

用热管换热器回收密闭式畜禽舍冬季换气中的余热^①

袁小艳^② 李保明 俞宏军

(中国农业大学水利与土木工程学院)

摘 要 首次将热管换热器用于回收密闭式畜禽舍冬季换气中的余热。对热管换热器作了传热设计计算,对给定工况进行了优化参数选定。根据设计参数而安装调试的热管换热器在实际运行中实测值略高于计算值,说明设计计算是合理的。热管换热器具有热效率高、节能等优点,有一定的推广价值。

关键词 热管换热器; 余热回收; 畜禽舍

分类号 S 828.4/831.4

Application of Thermal Pipe Heat-Exchangers in Recovery of Waste Heat in Closed Poultry Housing in Winter

Yuan Xiaoyan Li Baoming Yu Hongjun

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, CAU)

Abstract It is the first time that the heat pipe heat-exchangers are applied in the recovery of waste heat in closed-poultry housing in winter. The calculation and optimum design of heat transfer of the thermal pipe heat-exchangers are put forward. The practical parameters are superior to the theoretical ones, proving that the calculation and design are reasonable. The thermal pipe heat-exchangers can be used to recover the waste heat in closed-poultry housing for its high efficiency and energy-saving.

Key words heat pipe heat-exchanger; recovery of waste heat; poultry housing

我国北方地区密闭式鸡舍冬季舍内空气质量恶化,需要通风换气,其结果使舍内气温降低,导致蛋鸡舍在冬季的生产性能下降 5%~10%^[1];因此回收舍内排出废气的余热以提高舍温,对改善鸡舍环境,节能、节省饲料,进一步实现鸡舍环境的良好调控有重要意义。热管是一种高效传热元件,具有传热效率高、阻力小、结构紧凑、运行周期长等特点。与其他方式的余热回收装置相比,热管换热器的每根热管都是一个独立的传热元件,容易更换、维修和清洗,没有运动部件,可靠性高,因而具有较好的应用优势^[2]。国内自 70 年代初以来,热管换热器在能源转换及利用领域已得到普遍应用,80 年代中期至今,在低温余热回收装置中的应用也有了一定的发展,但北方冬季畜禽舍废气余热回收采用热管换热器装置还未见报道。笔者首次将此种高效换热元件应用到畜禽舍余热回收装置中,进行了传热优化计算并作了实验与理论比较,期望热管换热装置能在冬季畜禽舍环境调控中收到较好的效果。

收稿日期:1998-12-03

①国家“九五”重点攻关项目

②袁小艳,北京清华东路 17 号 中国农业大学(东校区)67 信箱,100083

1 热管换热器本体的设计计算

1.1 基本原理

换热器为氨-铝热管。通风换气排出的热废气流过换热器加热端翅片管束,将热量传给热管内工质(工作液为氨)。液体蒸发(沸腾)生成蒸汽,在压力差作用下流向冷却段,并在此过程中将热量通过热管传给逆向流过管束的冷风后重新凝结为液体,在毛细管力或重力作用下,凝结液流回热端,再进行新的蒸发凝结循环。这样,利用热管作为热传输元件,将排风的余热传给进入舍内的新鲜空气,使新鲜冷空气的温度提高,有效地解决了畜禽舍冬季通风与保温的矛盾。

与板式换热器相比,热管换热器有如下特点:

1)热管内蒸发凝结换热系数很高,管内传热热阻很小。换热器总热阻主要来自气流与管束间的换热,因而增加适当的翅片数,根据实际工况计算选择合理的热管根数和翅片尺寸、管间距等参数是目前减少热阻、增强换热效果的主要方法;

2)冷热端气流用中隔板隔开,避免了废气对新空气的混合污染;

3)每根热管完全独立,便于维修和清洗;

4)翅化后的换热器更紧凑。

1.2 设计条件

本设计以北京地区蛋鸡舍为例,据文献[1]的测试结果,取如下设计条件及要求:废气进口温度 $t_{hi}=15\text{ }^{\circ}\text{C}$,新空气入口温度 $t_{ci}=-5\text{ }^{\circ}\text{C}$,废气排风量 $G_h=6\ 000\ \text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$,新空气进风量 $G_c=6\ 000\ \text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$,允许压降 $147\ \text{Pa}<\Delta p<343\ \text{Pa}$ 。

根据设计要求选择氨-铝圆翅片热管,其几何尺寸如下:管外径 $D_o=0.024\ \text{m}$,管内径 $D_i=0.02\ \text{m}$,翅片外径 $D_t=0.05\ \text{m}$,翅片间距 $s=0.0025\ \text{m}$,翅片厚度 $\delta=0.0003\ \text{m}$,翅片高度 $t_t=0.013\ \text{m}$,每根热管长 $l=1.5\ \text{m}$,冷凝端管长 $l_c=0.73\ \text{m}$,加热端管长 $l_h=0.73\ \text{m}$,管横向中心距 $L_1=2.5D_o=0.06\ \text{m}$,管纵向中心距 $L_2=L_1=0.06\ \text{m}$ 。

