

地铁列车空调机组润滑油品质检测与试验研究

郑学林¹ 唐仕杰¹ 臧建彬² 王海鹰²

(1. 上海海事大学商船学院, 201306, 上海; 2. 同济大学机械与能源工程学院, 201804, 上海//第一作者, 副教授)

摘要 目的:随着地铁列车空调机组内润滑油的长期使用或其他外在因素的影响,润滑油会逐渐劣化而失效,并对制冷系统造成不利影响。因此,研究润滑油在不同条件下的劣化规律、劣化后性能及其对制冷系统的影响有着重要意义。方法:实测了经长期运行的地铁列车空调机组的性能;介绍了反映润滑油品质的重要理化指标及各指标的检测方法;对空调机组内润滑油进行取样检测;基于检测结果,分析了经长期使用的润滑油品质状况;对某常用 POE(多元醇酯)油 A 和矿物油 B 开展了高温氧化试验,分析两种润滑油在高温和有氧环境下的劣化情况及其对空调机组内金属材料的腐蚀情况。结果及结论:运行十年左右的地铁列车空调机组润滑油品质会出现一定程度下降,这种品质变化会使得润滑油的润滑性和密封性变差,导致制冷空调机组性能的下降;润滑油的色度并不完全反映油本身的劣化程度;润滑油在高温条件下会快速氧化变质,造成黏度和酸值的升高,并快速腐蚀铜和铁等金属;通过检测润滑油的黏度、酸值、元素质量分数,可对运行异常机组进行原因分析,对运行正常机组进行隐患排查,在机组出现重大问题前预先发现异常,从而规避损失。

关键词 地铁;列车空调;润滑油;理化指标;劣化

中图分类号 U270.38*3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.12.020

Research on Quality Inspection and Experimental Study of Lubricating Oil for Metro Train Air-conditioning Units

ZHENG Xuelin, TANG Shijie, ZANG Jianbin, WANG Haiying

Abstract Objective: With the long-term use of lubricating oil in metro train air-conditioning units or the impact of other external factors, lubricating oil will gradually deteriorate and lose the effectiveness, adversely affecting the refrigeration system. Therefore, studying the deterioration law, post-deterioration performance, and their impact on the refrigerant system under different conditions is of significant importance. Method: The performance of metro air-conditioning units after long-term operation is field-measured. Important physicochemical indicators reflecting lubricating oil quality and the detection

methods for each indicator are introduced. Samples of lubricating oil are taken from the air-conditioning unit and tested. Based on the test results, the quality condition of lubricating oil after long-term use is analyzed. High-temperature oxidation tests are carried out on a commonly-used POE (polyolester) oil A and a mineral oil B. The deterioration of the two lubricating oils under high-temperature and aerobic conditions, as well as their corrosion effects on the metal materials inside the air-conditioning units. Result & Conclusion: After approximately ten years of operation, the quality of lubricating oil in metro train air-conditioning units tends to decline to some extent. This change in quality deteriorates the lubricating and sealing properties of the oil, leading to a decrease in the performance of the refrigeration air-conditioning units. The color of the lubricating oil does not entirely reflect the degree of oil deterioration. Under high-temperature conditions, lubricating oil undergoes rapid oxidation, leading to an increase in viscosity and acidity, and a rapid corrosion of metals such as copper and iron. By testing the viscosity, acid value, and elemental mass fraction of lubricating oil, abnormal operation of units can be analyzed, potential risks in normal operation units can be identified, and anomalies can be detected in advance before major problems occur, thus avoiding losses.

Key words metro; train air-conditioner; lubricating oil; physical and chemical indicators; deterioration

First-author's address Merchant Marine College of Shanghai Maritime University, 201306, Shanghai, China

0 引言

地铁列车空调机组经长期运行,会出现功耗上升,性能系数不同程度下降的情况。引起地铁列车空调机组性能下降的因素有多种,其中压缩机润滑油的劣化是原因之一。在地铁列车空调系统中,压缩机润滑油起到了润滑运动部件、防止机械表面被磨损、清除机件间隙中的金属磨屑及润滑油氧化产物、密封压缩室和吸收气体压缩热等作用^[1]。其是

