

真空管太阳能空气集热系统阻力特性实验研究

任晓帅^{2,3}, 王登甲^{1,2}, 刘艳峰^{1,2}, 丁奎²

(1. 西部绿色建筑国家重点实验室, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 建筑设备科学与工程学院, 陕西 西安 710055;
3. 中冶京诚工程技术有限公司, 北京 102600)

摘要: 通过理论分析明确了真空管太阳能空气集热系统中集热器、管道以及局部构件阻力影响因素, 进而利用实验手段, 研究了不同太阳辐射强度、集热工质温度、质量流量作用下, 真空管太阳能空气集热器、输配管道及弯头阻力变化规律, 结果表明, 稳定状态下, 空气集热器压降随太阳辐射强度增大呈正向增大趋势, 集热器阻抗系数与压降有相似变化趋势; 而管道当量局部阻力系数与弯头局部阻力系数随流体温度升高呈对数增长趋势。对集热系统阻力单位化后发现, 集热器压降占系统总压降比例约为 86%~93%, 输配系统(单位管长、单个局部弯头)约占 7%~14%。归纳给出系统阻力简化计算公式, 可计算不同组真空管太阳能空气集热器、不同输配长度条件下的阻力。

关键词: 太阳能; 空气集热器; 阻力特性; 设计参数

中图分类号: TU83

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)01-0142-07

Experimental study on resistance characteristics of evacuated tube solar air heating system

REN Xiaoshuai^{2,3}, WANG Dengjia^{1,2}, LIU Yanfeng^{1,2}, DING Kui²

(1. State Key Laboratory of Green Building in Western China, Xi'an 710055, China;
2. School of Building Services Science and Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech.,
Xi'an 710055, China; 3. Capital Engineering & Research Incorporation Limited, Beijing 102600, China)

Abstract: Through theoretical analysis, the influencing factors of collector, pipeline and local component resistance in evacuated tube solar air collector system were clarified. Then, by means of experiments, the variation laws of collector, transmission and distribution pipeline and elbow resistance under different solar radiation intensities, collector working fluid temperatures and mass flow rates were studied. The results showed that under stable conditions, the pressure drop of air collector increased positively with the increase of solar radiation intensity, and the impedance coefficient of collector had a similar trend with the pressure drop, while the equivalent local resistance coefficient of the pipeline and the local resistance coefficient of the elbow increases logarithmically with the increase of fluid temperature. After unitizing the resistance of the collector system, it was found that the collector pressure drop accounted for about 86%~93% of the total pressure drop of the system, and the transmission and distribution system (unit pipe length, single local elbow) accounted for about 7%~14%. The simplified calculation formula of system resistance was summarized, which could calculate the resistance of solar air collectors with different groups of evacuated tubes and different transmission and distribution lengths.

Key words: solar energy; solar air collector; resistance characteristic; design parameter

相比于太阳能热水集热系统, 太阳能空气集热系统具有不易冻裂过热、系统操作和维修简单等优点^[1]。与平板型空气集热器对比, 真空管太阳能空气集热器又具有热损失小、集热性能好的特点, 在节约能源方面可起到非常积极的作用^[2]。因此, 真空管太阳能空气集热系统适用于维修不便、要求安

全可靠的乡村地区, 尤其是太阳能资源丰富的青海、西藏等高原乡村地区。关于太阳能集热器阻力特性的研究, 主要集中于太阳热水集热器。诸多学者进行了关于太阳能热水集热器流量分布和热特性的研究, Federico Bava 等^[3]提出了计算 U 型流动结构太阳能集热器在等温条件下的压降和流量分布的 Mat-

收稿日期: 2021-04-03

修改稿日期: 2022-01-20

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51676468, 51878532); 陕西省杰出青年基金项目(2020JC-43)

第一作者: 任晓帅(1995—), 男, 硕士, 主要研究方向为太阳能供暖与建筑热环境。E-mail: rxsl3293375591@163.com

通信作者: 王登甲(1984—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为太阳能供暖与建筑热环境。E-mail: wangdengjia@xauat.edu.cn

lab 数值模型; 王兴安等^[4]建立热水系统等温流动离散数学模型, 模拟得到集箱静压分布和集热器支管流量分布; 胡明辅等^[5]建立了新的太阳能热水系统流量分布模型, 提出改进算法, 并对计算结果进行误差分析; 侯宏娟^[6]建立了槽式太阳集热器的传热流动数学模型, 通过 Fluent 模拟和实验测试的方法研究其传热、流动性能。

