热磁对流氧浓度传感器感应机理的实验

张金龙, 程鲲鹏, 张晓燕, 王良璧*

兰州交通大学机电工程学院, 铁道车辆热工教育部重点实验室(兰州交通大学), 兰州 730070

* 联系人, E-mail: lbwang@mail.lzjtu.cn

2016-08-04 收稿, 2016-08-23 修回, 2016-08-24 接受, 2016-10-31 网络版发表

国家自然科学基金(51236003)资助

摘要 氧浓度分析仪被广泛地用于各行各业中, 热磁对流氧浓度传感器具有使用寿命长、测量准确度高等优点. 它巧妙地利用热磁对流现象引起传感器壁面温度的变化来感知氧气浓度的变化. 但是由于热磁对流现象较为复杂, 其感应机理尚不明确, 为了进一步提高热磁对流氧浓度传感器的测量精度, 有必要对其感应机理深入研究. 本文通过实验的方法研究了两块方形磁铁构成的非均匀磁场作用下薄壁圆管中顺磁性气体在其中的传热特性. 实验结果表明: 圆管壁面温度在磁场的作用下较无磁场时有明显的降低, 且随着热流密度的增大, 管壁温度降低得越明显, 管壁温度与热流密度成线性关系; 随着热流密度的增大, 热磁对流现象引起的平均速度及对流换热系数均增大; 氧气浓度每增加10%, 管壁温差降低0.12℃, 即氧气浓度越高热磁对流现象越明显; 所研究系统对于氧气浓度的分辨率约可达0.08%.

关键词 氧浓度, 磁场, 热磁对流, 传感器, 实验研究

氧浓度分析仪可用于食品等低氧及无氧储存行业; 用于特殊作业环境下人员生存安全保障, 如煤矿井下、坑道、油轮、船舱、潜水等容易发生缺氧的情况; 用于化工行业中氧气浓度的检测与控制. 常见的氧气浓度分析仪有电化学式、激光式、磁氧式氧浓度分析仪. 其中电化学式氧浓度分析仪应用最为普遍, 其测量原理有铜氨溶液吸收法、燃料电池法、氧化锆法、离子流技术. 然而电化学式氧浓度分析仪使用寿命普遍较短, 一般只有1~2年, 且其造价不菲, 这使得氧浓度测量成本较高. 在气体浓度检测中, 氧气作为一种顺磁性气体, 利用磁氧法检测其浓度有明显的优势. 首先检测受杂质气体干扰小, 除了一氧化氮(NO)以外, 氧气是一种少有的顺磁性气体; 其次使用寿命长, 利用氧气的顺磁性制造的氧浓度分析仪在使用过程中不像电化学式氧浓度分析仪会不断消耗反应物, 一般寿命均可达到5~10年; 再者检测精

度高、反应灵敏. 磁氧式氧浓度分析仪可以分为两种, 一种是磁力机械式氧浓度分析仪, 另一种是热磁对流式氧浓度分析仪. 由于氧气是顺磁性气体, 且氧气的体积磁化率较一般气体要大很多, 因此利用氧气的顺磁性来测量氧气浓度是一种十分有效的方法.

国内外对于磁场作用下顺磁性流体的流动现象的研究已经有很长时间. 20世纪90年代, Pauling等人^[1]和日本学者Wakayama等人^[2~8]研究了顺磁性气体在磁场作用下的运动情况. 他发现纯氧或者氧气浓度大于30%的氧气与氮气的混合气体会像磁流体一样被磁场吸引, 且氧气浓度越大吸引力越大. 21世纪初, Jovanovic等人^[9]从理论上描述了不同重力场下不均匀磁场作用于流动层中流体流动的动态模型. 他指出磁场力的大小跟磁场强度与磁场梯度有关系, 并在微重力条件下通过实验证实磁场力在使铁磁性微粒悬浮于流体中起主要作用. 1993年, Ueno等人^[10]

引用格式: 张金龙, 程鲲鹏, 张晓燕, 等. 热磁对流氧浓度传感器感应机理的实验. 科学通报, 2017, 62: 847~857

Zhang J L, Cheng K L, Zhang X Y, et al. The experiment study of the sensing mechanism of thermal magnetic type oxygen sensor (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 847~857, doi: 10.1360/N972016-00138

