

# 新型制冷剂在暖通空调系统中的性能与环境影响研究

王 丽

丹佛斯（天津）有限公司 天津 301700

**摘 要：**新型制冷剂因低全球变暖潜能值（GWP）、优异热力学性能及环境兼容性，成为制冷行业转型关键。R1233zd(E)、HFO-1234yf等氢氟烯烃类及R290等天然制冷剂，在GWP值、臭氧消耗潜能（ODP）及能效上优势显著。其在暖通空调系统中展现出高制冷/制热系数、优传热与流动性能，但面临安全性、系统兼容性 & 成本挑战。通过安全设计、系统优化与技术创新可应对上述问题，推动其在绿色高效制冷领域的广泛应用，助力行业低碳转型。

**关键词：**新型制冷剂；暖通空调系统；性能；环境影响

## 引言

随着全球环保与可持续发展要求升级，传统制冷剂因高GWP及臭氧层破坏问题渐显局限，新型制冷剂研发与应用成为必然。其在热力学、传热及流动性能上的突破，为暖通空调系统能效提升提供可能。然而，安全隐患、系统适配难题及成本压力制约其推广。本文聚焦新型制冷剂特性，分析其在暖通空调系统中的性能表现与环境影响，探讨应用挑战及应对策略，为推动制冷技术绿色升级提供参考。

## 1 新型制冷剂概述

在制冷技术不断革新的进程中，新型制冷剂正成为行业焦点。随着全球对环境保护和可持续发展的关注度日益提升，传统制冷剂因对臭氧层有破坏作用，或具有较高的全球变暖潜能值（GWP），逐渐无法满足环保要求，新型制冷剂应运而生。例如R1233zd(E)，化学名称为反式-1-氯-3,3,3-三氟丙烯，属于新型的氢氟烃（HFO）制冷剂。它的GWP值仅为4.5，远低于现有氢氟碳化合物（HFC）制冷剂。其沸点为32.5℃，临界温度为162.5℃，临界压力为4.2MPa，热力学性能优于许多现有HFC制冷剂，蒸气压和比热容与R134a接近，而临界温度和临界压力明显更低，这使其在制冷系统中使用更为便捷。它还是A1级制冷剂，无毒、不可燃，不会破坏臭氧层，展现出良好的安全性。又如HFO-1234yf，同样具有出色的环境参数，GWP值为4，ODP（臭氧消耗潜值）为0，寿命期气候性能（LCCP）低于HFC-134a，大气分解物与HFC-134a相同，且系统性能优于HFC-134a，被认为是极具潜力的新一代汽车制冷剂替代品，在西欧已被汽车生产商接受并逐步推广。R290（丙烷），作为一种天然制冷剂，GWP值仅为3，在环保性能上表现突出。在新能源汽车热管理系统的相关研究中，搭载新型冷媒R290热管理系统样机的新能源汽车，在接近零下30摄氏度的

极寒条件下进行道路试验，制热效果优秀，能稳定运行，为其可靠性和实用性提供了有力验证。不过，R290遇明火易燃，一旦泄漏存在爆炸风险，在应用时需解决其易燃易爆性问题。这些新型制冷剂凭借低GWP值、良好的热力学性能以及安全性等优势，正在逐步改变制冷行业的格局。随着研发的不断深入和技术的持续进步，新型制冷剂将在更多领域得到应用，推动制冷行业朝着绿色、高效的方向不断发展。

## 2 新型制冷剂在暖通空调系统中的性能研究

### 2.1 热力学性能

新型制冷剂在热力学性能方面展现出显著优势。其具备较高的制冷与制热系数，能高效实现热量的转移，在制冷循环中可迅速从低温热源吸热并向高温热源放热，在制热循环中则相反，大大提升了暖通空调系统的能效。例如，部分新型制冷剂的制冷系数相较于传统制冷剂可提高10%-20%，有效降低了系统能耗。新型制冷剂的沸点和凝固点适宜，能在较宽温度范围内维持稳定的相态变化，无论是高温环境下的制冷需求，还是低温环境下的制热需求，都能很好地适应。像一些应用于极寒地区的暖通空调系统，所采用的新型制冷剂在极低温度下依然能正常蒸发吸热，确保制热功能稳定运行。新型制冷剂的临界温度和压力等参数经过优化，使其在系统运行时能更接近理想循环状态，进一步提升了能量转换效率，为暖通空调系统的高效稳定运行奠定了坚实基础<sup>[1]</sup>。

### 2.2 传热性能

在传热性能上，新型制冷剂具有出色的表现。其较高的导热系数使得热量在制冷剂内部能够快速传递，在蒸发器中，可加速从周围环境吸收热量，实现高效制冷；在冷凝器中，能迅速将热量释放到外界环境，加快散热进程。研究表明，某些新型制冷剂的导热系数比传统制冷剂高出20%-30%，极大地增强了换热效果。新

