm;最大哈德曼数 $M=4000$;最大相互作用参数 $N=3600$ (聚变堆中 M 、 N 均在 10^3 — 10^5 范围);回路工作介质为低共融钠钾合金($\text{Na}_{22}\text{K}_{78}$,这是模拟Li的最好介质);运行温度为85℃;实验段管道由304不锈钢制成,主管道内径 ϕ_0 为57mm,壁厚 t_{w0} 为3.5mm;支管内径 ϕ_1 为22mm,壁厚 t_{w1} 为3.0mm;两压力传感器之间的距离为600mm,处于均匀磁场之中;传感器的误差为0.25%;流速分布探针LEVI(Liquid-metal Electro-magnetic Velocity Instrument)来自美国阿贡国立实验室(ANL);平均流速由电磁流量计测得,其误差为1.2%。所有数据由配有2.5 μV分辨率的12位A/D板的486工业微机采集和处理。实验段在磁场中的位置如图1所示。

* 国家自然科学基金(B19685005)资助项目

收稿日期:1998-09-01, 修回日期:1998-12-15

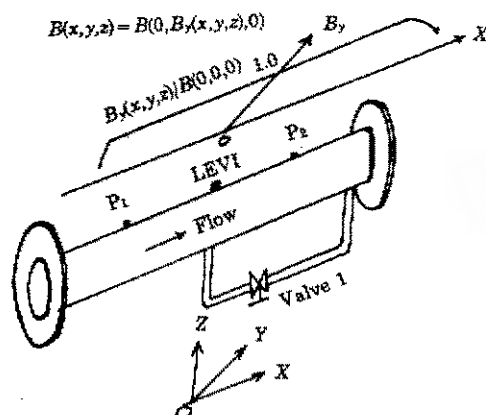


图1 实验段处于磁场中的位置

Fig.1 Scheme of test section located at magnetic field

2 结果和讨论

分支管道产生的磁流体动力学效应主要有两方面:(1)改变管道中的流速分布;(2)由于流速分布的变化而产生的三维MHD压降效应对热交换的影响。分支管道阀门V1关闭和开启两种状态下,管道截面中心线的流速分布如图2(a)、(b)所示。由图2可见,无论V1阀是开启

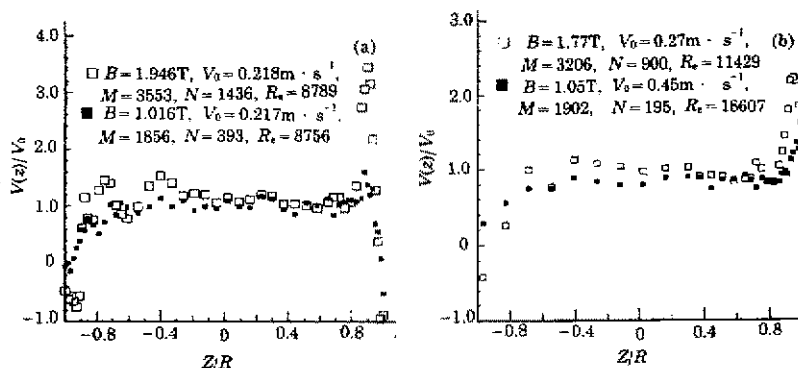


图2 V1阀关闭(a)和开启(b)时,主管道截面中心线上的流速分布

Fig.2 Velocity distribution in the center plane of cross section of pipe in valve 1 closed case(a) and opening case(b)

或是关闭,其对流速分布的影响仅靠近在分支管道这边。而另一边的流速分布基本不受影响,与矩形管道中的流速分布相类似,边界流速为射流中心流速分布平坦,且中心和边界流速均随 M 的增加而增加,这是截面感应电流密度变化所致^[12]。我们可以看到,在阀门V1关闭的情况下,流速分布产生振荡(涡旋街);同时,在 $M=3555$ 时,当雷诺数 Re 超过15500时,这种涡旋街会消失。

