

R290用焓差实验室制冷剂泄漏模拟分析

周宇游¹, 李征涛¹, 彭家驹¹, 陈剑云¹, 马林泉², 廖李平³

¹上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

²上海海普环境设备有限公司, 上海

³珠海格力电器股份有限公司, 广东 珠海

收稿日期: 2023年11月22日; 录用日期: 2023年12月15日; 发布日期: 2024年1月18日

摘要

R290是一种很有前途的空调替代制冷剂, 为了促进R290在空调中的安全应用, 本文以某单位建好的R290用焓差实验室为研究对象, 建立了在有限空间内存在室内自循环的制冷剂泄漏和扩散的数学模型, 对以使用R290为制冷剂的被测制冷设备(热泵)在发生泄漏的情况下, 用CFD对泄漏后的试验房间进行模拟计算, 分析探讨R290泄露到有限外部空间的爆炸风险。本文假设泄漏孔为圆形泄漏孔, 泄漏孔直径为4 mm, 泄漏量1.3 kg, 泄漏时间为240 s, 整个过程匀速泄漏, 发现在整个过程中, 除开在泄漏时间(240 s)内的泄漏口附近之外, 整个泄漏过程都不存在R290燃爆的浓度区间。

关键词

R290, 泄漏, CFD, 焓差实验室, 浓度场

Laboratory Refrigerant Leak Simulation Analysis with Enthalpy Difference for R290

Yuyou Zhou¹, Zhengtao Li¹, Jiaju Peng¹, Jianyun Chen¹, Linqun Ma², Liping Liao³

¹School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²Shanghai Hi-Performance Environment Equipment Co., Ltd., Shanghai

³Gree Electric Appliances, Inc. of Zhuhai, Zhuhai Guangdong

Received: Nov. 22nd, 2023; accepted: Dec. 15th, 2023; published: Jan. 18th, 2024

Abstract

R290 is a promising alternative refrigerant for air conditioning. In order to promote the safe application of R290 in air conditioning, this paper takes the R290 enthalpy difference laboratory built by a certain unit as the research object, and establishes a mathematical model for the leakage and dif-

文章引用: 周宇游, 李征涛, 彭家驹, 陈剑云, 马林泉, 廖李平. R290 用焓差实验室制冷剂泄漏模拟分析[J]. 建模与仿真, 2024, 13(1): 421-429. DOI: 10.12677/mos.2024.131040

fusion of indoor self-circulating refrigerant in a limited space. In the case of leakage of the tested refrigeration equipment (heat pump) using R290 as refrigerant, CFD is used to simulate the test room after leakage, and the explosion risk of R290 leaking into the limited outer space is analyzed and discussed. In this paper, it is assumed that the leakage hole is a circular leak hole, the diameter of the leak hole is 4 mm, the leakage amount is 1.3 kg, and the leakage time is 240 s, and the leakage rate is uniform throughout the whole process. It is found that there is no concentration range of R290 explosion in the whole process except near the leakage port within the leakage time (240 s).

Keywords

R290, Leak, CFD, Enthalpy Difference Laboratory, Concentration Field

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

焓差实验室是基于空气焓差法为基础来检测各种制冷设备的性能的试验装置,是检测新开发的设备是否满足各类国家标准或者行业标准的重要工具,它为测试设备创造所需要的环境条件。然而,对于以R290为制冷剂的制冷设备而言,必须考虑到R290易燃易爆的性质,R290是高度易燃的(在25℃和1atm的干燥空气中,可燃范围为2.1~9.5 vol%),在国标[1]中被归类为A3类的可燃制冷剂。国内外学者对R290的泄漏进行了相关研究。Colbourne [2]等研究发现,无论制冷系统的类型、年龄和尺寸如何,泄漏孔区域都聚集在非常小的值附近,小于0.10 mm²超过90%,小于98.8%小于1.0 mm²。系统安全设计时应考虑的最大泄漏孔尺寸约为0.5 mm²,或约70gmin⁻¹的R290蒸汽,或根据系统运行条件或制冷剂类型进行调整。Yalun Li [3]等人在密闭空间内对R290泄漏进行实验和模拟,发现在没有空气扰动的情况下,沿着泄漏喷射方向三角形泄漏孔的分布范围最广,圆形泄露孔的分布范围最窄。丁家琦[4]等在R290空气源热泵泄漏模拟中。对充注量为1.3 kg的热泵泄漏进行模拟分析,泄漏时间为240 s,匀速泄漏。发现丙烷沉积在地面,在房间加入fan扰动,制冷剂更快向房间上方扩散。海腾蛟[5]等对卧室内家用空调可燃制冷剂进行泄漏模拟,阐述了泄漏后浓度场的分布以及家具摆放和开窗通风对可燃区域的影响。Li等[6]发现,泄漏孔尺寸对外空间制冷剂的最大浓度影响较大,对泄漏制冷剂的扩散速率影响较小,在高泄漏率下,泄漏孔下的制冷剂浓度增加。