太阳能热水系统与热风系统有较大差异, 首先, 受温度变化, 热水与热风物性及阻力变化特征呈现相反的变化趋势; 其次由于空气热容小, 吸收太阳辐射热量后空气温度物性变化剧烈, 流动过程与热力过程更为复杂, 传统的稳态阻力特性变化规律难以对其进行描述。因此, 本文以实验的方法分析入口温度、质量流量等参数对系统阻力的影响, 得出系统各部分阻力变化规律, 对比得出集热系统各部分阻力占比情况, 为真空管太阳能空气集热系统工程阻力设计选型提供参考。

1 集热系统阻力理论分析

1.1 集热系统阻力

集热系统阻力包括集热器阻力、管道沿程阻力、系统局部阻力, 以真空管式太阳能空气系统为例, 原理图如图 1 所示, 集热系统阻力表达式为

$$\Delta P_z = \Delta P_g + \Delta P_c + \Delta P_j \quad (1)$$

式中: ΔP_z 为集热系统总阻力; ΔP_g 为管道沿程阻力; ΔP_c 为集热器阻力; ΔP_j 为局部阻力。

由于介质为空气, 忽略重力的影响, 依据流体力学能量方程, 集热系统总阻力可表示为

$$\Delta P_z = P_{in} - P_{out} + \frac{1}{2}(\rho_{out} v_{out}^2 - \rho_{in} v_{in}^2) \quad (2)$$

式中: P_{in} 为集热系统进口压力; P_{out} 为集热系统出口压力; ρ_{in} 为集热系统进口工质密度; ρ_{out} 为集热系统出口工质密度; v_{in} 为集热场系统进口流速; v_{out} 为集热系统出口流速。

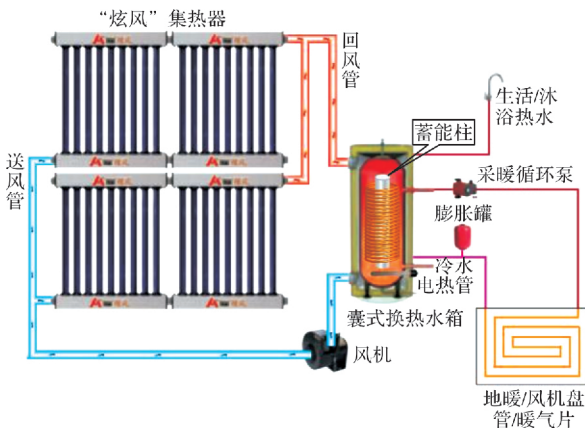


图 1 真空管太阳能空气集热系统图

Fig. 1 Operation schematic diagram of vacuum tube solar air heating system

1.2 集热器阻力

应用流体力学理论^[7], 将集热管串并联类比管网系统, 在某一流动状态下, 集热管的阻力特性、压降和流量的表达关系表示为

$$\Delta P_i = S_i Q_i^2 \quad (3)$$

其中: ΔP_i 为第 i 根集热管阻力; S_i 为第 i 根集热管阻抗; Q_i 为第 i 根集热管流量;

由上式可知, 影响集热器阻力的主要因素为阻抗和流量, 其中阻抗可表示为

$$S_i = \frac{8(\lambda_i \frac{l_i}{d_i} + \sum \xi) \rho}{\pi^2 d_i^4} \quad (4)$$

影响集热器阻抗的因素为: 摩擦阻力系数 λ , 管段长度 l , 直径(或当量直径) d , 局部阻力系数 ξ , 流体密度 ρ , 当集热器结构确定时, 最终影响集热器阻抗的因素为流体温度和流量。

根据实验求得单组集热器阻抗, 应用于多组集热器串并联设计时, 同样可将各组集热器类比为集热管, 根据单组集热器阻抗理论计算集热阵列压降。

1.3 管道沿程阻力

依据流体力学理论, 流体管道沿程阻力方程为

$$\Delta P_{cf} = \lambda \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2} \quad (5)$$

$$\text{连续性方程为 } Q = \rho \frac{\pi}{4} D^2 V \quad (6)$$

式中: λ 为此处沿程阻力系数; V 为管道流速; L 为等径风管道长度; D 为管道内径; ρ 为管道内对应温度下流体密度; Q 为管道质量流量; 沿程阻力系数 λ 由流态和管壁粗糙度决定, 流态可通过雷诺数 Re 的值进行区分:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (7)$$

