

文章编号:1671-6833(2011)03-0023-05

## 超临界 CO<sub>2</sub> 汽车空调气冷器分配性能研究

张丽娜<sup>1</sup>, 刘敏珊<sup>2</sup>, 董其伍<sup>2</sup>

(1. 郑州航空工业管理学院 航空工程系, 河南 郑州 400015; 2. 郑州大学 河南省过程传热与节能重点实验室, 河南 郑州 450002)

**摘 要:** 微通道平行流气冷器性能的好坏对超临界 CO<sub>2</sub> 空调系统的能效比影响很大, 是整个制冷系统性能高低的关键。提出了新的微通道平行流气冷器整体结构建模方法, 大大降低了网格划分时间及对计算机硬件的要求, 提高了工作效率。对微通道平行流气冷器扁管与集流管组合结构进行了一系列优化设计, 优化结果表明, 最优的参数组合为扁管间距为 8.8 mm, 扁管长度为 500 mm, 扁管排数为 10, 扁管与集流管的组合深度为 0.25。研究结果为新产品的工程应用提供参考。

**关键词:** 超临界 CO<sub>2</sub>; 汽车空调; 气冷器; 分配性能

**中图分类号:** TB657 **文献标志码:** A

### 0 引言

天然制冷剂 CO<sub>2</sub> 无毒、不可燃, 具有环境友好性和优良的热物理特性, 在汽车空调中有着其他制冷剂无可比拟的优势。Pettersen 等<sup>[1]</sup>研究了 CO<sub>2</sub> 微通道换热器。他们指出, 制冷剂侧换热系数比其它碳氟化合物的都高, 换热器内表面面积还可以减小。微通道平行流气冷器具有结构紧凑、耐压性能好及重量轻等优点, CO<sub>2</sub> 与微通道换热器的完美结合, 可以很好的解决汽车空调占用空间大、使用小通道时压降大的问题。微通道气冷器性能的好坏对跨临界 CO<sub>2</sub> 汽车空调系统的能效比影响很大<sup>[2-4]</sup>, 是整个制冷系统性能高低的关键。在微通道平行流气冷器的设计过程中, 通常以气冷器内流量均匀分配为假设前提, 而这种情况在实际过程中几乎是无法达到的。

换热器内部流量分配均匀性对其换热性能好有着重要影响。Lalot 等<sup>[5]</sup>对换热器内流量分配不均匀性进行研究, 发现对于交叉流换热器, 严重的流量分配不均匀性导致换热器性能下降高达 25%。笔者基于计算流体力学技术, 对微通道平行流气冷器中 CO<sub>2</sub> 流量分配均匀性进行研究, 为微通道平行流气冷器的设计提供参考依据。研究结果对气冷器的优化设计具有重要意义。

### 1 数值计算模型及边界条件

#### 1.1 计算区域

两例微通道平行流气冷器中集流管和换热扁管实验数据为: Yin JM<sup>[6]</sup>使用的集流管与扁管结构尺寸图如 1 图所示; Y. Zhao<sup>[7]</sup>使用的扁管内含 10 个微管, 内径为 1.0 mm 的换热扁管。

笔者主要对扁管长度、进口集流管与扁管组合尺寸以及扁管间距等参数对微通道平行流气冷器中 CO<sub>2</sub> 的流量分配性能进行考察。其中集流管与换热扁管尺寸与文献[6]中的一致, 具体结构参数如图 1 所示。

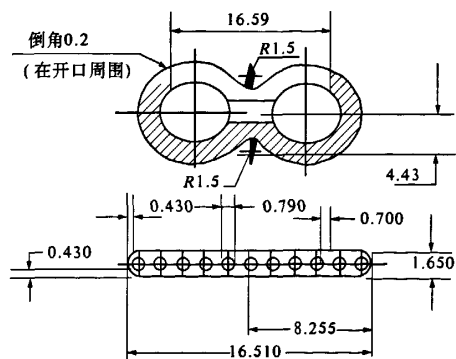


图1 气冷器集流管和微通道换热扁管

Fig.1 Manifold and flat-tube of gas cooler

收稿日期:2010-12-10;修订日期:2011-03-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51076145)

作者简介:张丽娜(1981-),女,河南周口人,郑州航空工业管理学院讲师,博士,主要研究方向为过程传热强化及其设备的研究与开发,E-mail:lina810619@163.com.