以上研究对于在实验室内有大型循环风机的泄漏实验研究较少,多数集中在泄漏孔大小,充注量,以及泄漏速率对房间R290浓度场的影响,而对于房间内是否有大的空气干扰源研究较少。本文以某单位建成的R290用焓差实验室为研究对象,在热泵热水器国标[7]测试工况干球温度20℃,湿球温度15℃的条件下进行泄漏模拟计算,此时,实验室循环风机为开启状态,研究泄漏后的R290气体在循环风机作用下在房间的浓度场结果。

2. 模型建立

2.1. 物理模型

该实验室围护结构采用300 mm聚氨酯库板,整个实验室包括两个相同的室外侧和一个室内侧,本次模拟仅对室外侧进行泄漏模拟,室外侧房间规格尺寸为5830 mm(宽)*6860 mm(长)*5500 mm(高),地面采用耐低温防静电树脂自流坪,回风方式为孔板送风,孔板为铝制孔板。房间中的空气进入空气处理

柜后, 经过冷却、加湿、加热之后, 经过循环风机通过孔板将处理过的空气重新输入到房间之中, 以此创造实验所需要的空气条件。本实验室室外侧房间结构示意图如图 1 所示。

2.2. 模型简化

1) 实验室墙面和顶板以及空气循环柜的壁面均抽象为平面, 数值求解时, 将房间壁面简化为一个平面, 不考虑其厚度, 采用绝热壁面作为边界条件。空气处理柜里只有循环风机。

2) 实验内介质空气与丙烷的混合视为不可压缩理想气体, 满足气体状态方程[8], 满足连续方程, 动量方程。能量方程和组份方程,

3) 对被测机制冷剂 R290 泄漏过程做出如下假设, 泄漏的成分为 100% R290 气体, 计算域内各项参数均匀, 泄漏孔为圆形, 泄漏过程中孔径不变, 为 4 mm, 泄漏的质量流速不变, 泄漏时间为 240 s, 为连续泄漏状态。泄露完毕后泄漏速度直接变为 0, R290 的密度为 1.83 kg/m^3 , 空气密度为 1.2 kg/m^3 。房间内压力为大气压力 101.325 kPa, 干重力加速度垂直向下。

简化后的室外侧物理模型如图 2 所示:

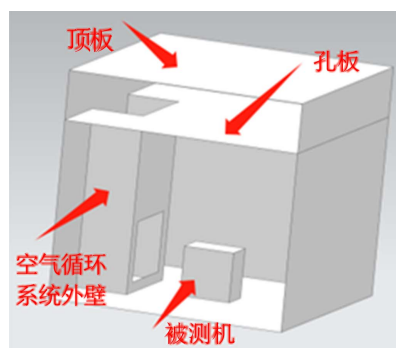


Figure 1. Schematic diagram of the outdoor room structure of the laboratory
图 1. 实验室室外侧房间结构示意图

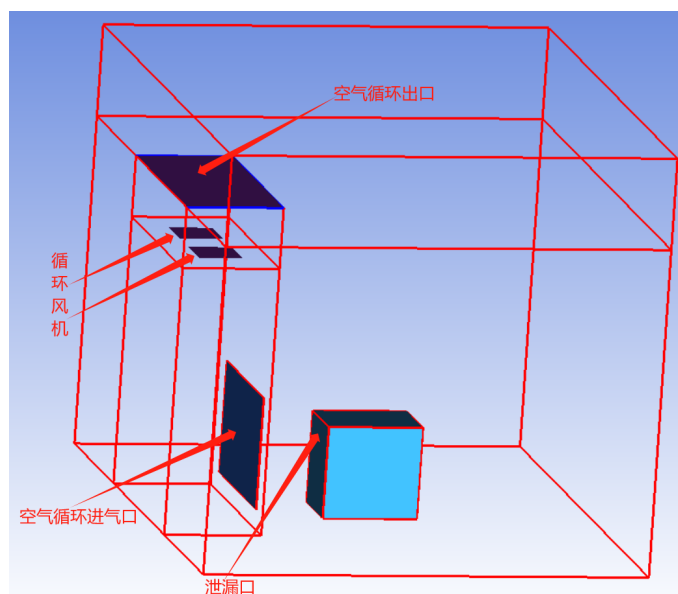


Figure 2. Schematic diagram of a laboratory physical model
图 2. 实验室物理模型示意图

2.3. 边界条件

采用 ANSYSICEM-CFD 软件对几何模型进行网格划分, 整个流体域采用非结构化网格, 对泄漏孔附近的网格进行局部加密。

1) 热泵泄漏处采用质量出口边界条件。质量流率为 0.0055 kg/s, 温度 323.15 k。

2) 空柜入口(空气循环进气口)和空气出口(空气柜循环出口)选用 interior 边界条件, 不做设置。循环风机采用 fan 边界条件, 设置压降为常量。本次实验室风机压降为 658 Pa。

3) 孔板采用 porous-jump 边界条件, 在已知肋板前后的压强和速度的增量时, 可以采用多孔跃升边界条件进行定义, 与多孔介质模型相比, 使用该模型使得计算收敛性更好, 并且在存在扰动的情況下不易引起发散, 因此在计算过滤器、薄肋板、孔板等应该尽量采用此边界条件[9]。