从分子动力学的角度解释了在磁场梯度约为120 T/m时, 气体流动明显被阻断的现象. 他指出氧气作为一种顺磁性气体在阻断气流的过程中起主要作用, 且顺磁性气体受到的磁化力与磁化率及磁场梯度成正比. Wrobel等人^[11,12]研究了水平环形通道内顺磁性流体的对流特性. 研究表明换热系数受到磁化力的影响, 强磁场可以控制顺磁性流体的对流运动, 对流运动被加强或削弱取决于磁场的强度及方向. Huang等人^[13-15]用线性稳定性分析研究了非均匀磁场作用下不导电顺磁性流体的磁效应, 并指出流体层中的对流可通过非均匀磁场加以控制. Wang等人^[16]研究表明不均匀磁场引起的磁化力作为一个体积力在顺磁性及逆磁性流体上起作用, 通过数值模拟研究了矩形方腔内磁化力对自然对流的影响, 指出自然对流被促进或抑制依赖于磁化力的方向. Lyubimova等人^[17]研究了无重力场下非均匀磁场中顺磁性流体的热对流现象, 研究表明在无重力场下, 通过磁场的作用在出现温度梯度时可产生热对流. Kenjereš等人^[18]研究了非均匀磁场梯度下顺磁性流体在方腔内的流动与传热, 研究表明强磁场能够增强顺磁性流体流动并使其从稳定的层流向湍流过渡. Kaneda等人^[19]通过数值方法研究了水平圆管内的顺磁性流体在磁场作用下的传热特性. 研究表明流动与传热增强跟载流线圈的位置有关系, 当线圈布置于加热区域的起始处会使得传热强化. Lee等人^[20]通过数值模拟研究了重力场与磁场共同作用下圆柱形容容器内瞬态对流的换热特性, 他们对外部参数进行了综合研究, 得到了不同半径、载流线圈轴向方向时的速度场与温度场. 研究表明当磁化力与重力方向相同时, 流动增强, 促进了空气的冷却. 当重力方向与磁化力方向相反, 且当磁化力与重力大小相当时能够最有效地抑制顺磁性流体的流动. Jiang等人^[21,22]用SIMPLE算法求解控制方程的方法研究了空气在多孔方腔内的热磁对流, 其中方腔被置于一个载流线圈中间. 结果表明磁场力与线圈的倾角对流动及传热有很大的影响. Bednarz等人^[23]还对普朗特数大于1的顺磁性流体的热磁对流特性进行了研究, 获得了磁矩、瑞利数等参数对顺磁性流体流动的影响规律. 杨帆等人^[24]用数值模拟研究了磁场作用下水平通道空气的流动换热规律, 研究表明除了温度场及磁场本身对热磁对流有影响, 还与温度场及磁场的相对位置有关系, 当温度场与磁场一定时, 存在最佳的加热位置, 可以获得

最大的磁化力及空气流量. 杨立军等人^[25,26]的研究表明空气的自然对流可以通过施加具有不同磁加速度的梯度磁场得以强化或控制. 近年来对于热磁对流的研究多为磁场对于顺磁性流体流动的增强或是抑制作用, 对热磁对流氧浓度传感器感应机理的研究鲜见报道. 最近, 张晓燕等人^[27]用数值方法对热磁对流氧浓度传感器感应机理进行了研究, 结果表明其机理在于热磁对流现象主要通过增加流经感应段流体的平均速度, 使来流温度降低来实现壁面温度的降低, 并非是热磁对流增加壁面传热系数. 为了进一步研究热磁对流氧浓度传感器感应机理, 本文用实验的方法对其进行研究.

1 物理模型

在自然界中除了强磁性物质外, 还有大量的弱磁性物质. 顺磁性物质和抗磁性物质均为弱磁性物质. 无论是强磁性物质还是弱磁性物质, 当受到外界磁场的作用时, 由于添加了外磁场产生的磁化能, 为了使物质系统保持最小的自由能, 物质中的各个有序排列的微小区域发生变化, 进而引起物质宏观磁性的变化. 被磁化的物质本身就表现出一定的磁性, 在空间中某一点的磁场强度为外加磁场强度和感生磁场强度的矢量和, 即:

$$\mathbf{B} = \mathbf{H} + \mathbf{H}' = \mathbf{H} + 4\pi\mathbf{M}, \quad (1)$$

式中 $\mathbf{B}$ 为总磁场强度, $\mathbf{H}$ 为外加磁场强度, $\mathbf{H}'$ 为感生磁场强度, $\mathbf{M}$ 为磁化强度.

物质的磁化率用 κ 来表示

$$\kappa = |\mathbf{M}|/|\mathbf{H}|, \quad (2)$$

顺磁性气体的磁化率还跟温度有关, 磁化率与温度的关系可以用居里定律表示

$$\kappa = C \frac{\rho}{T}, \quad (3)$$

式中 C 为居里常数, T 为热力学温度. 其中密度 ρ 可用下式表示:

$$\rho = \frac{1}{v}, \quad (4)$$

由波义耳定律, 我们可得

$$pv = R_g T, \quad (5)$$

其中 R_g 为气体常数, p 为气体的绝对压力, v 为气体的比体积, T 为气体的热力学温度.

影响磁化率的因素可用下式表示:

$$\kappa = \frac{C}{R_g} \cdot \frac{p}{T^2}, \quad (6)$$

对于一定组份的气体, 上式中 C , R_g 为定值. 由上式可以看出: 当混合气体的压力一定时, 其体积磁化率会随着被测气体温度的升高而急剧的降低, 这样在温度场的作用下就可使气体磁化率发生改变, 进而改变气体受力, 这就是热磁对流现象能够发生的根本原因.

