

丝网回热器中换热性能的优化

高凡, 何雅玲

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 建立了低温制冷机回热器的非各向同性多孔介质模型, 基于可用比热容、轴向导热率、回热效率和综合性能参数等性能指标, 以不同目数及丝径、不同物性材料的金属丝网回热器为对象, 对回热器的换热性能进行了数值优化研究. 结果表明: 回热器填料的比热容和密度越大, 可用比热容越大, 则制冷量越大; 可用比热容相同时, 热渗透深度大的制冷量反而小; 可用比热容随着径向导热率的增加而增大, 但制冷量却随之减小; 轴径向导热比取 0.1 时, 制冷机的制冷量比回热器按各向同性处理时要高 0.5~2.0 W, 可见通常模型中不考虑非各向同性因素计算获得的制冷量会偏低; 选择导热率相对低的填充材料或通过改变丝网填充方式来降低回热器轴径向导热比, 可减小轴向漏热量; 通过控制不同目数丝网的填充比例(体积分数), 如热端 75%200 目和冷端 25%250 目, 且冷端采用导热率较低的不锈钢丝网的多段式回热器, 可提高回热效率和综合性能参数, 从而获得更佳的换热效果.

关键词: 丝网回热器; 非各向同性; 换热性能; 优化

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)09-1070-05

Heat Transfer Performance Optimization for Mesh Regenerator

GAO Fan, HE Yaling

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: An anisotropic porous media model for cryocooler regenerator was established. Based on the thermophysical properties of available heat capacity, axial thermal conductivity, and performance parameters of regenerator effectiveness and regenerator performance factor, the regenerator heat transfer performances were optimized under different regenerator geometries and properties with numerical simulation. The simulation results indicate that the cooling power enhances while the regenerator mesh specific heat capacity or density increases, and gets lower when the mesh specific heat capacity fixes and penetration depth becomes larger; the available heat capacity grows but cooling power reduces with the ratio of axial and transverse thermal conductivity (α) increased. While α is taken as 0.1, the cooling power is 0.5-2.0 W higher than the case of isotropy, which demonstrates that if the factor anisotropic is not taken into account the cooling power obtained from numeration arises on the low side. The meshes with relatively lower thermal conductivity or measures are selected to weaken the axial thermal conductivity to reduce the axial heat loss. Furthermore, the filling scale with different mesh geometry (such as of 75% 200 twill and 25% 250 twill) as well as multi-segment regenerator with stainless steel filled at the cold end enhance the regenerator effectiveness and regenerator performance factor.

Keywords: mesh regenerator; anisotropy; heat transfer performance; optimum

对回热式低温制冷机而言,回热器是一个关键部件,其性能的好坏直接影响着制冷机的效率和性能.为了改善制冷机,很重要的一个途径就是改善回热器.

金属丝网因具有优良的换热和流动性能,且制作方便、价格低廉,从而成为回热器填料的首选材料^[1].丝网回热器是典型的多孔介质.数值模拟方法是研究多孔介质中流动和换热的有效方法.回热器的换热性能受丝网物性、回热器中的流阻、换热表面积和表面换热系数等因素的影响较大,而上述各因素均与丝网的目数、丝径和材料紧密相关.

本文建立了低温制冷机回热器的非各向同性多孔介质数值计算模型,以小孔型脉管制冷机的回热器为对象,对不同目数和丝径、不同物性材料的金属丝网填料进行研究,综合可用比热容、轴向导热率、回热效率和综合性能参数等性能指标,对回热器的换热性能进行了优化,给出了一些有意义的结论.

1 回热器内流动与换热的控制方程

回热器内为复杂的多孔介质结构,其中气体流动计算采用修正的 Darcy-Brinkman-Forchheimer 模型^[2],该模型能充分考虑多孔介质中流动的惯性效应和边界效应.描述回热器中可压缩交变流动气体的质量守恒方程和动量方程分别为

$$\epsilon \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial \tau} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r u)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} = -\epsilon \frac{\partial p}{\partial x} + \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial x} (\mu \operatorname{div} V) - \\ \frac{\mu \epsilon}{K_x} u - \frac{F_x \epsilon^2 \rho}{(K_x)^{1/2}} (u^2 + v^2)^{1/2} u \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v)}{\partial \tau} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r v)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho v v)}{\partial x} = -\epsilon \frac{\partial p}{\partial r} + \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu r \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial r} (\mu \operatorname{div} V) - \\ \frac{\mu v}{r^2} - \frac{\mu \epsilon}{K_r} v - \frac{F_r \epsilon^2 \rho}{(K_r)^{1/2}} (u^2 + v^2)^{1/2} v \end{aligned} \quad (3)$$

式中: ϵ 为孔隙率; K 和 F 分别为渗透率和惯性项系数^[3];下标 x 和 r 分别表示轴向和径向.