空调机组保持正常和安全运行的“血液”。压缩机润滑油经长期使用后可能由于被氧化或污染而劣化,使润滑油各项性能下降而造成机组性能的下降,严重时可能使整个制冷系统发生故障甚至损坏。因此,研究地铁列车空调机组内润滑油的劣化规律、劣化后性能的衰变状况及其对制冷系统的影响有着重要的意义。

文献[2]搭建了螺杆式制冷压缩机油的评定台架,采用加速劣化的方法开展了润滑油的台架评定测试,对 2 种油测试了其劣化过程,通过检测色度、黏度、闪点、酸值和抗磨损性等来反映润滑油的质量水平。文献[3]依据 ISO 917—1999《容积式制冷压缩机的性能试验方法(充油型)》试验方法的测试要求,搭建了 400DSX 型润滑油的台架评定系统,并对 KRD8 型和 NP8 型 2 种矿物油进行了长寿命评价试验,结果表明 KRD8 型的润滑效果明显好于 NP8 型。文献[4]开展了 CO₂ 与各类润滑油的相容性研究,结果表明,PAG(聚乙二醇)油与 CO₂ 的相容性不如 POE(多元醇酯)油,但 PAG 油的综合性能更为突出;基于高压反应釜法,选取 2 种不同牌号的 PAG 油,对 CO₂/润滑油的材料相容性进行试验测定,比较了二者用于热泵压缩机的性能。文献[5]采用反应釜法,试验研究了在不同真空度和不同水质量分数的条件下,HFC(氢氟烃)制冷剂中

PVE(聚乙烯醚)油的性能,结果表明,PVE 油对空气和水污染有充分耐受力,且具有长期可靠性。

上述研究通过对压缩机润滑油进行短期性能试验、长寿命试验或加速劣化等试验,探索了制冷系统用润滑油的性能、劣化规律和可靠性。经前期文献调研发现,实际长期运行空调系统的润滑油劣化情况及劣化油对空调系统性能影响的实测分析较少。本研究收集了部分运行多年的地铁列车空调机组润滑油,并对反映其品质的运动黏度、酸值、闪点、色度和元素等重要理化指标进行了检测。通过与新品润滑油指标进行对比,分析各润滑油样品的品质变化情况及其对空调系统可能产生的影响。同时,开展润滑油高温氧化试验,研究润滑油在高温有氧环境下的劣化情况及其对制冷系统内金属材料的腐蚀情况。

1 地铁列车空调机组性能实测

对上海地区 3 列运行了 10 年的地铁列车空调机组进行名义制冷量测试试验。试验工况如表 1 所示。试验获得的机组制冷量、总耗功率及 COP(能效比)等,如表 2 所示。各列车使用相同空调机组,采用全封闭涡旋式压缩机,制冷剂为 R407C,空调新机的制冷量为 44 kW,总功率为 17.3 kW,送风量为 5 000 m³/h。

表 1 名义制冷量测试试验工况

Tab.1 Test conditions for nominal cooling capacity test

冷凝器进风干球温度/℃	蒸发器进风干球温度/℃	蒸发器进风湿球温度/℃	冷凝器进风相对湿度/%	蒸发器进风相对湿度/%
35.0	29.6	24.8	70.0	67.5

表 2 地铁列车空调机组名义制冷量测试数据

Tab.2 Test data of nominal cooling capacity of air conditioning units in metro trains

机组运行 年限/年	制冷量/ kW	总功率/ kW	送风量/ (m ³ /h)	能效比
10	40.55	21.64	4 966.05	1.87
10	40.24	19.57	4 989.34	2.06
10	40.70	20.36	4 970.62	2.00

结果表明,运行了 10 年的地铁列车空调机组的制冷量相比新机组的下降了 7.5%~8.5%,总功率上升了 13.1%~25.1%。换热器积灰、风机阻塞和压缩机润滑油劣化均可能是其原因。本研究着重对制冷压缩机润滑油品质状况进行检测分析。

