

一种测量低密度混合流场浓度的新方法——热线法

66-69

庄 韬 郭传保
(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

√211.7

摘要 本文介绍了一种测量低密度混合流场浓度的方法, 采用热线浓度探头对 Air-He 组成的混合体系进行了标定测试, 在不同真空度和不同结构探头下进行了一系列对比试验, 同时考察了它们对测试精度的影响。

关键词 低密度流场测量, 浓度测量, 热线风速仪

热线法
流场

1. 引言

在一般气动混合实验中, 为了评价气体的混合速率和流场的均匀性, 通常需要测量流场的密度或浓度分布, 特别是对于低密度湍流混合问题, 要求测试仪器不仅具有较高的频率响应和空间分辨率, 而且对弱小信号检测也必须具有足够的灵敏度。目前的激光显微测量技术, 对湍流随时间和位置的迅速变化进行瞬时记录, 仍然是比较困难的工作。同时湍流的三维性也使得分析解释这些记录变量更加复杂和困难^[1]。我们知道传统的热线风速仪, 一般都具有灵敏度高、响应时间快的特点, 而且也能做到较高的空间分辨率, 因而可以检测非常低湍流速度或速度脉动。所以热线风速仪至今仍然是测量湍流参数最为理想的仪器之一。Bromn 等人^[2]利用热线风速仪的上述优点, 制作了一种“热线浓度探头”(hot wire concentration probe), 并把它配备在热线风速仪上, 用来检测混合流场中的浓度分布。Tanabe^[3]和 Kawaguchi^[4]等人分别采用这一方法, 成功地应用到空气与氢气、空气与氮气所组成的混合气体的测量中, 其探头的响应时间仅有 100μs 左右。由于他们所测试的流场密度较高, 测试精度一般不成问题。但对于低密度流场这一方法是否仍然适用, 流场密度对于测试精度有何影响? 不同的探头结构尺寸对测试结果有何不同? 这些将是我们这里主要讨论的问题。

2. 测试原理

我们采用恒温式电桥电路(图 1), 图中当热线温度 T_w 变化引起热线电阻 R_w 的变化, 其信号通过伺服放大器输入, 并反馈重新调整桥路电压, 使热线温度 T_w 保持不变。在单位时间输入到热线中

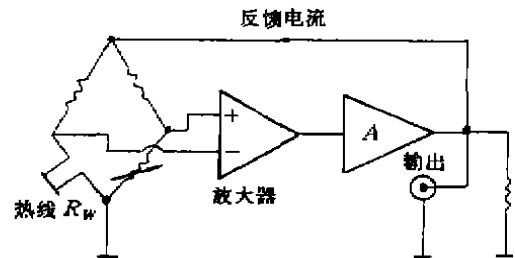


图 1 恒温式热线电桥电路

的热流可以写为

$$Q_{in} = I^2 R_w \quad (1)$$

而单位时间由热线输出的热流可以表示为

$$Q_{out} = f(u, \rho, \lambda, C_p, T_w - T_a, l_w, d_w) \quad (2)$$

式中, I 是通过热线的电流, l_w 和 d_w 分别为热线的长度和直径; u 是热线与环境介质的相关速度, T_a 、 ρ 、 C_p 和 λ 分别为热线周围介质的温度、密度、等压比热和热传导系数。在式 (2) 中热线的长度和直径是常数而且上面谈到 T_w 也是不变的。如果当环境压力和温度保持不变, 那么混合介质的成分只影响 ρ 、 C_p 、 λ 的值。对于双组元体系, ρ 、 C_p 、 λ 均可以用浓度 C 的函数形式来表示, 那么式 (2) 就可以写成

$$Q_{out} = f(u, C) \quad (3)$$

根据热平衡守恒原理

$$Q_{in} = Q_{out} \quad (4)$$

所以

$$I^2 R_w = f(u, C) \quad (5)$$

如果能够采用一种办法使得相关速度也保持为常数, 那么电路的输入电压仅仅是介质浓度 C 的函数。

热线浓度探头(图 2), 是在一细长封闭一端的玻璃管顶部开一个很小的针孔, 而玻璃管的另一端接真空泵, 并且热线固定在靠近针孔的一端, 当环境介质的温度、压力一定而真空泵又具有一定的抽

