

R290 作为家用空调制冷剂的研究

青岛海尔空调器有限总公司

2009.09

一、现有家用空调制冷剂使用情况与发展趋势

二、R290替代R22的可行性分析

三、实验数据分析

四、产品展示

五、R290做为家用空调制冷剂的安全问题

六、结论

现有家用空调制冷剂使用情况与发展趋势

自从上世纪70年代证实卤代烃物质在大气层中分解出的氯原子会对大气臭氧层产生强烈的破坏作用，从而导致对地球环境有害紫外线的增加后，为保护大气臭氧层，《蒙特利尔议定书》要求禁止使用CFC类制冷剂并逐步淘汰HCFC类制冷剂，由此开始了世界范围内的制冷剂替代工质的研究与发展。

虽然HCFCs的禁用日期规定为2030年，基于对环境保护的进一步认识，世界各国均加快了替代HCFCs的步伐，我国也将在2013年将使用量冻结在2009与2010年的平均消耗量基线水平上，寻找R22替代工质的任务极其紧迫。

。

现有家用空调制冷剂使用情况与发展趋势

对于HCFCs的替代，目前主要有两条路线：

以美国和日本为主的HFC替代路线，其中两元近共沸混合制冷工质R410a已广泛应用。R410a的排气压力比R22高50%—60%，需提高压缩机运动部件的耐磨性和系统管路的强度；且HFC类制冷工质虽然臭氧衰减指数ODP为0，但温室指数GWP仍较高，属于需减排的温室气体。

欧洲特别是德国主张走碳氢化合物替代路线。碳氢化合物是天然存在的物质，与自然的亲和性已经延续了数百万年，其ODP、GWP值为零，不会对环境造成危害。

R22等许多人工合成的物质的大量和长期使用，逐步显现出对生态环境的巨大破坏作用。随着世界制冷空调技术的应用和发展，对制冷工质的需求量逐年上升，每年达到数十万吨的消耗量。因此，从对环境的长期影响来看，避免使用那些最终会排放到生物圈中的非自然工质，重新起用自然工质是一种安全的选择。

R290替代R22的可行性分析

表1 R290与R22基本物理性质对照表

制冷剂代号	R22	R290
分子式	CHClF ₂	C ₃ H ₈
分子量	86.5	44.1
标准沸点 (°C)	-40.8	-42.1
凝固点 (°C)	-160	-187.7
临界压力 (MPa)	4.99	4.24
临界温度 (°C)	96	96.8
临界比容 (m ³ /kg)	0.001904	0.004545
0°C汽化潜热 (kJ/kg)	204.87	376.334

•如表1所示R290的基本物理性质是较好的，如标准沸点、凝固点、临界点等参数和R22非常接近。

R290替代R22的可行性分析

饱和蒸汽压

对比R290与R22的饱和蒸汽压力线接近，在20℃以下的低温区段，也就是家用空调制冷剂蒸发时两种制冷剂的压力线基本重合；而在家用空调常用的冷凝段，也就是在30度以上R290的压力与R22的压力开始拉开距离，R290较R22压力略低，这样的特点可以保证R290在不影响压缩机进气量工作的前提下有效地降低压缩比，提高压缩机的工作效率。并且家用空调器选用R290作为制冷剂，部件耐压方面不需要进行改进。

饱和液体密度和饱和气体比体积

在饱和液态时，R290比R22的密度小很多，在气体时，R290的蒸汽比体积比R22的大，这意味着在相同的内容积下，R290系统的关注量要比R22小得多，很多实验表明，在相同系统下，R290的最佳灌注量注量仅为R22的40%-45%左右。

R290替代R22的可行性分析

汽化潜热

在家用空调器可能达到的制冷剂温度 -20°C 到 70°C 间，在相同温度下，R290 的汽化潜热是R22 的的1.8倍以上。汽化潜热 r 、蒸发器的制冷量 Q_0 、蒸发器入口干度 X_i 之间有此关系： $Q_0=M*r*(1-X_i)$ ， M 为制冷剂质量流量。由于R290 的蒸汽比体积较小而导致质量流量 M 低的缺点，可以通过他们的汽化潜热 r 来来弥补。

