

可燃制冷剂在轨道交通车辆空调中的应用

杨艳飞¹ 李文华¹ 樊 宝²

(1. 石家庄国祥运输设备有限公司, 050035, 石家庄; 2. 中国人民解放军某部队, 050051, 石家庄)

摘 要 **[目的]** 为分析轨道交通车辆空调中的可燃制冷剂允许充注量, 需研究可燃性环保制冷剂在轨道交通车辆空调中安全应用的可行性及方案。**[方法]** 分析空调的安装场所及访问类别, 结合不同可燃制冷剂热物性, 计算当前轨道交通车辆空调中制冷剂的允许充注量。进一步通过空间接换热系统的设计, 提高轨道交通车辆空调中可燃制冷剂充注量限值, 并就不同制冷剂的空调性能进行对比分析。**[结果及结论]** 不同燃烧等级的制冷剂在轨道交通车辆空调中的允许充注量不尽相同, 基于制冷剂燃烧下限的限制, 可燃制冷剂在轨道交通车辆空调中难以直接使用, 而通过间接换热设计可以有效提高可燃制冷剂在空调中的允许充注量, 解决制冷剂燃烧性带来的安全风险问题, 实现环保制冷剂在轨道交通车辆空调上的应用。

关键词 轨道交通车辆空调; 可燃制冷剂; 充注量限值; 间接换热

中图分类号 U270.38+3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.01.049

Application of Flammable Refrigerants in Rail Transit Vehicle Air-conditioners

YANG Yanfei¹, LI Wenhua¹, FAN Bao²

(1. Shijiazhuang KING Transportation Equipment Co., Ltd., 050035, Shijiazhuang, China; 2. A Unit of the People's Liberation Army of China, 050051, Shijiazhuang, China)

Abstract **[Objective]** To analyze the allowable charge quantity of flammable refrigerants in RTVAC (rail transit vehicle air-conditioners), it is necessary to explore the feasibility and solutions for the safe application of environmentally friendly flammable refrigerants in RTVAC. **[Method]** The installation site and access categories of AC are analyzed. Along with the thermophysical properties of various flammable refrigerants, the allowable charge quantity of refrigerants in current RTVAC is calculated. Further, by designing the indirect heat exchange system among AC units, the maximum allowable charge limit of flammable refrigerants in RTVAC is increased and the AC performance of different refrigerants is comparatively analyzed. **[Result & Conclusion]** Refrigerants with different flammability levels have varying allowable charge quantities in RTVAC. Due to the limitations imposed by the lower

flammability limit of refrigerants, direct use of flammable refrigerants in RTVAC is challenging. However, through the design of indirect heat exchange, it is possible to effectively increase the allowable charge quantity of flammable refrigerants in AC, thereby addressing safety risks associated with the flammability of refrigerants and enabling the application of environmentally friendly refrigerants in RTVAC.

Key words rail transit vehicle air-conditioner; flammable refrigerant; charge quantity limit; indirect heat exchange

近年来, 全球气候变化剧烈, 日益严重的温室效应促使各国愈发认识到绿色低碳发展的重要性。“碳达峰 碳中和”战略目标的确定, 体现了我国应对气候变化的决心, 绿色低碳必将成为各行各业需要共同努力的事业。

早在 2014 年, 欧盟就发布了 F-GAS(含氟温室气体)法规, 要求自 2017 年起所有预充注制冷设备中 HFC(氢氟烃)类制冷剂需持有配额, 才可投放欧洲市场; 而 2020 年起, 制冷剂 GWP(全球变暖潜能值)高于 150 的商用冷藏冷冻设备及移动式房间空调设备禁止进入欧盟市场。2021 年 6 月 17 日, 我国正式接受《〈关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书〉基加利修正案》。这对空调行业环保制冷剂的应用提出了更为具体的要求。目前, 轨道交通车辆空调所用制冷剂主要为 HFC 类制冷剂, 包括 R407C、R410A 及 R134a。这些制冷剂的 ODP(臭氧消耗潜能值)指数为 0, 对臭氧层没有破坏作用; 但 GWP 均处于较高水平, 普遍在 1 300 以上, 温室效应较高。目前, 各标准法规尚未对轨道交通车辆空调制冷剂的 GWP 限值做出明确规定, 但已开始逐步削减, 最终使用 GWP < 150 的环保制冷剂是大势所趋, 低 GWP 制冷剂在轨道交通车辆空调机组中的应用研究迫在眉睫。

