

# 异丁烷 (R600a) 制冷剂在 无霜电冰箱上的应用

黄小池 吴世庆 谭 蓁 顾中平 潘 坚

(广东科龙电器股份有限公司 广东省顺德市容奇镇容港路 8 号 528303)

**摘要:** 本文在分析异丁烷制冷剂特性的基础之上论述了无霜电冰箱采用异丁烷作制冷剂的技术难点及依据标准, 阐明了无霜冰箱采用异丁烷作制冷剂的电器和制冷改造要点, 并对异丁烷无霜冰箱的整机安全性和整机性能作出评价。

**关键词:** 异丁烷 无霜电冰箱 制冷剂 防爆

## Isobutane Refrigerant Used in No-frost Refrigerators

**Abstract:** Based on the characteristic analysis of isobutane refrigerant, this paper explains the technical difficulties and the based standards for isobutane refrigerant used in no-frost refrigerators. It expounds the key retrofitting points of the electrical units and the refrigeration system of no-frost refrigerators with isobutane as the refrigerant. Moreover, it evaluates the overall safety and the overall performance of isobutane on-frost refrigerators.

**Key words:** isobutane, no-frost refrigerator, refrigerant, explosion-proof

## 前言

众所周知, 电冰箱上一一直广泛采用的 CFC-12 制冷剂和 CFC-11 发泡剂已被证实能破坏臭氧层和产生温室效应。为了保护人类赖以生存的大气环境, 国际上包括中国在内的许多国家都已签定了在规定时间内停止使用 CFCs 类物质的协议。在诸多 CFCs 类物质的替代方案中, 异丁烷、R134a 及混合类工质已成为电冰箱制冷剂的主要替代物。而异丁烷对臭氧层破坏系数为零, 温室效应系数几乎为零, 且与 CFCs 类工质相比具有节能低噪音的突出

优点, 是国际上最环保的无 CFC 替代物。德国首先将异丁烷作制冷剂用于直冷式电冰箱上, 此后在其它欧洲国家广泛推广。我国自 1993 年起引进、吸收异丁烷电冰箱生产技术, 现年生产异丁烷直冷式电冰箱已达到一百万台以上。

但对于无霜冰箱, 目前尚没有一个国家能完全掌握异丁烷制冷剂替代技术。

无霜冰箱主要有两种类型, 即纯风冷型和风直冷混合型。纯风冷无霜冰箱通常只有一个蒸发器, 通过对冷风量的合理分配来满足冷冻室、冷藏室及果菜室等各个间室的不同温度需要, 其主要特点是各个

间室都由风的强制循环来冷却。该类无霜冰箱在日本、美国及其它大部分国家都比较普遍。风直冷混合型无霜冰箱通常有两个蒸发器,冷冻室有一个翅片式蒸发器,通过冷风的循环,使冷冻室降到要求的温度。冷藏室则与直冷式冰箱的冷藏室相同,有一个独立的蒸发器,该蒸发器一般采用板管式结构。该冰箱的主要特点是冷冻室由风的强制循环、冷藏室则通过自然冷却实现冰箱制冷。风直冷混合型无霜冰箱主要以德国、中国等少数国家为主。

无霜冰箱外露式蒸发器直接与食品储藏室相通,且电器控制系统复杂,电气元件多,异丁烷作为一种可燃物质,若用作无霜系列冰箱的制冷剂,则必须解决冰箱的安全问题。另外制冷系统也需要重新设计,技术难度较大。目前只有德国等少数欧洲发达国家对风直冷混合类的无霜冰箱进行

研究,并有产品问世。但是纯风冷的无霜冰箱异丁烷替代技术较风直冷混合类的无霜冰箱替代技术更加复杂、难度更大,该项研究在国际上还是个空白,并成为碳氢应用技术发展的障碍。

近几年来,风冷和风直冷混合型无霜冰箱由于无需人工除霜,使用方便,并具有制冷速度快、储藏箱内温度均匀等优点,而风直冷冰箱更是结合了风冷和直冷冰箱的优点,冷冻室无霜制冷快、冷藏室具有保湿功能,因此无霜冰箱在市场上越来越受欢迎。

由此可见,进行风冷和风直冷无霜冰箱的异丁烷替代技术研究已成了冰箱界的当务之急,它的研究成功无疑将使异丁烷成为更加完美的电冰箱无氟利昂替代工质,极大地推进无氟利昂替代进程。