通过如下传热计算,欲求在总热管根数 n 一定(设定 $78<n<82$)、气流横向流经热管管束时其压降满足 $147\ \text{Pa}<\Delta p<343\ \text{Pa}$ 、达到可能的最大温度效率 η_h 的条件下,优化热管安装的横向及纵向间距 L_1 及 L_2 ,得出合理的横向热管排数 n_1 ,纵深向热管排数 n_2 ,并对风机进行选型。

1.3 传热计算

$$\eta_h = (t_{ci} - t_{co})(t_{hi} - t_{ci})^{-1}$$

$$\Delta t = [(t_{hi} - t_{co}) - (t_{ho} - t_{ci})] \{ \ln [(t_{hi} - t_{co})(t_{ho} - t_{co})^{-1}] \}^{-1}$$

式中: η_h 、 Δt 分别为热效率和对数平均温差; t_{ci} 、 t_{co} 为新空气入口和出口温度; t_{hi} 、 t_{ho} 为废气入口和出口温度。

以热气流加热端管外总表面积 A_h 为基准,传热系数为

$$K_h = \left(\frac{1}{h_h} + \frac{A_h}{2\pi n \lambda_w l_h} \ln \frac{D_o}{D_i} + \frac{A_h}{A_{hi} h_{ci}} + \frac{A_h}{A_{ci} h_{ci}} + \frac{A_h}{2\pi n \lambda_w l_c} \ln \frac{D_o}{D_i} + \frac{A_h}{A_c h_c} + R_c + R_h \right)^{-1} \quad (1)$$

如对称安装,即 $l_h=l_c$ 则

$$K_h = \left[\frac{1}{h_h} + \frac{A_h}{\pi n \lambda_w l_h} \ln \frac{D_o}{D_i} + \frac{A_h}{A_{hi}} \left(\frac{1}{h_{hi}} + \frac{1}{h_{ci}} \right) + \frac{A_h}{A_c h_c} + R_c + R_h \right]^{-1} \quad (2)$$

式中: h_h, h_c 为热、冷端管束与气流的对流换热系数, $W(m^2 \cdot ^\circ C)^{-1}$; h_{hi}, h_{ci} 为热、冷端管内放热系数, $W(m^2 \cdot ^\circ C)^{-1}$; A_{hi}, A_{ci} 为热、冷端管内放热面积, m^2 ; A_h, A_c 为热、冷端管外总表面积, m^2 ; λ_w 为铝管的导热系数, $W(m \cdot ^\circ C)^{-1}$; R_h, R_c 为热、冷端污垢热阻, 设计计算中暂不考虑; n 为热管总根数, $n = n_1 n_2$ (待求)。

式(1)或(2)中未知项 h_h, h_c 由以下式(3)及(4)计算求得(略去下标)。

当 $L_1/D_o = 2 \sim 3, s/t_f = 0.3 \sim 0.45, Re = 5 \times 10^3 \sim 5 \times 10^4$ 时, 有

$$h = h_0 (\eta_f A_f + A_{fr}) (A_f + A_{fr})^{-1} \quad (3)$$

式中: η_f 为翅片效率; h 为气流通过翅片管束的换热系数, $W(m^2 \cdot ^\circ C)^{-1}$; h_0 为 $\eta_f = 100\%$ 的换热系数, $W(m^2 \cdot ^\circ C)^{-1}$; A_f 为翅片表面积, m^2 ; A_{fr} 为热管上无翅片部分的表面积, m^2 。

$$h_0 = 0.1887 \lambda_f D_o^{-1} (0.8 + 0.1 L_1 D_o^{-1}) Re^{0.685} Pr^{0.33} (st^{-1})^{0.304} \quad (4)$$

式中: Re 为以 D_o 为定性尺寸的雷诺数; Pr 为气流普朗特数; λ_f 为气流的导热系数, $W(m \cdot ^\circ C)^{-1}$ 。

对于氨-铝热管, 其热、冷端管内放热系数可分别取 $h_{hi} = 5 \text{ kW}(m^2 \cdot ^\circ C)^{-1}, h_{ci} = 7.5 \text{ kW}(m^2 \cdot ^\circ C)^{-1}$, 则热流量为 $\Phi = AK\Delta t = nA_h K_h \Delta t$, 因此 $n = n_1 n_2 = \Phi (A_h K_h \Delta t)^{-1}$ 。