在微通道平行流气冷器中,二氧化碳温度分布如图2所示<sup>[8]</sup>,从图中可以看出,二氧化碳气体在第一流程中迅速降温,因此气冷器中主要热量传递发生在第一流程中.而当二氧化碳气体进入二、三流程后,其与冷却空气的温差较小,而相应的二氧化碳比热容较大,致使二、三流程中二氧化碳气体温度降低幅度变小.因此,气冷器中第一流程换热的好坏是整个气冷器性能好坏的关键,故本研究将气冷器第一流程作为计算区域.

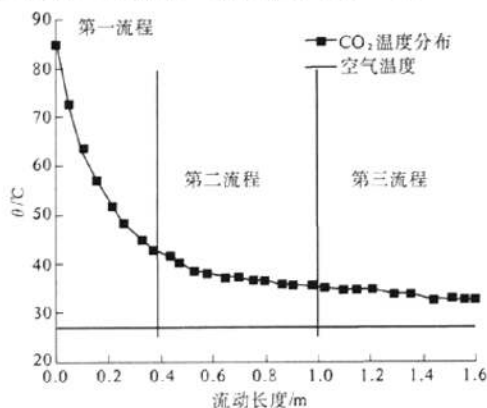


图2 气冷器中二氧化碳温度分布图

Fig.2 CO<sub>2</sub> temperature distribution of gas cooler

## 1.2 几何模型建立

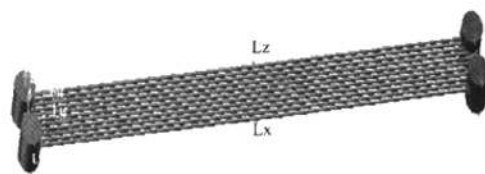
由于平行流微通道气冷器结构比较大,扁管数目较多,计算中还要考虑每层扁管内二氧化碳的流动,所以要把二氧化碳流道画出,网格数量达到近千万,利用 Gambit 软件建立模型时,如果建立整体模型,再进行网格划分,对计算机硬件要求较高,同时要花费很长的时间.为了节省时间,笔者研究了一种新的建模方法,对于相同的结构,只画出一部分,大大降低了模型建立的工作量,同时也缩短了网格划分时间,对计算机的要求也可以降低.

将微通道平行流气冷器第一流程分为三部分:进口段、中间重复段和出口段,如图3所示.由于结构的重复性,中间重复段只需建立一段周期模型结构,对其进行网格划分.网格划分如图4所示.

在计算流体力学软件 FLUENT<sup>[9-10]</sup>中,提供 Merge 和 Fuse 两项功能, Merge 的功能是将具有



(a) 进口段



(b) 中间重复段



(c) 出口段

图3 气冷器分段模型

Fig.3 Section model of gas cooler



图4 模型网格结构

Fig.4 Mesh of model

相同条件的边界合并成一个, Fuse 则是将两个网格完全贴合的边界融合成内部面(Interior)来处理.笔者在进行网格划分时,要保证中间重复段的集流管上、下面的网格相同,这样才能应用 Fuse 功能.在计算多排扁管流道时,只需生成一个中间重复段结构网格,其他通过复制后,将重合的集流管上下边界利用 Fuse 功能处理就行了.同时,将相同条件的边界利用 Merge 功能合并成一个.其微通道平行流气冷器第一流程整体结构如图5所示.