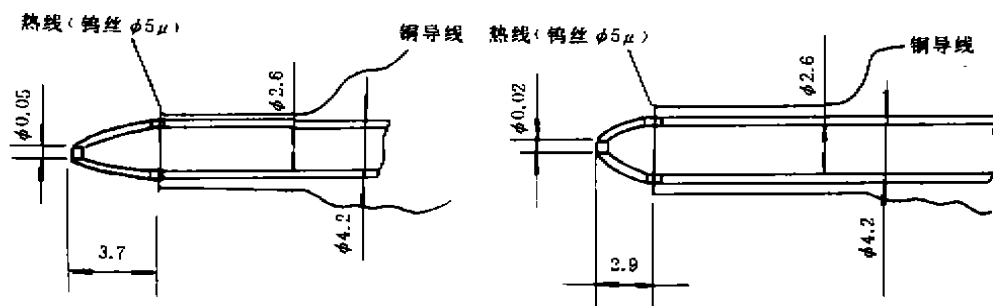


图 2 热线浓度探头结构图

空能力时, 通过针孔的介质流速将为音速, 即达到临界状态. 因而式 (5) 可以写成

$$I^2 R_w = E^2 / R_w = f(C) \quad (6)$$

这样我们就可以通过实验得到输出电压 E 与 C 的函数关系, 从而测试出流场中的浓度.

实验装置见图 3. 被测气体按比例注入配气

釜. 由真空泵 1 将管道和测试腔中的残余气体抽出, 并达到真空. 关闭真空泵 1, 开启真空泵 2, 同时把配气釜中的气体放入测试腔. 不同配气比, 会在热线风速仪上指示出不同的电压值. 这里的实验气体为空气和氮气两种气体进行混合. 实验是在常温和不同真空度下进行的.

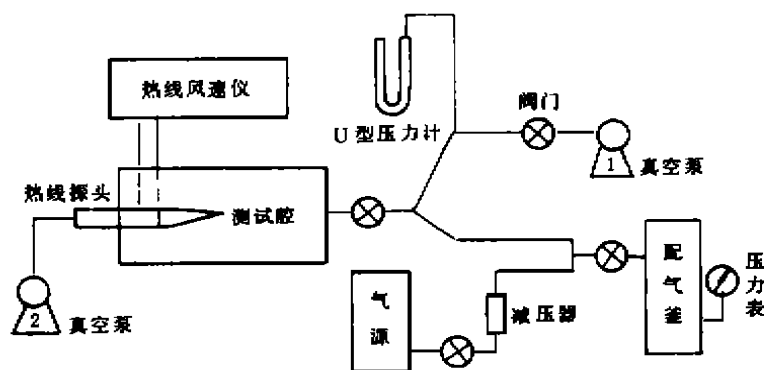


图 3 实验装置流程图

另外我们采用了两组不同的热线浓度探头, 进行一些对比实验. 探头的结构和参数见图 2.

3. 结果及讨论

首先我们对不同真空度 P_0 进行了一组浓度标定试验. 图 4 为 $P_0 = 4 \times 10^4(\text{Pa})$ 到 $P_0 = 9.3 \times 10^4(\text{Pa})$ 之间, 不同真空度下浓度 C 与输出电压 E 的函数关系曲线. 从图中可以看出浓度变化与输出电压基本上是线性关系. 真空度越高其斜率越小. 对于 $P_0 = 4 \times 10^4(\text{Pa})$ 其斜率为 0.56. 而 $P_0 = 9.3 \times 10^4(\text{Pa})$ 时只有 0.27. 这说明测试精度在

$4 \times 10^4(\text{Pa})$ 时要比 $9.3 \times 10^4(\text{Pa})$ 时降低一半. 所以对于低密度流场, 要求热线风速仪本身的测试精度要高. 在我们的实验情况下, 输出电压可以精确到 0.002V. 对 $P_0 = 4 \times 10^4(\text{Pa})$ 时浓度分辨率可以达到 1%.

图 5 给出了两组不同探头, 从 $P_0 = 4 \times 10^4(\text{Pa})$ 到 $P_0 = 9.3 \times 10^4(\text{Pa})$ 时, 以一号探头为参考, 浓度 C 与输出电压 E 的变化关系曲线.

图 6 为一号探头、文献 [3] 和二号探头, 在 1 大气压时, C 与 E 的变化关系曲线.