4) 房间壁面, 空柜壁面以及被测机外壳均采用 wall 边界条件, 视为绝热面。

3. 数值模拟结果及分析

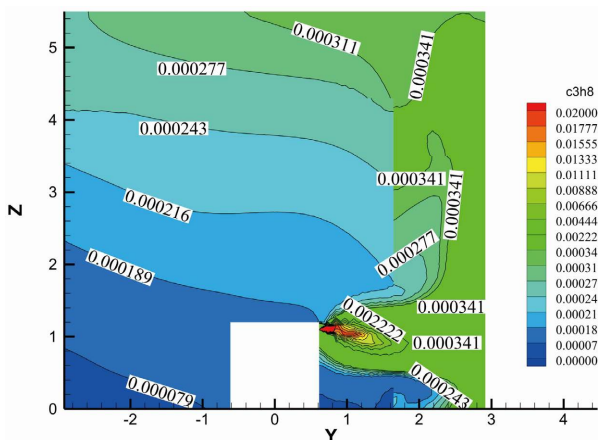
3.1. 泄漏时间(240 s)内的模拟结果以及分析

在房间取四个平面, 分别为 $x = 3.43$, $y = 0.615$, $z = 1.1$, 此三个平面平行于墙面且通过泄漏面的几何中心, 第四个平面 $z = 0.01$, 平行于地面, 因为 R290 的密度大于空气密度, 此平面用来监控地面是否存在 R290 沉积现象。

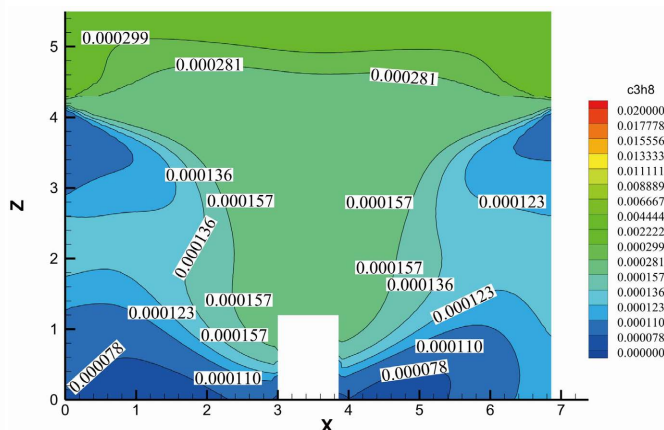
此外, 分别在四个平面上均匀的选择四个点, 在 $x = 3.43$ 平面为(3.43, 1.645, 1.1)、(3.43, 1.875, 0.97)、(3.43, -1.645, 2.9)、(3.43, 1.645, 2.9), 在 $y = 0.615$ 平面为(2.43, 0.615, 1.1)、(4.43, 0.615, 1.1)、(2.43, 0.615, 2.9)、(4.43, 0.615, 2.9), 在 $z = 0.01$ 平面为(2.43, 1.645, 0.01)、(2.43, -1.645, 0.01)、(4.43, 1.645, 0.01)、(4.43, -1.645, 0.01), 在 $z = 1.1$ 平面内为(2.43, 1.645, 1.1)、(2.43, -1.645, 1.1)、(4.43, 1.645, 1.1)、(4.43, -1.645, 1.1)。按照顺序命名为(1)、(2)、(3)、(4)四个点, 监测这四个点的 R290 浓度变化以及对比浓度变化差异。

3.1.1. 泄漏时间为 10 s 时的 R290 的浓度分布

制冷剂泄漏 10 s 时, 房间区域四个平面内的 R290 浓度都是在可燃区间外的, 只有在 R290 泄漏口处浓度较高。从图 3(a)可以看出, R290 从热泵泄漏后, R290 气体几乎都会进入空气处理柜, 由空气处理柜内的循环风机循环至房间内部, 由于在 10 s 时的泄漏总量较小, 使得整体的 R290 质量分数都较小, 从空气处理柜出来到静压腔, 到房间内部, 浓度逐渐降低, 泄漏口远端的角落由于泄漏时间的原因 R290 浓度几乎为 0。空气处理柜内的 R290 浓度高于房间其他地方, 但是仍旧不在 R290 可燃范围内。



