

热载体密度: $\rho = 1\ 700\ \text{kg}/\text{m}^3$, 不凝气产率 25%, 碳产率 15%。
原料低位发热值 $Q_{DW不}^Y = 6\ 354\ \text{kJ}/\text{kg}$, $Q_{DW碳}^Y = 20\ 000\ \text{kJ}/\text{kg}$,
 $Q_{DW秸}^Y = 4\ 462\ \text{kJ}/\text{kg}$ 。燃料燃烧效率 95%, 燃烧器效率 95%。
进热载体口温度 $300\ ^\circ\text{C}$, 进主反应器热载体温度 $580\ ^\circ\text{C}$ 。

3.1.2 能量计算。主反应器内生物质反应能耗小于 1 MJ/kg, 即 1 kg 生物质裂解变混合油蒸气所需热量小于 1 MJ, 取安全系数 $\alpha = 1.1$ 。在主反应器内反应的生物质量为 772 kg/h, 可得裂解生物质能耗: $Q_{裂} = 849.2\ \text{MJ}/\text{h}$ 。

热平衡公式:

$$Q_{总} = Q_{热载体吸热} + Q_{烟损} + Q_{损} \quad (1)$$

式中: $Q_{总}$ 为每小时加热装置燃烧原料提供的总热量, MJ/h; $Q_{热载体吸热}$ 为每小时热载体在加热装置内吸热量, MJ/h; $Q_{烟损}$ 为每小时加热装置排烟热损失, MJ/h; $Q_{损}$ 为每小时加热装置热损失, MJ/h。

热量计算公式:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta t \quad (2)$$

代入相应参数, 根据公式(1)和(2)可计算得 $Q_{热载体吸热} = 2\ 169\ \text{MJ}/\text{h}$, $Q_{烟损} = 1\ 140\ \text{MJ}/\text{h}$, $Q_{损} = 145.15\ \text{MJ}/\text{h}$, $Q_{总} = 3\ 454.15\ \text{MJ}/\text{h}$ 。

3.1.3 原料用量计算。

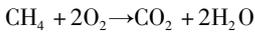
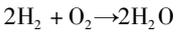
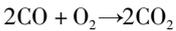
3.1.3.1 计算 1 kg 不凝气燃烧数据^[1]。不凝气各成分体积百分比中 CO_2 为 35%, CO 为 40%, H_2 为 10%, CH_4 为 15%。

标况密度公式:

$$\rho_0 = \frac{1}{22.4} (M_1 X_1 + M_2 X_2 + \dots + M_n X_n) \quad (3)$$

式中, ρ_0 为标况下不凝气密度, kg/m^3 ; M_1, M_2, \dots, M_n 分别为各种气体成分的相对分子量; X_1, X_2, \dots, X_n 分别为各种气体成分的体积百分比。由此可得标况下不凝气密度 $\rho_0 = 1.303\ 6\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。1 kg 不凝气各成分质量: $m_{\text{CO}_2} = 0.530\ 6\ \text{kg}$, $m_{\text{CO}} = 0.383\ 5\ \text{kg}$, $m_{\text{H}_2} = 0.007\ 1\ \text{kg}$, $m_{\text{CH}_4} = 0.082\ 5\ \text{kg}$ 。

燃烧反应方程式:



根据燃烧过程分析可知产物为: $\text{CO}_2, \text{N}_2, \text{H}_2\text{O}$ 。

根据燃烧反应方程式, 代入相应数据可计算得标况下理论烟气体积: $V_Y^0 = 2.597\ 3\ \text{m}^3$ 。

标况下实际烟气体积公式^[2]:

$$V_Y = V_Y^0 + (1 + 0.001\ 61d)(\alpha - 1)V_k^0 \quad (4)$$

式中, V_Y 为标况下实际烟气体积, m^3 ; V_Y^0 为标况下理论烟气体积, m^3 ; d 为干空气中水蒸气含量, 取 $d = 10\ \text{g}/\text{kg}$; α 为过量空气系数, 取 $\alpha = 1.1$; V_k^0 为理论空气量, m^3 。代入相应数据, 可计算得 $V_{Y不} = 2.802\ 5\ \text{m}^3$ 。同理, 可得 1 kg 碳粉燃烧产生标况下实际烟气体积 $V_{Y碳} = 9.933\ \text{m}^3$ 。