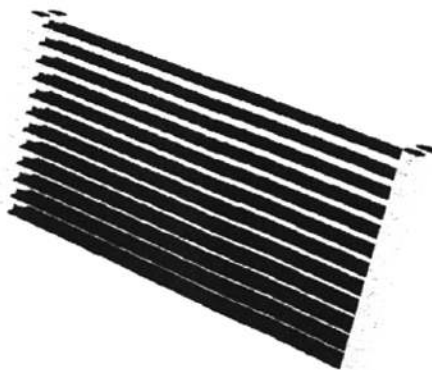


图5 微通道气冷器整体模型

Fig.5 Total model of micro-channel gas cooler

### 1.3 边界条件设置

笔者利用 CFD 软件 FLUENT 6.3 对微通道平行流气冷器中流量分配性能进行计算研究,二氧化碳物性均通过计算热物性流体性质软件 REFPROP7.0 获得.物性输入采用 piecewise-linear. 由于二氧化碳在细长管内流动,为了得到较好的计算结果,采用双精度求解器,同时湍流模型选用 RNG  $k-e$ . 压力速度耦合采用 SIMPLIC 算法. 在二氧化碳侧,采用质量流量进口,压力出口;扁管壁面采用定壁温.

为了评价不同排扁管内流量分配性能,从上而下对扁管进行编号,定义扁管流量分配不均匀度  $E_i$  和总流量分配不均匀度  $S$ .

定义扁管流量分配不均匀度  $E_i$ :

$$E_i = \frac{m_i - m_a}{m} \quad (1)$$

式中:  $m_i$ ,  $m_a$  分别为第  $i$  根扁管内制冷剂流量、平均单根扁管内制冷剂流量.

为表示换热器截面流道流量分配的绝对不均匀参数,引入数理统计上的标准方差  $S$ . 它反映了测量数据的离散程度,可以很好地体现不同工况、不同集流管结构参数对气冷器单元体内部的分配不均匀情况. 所得绝对值越大表示截面分配越不均匀. 反之,其分配就越均匀. 其定义为:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (m_i - m_a)^2} \quad (2)$$

式中:  $N$  为总扁管数.

为了研究集流管与扁管不同组合深度对制冷剂流量分配的影响,定义无量纲参数  $T$ :

$$T = \frac{t}{r} \quad (3)$$

$T$  的大小反映了集流管与扁管的组合深度,  $t$  为扁管插入集流管深度,  $r$  为集流管外径. 该值越大说明扁管插入集流管越深. 考虑到连接强度与实际加工工艺,本研究  $T$  变化范围为 0.2 ~ 0.7.

## 2 结果分析

### 2.1 扁管间距对流量分配不均匀性影响

考察参数为:扁管为 12 排,扁管长度为 200 mm,  $T=0.5$ , 二氧化碳进口压力为 10 MPa, 质量流量为 0.028 kg/s. 二氧化碳进口温度为 85 °C, 扁管温度为 35 °C. 分别对扁管间距为 9.2, 8.8, 8.4, 8.0 mm 时的流量分配性能进行考察.

图 6 为间距 8 mm 时,控制体内 CO<sub>2</sub> 流体流线图,从图中可以看出,CO<sub>2</sub> 从进口集流管流入,

分配到各扁管中,然后汇集到出口集流管中流出.