MHD压降的理论和实验结果如图3和图4所示。可以看到,修正后的理论值与实验值符合得相当好。

若将磁流体视为理想流体,且在均匀磁场区流速全展开区域,那么,其MHD压降可表

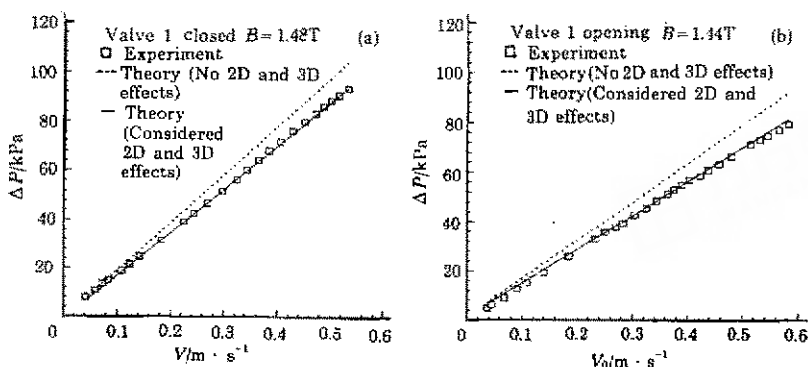


图3 V1阀关闭(a)和开启(b)时, 未考虑和考虑2D和3D效应的MHD压降理论值与实验值的比较
Fig.3 Comparison of the theoretical and experimental values of MHD pressure drop (with or without 2D and 3D effect consideration) when (a) valve1 closed (b) valve 1 opening

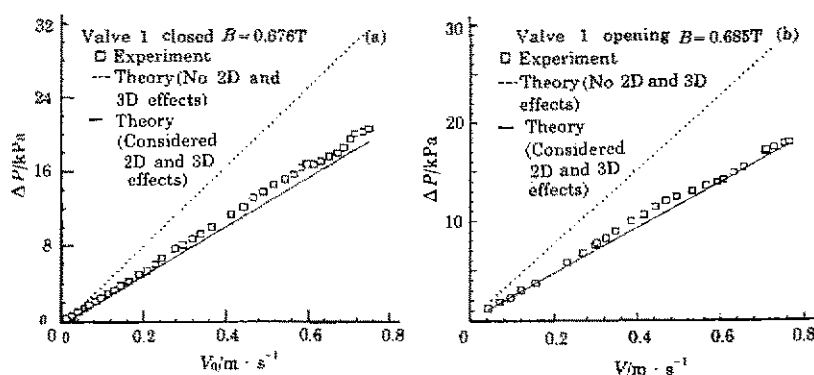


图4 在另一磁场下的V1关闭时, 未考虑和考虑了2D和3D效应的MHD压降理论值与实验值的比较
Fig.4 Comparison of the theoretical and experimental values of MHD pressure drop (with or without 2D and 3D effect consideration) when valve1 at another magnetic field was closed
示为

$$\Delta P_C \approx \sigma_f V_0 B_0^2 L \kappa \quad (1)$$

$$\kappa = \phi / (1 + \phi) \quad (2)$$

$$\phi = \sigma_w t_w / \sigma_f a \quad (3)$$

式中, σ_f 为流体电导率, B_0 为磁场强度, V_0 为平均流速, L 为两压力传感器之间的距离, ϕ 为壁电导比率, σ_w 为管道壁电导率, t_w 为壁厚, a 为与磁力线平行的管道半宽度。式(1)适用于 $M, N \gg 1$ 和 $1/M \ll \phi \ll 1$ (聚变堆及我们的实验均在此范围), 且没考虑二维MHD压降(ΔP_{2D})和三维MHD压降(ΔP_{3D})效应的情况; 若考虑了2D和3D效应, 那么, 总的MHD压降 ΔP_T 应为

$$\Delta P_T = \Delta P_C + \Delta P_{2D} + \Delta P_{3DJ} \quad (4)$$

式中, 下标J代表有支管所引起的三维效应。我们从矩形管道的二维MHD压降修正因子 $^{[12]}-K_{2D}M^{-1/2}$ 类推到圆形管道中; 在矩形管道中 $K_{2D} = 1.5 \approx b/a$ (a, b 分别为矩形管道两边的长度); 在圆形管道中 $a = b = R$, 所以这里取

$$\Delta P_{2D} = -M^{-1/2} \sigma_f V_0 B_0^2 L \kappa \quad (5)$$

对于支管所引起的三维MHD效应,理论上很难准确地给以描述和确定,这里我们参照弯道产生的附加MHD压降理论公式^[1]

$$\Delta P_B = a \sigma_f V_0 B_0^2 \phi^{1/2} \quad (6)$$

进行修正,假定

$$\Delta P_{3DJ} = \beta \Delta P_B \quad (7)$$

则 β 应正比于 a_1/a_0 (这里 a_1 、 a_0 分别为主管和支管的半宽度);同时由于附加的MHD压降是由流速的突然变化引起的轴向感应电流的环向分量引起的,而从图2(a)、(b)中流速分布的实验结果看, M 越大流速分布变化越大,所以 β 也应正比于 M 。因此,从MHD压降实验(10组实验)结果中得出

$$\beta = 0.11 \times 10^{-3} M a_1/a_0 \quad (8)$$

即

$$\Delta P_{3DJ} = \beta \Delta P_B = (0.11 \times 10^{-3} M a_1/a_0) \Delta P_B = (0.11 \times 10^{-3} M a_1/a_0) a_1 \sigma_f V_0 B_0^2 \phi^{1/2} \quad (9)$$