3.1.3.2 计算 1 kg 秸秆气燃烧数据。秸秆气各成分体积百分比^[3]中 CO 为 21.4%, H_2 为 12.2%; CH_4 为 1.87%, CO_2 为 13%, O_2 为 1.65%, N_2 为 49.88%。根据公式(3)可求得标况下秸秆气密度 $\rho_0 = 1.194\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。

根据公式(4)可得 1 kg 秸秆气燃烧产生标况下实际烟气体积 $V_{Y秸} = 1.513\ 6\ \text{m}^3$ 。

3.1.3.3 秸秆气用量计算。将产生的不凝气和碳作为原料全部燃烧掉, 设每小时需要补充 $m_{\text{秸}}\ \text{kg}$ 秸秆气。

热平衡方程:

$$(Q_{DW不}^Y \cdot m_{不} + Q_{DW碳}^Y \cdot m_{碳} + Q_{DW秸}^Y \cdot m_{秸}) \times \eta_1 \times \eta_2 = Q_{热载体吸热} + Q_{烟损} + Q_{损} \quad (5)$$

式中: $Q_{DW不}^Y, Q_{DW碳}^Y, Q_{DW秸}^Y$ 为不凝气、碳、秸秆气低位发热值, kJ/kg ; $m_{不}, m_{碳}, m_{秸}$ 为每小时燃烧不凝气、碳、秸秆气质量, kg/h ; η_1, η_2 为燃料燃烧效率、燃烧器效率。将“3.1.1”和“3.1.2”相应数据代入公式(5), 可求得 $m_{\text{秸}} = 143$, 即每小时需要补充燃烧秸秆气 143 kg, 以维持热载体加热循环系统热平衡。

3.2 结构设计

3.2.1 上炉体结构设计。烟道入口截面积计算公式^[4]:

$$F = \frac{V}{\omega} \quad (6)$$

式中, F 为烟道入口截面积, m^2 ; V 为烟道入口流量, m^3/s ; ω 为烟气流速, m/s 。带入数据, 得 $V = 1.816\ 0\ \text{m}^3/\text{s}$, 考虑金属管道机械引风, 选取 $\omega = 13\ \text{m}/\text{s}$, 可求得 $F = 0.14\ \text{m}^2$ 。烟道入口半径公式:

$$d = 2\sqrt{\frac{F}{\pi}} \quad (7)$$

式中, d 为烟道入口半径, m 。带入数据, 可求得 $d = 0.422\ \text{m}$ 。

烟管数量计算公式:

$$\eta_{\text{管}} = \frac{4F}{\pi \cdot \varphi^2} \quad (8)$$

式中, $\eta_{\text{管}}$ 为烟管数量, 根; φ 为烟管内径, mm 。带入数据, 可求得 $\eta_{\text{管}} \approx 245$ (根)。

多层圆筒壁导热公式^[5]:

$$\Phi = \frac{\Delta t}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2\pi\lambda_i l_{\text{管}}} \cdot \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}} \quad (9)$$

式中, Φ 为单根管热流量, J ; Δt 为平均温差, $^\circ\text{C}$; λ_i 为各种导热介质的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; $l_{\text{管}}$ 为导热管长, m ; d_i 为各圆筒半径, m 。将管阵的导热等效成两层圆筒壁导热模型, 取 $n = 2$ 。

则公式(9)可转化成:

$$\Phi = \frac{\Delta t}{\frac{1}{2\pi\lambda_1 l_{\text{管}}} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\pi\lambda_2 l_{\text{管}}} \cdot \frac{d_3}{d_2}} \quad (10)$$

由公式(10)可推导管长公式:

$$l_{\text{管}} = \frac{\Phi \cdot \left(\frac{\ln \frac{d_2}{d_1}}{\lambda_1} + \frac{\ln \frac{d_3}{d_2}}{\lambda_2} \right)}{2\pi \cdot \Delta t} \quad (11)$$

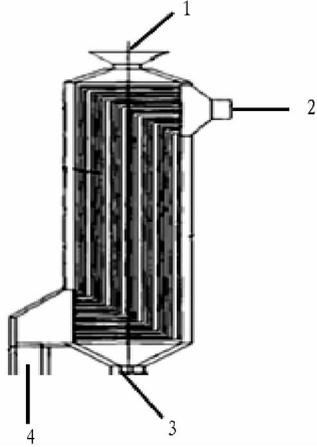
带入相应数据, 可求得 $l_{\text{管}} = 3.8\ \text{m}$ 。

