

文章编号:0253-4339(2013) 06-0042-06  
doi:10. 3969/j. issn. 0253-4339. 2013. 06. 042

分体式空调器使用 R290 作为制冷剂的泄漏研究

张 网<sup>1,2</sup> 杨 昭<sup>1</sup> 王 婕<sup>2</sup> 吕 东<sup>2</sup> 钟志锋<sup>3</sup>

(1 天津大学机械工程学院 天津 300072;2 公安部天津消防研究所 天津 300381;  
3 环境保护部环境保护对外合作中心 北京 100035)

**摘 要** HCFCs 和 HFCs 类制冷剂存在 ODP 和 GWP 值比较高的缺点。R290 具有良好的环保性能,但是其易燃易爆的特点是其使用的最大阻碍。为确定室内机发生泄漏所形成的燃爆范围,开展实体实验,研究了在不同房间面积、不同泄漏位置,不同泄漏速度条件下,R290 泄漏到室内浓度分布情况。结果表明,室内机发生泄漏时,仅在其附近可能形成燃爆区域。燃爆范围仅存在于泄漏过程中,一旦泄漏停止后,燃爆范围会迅速消失。  
**关键词** 制冷剂;泄漏;分体式空调;连接头;蒸发器;R290  
**中图分类号**:TB663; TB664 **文献标识码**:A

Leakage Research of Split-type Air-conditioner using R290 as Refrigerant

Zhang Wang <sup>1,2</sup> Yang Zhao<sup>1</sup> Wang Jie<sup>2</sup> Lü Dong <sup>2</sup> Zhong Zhifeng<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300072, China; 2. Tianjin Fire Research Institute of MPS Tianjin, 300381, China; 3. Foreign Economic Cooperation Office of Ministry of Environmental Protection Beijing, 100035, China)

**Abstract** The ozone depletion potential (ODP) and global warming potential (GWP) of HCFCs and HFCs are higher than hydrocarbons (HCs). R290 is perfect in environmental protection and energy saving performance. In order to determine the combustible region of leaked R290 from indoor unit of air-conditionerthis study, a test room was established in this study. The distribution of R290 concentration was studied after it leaked in the room with different room area; installation height of indoor unit, location of the leakage and different leakage rate. The results showed that combustible region is limited only in the region very close to the indoor unit, and combustible region only exists during the leakage process, which will quickly disappear once the leakage stops.  
**Keywords** refrigerant; leak; split-type air-conditioner; connector; evaporator; R290

目前国内外家用空调中普遍使用的制冷剂是 HCFCs 类物质,但其对臭氧层有很大的破坏作用。目前替代 R22 有两条技术路线,一条是研发 HFC 类物质,比如两元近共沸混合制冷工质 R410a 和三元非共沸混合制冷工质 R407C。另一条路线是采用天然工质,如 R290、R717 等。目前在选择替代制冷剂时,ODP 值不再是唯一的评判标准,GWP 值的权重越来越大<sup>[1]</sup>。HFC 类制冷剂虽然 ODP 值较低,但具有很高的 GWP 值。R290 的 ODP 值为 0, GWP 值为 3,具有很好的环保性能,但是 R290 具有易燃易爆的特点。其爆炸极限为 2.1%~9.5%。因此推广使用 R290 必须解决其泄漏、燃爆的问题。表 1 给出了几种常用制冷剂的火灾危险性参数的对比<sup>[2-4]</sup>。

1 实验房间及供气系统

为了研究空调器使用 R290 后,在室内发生泄漏后的浓度分布规律,我们建立了实验房间。实验房间参照普通公寓房卧室设计,房间面积 4.8m×3.6m(下文中称为大房间),房间的高度为 2.6m。当需要在较小房间内进行实验时,可在 4.8m 的房间长度上增加隔断,使房间面积变为 3.6m×3.6m(下文中称为小房间)。这两种房间面积用来模拟普通公寓房的主、次卧室。实验房间面积可变有助于研究不同可燃工质泄漏量在不同面积房间内泄漏后浓度分布对事故风险的影响。  
实验房间采用角钢为支架,敷设硅钙板,房间内部墙壁敷设不吸附可燃制冷剂的材料。层顶敷设彩