2 润滑油理化性能指标

反映制冷系统压缩机润滑油品质的重要性能指标有黏度、酸值、开口闪点、色度和元素质量分数等。黏度是制冷系统压缩机润滑油最重要的性能指标,其影响轴承、齿轮和压缩机内运动表面的润滑性能,以及压缩机内的密封性能。黏度高的润滑油油膜会较厚,在机构运动时能起到很好的保护作用,然而黏度过大会使得功率损耗变大,冷却和清洗作用变差^[6]。低黏度的润滑油润滑效果会较差,其在长期使用后会因为氧化分解或水解而使得黏度降低,加大机械磨损。黏度的检测方法较多,本研究基于现行标准 GB/T 265—1988《石油产品运动粘度测定法和动力粘度计算法》进行黏度检测。

酸值反映使用过程中润滑油的劣化程度,是润滑油重要的换油指标之一。酸值增大不仅影响润滑油的性能,还会造成与其接触的零部件的腐蚀,引起机械故障。本研究基于现行标准 GB/T 7304—2014《石油产品酸值的测定 电位滴定法》检测酸值,该方法操作简单、重复性好、精度较高。

闪点反映润滑油的蒸发倾向性和安全性。闪点降低可能表明润滑油分解生成低沸点的分解产物。出于安全,润滑油的闪点一般要高于压缩机排气温度 $15^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$ 。我国润滑油常基于 GB/T 3536—2008《石油产品闪点和燃点的测定 克利夫兰开口杯法》来测定其开口闪点。

色度变化越缓慢的润滑油其质量和稳定性也越好,因此可根据润滑油的颜色变化判断其劣化情况。润滑油发生劣化时,大分子会分解成较小的极性分子,这些极性分子集聚成为酸、酮等物质,使油的有机酸质量分数增高,颜色变深。色度检测可基于 GB/T 6540—1986《石油产品颜色测定法》进行。

分析润滑油中的元素,一方面可以判断润滑油的适用性,监测机械设备在运行过程中润滑油添加剂元素的损耗,预防机械故障;另一方面,制冷压缩机在长时间运转下会存在不同形式的磨损,通过对机械磨损元素进行检测,可有效掌握压缩机的运行状况,了解压缩机磨损的严重程度。元素检测基于 GB/T 17476—1998《使用过的润滑油中添加剂元素、磨损金属和污染物以及基础油中某些元素测定法(电感耦合等离子体发射光谱法)》进行。

3 地铁列车空调机组润滑油取样检测

定期对润滑油进行更换,可避免因品质发生变化造成对制冷机组的不利影响。目前,我国没有可用于判断空调压缩机润滑油是否劣化或需要更换的标准。本研究基于德国标准化学会的标准 DIN 51503-2—2015 来判断润滑油是否劣化,是否需要更换。该标准建议,使用中的冷冻机油,如果其运动黏度相比于新油变化超过 $\pm 15\%$,或酸值相比于新油的增大了 2~3 倍,则视该冷冻机油已经发生了劣化,应及时更换。

3.1 样品采集

目前,我国城市轨道交通车辆检修运维主要按照 GB/T 50157—2013《地铁设计规范》执行,一般 5 年 1 次架修,10 年 1 次大修。本研究采集了上海、广州等城市的地铁列车空调机组共 7 个润滑油样品

进行检测,各样品编号为 1 号—7 号。1、2、3、4 号 POE 油采集自上海地区同一大修批次空调机组,该批次列车空调机组制冷剂为 R407C,经历过一次架修,使用时长为 10 年;5 号 POE 油同样采集自上海地区,其所在空调机组与 1 号—4 号油所在机组为同一型号,经历过 1 次架修和 1 次大修,使用时长为 13 年;6 号和 7 号 POE 油采集自广州地区 2 条不同地铁列车空调机组,制冷剂均为 R407C,6 号油样使用时长为 8 年,所在空调机组未经历过架大修,7 号油样使用时长为 10 年,经历过 1 次架修。

上海和广州处于不同建筑气候地区,图 1、图 2 为两地 2019 年全年逐月气温,数据来源于国家气象科学数据中心。两地地铁列车空调运行气候环境和机组年运行时长不同。上海地铁列车空调每年 5 月底至 10 月初供冷,冬季采用电加热供暖。广州地铁列车空调一般 4 月底至 12 月初运行,其余月份空调偶尔开启。