考虑导热效果, 选用外径为 $\phi 32\ \text{mm}$, 壁厚为 $2.5\ \text{mm}$, 长度为 $3.8\ \text{m}$ 的标准不锈钢管作为烟管。相临各管间接正三

角形排列,取烟管中心距 $d_0 = 52 \text{ mm}$, 构成 $900 \times 891 \text{ mm}^2$ 的管阵横截面,取上炉体内胆横截面为正方形,边长 $r_{\text{上}} = 1 \text{ m}$ 。

考虑热载体储存情况以及热载体循环过程中始终保持覆盖烟管,有 $0.7l_{\text{炉}} + r = l_{\text{管}}$, 得上炉体高度: $l_{\text{上炉}} = 4 \text{ m}$ 。上炉体内壁选用 10 mm 厚钢板,外壁选用 5 mm 厚的钢板。

选用耐高温锡纸裹于炉体内胆,防辐射热。选用硅酸铝保温棉填充保温层,燃烧室各侧内壁进行耐火处理,添加耐火层,选用耐火水泥和耐火砖。



注:1. 进热载体口;2. 出烟口;3. 出热载体口;4. 进烟口。

图2 上炉体示意图

3.2.2 上炉体换热量验算。经判断有: $T_1 - T_2 > t_2 - t_1$, 有 $W_{\text{hceph}} < W_{\text{cph}}$, 所以烟气为最小值流体。

传热效率公式:

$$\varepsilon = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - t_1} \quad (12)$$

式中, ε 为上炉体传热效率; T_1 为上炉体进烟口温度, $^{\circ}\text{C}$; T_2 为上炉体出烟口处温度, $^{\circ}\text{C}$; t_1 为上炉体进热载体口温度, $^{\circ}\text{C}$ 。 t_2 为上炉体出热载体口温度, $^{\circ}\text{C}$ 。参数选取: $t_1 = 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_2 = 360 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varepsilon = 85\%$, $t_2 = 500 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 结构示意图如图2所示。将公式(12)带入相应数据,可求得 $T_1 = 700 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

根据公式(11),有上炉体管阵热流量公式:

$$Q_{\text{管阵}} = \frac{2\pi n_{\text{管}} l_{\text{管}} \cdot \Delta t}{\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) + \frac{\ln\left(\frac{d_3}{d_2}\right)}{\lambda_2}} \quad (13)$$

带入相应数据,可求得 $Q_{\text{管阵}} = 483.7 \text{ kW}$ 。根据公式(2)带入相应数据,可求得 $Q_{\text{热载体吸热上}} = 430 \text{ kW}$ 。经比较,有 $Q_{\text{管阵}} > Q_{\text{热载体吸热上}}$, 所以上炉体设计符合要求。

3.2.3 下炉体结构设计。下炉体设计成圆柱形,根据经验选取下炉体内置斜板倾角为 35° ,选取长 1.5 m ,厚 3 mm 的钢板,取3回合。

通过理论计算与CAD绘图,可确定以下主要参数:下炉体高度: $l_{\text{下炉}} = 7 \text{ m}$;下炉体内胆截面直径: $r_{\text{下}} = 1 \text{ m}$;下炉体内胆体积 $V_{\text{下}} = 5.50 \text{ m}^3$,下炉体底端两侧(方向成 90°)设置燃烧室,燃烧室高度 $h_{\text{燃烧室}} = 0.5 \text{ m}$ 。

试验测得,热载体流经下炉体所用时间 $t \approx 5 \text{ s}$ 。

炉膛截面计算公式:

$$F = \frac{Q_{\text{燃总}}}{q_a} \quad (14)$$

式中, F 为炉膛截面积, m^2 ; $Q_{\text{燃总}}$ 为燃料每秒提供总热量, kW ; q_a 为炉膛的截面热负荷, kW/m^2 。已知每小时燃烧不凝气量 $m_{\text{不}} = 173.7 \text{ kg}$,每小时燃烧碳粉量 $m_{\text{碳}} = 104.22 \text{ kg}$,每小时燃烧秸秆气量 $m_{\text{秸}} = 143 \text{ kg}$,根据公式(5)可以求得燃料提供热量 $Q_{\text{燃总}} = 959 \text{ kW}$ 。

