

对冰箱制冷系统中毛细管的探讨和分析

童 蕾

(广东机电职业技术学院 广州 510515)

陈超敏

(广州第一军医大学 广州 510515)

【摘要】 本文就冰箱系统中使用的毛细管从特性、设计选型、实验研究、工艺检测等方面作一较全面的探讨分析。

【关键词】 毛细管 冰箱 制冷系统

ANALYSIS AND DISCUSSION ON CAPILLARY TUBE IN REFRIGERATING SYSTEM OF REFRIGERATOR

【Abstract】 The capillary tube is system of refrigerator is completely analysed and discussed in respect of characteristic, design, experiment and technologies.

【Keywords】 capillary tube, refrigerator, refrigerating system

一、毛细管的作用

家用电冰箱普遍采用蒸气压缩式制冷原理, 详见

图 1。

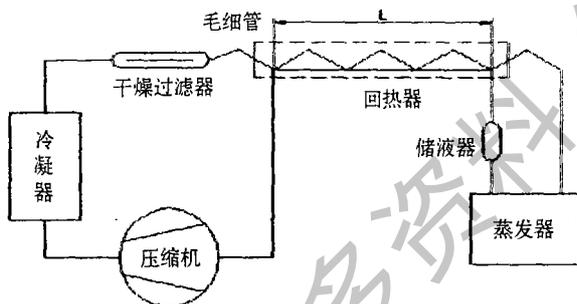


图 1 冰箱制冷系统原理图

毛细管是组成冰箱制冷系统的四个主要部件之一。它位于冷凝器与蒸发器之间, 在系统中起节流降压的作用, 直接影响冰箱的性能。在冰箱的设计、制造、维修中, 毛细管的选配、质量检查等都显得极其重要, 而且有一定的难度。

本文就冰箱系统中使用的毛细管从特性、设计选型、实验研究、工艺检测等方面作一较全面的探讨分析。

装有毛细管的冰箱, 制冷系统内压力变化规律如图 2 所示。

当制冷压缩机启动时: 毛细管保持冷凝器和蒸发器之间有一定的压力差, 从而使蒸发器中的液态制冷

剂在低压状况下蒸发吸热; 冷凝器中的气态制冷剂在高压状况下放热冷凝。

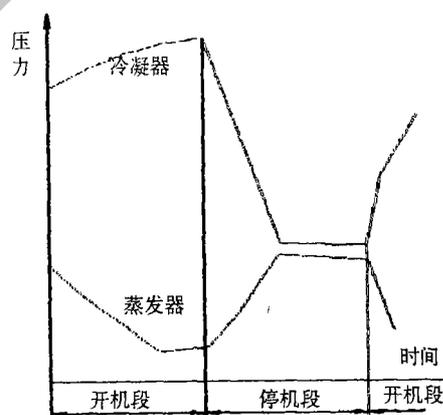


图 2 毛细管制冷系统内压力变化

当制冷压缩机停止运行时: 系统中的高低压段之间的压力通过毛细管很快得以平衡。一般来说, 停机 6-8 分钟, 压缩机活塞的高低压相对压力差近于零。压缩机再次启动时, 在无压差情况下进行, 转矩小, 制冷系统运行到达设定工况的时间短, 从而快速制冷。

二、毛细管的特点

毛细管是通过拉拔工艺制成的细而长的紫铜管, 诞生于上世纪三十年代, 并在多年后取得了专利。在冰箱制冷系统中作为节流元件得到广泛运用。

优点——结构简单, 无运动零件, 不易发生故障,

使用毛细管的系统,可以使用低启动转矩的压缩机。

缺点——自动调节范围小,且不能人工调整。毛细管对于工况变化引起的流量变化具有一定的自补偿能力。但是,在工况变化时,毛细管只能使流量有微小变化,再则毛细管出口处会产生喷流噪声。

设计难点——毛细管尺寸与装置的匹配以及系统中制冷工质的充注量必须经过反复实验确认。

在冰箱制冷系统中使用的毛细管有如下特点:

材料是磷脱氧铜无缝管,抗拉强度 $28\text{kg}/\text{mm}^2$ 以上,伸长率 2% 以上,能耐 7MPa 的水压,用 1.65MPa 的干燥空气试验无漏气。