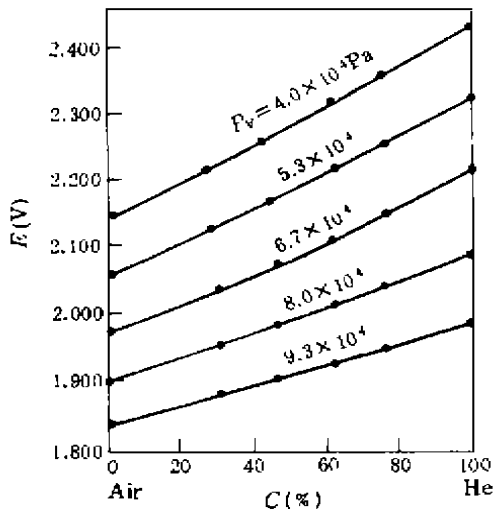


图4 不同真空下桥路电压随空气中氮气浓度的变化

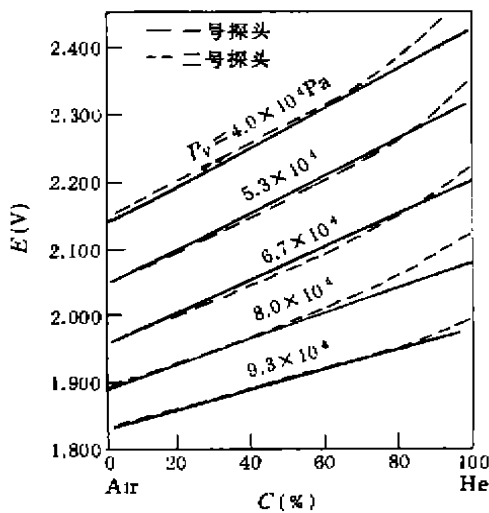


图5 不同探头桥路电压随空气中氮气浓度变化的比较 (以一号探头为标准)

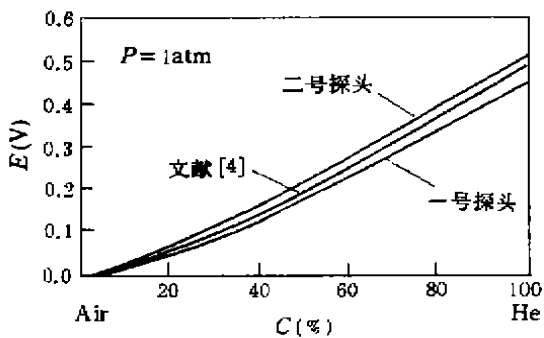


图6 C-E 的变化曲线

从以上结果可以看出, 在测试压力一定时采用不同探头, C 与 E 的变化曲线基本上是一致的, 这说明不论选择何种结构的浓度探头, 以及采用哪种类型的测试仪器, 所得到的结果 (线性斜率) 基本上是一致的, 只是在一固定浓度下输出的电压绝对值有所不同 (图 7).

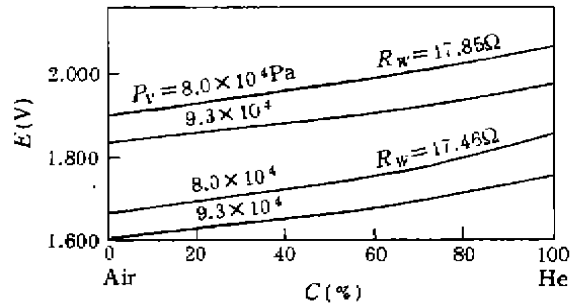


图7 不同阻值 R_w 的 $E-C$ 的变化曲线

我们从实验分析可以得出这样的结论: 对于双组分混合流场, 其浓度与输出电压的变化可以认为是线性函数关系 (即: $E = aC + b$), 其斜率 a 仅仅是真空度 P 的函数, 而采用不同结构的探头只影响其直线的截距 b .

热线浓度探头制作上是比较困难的, 其顶部针孔的大小很难掌握, 另外热线与顶部的距离以及它的锥度和热线的焊接也是非常细致和困难的工作, 一般很难制作出完全一样的探头, 但在浓度测试中我们必须准备数个探头, 因为热线探头的强度一般是很低的, 随时可能被损坏, 所以热线浓度探头的更换不影响其浓度场测量的数据, 这样在测试过程中, 只要标定出某一压力时对应的 $C-E$ 线性斜率, 并在更换探头时按此斜率平移, 便可与未更换时的探头重合, 使所有的测试数据具有连贯性.

综上所述, 配备有热线浓度探头的热线风速仪, 作为测试混合流场的浓度分布是完全适用的, 对于低密度湍流混合流场, 可以视其精度要求选择相应的测试仪器, 又由于热线风速仪给出的是连续信号, 可以通过数字技术提高其测量精度, 另外此种方法对流体和管壁的光学性能没有要求, 也不需要流场中填入测量粒子, 数据处理简单, 价格便宜, 容易掌握.

