

JC

中华人民共和国行业标准

JC 428—91

砖瓦工业隧道窑热平衡、热效率 测定与计算方法

1991-03-22 发布

1991-12-01 实施

国家建筑材料工业局 发布

目 次

1 主题内容与适用范围.....	(1)
2 引用标准.....	(1)
3 符号.....	(1)
4 条件与基准.....	(1)
5 热平衡示意图.....	(1)
6 记录、测定事项	(2)
7 测定方法.....	(2)
8 热平衡计算方法.....	(5)
9 热效率计算方法.....	(8)
10 热平衡、热效率计算结果汇总表.....	(9)
附录 A 符号说明(补充件)	(10)
附录 B 记录、测定事项表(补充件)	(13)
附录 C 燃料发热量的换算公式(补充件)	(16)
附录 D 灰渣含碳率的确定方法(补充件)	(18)
附录 E 气体中水蒸气的容积百分数的计算方法(补充件)	(18)
附录 F 各种管道测点的选择与气体流量的计算方法(补充件)	(18)
附录 G 奥氏气体分析仪的使用方法(参考件)	(21)
附录 H 各类数据表(参考件)	(23)

中华人民共和国行业标准

JC 428—91

砖瓦工业隧道窑热平衡、热效率 测定与计算方法

1 主题内容与适用范围

本标准规定了砖瓦工业隧道窑热平衡测定与计算的条件、基准、符号、测定方法、计算方法以及计算结果的表达方式。

本标准适用于使用固体燃料烧制粘土、页岩砖瓦的隧道窑。使用其他燃料及原料烧制砖瓦的隧道窑可参照执行。

2 引用标准

GB 211 煤中全水分的测定方法

GB 212 煤的工业分析方法

GB 213 煤的发热量测定方法

GB 2589 综合能耗计算通则

GB 6054 隧道式砖瓦干燥室热平衡、热效率测定与计算方法

JC 429 砖瓦工业隧道窑-干燥室体系热效率、单位热耗、单位煤耗计算方法

3 符号

本标准所采用的符号见附录 A(补充件)。

4 条件与基准

4.1 测定应在窑炉正常连续生产状态下进行。根据一个焙烧周期的实际测定结果进行热平衡计算。

4.2 基准温度为测定期间的环境温度。

4.3 外燃料的发热量以应用基低位发热量为基准。内燃料的发热量以干燥基低位发热量为基准。

4.4 收支热量的计算以一万块普通砖的质量为计算基数,计算的最终结果一般用“千焦/万块”表示,必要时也可将其折算为用“千焦/吨(千克)”表示的热量。

5 热平衡示意图

本标准热平衡体系包括窑体和送(排)风机两部分。窑体以窑墙、窑顶的外表面和窑底地平面为界。当车底散热和漏气严重,并具备测试条件时底部也可以以窑车底面为界。界限以内属热平衡体系,送(排)风机与风道是否划入体系内根据由测试条件所选定的测定位置确定,以测点为界限,靠近窑体一侧的风机与风道应划入热平衡体系内,位于另一侧的风机和风道均不属热平衡体系。在进行热平衡测定与计算时体系以外不予考虑。

在热平衡体系范围内,所有的热量收支项目应按图 1 所示绘出热平衡示意图。

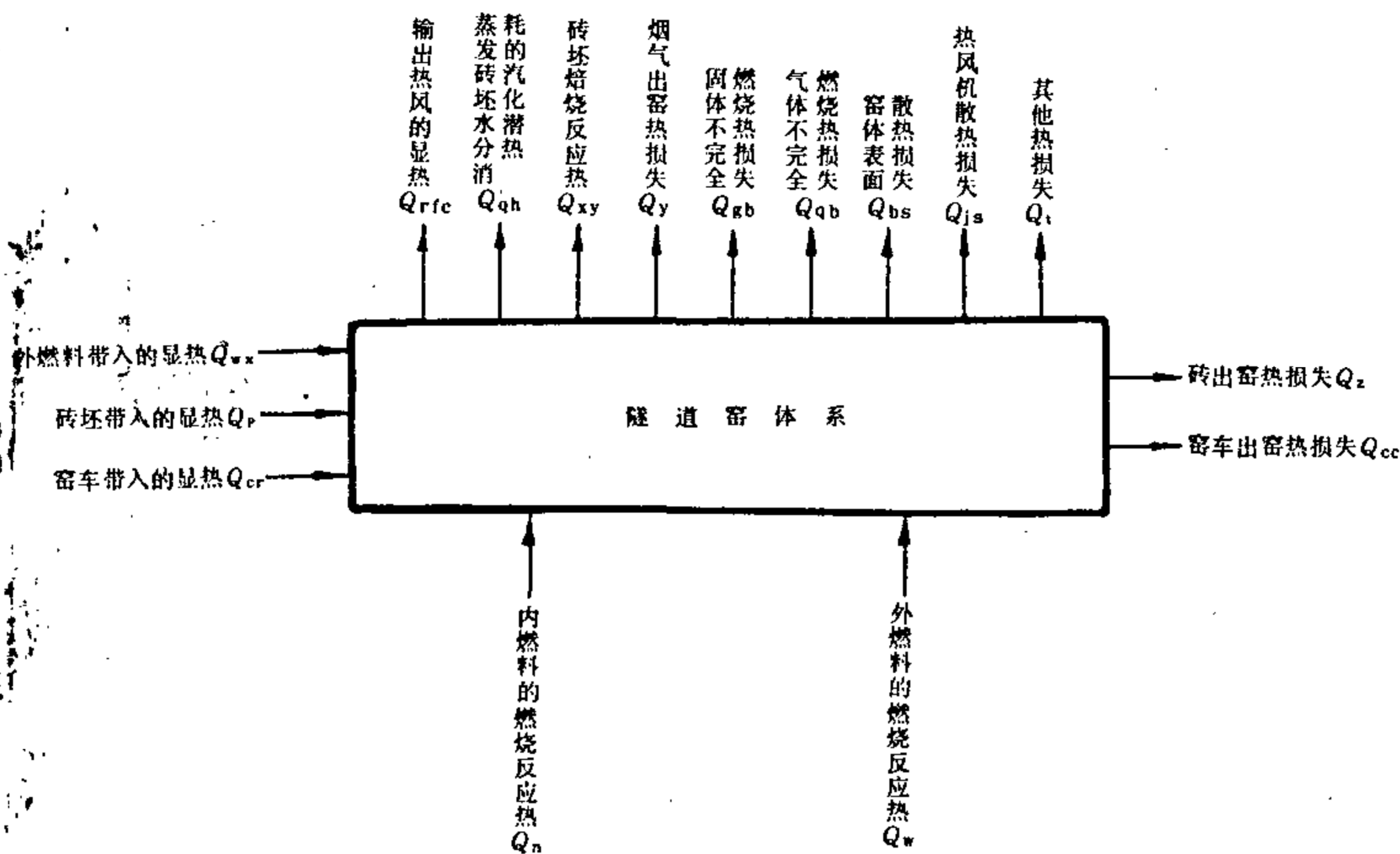


图 1 热平衡示意图

注：图中收支热量均以一万块普通砖的质量为计算基数。

6 记录、测定事项

记录、测定事项见附录 B(补充件)。

7 测定方法

7.1 测定起止时间

测定前应选定一辆窑车作为起止时间的依据,热平衡测定在该车从入窑至出窑的整个焙烧周期内进行。原料和燃料的取样及计量提前至构成被测定的坯体¹⁾的原料制备、成型阶段内进行。

注：1) 被测定坯体包括对全窑的热平衡测定开始前半个焙烧周期和测定开始后一个焙烧周期内进入窑内的半成品。

7.2 外界条件

7.2.1 环境温度

环境温度在距窑墙两米和离地面一米以上的地方用玻璃温度计测量,每小时测定一次,全周期的平均值为环境温度。

7.2.2 大气压强

大气压强采用大气压力计测量。也可以采用当地气象部门同期测量的数据。

7.3 原料

分析试样在原料制备车间掺入内燃料之前取样。每间隔 2~4 h 取样一次,每次取样约 3 kg,累计取样次数不得少于 10 次,将所取得的全部试样均匀混合后,用四分法缩分并留取试样 1 kg,根据化学分析结果确定其所需的热工计算参数。

7.4 燃料

7.4.1 内燃料

7.4.1.1 取样

内燃料在原料制备车间即将掺入原料之前取样。在被测试产品成型期间,每间隔约半小时取样一次,每次取样约 0.2 kg,装入密封容器内。将全部试样均匀混合后,用四分法缩分并留取试样 1 kg 供分

析。

7.4.1.2 组成及发热量

内燃料的应用基水分、分析基组成及发热量分别按照 GB 211、GB 212、GB 213 确定。各种原煤的发热量也可以根据工业分析结果按照 GB 2589 附录的规定用经验公式计算求得。不同基准发热量之间的换算关系见附录 C(补充件)。

7.4.1.3 每万块砖坯掺配量

内燃料应采取称量或测量流量的方法准确地计量。每万块砖坯的内燃料(干燥基)掺配量由测定期间内燃料(干燥基)的累计消耗量除以对应的湿坯累计产量确定。

7.4.2 外燃料

7.4.2.1 取样

在确定的测试周期内,每间隔 4 h 在投煤处煤堆表层分散取样约 0.5 kg。装入密闭容器内,到测量停止时,将全部样品均匀混合后用四分法缩分并留取试样 1 kg 供分析。

7.4.2.2 组成及发热量

组成及发热量的测量方法同 7.4.1.2。

7.4.2.3 每万块砖的外燃料消耗量

测定期间所用外燃料应与窑上存留燃料分开堆放,准确计量。每万块砖的外燃料消耗量由测定期间外燃料(应用基)实际消耗量除以对应的砖产量确定。

7.5 灰渣

7.5.1 取样

在测量外燃料消耗量期间出窑的窑车中,分别收集三辆出窑时间顺序被断开的窑车车面上的灰渣(砖渣除外),在现场集中称量计数,然后用四分法缩分并留取试样 1 kg 供分析。

7.5.2 每万块砖的灰渣生成量

每万块砖的灰渣生成量由收集到的灰渣总量除以对应窑车的砖坯装载量确定。

7.5.3 灰渣含碳率

灰渣含碳率的确定见附录 D(补充件)。

7.6 烟气和热风

7.6.1 测定间隔时间

在测定周期内每间隔 4 h 测定一次。热平衡计算取各次测定结果的平均值。

7.6.2 测定位置的选择

测定位置应选在直风道上与风机的距离相当于管道当量直径 3~7 倍长度的地方。

7.6.3 温度

测温仪器原则上用玻璃温度计,也可以选用电阻温度计或热电偶温度计。温度数值由管道断面的平均测量值确定。

7.6.4 湿度

气体湿度可以用干湿球温度计测量。也可以用冷凝计测量。冷凝计测量湿度的装置如图 2 所示。把接水瓶收集到的冷凝水量加上出冷凝器的气体在该温度下的饱和湿度时的水蒸气量,再除以通过气体的体积,所得之商确定为气体的绝对湿度(kg/m^3)。气体中水蒸气的容积百分数的计算方法见附录 E(补充件)。