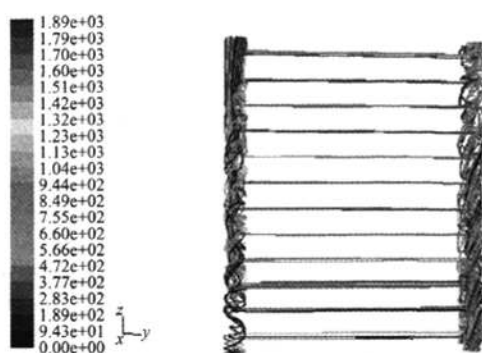


图 6 微通道气冷器流线图

Fig. 6 Streamline of micro-channel gas cooler

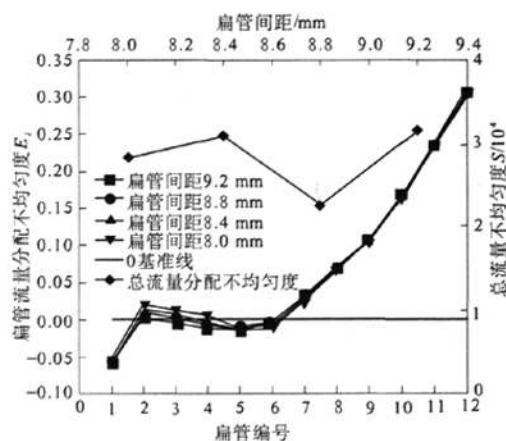


图 7 扁管间距对流量分配不均匀影响

Fig. 7 Effect of flat-tube pitch to flow maldistribution

图 7 为扁管间距对流量分配不均匀度的影响. 从图中可以看出,扁管间距不同时,扁管间流量分配不均匀度随扁管编号的变化趋势一致. 不同扁管间距对扁管流量分配不均匀度影响较小. 在第一排扁管处扁管流量不均匀度小于 0, 从进口处到第一排扁管插入高度,流动面积突然减小,大部分流体在扁管与集流管间隙间绕流而过,扁管内质量流量小于平均质量流量. 2~5 排扁管内扁管流量不均匀度接近 0, 说明流量分配比较均匀. 由于重力和惯性力的影响,大部分二氧化碳向下流动,在遇到进口集流管下部管壁后,向下流动被阻止,二氧化碳只有向扁管内流动,所以,下面几排扁管的质量流量较大,均高于平均质量流量,越接近进口扁管下壁面,扁管内二氧化碳质量流量越大,流量分配越不均匀. 从总流量分配不均匀度分布曲线可以看出,在考察的扁管间距范围内,当扁管间距为 8.8 mm 时,总流量分配不均匀度存在一个最低值. 说明,在此扁管间距时,流量分

配性能相对较好.

### 2.2 扁管长度对流量分配不均匀性影响

考察参数为:扁管为 12 排,扁管间距为 8.8 mm,  $T=0.5$ , 二氧化碳进口压力为 10 MPa, 质量流量为 0.028 kg/s. 二氧化碳进口温度为 85 ℃, 扁管温度为 35 ℃. 分别对扁管长度为 100, 200, 300, 400, 500 mm 时的流量分配性能进行考察.

图 8 为不同扁管长度对流量分配不均匀度的影响曲线. 从图中可以看出, 扁管长度对扁管流量分配不均匀度影响比较明显. 随着扁管长度的增加, 扁管流量分配不均匀度越接近 0 基准线, 流量分配越均匀; 扁管流量分配不均匀度随扁管长度增加变化幅度减小, 不均匀度较低, 流量分配比较均匀; 扁管长度变化对扁管流量分配不均度影响较大, 同时不均匀度较高, 流量分配不均匀, 尤其在下面几排扁管, 扁管流量分布不均匀性更为明显. 从总流量分配不均匀度来看, 随着扁管长度的增加, 总流量分配不均匀度降低. 不过考虑到汽车空间的限制, 本研究扁管长度不超过 500 mm.

