

窑炉热工学实验

材 9105

91113

华东化工学院无机材料热工教研组

一九九一年五月

目 录

前 言	.....	1
实验一 局部阻力系统的测定	.....	3
实验二 烟囱的工作原理	.....	7
实验三 烟气分析	.....	10
实验四 煤气分析	.....	16
实验五 燃料发热值测定	.....	23
实验六 液体燃料粘度的测定	.....	31
实验七 脉冲法常温导热与导温系数的测定	.....	34
实验八 高温导热系数测定	.....	40
实验九 法向热辐射率的测定	.....	44
实验十 综合传热系数测定	.....	49
实验十一 空气横向掠过管簇时放热系数的测定	.....	54
实验十二 热电模拟	.....	62
实验十三 散状材料导热系数的测定	.....	69
实验十四 蓄热室内气流分布的测定	.....	73
实验十五 下落法等温铜卡计测定固体材料的比热	.....	80
实验十六 用动力法测定燃气—空气混合气体法向火焰 传播速度的平均值	.....	85
实验十七 玻璃池窑内液流和传热的相似模拟试验	.....	99
附录一 热电偶校验	.....	111
附录二 用五孔球形探针法测定三维速度场	.....	122
附表一 铂铑—铂热电偶分度表	.....	130

附表二 镍铬—镍硅热电偶分度表..... 141

附表三 铜—康铜热电偶分度表 151

附表四 函数 $B(Y)$ 表 153

一、实验目的

实验是本课程的一个重要教学环节，它与讲课，习题课，热工测定及课程设计等教学方式紧密联系互相配合。

实验的目的是：

1. 加深对热工理论的理解，把已学过的理论知识用到实验中去，反过来用实验来验证所学的定律和原理。
2. 了解测试方法的原理及优缺点。
3. 熟悉实验设备的结构与性能。
4. 掌握操作技术要点，提高实验技巧。
5. 掌握热工研究方法，提高研究能力。
6. 培养整理实验数据、归纳结论的能力，培养分析实验误差的能力，培养独立思考及解决实际问题的能力。

二、实验规程

1. 实验前学生要认真预习实验讲义，明确每次实验的内容，测试方法，实验步骤及操作要点，每次实验开始时，教师要进行提问，无准备的学生，不得进行实验。

2. 实验开始时，学生注意聆听教师的讲介，并进行合理分工，使每人对整个实验的操作方法，数据记录等都有一个完整的概念。

3. 根据教师的指示（或根据实验讲义说明），每小组由专人负责领用所需的工具和仪器，使用仪器时，应注意爱护，对较贵重的仪器，应在教师的指导下使用，实验完毕后，应清理交回。

4. 开始实验时，应先检查设备及装置是否正确，连接必要的测量仪表，并且，应注意完全（如：注意电路接线，传动皮带等），在得到指导教师许可后，方可进行操作，记下数据及现象。