回热器中能量方程采用适用于非稳定流动和换热的局部非热平衡模型^[3],考虑了气固的耦合换热计算.气体与固体介质的能量方程分别如下

$$\epsilon \frac{\partial(\rho T)}{\partial \tau} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r v T)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} =$$

$$\frac{1}{c_p} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right] + \frac{1}{c_p} \left(\beta T \frac{DP}{D\tau} + \phi \right) + \frac{h_{sf} a_{sf}}{c_p} (T_s - T) \quad (\text{气体介质}) \quad (4)$$

$$(1-\epsilon) \frac{\partial(\rho_s T_s)}{\partial \tau} = \frac{1}{c_s} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_x r \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_r \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) \right] - \frac{h_{sf} a_{sf}}{c_s} (T_s - T) \quad (\text{固体介质}) \quad (5)$$

式中: $k=k_f \epsilon$, $k_r = a k_s (1-\epsilon)$, $k_x = a k_r$, k_f 和 k_s 分别为气体和固体的导热率, k_x 和 k_r 分别表示固体介质轴向和径向的等效导热率; a 为轴向与径向导热率之比;其他参数的计算参考文献^[3].丝网回热器是由金属丝网沿轴向以片状叠加而成,片间以点接触,存在较大的接触热阻,即轴向导热率比径向导热率小得多,故若将回热器按各向同性模型处理,取 $a=1$ 明显不合理.因此,回热器应当采用非各向同性模型,按照丝网填充的紧密程度, a 的取值通常在 $0 \sim 0.2$ 之间^[4].

回热器本身结构复杂,回热器的换热性能受到丝网物性、回热器中的流阻、换热表面积和表面换热系数等众多因素的影响.在进行回热器性能优化分析之前,先给出几种评价回热器换热性能的指标的定义.

2 换热性能指标

2.1 可用比热容

板叠的径向换热能力可用固体的比热容 c_s 、热渗透深度 δ_s 以及密度 ρ_s 的乘积来定量描述,并称 $c_s \delta_s \rho_s$ 为可用比热容^[5]

$$c_s \delta_s \rho_s = \left(\frac{k_r \rho_s c_s}{\pi f} \right)^{1/2} \quad (6)$$

$$\delta_s = \left(\frac{k_r}{\pi f \rho_s c_s} \right)^{1/2} \quad (7)$$

式中: f 为声振频率.

c_s 表征单位质量板叠温度每变化1 K所吸收或放出的热量, δ_s 为在 $1/\pi f$ 时间内热量通过板叠扩散的距离, ρ_s 是单位体积板叠的质量,三者乘积 $c_s \delta_s \rho_s$ (J/(m²·K))的物理意义为,单位板叠面积对应的热渗透深度区域温度每变化1 K所吸收或放出的热量.可见, $c_s \delta_s \rho_s$ 越大,表示板叠径向换热能力越强.

2.2 轴向导热率

板叠的轴向导热能力通常用轴向导热率 k_x 表征,实际上轴向换热在回热式热机中是有害的,会带来严重的轴向漏热损失,故在选择板叠材料和填充

时,应使得 k_x 越小越好.

2.3 回热效率

文献中常用回热效率 η 表征回热器换热性能的好坏.在液氮温区,通常回热效率由 100% 下降到 99% 时,则制冷量损失率增加 10% 以上,由此可见选用回热效率高的回热器对低温制冷机来说尤为关键.

η 与回热损失率 λ 的关系为 $\eta = 1 - \lambda$,文献[6]中定义的交变流动下回热损失率为

$$\lambda = \frac{\left(\int_0^{\tau} mh dt\right)_C}{\left(\int_0^{\tau} mh dt\right)_H + \left(\int_{\tau_1}^{\tau} mh dt\right)_C} = \frac{H_1}{H_2 - H_3} \quad (8)$$

式中:积分区间 $[0, \tau_1]$ 为气体从回热器热端流入的时间段; $[\tau_1, \tau]$ 为气体从回热器冷端流入的时间段;下标 C、H 分别表示回热器的冷端和热端; H_1 是一个周期内回热器冷端的净焓; H_2 和 H_3 分别为从回热器热端和冷端流入的焓.