表 1 几种制冷剂物性参数对比

Tab. 1 Physical parameters of three refrigerants

|                |                               |                                |                                    |
|----------------|-------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| 制冷剂            | R290                          | R32                            | HFC161                             |
| 分子式            | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub> | CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> F |
| 分子量            | 44                            | 52                             | 48                                 |
| 可燃性            | 易燃                            | 难燃                             | 易燃                                 |
| 闪点/℃           | -104                          | —                              | —                                  |
| 引燃温度/℃         | 450                           | 648                            | —                                  |
| 爆炸极限/%         | 2.1 ~ 9.5                     | 下限 14.4                        | 下限 3.8                             |
| 蒸气相对密度(空气 = 1) | 1.6                           | 3.0                            | 1.66                               |
| 最小点火能量/mJ      | 0.25                          | 30 ~ 100                       | —                                  |
| 燃烧速度/( cm/s)   | 46                            | 6.7                            | 38.3                               |
| 燃烧热/( MJ/kg)   | 50.3                          | 9.4                            | 26.6                               |
| 安全等级           | A3                            | A2                             | A3                                 |
| 沸点/℃           | -42.1                         | -51.7                          | -37.1                              |
| 临界温度/℃         | 96.7                          | 78.1                           | 102.2                              |

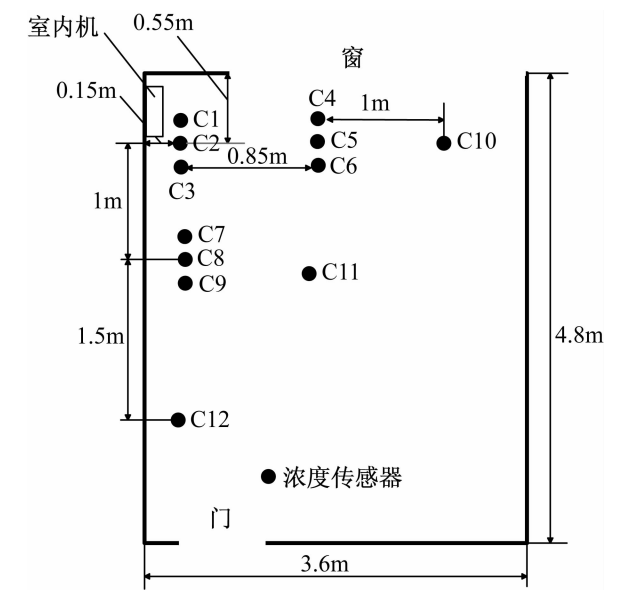


图 1 实验房间(大房间)  
Fig. 1 Test room (big room)

钢板,接缝处保证密封,防止室内机泄漏后的气体向外扩散。房间装一门一窗(均为塑钢材质)。房间地面铺设了复合地板,与国内最普通的公寓住房基本一致。房间方便拆卸,可整体移动。

根据国家标准 GB 50096《住宅设计规范》中对采光要求的规定,窗口面积与地面面积之比不小于 1/7,对于 4.8m × 3.6m 的房间面积,房间的窗户长 1.8m,高 1.5m,窗户下缘距离地面 0.9m,左右方向处

于 3.6m 墙的中間<sup>[5]</sup>。房间内设置了 12 只 R290 浓度传感器,其测量范围为 0 ~ 2.1% (R290 爆炸下限)。其中传感器 C1、C4、C7 的高度为 1.5m, C2、C5、C8 的高度为 0.8m, C3、C6、C9、C10、C11、C12 的高度为 0.2m。R290 浓度传感器距离窗户和左侧墙壁的距离见图 1。

实验中的供气方式,采用气瓶通过 5mm 的铜管通入室内,以模拟空调系统发生泄漏。供气系统由电子称、R290 气瓶 (容量 5kg, 钢瓶空重 2.5kg)、减压阀、减压吸热装置、截止阀、流量阀、5mm 内径铜管组成。实验过程中通过调节流量计的开度,获得不同泄漏速率。供气系统如下:

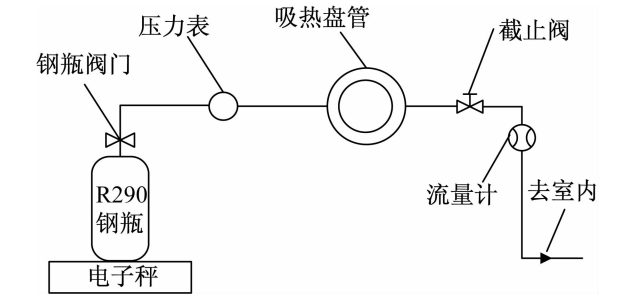


图 2 供气系统  
Fig. 2 Gas supply system

2 大房间内的实验结果

2.1 泄漏量的确定

根据对空调制冷剂管路系统的分析及在大量资料调研的基础上发现,室内机蒸发器和室内机背部气、液管连接处的泄漏是制冷剂泄漏最常见的两种情况。因此实验中选取了这两个泄漏部位针对不同的泄漏速度进行实验,以确定不同泄漏位置、不同泄漏速度情况下的房间内浓度分布情况。

该次实验工况为:空调安装高度 2.2m (指室内机底面距离房间地面 2.2m),由于空调管路泄漏较难形成规则的圆孔,多为缝隙型开口泄漏,因此该实验中采用了扁口泄漏,用以模拟缝隙形状的泄漏。

根据 IEC60335 中的规定,对不同的房间面积、空调安装高度,其空调器中 R290 的最大充注量由公式 (1) 计算确定<sup>[6]</sup>:

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

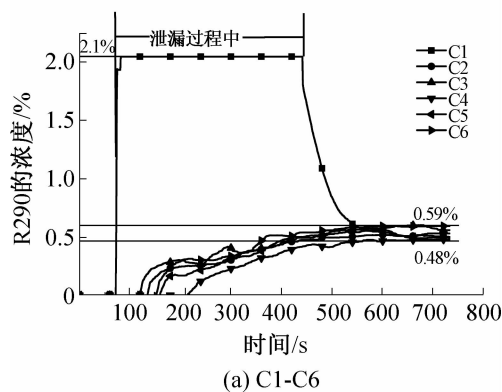
式中: $m_{\max}$  为 R290 最大充注量,kg; $LFL$  为 R290 的爆炸下限,0.038kg/m<sup>3</sup>; $h_0$  为空调室内机安装高度,m; $A$  为房间面积,m<sup>2</sup>。

对于大房间(面积 4.8m × 3.6m)根据公式 (1) 计算得到的最大充注量为 382g。因此在大房间实验中的泄漏量为 382g。

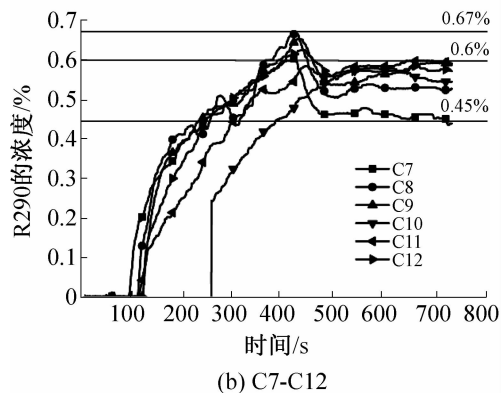
## 2.2 蒸发器泄漏实验结果

图3(a)为某次实验结果的情况,该实验中泄漏点位于室内机的蒸发器位置,泄漏口的方向指向了C1点的位置。该实验中382g的R290在6min20s内泄漏完毕后,C1-C6点浓度变化的情况。从图3(a)可看出仅仅在泄漏过程中C1点的浓度超过了2.1%,即超过了R290的爆炸下限。

图3(b)为C7-C12点R290的浓度。从图3(a)、图3(b)可看出除C1点外,其余点的浓度均未超过2.1%。



(a) C1-C6



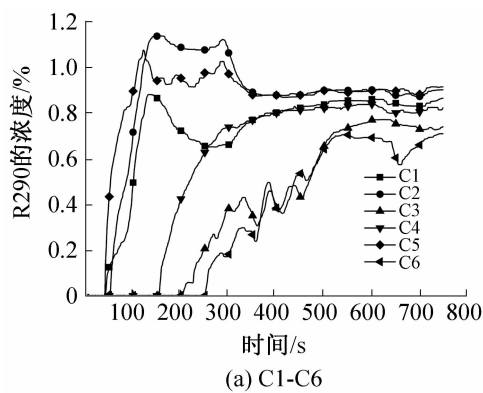
(b) C7-C12

图3 C1-C6和C7-C12浓度变化情况  
(382gR290的泄漏时间为6min20s)