饱和液态比热容和饱和气态比热容

在相同温度下，R290 的饱和液态比热容和饱和蒸汽比热容均比R22 的大。在相同的蒸发器负荷下，R290 的吸气温度比R22 的吸气温度较低，排气温度也低，可以减少压缩机压缩过程气体与汽缸之间的热交换，从而减少不可逆损失，降低能耗。

R290替代R22的可行性分析

饱和液态粘滞系数和饱和气态粘滞系数

R290 的气态动力粘滞系数和饱和液态动力粘滞系数都比R22 的小。粘滞系数小一方面可以减少流体与管壁以及流体内部的摩擦损失, 另一方面也可以减少传热时的附面层厚度, 从而增大传热系数。

饱和液态导热系数和饱和气态导热系数

R290 的饱和液态的导热系数和饱和气态的导热系数都比R22 的大。导热系数越大, 制冷剂在冷凝器和蒸发器中的传热系数越大, 有益于提高系统性能。

实验数据分析

R290与R22实验数据对比

通过对R290进行实验，由原灌注R22制冷剂的26机分体空调器系统，更换同排量压缩机后(压机油更改)灌注R290在GB/T 7725-2004的额定制冷工况下进行测试，经调试最佳节流后，样机在不同灌注量下其能效曲线如图1：

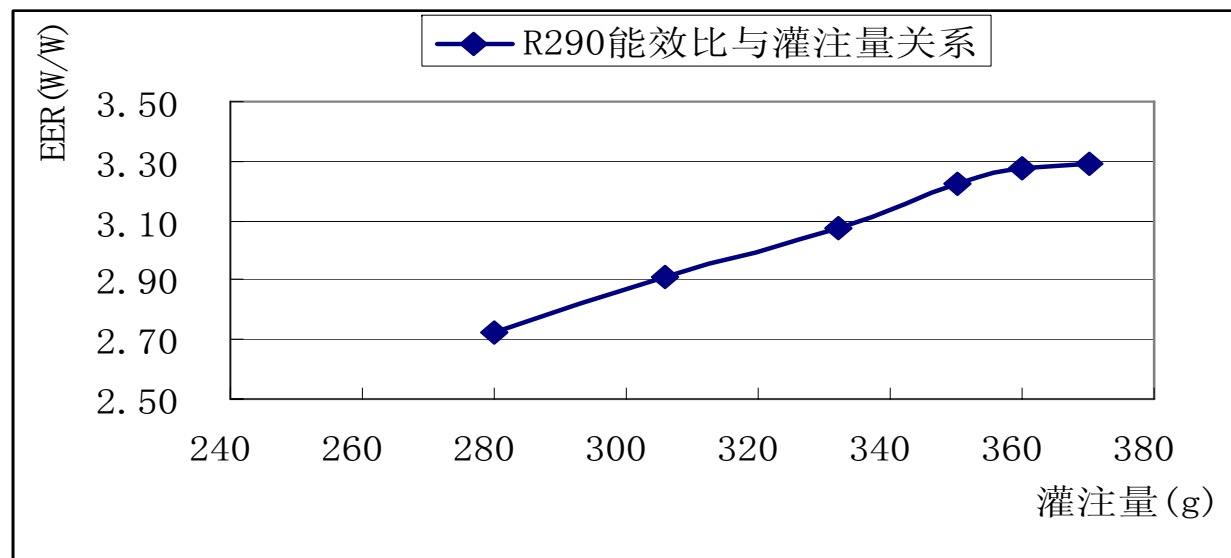


图1 R290样机能效比与制冷剂灌注量的关系

实验数据分析

R22与R290样机数据对比

表2 R22与R290样机数据对比

参数	制冷剂		增减率
	R22	R290	
能力(W)	2664	2295	-13.9%
功率(W)	817	701	-14.2%
能效(W/W)	3.26	3.27	0.4%
风量(m ³ /h)	449	442	•
排气温度(°C)	80.4	65.0	•
吸气温度(°C)	16.6	17.9	•
冷凝器中部(°C)	44.7	43.9	•
冷凝器出口(°C)	39.7	39.0	•
排气压力(MPa)	1.78	1.55	-12.9%
吸气压力(MPa)	0.66	0.61	-7.6%
压力比	2.70	2.54	-5.8%
最佳注气量(g)	850	360	-57.6%