1 环保制冷剂

选择替代制冷剂的首要原则应是环境友好, 即

ODP 为 0 且 GWP 值较低。但 ODP 和 GWP 不是制冷剂替代物的唯一指标,理想的替代制冷剂还应具有热物性优良、安全可靠、经济、易获得等特质。

在轨道交通车辆空调行业,当前制冷剂的替代

方案主要有两类:一类是 HFO(氢氟烯烃),典型代表如 R513A、R1234yf、R454C 等;另一类是自然工质,如 CO₂、R290 等。表 1 对几种低 GWP 制冷剂的基本性质进行了比较。

表 1 几种低 GWP 制冷剂基本性质比较

Tab. 1 Comparison of basic properties for several low GWP refrigerants

制冷剂	热物性	环保性	安全性等级及说明	被替代制冷剂
R513A	单位容积制冷量与 R134a 近似,压力适中	ODP 为 0,GWP 为 573	A1 级,无毒不可燃	R134a
R1234yf	单位容积制冷量及蒸发潜热略低于 R134a,压力适中	ODP 为 0,GWP 小于 1	A2L 级,无毒弱可燃	R134a
R454C	单位容积制冷量及性能系数较 R407C 略高,压力适中	ODP 为 0,GWP 为 146	A2L 级,无毒弱可燃	R407C
R290	单位容积制冷量大,压力适中	ODP 为 0,GWP 为 3	A3 级,无毒易燃易爆	R407C
CO ₂	单位容积制冷量大,系统运行压力很高,制热性能优良	ODP 为 0,GWP 为 1	A1 级,无毒不可燃	

这几种制冷剂中,R513A、R1234yf 均具有与 R134a 相近的饱和压力温度曲线,与润滑油互溶性良好,对金属、橡胶等材料的兼容性优良^[1],是十分理想的 R134a 替代物。其中 R513A 的 GWP 值略高,无毒不可燃,可作为过渡性环保冷媒用于轨道交通车辆空调;R1234yf 则具有轻微可燃性,制取工艺复杂,成本较高。

R454C 是科慕 HFO 类环保制冷剂,可替代 R407C,同样具有弱可燃性。

天然工质 CO₂ 来源广泛、价格低廉,也是轨道交通车辆空调环保冷媒的主要研究方向之一。其缺点是系统运行压力大,对部件的可靠性、制造工艺要求高;跨临界循环的特性也与常规制冷剂差异较大。

R290 作为碳氢类天然制冷剂,传热性能好、黏度低、排气温度低,有利于系统换热。但 R290 易燃易爆,需谨慎应用。

经综合比较,几种制冷剂各有优缺点。无论何种制冷剂,在追求环保的同时,必然在一定程度上牺牲其他性能。对于可燃性制冷剂,如果能够采取一定措施降低燃烧风险,则其在轨道交通车辆空调的应用可行性将大大提高。

2 安全分析

2.1 制冷剂安全等级

制冷剂安全等级由相应的制冷剂标准进行认定,如 ISO 817:2014 *Refrigerants-Designation and safety classification*、GB/T 7778—2017《制冷剂编号方法和安全性分类》。制冷剂标准分别从毒性和燃烧等级两个维度对制冷剂的安全等级进行了划分,如表 2 所示。

表 2 制冷剂安全等级划分

Tab. 2 Classification of refrigerant safety grades

燃烧等级	安全等级	
	A(低慢性毒性)	B(高慢性毒性)
3(可燃易爆)	A3 级	B3 级
2(可燃)	A2 级	B2 级
2L(弱可燃)	A2L 级	B2L 级
1(无火焰传播)	A1 级	B1 级

2.2 基于燃烧性的制冷剂允许充注量

可燃制冷剂只有达到一定浓度,并具备相应温度条件时才能燃烧。由此可推论,限制制冷剂的充注量,即可有效降低制冷剂泄漏燃烧引发火灾的风险。

2.2.1 制冷设备应用环境

根据制冷剂的燃烧特性,ISO 5149-1:2014 *Refrigerating systems and heat pumps-Safety and environmental requirements-Part 1: Definitions, classification and selection criteria* 和 EN 378-1:2016 *Refrigerating systems and heat pumps-Safety and environmental requirements-Part 1: Basic requirements, definitions, classification and selection criteria* 规定了不同应用环境、不同安全等级的制冷剂充注量限值。上述标准分别从安装场所和访问类别两个方面对制冷设备的应用环境进行了划分。

基于安装场所,制冷设备应用环境可划分为:

I 类:制冷系统或包含制冷剂的部件位于长期被人占用的空间(以下简称“占用空间”)中。

II 类:压缩机和所有压力容器位于机房或露天场所,线圈和管道阀门可能位于占用空间中。

Ⅲ类:所有包含制冷剂的部件都位于机房或露天场所。

Ⅳ类:具有通风外壳,即所有包含制冷剂的部件都放置通风机柜中,且机柜通过通风系统与室外空气连通,并确保空气无法从机柜流向周围空间。

根据访问类别,制冷设备应用环境划分为:

a 类:一般访问。放置制冷设备的房间或建筑物中提供睡眠设施,人员行动受限,进入人数不受控制;人员进入无需了解必要的安全措施。

b 类:受监督的访问。放置制冷设备的建筑物只能聚集有限人数,且人员进入前必须了解一些一般性的安全预防措施。

c 类:授权访问。只有熟悉常规和特殊安全预防措施的授权人员才能进入的放置制冷设备的建筑物或房间,以及进行材料和产品制造、加工或储存的建筑物。

对于轨道交通车辆空调来说,其制冷系统通过风道与人员密集的车厢直接连通,属于直接换热式空调系统。显然,轨道交通车辆空调的应用环境按安装场所应划分为 I 类,按访问类别应划分为 a 类。

2.2.2 可燃制冷剂允许充注量

不同应用条件下,不同燃烧等级的制冷剂允许充注量不同。

在安装场所为 I 类、访问类别为 a 类的空间,人员密度大,安全要求高,制冷设备中可燃制冷剂的允许充注量也最严格。对于此类应用环境,可燃制冷剂的最大允许充注量为:

m_max = 2.5 * rho_L^5/4 * h_0 * A^1/2 (1)

式中:

- m_max——制冷剂最大允许充注量,单位 kg;
- rho_L——制冷剂燃烧下限(LFL),单位 kg/m^3;
- h_0——制冷系统在空间中的安装高度,单位 m;
- A——地板面积,单位 m^2。

此外,按可燃制冷剂燃烧等级,m_max 还需满足:燃烧等级为 2L 时,m_max <= 26 m^3 * rho_L * 1.5;燃烧等级为 2 时,m_max <= 26 m^3 * rho_L;燃烧等级为 3 时,m_max <= max(26 m^3 * rho_L, 1.5 kg)。

在安装场所为Ⅳ类、访问类别为 a 类的空间中,可燃制冷剂燃烧等级为 2L 时,m_max <= 130 m^3 * rho_L * 1.5;燃烧等级为 2、3 时,m_max <= 130 m^3 * rho_L。

2.2.3 轨道交通车辆空调可燃制冷剂的 m_max

当前轨道交通车辆空调机组均采用直接换热

系统,主要由压缩机、冷凝器、冷凝风机、节流装置、蒸发器、蒸发风机等构成。直接换热系统的构成如图 1 所示。

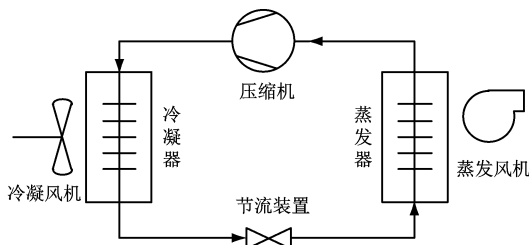


图 1 直接换热系统的构成示意图
Fig. 1 Schematic diagram of direct heat exchange system composition

制冷剂在蒸发器处与车内空气直接交换热量;制冷系统通过风道与人员聚集的车厢直接连通。制冷系统泄漏时制冷剂随送风直接进入车厢内部。常规轨道交通车辆空调属于占用空间类制冷设备,m_max 相对较低。

以某地铁车辆为例进行分析。司机室高 2.3 m,地板面积为 10.26 m^2,配置 1 台单系统的顶置式空调机组,采用 R134a 制冷剂,总充注量为 1.5 kg。客室高为 2.3 m,地板面积为 45.6 m^2,每节车厢设 2 台顶置式空调机组,每台机组包含 2 个独立系统,制冷剂为 R134a,单个系统制冷剂充注量为 4.2 kg,则车厢制冷剂总充注量达到 16.8 kg。

轨道交通车辆空调应用环境为 I 类及 a 类,若在该地铁空调中直接使用可燃制冷剂,则不同制冷剂在该地铁车辆空调中的 m_max 如表 3 所示。

表 3 不同可燃制冷剂在某地铁空调(直接换热)中的 m_max

Tab. 3 m_max for different flammable refrigerants in a metro

HVAC (direct heat exchange)				
制冷剂	燃烧等级	rho_L / (kg / m^3)	m_max / kg	
			客室	司机室
R1234yf	2L	0.289	8.23	3.91
R454C	2L	0.293	8.37	3.98
R290	3	0.038	0.65	0.31