式中, μ 为动力粘度系数, 根据文献调研^[8], 其经验公式为

$$\mu = (-4 \times 10^{-6} t^2 + 4.81 \times 10^{-2} t + 17.2) \times 10^{-6} \quad (8)$$

根据理论气体状态方程可得气体密度公式为

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (9)$$

空气密度通过干空气热物性参数表拟合得到:

$$\rho = 0.00295 + 1.29 \frac{271.43}{271.43 + t} \quad (10)$$

实验均在紊流下进行, $Re < 10^5$, 当 $4000 < Re < 10^5$ 时, 流态处于紊流光滑区, 沿程阻力系数仅与雷诺数有关, 可由布拉休斯公式计算:

$$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad (11)$$

1.4 集热系统构件局部阻力

根据流体力学知识, 和文献^[9]研究, 局部阻

力是流体流经局部构件(如弯头、三通、阀门等)时,由于流速分布和流动方向迅速改变造成的.局部阻力可按式(12)进行计算.

$$\Delta P_j = \xi \frac{\rho v^2}{2} \tag{12}$$

式中: ξ 为局部阻力系数.

根据上述对组成真空管太阳能空气集热系统的集热器、管道沿程阻力、系统局部阻力分析,影响集热系统的关键因素为集热工质温度和流量.将通过实验对系统各因素下阻力特性进行分析.

2 实验测试分析

为研究太阳能空气集热系统阻力特性,在西部绿色建筑国家重点实验室搭建集热系统阻力测试实验系统,在不同条件下进行单组集热器组成的真空管太阳能空气集热系统实验测试,太阳能空气集热器阻力特性实验原理及现场测试图如图2所示.

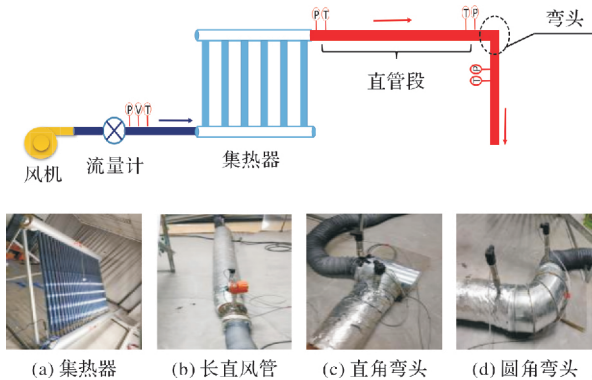


图2 真空管太阳能空气集热系统阻力特性实验测试系统

Fig. 2 Experimental schematic diagram of resistance characteristics of vacuum tube solar air heating system

阻力特性实验系统包括集热部分与热量运输管道部分.在集热部分,受太阳模拟器照射,集热工质温度不断升高,工质密度与黏度均发生改变,集热部分装置包括风机、集热器和太阳模拟发射器;热量运输部分包括热风管道、直角弯头、圆角弯头;测试设备包括压力变送器、温度传感器、万象风速仪和数据采集仪.

集热器阻力测试分三类情况,太阳辐射强度分别为600、700和800 W/m²;通过调节太阳模拟器发光灯管辐射强度,将平行于真空管太阳能空气集热器的太阳辐射调整到相应值.

实验开始前,仅开启风机,将真空管太阳能空气集热器内空气排空,检查各设备运行状况,确保设备正常运行,实验开始,开启太阳模拟器主机柜,调节灯管辐射强度使其满足测试太阳辐射强度要求.在《太阳能供热采暖工程技术标准》^[10]中太阳能空气集热器单位面积流量推荐值为36 m³/(h·m²),经计算,该集热器推荐流量值

175 m³/h,选择三挡风机,风量最大额定值为408 m³/h.

集热系统各部分参数、测试仪器灵敏度、测试工况分别见表1、表2、表3.

测点布置及说明:

万象风速仪:根据文献研究^[11],流体紊流光滑区和粗糙区发生平均流速的位置在0.777倍管道半径处,通过测距方法将探头放置于此,测定管道平均流速.

压力变送器:垂直放置于距集热器、管道、弯头进出口处两倍管道直径处.

温度传感器:探头放置于集热器进出口、管道和弯头进口中心处.