(a) $X = 3.43$ 平面等质量分数线图



(b) $Y = 0.615$ 平面等质量分数线图

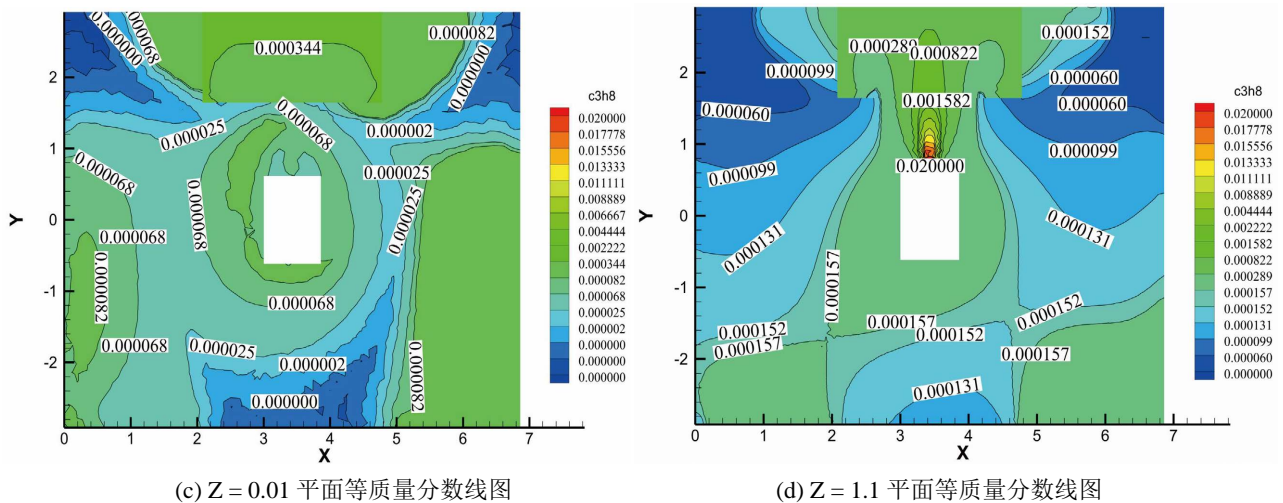


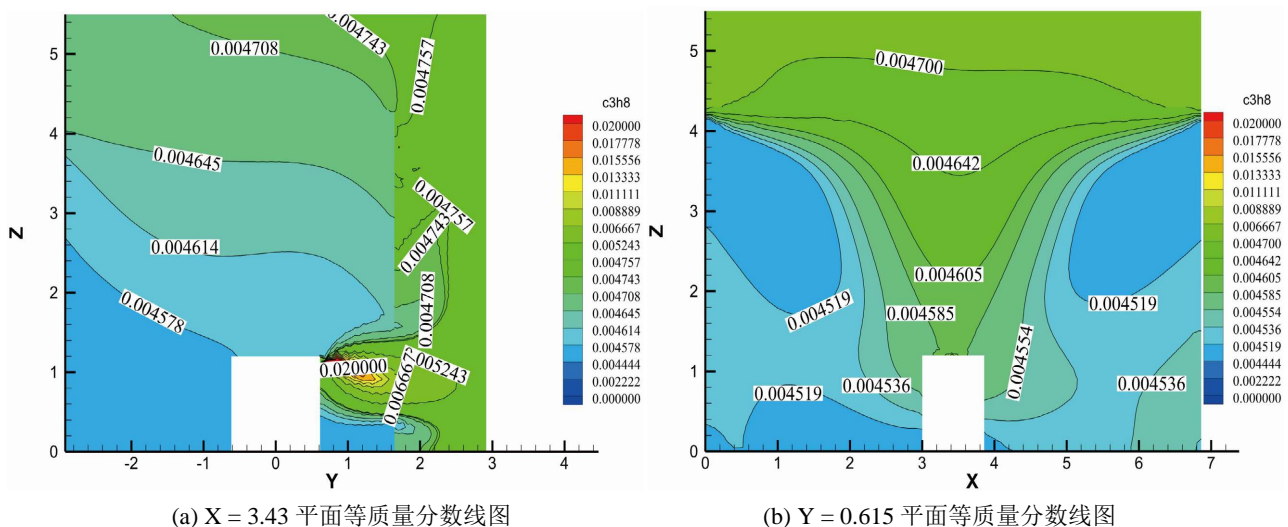
Figure 3. Mass fraction distribution of R290 in each plane when the leakage time is 10 s
图 3. 泄漏时间为 10 s 时各平面 R290 的质量分数分布图

图 3(b)中 R290 的质量分数分布也是因为循环风机的影响,房间整体上端浓度较高,10 S 泄漏量较小,两侧和地面附近较低,两端浓度基本对称分布,总体浓度都是低水平的。图 3(c) R290 在地面的浓度因为泄漏量较小,浓度很低, R290 的密度虽然大于空气,但是循环风机对于房间内部流场扰动较强, R290 不会在地面沉积。

图 3(d)中在与泄漏口等高的平面,也可以看出 R290 从泄漏口出来后会进入循环风机,使得空柜内浓度高于其余空间,空柜相邻的墙角处几乎没有 R290 气体存在,泄漏口的气体少部分自由扩散,使得被测机周围 R290 较其余地方高。

3.1.2. 泄漏时间为 240 s 时 R290 的浓度分布。

泄漏时间为 240 s 时,此时,房间各个区域的浓度达到最大,除了被泄漏口影响到的区域外,各个区域之间浓度已经相差很小,并且整个房间 R290 的浓度都在可燃范围外,说明循环风机在泄漏的过程中将 R290 分散到了整个房间。在泄漏过程中,如果循环风机一直保持在开启的状态,那么整个房间不存在 R290 燃爆极限的浓度区间。