气流流经热管束的压降由下式计算:

$$\Delta p = n_2 f_r \rho v^2 g^{-1}$$

式中: f_r 为阻力系数, $f_r = 371.3 Re^{-0.316} (L_1 D_o^{-1})^{-0.927} (L_1 L_2^{-1})^{-0.515}$; ρ 为气体密度, $kg \cdot m^{-3}$; g 为重力加速度; v 为气流横向冲刷管束的流速, $m \cdot s^{-1}, v = G_h A_m / 3600$, 其中 A_m 为气体流通面积, m^2 。

现对换热器安装尺寸 L_1, L_2 及 n_1, n_2 进行优化, 其优化条件据文献[1]得

$$147 \text{ Pa} < \Delta p < 343 \text{ Pa}, 78 < n < 82$$

编程计算得最佳参数:

$$L_1 = 0.0053 \text{ m}, n_1 = 10; L_2 = 0.0053 \text{ m}, n_2 = 8.$$

选定风机类型为北京风机厂生产的 JO₂₂₂ 型。

2 结果及分析

按上述优化计算尺寸, 改变气体流量, 可得热流量 Φ 和压差 Δp 与气流量 G_h 和 G_c 的关系曲线。图 1(a) 表明, 在热管排数一定的条件下, 热效率随气流量的增加而降低, 如要保证较高

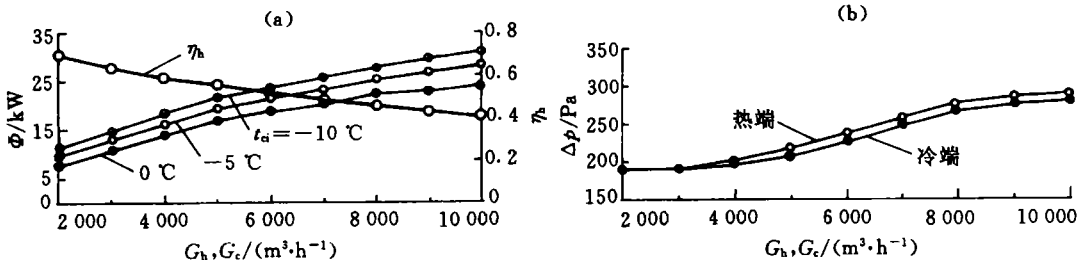


图 1 气流量 G_h, G_c 与热流量 Φ 和温度效率 η_h (a) 及与压差 Δp (b) 的关系

的热效率,则需对气流量加以限制。从经济角度考虑,对热管总数为80的换热器,宜选风量 $4\,000\sim 6\,000\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$,即可避免热效率过低($<50\%$),又不至于使热管数相对过多而不经济。图1(b)表明,过大的风量导致阻力较大,风机耗电量过大,噪声大而影响鸡群的正常生长。

1997年冬季对换热器按设计参数进行安装调试实验。实测数据如下:热空气排风量和冷空气进风量均为 $5\,700\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$,热空气进口温度为 $15.3\text{ }^\circ\text{C}$,冷空气进口温度为 $-4.9\text{ }^\circ\text{C}$ 。以此数据代入计算式得计算值。实测值与计算值的比较见表1。可以看出,冷空气出口温度的实测值比计算值略高,证明理论计算方法及参数选定是正确的。实测值与计算值有差异,原因是理论计算中未考虑热湿废气通过换热器时受冷凝结释放的潜热,以及存在实验误差等。

表1 热管换热器性能参数对比

对比值	热空气			冷空气			回收 热流量/ kW	$\Delta p/\text{Pa}$	
	排风量/ $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$	温度/ $^\circ\text{C}$		进风量/ $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$	温度/ $^\circ\text{C}$			热端	冷端
		进口	出口		进口	出口			
实测值	5 700	15.3	4.5	5 700	-4.9	6.0	21.2		
计算值	5 700	15.3	5.2	5 700	-4.9	5.6	20.9	284	274

3 结 论

将低温热管换热器用于国内工厂化畜禽舍换气余热回收中尚属首次。将按本设计计算选定的热管换热器用于冬季畜禽舍余热回收,实测结果进入舍内的新鲜空气的温度及回收热流量高于计算值,证明本设计是合理的。此热管换热器的热效率可达 $50\%\sim 65\%$,从而节约能源,节省饲料,提高产蛋率。与其他方式的换热设备相比,热管换热器还具有拆洗容易、维修方便的优点。

参 考 文 献

- 1 俞宏军,李保明,施正香,等.北京密闭式商品蛋鸡舍冬季环境研究(初报).农业工程学报,1997,13(增刊),68~72
- 2 陈沛霖,岳孝方,秦慧敏,等编.空调与制冷技术手册.上海:同济大学出版社,1990.465~469