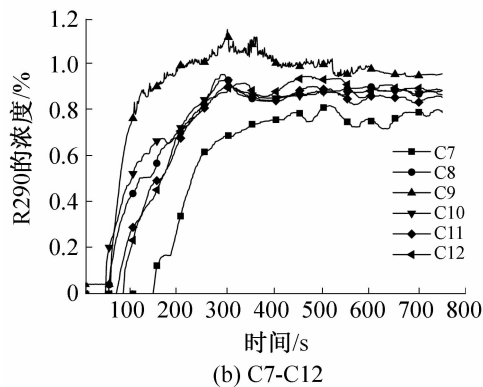
Fig.3 R290 concentration of C1-C6 and C7-C12  
(382g R290 completely released in 6 minutes  
and 20 seconds)

图4为另一次蒸发器泄漏实验中,浓度的变化情况。该实验中,泄漏口未指向任何一点的传感器。382g的R290在4min7s内泄漏完毕。由于泄漏的制冷剂气流未吹向任何传感器,所以C1~C12点的浓度均未超过2.1%。

蒸发器泄漏的实验进行了多次,在这些实验中仅仅当泄漏口直吹向浓度测点C1时,该测点的浓度才会超过2.1%。在所有实验中仅有3~4次实验中,仅有C1测点的浓度超过了2.1%。



(a) C1-C6



(b) C7-C12

图4 C1-C6和C7-C12的浓度变化  
(382gR290的泄漏时间为4min7s)

Fig.4 R290 concentration of C1-C6 and C7-C12  
(382g R290 completely released in 4 minutes  
and 7 seconds)

## 2.3 连接头实验结果

该实验结束后我们调整了泄漏口的位置,泄漏点位于空调制冷剂气管连接头的位置。由于空调器室内机背部紧贴墙壁,泄漏口的位置不会吹向任何浓度传感器。图5为某次实验结果中,R290浓度变化情况。该实验中382g的R290在5min27s内泄漏完毕,泄漏结束后我们持续记录房间内浓度约1.5h,观察房间内浓度的变化。从图5可看出房间从泄漏开始至实验结束,整个过程中C1~C12点的浓度均未超过2.1%。最大浓度约1.15%。1.5h后结束实验时,房间内浓度基本趋于一致。R290并未在房间内出现明显沉降,C1~C12点的浓度处于0.2%~0.26%之间。

对于连接头处的泄漏实验我们也进行了许多次,所有实验过程中C1~C12点的浓度均未超过2.1%。

图6为某次实验中382g的R290在6min26s内泄漏完毕,该次实验中C1~C12点的浓度均未超过2.1%,泄漏结束后所有测点的浓度逐步下降。15min后打开房间的门窗,可以看到房间内浓度迅速下降。

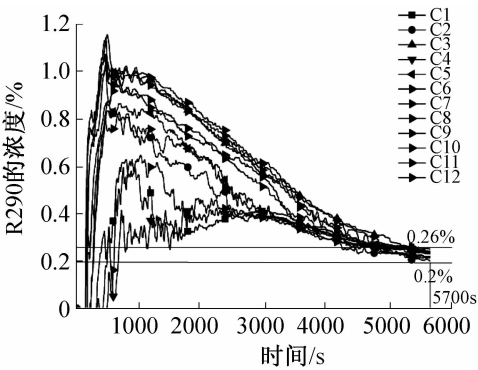


图 5 连接头泄漏 C1 ~ C12 的浓度  
(382gR290 的泄漏时间为 5min27s)

Fig.5 R290 concentration of C1-C12 of connector leakage (382g R290 completely released in 5 minutes and 27 seconds)

