

环保冷媒 R290 对应冷冻机油的设计研究

龙春仙^{1,2} 杨忠学¹ 孙 蓉¹

¹(中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055)

²(广东美芝制冷设备有限公司研发中心 顺德 528333)

摘 要 由于氟利昂类冷媒(CFCs)对臭氧层具有破坏作用,而氢氟烃类冷媒(HFCs)冷媒具有较高的全球变暖潜势(Global Warming Potential, GWP),目前不少国家已研讨在家用空调中使用低 GWP 的冷媒替代方案,其中一种方案就是以 R290 替代 R22。使用 R290 作为制冷剂在开发过程中需要解决的一个最重要问题就是冷冻机油的选择和设计。文章通过对家用空调用旋转式压缩机内部润滑状态进行分析,并对不同冷冻机油在 R290 冷媒下的特性进行研究,提出了 R290 冷媒下油品设计方法。

关键词 旋转式压缩机; 冷冻机油; R290

中图分类号 TH 117.2 TB 61 **文献标志码** A

The Study Overview of Designing Lubricant for Environmentally Friendly Refrigerant R290

LONG Chunxian^{1,2} YANG Zhongxue¹ SUN Rong¹

¹(Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

²(R&D Section, Guangdong Meizhi Compressor Co. Ltd., Shunde 528333, China)

Abstract Because CFCs deplete the ozone layer and HFCs have high global warming potentials, many countries have been reinvestigating low GWP refrigerants as alternatives in household air conditioners, one of which is R290 as the alternative for R22. But the most important problem is how to choose the suitable lubricant for refrigerant R290. In this paper, the design method of lubricant was proposed through analyzing the lubrication in rotate compressor of household air conditioners and studying on properties of several oils in R290 refrigerant.

Keywords rotate compressor; refrigerant oil; R290

收稿日期: 2013-10-25

作者简介: 龙春仙, 博士研究生, 研究方向为适用于 R290 冷媒空调压缩机油品开发及其摩擦行为; 杨忠学, 高级工程师, 研究方向为润滑油方面的理论研究和推广; 孙蓉(通讯作者), 研究员, 研究方向为结构可控纳米材料的制备、工业化生产及其在电子封装、工业润滑等领域的应用, E-mail: rong.sun@siat.ac.cn。

1 引言

根据《蒙特利尔议定书》的规定, 对臭氧层具有破坏作用的氟利昂类冷媒 (CFCs) 将被逐步淘汰。而由于温室效应, 氢氟烃类冷媒 (HFCs) 也不是最终的理想替代方案。目前, 不少国家已在研讨使用低全球变暖潜势 (Global Warming Potential, GWP) 的 R32、二氧化碳和烃类等工质。由于新工质的特性与现有的制冷剂特性不同, 因此如何选择合适的冷冻机油成为新的研究课题。

在家用空调器中, R290 作为最有前景的候选环保冷媒备受压缩机厂商关注, 但在冷冻机油选择上存在比较大的争议。冷冻机油在压缩机中主要起润滑作用, 但压缩机内部存在冷媒, 而冷冻机油和冷媒具有一定的溶解度, 这样会造成油品粘度下降, 同时也会降低油品的润滑效果, 给压缩机的可靠性带来问题。而 R290 是无极性化合物, 与矿物油和合成油的溶解度非常大, 这势必造成压缩机内部润滑性能低下。另外, 由于过多冷媒溶解在油品中, 容易造成空调系统中有效冷媒量不够, 导致空调的制冷能力不足, 因此需要充注更多的 R290 冷媒来提高空调的制冷能力, 而 R290 是易燃易爆冷媒, 其在空调系统中的充注量受到严格的限制。因此为了满足规定的 R290 冷媒充注量的前提下, 提高空调的制冷能力和油品的润滑性, 必须降低冷媒和油品的溶解度。