2.4 综合性能参数

回热器换热性能与多方面因素有关,如回热器死容积、换热表面积和表面换热系数等.另外,换热与流动又紧密相关,文献[1]给出了稳态流动下与流阻有关的回热器性能参数 R_{pf} ,为固体单位体积的换热能力和单位长度回热器中流体的压降之比,表达式如下

$$R_{pf} = a_{sf} h_{sf} / (\partial p / \partial x) \quad (9)$$

对于交变流动固定长度的回热器,本文定义一个类似的参数 R_{osc} 对回热器流动和换热综合性能进行预测,即

$$R_{osc} = a_{sf} h_{sf} L_r / X_p \quad (10)$$

式中: X_p 为回热器进出口压差振幅; L_r 为回热器的长度.由文献[3]可知, h_{sf} 与气体的物性以及流动状况有关,与固体的结构有关,且正比于 $\epsilon^{1.79}$ 而反比于 d_p .本文计算的各种不同对比工况下,气体的物性以及流动状况不同对回热器中 h_{sf} 的影响,与固体的结构不同对 h_{sf} 的影响相比可忽略不计,由此进一步得到更加简化的综合性能参数

$$R'_{osc} = a_{sf} L_r \epsilon^{1.79} / d_p X_p \quad (11)$$

以上 4 个指标分别从不同角度描述了回热器的换热性能.可用比热容和轴向导热率考察了回热器中固体填料的物性;回热效率通过焓流考虑了回热器的传热传质能力;综合性能参数反映了固体的结构尺寸以及回热器阻力特性对回热器性能的影响.在实际的回热器选材制作过程中,建议按照以下步

骤进行:通过初步考察材料物性,选择可用比热容较大的丝网材料;进一步选择回热器填料的材料、填充方式(如丝网片间采取隔热措施),使得轴向导热率越小越好;然后通过不同孔隙率、不同材料的丝网组合成多段式回热器,使得回热效率和综合性能参数越大越好.

3 计算模型

本文以小孔型脉管制冷机(见图 1)为例,来分析不同回热器的换热性能.采用可压缩 SIMPLEC 算法对动量方程和能量方程同时进行求解,有关数值计算方法参考文献[3].计算模型为小孔型脉管制冷机整机,各部件尺寸如下:回热器和脉管直径均为 10 mm,长均为 80 mm;压缩机扫气容积和死体积分别为 8 cm^3 和 2 cm^3 ,气库容积为 100 cm^3 ;小孔阀半径为 0.4 mm.计算工况如下:工质取氦气,冷端换热器温度为 100 K,热端换热器、压缩机容腔及气库的温度为 300 K;系统频率为 40 Hz,初始充气压力为 2 MPa.

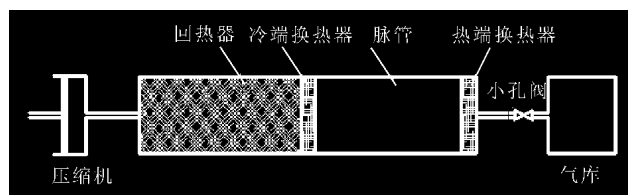


图1 计算模型

本文选用表 1 所列 3 种不同目数的丝网作为回热器填料,丝网材料分别为铜和不锈钢两种(物性参见表 2),以研究不同目数、丝径及不同材料下回热器的换热特性.

表 1 金属丝网几何结构尺寸

丝网目数	丝径 /mm	当量孔径 /mm	孔隙率	比表面积 / m^{-1}
200	0.040	0.120	0.75	24 736.93
250	0.040	0.090	0.69	30 921.16
400	0.025	0.056	0.69	49 473.86

表 2 丝网回热器填料的物性

材料	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	比热容/ $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	导热率/ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$
铜	8 930	386	398.0
不锈钢	7 820	460	15.2

4 计算结果及分析

4.1 基于可用比热容的优化

表3反映了250目丝网回热器中不同比热容、不同密度和不同导热率对热渗透深度、可用比热容及制冷量的影响,其中 c_s^* 、 ρ_s^* 和 k_r^* 表示相对归一化参数,为计算中采用的填料物性参数与不锈钢物性参数的比值.从表中可看出:①比热容和密度越大,可用比热容越大,因而制冷量越大;②可用比热容相同时,热渗透深度大的制冷量反而小;③可用比热容随着径向导热率的增加而增大,但制冷量却随之减小.可见,由径向导热率增大引起的轴向漏热的负效果大于由可用比热容增大引起的径向换热能力增强的正效果,因而体现出换热性能变差的综合效果,故回热器填料应该选择比热容和密度较大、导热率相对低的材料,以提高回热器的综合换热能力.