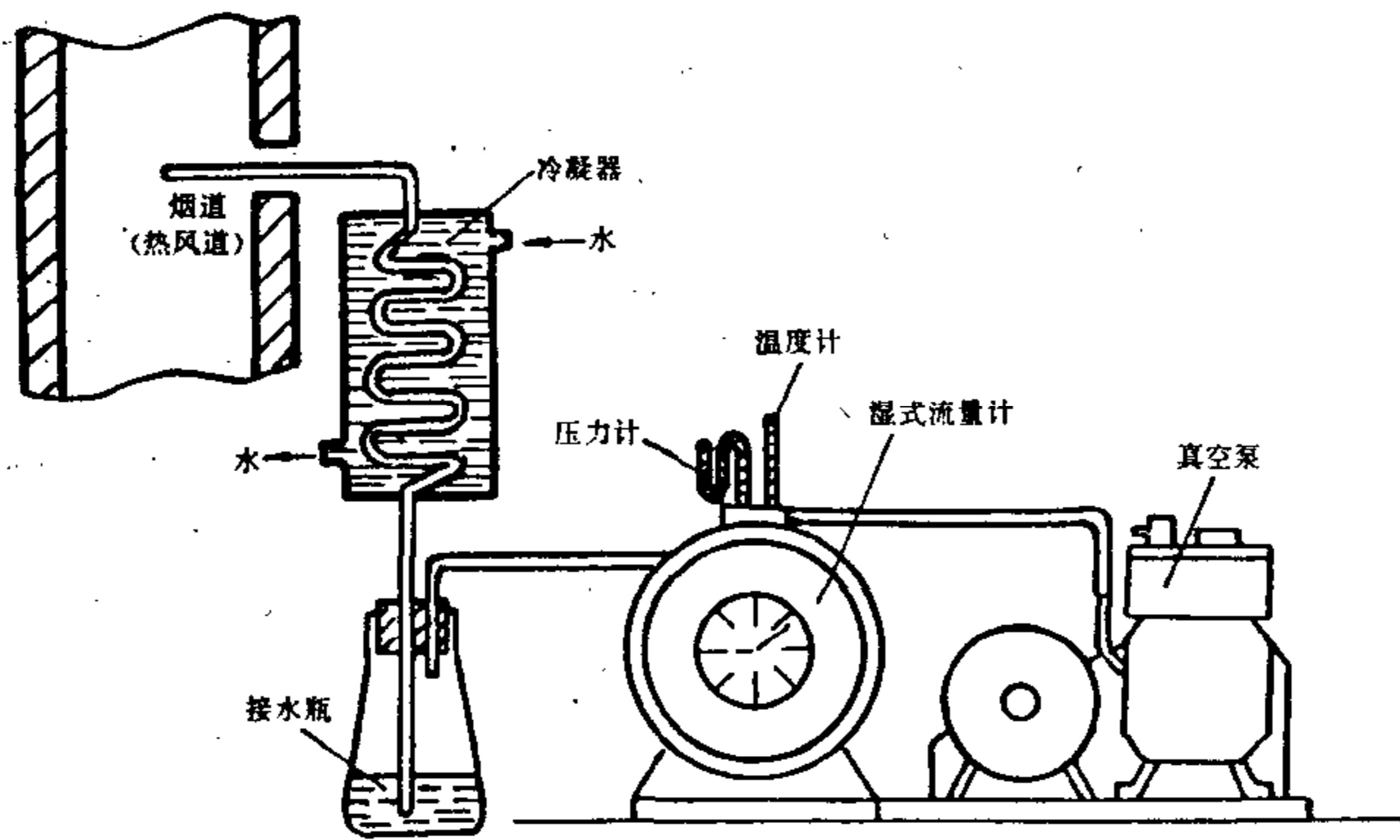


图2 用冷凝法测量气体湿含量的系统装置示意图

7.6.5 流量

气体压力用微压计配合毕托管测量。测点选择及流量的计算按照附录 F(补充件)的规定进行。

7.6.6 气体成分

测定气体成分原则上采用奥氏气体分析仪。取样位置同 7.6.2,分析的方法和步骤见附录 C(参考件)。

7.7 砖坯与砖

7.7.1 测定间隔时间

在测定周期内,每隔约 2 h 测定一次,热平衡计算取各次测定结果的平均值。

7.7.2 进出窑时的温度与质量

砖坯测试样品在即将入窑的窑车上采集,每次在坯垛顶部及四角各取一块,共取五块。砖的测试样品在刚出窑的窑车上采集,每次在砖垛的四角及中部各取一块,共取五块。取得的样品分别用半导体温度计或表面热电偶温度计测量温度,用感量为 0.5 g 的台秤称量质量,根据各项测量的平均值确定该次砖坯与砖进出窑时的温度与质量。

7.7.3 砖坯含水率

每次测完砖坯温度之后,留取两块样品测定其含水率。将样品在 $107 \pm 2^\circ\text{C}$ 的温度下烘干至恒重,将其减量与坯体恒重的百分比确定为砖坯含水率。

7.7.4 砖内残余含碳率

将测定砖的温度时所取样品保留三组(三组样品取样的时间顺序应是不连续的),全部粉碎混合后用四分法缩分并留取试样 1 kg,按照附录 D 的分析步骤测定其含碳率。

7.8 窑车

7.8.1 进出窑时的温度

每间隔 1~2 h 选定一辆即将进窑和刚出窑的窑车,测定进出窑时的温度。不同材料的温度应分别测量。测定金属材料的温度至少在前后车轮和车架上取三个测点,测定非金属耐火材料的温度应分别在窑车面中部取两个测点和车沿四周取四个测点。

然后分别计算出该次窑车进出窑时各种材料的平均温度。热平衡计算取各次测定结果的平均值。

7.9 窑体

7.9.1 测定间隔时间

在测定周期内每间隔 6 h 测定一次,热平衡计算取各次测定的平均值。

7.9.2 测点的划分

测定前根据温度的变化将窑体外表面划分为若干个矩形面,同一面上各点温度最大值与最小值之差不得大于 3℃,每个面的中心作为一个测点。

7.9.3 表面散热流量

按照规定的测定时间用表面热电偶温度计测定窑体表面温度,并同时用玻璃温度计测量周围空间温度,以此计算该表面当时的散热流量。若采用热流计测定散热时,应在测定之前装上测头,使热流值基本保持稳定,然后在规定的时间内记录各测点的热流值。根据对全部测点进行测定所取得的数据计算全窑的平均散热流量。

7.10 风机

风机散热使用热流计测量。每台风机取 1~2 个测点。测定时间间隔同 7.9.1。测定方法及要求同 7.9.3。

7.11 窑内介质的温度、压力曲线

窑内介质的温度、压力应在热平衡测定开始后,进行跟踪窑车逐点测定,也可以在整个纵向长度上均匀选择测点同时测定。以长度为横坐标,以温度、压力为纵坐标绘制曲线。

8 热平衡计算方法

8.1 热量收入

8.1.1 内燃料的燃烧反应热

$$Q_n = Q_{ndw}^* \cdot m_n^* \quad \dots\dots\dots(1)$$

式中: Q_n —— 每万块砖内掺燃料的燃烧反应热, kJ;

Q_{ndw}^* —— 内燃料干燥基低位发热量, kJ/kg;

m_n^* —— 每万块砖内燃料(干燥基)掺配量, kg。

8.1.2 外燃料的燃烧反应热

$$Q_w = Q_{wdw}^* \cdot m_w^* \quad \dots\dots\dots(2)$$

式中: Q_w —— 每万块砖所消耗外燃料的燃烧反应热, kJ;

Q_{wdw}^* —— 外燃料应用基低位发热量, kJ/kg;

m_w^* —— 每万块砖的外燃料(应用基)消耗量, kg。

8.1.3 外燃料带入的显热

$$Q_{wx} = m_w^* \cdot \left[\frac{(100 - W_w^*)c_w + 4.18 W_w^*}{100} \right] \cdot (t_w - t_0) \quad \dots\dots\dots(3)$$

式中: Q_{wx} —— 每万块砖所消耗外燃料带入的显热, kJ;

W_w^* —— 外燃料应用基含水率, %;

c_w —— 外燃料的比热, kJ/(kg · °C), 见附录 H(参考件);

t_w —— 外燃料的平均温度, °C;

t_0 —— 环境温度, °C。

8.1.4 砖坯带入的显热

$$Q_p = \left[\left(m_p \cdot \frac{100 - W_p}{100} - m_n^* \right) \right] \cdot c_{p1} + 0.0418 m_p \cdot W_p + m_n^* \cdot c_n \cdot (t_p - t_0) \quad \dots\dots\dots(4)$$

式中: Q_p —— 每万块砖坯带入的显热, kJ;

m_p —— 每万块砖坯的质量, kg;

t_p —— 砖坯的平均温度, °C;

c_{p1} —— 砖坯内原料的比热, kJ/(kg · °C), 按下式计算:

$$c_{p1} = 0.807 + 313.6 \times 10^{-6} t_p \quad \dots\dots\dots(5)$$

c_n ——内燃料的比热, kJ/(kg·℃), 见附录 H(参考件)。

8.1.5 窑车带入的显热

$$Q_{cr} = \frac{1}{B} [m_j \cdot c_j (t_{jr} - t_0) + \sum m_{f1} \cdot c_{f1} (t_{fr} - t_0)] \quad \dots\dots\dots(6)$$

式中: Q_{cr} ——相应于每万块砖窑车带入的显热, kJ;
 B ——以一万块普通砖为计量单位的每辆窑车装载量;
 m_j ——一辆窑车中属材料的质量, kg;
 c_j ——窑车金属材料的比热, kJ/(kg·℃), 见附录 H(参考件);
 t_{jr} ——窑车入窑时金属材料温度, ℃;
 m_{f1} ——一辆车中非金属耐火衬料的质量, kg;
 c_{f1} ——窑车非金属耐火衬料的比热, 见附录 H(参考件);
 t_{fr} ——窑车入窑时非金属耐火衬料的温度, ℃。

8.1.6 总收入热量

$$Q_{zs} = Q_z + Q_w + Q_{wx} + Q_p + Q_{cr} \quad \dots\dots\dots(7)$$

式中: Q_{zs} ——烧成每万块砖总收入热量, kJ。

8.2 热量支出

8.2.1 蒸发砖坯水分消耗的汽化潜热

$$Q_{qh} = \frac{1}{100} r \cdot m_p \cdot W_p \quad \dots\dots\dots(8)$$

式中: Q_{qh} ——蒸发每万块砖坯水分消耗的汽化潜热, kJ;
 r ——水在入窑砖坯平均温度下的汽化潜热, kJ/kg。

8.2.2 砖坯焙烧反应热

砖坯在高温焙烧时的反应热以量热仪实测结果为准, 在条件不具备时可按下式计算:

$$Q_{xy} = 20.91 m_{p1} \cdot Al_2O_3 \quad \dots\dots\dots(9)$$

或
$$Q_{xy} = 20.91 \left(m_p \frac{100 - W_p}{100} - m_n^g \right) \cdot Al_2O_3 \quad \dots\dots\dots(10)$$

式中: Q_{xy} ——每万块砖的焙烧反应热, kJ;
 m_{p1} ——每万块砖坯中粘土质原料的质量, kg;
 Al_2O_3 ——砖坯原料中氧化铝的含量, %。

8.2.3 输出热风的显热

$$Q_{rhc} = \frac{1}{100 A} \{ V_{rt} [100 - \phi_{rt(H_2O)}] \cdot c'_{grt} + V_{rt} \cdot \phi_{rt(H_2O)} \cdot c'_{(H_2O)} \} \cdot (t_{rt} - t_0) \quad \dots\dots\dots(11)$$

式中: Q_{rhc} ——相应于每万块砖输出热风的显热, kJ;
 A ——以万块普通砖为计量单位的窑的每小时产量;
 V_{rt} ——输出热风的流量, m³·h;
 注: m³ 为标准立方米。
 $\phi_{rt(H_2O)}$ ——热风中水蒸气的容积百分数, %;
 $c'_{(H_2O)}$ ——水蒸气的平均容积比热, kJ/(m³·℃); 见附录 H(参考件);
 t_{rt} ——热风的平均温度, ℃;
 c'_{grt} ——干热风的平均容积比热, kJ/(m³·℃), 按下式计算:

$$c'_{grt} = \frac{1}{100} [\phi_{grt(CO_2)} \cdot c'_{(CO_2)} + \phi_{grt(CO)} \cdot c'_{(CO)} + \phi_{grt(N_2)} \cdot c'_{(N_2)} + \phi_{grt(O_2)} \cdot c'_{(O_2)}] \quad \dots\dots\dots(12)$$