型制冷剂在相态变化过程中,如蒸发和冷凝时,具有较高的传热系数,这意味着在相同的传热面积和温差条件下,能够传递更多的热量。在空调的蒸发器和冷凝器设计中,使用新型制冷剂可适当减小换热面积,从而降低设备成本,同时不影响系统的制冷和制热能力。新型制冷剂与换热表面之间具有良好的润湿性,能够均匀地分布在换热表面,避免出现局部换热不良的情况,进一步保障了传热过程的高效与稳定。

### 2.3 流动性能

新型制冷剂的流动性能对暖通空调系统的运行同样关键。其具有较低的粘度,在管道中流动时产生的阻力较小,这使得制冷剂在系统内的循环更加顺畅,减少了输送过程中的能量损耗。以常见的空调管路为例,使用新型制冷剂后,系统的循环泵功耗可降低15%~20%,有效节约了能源。新型制冷剂在不同温度和压力条件下,仍能保持较为稳定的流动特性,不会因工况变化而出现明显的流动异常,确保了系统在各种运行条件下都能可靠运行。新型制冷剂与管道材料具有良好的相容性,不会对管道造成腐蚀或侵蚀,保证了管道系统的长期使用寿命,也维持了制冷剂在管道内稳定的流动状态,为系统的高效稳定运行提供了有力保障。

## 3 新型制冷剂在暖通空调系统中的环境影响评估

### 3.1 全球变暖潜能(GWP)

全球变暖潜能(GWP)作为衡量制冷剂对气候变化影响的核心指标,直接反映其在大气中吸收红外辐射并引发温室效应的能力,通常以二氧化碳为基准(GWP值为1)进行量化。新型制冷剂研发时对GWP值控制成效显著。其分子结构经精心设计,优化碳氟键排列并引入不饱和键,大幅降低对红外辐射的吸收效率,多数产品GWP值仅有个位数或处于数十水平,与传统HFCs动辄数千的数值相比优势巨大。低GWP特性意味着,在制冷剂生命周期内,即便出现泄漏,进入大气后对全球变暖的贡献也微乎其微,能有效减轻制冷系统运行时的气候负荷。实际应用中,低GWP新型制冷剂与系统循环效率协同优化,可进一步减少间接碳排放,通过提升能源转换效率降低电力消耗,从直接和间接两个层面降低对气候系统的综合影响,为暖通空调领域的低碳转型提供关键支撑。

### 3.2 臭氧消耗潜能(ODP)

臭氧消耗潜能(ODP)用于评估制冷剂分子在大气中与臭氧发生化学反应的可能性,其数值大小取决于分子中是否含有氯、溴等对臭氧具有破坏作用的卤素原子。传统含氯氟烃(CFCs)和氢氯氟烃(HCFCs)分

子含氯,会在平流层与臭氧发生链式反应,致使臭氧分解,ODP值较高。而新型制冷剂在分子设计上,普遍剔除氯、溴等卤素成分,或调整分子构型削弱与臭氧的反应活性,绝大多数产品ODP值为0。零臭氧消耗特性意义重大,它从根源上杜绝了对臭氧层的破坏,保护了大气臭氧层对紫外线的屏蔽功能,降低了地表紫外线辐射强度。在暖通空调系统长期运行过程中,使用ODP值为0的新型制冷剂,即便发生慢性泄漏,也不会干扰平流层臭氧平衡,为维护全球生态系统的紫外线防护屏障筑牢了根基,与臭氧层保护的科学目标高度契合<sup>[2]</sup>。

### 3.3 大气寿命

大气寿命指制冷剂分子进入大气后在环境中保持化学稳定性的时间长度,其数值大小与分子的化学活性及在大气中的降解路径密切相关。新型制冷剂引入不饱和碳碳键或调整取代基种类,增强了与大气中羟基自由基的反应活性,让分子在对流层更易被氧化分解,显著缩短了大气寿命,多数产品仅为数天至数年,远低于传统HFCs数十年甚至上百年的留存时间。较短的大气寿命,即便发生泄漏,其在大气中积累的浓度也难达显著影响气候的水平,可降低长期环境风险,短期泄漏的分子也会较快降解,减少累积效应。在暖通空调系统的全生命周期中,这种短大气寿命特性与低GWP值形成协同作用,通过降低分子在大气中的留存时间和辐射效率,进一步削弱其对气候系统的长期扰动,为制冷行业的环境安全性提供了额外保障。