表3 不同物性参数对应的热渗透深度、可用比热容及制冷量

$c_s^*:\rho_s^*:k_r^*$	δ_s/mm	$c_s\delta_s\rho_s$ / $\text{kJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$	Q_c/W
1:1:1	0.183	0.66	16.03
0.5:1:1	0.259	0.47	15.56
1:0.5:1	0.259	0.47	15.54
1:1:0.5	0.129	0.47	16.07
2:1:1	0.129	0.93	16.38
1:2:1	0.129	0.93	16.37
1:1:2	0.259	0.93	15.91

4.2 基于轴向导热率的优化

表4给出了6种不同填料的回热器(分别标记为R1~R6)参数,其中R1和R2为单段式回热器,R3~R6为多段式回热器,各段采用目数相同或不同的铜或不锈钢作为填料.不同目数或材料的丝网当量导热率不同.图2为脉管制冷机采用6种不同回热器时的制冷量.由图可知, $a=0.1$ 时,制冷机的制冷量比回热器按各向同性处理时要高0.5~2.0 W,可见通常模型中不考虑非各向同性因素计算获得的制冷量会偏低.不锈钢丝网回热器R1~R4的制冷量依次增大,多段式回热器R3和R4的换热性能比填充同一种即100%的250目或400目丝网的R1和R2的好,通过控制不同目数丝网的填充比例(体积分数),如R4为75%的250目和25%的400目,可获得更佳的换热效果.R5和R6由铜和不锈钢两种材料组成,其制冷量与R4相比有所下降,这

是由于铜的导热率较大而使轴向漏热较多所致.

表4 6种不同回热器的参数

标号	目数	材料	长度/mm
R1	250	不锈钢	80
R2	400	不锈钢	80
R3	250	不锈钢	40
	400	不锈钢	40
R4	250	不锈钢	60
	400	不锈钢	20
R5	250	铜	20
	250	不锈钢	20
	250	铜	20
	400	不锈钢	20
R6	250	铜	60
	400	不锈钢	20

图3给出了 $a=0.1$ 时,不同纵向导热率下制冷机的制冷量, k^* 为相对归一化导热系数,即计算中采用的导热率与不锈钢导热率($15.2\text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$)的比值.由图可以看出,制冷量随纵向导热率的增加而降低. a 为定值时,轴向导热率随纵向导热率的增加而增大,所以回热器的漏热损失随纵向导热率的增加而增大.回热器填料应该选择导热率相