5. 实验时，应周密观察事物，对测试方法实验装置及实验中发生的各种现象都要进行钻研。如果实验中发生问题或数据不符应找出原因，予以说明，或设法解决。

6. 每次实验应记录数据一式二份，一份供写报告之用，一份留实验室。

7. 实验室内应保持整齐清洁，与本次实验无关的各项设备，不可随便动手，对水、电、燃料、药品及材料要注意节约。

8. 学生应准时到达实验室，不得迟到，未到规定下课时间，未取得教师同意，不得早退。

9. 实验报告必需独立写作，实验报告应及时完成交给指导教师。

三、安全及防火条例：

1. 如发现马达发热响声不正常或有受潮现象，应立即关闭检查。

2. 空压机，通风机，电炉等应装有接地设备，以防漏电时发生触电事故。

3. 如遇误触电源时，在旁人员应立即切断电路。

4. 如发现线路有火花出现，应立即关闭闸刀，设法处理。

5. 使用煤气时，应注意燃烧完全，用毕后立即关紧，切勿漏气。

6. 实验室内不得存放易燃物和危险品。

7. 消防用具应完善，不得随意移动或挪用。

8. 实验时要注意安全，尽量避免事故发生。以“预防为主”。例如氧气瓶周围要禁油禁火，煤气用毕要关紧，鼓风机和电炉要有接电设备等。

实验一 局部阻力系数的测定

一、实验目的：

当气体流过的管道断面或方向发生改变时，会引起气流的形状或气流的速度发生改变，从而产生局部阻力损失。通过本实验要求

1. 建立气体流动时产生局部阻力的概念。

2. 了解局部阻力的测定方法，并求出不同情况下的局部阻力系数。

二、实验设备：

风管	1 套
斜管微压计	1 个
U 形压力计	1 个
单管压头管	2 个
水银温度计	1 个

三、实验内容：

空气由总风管引入后，通过以下各部分产生局部阻力损失，即：
90° 圆转弯，突然扩张，突然收缩，二个 90° 直角转弯后逐渐扩张排至大气中（如图 1-1 所示）

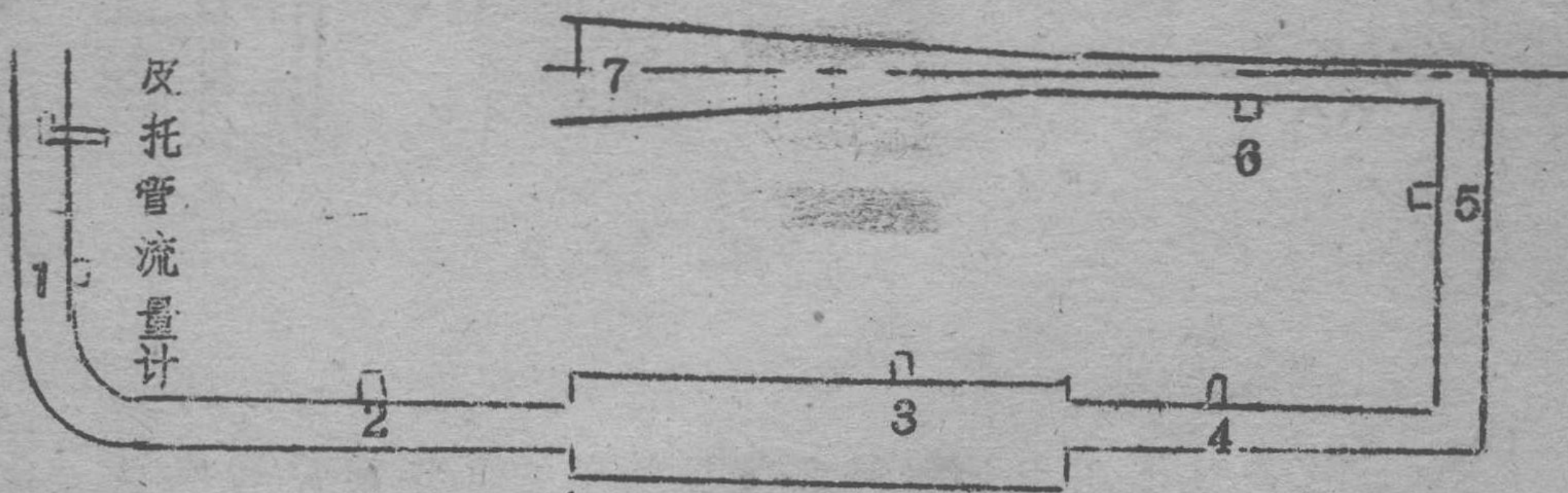


图 1-1

各部份尺寸：

1—2：770 毫米

2—3：800 毫米

3—4：600 毫米

4—5：900 毫米

5—6：540 毫米

6—7：700 毫米

粗管直径：144 毫米，细管直径：49 毫米。

张角： 21°

空气经过这些地方产生的压头损失，是用单管压头管来测量的，它是一根弯成直角的铜管、开口朝向气流流动的轴心方向（如图 1—2 所示）。

它所测得的是总压头（动压头+静压头）（毫米水柱，1 毫米水柱=9.8 帕斯卡），假定水平导管的摩擦阻力忽略不计，根据伯努利方程式，对于二个不同截面测得的总压头之差。即为局部阻力损失。