选取下炉体炉膛的截面热负荷 $q_a = 3000 \text{ kW}/\text{m}^2$,下炉体炉膛的体积热负荷 $q_v = 320 \text{ kW}/\text{m}^3$ 。

带入相应数据,可求得 $F = 0.339 \text{ m}^2$ 。

炉膛内径计算公式:

$$r_{\text{下}} = 2\sqrt{\frac{F}{\pi}} \quad (15)$$

式中, $r_{\text{下}}$ 为下炉体内胆直径, m 。带入相应数据,可求得 $r_{\text{下}} = 0.66 \text{ m}$ 。

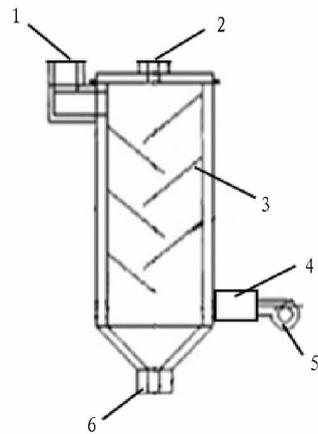
炉膛体积计算公式:

$$V_{\text{下}} = \frac{Q_{\text{燃总}}}{q_v} \quad (16)$$

式中, $V_{\text{下}}$ 为炉膛体积, m^3 ; q_v 为炉膛的体积热负荷, kW/m^3 。

带入相应数据,可求得 $V_{\text{下}} = 3.109 \text{ m}^3$ 。

经比较,有 $r_{\text{下}} > r_{\text{下}}, V_{\text{下}} > V_{\text{下}}$,所以下炉体设计(见图3)符合要求。



注:1. 出烟口;2. 进热载体口;3. 斜板;4. 燃烧室;5. 燃烧机;6. 出热载体口。

图3 下炉体示意图

4 热能利用率检测试验

同一天分3个时间段进行采样,共计3组采样数据,按均值计算。

$$\bar{x} = \frac{\sum(x_1 + x_2 + \dots + x_n)}{n} \quad (17)$$

取 $n = 3$,进行检测与计算。

热能利用率计算公式:

$$\eta = \frac{\text{观测时段热载体吸收总热量}}{\text{观测时段燃料提供总热量}} \times 100\% \quad (18)$$

每组采样观测时段均为 20 min ,共3组,将表1中检测

数据带入公式(18)。

表 1 串联复合式热载体加热装置检测报告

采样时段	采样时间	下炉体出口热载体温度//℃	上炉体入口热载体温度//℃	热载体流速//kg/s	20 min 热载体流量//kg	20 min 秸秆用量//kg	20 min 燃气消耗量//m ³	20 min 燃气总热量//MJ
1	9:10	552	211	0.833	1 000	49.43	98.86	454.76
	9:20	555	214	0.833				
	9:30	556	219	0.833				
2	13:30	554	213	0.833	1 000	49.32	98.63	453.71
	13:40	560	220	0.833				
	13:50	558	218	0.833				
3	15:10	550	211	0.833	1 000	49.24	98.47	452.96
	15:20	553	214	0.833				
	15:30	548	209	0.833				

第 1 组: $Q_{\text{热载体吸热1}} = 340.75 \text{ MJ}$, $\eta_1 = 74.93\%$ 。

第 2 组: $Q_{\text{热载体吸热2}} = 341.42 \text{ MJ}$, $\eta_2 = 75.25\%$ 。

第 3 组: $Q_{\text{热载体吸热3}} = 340.08 \text{ MJ}$, $\eta_3 = 75.08\%$ 。

将数据带入公式(17), 串联复合式热载体加热装置平均热能利用率为 $\bar{\eta} = 75.09\%$ 。

通过计算可知, 串联复合式热载体加热装置热能利用率可以达到 75.25%, 平均热能利用率为 75.09%, 满足生物质热解制油工艺要求。

5 结论

热载体加热有多种方式, 热载体加热装置的合理设计决

定了生物质热解制油工艺的实施。该研究的设计是将热载体的两种不同加热方式串联复合使用, 以期提高装置的热能利用率, 有利于实现生物质热解制油规模化生产。

参考文献

- [1] 汪军. 工程燃烧学[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 50-73.
- [2] 刘联胜. 燃烧理论与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 86.
- [3] 袁振宏, 吴创之, 马隆龙. 生物质能利用原理与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 175.
- [4] 赵明泉. 锅炉结构与设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 1998: 217-223.
- [5] 陈敏恒, 丛德滋, 方图南, 等. 化工原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000: 263-271.