参 考 文 献

[1] Hinze J. O. Turbulence. 2nd Edition. McGraw-Hill Book Co., 1975

[2] Brown G L, Roshko M R. *AIAAJ*, 1972,10(5):649
 [3] Tanabe H, Ohnishi M, Fujimoto H, Sato G T. Experimental study of transient hydrogen jet using a fast response probe. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1982,7(12):967-976

[4] Kawaguchi O, Sato G T. *Turbulence Measurements and Flow Modeling*. Hemisphere Publishing Corporation, 1987: 119-125.

(本文于 1993 年 6 月 28 日收到第一稿, 1993 年 11 月 25 日收到修改稿)

105
 49-51

钻井液流体力引起旋转石油钻柱涡动的理论分析

屈展
 (西安石油学院, 西安 710061)

TE 3)

摘要 本文把力学基本理论应用到石油钻井的钻柱动力学问题上, 分析了钻柱和井壁间钻井液存在而引起的旋转石油钻柱涡动问题. 首先将钻柱旋转所受到的钻井液流体反作用力以非线性形式给出, 然后就其钻井液流体力引起钻柱涡动和失稳的力学机理与条件予以探讨和论述.

关键词 石油钻柱力学, 钻井液流体力, 涡动, 运动稳定性

石油力学 流体力学

1. 引言

钻柱是石油钻井工程中必不可少的重要井下工具, 它一般由厚壁钢管连接而成, 处在内外充满钻井液的狭长井眼里工作, 通常受着拉、压、弯、扭及液力等荷载, 在地面动力驱动下, 它不仅自转运动而且还往往发生涡动^[1]. 在转盘钻井过程中, 旋转钻柱本身不平衡质量所引起的振动属于强迫振动, 它的频率和转动角速度相等, 而对于高速旋转时的钻柱, 除了由不平衡质量引起的振动现象外, 还有频率与转动角速度不相等的振动出现, 就称为“涡动”. 从理论上讲, 钻井液流体力引起钻柱的涡动属于“自激振动”^[2]. 以往对石油钻柱涡动行为的研究大都未考虑钻柱受周围钻井液的影响作用, 本文即试图从力学观点出发, 对钻柱在钻井液中的涡动现象进行一些具体的讨论, 对其钻井液流体力引起钻柱自激振动及运动失稳的力学机理与条件予以基本理论分析和计算.

2. 钻井液流体对石油钻柱的作用力

石油钻井过程中, 钻柱在充满钻井液的狭长井眼里旋转, 由于钻柱中心和井眼中心不可能完全相

重合, 如图 1 中所示, 钻柱中心的位置为 e 、 φ , 把钻柱转动时所受到钻井液的流体反力看作是钻柱位移和速度的函数, 当扰动较大时, 这种关系是非线性的. 钻井液对钻柱的流体力被分解为沿偏心距方向的径向分力 F_r 和垂直于偏心距方向的周向分力 F_φ . 如从最大的间隙处开始, 顺钻柱旋转方向取 θ 角为周向坐标, 考虑到钻柱中心位置 e 、 φ 的变化所引起钻井液厚度的变化, 参照转子动力学和润滑理论中类似问题的处理方法, 可利用 Reynolds 方程式来描述这一过程, 即有如下的关系式^[3,4]

$$\frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = \frac{1}{2} (\Omega - 2\dot{\varphi}) \frac{\partial h}{\partial \theta} + \dot{e} \cos \theta \quad (1)$$

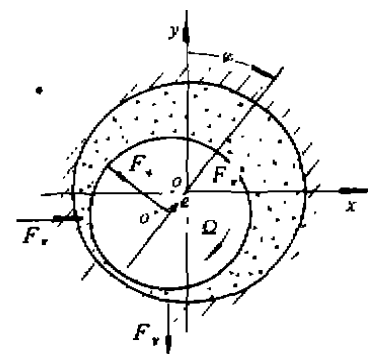


图 1 被钻井液包围的钻柱涡动截面示意图

此方程是在一系列假设下, 对流体微元进行受力分析并利用流量连续方程和牛顿黏性定律后导出的^[3]. 式中, R 为钻柱半径; Ω 是钻柱旋转角速度; p 为钻井液压力分布; μ 是钻井液黏度;