将式(1)、(5)、(9)代入式(4)中即得到总的MHD压降。

这里值得注意的是在将式(1)代入式(4)之前应考虑

$$\Delta P_C \approx \sigma_f V_0 B_0^2 (L_1 + L_2) \kappa \quad \text{V1阀关闭}$$

$$\Delta P_C \approx \sigma_f V_0 B_0^2 L_1 \kappa + \sigma_f V_2 B_0^2 L_2 \kappa \quad \text{V1阀开启}$$

式中, L_1 和 L_2 分别为从分支管道中心点处到压差传感器两接口的距离; V_0 和 V_2 分别为分支管道前后主管道的平均流速。

另一个须要指出的问题是式(4)忽略了压差传感器处于流速未全展开区域(在离开均匀磁场 $\tau a = \phi_1^{-1/2} a$ 的距离内, τa 称为进入长度)所引起的附加的三维MHD压降

$$\Delta P_{3Dn} = a \sigma_f V_0 B_0^2 \phi_1^{-1/2} \quad (10)$$

$|\alpha| < 1$, 沿流速方向 B 增加时 α 为正, B 减少时 α 为负。对于V1阀关闭情况,由于对称性,两端引起的 ΔP_{3Dn} 相互抵消;对于V1阀开启情况,由于分支管道前后主管道的平均流速有差异,会引起附加的 ΔP_{3Dn} ,但较小,这里忽略了。从图3(b)上看到,忽略 ΔP_{3Dn} 后,修正的理论值与实验值还是符合得比较好。

3 结论

(1) 对于下游分支管道,无论V1阀关闭或开启,对主管道的流速分布都将产生较大的影响。

(2) 小分支管道(半径之比 $a_1/a_0 < 1/2$) 对流速的影响仅在靠近接口处的主管道截面的一半区域内,另一半区域基本不受影响。

(3) 支管接口引起的三维MHD压降效应可以表示为

$$\Delta P_{3DJ} = (0.11 \times 10^{-3} M a_1/a_0) a_1 \sigma_f V_0 B_0^2 \phi_1^{1/2}$$

(4) 包层设计中应考虑支管接口引起的三维MHD效应。

致谢 LEVI仪器是在1995年中美磁约束聚变合作协议框架下,由美国阿贡国立实验室提供的;同时,还要对为保证本研究的顺利进行提供支持和帮助,以及提出宝贵意见和建议的人

们表示由衷的感谢!

参 考 文 献

- 1 Hunt J C, Holloyd R J. UKAEA Reported. 1977. 1-47
- 2 Walker S, Ludford G S, Hunt J C R. J Fluid Mech, 1972, 56:121-141
- 3 Hunt J C R. J Fluid Mech, 1965, 121:577-590
- 4 Hunt J C, Ludford G S. J Fluid Mech, 1968, 133:693-714
- 5 Holroyd R J, Walker J S. J Fluid Mech, 1978, 184:471-495
- 6 Hua T Q, Walker J S. Int J Engng Sci, 1989, 127(9):1079-1091
- 7 Bithler L. Fusion Eng Design, 1995, 27:650-658
- 8 Branover H, Buhler L. J Fluid Mech, 1994, 267:325-352
- 9 Knnngi T, Tillack M S, Abdou M A. Fusion Technol, 1991, 119:1000-1005
- 10 Ying A Y, Tillack M S. Fusion Technol, 1991, 199:990-994
- 11 Kirillov I R, Reed C B, Barleon L, et al. Fusion Eng Design, 1995, 27:553-569
- 12 XU Zengyu, PAN Chuanjie, WEI Wenhao. China Nucl Sci Technol Rep CNIC-01251 SIP0103. 1998
- 13 XU Zengyu, PAN Chuangjie, JIANG Weihong, et al. Fusion Eng Design, 1998, 39-40:793-798
- 14 QIAN Jiapa, SUN Kunze, JIANG Weihong, et al. Fusion Eng Design, 1991, 17:221-226

Study of three dimensional MHD effects in a manifold circular pipe

XU Zengyu PAN Chuanjie WEI Wenhao CHEN Xiaoqiong ZHANG Yanxu

(Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041)

Abstract

Some new experimental results carried out in a manifold circular pipe for liquid metal MHD (Magneto-hydro-dynamic) fluid flow were presented in this article. The velocity distributions were measured at the center plane of cross section of the joint of the manifold pipe. The instabilities of vortex street were observed in the cross section of the pipe. An expression formula of three-dimensional (3D) additional MHD pressure drop due to the manifold junction was obtained. 2D MHD effects and effect of non-fully developed flow on the experiment results were also discussed.

Key words Magneto-hydro-dynamic, Velocity distributions, Three-dimensional effects