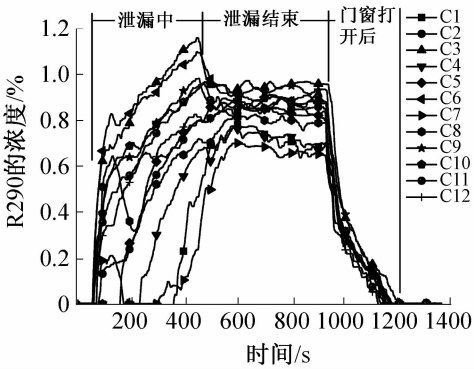


图 6 连接头泄漏 C1-C12 的浓度  
(382gR290 的泄漏时间为 6min26s)

Fig. 6 R290 concentration of C1-C12 of connector leakage (382g R290 completely released in 6 minutes and 26 seconds)

2.4 大房间实验结果的分析

在大房间内,针对不同泄漏位置、不同室内机的安装高度、不同泄漏速度等进行了多实验,部分实验结果见表 2。

从表 2 可看出,在连接头泄漏的实验中,所有传感器的浓度均未达到 R290 的爆炸下限 2.1%。这是因为室内机安装后其背部的制冷剂气、液管连接头会贴紧墙壁,R290 泄漏后会沿着室内机与墙壁的缝隙进行扩散。因此所形成的可燃范围很狭窄。

此外,从表 2 可看出,室内机的安装高度对房间内的最大浓度也有很大影响。当室内机安装高度从 1.8m 提高至 2.2m 后,平均的最大浓度从 1.067% 降低到了 0.776%。

3 小房间内实验结果

在 4.8m×3.6m 房间实验的基础上,在房间内靠

近门的一侧增加隔断以减小房间面积,减小后的房间面积为 3.6m×3.6m。小房间可模拟普通家庭次卧室的情况。以安装高度 2.2m 为例,根据公式(1)计算得到,在小房间内空调系统最大的充注量为 331g。因此在小房间的实验过程中 R290 的泄漏量为 331g。

表 2 大房间实验的实验结果

Tab.2 Test results of big room

| 序号 | 室内机<br>安装高<br>度/m | 泄漏量/ g | 泄漏<br>时间/ s | 最大浓<br>度 /% | 平均最<br>大浓<br>度/% |
|----|-------------------|--------|-------------|-------------|------------------|
| 1  | 1.8               | 409    | 190         | 1.09        | 1.067            |
| 2  |                   | 155    | 180         | 0.81        |                  |
| 3  |                   | 385    | 149         | 0.86        |                  |
| 4  |                   | 394    | 141         | 1.07        |                  |
| 5  |                   | 388    | 182         | 1.53        |                  |
| 6  |                   | 382    | 220         | 1.12        |                  |
| 7  |                   | 382    | 237         | 0.8         |                  |
| 8  |                   | 382    | 240         | 0.69        |                  |
| 9  |                   | 382    | 250         | 1.38        |                  |
| 10 |                   | 382    | 280         | 0.78        |                  |
| 11 | 2.2               | 382    | 327         | 1.16        | 0.776            |
| 12 |                   | 382    | 418         | 1.47        |                  |
| 13 |                   | 245    | 420         | 1.01        |                  |
| 14 |                   | 382    | 469         | 1.17        |                  |
| 15 |                   | 382    | 183         | 0.8         |                  |
| 16 |                   | 382    | 238         | 0.9         |                  |
| 17 |                   | 391    | 420         | 0.83        |                  |
| 18 |                   | 382    | 180         | 0.67        |                  |
| 19 |                   | 382    | 188         | 0.68        |                  |

3.1 蒸发器泄漏

图 7 中为 331g 的 R290 在 3min4s 的时间内泄漏完毕的情况,泄漏位置为蒸发器。由于泄漏口未吹向任何传感器,因此该实验中 12 个测点位置均未达到 2.1%。

图 8 为 331g 的 R290 在 2min56s 的时间内泄漏到小房间内,12 个测点浓度变化情况。泄漏位置为蒸发器,空调安装高度为 1.8m。该实验中仅在泄漏过程中 C1 点的浓度超过了 2.1%。