根据Wakayama等人^[6~8]关于磁化力的计算可知, 磁化力 F_M 可以表述为

$$F_M = \frac{1}{2} \mu_0 \rho \chi_g \nabla H^2$$

$$= \frac{1}{2} \mu_0 \rho \chi_g \left[\frac{\partial}{\partial x} (|\mathbf{H}|^2) \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} (|\mathbf{H}|^2) \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z} (|\mathbf{H}|^2) \mathbf{k} \right], \quad (7)$$

其中 μ_0 为真空磁导率($4\pi \times 10^{-7}$ H/m), χ_g 为流体的质量磁化率, $\mathbf{H}$ 为磁场强度. 对于标况下的空气, 磁化率 χ_g 由居里定律表示为

$$\chi_g = C/T, \quad (8)$$

由理想气体状态方程可得气体密度的表达式为

$$\rho = \frac{p}{R_g T}, \quad (9)$$

对(8)和(9)式运用泰勒公式在 T_c 点展开, 略去高阶项得

$$\chi_g = \chi_c [1 - \beta(T - T_c)], \quad (10)$$

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_c)], \quad (11)$$

其中 χ_c , T_c 为标况下气体的质量磁化率及热力学温度, ρ_0 为标况下气体的密度. 对于气体来说热膨胀系数

$\beta=1/T$. 将上式代入(7)整理可得磁化力 F_M 的表达式为^[27]

$$F_M = \frac{1}{2} \mu_0 \rho \chi_g \nabla H^2$$

$$= \frac{1}{2} \mu_0 \rho_0 \chi_c \nabla H^2 [1 - 2\beta(T - T_c) + \beta^2(T - T_c)^2]. \quad (12)$$

热磁对流氧浓度分析仪的关键部件是温度敏感元件. 常见的敏感元件有外对流式和内对流式之分. 外对流式即被测气体从元件外表面流过, 引起外表面温度的变化. 内对流式即流体从敏感元件内表面流过, 同样使其壁面温度发生变化. 虽然两种敏感元件外形不同, 但其原理是相同的. 本文对内对流式敏感元件进行研究, 采用一个壁厚较薄的石英玻璃管作为被测气体流经的通道, 在石英管外壁面上绕上电阻丝, 通电加热得到所需的温度场, 并在石英管外布置钕铁硼永磁体, 用来提供热磁对流所需的磁场, 见图1. 图中石英玻璃管水平放置, 石英管总长28 mm, 其中加热段长10 mm. 加热段处于试管左端, 当被测气体流经左侧通道口时, 被测气体中所含氧气被磁化由强磁场吸入通道, 经过加热段的加热, 气体温度升高, 磁化力减弱. 通道口未被加热的气体不断被吸引, 且其磁化力相对加热过的气体要大的多, 所以不断有气体被吸入通道经加热后离开通道, 这样气体在通道内的流动使得加热段的温度降低, 使绕在石英管壁上的测温电阻丝的阻值减小. 只要测出管壁上电阻值的变化即可反应被测气体中氧气浓度的变化. 可概括为: 在温差存在条件下 $O_2\%$ 变化 $\rightarrow$ 磁化率 κ 变化 $\rightarrow$ 磁化力 F_M 变化 $\rightarrow$ 带走热量 Q 变化 $\rightarrow$ 管壁测温电阻 R 变化 $\rightarrow$ 管壁温度 T_w 变化.

图1 热磁对流氧浓度传感器图(单位: mm)

Figure 1 The thermal magnetic convection type oxygen sensor (unit: mm)

2 实验系统及方法

2.1 敏感元件

目前热磁对流氧浓度分析仪采用的敏感元件分为两种,一种为外对流式的敏感元件,如国产的热磁式氧浓度分析仪QZS-5101, QZS-5106;另一种为内对流式的敏感元件,如西德H&B公司生产的MAGNOS-2型氧浓度分析仪、国产QZS-5108型氧浓度分析仪. 外对流式敏感元件和内对流式敏感元件各有优势. 从热磁式氧浓度分析仪问世以来,内对流式敏感元件都大同小异. 基本上都是在玻璃管外绕两段长度相等的铂丝,将铂丝接入惠斯通电桥,再在玻璃管外加以磁场,在磁场和温度场的作用下,发生热磁对流现象. 被测气体流过玻璃管,致使两段铂丝电阻发生变化,进而测出惠斯通电桥的不平衡电压. 根据标定时得出的氧浓度与不平衡电压之间的关系,即可得到被测气体的氧气浓度.

现有的内对流式氧浓度分析仪的敏感元件中金属铂丝均串入惠斯通电桥,热磁对流会引起铂丝电阻的变化,若外加电压不变,铂丝电阻的变化会引起加热功率的变化,加热功率的变化定会引起壁温的变化. 氧浓度传感器是根据实际的氧气浓度标定的,故这些变化不会影响最终的测量结果,但是这种加热功率与壁温测量相互耦合的设计不利于敏感元件的研究. 为此提出一种新的设想,将加热与测温分离开来,实现加热功率的单独控制和管壁温度的单独测量. 具体办法是在石英管测试段绕两种电阻丝,其中一种为加热用的锰铜漆包线,另一种为测温用的金属铂丝,两种电阻丝之间绝缘,这样就实现了加热与测温的解耦. 其结构如图2(a)所示,图2(b)为实验所用的敏感元件实物图. 锰铜丝和铂丝具有不同的电阻温度系数,锰铜的电阻温度系数 $\alpha < 40 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,铂的电阻温度系数 $\alpha < 40 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$. 锰铜的电阻温度系数远小于铂丝的电阻温度系数,故锰铜常用来做精密绕线电阻和采样电阻,而铂丝则被用于做测温电阻. 在直径为6 mm的石英玻璃管外绕10圈线径为0.2 mm的锰铜丝,其电阻约为4 Ω ,绕10圈线径为0.03 mm的铂丝,其电阻约为30 Ω . 当温度变化100 $^{\circ}\text{C}$ 时,锰铜丝电阻变化0.016 Ω ,铂丝电阻变化12 Ω . 锰铜丝阻值随温度变化较小可以忽略其阻值变化对加热功率的影响,铂丝电阻变化较大,可以精确测量温度的变化. 为了提高测量精度,采用了直径只有0.03 mm

图2 (网络版彩色)双绕线敏感元件示意图(a)和实物图(b)

Figure 2 (Color online) Schematic view (a) and details (b) of the sensitive element

的铂丝,由于直径较小,铂丝强度较低. 为了保护铂丝,在石英管外面均匀的涂一层耐高温绝缘胶. 耐高温绝缘胶的涂覆,极大地增加了试管的寿命和实验的稳定性.