式中: $\phi_{grt(CO_2)}$ 、 $\phi_{grt(CO)}$ 、 $\phi_{grt(N_2)}$ 、 $\phi_{grt(O_2)}$ 分别为干热风中二氧化碳、一氧化碳、氮、氧的容积百分数, %;

$c'_{(\text{CO}_2)}$ 、 $c'_{(\text{CO})}$ 、 $c'_{(\text{N}_2)}$ 、 $c'_{(\text{O}_2)}$ 分别为二氧化碳、一氧化碳、氮、氧的平均容积比热, $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$, 见附录 H(参考件)。

8.2.4 烟气出窑热损失

$$Q_y = \frac{1}{100A} \{ V_y [100 - \phi_{y(\text{H}_2\text{O})}] \cdot c'_{\text{BY}} + V_y \cdot \phi_{y(\text{H}_2\text{O})} \cdot c'_{(\text{H}_2\text{O})} \} \cdot (t_y - t_0) \quad \dots\dots\dots (13)$$

式中: Q_y —— 相应于每万块砖排出烟气的显热, kJ ;
 V_y —— 出窑烟气的流量, m^3/h ;
 c'_{BY} —— 干烟气的平均容积比热, $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$, 计算方法参照 8.2.3;
 $\phi_{y(\text{H}_2\text{O})}$ —— 烟气中水蒸气的容积百分数, %;
 t_y —— 烟气的平均温度, $^\circ\text{C}$ 。

注: m^3 为标准立方米。

8.2.5 砖出窑热损失

$$Q_z = m_z \cdot c_z \cdot (t_z - t_0) \quad \dots\dots\dots (14)$$

式中: Q_z —— 每万块砖带出窑外的显热, kJ ;
 m_z —— 每万块砖的质量, kg ;
 t_z —— 砖出窑时的平均温度, $^\circ\text{C}$;
 c_z —— 砖的比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, 按下式计算:

$$c_z = 0.807 + 313.6 \times 10^{-6} t_z \quad \dots\dots\dots (15)$$

8.2.6 窑车出窑热损失

$$Q_{cc} = \frac{1}{B} [m_j \cdot c_j \cdot (t_{jc} - t_0) + \sum_{\text{mt}} c_t \cdot (t_{tc} - t_0)] \quad \dots\dots\dots (16)$$

式中: Q_{cc} —— 相应于每万块砖窑车带出的显热, kJ ;
 t_{jc} —— 窑车出窑时金属材料的温度, $^\circ\text{C}$;
 t_{tc} —— 窑车出窑时非金属耐火材料的温度, $^\circ\text{C}$ 。

8.2.7 固体不完全燃烧热损失

$$Q_{\text{sb}} = 338.71 (m_{\text{hz}} \cdot c_{\text{hz}} + m_z \cdot c_z) \quad \dots\dots\dots (17)$$

式中: Q_{sb} —— 相应于每万块砖的固体不完全燃烧热损失, kJ ;
 m_{hz} —— 生产一万块砖产生的灰渣量, kg ;
 c_{hz} —— 灰渣含碳率, %;
 c_z —— 砖内残余含碳率, %。

8.2.8 气体不完全燃烧热损失

$$Q_{\text{qb}} = \frac{1.26}{A} \{ V_y [100 - \phi_{y(\text{H}_2\text{O})}] \cdot \phi_{\text{BY}(\text{CO})} + V_{\text{rt}} [100 - \phi_{\text{rt}(\text{H}_2\text{O})}] \cdot \phi_{\text{Brt}(\text{CO})} \} \quad \dots\dots\dots (18)$$

式中: Q_{qb} —— 相应于每万块砖的气体不完全燃烧热损失, kJ ;
 $\phi_{\text{BY}(\text{CO})}$ —— 干烟气中一氧化碳的容积百分数, %;
 $\phi_{\text{Brt}(\text{CO})}$ —— 干热风中一氧化碳的容积百分数, %。

8.2.9 窑体表面¹⁾散热损失

注: 1) 包括窑墙、窑顶和体系内风道的外露表面以及需要测定车底散热时窑车的底平面。

8.2.9.1 窑体表面综合传热系数

$$a_{\text{bi}} = k(t_{\text{bi}} - t_{\text{ki}})^{0.25} + \frac{20.41e \left[\left(\frac{t_{\text{bi}} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{ki}} + 273}{100} \right)^4 \right]}{t_{\text{bi}} - t_{\text{ki}}} \quad \dots\dots\dots (19)$$

式中: a_{bi} —— 第 i 次测得的窑体表面综合传热系数, $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$;

k ——决定于散热面位置的对流传热系数。侧向散热面取 9.20, 水平向上的散热面取 11.71, 水平向下的散热面取 6.27;

t_{bi} ——第 i 次测得的窑体表面温度, °C;

t_{ki} ——第 i 次测得的与测点相对应的空间温度, °C;

e ——窑体表面黑度, 见附录 H(参考件)。

若车底采取强制通风时, 车底表面的 a_{bi} 按下式计算:

$$a_{bi} = 5.3 + 3.6 W_d + \frac{20.41 e \left[\left(\frac{t_{bi} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{ki} + 273}{100} \right)^4 \right]}{t_{bi} - t_{ki}} \quad \dots\dots(20)$$

式中: W_d ——车下采取强制通风时的风速, m/s。

8.2.9.2 窑体表面平均散热流量

$$q_{bsi} = \frac{a_{bi1}(t_{bi1} - t_{ki1}) \cdot F_{b1} + a_{bi2}(t_{bi2} - t_{ki2}) \cdot F_{b2} + \dots\dots + a_{bin}(t_{bin} - t_{kin}) \cdot F_{bn}}{F_{b1} + F_{b2} + \dots\dots + F_{bn}} \quad \dots\dots(21)$$

或
$$q_{bsi} = \frac{q_{bi1} \cdot F_{b1} + q_{bi2} \cdot F_{b2} + \dots\dots q_{bin} \cdot F_{bn}}{F_{b1} + F_{b2} + \dots\dots + F_{bn}} \quad \dots\dots(22)$$

式中: q_{bsi} ——第 i 次测得的全窑表面平均散热流量, kJ/(m²·h);
 $a_{bi1}, a_{bi2}, \dots\dots, a_{bin}$ ——分别表示第 i 次测得的各个测点的窑体表面综合传热系数, kJ/(m²·h·°C);
 $t_{bi1}, t_{bi2}, \dots\dots, t_{bin}$ ——分别表示第 i 次测得的各个测点的窑体表面温度, °C;
 $t_{ki1}, t_{ki2}, \dots\dots, t_{kin}$ ——分别表示第 i 次测得的与各个测点相对应的空间温度, °C;
 $F_{b1}, F_{b2}, \dots\dots, F_{bn}$ ——分别表示各个测点所在矩形面的面积, m²;
 $q_{bi1}, q_{bi2}, \dots\dots, q_{bin}$ ——分别表示第 i 次用热流计测得的各个测点的热流值, kJ/(m²·h)。

8.2.9.3 窑体表面散热损失

$$Q_{bs} = \frac{F_b}{A \cdot n} \sum_{i=1}^n q_{bsi} \quad \dots\dots(23)$$

式中: Q_{bs} ——相应于每万块砖的窑体表面散热损失, kJ;
 n ——测定次数;
 F_b ——窑体总表面积, m²。

8.2.10 送排风机散热损失

$$Q_s = \frac{F_s}{A \cdot n} \sum_{i=1}^n q_{si} \quad \dots\dots(24)$$

式中: Q_s ——相应于每万块砖的风机散热损失, kJ;
 q_{si} ——第 i 次测得的风机表面平均散热流量, kJ/(m²·h);
 F_s ——风机散热面积, m²。

8.2.11 其他热损失

$$Q_t = Q_z - (Q_{qh} + Q_{xy} + Q_{tfc} + Q_y + Q_z + Q_{cc} + Q_{gb} + Q_{qb} + Q_{ba} + Q_s) \quad \dots\dots(25)$$

式中: Q_t ——烧成每万块砖的其他热损失, kJ。

8.2.12 总支出热量

$$Q_z = Q_{qh} + Q_{xy} + Q_{tfc} + Q_y + Q_z + Q_{cc} + Q_{gb} + Q_{qb} + Q_{ba} + Q_s + Q_t \quad \dots\dots(26)$$

式中: Q_z ——烧成每万块砖总支出热量, kJ。

9 热效率计算方法

本标准热效率的计算只限于由隧道窑单个设备构成的体系, 需要向干燥室供热的隧道窑, 还需按照 GB 6054 同时对于干燥室进行测定, 然后按照 JC 429 计算出有关参数, 才能对不同窑的热工性能进行比

较。

9.1 供给热量

$$Q_{ss} = Q_n + Q_w \dots\dots\dots(27)$$

式中: Q_{ss} ——烧成一万块砖供给隧道窑的热量, kJ。

入窑砖坯和外燃烧若用外热源从基准温度加热到入窑温度时, 供给热量应加上砖坯和外燃料的显热。

9.2 有效热量

$$Q_{yx} = Q_{ps} + Q_{xy} \dots\dots\dots(28)$$

式中: Q_{yx} ——烧成一万块砖消耗的有效热量, kJ;

Q_{ps} ——排除每万块砖坯内水分消耗的显、潜热, kJ, 按下式计算:

$$Q_{ps} = \frac{1}{100} m_p W_p \cdot [r + c_{ps} \cdot (t_y - t_p)] \dots\dots\dots(29)$$

式中: c_{ps} ——按砖坯温度和烟气温度的平均值确定的水蒸气质量比热, kJ/(kg · °C)。

9.3 热效率

$$\eta = \frac{Q_{yx}}{Q_{ss}} \times 100 \dots\dots\dots(30)$$

式中: η ——热效率, %。

10 热平衡、热效率计算结果汇总表(见下表)

热平衡、热效率计算结果汇总表

序号	热量收入			热量支出			
	项 目	数值		项 目	数值		百分数
		10 ⁴ kJ	10 ⁴ kcal		10 ⁴ kJ	10 ⁴ kcal	
1	内燃料的燃烧反应热 Q_n			蒸发砖坯水分消耗的汽化潜热 Q_{ps}			
2	外燃料的燃烧反应热 Q_w			砖坯焙烧反应热 Q_{xy}			
3	外燃料带入的显热 Q_{ws}			输出热风的显热 Q_{rc}			
4	砖坯带入的显热 Q_b			烟气出窑热损失 Q_y			
5	窑车带入的显热 Q_c			砖出窑热损失 Q_z			
6				窑车出窑热损失 Q_{cc}			
7				固体不完全燃烧热损失 Q_{qo}			
8				气体不完全燃烧热损失 Q_{go}			
9				窑体表面散热损失 Q_w			
10				风机散热损失 Q_f			
11				其他热损失 Q_i			
12	合计		100	合计			100
有效热量 Q_{yx} , 10 ⁴ kJ(10 ⁴ kcal)				()			
热效率 η , %							

注: 上述各项收支热量均以一万块普通砖的质量为计算基数。

附录 A
符号说明
(补充件)