本文通过综述冷冻机油和冷媒混合物对旋转压缩机滑动部件的润滑和摩擦的影响, 研究不同油品在 R290 冷媒下的特性, 为设计合适的冷冻机油提供更多的参考和帮助。

2 压缩机的润滑

目前在家用空调器中采用的压缩机主要为滚动活塞压缩机, 其压缩部件如图 1 所示。在该类旋转式压缩机中, 发生磨损的主要位置有: ①活

塞和滑片磨损; ②曲轴和轴承的磨损; ③活塞和曲轴的磨损; ④活塞和轴承的磨损; ⑤滑片和轴承的磨损; ⑥滑片和气缸的磨损。

在以上接触面磨损中, 对压缩机可靠性影响比较大的、容易产生的磨损主要是①和②, 即活塞和滑片的磨损、轴承和曲轴之间的磨损。因此在冷冻机油设计时需重点考虑活塞和滑片、轴承和曲轴之间的磨损。下面将从这两方面介绍冷冻机油的设计。

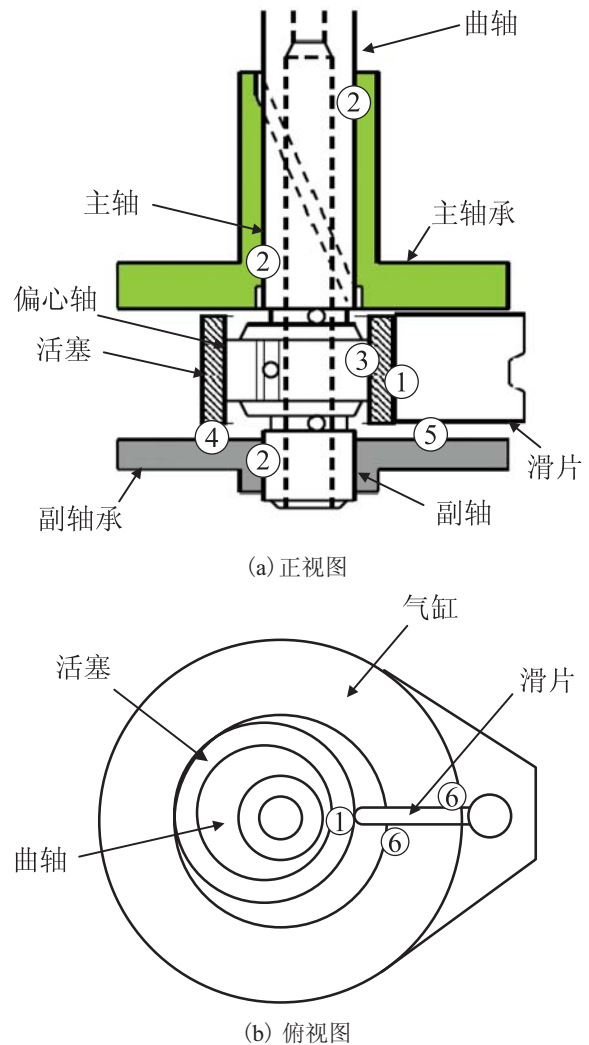


图 1 旋转压缩机滑动部件示意图

Fig. 1. Sliding assembly of rotary compressor

2.1 轴承和曲轴运动对冷冻机油的设计要求

轴承和曲轴的润滑一般可视为径向滑动轴承

进行分析^[1]。当曲轴偏心旋转时，两表面组成收敛楔形，曲轴的旋转将润滑油带入收敛间隙而形成流体动压，油膜压力的合力与曲轴的载荷相平衡，其平衡位置偏于一侧。但在压缩机中，由于冷媒的存在，油膜的实际状况比理论要复杂很多。

Grand 研究^[2]发现，在曲轴旋转过程中，油膜中的冷媒量随油膜压力的变化而变化，进而造成油冷媒混合物粘度的变化。另外在出口端，由于压力下降，少量冷媒蒸发，使得油膜中还有气体冷媒存在。这样使得油膜在重负荷时，满足雷诺边界条件，而在轻载荷下，边界条件则由雷诺条件向索默菲德(Sommerfeld)条件转变。另外，Hirayama 研究^[3]提出在旋转中，由于压缩气体力，曲轴会发生倾斜，而在低转速时某一个角度曲轴和轴承处于边界润滑，此时油膜较薄，无法有效对曲轴和轴承进行润滑，曲轴和轴承会发生固体接触，造成磨损加大，压缩机寿命下降。其润滑模型如图 2 所示。