2.2 磁场的布置

磁场的布置对于氧浓度传感器是至关重要的. 根据磁化力 F_M 的数学描述我们可以知道磁场梯度与温度场梯度的大小决定了热磁对流现象的强弱. 为了获得较大的磁场梯度,本实验采用剩磁强度为1.32 T的钕铁硼永久磁铁. 磁铁尺寸参数:长度10 mm,宽度8 mm,高度4 mm,其布置如图3所示. 磁铁的长度方向与石英玻璃管的轴线平行,在轴线方向磁铁的中心距离石英玻璃管进口端10.5 mm. 在石英玻璃管轴向方向磁铁的中心与加热段的中心重合. 为了在试验段形成较大的磁场梯度,特意用磁阻较小的硅钢制成了三棱柱形及U形的磁场通路. 磁感线都是闭合曲线,在永磁体外磁感线从N极出发回到S极,在永磁体内磁感线从S极出发到N极,形成一个闭合

图3 (网络版彩色)永久磁铁布置结构图

Figure 3 (Color online) Schematic diagram of the position of permanent magnet

的回路。除测试段外,磁感线大部分从硅钢中通过。在测试段很小的空间内有大量的磁感线通过,意味着测试段有较强的磁场强度。

如图4所示,以测试段的中心为坐标原点,用高斯计对钕铁硼磁铁在石英管内形成的磁场强度进行测量。通过测量可以得到如图5所示的磁场分布规律。在竖直方向磁场中心磁场强度最大,约为215 mT。离开磁场中心两侧的磁场强度迅速递减,即在石英管内存在的较大的磁场梯度,距离磁场中心30 mm处磁场强度几乎为0 mT。

2.3 测温电阻标定

电阻跟导线长度成正比。由于试管上铂电阻丝是手工绕的,根据长度只能粗略估算其阻值,为了精

图4 磁场布置示

Figure 4 Schematic view of magnetic field structure

图5 竖直方向上磁场强度沿水平距离的变化

Figure 5 The variation of the magnetic fields in the y direction with the x direction

确测量就需对其电阻进行标定。将敏感元件接入开尔文电桥,然后经防水处理后置于冰水混合物中,待敏感元件温度稳定后打开开尔文电桥,并且调节测试电流为6 mA,然后读数得到铂丝电阻的零度电阻值 R_0 。根据公式 $R_t=R_0(1+aT)$,已知 R_0 , a ,以后的测量中只需要精确测量电阻 R_t 就可计算出其对应的温度值 T 。

2.4 加热及测试系统

将电阻丝均匀地绕在石英玻璃管外,在康铜丝两端加以直流电压,即可实现试管的加热。通过调节电源电压来实现加热功率的调节。测试系统主要包括试管壁温测量、加热功率测量、试管进出口温度测量、腔内温度测量。

(i) 加热功率。实验前用双臂电桥对加热电阻进行测量,得到其电阻值。因为加热丝材料为康铜,其电阻温度系数很小,故忽略其电阻值随温度的变化。用高精度直流电压表测得加热电阻丝两端的电压,根据 $p=U^2/R$,即可计算出试管壁面处的加热功率,其中 U 为加热丝两端的电压, R 为加热丝电阻。

(ii) 试管壁面温度。试管壁温测量主要用到的仪器为开尔文测温电桥,通过测量绕在试管外壁面上铂丝的电阻,进而推算出试管壁温。用开尔文电桥测量绕在试管壁面上铂丝的电阻 R_t ,根据之前标定的电阻 R_0 ,算得试管壁面温度。开尔文双臂电桥测量范围为 $10^{-4} \sim 1000 \Omega$ 的电阻,从测量原理上消除了连接导线电阻带来的误差,具有较高的精度。

(iii) 环境温度及试管进出口温度的测量。实验的变化量有加热功率、磁场、氧气浓度。改变加热功率即改变试管壁面的热流密度,同时加热功率也直接影响着试管内温度场。加热功率是一个重要的参数,为了能够保证加热产生的热量只向着试管内传递,对试管及磁对进行了保温。保温后的敏感元件如图6(b)所示,将试管及磁对置于泡沫板之中,并且由泡沫板固定其相对位置。如图6(a)所示在试管进出口及泡沫板周围布置热电偶。由于热电偶尺寸很小,忽略其对气流的影响。将试管保温好后置于一个 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 的方形腔内。采用如图7(a)所示方腔作为气体混合的容器,用于提供热磁对流发生所需的不同气氛的环境。由于试管相对方腔尺寸较小,可以认为将试管置于一个无限大的环境中。且在实验时由于加热功率最大为0.55 W,方腔内温度基本不变。