- A 以万块普通砖为计量单位的窑的小时产量;
- a 系数(用于换算燃料发热量);
- Al_2O_3 砖坯原料中氧化铝的含量, %;
- B 以万块普通砖为计量单位的每辆窑车装载量;
- c^f 分析基燃料含碳率, %;
- c_{hz} 灰渣含碳率, %;
- c_z 砖内残余含碳率, %;
- c_t 窑车中非金属耐火材料的比热, $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$;
- c_j 窑车金属材料的比热, $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$;
- c_n 内燃料的比热, $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$;
- c_{pl} 砖坯内原料的比热, $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$;
- c_{ps} 按照干坯温度与烟气温度的平均值确定的水蒸气的比热, $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$;
- c_w 外燃料的比热, $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$;
- c_z 砖的比热, $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$;
- $c'_{(CO_2)}$ 、 $c'_{(CO)}$ 、 $c'_{(N_2)}$ 、 $c'_{(O_2)}$ 、 $c'_{(H_2O)}$ 分别为二氧化碳, 一氧化碳, 氮, 氧和水蒸气的平均内容积比热, $kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$;
- c'_{grt} 干热风的平均容积比热, $kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$;
- c'_{gy} 干烟气的平均容积比热, $kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$;
- d_{bh} 气体的饱和绝对湿度, g/m^3 ;
- d_s 气体在出冷凝器温度下的饱和绝对湿度, g/m^3 ;
- d_t 实际温度下气体的绝对湿度, g/m^3 ;
- F_b 窑体总表面积, m^2 ;
- $F_{b1}, F_{b2}, F_{b3}, \dots, F_{bn}$ 分别表示各个测点所在矩形面的面积, m^2 ;
- F_d 管道横截面积, m^2 ;
- F_f 风机散热面积, m^2 ;
- g 重力加速度, m/s^2 ;
- H^t 分析煤样中氢含量, %;
- K 决定于散热面位置的对流传热系数;
- m_t 每辆窑车中非金属耐火材料的质量, kg ;
- m_z 生产一万块砖产生的灰渣量, kg ;
- m_{hzh} 灰渣试样灼烧后的质量, g ;
- m_{hzhq} 灰渣试样灼烧前的质量, g ;
- m_j 每辆窑车中金属材料的质量, kg ;
- m_n^s 每万块砖坯的内燃料(干燥基)掺配量, kg ;
- m_p 每万块砖坯的质量, kg ;
- m_{p1} 每万块砖坯中粘土质原料的质量, kg ;
- m_s 冷凝器中凝结出来的水量, g ;
- m_w^z 每万块砖坯外燃料(应用基)消耗量, kg ;

- m_z 每万块砖的质量, kg;
 n 测点数; 测定次数;
 $p_{d1}, p_{d2}, \dots, p_{dn}$ 管道横截面上各个测点的动压值, Pa;
 p_{dq} 大气压力, Pa;
 p_t 实际温度下气体的静压力, Pa;
 Q_{ba} 相应于每万块砖的窑体表面散热损失, kJ;
 $q_{bi1}, q_{bi2}, \dots, q_{bin}$ 分别表示第 i 次用热流计测得的名个测点的热流值, kJ/(m²·h);
 q_{bsi} 第 i 次测得的全窑表面平均散热流量, kJ/(m²·h);
 Q_{cc} 相应于每万块砖窑车带出的显热, kJ;
 Q_{cr} 相应于每万块砖窑车带入的显热, kJ;
 Q_{dr}^f 分析煤样弹筒发热量, kJ/kg[kcal/kg];
 Q_{dw}^f 分析煤样低位发热量, kJ/kg[kcal/kg];
 Q_{dw}^b 干燥基煤样低位发热量, kJ/kg[kcal/kg];
 Q_{GW}^f 分析基煤样高位发热量, kJ/kg[kcal/kg];
 Q_{gb} 相应于每万块砖的固体不完全燃烧热损失, kJ;
 Q_{gg} 烧成一万块砖坯供给隧道窑的热量, kJ;
 Q_{gs} 相应于每万块砖坯的风机散热损失, kJ;
 q_{si} 第 i 次测得的风机表面平均散热流量, kJ/(m²·h);
 Q_n 每万块砖内掺燃料的燃烧反应热, kJ;
 Q_{ndw}^b 内燃料干燥基低位发热量, kJ/kg;
 Q_o 每万块砖坯带入的显热, kJ;
 Q_{ps} 排除万块砖坯内水分消耗的显潜热, kJ;
 Q_{qs} 相应于每万块砖坯的气体不完全燃烧热损失, kJ;
 Q_{qb} 蒸发每万块砖坯水分消耗的汽化潜热, kJ;
 Q_{rc} 相应于每万块砖输出热风的显热, kJ;
 Q_t 烧成每万块砖的其他热损失, kJ;
 Q_w 每万块砖所消耗外燃料的燃烧反应热, kJ;
 Q_{wdw}^b 外燃料应用基低位发热量, kJ/kg;
 Q_{wx} 每万块砖所消耗外燃料带入的显热, kJ;
 Q_{xy} 每万块砖的焙烧反应热, kJ;
 Q_y 相应于每万块砖排出烟气的显热, kJ;
 Q_{yx} 烧成一万块砖所消耗的有效热量, kJ;
 Q_z 每万块砖带出窑外的显热, kJ;
 Q_{zz} 烧成每万块砖总支出热量, kJ;
 Q_{zs} 烧成每万块砖总收入热量, kJ;
 r 水在入窑砖坯平均温度下的汽化潜热, kJ/kg;
 $s_{(DT-LY)}^f$ 分析煤样的弹筒洗液硫与分析煤样的硫酸盐硫之差值;
 t_0 环境温度, °C;
 t 气体的实际温度, °C;
 t_{bi} 第 i 次测得的窑体表面温度, °C;
 $t_{bi1}, t_{bi2}, \dots, t_{bin}$ 分别表示第 i 次测得的各个测点的窑体表面温度, °C;
 t_{tc} 窑车出窑时非金属耐火材料的温度, °C;
 t_{tr} 窑车入窑时非金属耐火材料的温度, °C;

- $t_{\text{出}}$ 窑车出窑时金属材料的温度, $^{\circ}\text{C}$;
 $t_{\text{入}}$ 窑车入窑时金属材料的温度, $^{\circ}\text{C}$;
 t_{ki} 第 i 次测得的与测点相对应的空间温度, $^{\circ}\text{C}$;
 $t_{ki1}, t_{ki2}, \dots, t_{kin}$ 分别表示第 i 次测得的与各个测点相对应的空间温度, $^{\circ}\text{C}$;
 t_p 砖坯的平均温度, $^{\circ}\text{C}$;
 $t_{\text{热}}$ 热风的平均温度, $^{\circ}\text{C}$;
 t_w 外燃料的平均温度, $^{\circ}\text{C}$;
 t_y 烟气的平均温度, $^{\circ}\text{C}$;
 t_z 砖出窑时的平均温度, $^{\circ}\text{C}$;
 V_0 标准状态下气体的平均流量, m^3/h ;
 V^{I} 燃料分析基挥发分含量, %;
 V^{r} 燃料可燃基挥发分含量, %;
 $V_{\text{热}}$ 输出热风的流量, m^3/h ;
 V_s 通过流量计的气体体积, m^3 ;
 V_i 工作状态下气体的平均流量, m^3/h ;
 V_y 出窑烟气的流量, m^3/h ;
 W 气体的平均流速, m/s ;
 W^{I} 煤样分析基含水率, %;
 W_d 车下采取强制通风时的风速, m/s ;
 W_{sp} 干坯的残余含水率, %;
 W_w^{I} 外燃料应用基含水率, %;
 a_{bi} 第 i 次测得的窑体表面综合传热系数, $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$;
 $a_{bi1}, a_{bi2}, \dots, a_{bin}$ 分别表示第 i 次测得的各个测点的窑体表面综合传热系数, $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$;
 e 窑体表面黑度;
 η 热效率, %;
 φ 气体的相对湿度, %;
 ρ_0 标准状态下气体的密度, kg/m^3 ;
 ρ_i 工作状态下气体的密度, kg/m^3 ;
 $\rho_0(\text{CO}_2), \rho_0(\text{CO}), \rho_0(\text{N}_2), \rho_0(\text{O}_2), \rho_0(\text{H}_2\text{O})$ 分别为二氧化碳、一氧化碳、氮、氧和水蒸气在标准状态下的密度, kg/m^3 ;
 $\phi(\text{CO}_2), \phi(\text{CO}), \phi(\text{N}_2), \phi(\text{O}_2), \phi(\text{H}_2\text{O})$ 分别为被测气体中二氧化碳、一氧化碳、氮、氧和水蒸气的容积百分数, %;
 $\phi_{\text{热}}(\text{CO}_2), \phi_{\text{热}}(\text{CO}), \phi_{\text{热}}(\text{N}_2), \phi_{\text{热}}(\text{O}_2)$ 分别为干热风中二氧化碳、一氧化碳、氮和氧的容积百分数, %;
 $\phi_{\text{烟}}(\text{CO})$ 干烟气中一氧化碳的容积百分数, %;
 $\phi_{\text{热}}(\text{H}_2\text{O})$ 热风中水蒸气的容积百分数, %;
 $\phi_y(\text{H}_2\text{O})$ 烟气中水蒸气的容积百分数, %;
 $\phi(\text{H}_2\text{O})$ 气体中水蒸气容积百分数, %。

附录 B
记录、测定事项表
(补充件)

表 B1 窑的基本情况记录表

厂名						
窑名						
窑的历史及现状						
项目		单位	数值	备注		
产品	品种					
	规格型号(长×宽×高)		mm			
	与普通砖的体积折算比					
窑的基本情况	窑型	工艺类别		注明一次或二次码烧		
		窑拱角度				
	技术性	规格(长×宽×高)		m	窑高指车面至拱顶高度	
		有效横截面积		m ²		
		每条窑容车数				
		窑通道条数				
		窑车尺寸(长×宽×高)		m		
		烟囱	高度		m	
			出口横截面积		m ²	
	下底横截面积		m ²			
	排烟系统	风机	规格型号			
			风量	m ³ ·/h	标定值	
			全压	Pa	标定值	
			电机功率	kW		
	烟道	排烟口尺寸(宽×高)		m		
		排烟口数量				
		总烟道尺寸(宽×高)		m		
	抽送热风系统	热风总道尺寸(宽×高)		m		
		风机	风量	m ³ ·/h		
			全压	Pa		
			电机功率	kW		
			风机台数			
	窑体表面积	窑顶		m ²		
		窑墙		m ²		
其他						

表 B2 热平衡参数测定记录表

测定人员		负责人	参加人		
测定起止时间		自 年 月 日 时至 年 月 日 时 共计 小时			
测定项目		单位	测定数据		备注
外界条件	天气				注明晴、阴、雨天
	大气压力		Pa		
	环境温度	测定值	℃		
		平均值	℃		
粘土原料化学组成	SiO ₂		%		
	Al ₂ O ₃		%		
	Fe ₂ O ₃		%		
	CaO		%		
	MgO		%		
	K ₂ O		%		
	Na ₂ O		%		
	烧失量		%		
燃料	内燃料	种类			
		全水分含量		%	
		分析基组成	c'	%	
			W'	%	
			A'	%	
			V'	%	
		分析基弹筒发热量		kJ/kg	
		干燥基低位发热量		kJ/kg	
	每万块砖坯的掺配量(干燥基)		kg		
	外燃料	种类			
		全水分含量		%	
		分析基组成	c'	%	
			W'	%	
			A'	%	
V'			%		
分析基弹筒发热量		kJ/kg			
应用基低位发热量		kJ/kg			
每万块砖消耗量(应用基)		kg			
入窑时的温度		℃			