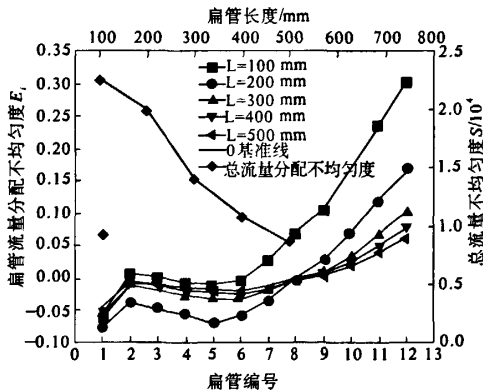


图 8 扁管长度对流量分配不均匀影响

Fig. 8 Effect of flat-tube length to flow maldistribution

### 2.3 扁管排数对流量分配不均匀性影响

考察参数为:扁管间距为 8.8 mm,  $T=0.5$ , 扁管长度为 500 mm, 二氧化碳进口压力为 10 MPa, 质量流量为 0.028 kg/s. 二氧化碳进口温度为 85 ℃, 扁管温度为 35 ℃. 分别对扁管排数为 12, 10, 8 时的流量分配性能进行考察.

图 9 为不同扁管数对流量分配不均匀度的影响曲线. 从上图中可以看出, 距离进口较近的几个扁管流量分配不均匀度低于 0, 随着扁管数的减小, 距离进口最近一排扁管的流量分配不均匀度减小, 均匀度增强. 第二、三排扁管不均匀度基本

相同. 随着扁管数的增加, 扁管流量不均匀度达到零值往后延迟. 在扁管流量不均匀度达到零之前, 扁管数越小, 流量分配不均匀度越靠近 0, 均匀度越好. 随后, 扁管流量分配不均匀度增加幅度基本相同, 随着扁管数的减小, 扁管流量不均匀度越早远离 0 点, 不均匀度越高. 总的来看, 扁管流量分配不均匀度在范围内, 不均匀度较低. 从总流量分配不均匀度可以看出, 扁管排数为 10 时, 总流量分配不均匀度最小.

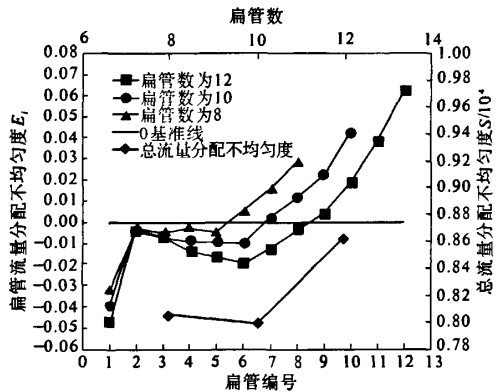


图 9 扁管数对流量分配不均匀影响

Fig. 9 Effect of flat-tube numbers to flow maldistribution

### 2.4 扁管与集流管组合深度对流量分配不均匀性影响

考察参数为:扁管间距为 8.8 mm, 扁管排数为 10, 扁管长度为 500 mm, 二氧化碳进口压力为 10 MPa, 质量流量为 0.028 kg/s. 二氧化碳进口温度为 85 ℃, 扁管温度为 35 ℃. 分别对扁管与集流管组合深度  $T=0.25, 0.5, 0.75$  时的流量分配性能进行考察.

图 10 为不同扁管与集流管组合深度对流量分配不均匀度的影响曲线. 从图中可以看出, 扁管与集流管组合深度越小, 扁管流量分配不均匀度曲线越接近 0 基准线, 流量分配越均匀, 同时可以看出, 不同组合深度下, 扁管流量分配不均匀度在以内, 说明不同排扁管的扁管流量分配较为均匀. 从总流量分配不均匀度变化曲线可以看出, 随着组合深度的增加, 总流量分配不均匀度增加, 也就是说, 扁管流量分配不均匀度曲线变化幅度较大, 不同管排间流量分配相差较大. 所以建议使用较小的扁管与集流管组合深度, 但从加工和稳定性及承压性能考虑, 扁管与集流管组合深度也不能过小. 笔者建议采用  $T=0.25$  时的深度组合.

