



制冷与低温工程系

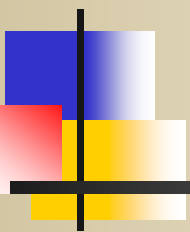
Department of Refrigeration and Cryogenic Engineering

北京工业大学环境工程研究所

Center of Environment and Energy Engineering

北京工业大学环境与能源工程学院

# 小型制冷技术在新一轮工质替代中 何去何从的思考



马国远

北京工业大学



# 主要内容

1 基加利修正案

2 新一轮替代制冷剂的选择

3 新一轮工质替代困局与突破

4 ICR2019自然工质研究介绍

5 未来发展的思考



## 1.1 基加利修正案的背景

- 1985年 《保护臭氧层维也纳公约》
- 1987年 《关于淘汰臭氧层消耗物质（ODS）的蒙特利尔议定书》
- 1997年 《京都议定书》，控制温室气体排放量
- 2015年 《巴黎协定》-全球气候变化的新协议，已于2016年11月4日正式生效，目前全球已有179个国家批准了《巴黎协定》。其核心内容：
- 本世纪把全球平均气温升高较工业化前水平控制在 $2^{\circ}\text{C}$ 之内，并为把升温控制在 $1.5^{\circ}\text{C}$ 之内而努力



## 1.2 基加利修正案的提出

- 普遍采用的无臭氧破坏作用的替代CFCs和HCFCs的制冷剂HFCs，包括目前常用的R134a, R410A, R407C, R404A等，均属于《联合国气候变化框架公约》框架下的《京都议定书》所列明的应实施减排的六大类温室气体之一
- 秉承《巴黎协定》的东风，经过艰苦的谈判，《蒙特利尔议定书》197个缔约方在2016年10月10日~15日于卢旺达首都基加利召开的《蒙特利尔议定书》第28次缔约方大会上最终达成一致，形成了新的“基加利修正案”。



## 1.3 基加利修正案的目标

- 通过新的修正案，将**有效减少强效温室气体HFCs的排放**，从而在**本世纪末防止全球升温0.5℃**。
- 这一修正案是迄今为止为推动实现《巴黎协定》商定的“到本世纪末将全球气温上升幅度控制在2摄氏度以内”这一目标所做出的最大贡献。
- 相比不受控情景，到2050年中国**削减HFCs可带来减排300~400亿吨二氧化碳当量的气候效益**，为修正案确定的**减少全球升温0.5℃的总体目标贡献达三分之一**。



## 基加利修正案列明的HFCs物质一览表

分组	物质	GWP
<b>第I组</b>		
CHF <sub>2</sub> CHF <sub>2</sub>	HFC-134	1,100
CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub>	HFC-134a	1,430
CH <sub>2</sub> FCHF <sub>2</sub>	HFC-143	353
CHF <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	HFC-245fa	1,030
CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	HFC-365mfc	794
CF <sub>3</sub> CHF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	HFC-227ea	3,220
CH <sub>2</sub> FCF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	HFC-236cb	1,340
CHF <sub>2</sub> CHF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	HFC-236ea	1,370
CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	HFC-236fa	9,810
CH <sub>2</sub> FCF <sub>2</sub> CHF <sub>2</sub>	HFC-245ca	693
CF <sub>3</sub> CHFCH <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	HFC-43-10mee	1,640
CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	HFC-32	675
CHF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	HFC-125	3,500
CH <sub>3</sub> CF <sub>3</sub>	HFC-143a	4,470
CH <sub>3</sub> F	HFC-41	92
CH <sub>2</sub> FCH <sub>2</sub> F	HFC-152	53
CH <sub>3</sub> CHF <sub>2</sub>	HFC-152a	124
<b>第II组</b>		
CHF <sub>3</sub>	HFC-23	14,800

- 共18种受控物质，HFC-161应中国提议最终从附件F中删除；
- 列入受控物质目录是指被纳入监控范围，不代表要全部淘汰。





## 发达国家HFCs限控时间表

国家类别	主要发达国家 (美国、欧盟、日本、加拿大、澳大利亚等)	少部分发达国家 (俄罗斯、白俄罗斯、哈萨克斯坦、塔吉克斯坦等)
基线	100%HFCs三年均值 (2011-2013) +15%HCFCs基线	100%HFCs三年均值 (2011-2013) +25%HCFCs基线
削减进度	2019: 10% 2024: 40% 2029: 70% 2034: 80% 2036: 85%	2020: 5% 2025: 35% 2029: 70% 2034: 80% 2036: 85%