表1 集热系统各部分参数

Tab. 1 Parameters of each part of the heating system

构件名称	尺寸参数
集热器	集热器长2.23 m,总面积4.86 m ² ,采光面积2.92 m ² ,上下联箱直径0.2 m(内径115 mm);集热管(光管)受照射部分长1.68 m,总长1.8 m;集热管下端进口孔径10 mm,管内径47 mm,外径58 mm,相邻管中心间距75 mm,集热管数量30根.
风管	内径115 mm,长3 m.
弯头	90°直角弯头与圆角弯头各1个.

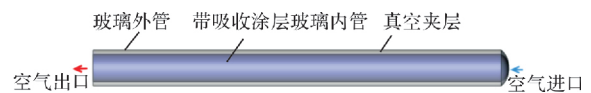


图3 真空管太阳能空气集热管

Fig. 3 Vacuum tube solar air collector tube

表2 测试仪器及精度

Tab. 2 Test instrument and accuracy

测试仪器	量程	精度
压力变送器 SKE-131	-500~2 000 Pa	±0.5%
温度传感器 K 型	-100~1 300 °C	±0.75%
万象风速仪 WWFWZY-1 型	0.05~30 m/s	±0.01~0.02
流量计 LUGB-DN65	8 000 Nm ³ /h	1.5%
游标卡尺 SJ-455530	0~300 mm	±0.02

表3 管道和局部构件测试工况

Tab. 3 Test conditions of pipeline and local components

构件名称	测温范围/°C	进口流量/kg·s ⁻¹
等径风管	40~100	0.03~0.04
90°直角弯头	40~130	0.03~0.04
90°圆角弯头	40~130	0.03~0.04

实验测试误差分析:

根据实验测试参数及其精度,对实验输出参数采用均方根法^[12]进行误差分析,设函数的一般形式为 $x = f(a_1, a_2, L, a_n)$, 其标准误差公式为

$$W_x = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial a_1} \delta a_1\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial a_2} \delta a_2\right)^2 + L + \left(\frac{\partial x}{\partial a_n} \delta a_n\right)^2} \quad (13)$$

式中: W_x 为函数标准误差; δa_n 为直接测量值的标准误差。

根据公式(13), 计算公式(3)中阻抗的标准误差为 $W_s = \sqrt{\left(\frac{\partial s}{\partial (\Delta P)} \delta(\Delta P)\right)^2 + 2\left(\frac{\partial s}{\partial Q} \delta Q\right)^2}$, 根据表2数据, 计算得到阻抗标准误差为 5.09×10^{-3} 。

同理根据公式(5)和公式(12)分别得到管道当量局部阻力系数 ξ_d 和弯头局部阻力系数 ξ 的标准误差为

$$W_{\xi_d} = \sqrt{\left(\frac{\partial \xi_d}{\partial (\Delta P_{cf})} \delta(\Delta P_{cf})\right)^2 + 2\left(\frac{\partial \xi_d}{\partial V} \delta V\right)^2} \quad (14)$$

$$W_{\xi} = \sqrt{\left(\frac{\partial \xi}{\partial (\Delta P_j)} \delta(\Delta P_j)\right)^2 + 2\left(\frac{\partial \xi}{\partial V} \delta V\right)^2} \quad (15)$$

根据表2对应测试仪器量程及精度, 管道当量局部阻力系数和弯头局部阻力系数的标准误差计算值同为 5.09×10^{-3} 。

2.1 集热器阻力特性

保持集热器质量流量不变前提下, 改变太阳能模拟器辐射强度大小, 分别测试太阳辐射强度为 600 W/m^2 、 700 W/m^2 、 800 W/m^2 时, 集热器进出口温度和压力值, 集热器进口压力与出口压力之差即为集热器压降, 测试结果如图4所示。

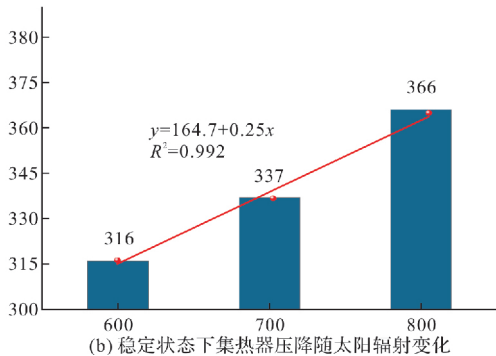
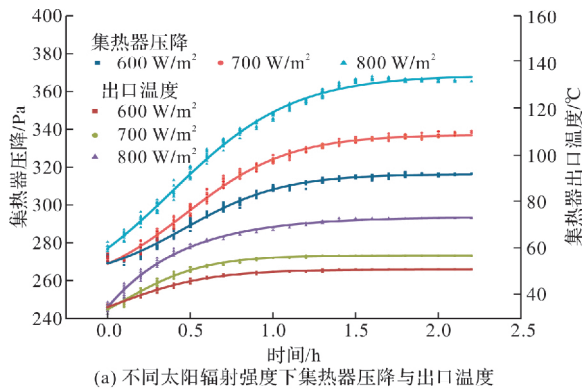