考虑生产实际,毛细管的内径和长度受许多因素制约。如内径太小,要求制冷剂 and 制冷系统部件达到更高的清洁度,否则易造成毛细管堵塞。如果毛细管过长,很难将它装入箱体内,并且在制造过程中,长的毛细管容易损坏。太短的毛细管给连接冷凝器和蒸发器带来难度,可能还需要再接额外的管路,这样做会影响系统性能。在冰箱制冷系统中毛细管内径通常为 $0.5 \sim 1\text{mm}$,长度 $1 \sim 4\text{m}$;

为防止杂质堵塞毛细管,必须严格保证系统的清洁度,且在冷凝器与毛细管之间要加装干燥过滤器。

在毛细管出口端的喷流噪声可以用管外包扎异丁橡胶隔声减震,或连接过滤管(管径大于毛细管小于蒸发管)的方法来改善;

为使毛细管中制冷剂保持一定过冷度,以提高制冷效率,应尽量采用回热循环。冰箱中毛细管需与低压回气管组成一逆流回热器,组成方式有三种,详见图 3。①内含法——将部分毛细管穿入低压回气管中;②外焊法——将部分毛细管与部分回气管用锡平行并焊为一体;③套管法——用热收缩管将毛细管和低压回气管缩套为一体。计算机仿真模拟和实验研究都显示外焊法比内含法换热效率高。毛细管与回气管的换热长度(图 1 中 L)也是个值得注意的问题。日本三菱电机要求钎焊范围 $1131 \pm 3.3(\text{mm})$,随着冰箱节能要求的提高,已有冰箱厂建议换热范围为 2m ;

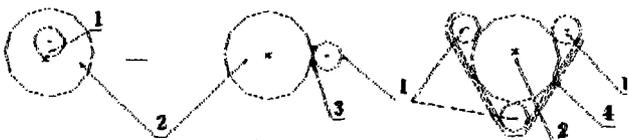


图 3 冰箱逆流回热器的组成形式

除去与低压回气管段的热交换部分,多余的毛细

管应盘绕(注意尽量减少局部阻力)置于回热器某一侧。放在靠蒸发器的一侧,对传热会更有效,放在冷凝器一侧,利于增强系统的稳定性;

当电冰箱制冷系统同时使用几根毛细管作节流机构(如在使用变频压缩机系统中、精确控温的多温区冰箱)时,毛细管的进液端就设置分液器。批量生产时为使各分液管中制冷剂流量稳定、重复性好,避免在分液管内产生二次节流的不利影响,所接出的分液管内径、长度和压力损失必须基本相同,分液管内壁及焊接处均要光滑和清洁,要有足够的内径和适当的弯曲半径。

三、毛细管的设计选型

尽管毛细管本身的结构相当简单,但制冷剂在其内的流动是相当复杂的。图 4 描述制冷剂沿绝热毛细管流动时,其压力、温度参数的变化过程。进入毛细管的制冷剂是过冷液体, B 为产生第一个气泡处, AB 是液态长度段,紧接着的 BC 是两相长度段。在管内径、长度及工质进口前状态都已定的条件下,流量随出口处的背压(P_0) 而变, P_c 不很低时,流量随 P_0 降低而增大。但当降到一定值时,出口处出现临界状况,出口处工质压力为 P_c ,流速等于当地音速,流量最大,若继续降低 P_0 ,流量不变,工质将在出口处由 P_c 自由膨胀到 P_0 。冰箱制冷系统中使用非绝热毛细管,从进口到达由纯液相向两相流动的转变点 B 的位置,压力和温度都在下降,且 B 点后移,即液体段增长,毛细管出口干度变小。小型制冷装置中毛细管背压多低于临界压力(P_c),所以尺寸一定的毛细管流量取决于入口条件,而与蒸发压力(P_0) 的变化几乎无关。

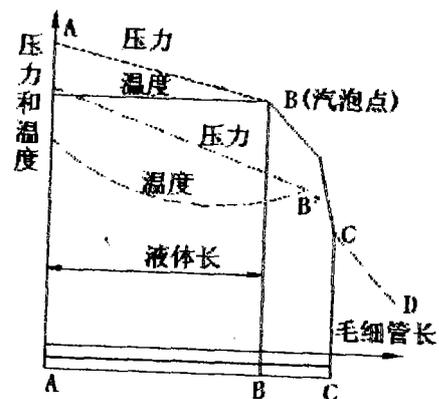


图 4 毛细管内压力与温度

毛细管在系统中起控制流量的作用,计算管道中的流量有如下经验公式:

$$G = 5400 \times d^{2.5} \times \Delta P \times L^{-0.5}$$

其中G - 流量;