(上接第 12655 页)

程对应的流域总降水与水文站峰值流量大小有较好的相关关系, 峰值流量在强降水开始 1~2 d 后出现, 而第 3 次暴雨过程期间总降水与流量大小的相关性不明显。因此, 流域总降水是水文站流量趋势预测的有效参数, 但要进行更精细的流量预测, 还需要在高分辨降水估计基础上对流域做进一步的划分和降水空时分布分型研究。

4 结论

(1) 2011 年西安世园会陕西 3 次暴雨过程期间, 流域总降水估计与影响地区灾害风险定量分析表明, 汉中地区灾情明显严重于其他地区, 这与汉江上游降水明显、流域总降水大直接相关。汉江上游流域是陕南灾害预警防控的重点地区, 流域内过程总降水明显增大是引发陕南多种次生灾害的主要因素。汉江上游和汉江下游流域同时出现较大总降水时, 由于上游强降水对下游山洪等灾害的重叠效应和下游水情对上游自然排洪能力的影响, 汉江流域灾情将会有所加重。

(2) 短时强降水频次明显增加时灾情风险随之增大, 降水随时间的不均匀性和突发性也是引发灾害的重要因素。暴雨灾害要从过程总降水和降水时间分布 2 个方面出发进行分析评估。

(3) 基于雷达和气象自动站高分辨资料的降水联合估计方法依据天气系统的时空连续性, 利用邻近降水实况信息自适应地调节待估网格单元的降水反演参数, 估计性能优于常系数和分段最优方法。结合空间网格划分, 高分辨资料降水

联合估计得到的流域总降水是相关地区水文流量趋势预测的有效参数。

参考文献

- [1] 杜继稳. 降雨型地质灾害预报预警——以黄土高原和秦巴山区为例[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [2] 刘传正, 温铭生, 唐灿. 中国地质灾害气象预警初步研究[J]. 地质通报, 2004, 23(4): 304-309.
- [3] 岳建伟, 王斌, 刘国华, 等. 地质灾害预警预报及信息管理系统应用研究[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(6): 60-63.
- [4] 陈守煜, 李庆国, 李敏. 基于模糊优选神经网络与 GIS 结合的流域面雨量预测方法[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(2): 163-166.
- [5] 张雅斌, 杜继稳, 蔡蕊, 等. 陕西省精细化地质灾害气象预报预警研究[J]. 灾害学, 2011, 26(3): 28-34.
- [6] 陆桂华, 吴娟, 吴志勇. 水文集合预报试验及其研究进展[J]. 水科学进展, 2012, 23(5): 728-732.
- [7] 刘家福, 梁雨华, 马国斌. 基于 GIS 的淮河流域洪水灾害综合风险评估[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(5): 2510-2511.
- [8] 徐晶, 姚学祥. 流域面雨量估算技术综述[J]. 气象, 2007, 33(7): 15-20.
- [9] 王志, 赵琳娜, 张国平, 等. 汶川地震灾区堰塞湖流域面雨量计算方法研究[J]. 气象, 2010, 36(6): 7-12.
- [10] 姚燕飞, 程明虎, 杨洪平, 等. 优化 ZI 关系及其在淮河流域面雨量测量中的应用[J]. 气象, 2007, 33(6): 37-43.
- [11] 祝新建, 臧新洲. 河南省获嘉县气象灾害风险评估系统研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(26): 12873-12875.
- [12] 张雅斌. 基于加密探测资料的流域面雨量估计与水情预测方法研究[C]//第 28 届中国气象学会年会. 厦门, 2011.
- [13] 俞小鼎, 姚秀萍, 熊延南, 等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 221-225.
- [14] 袁艺, 王玉玲. 近 30 年我国自然灾害灾情时间分布特征分析[J]. 灾害学, 2011, 26(3): 61-64.
- [15] 赵飞, 廖永丰, 张妮娜, 等. 登陆中国台风灾害损失评估模型研究[J]. 灾害学, 2011, 26(2): 81-85.
- [16] 李良序, 罗慧. 陕西省气象暨 2011 西安世界园艺博览会气象服务评估报告[M]. 北京: 气象出版社, 2012: 84-86.