图4 不同太阳辐射强度下集热器出口温度与压降

Fig. 4 Inlet and outlet temperature and pressure drop of collector under different solar radiations

由于风机与集热器连接管道受太阳模拟器照射, 内部流体升温. 风机质量流量保持不变时, 流体升温, 造成集热器体积流量增大, 为排除进口升温干扰, 取无太阳模拟器照射时, 半小时内相对稳定流速的平均值 2.32 m/s 与集热器进口截面积乘积作为集热器进口体积流量. 根据公式(3), 计算集热器在不同太阳辐射强度下压降值与体积流量平方的比值即为集热器阻抗, 阻抗计算结果如图5所示。

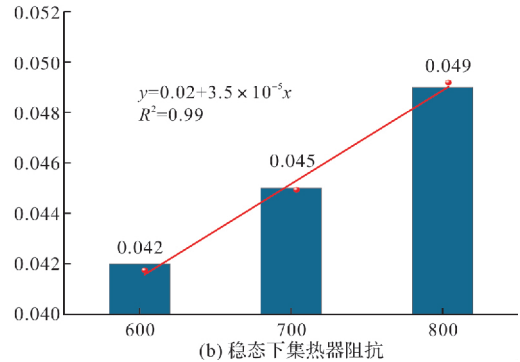
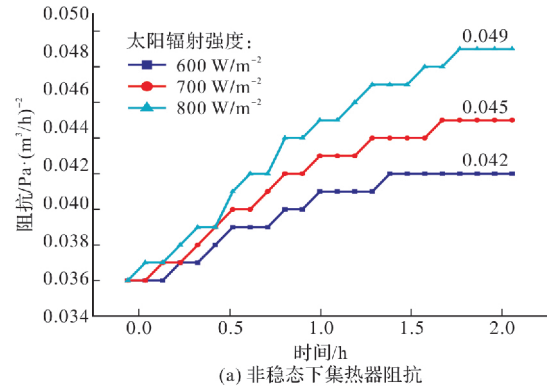


图5 不同太阳辐射强度下集热器阻抗

Fig. 5 Collector impedance under different solar radiation intensities

图4太阳辐射强度 $600 \sim 800 \text{ W/m}^2$, 集热器出口温度和压降在前两小时内迅速升高, 之后保持稳定. 稳定状态下, 集热器出口温度分别为 51°C 、 57°C 和 73°C , 压降值分别为 316 Pa 、 337 Pa 和 366 Pa , 图5中阻抗稳定值分别为 0.042 、 0.045 和 $0.049 \text{ Pa} \cdot (\text{m}^3/\text{h})^{-2}$ 。

对比图4(b)与图5(b), 稳定状态下集热器阻抗与压降有相似变化趋势, 该集热器压降和阻抗值随太阳辐射强度升高呈正比例增长, 其中: 压降值与太阳辐射强度关系为 $y = 164.7 + 0.25x$; 阻抗值与太阳辐射强度关系为 $y = 0.02 + 3.5 \times (10^{-5})x$ 。

2.2 管道沿程阻力特性

管道沿程阻力测试实验中, 管道为等径长直管道, 长 3 m , 内径 115 mm , 通过暖风机提供恒定温度和质量流量的空气, 质量流量变化范围为

$0.03 \sim 0.04 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$; 温度变化范围为 $40 \sim 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 为测定稳定质量流量和温度变化下管道进出口压力值, 通过压力变送器传递信号至数据采集仪, 在稳定状态下每隔 30 s 记录数据, 每工况记录 8 次数据, 取其平均值; 通过流量计测定管道体积流量, 流量计位于距暖风机出口 5 倍管道直径处, 流量计与风机之间使用软管进行连接。