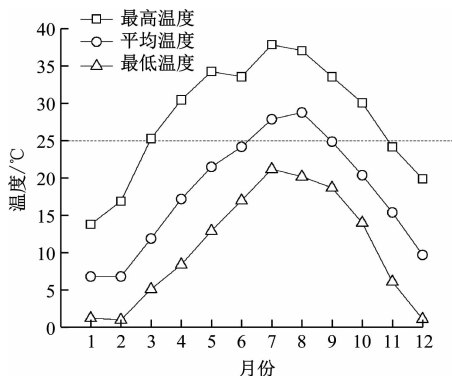


图 1 2019 年上海市每月温度

Fig. 1 Monthly temperature in Shanghai in 2019

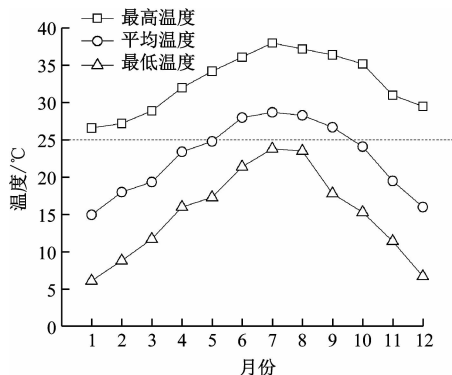


图 2 2019 年广州市每月温度

Fig. 2 Monthly temperature in Guangzhou in 2019

3.2 检测结果与分析

对所采集润滑油样品和各油样对应新油进行理化性能指标检测,结果如表 3 所示。其中,各油样

理化性能指标的变化率指该油样对于其对应新油理化指标的变化率。油样 1、2、3、4、5 号为同一种润滑油,其中 1、2、3、4 号油黏度下降了 10% 左右,虽未达到 DIN 51503-2—2015 的警告值,但从这 4 个油样 Fe 和 Si 元素质量分数的增加值可看出,黏度的下降使得运动部件摩擦加剧,压缩机发生了机械磨损。而 5 号油样的黏度下降了 17.1%,表明该润

滑油劣化程度高,已不能使用。5 号油样的 Si 元素质量分数远高于其他 4 个油样,说明其所在空调机组不仅发生了机械磨损还出现了泄漏,造成灰尘等污染物的侵入,润滑油在外界污染物和空气侵入的影响下加剧了劣化。5 号油样 Cu 元素质量分数增加了 11.5%,比 1 号—4 号油样的 Cu 元素质量分数高出不少,说明 5 号油样所在机组腐蚀更为严重。

表 3 各润滑油样品理化性能指标检测值
Tab.3 Physical and Chemical Performance Index Test Values of Various Lubricating Oil Samples

地区	样品	40 ℃运动黏度		w(KOH) ^a		色度 /度	开口闪点温度		Cu 质量分数		Fe 质量分数		Si 质量分数	
		检测值/ (Pa·s)	变化率 /%	检测值/ (mg/g)	变化率 /%		检测值 /℃	变化率 /%	检测值 /10 ⁻⁶	变化率 /%	检测值 /10 ⁻⁶	变化率 /%	检测值 /10 ⁻⁶	变化率 /%
上海	新油	31.69		0.02		<0.5	258		7.727		2.987		2.944	
	1 号样品	29.03	-8.4	0.03	+50	<0.5			7.862	+1.7	3.603	+20.6	4.001	+35.9
	2 号样品	27.59	-12.9	0.03	+50	0.5			8.180	+5.9	4.647	+55.6	4.734	+60.8
	3 号样品	27.74	-12.5	0.03	+50	1.0	246	-4.7	7.862	+1.7	3.94	+32.0	4.310	+46.4
	4 号样品	27.50	-13.2	0.03	+50	<0.5			8.021	+3.8	3.986	+33.4	3.192	+8.4
	5 号样品	26.26	-17.1	0.09	+350	1.0			8.612	+11.5	5.589	+87.1	18.960	+54.40
广州	6 号新油	55.26		0.03		<0.5	270		1.113		0		0	
	6 号样品	44.66	-18.8	0.11	+267	1.0	266	-1.5	1.697	+52.5	0.706		5.528	
	7 号新油	168.93		0.02		<0.5	275		1.114		0		0	
	7 号样品	150.37	-11.0	0.03	+50	<0.5	268	-2.5	1.141	+2.4	1.634		1.057	