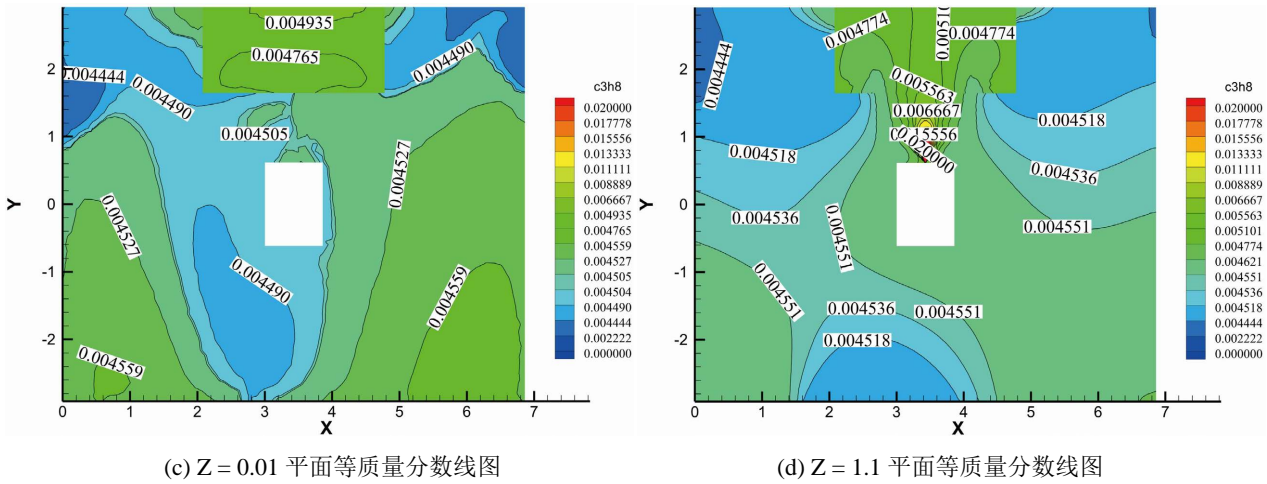


Figure 4. Mass fraction distribution of R290 in each plane when the leakage time is 240 s
图 4. 泄漏时间为 240 s 时各平面 R290 的质量分数分布图