表1 异丁烷制冷剂与 CFC-12 和 HFC-134a 主要性能对比

	CFC-12	异丁烷	HFC-134a	比较说明
臭氧层破坏系数 (ODP)	1.0	0	0	异丁烷制冷剂的 ODP 和 GWP 几乎均为零,对环境完全没有破坏作用,而 HFC-134a 对全球变暖有较大影响。
温室效应系数 (GWP)	3.1	0.01	0.27	
冷凝压力 (+40℃, bar)	10.088	5.319	10.164	异丁烷较低的冷凝压力、蒸发压力和排气温度减少了系统泄漏的可能性,提高系统效率,延长了压缩机的使用寿命。
蒸发压力 (-30℃, bar)	1.0041	0.468	0.8436	
理论排气温度 (℃)	120-125	100-105	125-130	
液相密度 (kg/m <sup>3</sup> , -25℃)	1472.0	608.3	1371.0	异丁烷较低的液相密度,使得充灌量大为减少。
润滑油	矿物油	矿物油	酯类油	1. HFC-134a 所用酯类油极强的吸水性,以及 HFC-134a 对杂质(如石蜡等)的高度敏感性,使得 HFC-134a 冰箱及压缩机生产必须保持苛刻的生产条件,制造难度较大。
对杂质的敏感性	敏感	敏感	高度敏感	2. HFC-134a 冰箱极易在较短的时间内因毛细管堵塞引起制冷系统破坏。
溶性	极微	极微	极易溶	3. HFC-134a 冰箱系统故障的维修也存在较大困难。
真空度要求	一般	一般	高	
材料兼容性	好	好	不好	

## 1. 主要替代工质的特性对比及其优缺点

目前冰箱的主要替代工质是异丁烷、HFC-134a 及混合类工质。由于混合类工质替代成本较低,对冰箱系统及生产线几

乎可以不作改动,故在发展中国家使用比较普遍。但该类工质对臭氧层还具有一定的破坏作用,有一定的温室效应,属于过渡型制冷剂,而且该类工质的冰箱存在噪声大、能耗大的缺陷。因此,目前国际上比较公认的是异丁烷和 HFC-134a 两种制冷剂。

前者以德国为主,包括欧洲大部分国家;后者是以美国、日本为主。异丁烷分子式为 $C_4H_{10}$ ,制冷剂代号为R600a,与CFC-12和HFC-134a相比,异丁烷制冷剂具有显而易见的优势。

异丁烷的主要缺点是它的易燃易爆性,当在空气中的含量为1.8%—8.4%(体积比)时,如遇火花则会燃烧或爆炸。因此,用异丁烷作制冷剂的电冰箱在设计时必须加以改进或重新设计,将燃烧和爆炸的可能性完全排除。

## 2. 直冷式电冰箱应用异丁烷制冷剂概述

直冷式电冰箱的冷藏室蒸发器被埋在箱体的隔热层中,与冷藏箱内的电器件如温控器、灯泡、门灯开关等都由内胆隔开,而冷冻室内尽管有外露的蒸发器,但一般没有电器件,因此这种异丁烷冰箱几乎不存在燃烧和爆炸的可能性,这也促使了德国以及欧洲大部分国家接受了以异丁烷作电冰箱的制冷剂。

我国自1993年开始吸收、引进异丁烷冰箱生产技术,并成功用于直冷式电冰箱。1994年科龙公司率先批量生产异丁烷电冰箱,1998年突破百万台,下图列出1994—1998年科龙公司的异丁烷电冰箱的生产量。

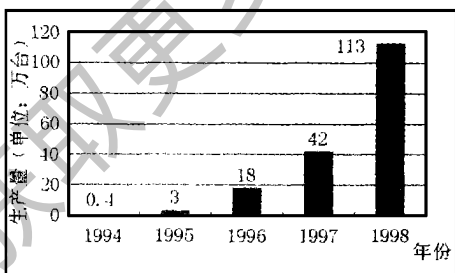


图1 1994—1998年科龙公司的异丁烷无CFC电冰箱的生产量直方图

## 3. 无霜电冰箱采用异丁烷作制冷剂的难点及技术依据标准

无霜电冰箱的翅片蒸发器与食品储藏室(包括冷藏室、冷冻室和果菜室等)是相通的,而食品储藏室及风道内有许多可能产生电火花的电器元件,如:风扇电机、除霜加热器、温度熔断器、照明灯、门灯开关等。显然这种结构的电冰箱若使用异丁烷作制冷剂是存在一定危险性的。这也正是无霜冰箱采用异丁烷作制冷剂的难点所在。