注:a w(KOH)表示中和 1 g 油中所需 KOH 的 mg 数;变化率为样品测试值与相应规范值之间的差值百分比比较,+ 号代表测试值增大,- 号代表测试值减小;DIN 51503-2 建议换油变化率对运动黏度为 ±15%,对酸值为 +200%;检测方法依据分别为 GB/T 265—1988、GB/T 7304—2014、GB/T 6540—1986、GB/T 3536—2008、GB/T 17476—1998。

6 号油样的运动黏度下降了 18.8%,酸值增加了 267%,高于 DIN 51503-2—2015 中的警告值,劣化较严重。从油样的 Cu、Fe、Si 元素质量分数增加值可判断,6 号润滑油所在机组腐蚀和磨损都较为严重,主要是酸值的大幅上升和黏度的大幅下降所致。通过油样的色度和外观,可看出样品色度只有 1,色度不高,但较为浑浊,且有大量沉淀,品质较低。这表明,色度的大小并不一定反映油品的劣化水平,还应结合其他理化指标来进行综合的评价。

7 号油样的黏度和酸值变化均未超过 DIN 51503-2—2015 的警告值,外观上油样清澈透明,色度没有变化。从 Fe 和 Si 元素质量分数看,黏度下降降低了油的润滑性,其所在压缩机发生了机械磨损。

3、6、7 号油样的开口闪点均只有小幅下降,仍远高于各油样所在压缩机的排气温度,表明各油样的着火危险性并没有随着油的劣化而显著升高,安全性好。

对比 1、2、3、4、7 号油样与 6 号油样,使用时长为 8 年的 6 号润滑油劣化程度高于使用时长为 10 年及以上的 5 个润滑油,本研究认为可能的原因有:

- 1) 6 号油样本身的耐久性不如其他油样。
- 2) 广州地区空调季持续时间较上海地区长 3~4 个月,6 号油样所在机组实际运行时间更长。
- 3) 6 号油样所在列车空调未经历过架大修,干燥过滤器和气液分离器长期使用未进行更换,其中的滤网可能被空调系统内污渍堵塞,油和制冷剂不能正常循环,导致压缩机润滑不足,从而加大机械磨损并使系统运行温度升高,润滑油在高温和金属铁屑催化下,加速了润滑油的劣化。
- 4) 冷凝器风机长时间未进行清洗,导致风机阻塞,冷凝器无法充分散热,从而空调系统的整体运行温度升高,加速了润滑油的劣化。
- 5) 换热器翅片未清洗以及空调过滤网等过滤装置长期使用未更换,上面积累大量灰尘,令空调机组热量散热不畅,致使空调系统运行温度升高,

加速了润滑油的劣化。

综上所述,运行十年左右的地铁列车空调机组润滑油品质会出现一定程度下降,如黏度降低 8.4% ~ 18.8%,酸值增加 50% ~ 350%,这种品质变化会使得润滑油的润滑性和密封性能变差,并对机组内部进行腐蚀,导致制冷空调机组性能的下降。

地铁列车空调机组长期使用出现如冷凝器、蒸发器风机阻塞或制冷剂泄漏等严重故障时,由于内部保护器反复启停,压缩机壳体温度可能会反复达到 170 ℃ 以上,为进一步探索冷冻机油在高温环境下的氧化变质,对某常用 POE 油 A 和矿物油 B 进

行高温氧化试验。

4 润滑油高温氧化试验

搭建高温氧化试验装置,将某常用 POE 油 A 和矿物油 B 注入耐腐蚀、具有恒温加热功能的反应容器,同时加入铜、铁、铝等金属,使润滑油温度恒定在 175 ℃,并以一定的流速向反应容器内通入空气。定期抽取定量油样检测其酸值、黏度,如表 4、表 5 所示。高温氧化试验后金属腐蚀图如图 3、图 4 所示。