•综合比较，R22系统直接灌注R290，灌注量仅需原来的42.4%，能力下降约13.9%，能效略有提高，R290替代R22在性能上是完全可行的。

实验数据分析

R290家用空调器性能改进

由于碳氢制冷剂R290的可燃性，且在一定浓度范围内才会燃烧，所以减少制冷剂灌注量是保证R290在家用空调器上安全使用的有效手段。在IEC 60335-2-40和EN 378-1: 2008中均对空调器使用碳氢制冷剂的最大安全灌注量做了限制，其中R290空调器在10平米房间内按2.2m的安装高度时，其灌注量不允许超过290g。

按照经验，空调器冷凝器中的制冷剂约占整个循环系统的40-50%左右，即实验样机中制冷剂约有160g制冷剂在室外机，要将R290的灌注量减少至290g以下，即需减少约70g，这就需要室外换热器减小约40%的内体积。为保证冷凝器的换热效果，室外冷凝器更换了 $\Phi 5$ 管径换热器替代原 $\Phi 7$ 管径换热器，并减小了尺寸，换热器内体积仅为原来的57%，由于铜管换热面积略有减小，加密了换热器翅片片距以保换热效果，改进后样机在不同灌注量下其能效曲如图2。

实验数据分析

在图2中可看出R290在此系统能效灌注量最佳点在275g，经过换热器更换小管径改进，样机可以达到高能效要求，并且灌注量满足IEC 60335-2-40和EN 378-1的规定。