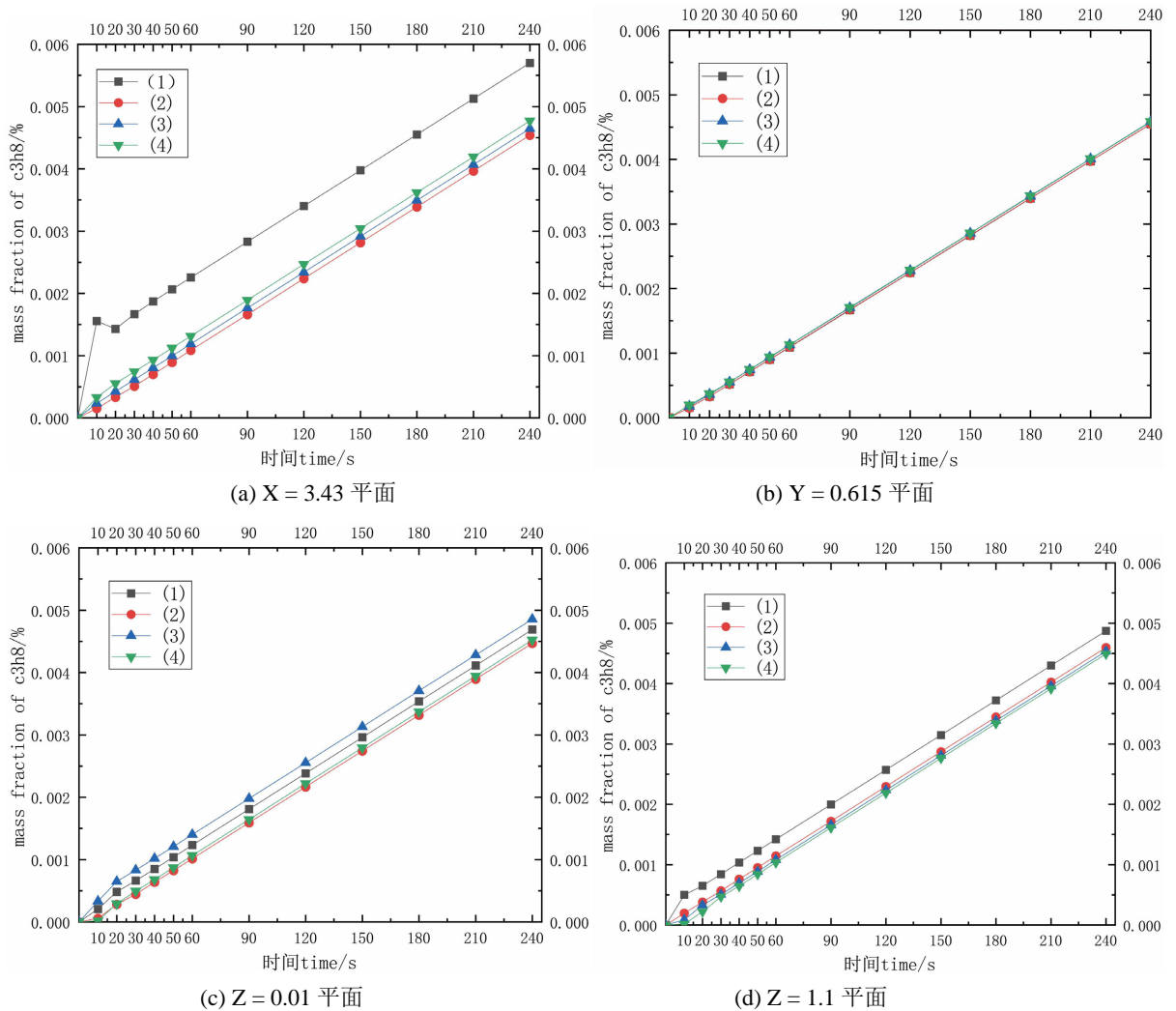


Figure 5. Mass fraction distribution of R290 at monitoring points within 240 s of leakage time
图 5. 泄漏时间 240 s 各监测点的 R290 的质量分数分布图

在图 4(a)中, R290 在空气处理柜进口处的浓度 0.005243 已经与远端房间角落内 R290 的浓度 0.004578 差值为 0.000665, 几乎为 0。图 4(b)中静压腔中的浓度虽然高于下部房间, 一部分是因为泄漏还在进行, 另一方面是循环风机将 R290 吸入空气处理柜后 R290 由孔板进入房间, 房间上部是 R290 先到达的地方。下部房间的浓度曲线由泄漏口向两边发散, 两边浓度对称分布, 符合常理。此时, R290 没有在地面沉积的现象。图 4(c) R290 在地面的浓度总体与其他平面一致, 各个区域之间浓度差极小, 没有出现 R290 在地面沉积的现象, 与图 4(d)整个浓度分布大体相同。

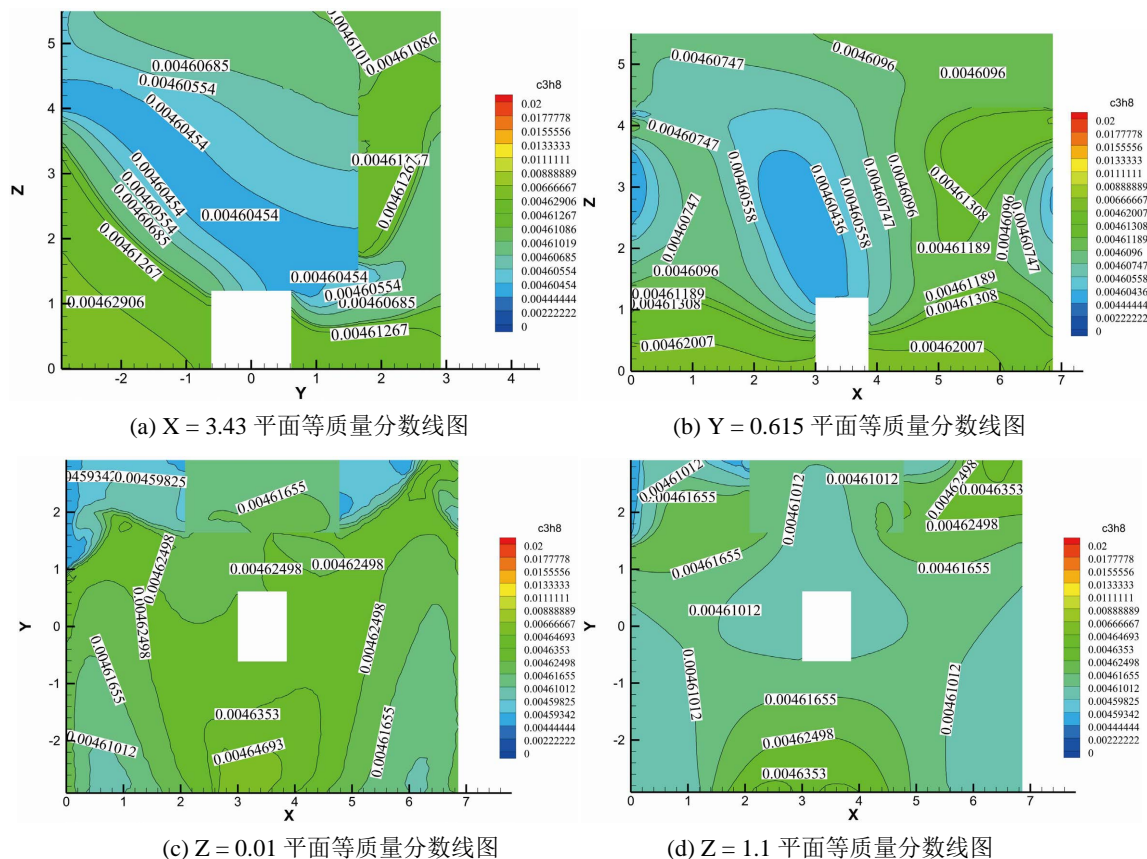


Figure 6. Distribution of R290 mass fraction in each plane at 10 s after leakage (1)

图 6. 泄漏结束后 10 s 时各平面的 R290 质量分数分布图(1)