异丁烷作为一种碳氢制冷剂具有可燃性,因此确保电冰箱的安全运行是设计异丁烷无霜冰箱的重要技术关键。

燃烧爆炸的发生取决于三个条件:一是异丁烷制冷剂泄漏;二是泄漏的异丁烷制冷剂到达爆炸浓度;三是电器件产生电火花或电器件表面温度到达异丁烷燃点。这三个条件缺一不可,异丁烷无霜冰箱的设计也是针对这三点来展开。

首先,减少制冷管路尤其是翅片蒸发器的泄漏可能性是确保系统安全运行的重要保证。蒸发器如采用双层铜管,则可以将泄漏的可能性降到最低,甚至可以认为此时的冰箱是绝对安全的。但双层铜管的加工工艺复杂,成本较高,国内尚不具备生产能力,因此,要做到蒸发器的彻底防漏还不太可能。但是可以采取减少泄漏的可能性,如蒸发器保压检漏、整机氦质谱检漏等。这些在异丁烷冰箱设计和生产上相当重要。

其次,在泄漏的异丁烷可能达到爆炸浓度区域的电器件必须进行防爆设计,设计标准依据IEC79—15《爆炸性气体环境用防爆电气设备 第15部分“n”型电气设备》——即R600a防爆电器零部件的设计要求。

总之,整机的安全性应满足

EN60335-2-24/A53《家用和类似用途电器的安全 第二部分：冷藏箱、食品冷冻箱及制冰机的特殊要求》——即 R600a 冰箱整机的设计要求。

#### 4. 无霜电冰箱采用异丁烷作制冷剂的电器设计改造要点

根据 IEC79-15《爆炸性气体环境用防爆电气设备 第 15 部分“n”型电气设备》标准要求,对电器件提出设计改造要求。

异丁烷冰箱中的防爆电器件,根据气体种类属 II A 组别,即不太可能产生爆炸性气体空气混合物,即使产生也只能短时间存在。爆炸性气体空气混合物需较高的温度和较高的能量才能点燃。在 II A 组,危险性物质通常封闭在密闭的容器或系统内,当容器或系统意外发生破裂或损坏时,发生危险性物质泄漏。在该危险场所,除了使用 0 区、1 区可以使用的电器件外,还可使用“n”型电气设备。具体包括:电器件的防护等级、机械强度、连接装置、插头和插座、电气间隙、间隔和爬电距离、介电强度、耐热老化、耐寒等要求。

下面以科龙公司容声牌电冰箱 BCD-190WB/HC(注:在型号后加“/HC”代表以碳氢化合物异丁烷作制冷剂)为例介绍电器件改造要点。

##### 4.1 科龙 BCD-190WB/HC 电冰箱简介

BCD-190WB/HC 是纯风冷型的无霜电冰箱,上冷冻下冷藏,采用电脑控制,该冰箱及电器件示意图如下图所示:

##### 4.2 科龙 BCD-190WB/HC 电冰箱改造要点:

###### 4.2.1 BCD-190WB/HC 采用电脑控制给异丁烷应用带来的优势

由于 BCD-190WB/HC 采用电脑控制,因此不存在门开关和机械式温控器动作时的电火花。电脑控制的主控制板安装在冰

箱外部,远离了可能泄露的异丁烷气体,因此当主控板上的元器件发热或继电器动作产生火花时,不会点燃异丁烷气体。门开

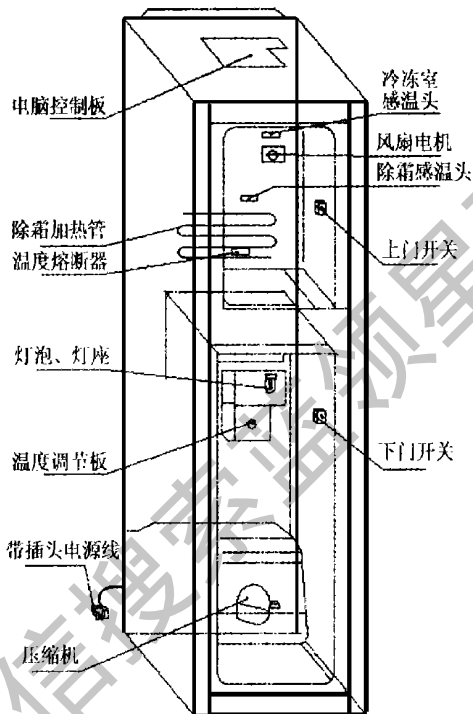


图 2 科龙 BCD-190WB/HC 电冰箱电器件示意图

和温度调节电路板在冰箱内部,门开关只是起采集信号的作用,而不是串联在风扇电机或内部照明灯回路中,不直接控制负载通断电;温度调节电路板也只是将温度设定值通过弱电信号传至主控制板。因此,设计时主要考虑由主控制板至门开关和温度调节电路板的电压和电流,并确保电压和电流值在各种情况下符合本质安全的防爆要求。