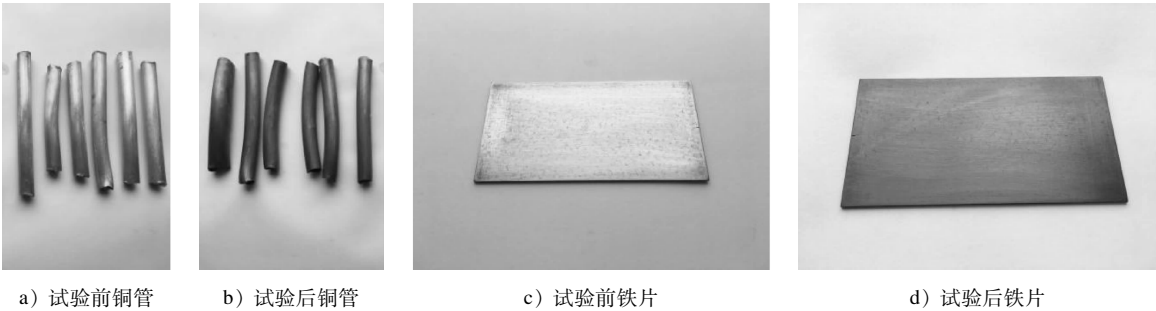


图 3 POE 油 A 80 h 高温氧化试验金属腐蚀对比图
Fig. 3 Comparison of metal corrosion in POE oil A 80 h high temperature oxidation test

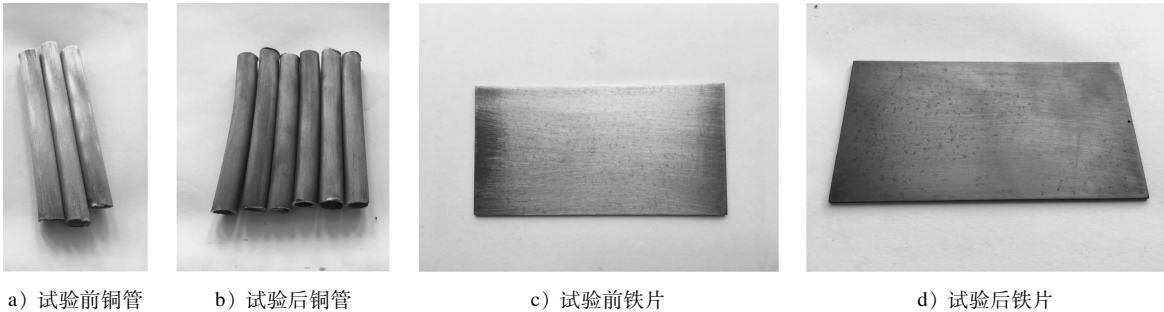


图 4 矿物油 B 18 h 高温氧化试验金属腐蚀对比图
Fig. 4 Comparison of metal corrosion in mineral oil B 18 h high temperature oxidation test

由表 4、表 5 可知,当高温氧化时间为 3 h 时,矿物油 B 的酸值 $w(\text{KOH}) = 0.30 \text{ mg/g}$,运动黏度为 $66.74 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,相比于新油,其运动黏度升高了 20.7%,润滑油已严重劣化。表明矿物油 B 的热氧化安定性较差,在高温下将急速氧化变质,对机组造成不利的影响。随着试验的进行,矿物油 B 的酸值和运动黏度继续升高,当试验时间为 18 h 时,酸值和运动黏度达到了 2.05 mg/g 和 $104.78 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。而 POE 油 A 在试验期间,黏度仅小幅增加,且酸值在前 48.5 h 内没有发生变化。表明 POE 油 A 的热氧化安定性明显优于矿物油 B,当空调机组异常运

表 4 POE 油 A 的酸值和黏度随氧化时间的变化

Tab. 4 Changes in acid value and viscosity of POE oil A with oxidation time		
氧化时间/ h	$w(\text{KOH})/$ (mg/g)	40 ℃ 运动黏度/ (Pa · s)
0.0	0.03	65.82
12.0	0.03	66.15
31.5	0.03	66.70
48.5	0.03	67.21
56.5	0.06	67.46
65.5	0.09	67.69
80.0	0.24	70.20

表 5 矿物油 B 酸值和黏度随氧化时间的变化
Tab.5 Changes in acid value and viscosity of mineral oil B with oxidation time