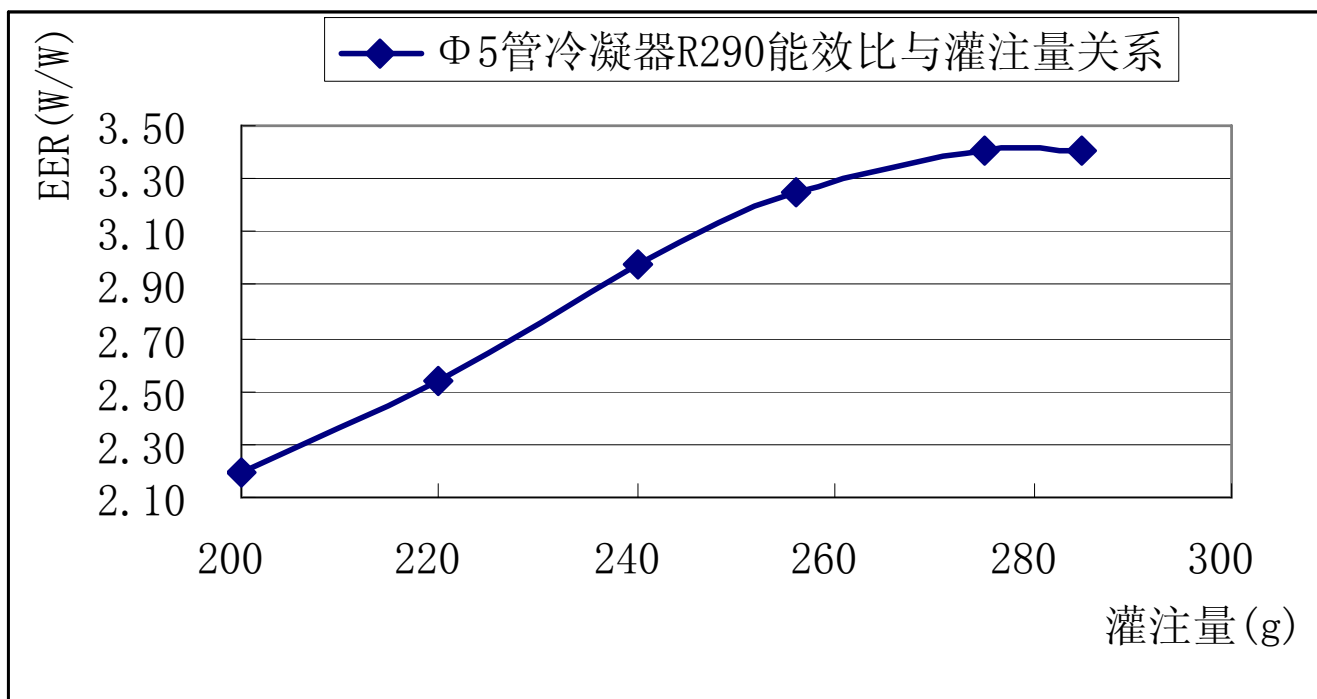


图2 使用 $\phi 5$ 管换热器后R290样机能效比与灌注量的关系

实验数据分析

表3是 $\Phi 5$ 管径换热器替代原 $\Phi 7$ 管径换热器后在最佳灌注点的样机性能数据，由于更换冷凝器后，冷凝效果较原冷凝器有所改进，样机排气压力与冷凝温度均有所降低，能效提升。

表3 R290样机数据对比

参数	冷凝器	
	• $\Phi 7$	• $\Phi 5$
•能力(W)	•2295	•2354
•功率(W)	•701	•691
•能效(W/W)	•3.27	•3.41
•风量(m ³ /h)	•442	•433
•排气(°C)	•65.0	•62.4
•吸气(°C)	•17.9	•15.7
•冷凝器中部(°C)	•43.9	•43.5
•冷凝器出口(°C)	•39.0	•39.8
•排气压力(MPa)	•1.55	•1.53
•吸气压力(MPa)	•0.61	•0.61
•压力比	•2.54	•2.51
•最佳注气量(g)	•360	•275

实验数据分析

R290家用空调器制热性能改进

在将制冷剂减少灌注量后，制热能力下降明显，仅为2095W，不能满足要求，为满足制热需要，改换大排量压缩机进行实验，经过实验，需在大排量压缩机，且灌注量达到400g时，制热能力才能满足要求。

根据以上数据可知，R290替代R22在性能上是可行的，但其能力有14%左右的下降，需更换更大排量压缩机保证原有性能。减小换热器内体积可有效减少R290的灌注量，并且达到较高能效，但制热性能会受到较大影响，制热量需要足够多的压机排气量与制冷剂灌注量才能达到要求。

•表4 增大压缩机后的制热数据对比

参数	压缩机	
	16.2	17.3
能力(W)	2095	2680
功率(W)	657	825
能效(W/W)	3.19	3.25
排气(°C)	61.8	62.8
吸气(°C)	6.3	3.2
排气压力(MPa)	1.33	1.62
吸气压力(MPa)	0.34	0.41
压力比	3.91	3.95
注气量(g)	275	400

实验数据分析

平行流微通道换热器的应用

根据实验数据，R290在制热使用时，其灌注量需增加。在制冷方面时可通过进一步采用平行流微通道冷凝器可进一步减少制冷剂灌注量，并提高能效。

平行流式微通道换热器是一种由多孔铝扁管和铝制波浪形翅片组成的高效紧凑式全铝换热器，散热片上开有百叶窗条缝，扁管是每根截断的，两端有集流管。实验中采用了多元平行流式冷凝器，其集流管中有隔片打断，每段管子数不同，刚进入冷凝器时，制冷剂呈气态，比容最大，管子数也最多，随着制冷剂逐渐冷凝成液体，其比容减小，管子数也相应减小，如图3、4所示。