3.2 连接头泄漏

图 9 为某次连接头泄漏实验中 R290 的浓度情

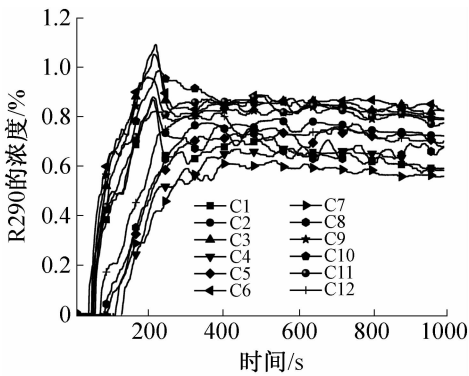


图 7 R290 浓度变化情况  
(331gR290 的泄漏时间为 3min4s)  
Fig. 7 R290 concentration of C1-C12 (331g R290 completely released in 3 minutes and 4 seconds)

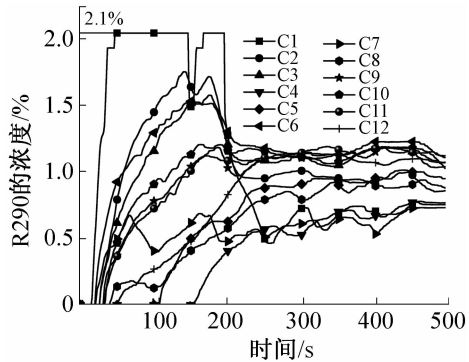


图 8 C1-C12 的浓度 (室内机安装高度 1.8m, 331gR290 的泄漏时间为 2min56s)  
Fig. 8 R290 concentration of C1-C12 (the height of indoor unit is 1.8m, 331g R290 completely released in 2 minutes and 56 seconds)

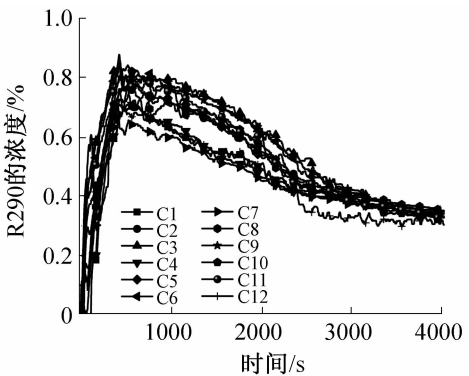


图 9 C1-C12 的浓度 (室内机安装高度 2.2m 泄漏时间 7min4s)  
Fig. 9 R290 concentration of C1-C12 (the height of indoor unit is 2.2m, 331g R290 completely released in 7 minutes and 4 seconds)

况,331g 的 R290 在 7min4s 内泄漏完毕。泄漏过程中所有 12 个浓度测定均未超过 R290 的爆炸下限 2.1%。泄漏结束后持续记录房间内浓度超过 1h。

1h 后房间内浓度逐步趋于一致。  
3.3 小房间实验结果的分析  
小房间内的泄漏实验也进行了多次,所有实验中仅有 1 次实验中的 C1 点浓度超过了 2.1%。仅有在蒸发器泄漏且泄漏口直吹向 C1 点时,才会导致 C1 点的浓度超过 2.1%。部分实验结果见表 3。

表 3 小房间内的实验结果  
Tab.3 Test results of small room

| 序号 | 室内机安装高度/m | 泄漏量/g | 泄漏时间/ s | 最大浓度 /% | 平均最大浓度/% |
|----|-----------|-------|---------|---------|----------|
| 1  | 1.8       | 331   | 191     | 2.1     | 1.445    |
| 2  |           | 331   | 242     | 1.68    |          |
| 3  |           | 332   | 416     | 1.41    |          |
| 4  |           | 331   | 187     | 1.25    |          |
| 5  |           | 331   | 413     | 1.11    |          |
| 6  | 2.2       | 382   | 436     | 1.12    | 0.803    |
| 7  |           | 331   | 194     | 0.8     |          |
| 8  |           | 331   | 424     | 0.9     |          |
| 9  |           | 334   | 252     | 0.83    |          |
| 10 |           | 331   | 184     | 0.67    |          |
| 11 |           | 331   | 242     | 0.68    |          |
| 12 |           | 331   | 418     | 0.94    |          |