## 4 新型制冷剂在暖通空调系统应用中面临的挑战与对策

### 4.1 面临的挑战

#### 4.1.1 安全性问题

部分新型制冷剂因分子结构特性存在易燃易爆风险,如碳氢类制冷剂在空气中达到一定浓度时,遇高温或电火花可能引发燃烧甚至爆炸,对系统运行环境的安全性构成挑战。部分含氟烯烃类制冷剂虽不可燃,但高浓度下可能对人体呼吸系统产生刺激,长期暴露存在健康隐患。新型制冷剂与传统润滑油的混合体系在高温高压下可能发生化学稳定性下降,导致分解产物腐蚀性增强,间接影响系统部件的安全运行,这些因素均需应用中通过技术手段进行有效管控。

#### 4.1.2 系统兼容性

新型制冷剂的物理化学性质与传统制冷剂存在显著差异,可能与现有系统中的密封材料、管道镀层及压缩机润滑油发生不相容反应,导致密封性能下降、管路腐蚀或润滑失效,影响系统的长期可靠性。例如,部分

HFO类制冷剂与矿物油的互溶性较差,会降低润滑效果并增加流动阻力,而极性较强的制冷剂可能对橡胶密封件产生溶胀作用,导致泄漏风险上升。制冷剂的压力特性变化可能使现有压缩机的压缩比偏离设计值,引发效率下降或机械磨损加剧等问题<sup>[3]</sup>。

#### 4.1.3 成本因素

新型制冷剂的合成工艺较为复杂,尤其是高纯度HFO类制冷剂需通过多步催化反应实现分子结构调控,生产过程中的原料转化率较低且能耗较高,导致单位成本显著高于传统HFCs制冷剂。为适配新型制冷剂的特性,系统需进行针对性改造,如更换压缩机类型、优化换热器结构及升级控制系统,这些改造成本会增加初期投入。新型制冷剂的回收与再利用技术尚不成熟,循环使用效率低,进一步推高了全生命周期的应用成本。

### 4.2 对策

#### 4.2.1 安全设计与监测

针对制冷剂的易燃易爆特性,可采用低充注量设计,通过优化换热器结构缩小制冷剂循环体积,同时在系统关键节点设置浓度传感器与防爆装置,实时监测泄漏浓度并在超标时触发自动切断机制。对于具有潜在毒性的制冷剂,需强化系统密闭性设计,采用耐腐蚀的合金材料制作管道与阀门,并配备高效通风系统,加速泄漏气体的扩散稀释。通过数值模拟预判制冷剂在不同工况下的泄漏路径,优化设备布局以避免泄漏气体聚集,从空间设计层面提升系统安全性。

#### 4.2.2 优化系统设计与材料选择

基于新型制冷剂的热力参数,重新匹配压缩机排量与转速,调整节流装置的孔径与流量特性,使循环过程更接近理论最优状态。在材料选择上,针对制冷剂的极性特征选用氢化丁腈橡胶等耐溶胀密封材料,采用POE类合成润滑油提升与制冷剂的互溶性,减少油膜对传热的阻碍。对换热器进行强化传热设计,采用微通道结构

增大换热面积,并通过表面改性技术提升制冷剂的润湿性,降低流动阻力。通过加速老化试验筛选适配的金属材料,确保管道与部件在长期接触中无腐蚀或磨损现象。

#### 4.2.3 技术创新与成本控制

研发高效催化合成工艺,通过改良催化剂活性组分提高新型制冷剂的单程转化率,降低单位产品的能耗与原料消耗,从生产端压缩成本。推动系统集成化设计,开发模块化换热设备与通用型压缩机平台,减少因制冷剂类型差异导致的定制化改造需求,降低适配成本。建立制冷剂回收提纯体系,采用吸附-精馏联合工艺分离回收气体中的杂质,提升循环利用率,通过延长使用寿命间接降低长期投入,实现技术经济性的平衡<sup>[4]</sup>。

### 结语

综上所述,新型制冷剂凭借低GWP、高能效及环境友好特性,为暖通空调行业绿色转型提供有力支撑。尽管在安全性、系统兼容性及成本方面存在挑战,但通过安全设计优化、材料适配升级及技术创新突破,可有效化解难题。未来,随着研发深入与应用拓展,新型制冷剂将进一步重塑制冷行业格局,推动暖通空调系统向更高效、低碳、可持续方向发展,为全球气候治理与能源节约贡献重要力量。

### 参考文献

- [1]马驰原,孙大伟.新型制冷剂在LNG液化装置中的应用与性能评估[J].石化技术,2024,31(11):68-70.
- [2]鹿凤云.新型制冷剂反应器的设计[J].中国化工装备,2020,22(3):32-35.
- [3]张利优.暖通空调系统对建筑内环境的影响[J].城镇建设,2020(9):359.
- [4]李喜良.暖通空调系统对建筑内环境的影响[J].理财周刊,2021(6):143.