管道当量局部阻力系数计算过程如下: 首先由管道体积流量与管径根据连续性方程计算得到管道流速, 然后根据密度计算公式(10), 计算出管道动压值, 最后根据公式(5)得到管道进出口压降值与动压比值即为管道当量局部阻力系数, 将其绘制成图, 实验数据和数据处理结果如图 6、图 7 所示。

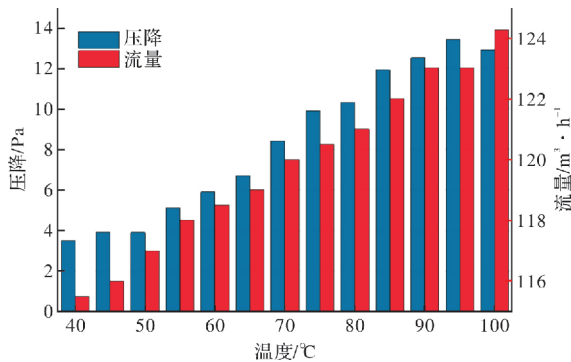


图 6 不同温度下体积流量与压降变化

Fig. 6 Variation of volumetric flow and pressure drop at different temperatures

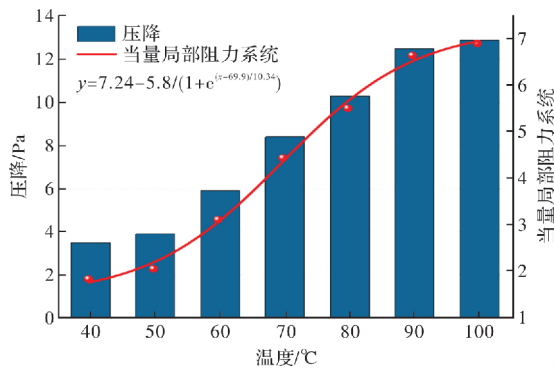


图 7 不同温度下压降与当量局部阻力变化

Fig. 7 Variation of pressure drop and equivalent local resistance at different temperatures

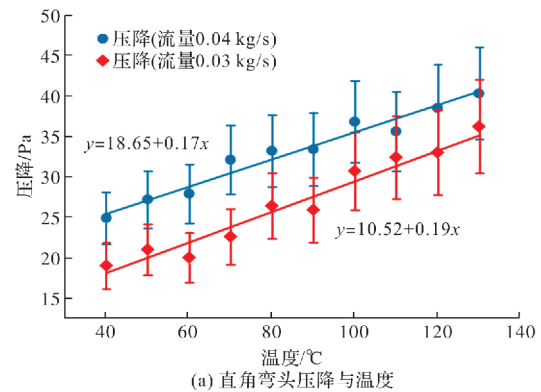
图 6 中, 在测试范围, 压降与体积流量随温度升高而增大, 压降由 3.5 Pa 增加到 13.4 Pa , 体积流量由 $115 \text{ m}^3/\text{h}$ 增加到 $125 \text{ m}^3/\text{h}$; 图 7 中管道当量局部阻力系数与压降有相同变化趋势, 变化范围为 $1.82 \sim 7.21$, 当量局部阻力系数与温度关系为 $y = 7.24 - 5.8 / (1 + e^((x-69.9)/10.34))$ 。

空气温度升高时, 黏度增大, 密度减小, 因

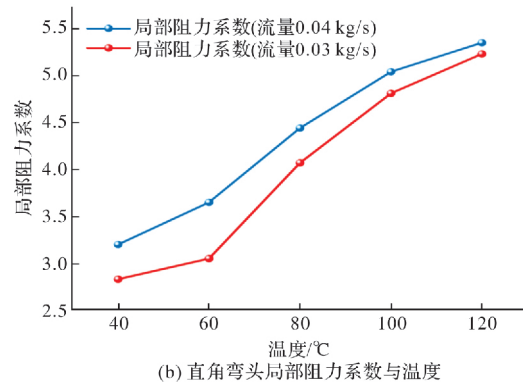
此集热器压降升高, 管道的体积流量增大; 集热工质温度在 $40 \sim 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化时, 动压变化较小, 因此造成当量局部阻力系数与压降有相似变化趋势。