续表 B2

测定项目		单位	测定数据	备注	
灰渣	生产一万块砖产生的灰渣量	kg			
	含碳率	%			
烟气	温度	℃			
	内含水蒸气的容积百分数	%			
	流量	m ³ /h			
	成分	CO ₂	%		
		CO	%		
		O ₂	%		
		N ₂	%		
热风	温度	℃			
	内含水蒸气的容积百分数	%			
	流量	m ³ /h			
	成分	CO ₂	%		
		CO	%		
		O ₂	%		
		N ₂	%		
砖坯与砖	砖坯含水率	%			
	砖坯入窑时的温度	℃			
	万块砖坯的质量	kg			
	砖出窑时的温度	℃			
	万块砖的质量	kg			
	砖内残余碳率	%			
窑车	质量	金属材料	kg		
		非金属耐火材料	kg		
	入窑时的温度	金属材料	℃		
		非金属耐火材料	℃		
	出窑时的温度	金属材料	℃		
		非金属耐火材料	℃		

续表 B2

测定项目		单位	测定数据						备注
散 热	窑 体	测定次数		1	2	3			
		测点所在矩形面面积	m ²						
		测点表面温度	℃						
		对应的周围空间温度	℃						
		用热流计测得的散热流量	kJ/(m ² ·h)						
	风 机	测定次数						n	
		测点所在矩形面面积	m ²						
		测点表面温度	℃						
		对应的周围空间温度	℃						
		用热流计测得的散热流量	kJ/(m ² ·h)						
窑 的 操 作 特 性	各 带 长 度	焙烧周期	h						
		预热带	m						
		焙烧带	m						
	冷却带	m							
	每辆窑车装载量	万块							
	码窑密度	块/米 ³							
	火行速度	m/h							
	每条窑的产量	万块/小时							

附 录 C

燃料发热量的换算公式

(补充件)

C1 由分析基弹筒发热量换算为分析基高位发热量

$$Q_{\text{Gw}}^{\text{f}} = Q_{\text{br}}^{\text{f}} - 94.09 S^{\text{f}}(\text{DT} - \text{LY}) - aQ_{\text{br}}^{\text{f}} \quad \dots\dots\dots(\text{C1})$$

式中: Q_{Gw}^{f} ——分析煤样高位发热量, kJ/kg;

Q_{br}^{f} ——分析煤样弹筒发热量, kJ/kg;

a ——系数, 对贫煤、无烟煤、石煤和天然焦(包括人造焦, $a = 0.001$, 对其他煤种(包括油页岩) $a = 0.0015$;

$S_{(\text{DT-LY})}^{\text{f}}$ ——分析煤样的弹筒洗液硫, 减去分析煤样的硫酸盐硫。当干基煤的全硫含量 $S_{\text{g}}^{\text{f}} \leq 4\%$ 、 $Q_{\text{br}}^{\text{f}} > 1.46 \times 10^4$ kJ/kg 时, $S_{(\text{DT-LY})}^{\text{f}}$ 可用分析煤样全硫含量(S_{g}^{f})代替; 对于 $S_{\text{g}}^{\text{f}} > 4\%$ 或 $Q_{\text{br}}^{\text{f}} \leq 1.46 \times 10^4$ kJ/kg 的各种煤, $S_{(\text{DT-LY})}^{\text{f}}$ 可用弹筒洗液硫(S_{br}^{f}); 对硫酸盐硫(S_{LY}^{f})含量大于

或等于 0.5% 的煤样, 必须采用 $S_{(DT-LY)}^t$ 。

C2 由分析基高位发热量, 换算为分析基低位发热量

$$Q_{bw}^t = Q_{Gw}^t - 25(W^t + 9H^t) \quad \dots\dots\dots(C2)$$

式中: Q_{bw}^t ——分析煤样低位发热量, kJ/kg;

H^t ——分析煤样中氢含量, %。可由图 C1, 图 C2 查出 H^t , 再经过换算求得。

W^t ——分析基煤样中水分含量, %。

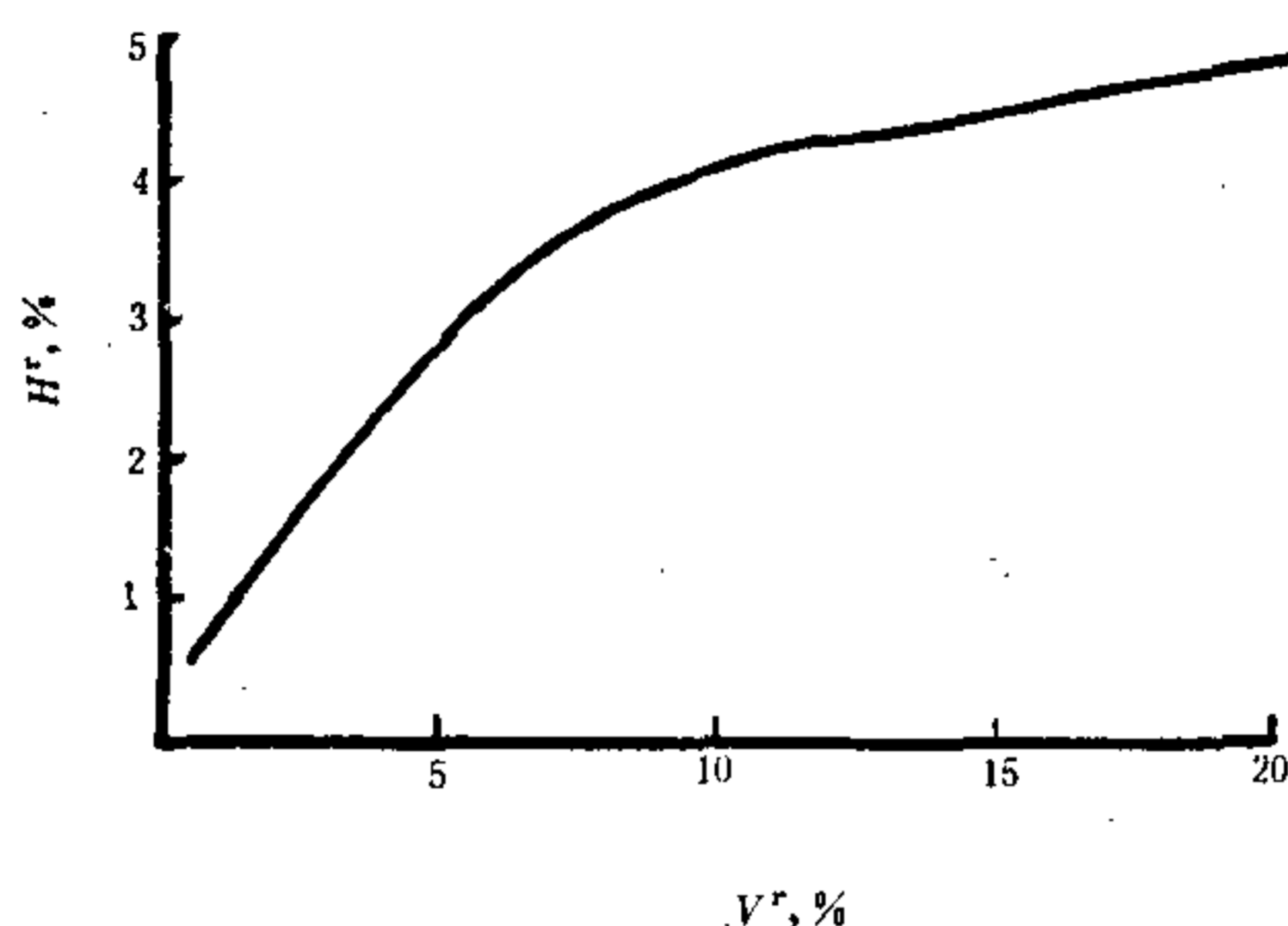


图 C1 煤的挥发分和氢含量曲线(用于 $V^t \leq 20\%$ 的煤)

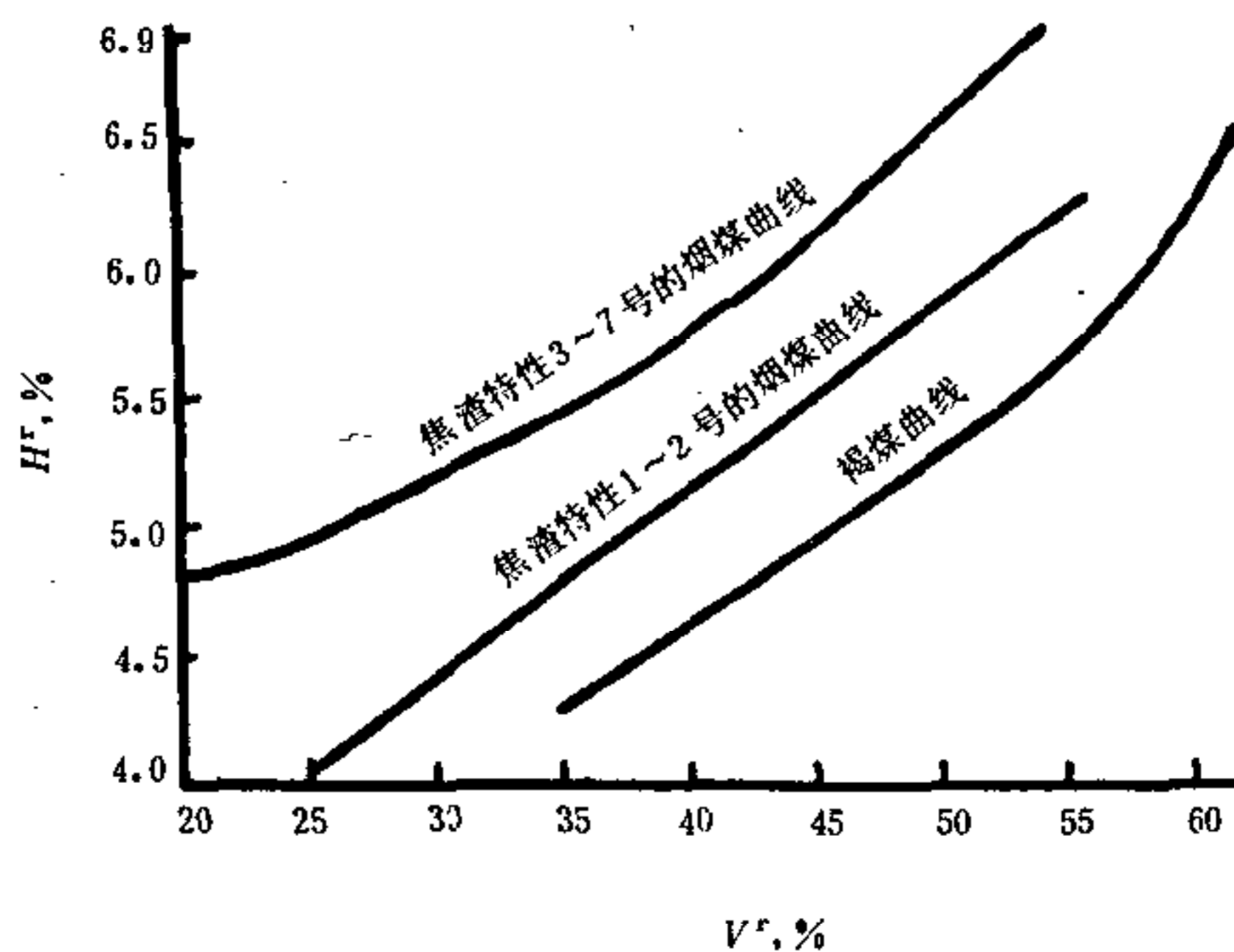


图 C2 煤的挥发分和氢含量曲线
(用于 $V^t > 20\%$ 的煤)

C3 由分析基低位发热量, 换算为干燥基低位发热量

$$Q_{bw}^t = (Q_{bw}^t + 25W^t) \times \frac{100}{100 - W^t} \quad \dots\dots\dots(C3)$$