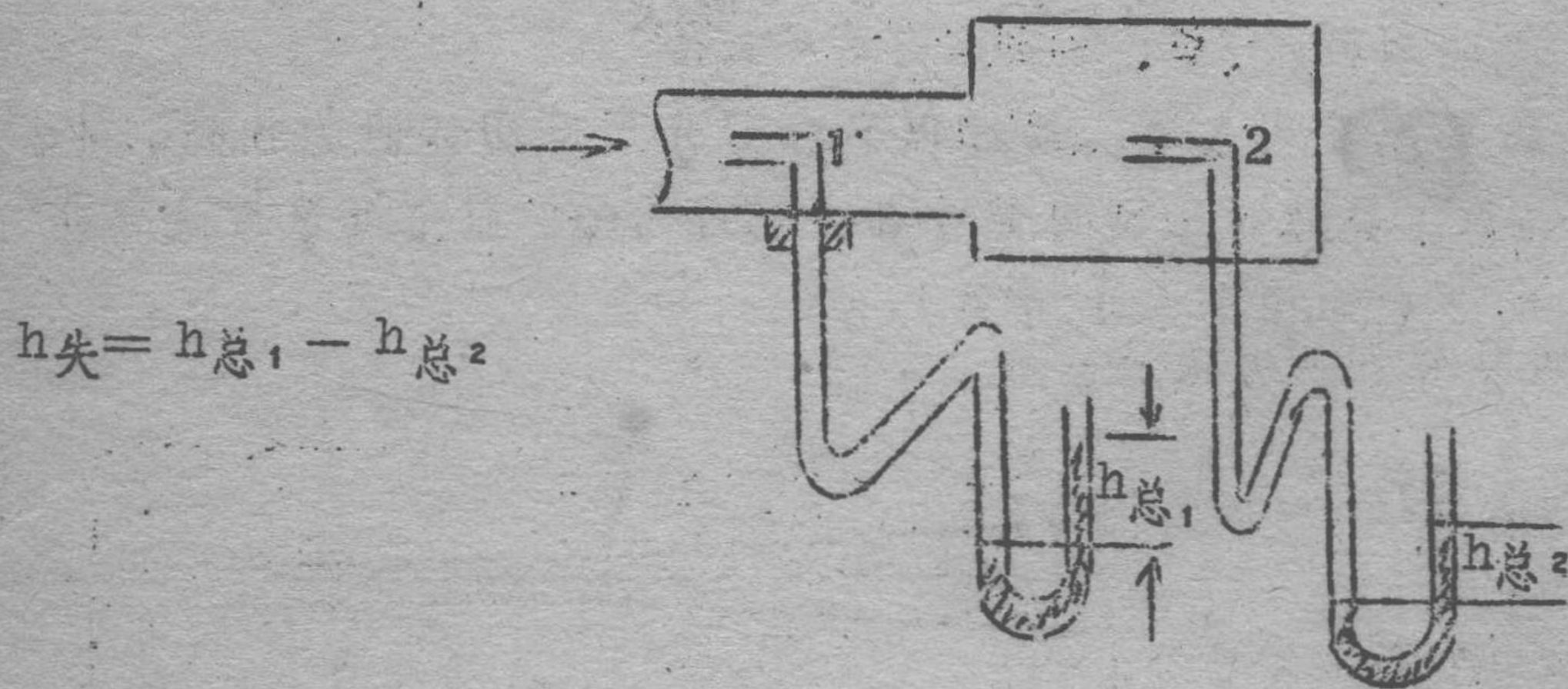


图 1—2

四、实验步骤：

1. 检查 U 形压力计和斜管微压计中的工作液体的液面是否零位，进行调整或记下读数误差，计算时进行校正。

2. 将仪器准备妥当，由指导教师检查后再开通风机。

3. 记下斜管微压计上皮管所测定的管轴线上的动压头 $h_{\text{动max}} [\text{Pa}]$ 。

4. 用单管压头管依次序测得1、2、3、4、5、6、7各点的总压头 $h_{\text{总1}}, h_{\text{总2}} \dots h_{\text{总7}}$ 等，并记录下来。

5. 改变风速（将阀门开大或关小），重复做一遍，并加以记录。

6. 在干湿球湿度计上观测空气的温度和湿度，并加以记录。

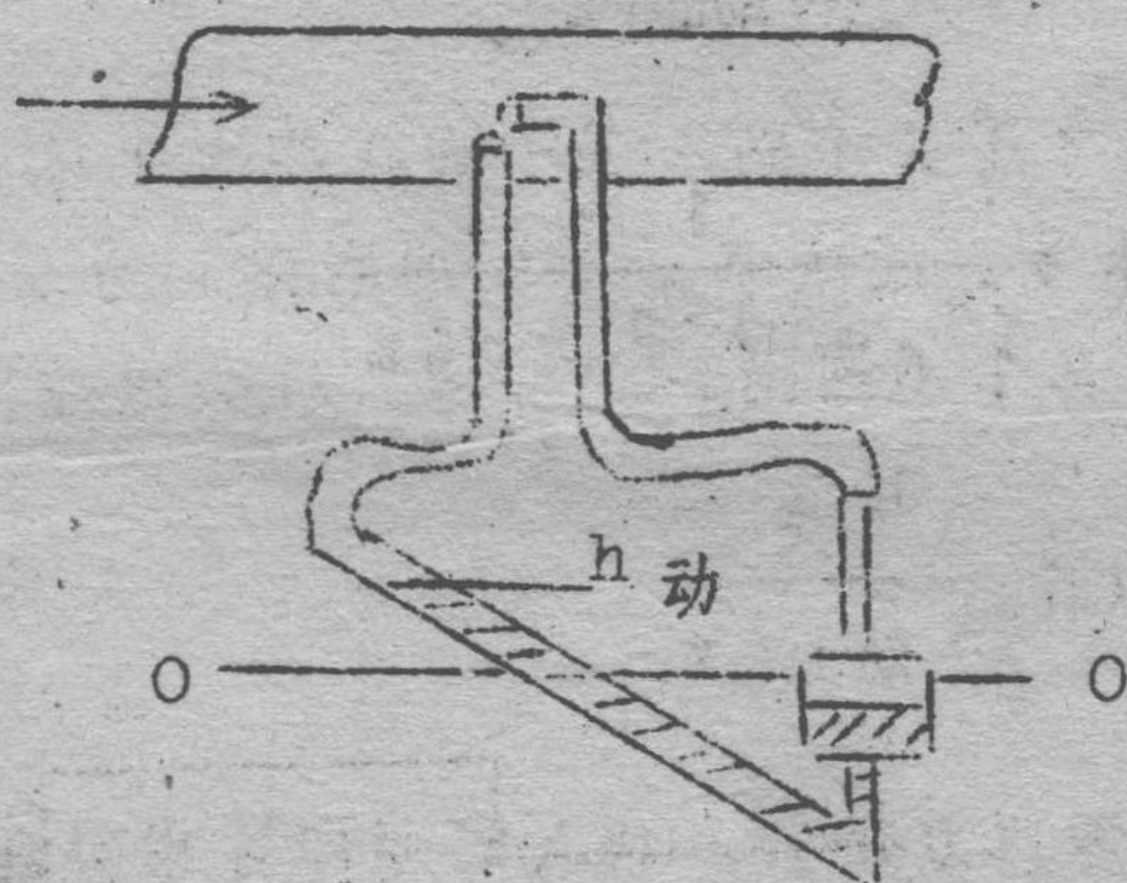


图 1-3

五、计算局部阻力系数：

$$h_{\text{失}} = \zeta \frac{W^2}{2} \rho_t [\text{Pa}]$$

式中： ζ ——局部阻力系数；

W ——管内气体平均流速〔米/秒〕

$$W = AW_{\text{max}} = A \cdot \sqrt{2 \frac{h_{\text{动max}}}{\rho_t}} \quad \text{本实验中可取 } A = 0.83$$