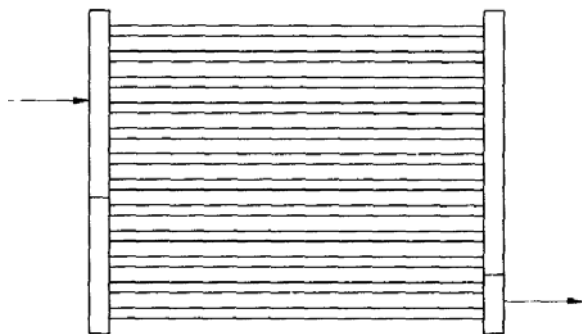


图3 平行流换热器示意简图

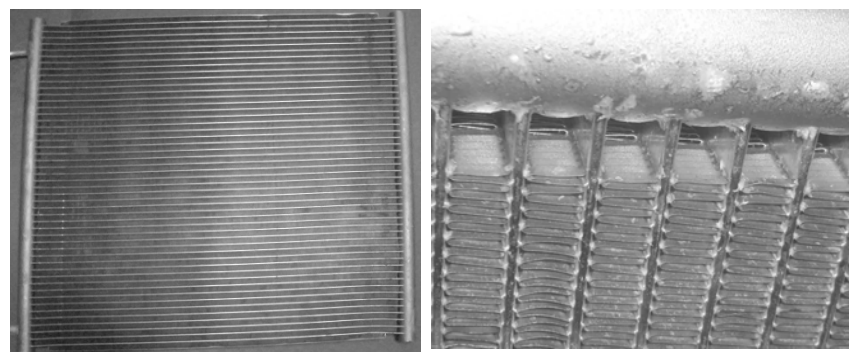


图4 实验使用平行流换热器与其翅片结构

实验数据分析

由于平行流微通道换热器结霜排水问题还有待解决，因此实验中只进行了制冷实验，样机灌注量与能效的数据曲线如图5所示：

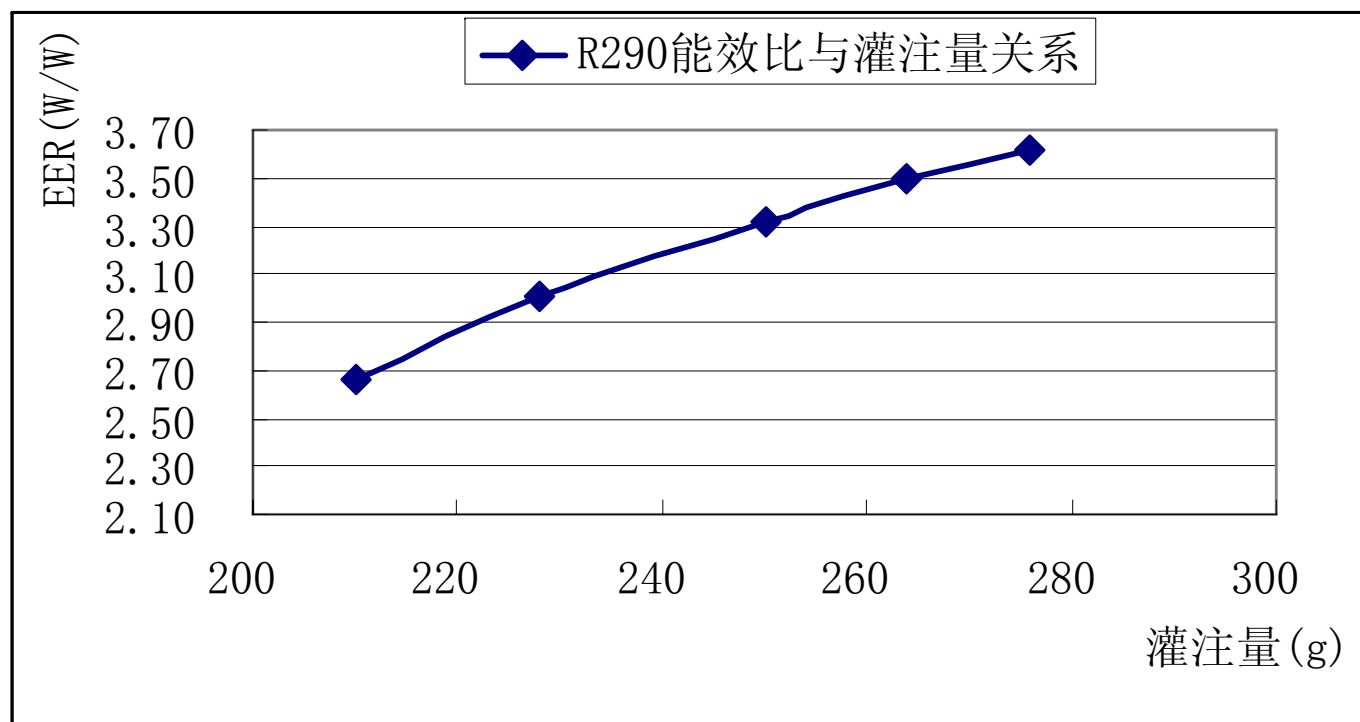


图5 使用平行流换热器后R290样机能效比与灌注量的关系

实验数据分析

表5 平行流换热器R290样机数据

参数	• 冷凝器	
	• 平行流	• 平行流
•能力(W)	•2393	•2477
•功率(W)	•680	•686
•能效(W/W)	•3.52	•3.61
•风量(m ³ /h)	•431	•431
•排气(°C)	•62.3	•61.9
•吸气(°C)	•16.0	•14.8
•冷凝器中部(°C)	•43.7	•44.0
•冷凝器出口(°C)	•38.7	•38.0
•注气量(g)	•264	•276

在更换多元式平行流微通道换热器后，样机在低灌注量下能效仍有很大提高，并且通过曲线发现随着灌注量的增加，能效还在增长，样机仍然有较大的可改进空间。

产品展示

海尔R290环保空调KF-23GW/RA(R3)-S1机型，整机充注量仅275g，满足IEC 60335-2-40规定的充注量标准，EER=3.72，能效等级达到国家一级能效标准。