结合表 3 可知:燃烧等级为 2L 时的 m_max 满足司机室空调制冷需求,但不能满足客室负荷需求;燃烧等级为 3 时的 m_max 极低,不能直接在轨道交通车辆空调中使用。

此外,由式(1)可以看出,m_max 与 h_0 有关,顶置单元式空调机组的 m_max 远高于车下悬挂式空调机组,因此也不建议在安装位置较低的车下悬挂式空

调机组中直接使用可燃性制冷剂。

3 间接换热系统的应用

虽然车辆空调机组在使用可燃制冷剂时,可通过采用小管径换热器或微通道换热器等措施来减少冷媒充注量,但这对于降低充注量的作用仍十分有限。采用间接换热系统,能有效提高轨道交通车辆空调机组可燃性制冷剂的 m_{\max} 。

3.1 间接换热系统

所谓间接换热系统,是将制冷剂循环与载冷剂循环分隔在室内和室外两个腔室,两个循环通过中间换热器实现冷量传递,最后通过载冷剂循环的末端设备把冷量传递给空气送入车厢,从而实现为车厢制冷功能。由于制冷剂循环被完全隔绝在室外侧,制冷剂泄漏也只会泄漏至室外,而不会泄漏至空间有限的室内侧,其基本构成如图 2 所示。

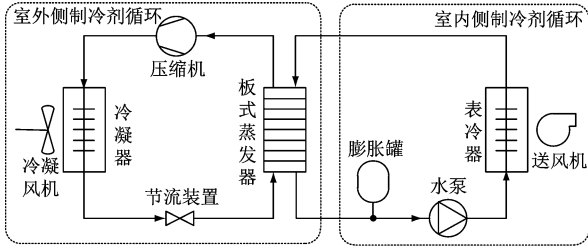


图 2 间接换热系统构成示意图

Fig. 2 Schematic diagram of indirect heat exchange system composition

相较于常规直接换热式空调机组,间接换热系统增加了载冷剂^[2]循环相关部件,包括中间换热器、水泵、膨胀罐等。而载冷剂作为载冷循环的“血液”,承担着将制冷剂冷量传递给室内空气的职责。

增加载冷剂循环不仅能实现制冷系统与空气的间接换热,还能使制冷剂循环与车厢内部完全隔绝,保障了可燃制冷剂的使用安全。

3.2 间接换热系统的 m_{\max}

若采用间接换热系统,则轨道交通车辆空调的安装场所由 I 类占用空间变为 IV 类通风外壳。间接换热系统中可燃性制冷剂的 m_{\max} 如表 4 所示。

比较表 3 及表 4 可见,使用间接换热系统的空调机组 m_{\max} 大大提高,燃烧等级 2L 时 m_{\max} 完全满足客室制冷需求。可见,采用间接换热系统可在不降低空调冷媒实际充注量的前提下,保障可燃性制

冷剂的运用安全。

表 4 不同可燃制冷剂在轨道交通车辆空调(间接换热)中的 m_{\max}

Tab. 4 m_{\max} for different flammable refrigerants in rail vehicle HVAC (indirect heat exchange)

制冷剂	燃烧等级	$\rho_L / (\text{kg}/\text{m}^3)$	m_{\max} / kg	
			客室	司机室
R1234yf	2L	0.289	56.36	56.36
R454C	2L	0.293	57.14	57.14
R290	3	0.038	4.94	4.94

然而对于燃烧等级较高的制冷剂而言,由于其 ρ_L 较低,即使采用间接换热方式, m_{\max} 也仍较低,因此需对其应用安全性进行研究。

3.3 直接换热系统与间接换热系统的基本性能对比

基于某地铁客室空调平台接口,分别采用不同制冷剂和不同换热方式,以 R407C 制冷剂 + 直接换热作为基本对照组,分析各空调机组的基本性能。同制冷剂、不同换热方式的空调性能对比如表 5 所示。

表 5 不同制冷剂、不同换热方式的空调性能对比

Tab. 5 Comparison of HVAC performance with different refrigerants and different heat exchanging modes

制冷剂	换热方式	制冷量/ kW	COP	成本 指数/%	质量 指数/%
R407C	直接换热	37.2	2.30	100	100
R454C	间接换热	38.6	2.03	125	111
R1234yf	间接换热	31.3	2.16	136	114
CO ₂	直接换热	36.4	2.00	211	115

注:COP 为逆向循环性能系数。

相较于直接换热系统,间接换热系统增加了一次热量交换,不可避免地带来了热量损失。试验结果显示:与采用 R407C 直接换热时相比,使用环保冷媒间接换热后空调机组 COP 略有降低,成本也略微增加;与 CO₂ 直接换热系统相比,可燃制冷剂间接换热系统 COP 更优,成本也低得多;此外,在质量方面,通过轻量化设计,间接换热式空调机组可减重至直接换热式空调机组质量的 105%。

综上,在轨道交通车辆空调中使用环保可燃性制冷剂,可通过间接换热的设计来保障安全性。

(下转第 275 页)

(S1): 57.