式中: Q_{bw}^t ——干燥煤样低位发热量, kJ/kg。

附录 D
灰渣含碳率的确定方法
(补充件)

将现场所取得的灰渣试样粗碎后,用四分法缩分留取试样 50 g 左右,然后再将其粉碎至 0.2 mg(80 目),称取此样 1 ± 0.2 g(称准到 0.002 g),先放入预先灼烧,并称出质量(称准到 0.002 g)的长瓷碟中,再将此碟放入事先已经升到 $850 \pm 20^\circ\text{C}$ 的马弗炉中进行灼烧,灼烧 2 h 即可取出,放在石棉板上冷却 5 min 后,再移到干燥器中,冷却至室温(约 30 min),进行称样,然后再进行一次检查性试验,在同样条件下灼烧 30 min 即可。直到质量变化不大于 0.01 g 为止。

灰渣含碳率按式(D1)计算确定。

$$C_{\text{bz}} = \frac{m_{\text{bzq}} - m_{\text{bzh}}}{m_{\text{bzq}}} \times 100 \quad \dots\dots\dots(\text{D1})$$

式中: C_{bz} —— 灰渣含碳率,%;
 m_{bzq} —— 灰渣试样灼烧前的质量,g;
 m_{bzh} —— 灰渣试样灼烧后的质量,g。

附录 E
气体中水蒸气的容积百分数的计算方法
(补充件)

E1 根据干湿球温度计测量结果计算时:

$$\phi_{(\text{H}_2\text{O})} = \frac{d_{\text{bh}} \cdot \varphi}{804} \times \frac{273 + t}{273} \quad \dots\dots\dots(\text{E1})$$

式中: $\phi_{(\text{H}_2\text{O})}$ —— 气体中水蒸气的容积百分数,%;
 d_{bh} —— 气体的饱和和绝对湿度, g/m^3 根据干球温度查表确定;
 φ —— 气体的相对湿度, %。

E2 根据冷凝计测量结果计算时:

$$\phi_{(\text{H}_2\text{O})} = \frac{d_t}{8.04} \cdot \frac{273 + t}{273} \quad \dots\dots\dots(\text{E2})$$

式中: d_t —— 实际温度下气体的绝对湿度, g/m^3 , 按下式计算:

$$d_t = \frac{M_s + V_s \cdot d_s}{V_s} \quad \dots\dots\dots(\text{E3})$$

式中: M_s —— 冷凝器中凝结出来的水量,g;
 d_s —— 气体在出冷凝器温度下的饱和绝对湿度, g/m^3 , 见附录 E(参考件);
 V_s —— 通过流量计的气体体积, m^3 。

附录 F
各种管道测点的选择与气体流量的计算方法
(补充件)

F1 矩形截面管道测点的选择

在矩形截面管道内测定动压值时,必须把它的截面划分为若干个面积相等的小矩形。各小矩形对角

线的交点就是动压的测量点。如图 F1 所示,小矩形数量(测点排数)一般不应少于表 F1 中所列的数值。

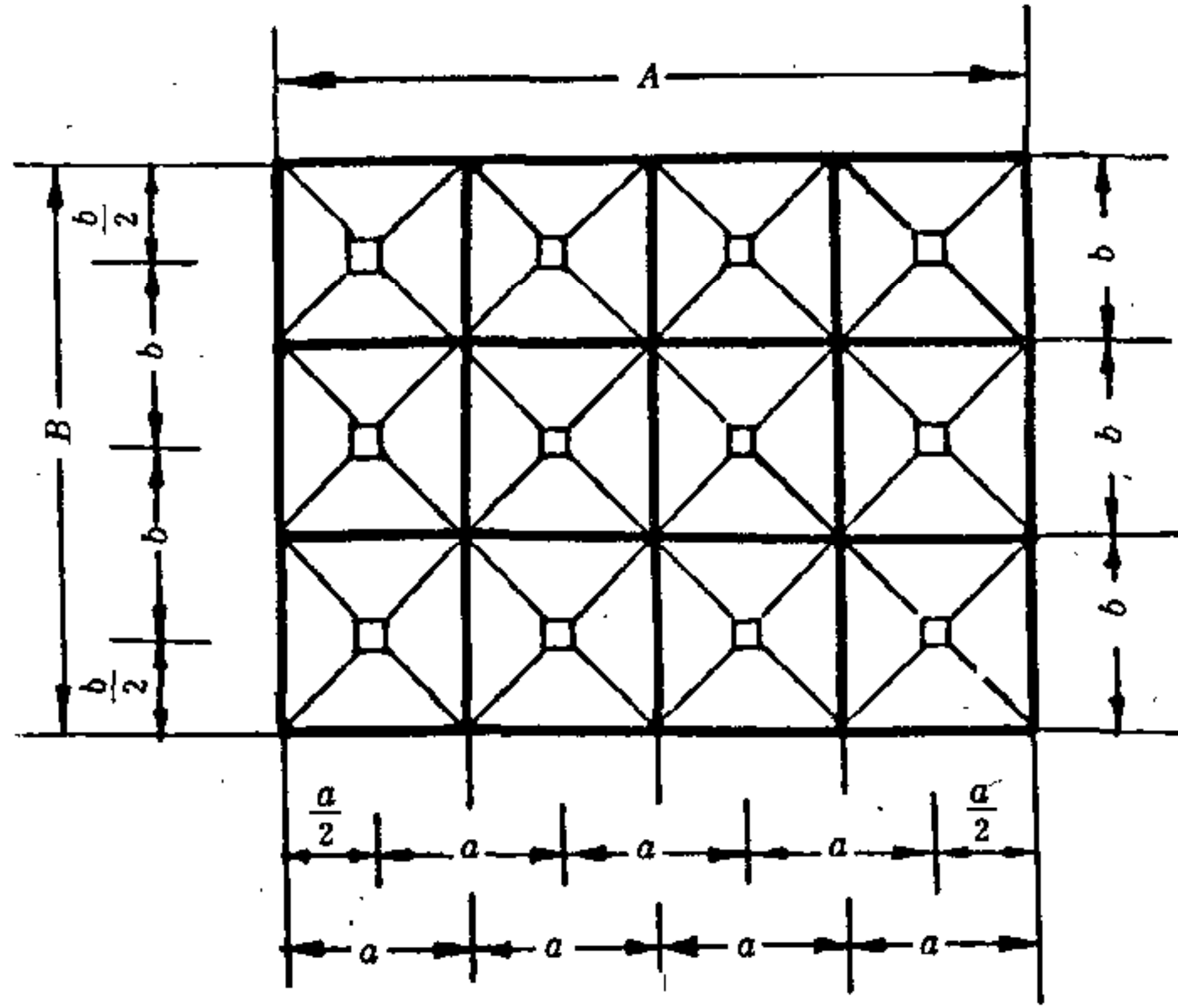


图 F1 矩形截面测点分布图

表 F1 矩形管道测点的确定

矩形管道截面边长, mm	≤ 500	500~1 000	1 000~1 500	1 500~2 000	2 000~2 500	$\geq 2 500$
测点排数	3	4	5	6	7	8

F2 圆形截面管道测点的选择

在圆形截面管道内测量动压值时,依管道的直径大小,把它分成若干面积相等的同心圆环。再画两条互相垂直的直径把圆环面积分成四个相等的部分。测点就放在这四个部分的分界线上,如图 F2 所示。

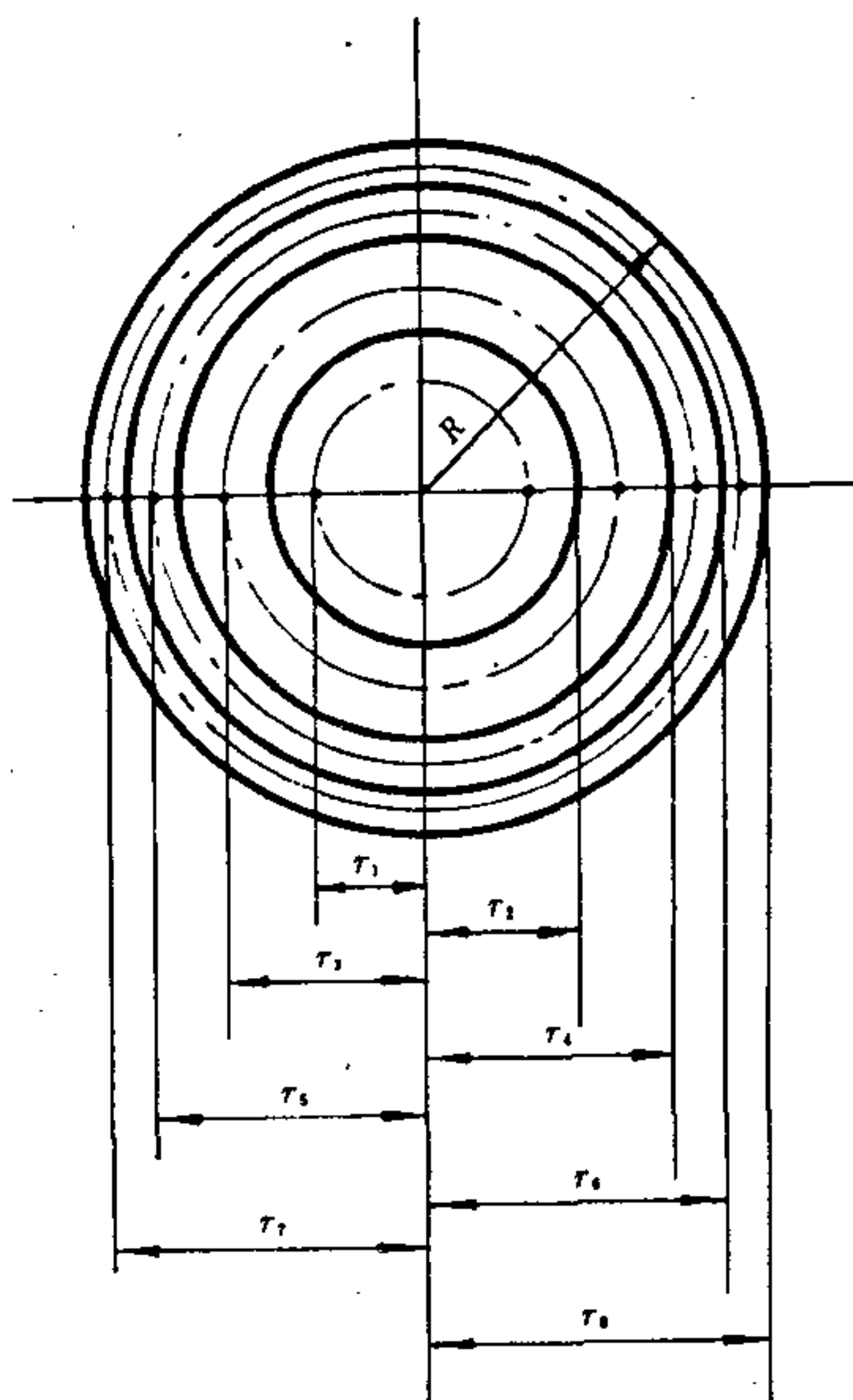


图 F2 圆形截面测点分布图

设管道内半径为 R ，将管道划分成几个相等的圆环，这些圆环周边的半径各为 $r_2, r_4, r_6 \dots$ 测点与管道中心的距离各为 $r_1, r_3, r_5 \dots$ 则可求得：

$$r_1 = R \sqrt{\frac{1}{2N}}$$

$$r_3 = R \sqrt{\frac{3}{2N}}$$

$$r_5 = R \sqrt{\frac{5}{2N}}$$

$$r_{2n-1} = R \sqrt{\frac{2N-1}{2N}}$$

式中： n ——等面积同心环的序号；

N ——等面积同心环的数目。

划分等面积圆环的数目和管道直径有关，一般不少于表 F2 中所列的数目。

表 F2 等面积圆环数与测量直径数

管道直径 D (mm)	300	400	600	800	1 000	1 200	1 400	1 600	1 800	2 000
等面积圆环数 N	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
测量直径数	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
测点总数	6	8	20	24	28	32	36	40	44	48