图6 (网络版彩色) (a) 进出口温度测量热点偶安装位置; (b) 实验装置保温

图7(b)为整个实验的系统图。热磁对流实验系统主要包括三部分,分别为配气系统、氧浓度分析仪及测量系统。配气系统可以提供任意比例的混合气体。氧浓度分析仪为实验的核心部件,其可形成热磁对流现象发生所需要的磁场及温度场。测量系统用于实验数据的采集,包括氧浓度、温度、功率等参数的测量。实验所需气样由连续配气装置配得,并进行减压、净化和稳流,使达到传感器所要求的状态进入方腔。

3 实验结果及分析

3.1 不同加热功率时磁场的作用对壁温的影响

将实验装置置于空气中,有磁场时采用剩磁为 1.32 T 的钕铁硼磁铁,无磁场时采用与磁铁相同大小的硅钢代替磁铁的位置.在泡沫保温层中,试管以及磁铁得以有效的保温,可以认为加热丝所产生的热量大部分流向试管内壁,一小部分沿试管壁面轴向传导.

实验开始前先将数据采集系统通电预热，待采集系统工作稳定后，开启直流电源，通过调节直流电

源电压至所需加热功率。试管壁温迅速升高,待管壁温度稳定后进行读数,读数完成后调节电源电压至下一个测试点。

在实验中,环境温度约为 10°C ,当加热功率为 0.55 W 无磁场时试管壁温为 89°C .较大的加热功率会使保温材料失效,故对于这套实验装置最大加热功率不宜超过 0.55 W .从图8(a)可以看出有磁场时试管壁温与周围环境温度的差值均小于无磁场时,且随着加热功率的增大,管壁与环境温度差值不断增大,即加热功率越大,热磁对流现象越明显.实验采用了高精度直流电压表,其最小分辨率为 $0.1\text{ }\mu\text{V}$.在两次实验中,直流电源输出电压无法调节至完全一样,电压的微小变化就会引起加热功率的变化.故采用拟合的办法拟合出管壁温度与环境温度差值随加热功率的变化关系,再取相同的功率比较有磁场与无磁场时管壁温度和环境温度差值的变化.图8(b)是由拟合得到的直线在相同功率点作差得到的.从图中可以看出管壁与环境温度的差值在有磁场与无磁场时的差值 ΔT 随加热功率呈递增的趋势,当加热功率为 0.55 W 时,管壁与环境温度的差值在有磁场与无磁场时的差值为 1.075°C .

本实验具有很好的重复性,两次相同工况下的实验,管壁温度差值小于 0.1°C .在实验开始前,在不通电加热的情况下,通过电阻测得的管壁温度及用热电偶测得的环境温基本相等.由于管壁温度在有磁场和无磁场条件的差值与加热功率之间的拟合优度(拟合相关系数的平方)已大于 0.999 ,说明有磁场和无磁场条件的管壁温度差值与加热功率呈较好线性关系.

实验中可得出管壁温度有磁场较无磁场低,且温差随热流密度增大而增大.管壁温差直接反映热

Figure 7 (Color online) (a) Details of the experimental setup; (b) schematic diagram of the experimental setup of oxygen sensor

图8 不同加热功率下管壁与环境温度差值(a)及有磁场与无磁场时的差值(b)

Figure 8 The difference between the wall and the ambient temperature (a) and the difference with and without magnetic field (b) at different heating power

磁对流现象的强弱,在磁场、氧气浓度不变的情况下要想产生较大的管壁温差,就需要较大的温度场梯度.实验结果所得温差相对较小,主要原因是自然对流带走了较多的热量,热磁对流相对自然对流还很小.

不同加热功率对氧浓度测量值的影响是通过加热功率对于管壁温度与环境温度的差值的影响来实现的.加热功率越大,管壁温差越高,热磁对流现象越明显,则氧气浓度测量的分辨率越高.经系统标定后,加热功率不影响氧浓度测量,但影响测量分辨率.

3.2 热磁对流对管壁换热系数的影响

实验装置经过保温以后,可以认为无磁场时加热丝产生的热量由试管周围自然对流及试管管壁轴向传导及辐射散失,有磁场时热量由试管周围的自

然对流、试管内壁面热磁对流及试管管壁轴向传导及辐射散失.因为有磁场与无磁场只改变了试管所处的磁场,对其周围参与自然对流的气氛及参与导热的介质并没改变.当试管壁温与周围环境温度的差值一定时,若无热磁对流,有磁场与无磁场两种工况下发生的自然对流及试管管壁轴向传导的热量应该是相等的,这时两工况的加热功率应相同.若存在热磁对流作用,当试管壁温与周围环境温度的差值相同时,则加热功率必然不同.在相同两工况下加热功率的差值就应该是由于热磁对流引起的传热量增量 ΔQ .根据 $\Delta Q = F\Delta h(T_w - T_f)$,就可求出热磁对流引起的对流换热系数的增量 Δh ,这里 T_f 是进出口空气温度的平均值.

如图9(a)所示热磁对流换热系数增量随加热功率增加而不断增大.实验时环境温度基本不变时,管

图9 对流换热系数增量随加热功率的变化(a)及随管壁温度的变化(b)

Figure 9 The variation of the convective heat transfer coefficient with the heating power (a) and the temperature of tube wall (b)

壁温度不断升高,使得石英管内温度梯度不断增大.温度梯度增大导致磁化力增强,使热磁对流现象增强.但是当加热功率大于0.35 W后,热磁对流现象随着加热功率的增大趋势变缓.这是因为随着管壁温度的升高,换热强度增大程度远比温差增大程度要小的缘故.图9(b)为热磁对流现象引起的对流换热系数的增量随管壁温差的变化曲线,显然较大的加热功率得到了较高的管壁温度,有利于增强热磁对流的强度.