###### 4.2.2 除霜系统改造要点

除霜系统的关键是除霜加热管,除霜加热管作为发热元件,其表面温度必须比异丁烷的燃点温度(494℃)低 100℃,即不能超过 394℃。普通 CFC-12 为制冷剂的无霜冰箱一般采用红外辐射加热方式,加热

管的表面温度超过 394℃, 而且在化霜过程中蒸发器表面温度不均匀, 化霜功率较大, 化霜时间较长。科龙 BCD-190WB/HC

经改造后, 采用电阻式接触加热方式, 其化霜参数可参见下表:

表 2 红外辐射加热和电阻式接触加热化霜参数对比

	CFC-12	异丁烷	备注
电冰箱型号	BCD-190WB	BCD-190WB/HC	
加热方式	红外辐射加热	电阻式接触加热	
化霜过程加热管表面最高温度	> 394℃	< 40℃	环境 38℃, 电压为 252V
化霜过程蒸发器最高温度	蒸发器上部	8℃左右	电阻式接触加热蒸发器的温度均匀性取决于电阻加热管的合理设计。
	蒸发器下部	> 20℃	
加热管功率	145W	120W	
化霜时间	20 min 左右	17 min 左右	

#### 4.2.3 BCD-190WB/HC 电冰箱电器零部件防爆设计要点

电器零部件的防爆设计主要从以下几个方面着手, 最终目的是限制最高表面温度和避免产生电火花。具体要求如下:

- a) 采用耐热、耐寒材料;
  - b) 对易发生短路危险或产生火花危险的部位采用密封结构和温度保护装置;
  - c) 采用符合要求的连接器, 保证连接部位的强度;
  - d) 采用防腐蚀镀层, 保证连接部位的表面不易锈蚀, 并从结构上确保其充分接触;
  - e) 对于有相对运动的部件, 保证有足够的间隙或有防摩擦的保护;
  - f) 采用符合电气强度要求的绝缘材料;
  - g) 采用限制温度的装置或降低加热器的发热功率, 从而降低最高表面温度;
  - h) 采用本质安全型的防爆电器件。
- BCD-190WB/HC 防爆电器件包括: 防爆除霜加热管、防爆照明灯具、防爆风扇电机、防爆温度熔断器和防爆接插件等。

#### 5. 无霜电冰箱采用异丁烷作制冷剂的制冷设计改造要点

为适应异丁烷制冷剂的特性, 须对制冷系统进行匹配性研究, 以获得最优的制冷性能。下面就无霜电冰箱采用异丁烷作制冷剂的制冷设计改造情况作些介绍。

##### 5.1 异丁烷制冷剂充注量要求

异丁烷的充注量由试验确定, 以 BCD-190WB/HC 冰箱为例, 异丁烷的充注量为 43 g, 而 BCD-190WB 的 CFC-12 的充注量为 115 g, 充注量约为原 CFC-12 的 37%。

##### 5.2 压缩机要求

必须采用异丁烷专用压缩机, 配备密闭式或固态式启动和保护装置。压缩机的制冷量和性能系数是选配压缩机的主要指标。异丁烷专用压缩机与 CFC-12 压缩机相比具有以下一些性能特点:

- a) 比较高的性能系数;
- b) 较低的噪音和振动;
- c) 高低压差较小, 运行工况优越, 可靠性好。

### 5.3 冷凝器和蒸发器

冷凝器和蒸发器可与 CFC-12 系统相同,不需另作改动。当然蒸发器改用接触式电阻加热形式后,结构应有所改动。

### 5.4 毛细管

毛细管长度可仍然采用 CFC-12 系统长度。但为获得最佳的性能,可通过测试,对毛细管长度作适当调整。

## 6. 异丁烷作制冷剂无霜电冰箱的整机安全性评价和整机性能评价

### 6.1 整机安全性通过 TUV 测试

根据 EN60335-2-24/A53《家用和类似用途电器的安全 第二部分:冷藏箱、食品冷冻箱及制冰机的特殊要求》,科龙 BCD-190WB/HC 整机安全性通过 TUV 测试,具体内容如下:

6.1.1 制冷剂灌注量小于 150 g。

6.1.2 有“小心火灾”的标记。

6.1.3 有关于处理、清洁等方面的警告信息

6.1.4 陷藏式制冷系统:模拟泄漏(毛细管接头处),测定内部浓度

6.1.5 可见式制冷系统:电器件符合 IEC79-15 标准。

6.1.6 在不用防爆电器件的场合,要做以下三项试验:

a) 外部接头处的泄漏是否会泄漏到食品储藏室中。

b) 食品储藏室中的泄漏在门打开或关闭时,是否会对外部电器有影响。

c) 从制冷系统的泄漏是否会对外部电器系统有影响。

6.1.7 暴露于泄漏气体中的器件表面温度:燃点温度减 100℃(494℃-100℃)。

6.1.8 防锈、防腐保护。

### 6.2 模拟爆炸实验

为了验证防爆设计,我们在南阳防爆电气研究所(国家防爆电气产品质检中心)

对异丁烷无霜电冰箱的防爆安全性以及发生瞬间爆炸时的破坏性进行模拟试验。

#### 6.2.1 模拟爆炸实验测试项目:

a) 冰箱正常制冷的安全性:充 R600a 气体至标准浓度(40 g×80%浓度下的最佳爆炸浓度),冰箱通电至压缩机有不少于三次开停,看是否有爆炸。

b) 除霜加热系统的安全性:充 R600a 气体至标准浓度(40 g×80%浓度下的最佳爆炸浓度),强制化霜,至温度熔断器熔断,观察是否有爆炸。

c) 照明灯具的安全性:关上门,充 R600a 气体至标准浓度(40 g×80%浓度下的最佳爆炸浓度),在通电状态下,让灯泡不断的点亮和熄灭,观察 10 分钟内是否有爆炸。如不爆炸,则换上各种有裂纹的灯泡(先用细小裂纹,后用大裂纹)重做本试验。

d) 爆炸后果试验:如果上述试验不能使冰箱爆炸,则充 R600a 气体至标准浓度(40 g×80%浓度下的最佳爆炸浓度),人为点火,观察爆炸后果。

#### 6.2.2 模拟爆炸实验测试结果:

上述 a)~c) 项均不发生爆炸,防爆设计合格。d) 项人为点火发生瞬间燃烧爆炸,门被震开,爆炸火焰随即熄灭,箱内并无留下任何燃烧痕迹。从模拟爆炸实验来看爆炸压力低,且持续时间短,不会造成设备或防护罩的燃烧,仅门被震开。

### 6.3 整机性能评价

我们以 BCD-190WB 电冰箱为基础,对采用各种不同制冷剂的电冰箱产品进行了性能对比测试,各项测试指标符合 GB/T8059.4-93《家用制冷器具 无霜冷藏箱无霜冷藏冷冻箱无霜冷冻食品储藏箱和食品冷冻箱》标准有关内容要求,其中耗电量和噪声测试对比结果如下图所示:

从上图可以看出,采用异丁烷制冷剂电冰箱的耗电量和噪声都明显低于使用其

它制冷剂的产品。与 CFC-12 相比,耗电量较低约 12%,噪声降低约 2dB(A);与 HFC-134a 相比,耗电量较低约 14%,噪声降低约 2.1dB(A);与三元混合工质 R401A 相比,耗电量较低约 20%,噪声降低约 3.1dB(A)。由此可见,采用异丁烷制冷剂的冰箱整机性能优越。

## 结束语

总之,异丁烷作电冰箱的制冷剂,以节能低噪音、对大气完全没有破坏作用的优势,在众多的替代路线中独树一帜。德国率先在直冷和风直冷无霜冰箱上采用异丁烷制冷剂,我们在吸收德国异丁烷替代技术的基础上又突破禁区率先在风冷无霜冰箱上成功使用异丁烷冷剂。它的研究成功,攻克了碳氢应用技术发展的障碍,填补

了国际上应用异丁烷技术的一项空白;它的全面推广应用,使得异丁烷可以应用于直冷、风直冷和风冷等所有冰箱产品上,从而使异丁烷成为最具完美的替代工质。另外对于增加我国产品的高新技术含量,增强产品的竞争力,拓展国际和国内市场,保护大气环境,彻底履行国际协议都具有非常重要的意义。

## 参考文献

- [1] IEC79-15《爆炸性气体环境用防爆电气设备 第15部分“n”型电气设备》。
- [2] EN60335-2-24/A53《家用和类似用途电器的安全 第二部分:冷藏箱、食品冷冻箱及制冰机的特殊要求》。
- [3] Klaus Meyersen 博士,《R134a 运用于家用电冰箱的一些问题》。
- [4] Cool concerns Newbury, UK,《采用 HCs 制冷剂的制冷装置、家用和商用装置 安全设计手册》。