F3 气体平均流速的计算方法

$$W = \frac{1}{n} \sqrt{\frac{2}{\rho_t}} \cdot (\sqrt{p_{d1}} + \sqrt{p_{d2}} + \dots + \sqrt{p_{dn}}) \dots\dots\dots (F1)$$

式中: W —— 气体的平均流速, m/s;
 n —— 测点数;
 $p_{d1}, p_{d2}, \dots, p_{dn}$ —— 管道横截面上各测点的动压值, Pa;
 ρ_t —— 工作状态下的气体密度, kg/m³, 按下式计算:

$$\rho_t = \rho_0 \cdot \frac{273}{273 + t} \dots\dots\dots (F2)$$

式中: t —— 气体的实际温度, °C;
 ρ_0 —— 标准状态下的气体密度, kg/m³, 按下式计算:

$$\rho_0 = \phi_{(CO_2)} \cdot \rho_{0(CO_2)} + \phi_{(CO)} \cdot \rho_{0(CO)} + \phi_{(N_2)} \cdot \rho_{0(N_2)} + \phi_{(O_2)} \cdot \rho_{0(O_2)} + \phi_{(H_2O)} \cdot \rho_{0(H_2O)} \dots\dots\dots (F3)$$

式中: $\phi_{(CO_2)}, \phi_{(CO)}, \phi_{(N_2)}, \phi_{(O_2)}, \phi_{(H_2O)}$ —— 分别为被测气体中二氧化碳、一氧化碳、氮、氧和水蒸气的容积百分数, %;
 $\rho_{0(CO_2)}, \rho_{0(CO)}, \rho_{0(N_2)}, \rho_{0(O_2)}, \rho_{0(H_2O)}$ —— 分别为二氧化碳、一氧化碳、氮、氧和水蒸气在标准状态下的密度, kg/m³, 见附录 H(参考件)。

F4 气体平均流量的计算方法

$$V_t = 3\,600 F_d \cdot W \dots\dots\dots (F4)$$

式中: V_t —— 工作状态下气体的平均流量, m³/h;
 F_d —— 管道横截面积, m²。

$$V_0 = 3\,600 \cdot F_d \cdot W \cdot \frac{273}{273 + t} \cdot \frac{p_{dq} + p_t}{p_{dq}} \dots\dots\dots (F5)$$

式中: V_0 —— 标准状态下气体的平均流量, m³/h;
 p_{dq} —— 大气压力, Pa;
 p_t —— 工作状态下气体的静压力, Pa。

附 录 G

奥氏气体分析仪的使用方法
(参考件)

奥氏气体分析仪是利用化学吸收法,按容积测定气体成分的仪器。常用来分析气体中的二氧化碳、氧、一氧化碳、氮的容积百分含量。

G1 取样要求

一般烟道截面上,烟气成分的含量分布常是不均匀的。因此,插入烟道的取样管上要开一些均匀的

孔。如图 G1 所示。烟分析试样的抽取也可利用球胆、或排水取气等方法进行。

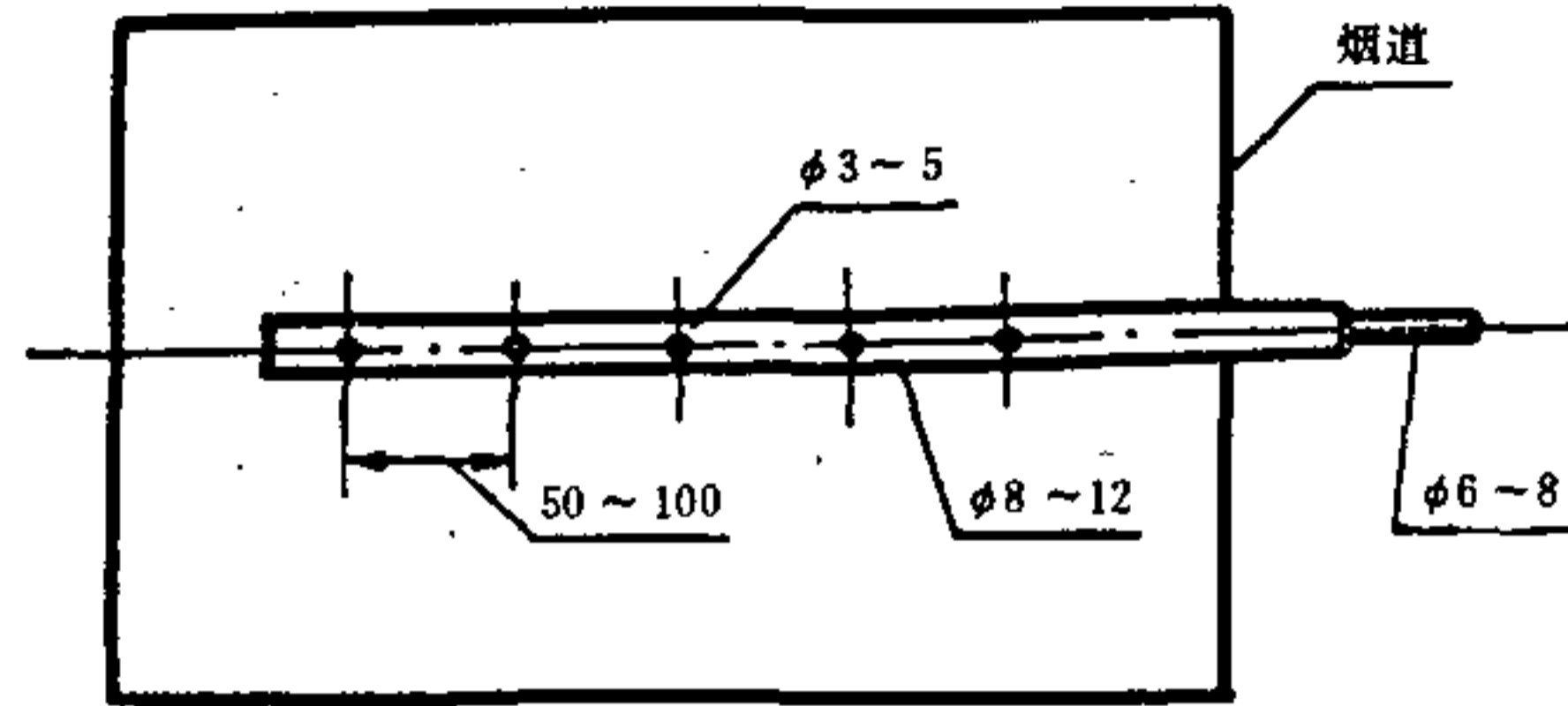


图 G1 取气管示意图

G2 吸收剂的配制方法

G2.1 二氧化碳吸收液

取 100 g 氢氧化钾溶于 200 mL 的蒸馏水中。

G2.2 氧吸收液

取 100 g 氢氧化钾溶于 130 mL 的蒸馏水中,另取 20 g 焦性没食子酸溶于 60 mL 蒸馏水中,将两者配成混合液,配成后立即装入棕色瓶内密封,以免与空气接触失效。

G2.3 一氧化碳吸收液

取 66 g 氯化铵和 54 g 氯化亚铜共溶于 100 mL 蒸馏水中,再加入该溶液体积 1/3 的氨水(25%)。

G2.4 封气液

在 5% 的硫酸溶液中加入氯化钠使之成为饱和溶液,然后加入甲基橙指示剂,使之呈微红色。

G3 奥氏气体分析仪使用要求

G3.1 为防止分析仪漏气,各旋塞接触面应涂凡士林油膏,各玻璃部件的连接应用弹性好的厚橡皮管。各玻璃旋塞应用橡皮筋拴紧。

G3.2 分析程序应为首先测定二氧化碳,次为氧。最后测定一氧化碳。

附录 H
各类数据表
(参考件)

表 H1 水在不同温度下的汽化潜热

温度 (°C)	汽化潜热 kJ/kg(kcal/kg)	温度 (°C)	汽化潜热 kJ/kg(kcal/kg)	温度 (°C)	汽化潜热 kJ/kg(kcal/kg)
0	2 501.6(597.5)	40	2 406.9(574.9)	80	2 308.8(551.5)
1	2 499.2(596.9)	41	2 404.5(574.3)	81	2 306.3(550.9)
2	2 496.8(596.4)	42	2 402.1(573.7)	82	2 303.8(550.3)
3	2 494.5(595.8)	43	2 399.7(573.3)	83	2 301.2(549.7)
4	2 492.1(595.3)	44	2 397.3(572.6)	84	2 298.7(549.1)
5	2 489.7(594.7)	45	2 394.9(572.0)	85	2 296.5(548.4)
6	2 487.4(594.1)	46	2 392.5(571.4)	86	2 293.1(547.8)
7	2 485.0(593.5)	47	2 390.1(570.9)	87	2 290.9(547.2)
8	2 482.6(593.0)	48	2 387.7(570.3)	88	2 288.4(546.6)
9	2 480.3(592.4)	49	2 385.3(569.7)	89	2 285.8(546.0)
10	2 477.9(591.8)	50	2 382.9(569.2)	90	2 283.2(545.3)
11	2 475.5(591.3)	51	2 380.5(568.6)	91	2 280.6(544.7)
12	2 473.2(590.7)	52	2 378.1(568.0)	92	2 278.0(544.1)
13	2 470.8(590.1)	53	2 375.7(567.4)	93	2 275.4(543.5)
14	2 468.5(589.6)	54	2 373.2(566.8)	94	2 272.8(542.8)
15	2 466.1(589.0)	55	2 370.8(566.3)	95	2 270.2(542.2)
16	2 463.8(588.5)	56	2 368.4(565.7)	96	2 267.5(541.6)
17	2 461.4(587.9)	57	2 365.9(565.1)	97	2 264.9(541.0)
18	2 459.0(587.3)	58	2 363.5(564.5)	98	2 262.2(540.8)
19	2 456.7(586.8)	59	2 361.1(563.9)	99	2 259.6(539.7)
20	2 454.3(586.2)	60	2 358.6(563.3)	100	2 256.9(539.1)
21	2 452.0(585.7)	61	2 356.2(562.8)	101	2 254.3(538.4)
22	2 449.6(585.1)	62	2 353.7(562.2)	102	2 251.6(537.8)
23	2 447.2(584.5)	63	2 351.3(563.6)	103	2 248.9(537.1)
24	2 444.9(584.0)	64	2 348.8(561.0)	104	2 246.3(536.5)
25	2 442.9(583.5)	65	2 346.3(560.4)	105	2 243.6(535.9)
26	2 440.2(582.8)	66	2 343.9(559.8)	106	2 240.9(535.2)
27	2 437.8(582.3)	67	2 341.4(559.2)	107	2 238.2(534.6)
28	2 435.4(581.7)	68	2 338.9(558.6)	108	2 235.4(533.9)
29	2 433.1(581.1)	69	2 336.4(558.7)	109	2 232.7(533.3)
30	2 430.7(580.6)	70	2 334.0(557.5)	110	2 230.0(532.6)
31	2 428.3(580.0)	71	2 331.5(556.9)	111	2 227.3(532.0)
32	2 425.9(579.4)	72	2 329.0(556.3)	112	2 224.5(531.3)
33	2 423.6(578.9)	73	2 326.5(555.7)	113	2 221.8(530.7)
34	2 421.2(578.3)	74	2 324.0(555.1)	114	2 219.0(530.0)
35	2 418.8(577.7)	75	2 321.5(554.5)	115	2 216.2(529.3)
36	2 416.4(577.1)	76	2 318.9(553.9)	116	2 213.4(528.7)
37	2 414.1(576.6)	77	2 316.4(553.3)	117	2 210.7(528.0)
38	2 411.7(576.0)	78	2 313.9(552.7)	118	2 207.9(527.3)
39	2 409.3(575.5)	79	2 311.4(552.1)	119	2 205.1(526.7)