氧化时间/ h	w(KOH)/ (mg/g)	40 ℃运动黏度/ (Pa·s)
0.0	0.01	55.29
3.0	0.30	66.74
6.0	0.56	72.06
9.0	0.85	75.97
12.0	1.19	80.69
15.0	1.67	98.08
18.0	2.05	104.78

行时短时间内不会劣化失效而对机组造成不利影响。对 POE 油 A,当试验时间为 65.5 h 时,酸值为 0.09 mg/g,与新油相比增大了 2 倍,参照 DIN 51503-2 标准,此时润滑油已不能继续使用;当氧化时间为 80.0 h 时,试验停止,酸值达到 0.24 mg/g。

由图 3、图 4 可知,两种润滑油劣化后均对铜、铁进行了不同程度的腐蚀,表明劣化后的润滑油对铜、铁具有较强的腐蚀性。试验中 POE 油 A 酸值增加虽然比矿物油 B 小,但由于其试验时间长使得其对金属的腐蚀程度大于矿物油,这表明润滑油在劣化不严重、酸值增加不大的情况下,只要时间够长,润滑油依然会对空调系统内金属造成严重腐蚀。因此,对于已劣化的润滑油应及时发现并进行更换。

5 结语

1) 应结合地铁列车空调机组所处地区气候特征及其实际运行时长确定机组维修周期,并及时对相关部件进行清洗或更换,防止因长期使用出现风机阻塞或换热器积灰导致系统无法充分散热,或干燥过滤器及气液分离器滤网阻塞导致系统回油不足等问题而加速冷冻机油的劣化变质,并导致空调机组功耗增加、制冷量下降。

2) 润滑油的色度并不完全反映油本身的劣化程度。评价制冷系统润滑油的品质,可检测油的黏

度和酸值两个理化指标。当其中任一个指标达到 DIN 51503-2—2015 中的警告值,应对润滑油进行更换。

3) 润滑油在高温条件下会快速氧化变质,造成黏度和酸值的升高,并快速腐蚀铜和铁等金属。通过检测地铁列车空调系统内润滑油的黏度、酸值、元素质量分数,可对运行异常机组进行原因分析,对运行正常机组进行隐患排查,在机组出现重大问题前预先发现异常,以规避损失。

参考文献

[1] 蔡叔华,林振国. 压缩机润滑及其用油[M]. 北京:中国石化出版社,1993:9.
CAI Shuhua, LIN Zhenguo. Lubrication of compressor and its oil use[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 1993: 9.

[2] 吴伟烽,杨良伟,张翌,等. 螺杆制冷压缩机冷冻机油台架评定试验[J]. 压缩机技术,2018(5):26.
WU Weifeng, YANG Liangwei, ZHANG Zhao, et al. Bench evaluation test of refrigeration oil for screw refrigerator compressors[J]. Compressor Technology, 2018(5): 26.

[3] 李雁秋,王鹏,马书杰,等. 400DSX 型冷冻机油台架评定系统的可靠性评价[J]. 润滑油,2011,26(2):52.
LI Yanqiu, WANG Peng, MA Shujie, et al. Reliability analysis of 400DSX type refrigerator oil evaluation system[J]. Lubricating Oil, 2011, 26(2): 52.

[4] 杨坤,张秀平,王汝金,等. CO₂ 制冷剂/润滑油的相溶性及材料相容性研究[J]. 低温与超导,2016,44(5):75.
YANG Kun, ZHANG Xiuping, WANG Rujin, et al. Study on miscibility and materials compatibility of CO₂ refrigerant/lubricant[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2016, 44(5): 75.

[5] 富永正一,高木实. HFC 制冷剂用 PVE 润滑油的应用稳定性[J]. 制冷学报,2003,24(2):57.
TOMINAGA Shoichi, TAKAGI Minoru. Practical stability performance of polyvinylether(PVE) with HFC refrigerarits[J]. Refrigeration Journal, 2003, 24(2): 57.

[6] 冯玉娟. 润滑油运动粘度检测的重要性[J]. 冶金设备,2017(增刊2):285.
FENG Yujuan. Importance of detecting kinematic viscosity of lubricating oil[J]. Metallurgical Equipment, 2017(S2): 285.

(收稿日期:2021-06-30)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》
服务热线 021—56830728 转 821