[4] 冯建霖. 下穿机场跑道大断面隧道施工对策及地层变形规律研究[J]. 隧道建设, 2015, 35(5): 473.
FENG Jianlin. Study on construction countermeasures for and ground deformation rule of construction of large cross-section tunnel crossing underneath existing airport runway[J]. Tunnel Construction, 2015, 35(5): 473.

[5] 王颖, 斯碧峰, 白乔木, 等. 不停航施工完成浦东机场飞行区下穿通道工程建设[J]. 航空港, 2019(4): 9.
WANG Ying, SI Bifeng, BAI Qiaomu, et al. Underpass tunnel project completed at Pudong International Airport [J]. Airport Journal, 2019(4): 9.

[6] 周松, 荣建, 陈立生, 等. 大直径泥水盾构下穿机场的施工控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 806.
ZHOU Song, RONG Jian, CHEN Lisheng, et al. Construction control of large diameter slurry shield undercrossing airport [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(4): 806.

[7] 叶耀东, 朱合华, 王如路. 软土地铁运营隧道病害现状及成因分析[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(1): 157.

YE Yaodong, ZHU Hehua, WANG Rulu. Analysis on the current status of metro operating tunnel damage in soft ground and its causes[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(1): 157.

[8] 毕湘利, 柳献, 王秀志, 等. 无缝拼装盾构隧道结构极限承载力的足尺试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(10): 117.
BI Xiangli, LIU Xian, WANG Xiuzhi, et al. Experimental investigation on the ultimate bearing capacity of continuous-jointed segmental tunnel linings[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(10): 117.

• 收稿日期:2021-10-19 修回日期:2021-12-10 出版日期:2024-01-10
Received:2021-10-19 Revised:2021-12-10 Published:2024-01-10
通信作者:叶宇航,工程师,yeyuhang@gmdi.cn
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 268 页)

4 结语

国际社会应对全球气候变化的决心,要求轨道交通车辆空调行业必须着手于低 GWP 制冷剂的研究。当前轨道交通车辆空调的替代制冷剂主要有 HFO 制冷剂及天然冷媒两类,除 CO₂ 外,其他替代制冷剂均具有一定程度的可燃性。本文从制冷剂的可燃性着手,对可燃性制冷剂在轨道交通车辆空调中的应用进行了分析,得出结论如下:

- 1) 不同燃烧等级的制冷剂在轨道交通车辆空调中的允许充注量不尽相同,具体应根据实际运用环境分析计算。
- 2) 对于轨道交通车辆司机室空调机组,所需制冷剂充注量较少,燃烧等级较低的制冷剂可直接应用,高燃烧性冷媒的使用需谨慎评估。
- 3) 对于客室空调机组,制冷剂燃烧等级不高时,可以考虑采用间接式换热系统,将制冷剂循环隔绝在室外腔,提高空调机组应用环境等级,从而提高可燃制冷剂的允许充注量。

4) 间接式换热系统不可避免地会带来系统空调性能的降低,但为可燃性环保型制冷剂在轨道交通车辆空调的安全应用提供了一个研究方向。

参考文献

[1] 刘圣春, 饶志明, 杨旭凯, 等. 新型制冷剂 R1234yf 的性能分析[J]. 制冷技术, 2013, 33(1): 56.
LIU Shengchun, RAO Zhiming, YANG Xukai, et al. Performance analysis of the new refrigerant R1234yf[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2013, 33(1): 56.

[2] 戴海凤, 刘妮, 陈伟军. 第二制冷剂及其制冷系统的应用[J]. 低温与超导, 2012, 40(5): 84.
DAI Haifeng, LIU Ni, CHEN Weijun. Development of secondary refrigerants and applications in refrigeration systems[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2012, 40(5): 84.

• 收稿日期:2021-06-23 修回日期:2022-03-19 出版日期:2024-01-10
Received:2021-06-23 Revised:2022-03-19 Published:2024-01-10
• 通信作者:杨艳飞,工程师,yanfei.yang@guoxiang.com.cn
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

www. umt 1998. tongji. edu. cn