- 注：1)均以CO<sub>2</sub>当量进行计算；  
2)HCFCs基线=1989的HCFCs+1989的2.8%CFCs。



# 发展中国家HFCs限控时间表

国家类别	主要发展中国家 (中国等)	少部分发展中国家 (印度、沙特、巴基斯坦等)
基线	100%HFCs三年均值 (2020-2022) +65%HCFCs基线	100%HFCs三年均值 <b>(2024-2026)</b> + <b>65%</b> HCFCs基线
削减进度	2024: 冻结 2029: 10% 2035: 30% 2040: 50% 2045: 80%	<b>2028: 冻结</b> <b>2032: 10%</b> <b>2037: 20%</b> <b>2042: 30%</b> <b>2047: 85%</b>

- 注：1)均以CO<sub>2</sub>当量进行计算；
- 2) HCFCs基线=2009-2010的HCFCs均值。





## 1.4 基加利修正案的生效

- 按照达成的协议，有20个国家签署加入修正案，基加利修正案将于2019年1月1日生效。
- 目前批准基加利修正案的国家已经达到42个，修正案已满足生效条件，这一国际公约于2019年1月1日正式生效。
- 京都议定书→基加利修正案：新一轮工质替代（低GWP）的触发→落地。



## 2 新一轮替代制冷剂的选择

- 需要考虑的因素
- 未来可能的选择方向
- 目前可选的低GWP工质及物性



## 目前可选的低GWP工质

目前可选的低GWP的工质主要有：

- (1) 自然工质：R290、R744、R717等
- (2) 氢氟烯烃(HFOs)：R1234yf、R1234ze(E)等
- (3) 部分氢氟烃(HFCs)：R152a、R161、R32等



## 3.1 困局：符合环保,性能,安全的替代物-无

替代物	安全	环保	性能	经济
HFOs	弱可燃性	降解出三氟乙酸	单位容积制冷量较低	价格高
HFCs	(弱)可燃性	基加利修正案明确限定		价格中
自然工质	HCs可燃性 R717有毒 易爆		R744的物性和能效比不理想	价格低

自然工质缺点明显但相对单一，便于集中精力有效地克服和回避。选用安全性差的工质将是新一轮工质替代中无法回避的问题。



## 3.2 困局之突破

- HFOs和HFCs：只能作为辅助技术路线而不能作为核心技术路线。
- 把R290和R744扬长避短的技术创新作为核心技术路线。如能有所突破、见到实效，R290和R744是可以作为长期替代物来选择的。
- 需要有战略眼光和决断的魄力(灰犀牛)



## 4.1 ICR涉及R290的研究19篇

地区	文章数	备注
亚洲	6	日本（4）中国（2）
欧洲	9	挪威（3）意大利（2）德国（2）波兰（1）丹麦（1）
美洲	4	美国（3）巴西（1）





# R290传热性能研究（4篇）

- 实验研究R290在水平光滑铜管中的两相流动沸腾传热。结果显示，饱和压力越高，压降和传热系数越小。
- 研究几种工质与聚酯油(POE)混合后在竖直微通道管内的沸腾传热情况。研究显示，R290的压降比小于R32和R1234yf。
- 研究R600a及R290为制冷剂的水平方形微通道换热器的传热及压降特性的影响规律。R290的压力损失小于R600a。



# R290系统性能研究（11篇）

- 对制冷机组或热泵机组的实验研究表明：R290具有替代R404A、R134a、R410A的潜力。
- 对R290热泵热水器进行了高出水温度的实验测试。结果显示，在环境为 $-15^{\circ}\text{C}$ ， $-7$ 和 $0^{\circ}\text{C}$ 时，出水温度可以分别达到 $55^{\circ}\text{C}$ ， $65^{\circ}\text{C}$ ， $70^{\circ}\text{C}$ 。
- 对气液两相喷射器进行了热力学分析，R290具有较高的引射效率。
- R290（低温级）与R600（高温级）复叠的高温热泵具有良好的性能。



## R290的安全研究（4篇）

- R290安全等级为A3，属易燃易爆制冷剂。研究热点：防止泄漏并降低泄漏后风险，后者可从降低泄漏速率、降低泄漏后制冷剂浓度和阻燃等方面考虑。
- 具体措施有：
  - 1) 分体式空调机组可在毛细管后加装电磁阀。
  - 2) 保证机组与室内的正常通风。
  - 3) 防止各类点火源。
  - 4) 润滑油中添加阻燃剂。
  - 5) 机组外增加围护结构，并保持与室外的通风。
  - 6) 机组内放置检漏仪和报警装置。



# ICR涉及R744的研究50篇

地区	文章数	备注
亚洲	7	中国 (6) 韩国 (1)
欧洲	39	挪威 (11) 德国 (5) 法国 (5) 意大利 (5) 西班牙 (4) 瑞典 (3) 丹麦 (2) 英国 (1) 比利时 (1) 波兰 (1) 荷兰 (1)
美洲	4	美国 (3) 加拿大 (1)