3.3 热磁对流引起的流出测管平均速度增量

目前热工测试中对于流体速度的测量常用的方法有毕托管测速、热线风速仪技术、激光多普勒测速和粒子图像测速技术.由于本实验所用的试管尺寸较小,且热磁对流现象较为微弱,不宜使用毕托管测速.热线风速仪探针工作温度较实验管壁温度高,若将其探针布置于试管进出口处,势必会影响试管周围温度场.激光多普勒测速及粒子图像测试系统庞大,设备操作复杂.同时其还需要在流体流动管壁上设置观测窗,以及在流场中散布能充分响应流体速度的示踪粒子.鉴于以上原因本文找出来一种间接计算热磁对流引起的速度的方法.

根据热平衡原理,当管壁与环境温差相同时,有磁场与没磁场加热功率的差值是由于热磁对流现象引起的.我们认为气体在石英管构成的通道内未被压缩,进出口气体流速相等.根据 $\Delta Q = C_p \Delta q_m (T_1 - T_2)$ 计算出带走热磁对流引起的换热量 ΔQ 所需的气体质量流量 Δq_m ,其中 T_1 , T_2 分别为试管进出口温度.只要

实验时同时测得 T_1 , T_2 即可计算出热磁对流引起的质量流量.再根据 $\Delta q_m = \rho A \Delta u$,算出速度 Δu ,其中 A 为试管截面面积.

基于以上分析,通过计算得到的热磁对流引起的速度的增量,即试管中气体的平均流速的结果如图10(a)所示.其数值随加热功率的增大而不断增大,增大趋势不断变缓.图10(b)是管壁温度与环境温度差值与速度增量的关系,可以看出,热磁对流引起的速度增量与热磁对流引起的对流换热系数增量有相同的变化趋势,即随着管壁温度的升高,增大趋势变缓.这一现象也易于理解,式(12)表明在磁场一定的情况下影响热磁对流强弱的另一个因素就是温度场,通道内的温度场及磁场决定了被测气体在通道内的所受的磁化力大小,从而影响被测气体的流动.

3.4 不同氧浓度对管壁温度的影响

在磁场作用下,当加热功率为0.25 W时管壁温度随着氧浓度的增加不断下降,管壁温度与氧气浓度基本呈线性关系.从图11(a)可以看出,随着氧气浓度的变化,管壁上的温度变化很明显,而且壁面的温度随着氧气浓度的增加而降低.这是因为作用在流体上的磁化力与磁化率成正比,混合气中氧气的含量越高,磁化率就越大,这就导致了磁化力越大,从而使得热磁对流现象越剧烈,以致壁面温度降低.

如图11(b)所示,当氧气浓度从0~100%变化时,管壁与环境温度的差值在有磁场与无磁场时的差值随氧气浓度的增加不断增大.氧气浓度约为100%时,管壁温度下降了1.2℃.当测温电阻丝零度电阻为

图10 有无磁场速度差值随加热功率的变化(a)及随管壁温度的变化(b)

Figure 10 The variation of the velocity with the heating power (a) and the wall temperature (b)

图 11 有磁场与无磁场时管壁与环境温差随氧气浓度的变化(a)及有磁场与无磁场的差值(b)

Figure 11 The variation of difference between the temperature of tube wall and the ambient temperature with oxygen content (a) and the difference (b) with and without magnetic field

28 Ω , 电阻温度系数为0.00385/ $^{\circ}\text{C}$, 1.2 $^{\circ}\text{C}$ 对应的电阻变化值为0.1294 Ω . QJ18a型测温双臂电桥的最小分辨率为0.0001 Ω , 即实验所用测试系统对于氧气浓度的分辨率为0.077%, 约为万分之八. 还可以通过增大测温电阻的零度电阻进一步提高测量的灵敏度.

张晓燕^[27]的数值模拟时没有考虑自然对流及辐射的影响, 在水平圆管进出口处施加0.008 Pa的压差, 认为水平圆管内在无磁场时处于层流的充分发展阶段. 有磁场与无磁场, 对流换热系数变化不大, 而流速变化相对较大. 而在本实验中水平圆管处于一个恒定的压力空间, 进出口处压差为0 Pa. 实验结果, 比如换热系数、流速、热量等参数, 只是有无磁场时的差值, 而张晓燕数值模拟所得结果是绝对量.

4 结论

为了研究热磁对流氧浓度传感器感应机理, 对于处在两块永久磁铁构成的非均匀磁场之中的薄壁圆管内热磁对流现象进行了研究. 建立了物理模型, 设计了实验装置, 并对影响热磁对流现象的参数进行了实验. 通过测量不同热流密度、不同氧气浓度下

管壁温度的变化、进出口气体温度的变化, 计算出了热磁对流现象在达到稳定状态时有磁场与无磁场壁面温度差值、热磁对流引起的平均速度差值、对流换热系数差值. 主要结论可归纳如下.

(1) 有磁场时管壁温度始终低于无磁场时的管壁温度, 热磁对流现象使得管壁温度明显降低.