表 3 可看出,当室内机安装高度从 1.8m 提高至 2.2m 后,平均的最大浓度从 1.445% 降低到了 0.803%。

4 结论

- 1) 仅有少数几次实验中、仅有 C1 点(距离室内机最近)的浓度超过了 2.1%。因此室内机发生泄漏时,仅在其附近可能形成燃爆区域。
- 2) 在 C1 点超过 2.1% 的实验中,在泄漏停止后 C1 点的浓度迅速下降至 2.1% 以下,因此燃爆范围仅存在于泄漏过程中,一旦泄漏停止后,室内机附近的燃爆范围会迅速消失。
- 3) R290 泄漏停止后,房间内的浓度会逐步趋于一致,R290 没有在地面上形成明显沉降。且所有区域内的浓度均低于 2.1%。
- 4) R290 从连接头位置泄漏后,会沿着墙壁与室内机间的缝隙进行扩散,形成的可燃范围较狭窄。
- 5) 室内机安装高度提高后,对房间内的最大浓

度有很大影响。

#### 参考文献

- [1] 梁杰荣,李廷勋. 基于 SINDA/FLUINT 平台的 R290 房间空调器仿真[J]. 低温与超导,2011,39(2):42-46. (Liang Jierong, Li Tingxun. R290 room air-conditioner simulation based on SINDA /FLUINT [J]. Cryogenics and Superconductivity, 2011, 39(2):42-46. )
- [2] 李廷勋,杨九铭,曾昭顺,等. R290 灌注式替代 R22 空调整机能研究[J]. 制冷学报,2010, 31(4):31-34. (Li Tingxun, Yang Jiuming, Zeng Zhaoshun, et al. Experiment on R290 Substituting for R22 in a Room Air-conditioner [J]. Journal of Refrigeration, 2010, 31(4):31-34. )
- [3] 张龙,刘煜. 制冷剂 R32 在空调应用上的理论分析[J]. 制冷与空调,2010,10(3):76-78. (Zhang Long, Liu Yu. Theory analysis about application of refrigerant R32 on air-conditioning [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2010, 10(3):76-78. )
- [4] 梅奎,李明,梁路军. R32 和 R410A 循环特性对比研究[J]. 制冷与空调,2011,11(2):56-59. (Mei Kui, Li

Ming, Liang Lujun. Comparative research on the cycle performance of R32 & R410A [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2011,11(2):56-59. )

- [5] 中国建筑设计研究院. GB 50096—2011 住宅设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [6] International Electrotechnical Commission. IEC 60335-2-40: 2005. Household and similar electrical appliances-Safety-part 2-40: Particular requirements for electrical heat pumps, air-conditioners and dehumidifiers[S]. Geneva: IEC, 2006.

#### 作者简介

张网,男(1979-),博士研究生,天津大学机械工程学院,(022)23387219,E-mail: zhangwang@tfri.com.cn。研究方向:可燃制冷剂火灾危险性及危险化学品火灾特性。

#### About the author

Zhang Wang (1979-), male, Tianjin University School of Mechanical Engineering, (022) 23387219, E-mail: zhangwang@tfri.com.cn. Research fields: research for the fire hazard of flammable refrigerants in air conditioning system; Fire characteristics of hazardous chemicals.

(上接第 16 页)

- [13] Xia Z Z, Wang D C, Zhang J C, et al. Experimental study on improved two-bed silica gel-water adsorption chiller[J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(2): 1469-1479.
- [14] Lu H B, Mazet N, Spinner B, et al. Modelling of gas solid reaction coupling of heat and mass transfer with chemical reaction[J]. Chemical Engineering Science, 1996, 51(2): 3829-3845.
- [15] Hu Y Y, Wang L W, Lu X U, et al. A two-stage deep freezing chemisorption cycle driven by low-temperature heat source[J]. Front Energy, 2011, 5(3): 263-269.

#### 作者简介

宋分平,男(1989-),硕士研究生,上海交通大学制冷与低温工程研究所,18818212902,E-mail:2856051356@qq.com。研究方向:吸附式制冷及其应用。

#### About the author

Song Fenping (1989-), male, graduate student, Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, 18818212902, E-mail: 2856051356@qq.com. Research fields: adsorption refrigeration and its application.