如截面有改变时，采用 细管中的流速。

ρ_t ——实验温度下的气体密度〔千克/米³〕

$$\text{所以 } \zeta = h_{\text{失}} \frac{2}{W^2 \rho_t} = h_{\text{失}} \frac{2}{A^2 W^2_{\text{max}} \rho_t}$$

$$= h_{\text{失}} \frac{2}{A^2 \cdot \frac{2 h_{\text{动 max}}}{\rho_t} \cdot \rho_t}$$

$$= h_{\text{失}} \cdot \frac{1}{A^2 h_{\text{动 max}}}$$

$$= h_{\text{失}} \frac{1}{(0.83)^2 h_{\text{动 max}}}$$

$$= 1.45 \frac{h_{\text{失}}}{h_{\text{动 max}}}$$

将各处的局部阻力损失，代入式中即可求得相应的局部阻力系数 ζ ，例如以 2—3 突然扩大为例： $h_{\text{失}2-3} = h_{\text{总}2} - h_{\text{总}3}$ ，

所以突然扩大局部阻力系数 $\zeta_{2-3} = 1.45 \frac{h_{\text{失}2-3}}{h_{\text{动 max}}}$ ，其余类推。

六、数据整理：

局部阻力系数 ζ 的计算

次	1~2点间		2~3点间		3~4点间		4~5点间		5~6点间		6~7点间	
数	$h_{\text{失}}$	ζ	$h_{\text{失}}$	ζ	$h_{\text{失}}$	ζ	$h_{\text{失}}$	ζ	$h_{\text{失}}$	ζ	$h_{\text{失}}$	ζ
1												
2												

1. 将求得的 ζ 与教材中给出的 ζ 加以比较，并解释误差原因。

14.5 x 0.4

93.0

1.5

0-20C

71.0

65.5

38.5

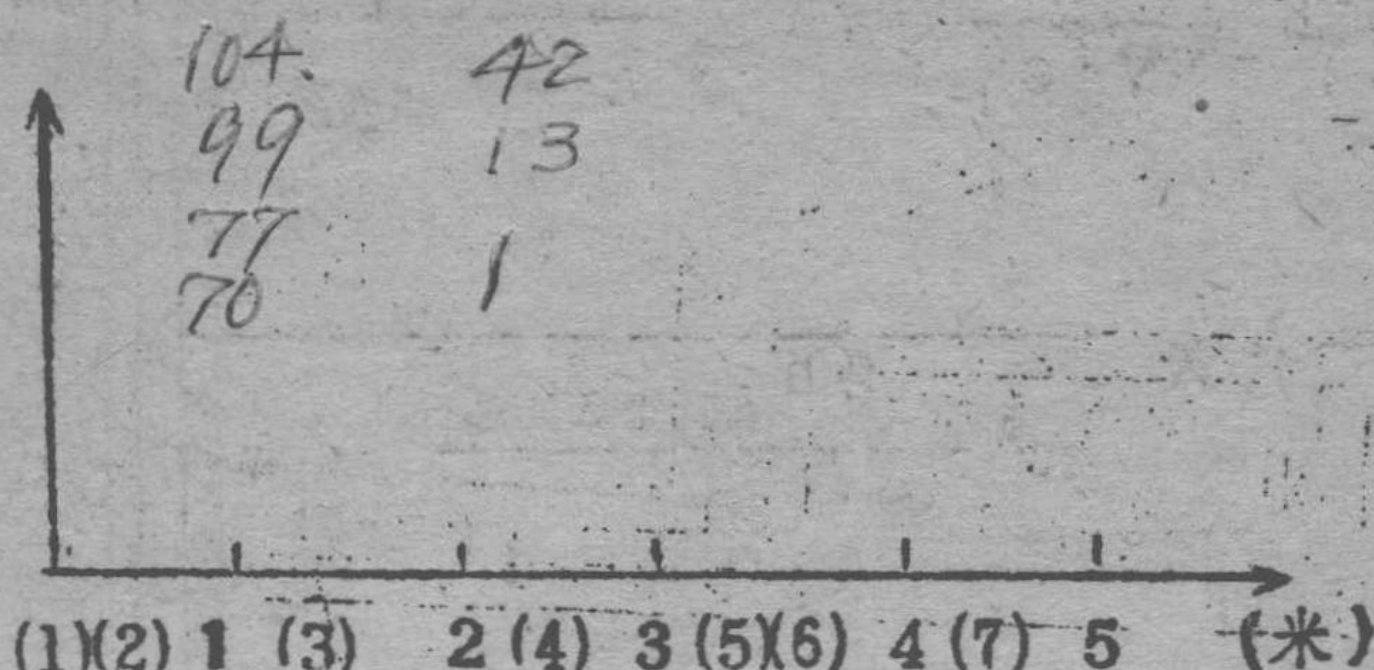
2. 作出沿管道总压头变化曲线:

流量

120 x 10⁴

90

总压头
(帕斯卡)



管道长度 (米)

思考题:

1. 为什么在管道二截面轴线上测得的总压头之差, 即为该管段上的阻力损失?

2. 为什么用皮托管在管轴线测得的速度是最大速度?

实验二 烟囱的工作原理

一、实验目的:

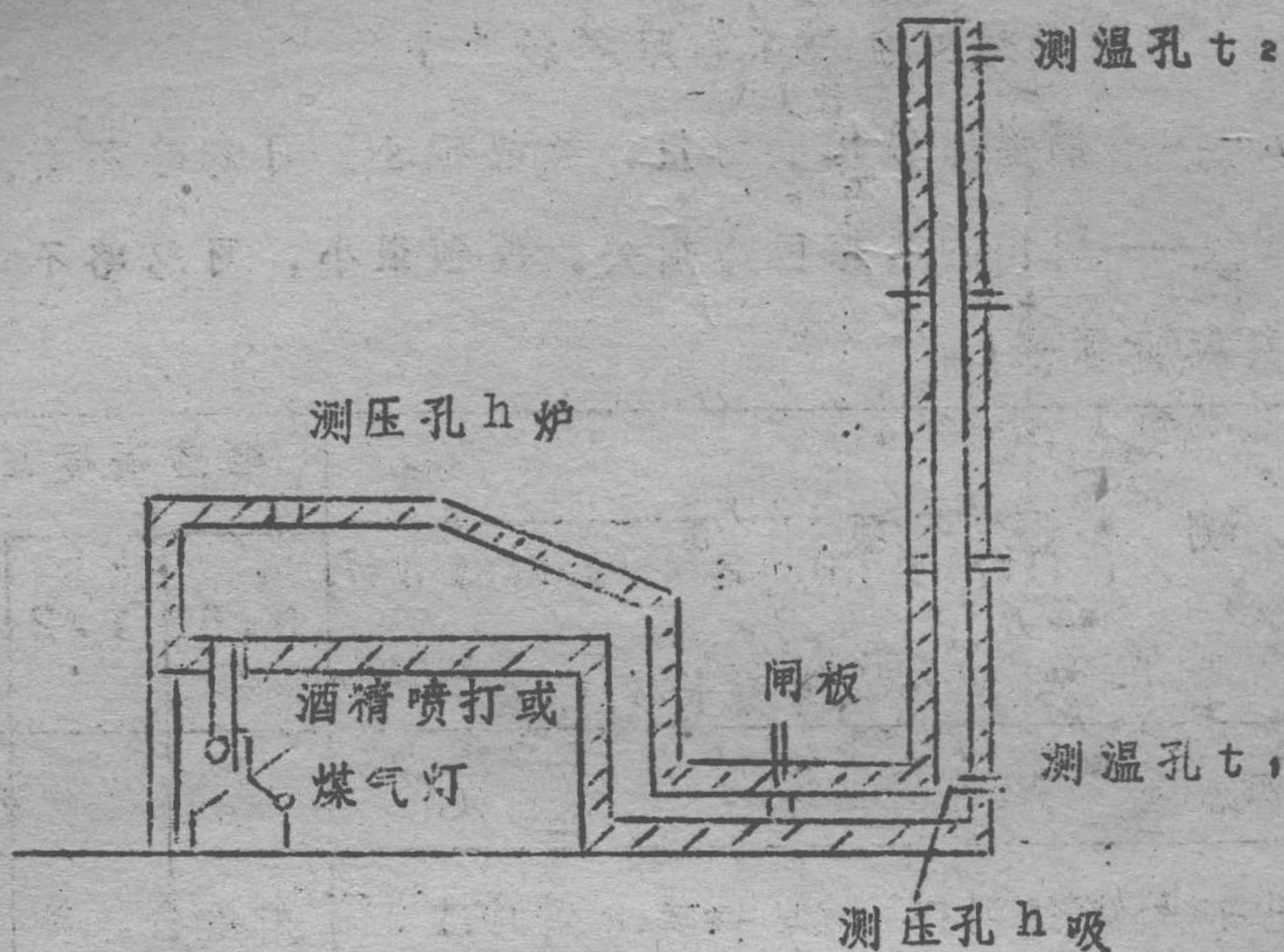
- (1) 测定废气温度及烟囱高度对产生抽力 (又称负压) 的影响。
- (2) 测定烟道闸板对炉内压力的影响。

二、实验设备:

设备如图, 炉子和烟囱都是铁制成, 外裹以绝热材料, 热源为煤气灯或酒精喷灯, 用两支温度计分别测量烟囱底部及出口的温度 t_1 , t_2 用微压计测量烟囱底部抽力 $h_{吸}$ 和炉内压力 $h_{炉}$ 。

三、实验内容:

1. 最初烟囱高 0.6 米, 全开闸门, 点燃煤气灯或酒精喷灯, 待 10~15 分钟温度稳定后, 测量 t_1 , t_2 及烟囱底部抽力 $h_{吸}$ 。



加高烟囱至 1.2 米，1.8 米，分别测量 t_1 、 t_2 及抽力 $h_{吸}$ 。这时应当使喷灯的气流恒定，闸门不漏气以保持各个参数的稳定。

2. 烟囱保持 1.8 米高度，变更煤气量或喷灯火焰量，测量废气温度对烟囱抽力的影响。

3. 在烟囱最大高度和废气最高温度下，在闸板全开时及闸板下落为全高的 $\frac{1}{4}$ ， $\frac{1}{2}$ ， $\frac{3}{4}$ 时，分别测量炉膛内的压力 $h_{炉}$ ，观察闸板下降程度对炉内压力的影响。

四、数据整理：

将实验数值与下列计算值进行比较：

$$h_{吸} = Hg(\rho_{空} - \rho_{气}) - \Delta h_{动} - \Delta h_{摩} \quad (\text{帕斯卡})$$

式中： $\rho_{空}$ ——周围环境温度下的空气密度；〔千克/米³〕。

$\rho_{气}$ ——废气平均温度 $(\frac{t_1 + t_2}{2})$ 下的废气密度〔 $\frac{\text{千克}}{\text{米}^3}$ 〕

($\rho_{空0} = 1.293[\frac{\text{千克}}{\text{米}^3}]$ ， $\rho_{气0} = 1.3[\frac{\text{千克}}{\text{米}^3}]$)

g ——重力加速度 9.81 [米/秒²]

$\Delta h_{\text{动}}$ ——烟囱的动压头增量，数值很小，可忽略不计。

$\Delta h_{\text{摩}}$ ——烟囱的摩擦阻力损失，数值很小，可忽略不计。

1. 数据记录表:

测 量 项 目		烟囱高度 H (米)		
		0.6	1.2	1.8
周围环境	$t_{\text{空}} =$ °C			
烟囱出口处废气温度	$t_0 =$ °C			
测出的烟囱	火焰变更前 $t_1 =$ °C			
底部抽力	火焰第一次变更后 $t_1 =$ °C			
$h_{\text{吸}}$ (帕斯卡)	火焰第二次变更后 $t_1 =$ °C			
按公式算出	当 $t_1 =$ °C			
的底部抽力	$t_1 =$ °C			
$h_{\text{吸}}$ (帕斯卡)	$t_1 =$ °C			
炉内压力	闸板全开时 $t_1 =$ °C			
$h_{\text{炉}}$ (帕斯卡)	闸板下降 $\frac{1}{4}$ 时 $t_1 =$ °C			
	闸板下降 $\frac{1}{2}$ 时 $t_1 =$ °C			
	闸板下降 $\frac{3}{4}$ 时 $t_1 =$ °C			

2. 绘图:

(1) $h_{\text{吸}} = f(H)$ (当 t_1 一定时)

(2) $h_{\text{吸}} = f(t_1)$ (当 H 一定时)

(3) h 炉与闸板开度间关系 (当 t_1 , H 一定时)

思考题:

1. 为什么烟囱底部的抽力能用来克服烟道和烟囱内的阻力。
2. 烟囱底部的抽力主要与那些因素有关。
3. 闸板下降, 炉膛压力增加还是下降, 为什么?

实验三 烟气分析

一、实验目的:

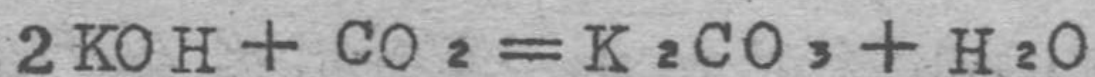
了解化学式气体分析器的作用原理, 掌握烟气中 CO 、 CO_2 、 O_2 、 N_2 的分析方法, 并通过烟气分析计算燃烧过剩空气系数。

二、实验原理

化学式分析器的作用原理是用适当的吸收剂逐次分别吸取烟气中个别成份, 然后测出烟气中被分析成份除去后的体积缩减量, 即为被测气体的含量。这种方法虽费时较多, 且不能连续自动地进行分析, 但设备简单, 分析的结果比较准确, 故目前仍广泛使用。

1. CO_2 的测定:

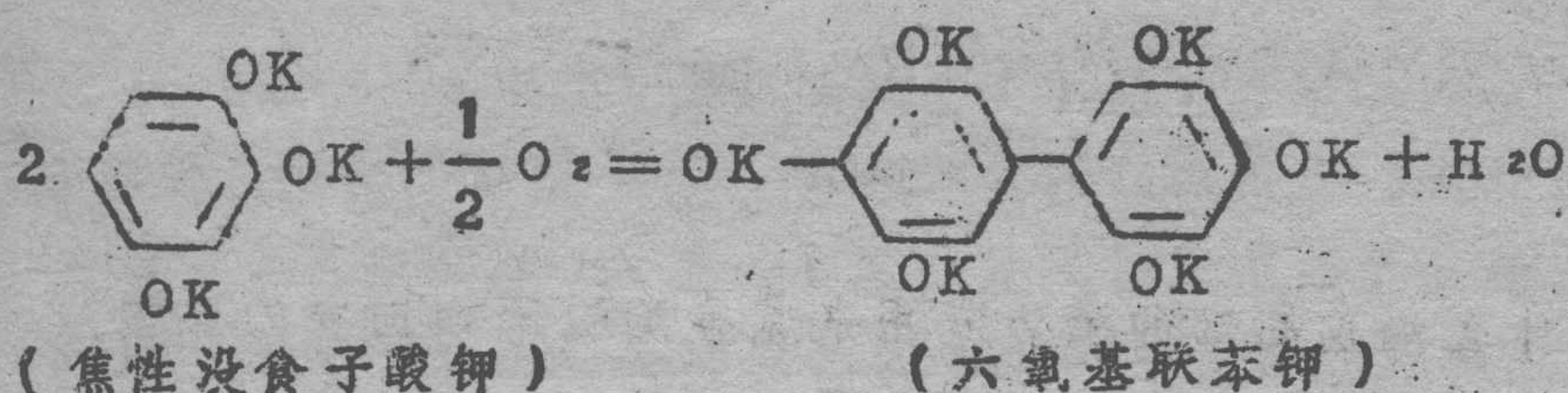
使一定量的烟气 (V) 通过 KOH 溶液, 其中 CO_2 与 KOH , 产生下述化学反应, 而被吸收。



烟气中如有 SO_2 , 则也在这里吸收, 这时测定结果实际上是 CO_2 与 SO_2 的和量。

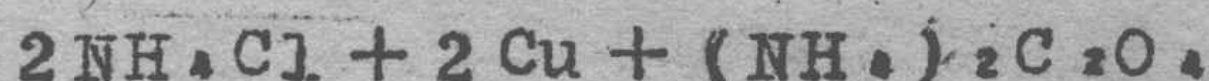
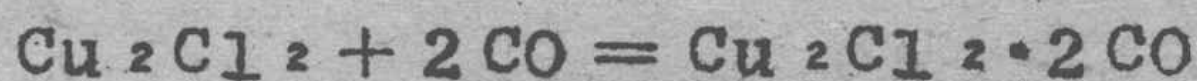
2. O_2 的测定:

吸收于二氧化碳的烟气, 通过焦性没食子酸钾溶液, 其中 O_2 与焦性没食子酸钾发生下述化学反应, 而被吸收。



3. CO 的测定

吸收了 CO_2 , O_2 后的烟气通过氨性氯化亚铜溶液, 其中 CO 与氨性氯化亚铜发生下述化学反应, 而被吸收。



由于碱性焦性没食子酸也能吸收 CO_2 , 氨性氯化亚铜也能吸收 CO_2 和 O_2 , 所以分析时应先分析 CO_2 , 然后依次分析 O_2 和 CO, 次序不可颠倒。

进行 CO 测定时, 时间不宜过长, 否则被氯化亚铜吸收的 CO 又会放出来, 使结果不准。当烟气成份中 CO 含量比较高 (达 16~20%) 时, 利用一个管子吸收 CO 很慢, 且不容易吸收完全, 可在一般三个吸收管后再加一个第四吸收管, 其中装入氨性氯化亚铜溶液, 用以 CO 的第二次吸收。

三、溶液配制与仪器安装检查

1. CO_2 吸收剂——KOH 溶液配制:

90 克 KOH 溶于 180ml 蒸馏水中。溶解时因会产生大量的热量, 所以要不断搅拌, 待冷却后取上面澄清无色部分使用。1 ml 这种吸收液可吸收 40 ml CO_2 。

2. O_2 的吸收剂——硷性焦性没食子酸的配制:

吸收液由 A 液和 B 液混合而成。

A 液: 30 克焦性没食子酸溶于 80 ml 蒸馏水中 (为了加快溶解, 可加热到 60°C)。

B液：48克氢氧化钾溶于100ml蒸馏水中。

使用前把A、B两液倒入吸收瓶中，上下移动平衡瓶，使其混合（这两种液体单独贮藏时不吸收氧）。1ml混合液可吸收氧气10ml，吸收能力与吸收剂本身的温度有关。不低于25℃吸收最快，低于7℃时便不能吸收）。

3. CO吸收剂——氨性氯化亚铜溶液的配制：

42克氯化铵溶于125ml蒸馏水中，加入33.4克氯化亚铜。注入吸收瓶时，每三体积所配液，需加入一体积0.9的氢氧化铵（约42ml），为避免氯化亚铜被空气氧化，在吸收瓶中需加入一束铜丝。这种吸收液，每一体积能吸收10~16体积CO。

4. 封闭液的配制

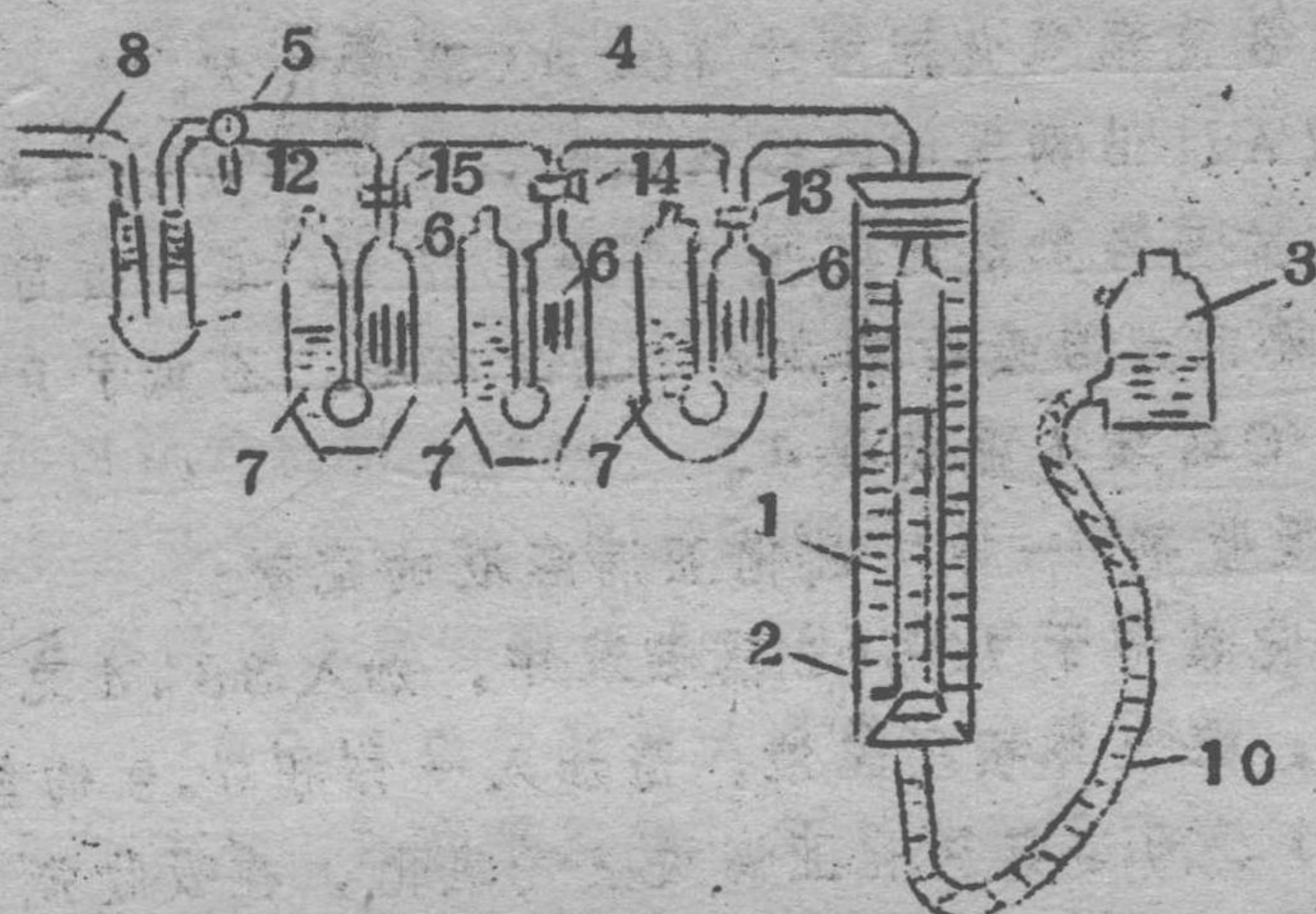
平衡瓶内的封闭液在分析时要和烟气试样接触，为了使封闭液不吸收CO₂，常使它略带微酸性。封闭液的配方有以下几种。