3.1.3. 泄漏时间(240 s)内监测点 R290 的浓度场变化

从图 5 可以看出, 各个检测点 R290 的浓度基本都是线性上升的, 在 $x = 3.43$ 平面, 点(1) (3.43, 1.645, 1.1)由于正处在 R290 泄漏口的喷射区域, R290 浓度一直高于其余监测点, 在 240 s 达到最高点 0.0057。(1)点一开始浓度上升较快, 后续由于循环风机作用, R290 浓度在 10 s 到 20 s 内有回落, 之后呈线性上升。其余三点的 R290 浓度和增加速度都相差很小, 是循环风机作用的结果。

图 5(b)是 $y = 0.615$ 平面内的四个点, 此平面是与泄漏面垂直的平面, 在空间内到泄露点的距离相同, 且都在孔板下方, 所以 R290 的浓度几乎都是一样的, 最高值在 0.004551。

在图 5(c)~(d)中, 由于 $z = 0.1$ 和 $z = 1.1$ 都是水平界面, 泄漏口方向的两个监测点的浓度在泄漏时间内都会略高于另外两个点, 但是总体都是相近的。

综上分析得知, 在循环风机的作用下, 整个房间的 R290 浓度场分布均匀, 且不会出现 R290 燃爆极限区间。

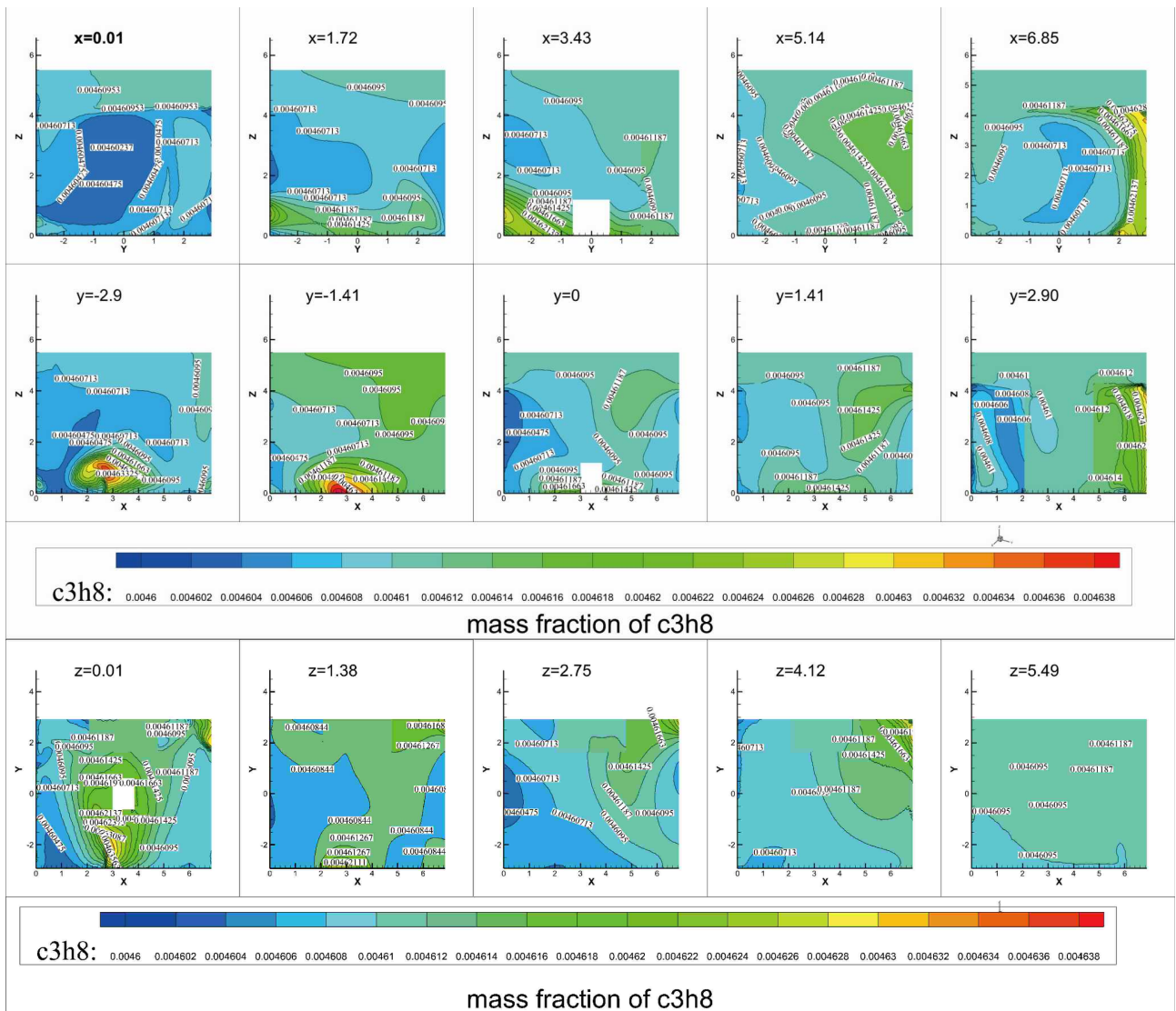


Figure 7. Distribution of R290 mass fraction in each plane at 10 s after leakage (2)
 图 7. 泄漏结束后 10 s 时各平面的 R290 质量分数分布图(2)