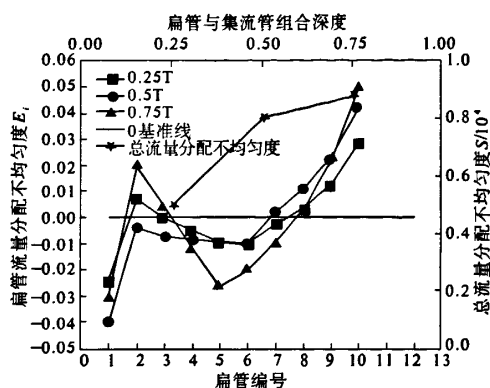


图10 扁管与集流管组合深度对流量分配不均匀影响

Fig.10 Effect of depth between flat-tube and manifold to flow maldistribution

### 3 结论

(1) 充分利用 FLUENT 软件性能,将微通道平行流气冷器第一流程实体模型分为进口段、周期段及出口段三部分进行建模,大大缩短了建模及网格划分时间,降低了对计算机硬件的要求,提高了建模效率。

(2) 综合考虑流动与传热特性,对超临界 CO<sub>2</sub> 采用变物性,分析微通道平行流气冷器不同扁管间距、扁管长度、扁管排数及扁管与集流管组合深度等参数对扁管流量分配均匀度及总流量分配均匀度的影响,得到最优的参数组合为扁管间距为 8.8 mm,扁管长度为 500 mm,扁管排数为 10,扁管与集流管的组合深度为 0.25。

### 参考文献:

[1] PETTERSEN J, HAFNER A, SKAUGEN G. Develop-

ment of compact heat exchanger for CO<sub>2</sub> air conditioning system[J]. Int Journal of Refrigeration, 1998, 21 (3): 180-193

[2] 杨俊兰,马一太,管海清.微通道换热器在 CO<sub>2</sub> 跨临界制冷系统中的应用[J]. 制冷与空调, 2005, 5 (2): 52-56.

[3] 林高平,顾兆林.跨临界 CO<sub>2</sub> 循环性能的研究[J]. 西安交通大学学报, 1998, 22(8): 35-38.

[4] 陈江平,穆景阳,简晓文.二氧化碳汽车空调系统应用研究进展(一)——系统结构、性能及其优化[J]. 流体机械, 2000, 28(4): 51-54.

[5] LALOT S, FLORENT P, LANG S K, et al. Flow maldistribution in heat exchangers[J]. Applied Thermal Engineering, 1999, 19(8): 847-863.

[6] YIN J M, BULLARD C W. R-744 gas cooler development and validation[J]. International Journal of Refrigeration, 2001, 24: 692-701.

[7] ZHAO Y, OHADI M M, RADERMACHER R. Micro-channel Heat Exchangers with Carbon Dioxide (Final Report)[D]. University of Maryland, College Park, 2001.

[8] MCEnaney R P, PARK Y C, YIN J M, et al. Performance of the prototype of a transcritical R744 mobile A/C system[C]//SAE International Congress and Exposition. Detroit: Michigan, 1999: 872.

[9] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2005.

[10] 韩占忠,王敬,兰小平. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2008.

## Flow Distribution Investigation of a CO<sub>2</sub> Automotive Air Conditioner of Gas Cooler

ZHANG Li-na<sup>1</sup>, LIU Min-shan<sup>2</sup>, DONG Qi-wu<sup>2</sup>

(1. School Aeronautics Engineering, Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450015, China; 2. Key Laboratory of Process Heat Transfer and Energy Saving of Henan Province, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** The performance of micro-channel parallel gas cooler is very important to trans-critical CO<sub>2</sub> air-conditioning system. The new modeling method is studied about micro-channel parallel gas cooler. The time of dividing meshes is shorten and requirement to computer hardware is decreased, the efficiency of modeling method is improved. A series of optimization designs are executed to combinations of flat tube and manifold of gas cooler. The optimal combination is that the space between flat tubes is 8.8 mm, the length of flat tube is 500 mm, rows number of flat tube is 10, the combination depth of flat tube and manifold is 0.25. The work will provide the reference for engineering application of new design.

**Key words:** supercritical CO<sub>2</sub>; automotive air conditioner; gas cooler; flow distribution