产品参数

能力(W)	功率(W)	EER	充注量(g)
2380	640	3.72	275

产品外观



R290做为家用空调制冷剂的安全问题

R290是可燃的，但必须同时满足浓度在可燃浓度范围且温度高于着火点两个条件才能燃烧，R290的可燃浓度为体积浓度在2.1-9.5%之间，着火点470℃。根据实验，其实际爆炸条件更高[4]，即使在最佳起爆浓度5.5%下要810℃才发生爆炸。最低起爆浓度为2.6%，此时起爆温度为918℃。随着R290浓度的增大，起爆温度下降，到5.5%时起爆温度达到极小值的810℃，浓度再增大起爆温度将增大，当浓度为8.5%时起爆温度达到880℃，浓度超过8.9%和低于2.5%的R290空气混合气体就不具备可燃可爆性了，此时即使燃着的烟头也不足以使其爆炸。

由于制冷剂泄漏是按一定速度进行的，其浓度在室内是不均匀分布的，在发生泄漏时，空调器附近制冷机浓度较大，可能达到可燃浓度范围。实验表明，采用HC自然制冷剂，当灌注量小于600g时，完全泄漏后，只在泄漏点附近的局部区域内，可燃制冷剂的浓度达到或超过爆炸点下限并遇到点火源时会引起局部燃爆或火灾，当泄漏量为300g时，伤害半径只有0.65到0.9m[8]，伤害度有限，不会对人员造成伤害。

R290做为家用空调制冷剂的安全问题

在与其他材料相容性方面，实验表明黄铜、紫铜、碳钢、锰钢、铸铁、漆包线等均与R290相容，由于R290的压力略低于R22，R22制冷剂使用的部件均可直接使用在R290冷媒空调器上。