(2) 随着加热功率的增加, 有磁场与无磁场管壁温差不断增大, 且管壁温差与加热功率呈较好线性关系.

(3) 随着加热功率的增加, 热磁对流现象引起的对流换热系数及速度不断增大, 但增大趋势不断变缓.

(4) 氧气浓度从0~100%之间变化时, 管壁温差变化1.2 $^{\circ}\text{C}$, 即氧气浓度越高对流换热现象越明显. 实验所采用测温铂丝零度电阻为28 Ω , 1.2 $^{\circ}\text{C}$ 对应的电阻变化为0.1294 Ω , 电桥精度为0.0001 Ω , 从而实验系统对于氧气浓度的分辨率约为0.08%.

(5) 实验中热磁对流现象很是微弱, 热磁对流引起的流体速度的测量十分困难, 虽文中通过测量温度及加热功率计算出有无磁场时流速的差值, 但是对于包含自然对流在内的绝对速度尚未获得.

参考文献

- Pauling L, Wood R E, Sturdivant J H. An instrument for determining the partial pressure of oxygen in a gas. J Amer Chem Soc, 1946, 68: 795-798
- Wakayama N I. Effect of a decreasing magnetic field on the flow of nitrogen gas. Chem Phys Lett, 1991, 185: 449-451
- Wakayama N I, Ito H, Kuroda Y, et al. Magnetic support of combustion in diffusion flames under microgravity. Combust Flame, 1996, 107: 187-192
- Wakayama N I. Behavior of gas flow under gradient magnetic fields. J Appl Phys, 1991, 69: 2734-2736

- 5 Wakayama N I. Magnetic promotion of combustion in diffusion flames. *Combust Flame*, 1993, 93: 207–214
- 6 Wakayama N I. Magnetic buoyancy force acting on bubbles in non-conducting and diamagnetic fluids under microgravity. *J Appl Phys*, 1997, 81: 2980–2984
- 7 Wakayama N I, Ataka M, Abe H. Effect of a magnetic field gradient on the crystallization of hen lysozyme. *J Cryst Growth*, 1997, 178: 653–656
- 8 Qi J W, Wakayama N I, Yabe A. Magnetic control of thermal convection in electrically non-conducting or low-conducting paramagnetic fluids. *Int J Heat Mass Tran*, 2001, 44: 3043–3052
- 9 Jovanovic G N, Sornchamni T, Atwater J E, et al. Magnetically assisted liquid–solid fluidization in normal and microgravity conditions: Experiment and theory. *Powder Technol*, 2004, 148: 80–91
- 10 Ueno S, Iwasaka M, Eguchi H, et al. Dynamic behavior of gas flow in gradient magnetic fields. *IEEE Trans Magn*, 1993, 29: 3264–3266
- 11 Wrobel W, Fornalik-Wajs E, Szmyd J S. Experimental and numerical analysis of thermo-magnetic convection in a vertical annular enclosure. *Int J Heat Fluid Fl*, 2010, 31: 1019–1031
- 12 Wrobel W, Fornalik-Wajs E, Szmyd J S. Analysis of the influence of a strong magnetic field gradient on convection process of paramagnetic fluid in the annulus between horizontal concentric cylinders. *J Phys Conf Ser*, 2012, 395: 12124–12131
- 13 Huang J, Edwards B F, Gray D D. Magnetic control of convection in non-conducting paramagnetic fluids. *Phys Rev E*, 1998, 57: R29–R31
- 14 Huang J, Gray D D, Edwards B F. Thermo-convective instability of paramagnetic fluids in a non-uniform magnetic field. *Phys Rev E*, 1998, 57: 5564–5571
- 15 Huang J, Gray D D, Edwards B F. Magnetic control of convection in non-conducting diamagnetic fluids. *Phys Rev E*, 1998, 58: 5164–5167
- 16 Wang L B, Wakayama N I. Control of natural convection in non-and low-conducting diamagnetic fluids in a cubical enclosure using inhomogeneous magnetic fields with different directions. *Chem Eng Sci*, 2002, 57: 1867–1876
- 17 Lyubimova T, Mailfert A. Thermal convection in a closed cavity in zero-gravity space conditions with stationary magnetic forces. *J Phys Conf Ser*, 2013, 416: 12027–12032
- 18 Kenjereš S, Wrobel W, Pyrda L, et al. Transients and turbulence pockets in thermal convection of paramagnetic fluid subjected to strong magnetic field gradients. *J Phys Conf Ser*, 2011, 318: 072028
- 19 Kaneda M, Tsuji A, Ooka H, et al. Heat transfer enhancement by external magnetic field for paramagnetic laminar pipe flow. *Int J Heat Mass Tran*, 2015, 90: 388–395
- 20 Lee S H, Hyun J M. Transient buoyant convection of air in an enclosure under strong magnetic effect. *Int J Heat Mass Tran*, 2005, 48: 3097–3106
- 21 Jiang C W, Feng W, Zhong H, et al. Magnetic and gravitational convection of air in a porous cubic enclosure with a coil inclined around the y axis. *Transport Porous Med*, 2014, 102: 167–183
- 22 Jiang C W, Li H S, Chen D L, et al. Influences of coil inclined around Y axis on thermomagnetic convection of air in a cubic enclosure (in Chinese). *Proc CSEE*, 2011, 31: 76–83 [姜昌伟, 李贺松, 陈冬林, 等. 线圈绕Y轴倾斜对方腔内空气热磁对流的影响. *中国电机工程学报*, 2011, 31: 76–83]
- 23 Bednarz T P, Lin W, Patterson J C, et al. Scaling for unsteady thermo-magnetic convection boundary layer of paramagnetic fluids of $Pr > 1$ in micro-gravity conditions. *Int J Heat Fluid Fl*, 2009, 30: 1157–1170
- 24 Yang F, Ren J X, Yang K L, et al. Coordination analysis of magnetothermal convection in horizontal tube (in Chinese). *J Eng Thermophys*, 2006, 27(Suppl): 89–92 [杨帆, 任建勋, 杨昆仑, 等. 通道内空气热磁对流的协同分析. *工程热物理学报*, 2006, 27(增刊): 89–92]
- 25 Yang L J, Du X Z, Yang Y P. Influences of permanent gradient magnetic field configurations on air natural convection heat transfer (in Chinese). *J Chem Ind Eng*, 2007, 58: 2980–2985 [杨立军, 杜小泽, 杨勇平. 永磁梯度磁场布置方式对空气自然对流换热的影响. *化工学报*, 2007, 58: 2980–2985]
- 26 Yang L J, Ren J X, Du X Z, et al. Influences of different magnetically induced longitudinal vortices on air convection heat transfer (in Chinese). *J Eng Thermophys*, 2006, 27: 283–285 [杨立军, 任建勋, 杜小泽, 等. 不同磁致纵向涡形式对空气对流换热的影响. *工程热物理学报*, 2006, 27: 283–285]
- 27 Zhang X Y. The magneto-hydrodynamic characteristics of the thermal magnetic type oxygen sensor (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2014 [张晓燕. 热磁气式氧浓度传感器的磁流体动力学特性研究. 硕士学位论文. 兰州: 兰州交通大学, 2014]