Xie 的研究^[4]表明，压缩机运行时，由于受到的气体力和油膜压力不均匀，曲轴的旋转中心和轴承的中心并未重合，故它们之间存在一个偏心量，且可在某一角度存在最大值。由于曲轴在轴承中偏心运转，它们之间的间隙比理论更小，这也会造成曲轴和轴承进一步的固体接触。

从目前的研究来看，轴承和曲轴的润滑大部分是流体润滑，但有部分是边界润滑。在设计油品时，为了保证曲轴和轴承的可靠性、减少磨损，除了保证油膜的粘度设计外，还要在油品中考虑如何减小固体接触带来的磨损，如采用油性剂、抗磨剂等。

在目前的压缩机轴承的研究中，大部分都通过轴承的计算机模型来研究其变形、润滑条件等。但真正涉及到油品粘度、添加剂对轴承磨损的研究比较少，特别是抗磨剂如何有效提高轴承润滑方面的文献几乎没有，对油品设计开发增加了一定的难度。

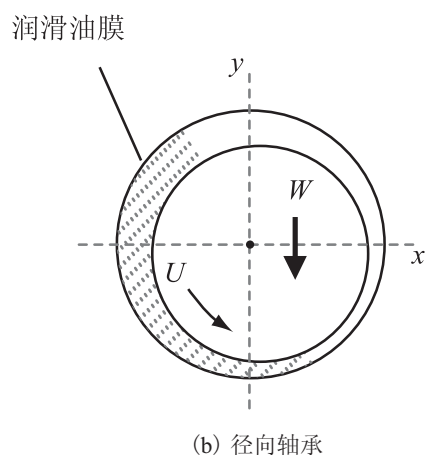
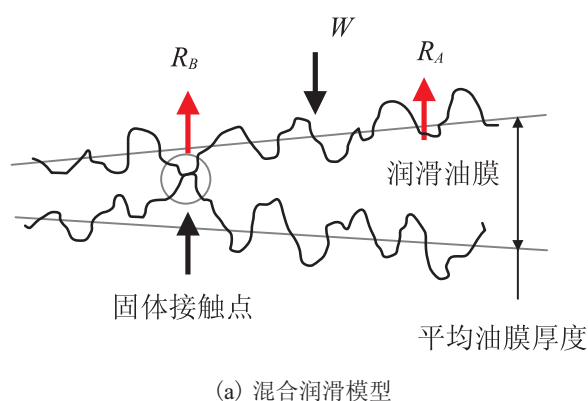


图 2 压缩机轴承润滑机理

Fig. 2. Lubricant theory of journal bearing in rotary compressor

2.2 滑片和活塞的磨损对冷冻机油的设计要求

滚动活塞压缩机活塞和滑片之间的摩擦环境最为严酷，其受力分析模型如图 3 所示。曲轴旋转带动活塞在气缸内旋转，而滑片背部由于承受高压气体(排气压力)和弹簧力，先端始终紧贴在活塞外径上，将气缸分隔成吸气腔和压缩腔，在活塞旋转时滑片在滑片槽内进行往复运动。由于滑片先端和活塞外径为线接触，其润滑状态为边界润滑，故润滑条件非常恶劣。如润滑油设计不好，滑片先端将会出现严重磨损，甚者还将会出现粘结、刮伤和咬合等现象。因此，滑片先端和活塞之间的可靠性完全取决于冷冻机油的润滑特性。