## R744热力性质及性能优化（22篇）

- 与其它工质混合，改善物性。与丙烯的共沸混合物在制冷设备中可节能10.3%；与N<sub>2</sub>O的混合物用于冷冻干燥机，可实现与标准HFC设备相似的能效。
- 喷射器技术。跨临界R744制冷系统，喷射器的使用提高了系统的COP。
- 压力交换器（PX）技术。与标准跨临界R744增压系统相比，PX可将R744系统的性能系数提高25%以上。



## R744热泵及应用（7篇）

- **系统耦合。**将地热储存集成到CO<sub>2</sub>超市制冷系统对能源使用没有显著影响；地热存储集成可以降低年运行成本19-31%。
- **食品干燥。**热泵可对干燥过程进行加热和冷却，使干燥效率提高80%以上，但使干燥时间延长13-43%。
- **探测器冷却。**引入R744跨临界冷却系统，与自然冷却液体一起工作来完成探测器未来的冷却。





## R744冷冻及超市应用（12篇）

- 喷射器支撑的多级压缩跨临界二氧化碳增压系统，制冷装置的能源需求减少了30%以上
- 由喷射器支撑的CO<sub>2</sub>增压系统，在两种温度下均采用并行压缩和直接膨胀制冷剂，比R22机组能效有显著提高
- 将冷热能储存器和CO<sub>2</sub>过冷器添加到整个CO<sub>2</sub>制冷设备中，节省电费的6%
- 并联10台压缩机的CO<sub>2</sub>商用制冷装置，同时回收冷凝热用于卫生热水生产和空间加热，制冷COP和总COP的平均值分别为2.1和3.6



## 5.1 未来发展的思考- R290

- 技术创新的核心：充分发挥热力学性能的优势、弱化可燃性带来的负面影响
- 技术路线：1) 提升系统的密封性，尽可能减少现场安装→管路全焊接的整体结构，即整体机而非分体机；2) 有效减低系统工质的充注量→管内容积尽可能小的高效换热器。



## 整体机（窗式空调器）的技术再创新

- 研发新一代R290窗式空调器不是简单的返祖，而是综合体现舒适、健康与绿色等现代建筑理念的性能全面提升。
- 要解决的问题主要有：如何有效地降低振动和噪声？如何将换气热回收技术集成于产品中？如何改善制热性能特别是低温工况制热性能？
- 这些问题合理有效地解决，将有助于窗式空调器全面升级换代和可燃制冷剂扩大应用。



## 整体机(户式中央空调)的技术再创新

- 优势：水进入室内更加安全，室外机置于室外开阔的环境中，泄漏后易扩散。充注量能增加到多大，需进一步研究。
- 新一代的户式中央空调应以提高能效、缩减换热器尺寸为研发目标。
- 在新一轮工质替代中重焕青春，使之发挥重要作用。



# 小工质容量高效换热器应用创新

- 应用创新核心：提高换热效率，减少换热器管内容积。
- 风冷换热器：目前主要有：小管径换热器（ $\phi 5\text{mm}$ 铜管 $\downarrow 25\%$ ）垂直管换热器（ $\downarrow 47.7\%$ ）和微通道换热器（ $\downarrow 77\%$ ）。如何适应热泵工作模式？
- 水冷换热器：高效管，紧凑结构（板式、套管式）。另外，还应研发新结构、新流程的高效换热器，以及与系统的协同优化。





## 5.2 未来发展的思考 - R744

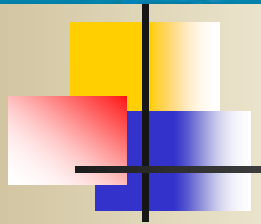
- 目前只能应用到热泵热水器中，且必须采用跨临界循环，另外，采用小口径管或者不锈钢管换热器以增强承压能力。
- 提高能效水平的途径：优化热力循环并研制相应部件，包括开发二级压缩机，采用喷射器或者膨胀机代替节流元件，通过回热、增大过冷等。





## 结论

- 选用可燃制冷剂是无法回避的问题，通过技术创新，R290和R744能够作为长期替代工质。
- R290技术创新的核心是弱化可燃性带来的负面影响：整体机再创新→提升系统的密封性，小工质容量高效换热器的应用创新→减低系统工质的充注量。
- R744跨临界循环的热泵热水器，提高能效水平的主要技术途径：二级压缩，喷射器或者膨胀机，回热、增大过冷等。



谢谢大家！  
Thanks for your attention