2.3 系统局部阻力特性

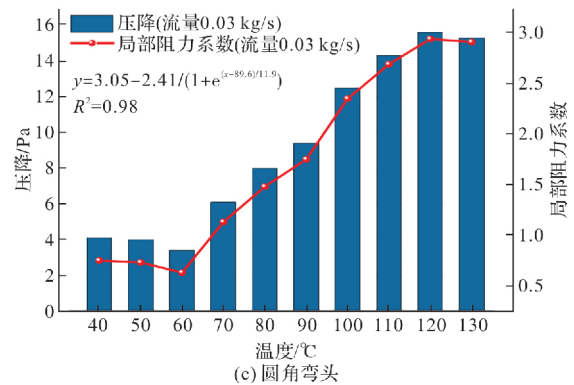
系统局部阻力测试实验中, 测试构件为 90° 直角弯头和 90° 圆角弯头, 温度变化范围 $40 \sim 130 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 质量流量变化范围为 $0.03 \sim 0.04 \text{ kg/s}$; 为测定压力, 在稳定状态下使用数据采集仪每隔 30 s 记录 8 次压力变送器数据, 取其平均值。为计算局部阻力系数, 参考管道当量局部阻力系数计算方法得到弯头动压值, 最后根据公式(12)计算弯头进出口压降值与动压比值, 即为弯头局部阻力系数, 实验数据和局部阻力系数计算值如图 8 所示。



(a) 直角弯头压降与温度



(b) 直角弯头局部阻力系数与温度



(c) 圆角弯头

图 8 不同温度直角、圆角弯头压降和局部阻力系数变化
Fig. 8 Variation of pressure drop and local resistance coefficient of right angle and round elbow at different temperatures
局部阻力系数变化, 是由于流经局部构件的

空气温度升高,密度减小,密度减小量对动压影响较小,因此根据公式(12),压降增大时,局部阻力系数以相同趋势增大。

由本节内容:根据该系统单个圆角弯头和直角弯头压降最大值 15.8 Pa、40.3 Pa 与相应形状弯头数量的乘积即可得到系统局部阻力。

2.4 系统阻力对比

为研究集热系统各部分压降占比情况,在太阳辐射强度 $600 \sim 800 \text{ W/m}^2$,质量流量 $0.03 \sim 0.04 \text{ kg/s}$,集热工质温度 $40 \sim 130 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内,单组集热器压降稳定值由 316 Pa 增加到 366 Pa;单个圆角弯头压降由 3.4 Pa 增加到 15.8 Pa;单个直角弯头压降由 19 Pa 增加到 40.3 Pa;单位长度管道沿程阻力压降由 1.2 Pa 增加到 4.5 Pa。

将集热器、弯头、管道沿程三部分压降最大值与最小值占比情况绘制成图,结果如图 9 所示。

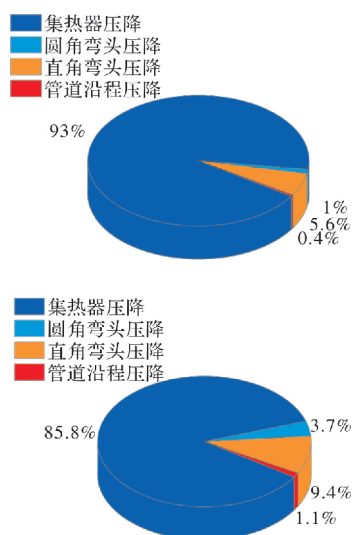


图9 集热系统各部分压降最小值与最大值占比图

Fig. 9 Proportion chart of minimum and maximum pressure drop in each part of heat collecting system

图9测试范围内,集热系统各部分压降占比中,单组集热器压降占比 $85.8\% \sim 93\%$;输配系统(单位管长和单个局部弯头)约占 $7\% \sim 14\%$ 。

3 结 论

通过实验研究真空管太阳能空气集热系统中集热器、管道以及局部弯头在不同太阳辐射强度、质量流量、集热工质温度波动下阻力特性变化规律,得到以下结论:

(1)测试范围太阳辐射强度 $600 \sim 800 \text{ W/m}^2$,稳定状态下,该集热器压降和阻抗值随太阳辐射

强度升高呈正比例增长,压降值与太阳辐射强度关系为 $y = 164.7 + 0.25x$,阻抗值与太阳辐射强度关系为 $y = 0.02 + 3.5 \times 10^{-5}x$,可根据该阻抗计算式,结合串并联阻抗变化规律,计算真空管太阳能空气集热器阻力。