ΔP - 入口、出口压差;

d - 内径;

L - 长度。

从上面的公式,我们可以知道,毛细管内径的大小对制冷循环量的影响比管长影响大,内径和长度一定的毛细管其性能又受到压缩机实际输气量、系统工况和制冷剂特性的影响。

从前面的分析我们可以知道,毛细管的功能取决于五个因素:管长、管内径、系统特性、热交换作用以及安装位置。后两项均在第二项中进行了详述,一个制冷系统一旦选择好了压缩机,及与之相配的蒸发器、冷凝器,最后就是确定毛细管的管长和内径。

众所周知,设计毛细管很难,自从毛细管诞生以来,国内外学者一直都对其流量特性进行模拟,通常有两种方法:一种是从基本方程出发,应用一定的数值计算方法来模拟;一种是使用实验数据回归关联式

法。近年来快速仿真人工智能方法也应用到了毛细管的模型计算中。但上述方法普遍是以绝热毛细管为研究对象,冰箱中使用的非绝热毛细管,则在前者基础上当量为绝热毛细管的流量计算。最常用的当量法是考虑因热交换引起毛细管内液体降温,将该温降作为附加过冷度叠加在毛细管入口过冷度上,再以此叠加后的总过冷度按绝热毛细管计算流量。

理论计算繁复,结果误差较大。实际上每一根毛细管都是凭经验设计的,凭经验或现成的毛细管尺寸定位模型初步估算毛细管的内径和长度。毛细管内径的选取又与系统使用的制冷剂有关,目前冰箱中使用的制冷剂主要有 R12、R134a、R600a 三种,它们的特性参数见下表。从表中参数可知 R134a 制冷剂易溶于水,对杂质敏感,为防止毛细管堵塞,除严格选择干燥过滤器中的分子筛外,毛细管内径也偏向较 R12 取大 10%。冰箱在相同制冷量基础上,R600a 的体积流量增加,日本三菱电机建议毛细管内径较 R134a 系统所用的增大 10%。

表 1 制冷剂特性参数对照表

代号	名称	分子式	分子量	溶水性	对杂质敏感性	30℃ 饱和液体密度
R12	二氯二氟甲烷	CCl ₂ F ₂	120.9	极微	敏感	1292kg/m ³
R134a	四氟乙烷	CH ₂ FCF ₃	102	极易溶	高度敏感	1187kg/m ³
R600a	异丁烷	CH(CH ₃) ₃	58.1	极微	敏感	545kg/m ³

一般均在选定内径之后,再通过优化实验来决定长度和系统的冷媒充注量。优化实验中,毛细管长度一般以 300mm 为调整单元,制冷剂充注量方面 R134a 以 5g 为调整单元,R600a 以 2g 为调整单元。通过实验修正定下的毛细管,再以流量计测定其在一定温度和压力下的流量,确定其为标准毛细管,为批量生产提供依据。

据介绍,日本三菱电机的做法有其独特处。首先按照冰箱毛细管安装特点和回热长度要求,先定下毛细管的长度,接着按系统所选压缩机理论排气量用经验公式估算出毛细管的内径,定下三根内径不同、长度相同的毛细管装入同一系统中,通过制冷剂充注量变化的优化实验,三选一,定下该系统的标准毛细管。毛细管内径与耗电量、制冷量的关系如图 5。

总之,根据设计工况选择毛细管,首先要使毛细管的阻力足以在其进口侧保持一段液封,又不至有过多液体积存在冷凝器,系统可以在容量平衡的条件下工作。无论用何种方法,理论计算分析、经验数据查

找都只能作为毛细管的初选。最终对应于任何一条毛细管与充注量的组合,都必须使试验冰箱在预定的运行条件范围内工作,确定其功耗和制冷量。从中找出最佳充注量和最佳毛细管选择。

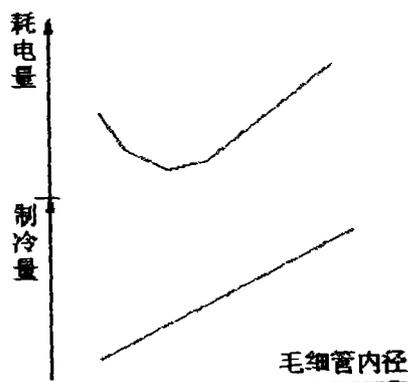


图 5 毛细管内径与制冷量、耗电量

(下转第 18 页)