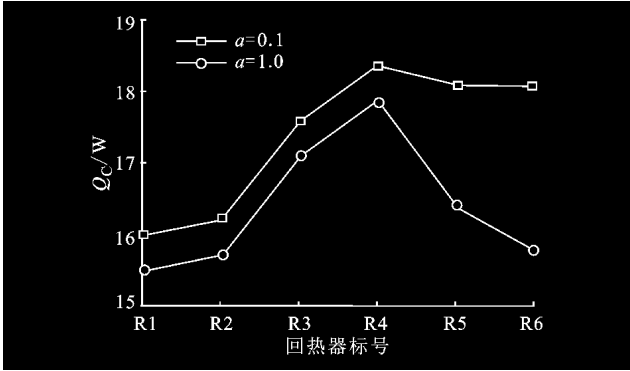


图2 不同回热器的制冷量

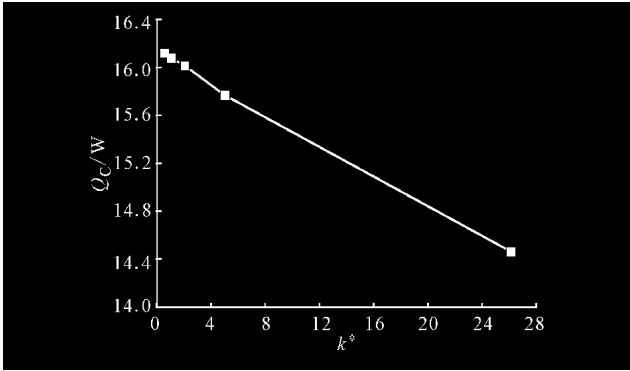


图3 不同纵向导热率下的制冷量

对低材料,或通过改变丝网的填充方式,尽可能降低 α ,以减小轴向漏热量。

4.3 基于回热效率和综合性能参数的优化

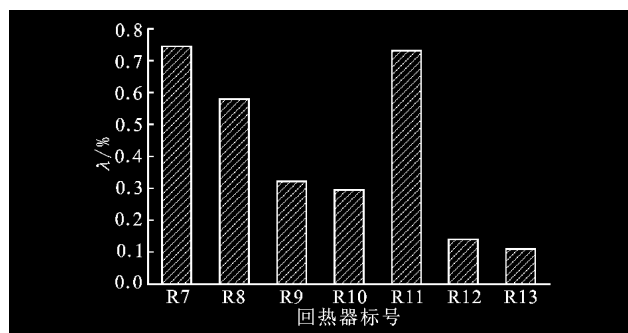
表5给出了7种不同填料的回热器(分别标记为R7~R13)参数。由表1知,200目和250目丝网的孔隙率分别为0.75和0.69。不同孔隙率的回热器中的流阻不同,换热性能也会随之不同。本部分结合回热效率和综合性能参数来对回热器进行优化。

表5 7种不同回热器的参数

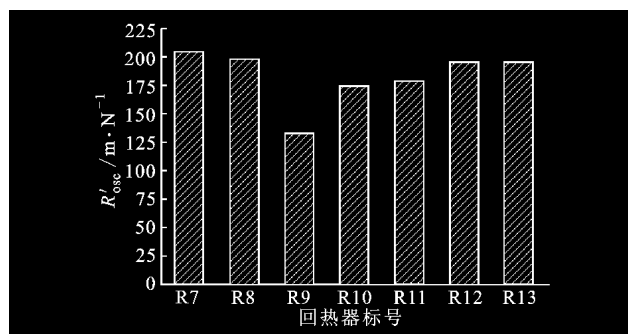
标号	目数	材料	长度/mm
R7	200	铜	80
R8	200	不锈钢	80
R9	250	不锈钢	80
R10	200	不锈钢	40
	250	不锈钢	40
R11	200	不锈钢	40
	250	铜	40
R12	200	铜	20
	200	不锈钢	20
	200	铜	20
	250	不锈钢	20
R13	200	铜	60
	250	不锈钢	20

图4为不同回热器的回热损失率和综合性能参数的比较。在单段式回热器(R7~R9)中,R7的回热损失最大,R9最小;从综合性能参数 R'_{seg} 来看,R8性能最好,R7次之。R7的综合性能指标稍高于R8,但同时回热损失也更大。R9与R8同为不锈钢材料,由表1知R9的比表面积较大,则R9能与流体更充分地换热,因而回热损失较小,但因其孔隙率小,回热器中压降大幅提高,从而综合性能不占优势。由此可见,R7~R9各有优缺点,可考虑将这3种回热器适当组合,即构成多段式回热器(如R10~R13),以降低回热损失率,并提高换热器的综合性能。R10~R13的共同特点是一端为200目丝网,另一端为250目丝网。考虑到压力相同时,氦气在300 K下的运动黏度是100 K下的2倍左右^[7],单段式回热器中热端造成的黏性耗散会比冷端多,因而本文将孔隙率较大的200目丝网放在回热器热端,而将孔隙率小的250目丝网放在冷端,以减小整个回

热器的黏性耗散,同时使得回热器冷端有较大的比表面积,能够更充分换热而提高回热效率。从图4中可看出,4种多段式回热器的综合性能指标均比R9高,R12和R13的回热损失比R9降低50%以上。R11由于冷端采用铜丝网,冷端漏热损失严重。结合回热效率和综合性能参数两项指标来看,R12和R13的性能均比R10和R11更优,可见通过控制不同目数丝网的填充比例(热端75%200目和冷端25%250目),并且冷端采用导热率较低的不锈钢丝网,可使回热器获得更佳的换热效果。



(a)回热损失率比较



(b)性能参数比较

图4 不同回热器的回热损失率和性能参数

5 结论

本文以不同目数和丝径、不同物性材料的金属丝网回热器为对象,通过可用比热容、轴向导热率、回热效率和综合性能参数等多个指标参数对回热器的换热性能进行优化,得到如下结论。

(1)基于可用比热容的优化。回热器填料的比热容和密度越大,可用比热容越大,则制冷量越大;可用比热容相同时,热渗透深度大的制冷量反而小;可用比热容也随着径向导热率的增加而增大,但制冷量却随之减小。因此,回热器填料应该选择比热容和密度较大、导热率相对低的材料,以提高回热器的综合换热能力。

(2)基于轴向导热率的优化。轴径向导热比 α 取

0.1时,制冷机的制冷量比回热器按各向同性处理时要高0.5~2.0 W,可见通常模型中不考虑非各向同性因素计算获得的制冷量会偏小.选择导热率相对低的填充材料或通过改变丝网填充方式(如丝网片间采取隔热措施)来降低回热器轴径向导热比,可减小轴向漏热量.