在生产方面，空调企业可以通过完善生产控制过程来控制安全生产，主要措施有：

R290应按易燃易爆的危险品标准运输储存，气瓶充装量系数不大于0.4kg/L；

生产线增加R290浓度检测装置，在制冷剂有泄漏的情况下及时报警；

生产线增加空气流通设备，保证空气循环，泄漏制冷剂可及时扩散；

改进生产灌注设备，减少生产过程中的冷媒泄漏；

改进空调试运转检验设备，防止电火花产生；

更改生产工艺，焊接部分与充注部分及检验部分分隔，防止泄漏的R290靠近火源；

采用机械封口代替火焰焊接；

R290作为家用空调制冷剂的安全问题

碳氢化合物最为制冷剂最大的局限是它的可燃性，发生泄漏后可能引起火灾与爆炸等危险事故，所以R290制冷剂安全性主要从防止制冷剂泄漏以及泄漏后采取的安全措施来控制。

现阶段家用空调器生产厂家的空调器密封性检测标准要求都很高，正常的空调器年泄漏量都可以控制在5g以下，不会产生任何危险。现在空调使用中制冷剂泄漏主要是因为安装时的连接紧密型不足或因意外造成的系统破裂导致的。由于R290在室内泄漏危险性较高，对于安装造成的室内泄漏，可以通过将室内机增加快速接头，或在出厂时将连机管与室内机作为一体，减少室售后在室内进行的机械连接来避免，确保制冷剂不向室内泄漏。

R290做为家用空调制冷剂的安全问题

空调器生产与安装均是专业技术人员进行操作，具有一定的专业知识，具有较强的安全意识与预防知识，而空调用户作为消费者一般并不具备这种能力，所以必须有足够的措施能够帮助用户解决使用中制冷剂泄漏造成的可能危险。

作为安全要求，一个必须的措施是在空调器室内机安装浓度检测探头以及报警用的指示灯与蜂鸣器。由于R290的比重大于空气，制冷剂会向下方聚集，所以气体探头应该安装在室内换热器的下方。当气体探头检测到制冷剂发生泄漏后，可以立即切断空调器主电源，避免电器件可能产生的电火花成为火源的隐患，同时应保持一定电源为报警指示灯与蜂鸣器供电，向用户发出警报，提示用户开窗通风，切断可能火源。为确保绝对安全，设定的气体探头报警浓度不应高于R290制冷剂最低燃烧浓度的1/3。

除检测作为制冷剂的R290外，我们选用的TP-1.1A非加热可燃性气体传感器还可检测甲烷、乙醇、丁烷、氢气等多种可燃性气体的泄漏，对家庭内的燃气等泄漏也可以起到预警的作用，保证人体健康与生命、财产安全。

为彻底杜绝可能的火源，对空调器进行模块化控制，在电器模块部分进行灌胶处理，避免电火花的产生。

所有结构件均采用防静电材料或进行防静电处理，杜绝电火花。

R290做为家用空调制冷剂的安全问题

由于R290的燃烧需要体积极限浓度在2.1%-9.5%，所以空调器设计时R290充注量必须尽可能少，以保证即使制冷剂完全在房间泄漏后，房间内R290要远低于此浓度。

现在世界各国与相关机构相继对碳氢制冷剂的安全使用出台了一些相应的标准，在IEC 60335-2-40 与EN 378:2008标准给出了最小房间使用面积与最大允许充注量的对应计算公式，其中R290在10平米房间安装高度2.2米时允许量为290g。

当系统充注量M： $(4\text{m}^3)*\text{LFL} < M \leq (26\text{ m}^3)*\text{LFL}$ 时：

$$M_{\max} = 2.5 \times (\text{LFL})^{5/4} \times h_0 \times (A)^{1/2}$$

式中：LFL ——冷媒最低可燃浓度，R290=0.038kg/ m³；

M_{max} ——空调系统的最大灌注量，kg；

h₀ ——室内机的安装高度，m；

A —— 房间面积， m²；

根据此要求充注制冷剂完全泄漏后若均匀分布在房间内，其浓度仅为0.013 kg/ m³，远低于R290最低可燃浓度。

结论

R290制冷剂是一种环保高效制冷剂，可以在家用空调器上使用并达到较高能效。通过减小换热器管径、采用微通道换热器等措施，可在达到高能效的前提下，即节省材料成本又减少制冷剂灌注量。虽然R290是可燃的，但经过减少灌注量并采取适当安全措施后是可以实现安全生产使用的。但减少灌注量后，由于制冷剂质量流量的不足，R290的空调器制热面临很大的问题，还需探索提高。

海尔，高效省电空调的领导者

Haier
一个世界一个家

谢谢！