量系统的经济性仍有一定的参考价格,且较简便,具有一定的实用性。

3. 结论:

通过以上对浦东国际机场能源中心燃气轮机汽电共生系统的分析评价,可以看出以中小型燃气轮机联合循环为基础的热电冷三联供系统是一种热能梯级利用的良好手段,对提高能量利用率是行之有效的,但其对能源有效利用的程序以及经济性好坏并不孤立的取决于燃气机组本身的性能,在上述第一部分热力学分析及第二部分热经济性中单位制冷成本及

发电成本的分析中可以看出“以热定电、热电平衡”以最大限度发挥汽电共生的优越性才是使整个系统获得良好效益的关键;而焓经济系数则通过加入对非能量因素的考虑为能量系统的比较提供了一种辅助手段。总之,以中小型燃气轮机联合循环为基础的热电冷三联供系统是一种高投入设备。需对其发电量与冷热产量的使用仔细平衡,并对系统从能源价格、运行时间等边界条件上作综合考虑,才会有较好的效益。

(上接第13页)

四、毛细管的工艺检测

毛细管的节流降压作用和流量大小直接影响冰箱制冷性能,故对其质量的检验,在冰箱制造中就显得尤其重要。

毛细管的工艺检测通常有两种方法①流量法、②压差法,两者的测试原理如图6所示,前者一般被用在毛细管的设计阶段,后者主要是作为批量生产时对毛细管的高效经济检验。

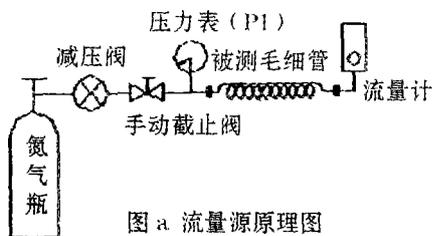


图 a 流量源原理图

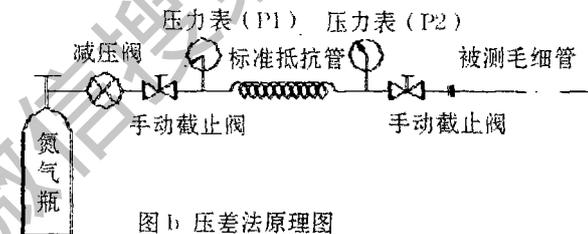


图 b 压差法原理图

图6 毛细管检测

氮气瓶内要求是露点在 -40°C 以下的干燥洁净氮气,压力表要求可测试 0.01MPa 压力,装置的接续部分全部保持密封。如日本三菱电机为华凌设计的BCD-182W冰箱,在批量生产判别所用毛细管是否合格时,使用的标准抵抗管为 $\phi 0.6$ (内径) $\times 1850$ (长度)毛细管,调节 $P_1 = 1.2\text{MPa}$,装入被测毛细管,在 P_2 显示 0.8MPa 时,判定该条毛细管合格。

日本三菱电机在冰箱设计时,除用流量法初选毛细管,经过冰箱性能实验,定下一条毛细管后,再用流量法、压差法确定标准毛细管检测参数外。在针对系统是否会发生脏堵的高温断续寿命试验中也有一项用流量法对毛细管进行考核的内容,具体如下:

试验条件——①环境温度: 40°C ;②运行条件:ON/OFF = 30/10 强制断续运转;③设定条件:用玻璃

棉等隔热材料将冰箱箱体包好,加速温度上升;④负荷条件:将门的前端打开约 10mm 宽,给箱内以负荷;⑤运转时间 1000 小时;⑥其它:对风冷冰箱,压缩机积算运转时间每 6 小时强制除霜。

寿命试验后,对毛细管流量降低率的判定是:如果下降 10% ,判断为异常。在压力表显示 $P_1 = 0.6\text{MPa}$ 时,对 $\phi 0.7$ (内径) $\times 2300$ (长度)毛细管的标准流量为 $4\text{L}/\text{min}$, $\phi 0.6$ (内径) $\times 2300$ (长度)毛细管的标准流量为 $2.3\text{L}/\text{min}$ 。

冰箱在使用过程中发生毛细管冰堵和脏堵时,首先应及时更换干燥过滤器,在不得已换接毛细管时,要先经过清洁干燥处再焊接,另外不同规格不同品牌的冰箱所用毛细管都不同,在维修时不能任意更换其它规格的毛细管。