Summary for “热磁对流氧浓度传感器感应机理的实验”

The experiment study of the sensing mechanism of thermal magnetic type oxygen sensor

ZHANG JinLong, CHENG KunLun, ZHANG XiaoYan & WANG LiangBi*

School of Mechanical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Key Laboratory of Railway Vehicle Thermal Engineering of Ministry of Education (Lanzhou Jiaotong University), Lanzhou 730070, China

* Corresponding author, E-mail: lbwang@mail.lzjtu.cn

The oxygen sensor is widely used in daily life. Thermal magnetic type oxygen sensor has some advantages such as long service life and high accuracy of measurement. It skillfully uses the change of the wall temperature that caused by the thermal magnetic convection phenomenon to sense the change of oxygen concentration. For a paramagnetic gas, the thermal magnetic convection is caused by the interaction between the temperature field and the magnetic field as the gradient of the magnet field and the temperature gradient both existing at the same time. The intensity of thermal magnetic convection is determined by the magnetic susceptibility of a gas and the gradient of H^2 (where H is the induced magnet field). Oxygen is a common paramagnetic gas, the magnetic susceptibility of oxygen has a much higher than other gas, thus, the oxygen concentration of a gas can be detected by the thermal magnetic convection phenomenon. However, the thermal magnetic convection phenomenon is complicated, The sensing mechanism of this type sensor is not clear. Therefore, it is necessary to study the sensing mechanism in-depth to improve the accuracy and efficiency of thermal magnetic type oxygen sensor. This paper, by means of experiments, studies the wall temperature change characteristics of the thin-wall circular tube in a non-uniform magnetic field generated by two pieces of rectangular permanent magnets. In the experiment, a quartz glass tube with a thin wall thickness was used as the channel through which the measured gas flows. Two permanent magnets are arranged outside the quartz tube, which are used to provide the magnetic field required for the thermal magnetic convection. A kind of the sensitive element with double helically wound resistance wires is designed. In which two resistance wires with different temperature coefficient are helically wound on the wall of outside the quartz tube, one is the Manganin resistance wire for heating, and one is the platinum wire for measuring the temperature of tube wall. The loops of the heating and the temperature measurement are separated, which is favorable for study of the thermal magnetic type oxygen sensor. The permanent magnets used in the experiment have the remanence of 1.32 T. The ambient temperature around the sensitive element is measured by the thermocouple. The experimental device, which includes the sensitive element and some appropriately insulating elements, is placed in a rectangular cavity, and the size of the square cavity is much larger than the sensitive element. By comparing temperature difference of the tube wall, the increment of the convective heat transfer coefficient and the increment of velocity under conditions with and without the magnetic field to illustrate the relationship of the thermal magnetic convection phenomenon and heating power, oxygen concentration and other parameters. It is found that when magnetic field is present, the surface temperature of the tube wall is significantly lower than that of the case without magnetic field, and with the increase of heat flux, the surface temperature of tube wall decreases significantly. The relationship between the heat flux density and the change of the wall temperature is nearly linear. With the increase of heat flux density, the increments of average velocity and convective heat transfer coefficient caused by the thermal magnetic convection phenomenon increase. When oxygen content increases by 10%, the temperature of the tube wall decreases by 0.12°C. The resolution of the studied oxygen concentration sensor is about 0.08%.

oxygen concentration, magnetic field, thermal magnet convection, sensor, experimental research

doi: 10.1360/N972016-00138