(2)质量流量变化范围为 $0.03 \sim 0.04 \text{ kg/s}$;温度变化范围为 $40 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 下,管道当量局部阻力系数随流体温度升高呈对数增长趋势,单位长度管道当量局部阻力系数与流体温度关系为 $y = 2.41 - 1.93 / (1 + e^{(x-69.9)/10.34})$,工程中可依据该关系式,计算输配管道阻力。

(3)温度变化范围 $40 \sim 130 \text{ }^\circ\text{C}$,质量流量变化范围为 $0.03 \sim 0.04 \text{ kg/s}$ 下,相同条件局部弯头阻力中直角弯头与圆角弯头相比阻力较大,直角弯头局部阻力系数与温度关系为 $y = 5.48 - 2.54 / (1 + e^{(x-74.6)/15.7})$,根据此计算式,结合管道输配系统中弯头数量,计算系统中局部弯头阻力。

工程中可根据结论(1)集热器阻抗稳定值计算串并联集热器阻力,根据结论(2)和结论(3)单位长度管道沿程阻力系数和弯头阻力系数最大值计算管道和弯头阻力,从而进行真空管太阳能空气集热系统阻力计算。

参考文献 References

- [1] 李宪莉,李超,陈高峰,等. 太阳能热风采暖系统热性能的影响因素研究[J]. 太阳能学报, 2014, 35(7): 1280-1288.
LI X L, LI C, CHEN G F, et al. Influencing factor study on thermal performance of solar air heating system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2014, 35(7): 1280-1288.
- [2] 王登甲,刘艳峰,刘加平. 间歇采暖太阳能建筑设计及运行优化研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2012, 44(5): 720-725.
WANG D J, LIU Y F, LIU J P, et al. Design and operation optimization of intermittent heating solar building[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2012, 44(5): 720-725.
- [3] Federico Bava, Simon Furbo. A numerical model for pressure drop and flow distribution in a solar collector with U-connected absorber pipes[J]. Solar Energy, 2016, 134:
- [4] 王兴安,余佩桢,韩来生. 太阳热水系统等温流动特性的研究[J]. 太阳能学报, 1988 (2): 119-127.

- WANG X A, YU P Z, HAN L S. Isothermal flow distribution in solar water systems[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 1988, 9(2): 119-127.
- [5] 胡明辅, 别玉, 卜江华. 太阳能集热器阵列流量均布模型[J]. *太阳能学报*, 2011, 32(1): 60-65.
- HU M B, BIE Y, BU J H. Mathematical model of uniform flow distribution in solar collector arrays with subcollectors connected in parallel[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2011, 32(1): 60-65.
- [6] 侯宏娟, 周传文, 杨勇平. 槽式太阳集热器传热与流动性能研究[J]. *太阳能学报*, 2014, 35(5): 768-772.
- HOU H J, ZHOU C W, YANG Y P. Research on the performance of heat transfer and fluid flow of trough solar collector[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2014, 35(5): 768-772.
- [7] 付祥钊. 流体输配管网[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- FU X Z. Fluid network for transportation and distribution [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2009.
- [8] 王兴华, 周鸣镝, 成红娟. 湿空气热物性参数的计算[C]// 湿空气热物性参数的计算. 中国建筑学会建筑热能动力分会第十八届学术交流大会暨第四届全国区域能源专业委员会年会, 牡丹江: 中国建筑学会建筑热能动力分会, 2013.
- WANG X H, ZHOU M D, CHENG H J. Calculation of thermal physical parameters of humid air[C]// Chinese Architectural Society. Proceedings of the Eighteenth Academic Exchange Conference and the Fourth Annual Meeting of the National Regional Energy Professional Committee, Mudanjiang: Chinese Architectural Society, 2013: 1-4.
- [9] 华绍曾, 杨学宁等. 实用流体阻力手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
- HUA S Z, YANG X N. Practical fluid resistance manual [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1985.
- [10] 郑瑞澄, 路宾, 李忠, 等. 太阳能供热采暖工程应用技术手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- ZHENG R C, LU B, LI Z, et al. Solar heating engineering application technology manual [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2012.
- [11] 郭仁东, 胡冰, 王立捷, 等. 圆管流体平均流速与管道半径的关系[J]. *沈阳大学学报*, 2008 (1): 1-3.
- GUO R D, HU B, WANG L J, et al. Relationship between average flow velocity and radius of circular pipe[J]. *Journal of Shenyang University*, 2008(1): 1-3.
- [12] Moffat Robert J. Describing the uncertainties in experimental results[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1988, 1(1): 3-17.

(编辑 桂智刚)