a. 将150克食盐溶解于0.5升蒸馏水中，经过一昼夜沉淀以后，滤去沉淀物，向该溶液中加入浓硫酸酸化，每升加10毫升浓硫酸，再向溶液内滴入10滴甲基橙，使它变成红色，然后用烟气饱和即可使用。

b. 将80克固体硫酸钠溶于200毫升蒸馏水中，滤去杂质，再加入甲基橙2~4滴，并加入稀硫酸使甲基橙变红，然后用烟气饱和即可使用。

5. 仪器的安装和检查

先把仪器洗净，如图示装置，装妥后在第一组吸收瓶中注入200毫升KOH溶液，作吸收CO₂用，于第二组吸收瓶中注入200毫升碱性焦性没食子酸溶液，作吸收O₂用，于第三组吸收瓶中注入200毫升氨性氯化亚铜和铜丝作吸收CO用，每瓶装入吸收剂溶液量以瓶体积的2/3为宜（约200毫升），要求瓶内剩余体间不小于100毫升，并在三组吸收瓶与大气相通的吸收溶液液面上，注入液体石蜡。在平衡瓶3注满封闭液，在量气管外套管2中加入冷却水（此种装置可使量筒内烟气温度的不变，在U形管9内装上无水氯化钙（或硅胶），仪器各部分用乳胶管连接好，注意密封。然



1 — 量气管
2 — 恒温水套
3 — 平衡瓶
4 — 梳形管
5 — 三通
6 — 7 — 吸收瓶

8 — 连接管
9 — U形干燥管 (内存在无水氯化钙)
10 — 橡皮管
12 — 连接管
13, 14, 15 — 活塞

后按下述方法检查仪器是否漏气。

把开关 13, 14, 15 闭上, 将三通开关 5 和大气相通, 将平衡瓶 3 提高, 使量气管内水位升到最上端刻度附近, 然后关闭三通 5, 放下平衡瓶, 此时量气筒内水面如只微微下落后, 保持不变, 即证明活塞 5 不漏气。然后再依次打开各组吸收瓶的活塞作检查。即把第一组吸收瓶的液面调到刻度线后关闭活塞 13, 如果吸收瓶中液面保持不变, 即证明活塞 13 不漏气, 其他二组吸收瓶上的活塞 14, 15 也按同样方法检查。如发现漏气, 则要把活塞重新涂上凡士林, 校正至不漏气为止。检查完毕后, 把吸收瓶中吸收液和量气筒中封闭液调至标线, 以备测定。

四、测定步骤:

将取样管用橡皮管与 U 形干燥管连接, 旋转三通活塞 5, 使取样瓶与量管相通与大气不相通, 把平衡瓶向下移, 使待测烟气进入

量气管中，然后转动活塞 5，使量气管与大气相通，提高平衡瓶，把吸入量气管内的烟气排出，重复上述操作 2 次，便可以认为气体分析器已被待测气体洗净，继续提高平衡瓶使量气管内液面准确升至上端零点标线，并应使平衡瓶内液面与其对齐。然后旋三通活塞 5，使气样与量气管相通，下移平衡瓶，待量气管内液面降至略低于 100 ml 刻度线时，旋三通活塞 5，使量气管与气样及大气隔绝，将水准瓶液面对准量气管 100 ml 刻度线旋三通活塞 5 使管气量与大气相通下，随即关闭，使取入气样恰为 100 ml。

测定时，先打开活塞 1 3，提高平衡瓶，把气体压入第一组吸收瓶中，直至封闭液升到量气管上部标线为止。然后放下平衡瓶，气体又被吸回量气管中，如此重复 3—4 次，将气体吸入量气管中，当吸收液达到吸收瓶上部刻线时，关闭 1 3 提升平衡瓶 3，靠近量气管，使平衡瓶中液面和量气管中液面。

在同一高度时，记下量气管液面的读数。再打开活塞 1 3，重复上述方法进行操作，直至量气管的液面读数不变，说明 CO_2 气体已被第一组吸收瓶中的 KOH 溶液吸收完全。记下读数为 V_1 ，然后打开活塞 1 4，按上述方法进行 O_2 的测定。直至量气管的读数保持不变，记下读数为 V_2 ，再打开活塞 1 5，按上述方法进行 CO 的测定，直至量气管的读数不变，记下读数为 V_3 。

五、结果计算

(1) 烟气组成的计算

$$\text{CO}_2 = \frac{100 - V_1}{100} \times 100$$

$$\text{O}_2 = \frac{V_1 - V_2}{100} \times 100$$

$$\text{CO} = \frac{V_2 - V_3}{100} \times 100$$