(3)基于回热效率和综合性能参数的优化.通过控制不同目数丝网的填充比例(如热端75%200目和冷端25%250目),且冷端采用导热率较低的不锈钢丝网的分段式回热器,其回热效率和综合性能参数均可提高,从而能获得更佳的换热效果.

参考文献:

- [1] URI B N, DAN M. Low cost and high performance screen laminate regenerator matrix[J]. *Cryogenics*, 2004, 44(6/8): 439-444.
- [2] MURALIDHAR K, SUZUKI K. Analysis of flow and heat transfer in a regenerator mesh using a non-Darcy thermally non-equilibrium model[J]. *Int J Heat and Mass Transfer*, 2001, 44(13): 2493-2504.
- [3] 高凡,何雅玲,刘迎文. 交变流动下丝网回热器中压降特性的数值分析[J]. *工程热物理学报*, 2008, 29(4): 668-670.
- [4] GAO Fan, HE Yaling, LIU Yingwen. Numerical simulation of pressure drop characteristic in mesh regenerator under oscillating flow[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2008, 29(4): 668-670.
- [5] LEWIS M A, KURIYAMA T, KURIYAMA F, et al. Measurement of heat conduction through stacked screens [J]. *Advances of Cryogenic Engineering*, 1998, 43(B): 1611-1618.
- [6] SWIFT G W. Thermoacoustic engines[J]. *J Acoust Soc Am*, 1988, 84(5): 1145-1180.
- [7] NAM K, JEONG S. Measurement of cryogenic regenerator characteristics under oscillating flow and pulsating pressure[J]. *Cryogenics*, 2003, 43(10/11): 575-581.
- [8] NAM K, JEONG S. Investigation of oscillating flow friction factor for cryocooler regenerator considering cryogenic temperature effect[J]. *Cryogenics*, 2005, 45(12): 733-738.

(编辑 荆树蓉)

“过电压保护器的雷电流测试理论、关键技术及系列产品开发”项目通过科技成果鉴定

由我校电气工程学院姚学玲副教授课题组完成的项目“过电压保护器的雷电流测试理论、关键技术及系列产品开发”于2008年7月20日通过了教育部组织的科技成果鉴定.

该课题组经过十余年的刻苦攻关,提出了过电压防护的雷电流测试回路的设计方法,实现了雷电流测试回路的精确设计,解决了雷电流测试回路依靠经验设计的难题.此外,他们还发明了雷电流测试放电开关、雷电流波形形成电阻、雷电流波形形成电感等雷电流测试的核心器件,以及双射极跟随的充电电压自动监测、高精度的数字相位跟踪和控制触发等系列专用集成电路,发明了采用光发射/接收传输技术的控制装置,过电压保护器的雷电流和冲击残压的数字化测量装置,同时针对不同测试对象及不同雷电流测试要求,开发了专用控制软件和计算机数据处理软件.目前,基于该项目关键技术开发的测试设备已有200多台套,广泛应用于输配电和电子通信等领域,取得了显著的经济社会效益,并具有很好的应用推广前景.该项目在研究过程中发表论文60余篇,其中SCI、EI收录36篇,申请国家发明专利14项,已授权5项.鉴定委员会一致认为:该项目在雷电流测试技术及测试设备开发方面取得了多项创新性成果,具有重要的理论意义和实际应用价值,雷电流测试的核心器件及测试设备的性能指标超过了国内外同类产品,处于国际领先水平.该项目的研究,解决了困扰我国电力系统输配电、电子通信及航空航天、国防等领域雷电流测试的技术难题,打破了国外技术封锁和产品垄断,对雷电流测试专用设备的研究起到了引领和示范作用,提升了过电压保护器雷电流测试的技术水平,促进了过电压防护及相关行业的技术进步,具有重要的科学意义与经济意义.

来源:交大新闻网