表 H2 各种气体的平均定压比热(基准 0℃)

温度,℃	比热, kJ/m ³ ·℃								kJ/kg·℃ (kcal/ kg·℃)
	c _{CO₂}	c _{H₂}	c _{O₂}	c _{H₂O}	c _t	c _{CO}	c _{N₂}	c _{SO₂}	
0	1.618 (0.387)	1.275 (0.305)	1.305 (0.312)	1.497 (0.358)	1.300 (0.311)	1.300 (0.311)	1.300 (0.311)	1.731 (0.414)	1.857 0 (0.444 1)
100	1.714 (0.410)	1.292 (0.309)	1.317 (0.315)	1.505 (0.360)	1.305 (0.312)	1.300 (0.311)	1.300 (0.311)	1.811 (0.433)	1.872 1 (0.447 7)
200	1.798 (0.430)	1.296 (0.310)	1.334 (0.319)	1.522 (0.364)	1.309 (0.313)	1.305 (0.312)	1.305 (0.312)	1.886 (0.451)	1.891 3 (0.452 3)
300	1.869 (0.447)	1.300 (0.311)	1.355 (0.324)	1.539 (0.368)	1.321 (0.316)	1.317 (0.315)	1.313 (0.314)	1.953 (0.467)	1.916 8 (0.458 4)
400	1.936 (0.463)	1.300 (0.311)	1.380 (0.330)	1.564 (0.374)	1.334 (0.319)	1.330 (0.318)	1.321 (0.316)	2.016 (0.482)	1.945 3 (0.465 2)
500	1.995 (0.477)	1.305 (0.312)	1.397 (0.334)	1.589 (0.380)	1.346 (0.322)	1.342 (0.321)	1.334 (0.319)	2.066 (0.494)	1.975 4 (0.472 4)
600	2.049 (0.490)	1.309 (0.313)	1.418 (0.339)	1.614 (0.386)	1.363 (0.326)	1.359 (0.325)	1.346 (0.322)	2.112 (0.505)	2.006 3 (0.479 8)
700	2.095 (0.501)	1.313 (0.314)	1.434 (0.343)	1.639 (0.392)	1.376 (0.329)	1.372 (0.328)	1.359 (0.325)	2.149 (0.514)	2.039 4 (0.487 7)
800	2.141 (0.512)	1.317 (0.315)	1.451 (0.347)	1.664 (0.398)	1.388 (0.332)	1.388 (0.332)	1.372 (0.328)	2.179 (0.521)	2.027 8 (0.495 7)
900	2.179 (0.521)	1.321 (0.316)	1.464 (0.350)	1.694 (0.405)	1.401 (0.335)	1.401 (0.335)	1.384 (0.331)	2.212 (0.529)	2.106 7 (0.503 8)
1 000	2.212 (0.529)	1.330 (0.318)	1.476 (0.353)	1.723 (0.412)	1.413 (0.338)	1.413 (0.338)	1.397 (0.334)	2.233 (0.534)	2.141 0 (0.512 0)

注: 在使用 0℃ 为基准的平均比热表时, 其平均比热为: $c = \int_0^t c_p dt / t$, 因此在采用环境温度为准温度时, 其平均比热为: $c = (\int_0^t c_p dt - \int_0^{t_0} c_p dt) / (t - t_0)$, 但在这里为了简略起见而使用 0℃ 的基准去计算各种气体的平均定压比热。

表 H3 几种煤的平均比热 单位: kJ/(kg·℃) [kcal/(kg·℃)]

种类	平均比热	种类	平均比热	种类	平均比热
泥煤	1.338 [0.320]	气煤	1.263 [0.302]	无烟煤	0.836 [0.200]
褐煤	1.422 [0.340]	肥煤	1.213 [0.290]	煤渣	0.753 [0.180]
长焰煤	1.305 [0.312]	瘦煤	1.116 [0.267]	焦炭	0.836 [0.200]
粉煤灰	0.753 [0.180]	烟煤	1.305 [0.312]	木柴	1.380 [0.330]

表 H4 几种材料的平均比热 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ [$\text{kcal}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$]

物料名称	平均比热
钢筋混凝土	0.836[0.20]
建筑钢	0.46[0.11]
铸铁(生铁)	0.50[0.12]
粘土耐火砖	0.878[0.21]
粘土红砖	0.795[0.19]

表 H5 几种材料的黑度 ϵ

材料名称	黑度 ϵ	材料名称	黑度 ϵ
混凝土	0.63	铁板(已生锈)	0.67
红砖	0.93	铸铁(已氧化)	0.89
耐火粘土砖(新~旧)	0.71~0.85	抹灰砖砌物	0.94
钢板(有氧化层)	0.79		

表 H6 常用气体的密度

气体名称	化学式	密度, kg/m^3
空气(干)		1.293
氧	O_2	1.429
氮	N_2	1.25
氢	H_2	0.090
二氧化碳	CO_2	1.963
一氧化碳	CO	1.250
二氧化硫	SO_2	2.858
水蒸气	H_2O	0.804

表 H7 在 760 毫米汞柱压力下空气饱和时水蒸气压力和含量

温度 $^\circ\text{C}$	干空气密度	饱和水蒸气分压力 Pa	饱和时含湿量			
			$\frac{\text{g}}{\text{m}^3 \text{ 湿 气}}$	$\frac{\text{g}}{\text{m}^3 \text{ 干 气}}$	$\frac{\text{g}}{\text{m}^3 \text{ 湿 气}}$	$\frac{\text{g}}{\text{kg 干 气}}$
0	1.293	613.27	4.9	4.8	4.8	3.8
5	1.270	866.58	6.8	7.0	6.9	5.4
6	1.265	933.24	7.3	7.5	7.4	5.8
7	1.261	999.90	7.8	8.1	8.0	6.2
8	1.256	1 066.56	8.3	8.6	8.5	6.7
9	1.252	1 146.55	8.8	9.2	9.1	7.1
10	1.248	1 226.54	9.4	9.8	9.7	7.6
11	1.243	1 306.54	10.0	10.5	10.4	8.1
12	1.239	1 399.86	10.7	11.3	11.2	8.7

续表 H7

温度 ℃	干空气密度	饱和水蒸气分压力 Pa	饱和时含湿量			
			$\frac{g}{m^3}$ 湿气	$\frac{g}{m^3}$ 干气	$\frac{g}{m^3}$ 湿气	$\frac{g}{kg}$ 干气
13	1.235	1 493.18	11.4	12.1	11.9	9.3
14	1.230	1 599.84	12.1	12.9	12.7	9.9
15	1.226	1 706.50	12.8	13.7	13.5	10.6
16	1.222	1 813.15	13.6	14.7	14.4	11.3
17	1.217	1 933.14	14.5	15.7	15.4	12.1
18	1.213	2 066.46	15.4	16.7	16.4	12.9
19	1.209	2 199.78	16.3	17.9	17.5	13.8
20	1.205	2 333.10	17.3	18.9	18.5	14.6
21	1.201	2 493.08	18.3	20.3	19.8	15.6
22	1.197	2 639.74	19.4	21.5	20.9	16.6
23	1.193	2 813.05	20.6	22.9	22.3	17.7
24	1.189	2 986.37	21.8	24.4	23.1	18.8
25	1.185	3 173.02	23.0	26.0	25.2	20.0
26	1.181	3 359.66	24.4	27.5	26.6	21.2
27	1.177	3 559.64	25.8	29.3	28.2	22.6
28	1.173	3 772.96	27.2	31.1	29.9	24.0
29	1.169	3 999.60	28.7	33.0	31.7	25.5
30	1.165	4 239.58	30.4	35.1	33.6	27.0
31	1.161	4 492.88	32.0	37.3	36.6	28.7
32	1.157	4 759.52	33.9	39.6	37.7	30.4
33	1.154	5 026.16	35.6	41.9	39.9	32.3
34	1.150	5 319.47	37.5	44.5	42.2	34.2
35	1.146	5 626.10	39.6	47.3	44.6	36.4
36	1.142	5 946.07	40.5	50.1	47.1	38.6
37	1.139	6 279.37	43.9	53.1	49.8	40.9
38	1.135	6 626.00	46.2	56.3	52.6	43.4
39	1.132	6 985.97	48.5	59.5	55.4	45.9
40	1.128	7 372.60	51.1	63.1	58.5	48.6
41	1.124	7 772.56	53.6	66.8	61.6	51.2
42	1.121	8 199.18	56.5	70.8	65.0	54.3
43	1.117	8 639.14	59.2	74.9	68.6	57.6
44	1.114	9 105.76	62.3	79.3	72.2	61.0

续表 H7

温度 ℃	干空气密度	饱和水蒸气分压力 Pa	饱和时含湿量			
			$\frac{g}{m^3 \text{ 湿气}}$	$\frac{g}{m^3 \text{ 干气}}$	$\frac{g}{m^3 \text{ 湿气}}$	$\frac{g}{kg \text{ 干气}}$
45	1.110	9 585.71	65.4	80.4	76.0	64.8
46	1.107	10 092.32	68.6	89.0	80.0	68.6
47	1.103	10 612.27	71.8	94.1	84.3	72.7
48	1.100	11 158.88	75.3	99.5	88.6	76.9
49	1.096	11 732.16	79.0	105.3	93.1	81.5
50	1.093	12 345.43	83.0	111	97.9	86.1
51	1.090	12 958.70	86.7	118	103	91.3
52	1.086	13 611.97	90.9	125	108	96.6
53	1.083	14 291.90	95.0	132	113	102
54	1.080	14 998.50	99.5	139	119	108
55	1.076	15 731.76	104.3	148	125	114
56	1.073	16 505.02	108	156	131	121
57	1.070	17 304.94	113	165	137	128
58	1.067	18 144.85	119	175	144	135
59	1.063	19 011.43	124	185	151	143
60	1.060	19 918.01	130	196	158	152
61	1.057	20 851.25	136	209	166	161
62	1.054	21 837.82	142	222	174	170
63	1.051	22 851.05	148	235	182	181
64	1.048	23 904.28	154	249	190	192
65	1.044	24 997.50	161	265	199	204
66	1.041	26 144.05	168	281	208	215
67	1.038	27 330.60	175	299	218	239
68	1.035	28 557.14	182	318	228	244
69	1.032	29 823.68	190	338	238	259
70	1.029	31 156.88	198	361	249	275
75	1.014	38 542.81	242	499	308	381
80	1.000	47 341.93	293	716	379	544
85	0.986	57 807.55	353	1 092	463	824
90	0.973	70 099.66	423	1 877	563	1 395
95	0.959	84 511.55	504	4 381	679	3 110
100	0.947	101 323.20	579	∞	816	8 000

附加说明：

本标准由国家建筑材料工业局西安砖瓦研究所提出并归口。

本标准由国家建筑材料工业局西安砖瓦研究所负责起草。

本标准主要起草人罗韬毅。

(京)新登字 023 号

JC 428—91

中 华 人 民 共 和 国
行 业 标 准
砖瓦工业隧道窑热平衡、热效率
测 定 与 计 算 方 法

JC 428—91

*

中国标准出版社出版
(北京复外三里河)

中国标准出版社北京印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
版权专有 不得翻印

*

开本 880×1230 1/16 印张 2 字数 55 000
1991 年 12 月第一版 1991 年 12 月第一次印刷
印数 1—1 800

*

*

标 目 176—43