3.2. 泄漏结束后 R290 的浓度分布

泄漏结束后 10 s 的 R290 浓度分布

泄漏结束后，循环风机照常运行，此时，房间的 R290 分布进一步均匀，从图 6 可以看出，整个房间的浓度最高为 0.00464963，最低为 0.00459825，差值仅为 0.00005138，几乎可以忽略不计。此时，整个房间都不在 R290 的爆炸极限范围内。泄漏结束后 10 s，R290 的浓度场进一步均匀，无燃爆区间出现。此时，因为泄漏口不在泄漏，如图 6(a)所示，泄漏口不存在浓度过高区域。

为了进一步分析泄漏结束后 R290 的浓度分布场，在 x, y, z 三个方向均匀的取五个面，如图 7 所示。所有的 R290 浓度等值线的值都在 0.0046 附近，几乎相等，与图 6 得到的结论相同。

4. 实验与模拟对比分析

为了验证模拟结果的可信性，需要对模拟结果进行验证，在 z = 1.1 平面取四个点，分别为(2.43, 1.645,

1.1)、(2.43, -1.645, 1.1)、(4.43, 1.645, 1.1)、(4.43, -1.645, 1.1), 分别命名为(1)、(2)、(3)、(4), 与之前在 $z = 1.1$ 平面上的取点一致, 实验结果如图 8: 与图 5(c)相比, R290 浓度的总体分布大致相同, 各个点的浓度范围实测值与模拟值的最大误差不超过 1%, 误差在可接受范围内。

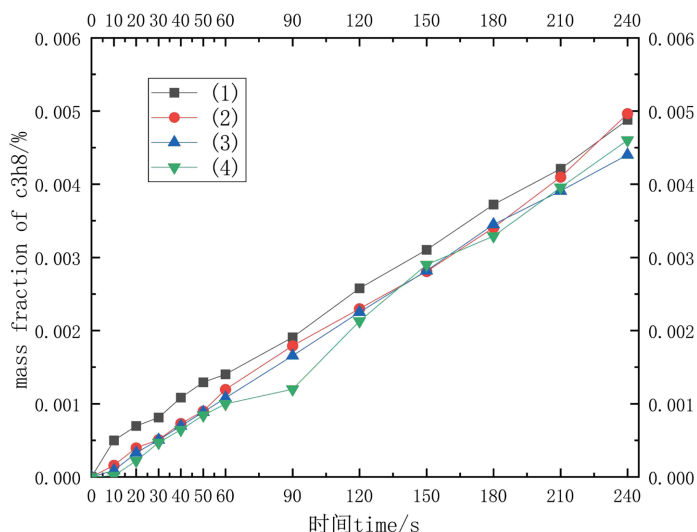


Figure 8. R290 mass fraction distribution of monitoring points in $z = 1.1$ plane within 240 s leakage time

图 8. 泄漏时间 240 s 内 $z = 1.1$ 平面内监测点的 R290 质量分数分布图

5. 结论

本文基于现有的 R290 用焓差实验室, 借助于 ANSYS 软件进行数值模拟, 对于在国标工况干球 20°C , 湿球 15°C 的环境内, 使用 R290 为制冷剂的被测机发生泄漏的情况进行了分析总结, 得出以下结论:

1) 不论是在泄漏进行的时候, 还是在泄漏结束后, 房间内的都不会存在 R290 燃爆极限的区域。

2) 在循环风机的作用下, 泄漏口喷射的 R290 进入空气循环系统经由孔板进入房间后, 整个房间内的 R290 分布均匀, 没有 R290 沉积的现象。

参考文献

- [1] 全国冷冻空调设备标准化技术委员会. GB/T 7778-2017 制冷剂编号方法和安全性分类[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [2] Colbourne, D., Pitarch Mocholi, M., Munzinger, P., Oppelt, D., Paetzold, B. and Vince, I. (2021) Leak Hole Sizes from Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pump Systems. *International Journal of Refrigeration*, **131**, 559-567. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.07.003>
- [3] Li, Y., Yang, J., Wu, X., et al. (2023) Explosion Risk Analysis of R290 Leakage into a Limited External Space. *Applied Thermal Engineering*, **225**, 120122. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120122>
- [4] 丁家琦. R290 空气源冷热水热泵机组泄漏安全性研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [5] 海腾蛟. 家用空调可燃制冷剂泄漏危险性模拟[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- [6] Li, T. (2014) Indoor Leakage Test for Safety of R-290 Split Type Room Air Conditioner. *International Journal of Refrigeration*, **40**, 380-389. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.11.023>
- [7] 全国冷冻空调设备标准化技术委员会. GB/T 21362-2023 商业或工业用及类似用途的热泵热水机[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [8] 孙秉才, 冉冉, 顾晓敏, 等. LPG 低温储罐泄漏扩散数值模拟及影响因素分析[J]. 工业安全与环保, 2022, 48(9): 26-30.
- [9] 李盼. 机械回转反吹袋滤器内温度场和流场数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 东北大学, 2017.