Tanaka^[5]采用线接触的弹性流体动力润滑对活塞、滑片先端的混合润滑条件研究发现，在曲

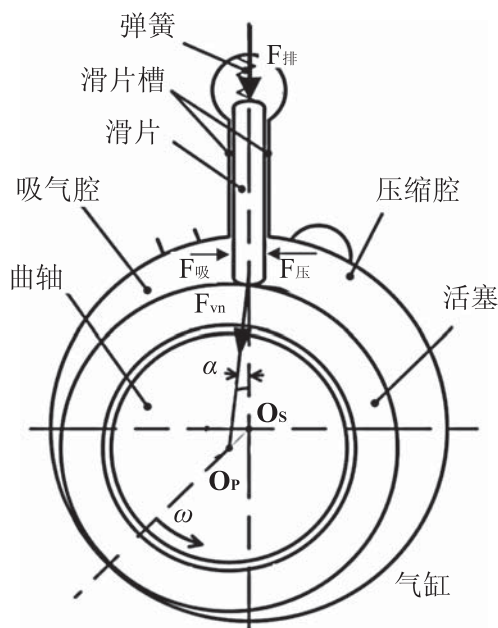


图3 受力分析模型

Fig. 3. Analytical model

轴旋转到某一角度时, 活塞和滑片的相对速度为 0, 因此滑片先端和活塞之间吸入的油品速度也为 0, 这表明活塞和滑片之间会出现短暂缺油, 没有油膜形成, 此时的润滑状况非常恶劣。Ito^[6]等的研究发现, 当压差较大时, 在整个曲轴旋转周期中的活塞和滑片相对速度趋于 0, 因此活塞和滑片之间基本处于无油膜润滑状态。对活塞和滑片的耐磨性要求除了材料本身的要求外, 更重要的是要求冷冻机油中抗磨剂发挥有效的作用。

另外在对滑片和活塞 PV 值的研究中, Tanaka^[5]发现 PV 值随着油品粘度等级和压缩机转速的提高而增加。特别是在 5400 rpm 时, PV 值在 0° 时出现异常峰值。这种情况对于变频压缩机的可靠性需要特别注意。另外, 由于冷媒的存在, 活塞和滑片之间润滑不是单纯的油品润滑, 而是油和冷媒的混合物, 该混合物的粘度受温度和冷媒溶解量两方面的影响。当冷媒在油中的溶解度不变时, 混合物的粘度随温度的升高而下降, 这是因为油品粘度下降的缘故。但实际上温度升高后, 溶解在油中的冷媒会蒸发, 使冷媒

在油中的溶解度下降, 其混合物的粘度有升高的趋势。因此在温度升高过程中, 如果是油品粘度起主导作用的话, 混合物的粘度会下降; 如果是冷媒在油品的溶解度起主导作用的话, 混合物的粘度会上升, 故在这期间混合物的粘度出现上升后下降的过程, 使混合物的粘度存在最大值。因此在选择合适的油品粘度时要进行优化。

Tanaka^[5]和 Ito^[6]的研究表明活塞和滑片间的润滑条件较恶劣, 仅仅对油品粘度进行优化无法解决该问题。Lee^[7]采用摩擦试验机研究了 POE/R410A 下滑片的摩擦特性, 结果显示高转速、高负载下滑片先端的磨损比较大, 而且磨损系数也比较大。文章提出采用 TiN 可以大幅度减小磨损和降低磨损系数, 但对于家用空调压缩机来说, 采用涂层固然可以解决磨损问题, 但会增加很多成本, 因此应该把更多精力放在油品中选择合适的极压抗磨剂来解决滑片先端磨损问题。特别是对于 R22 替代冷媒, 由于冷媒中不含 Cl 元素, 无法在滑片先端形成氯化膜来增加抗磨性, 油品添加剂的选择将成为解决问题的关键。

3 R290 冷媒用冷冻机油的设计

关于 R22 替代工质方面, 国际上主要有两条不同的技术路线: 一是以美日为代表, 支持开发 HFCs 制冷剂, 如 R32 等; 一是以德国和欧洲的一些国家为代表, 支持自然工质为替代物, 如 R290 等。R32 作为制冷剂仍存在较高的 GWP, 而在低 GWP 冷媒中, R290 作为 R22 替代工质具有较大的可行性^[8-10]。下面就 R290 的油品设计进行分析。

3.1 R290 冷媒特性对油品要求

R290 是饱和碳氢化合物, 作为制冷剂, 其 ODP 和 GWP 均为零, 是一种优秀的绿色天然环保制冷剂。其特性如表 1 所示^[8]。

从表 1 可以看出, R290 的热力性质(如临界温度、压力等参数)与 R22 非常接近, 具备替代 R22

表1 R290与R22的性能比较

Table 1. Comparison between R290 and R22

冷媒	相对分子质量	标准沸点(°C)	凝固点(°C)	临界温度(°C)	临界压力(MPa)	临界比容($\times 10^{-3} \text{m}^3/\text{kg}$)	ODP	GWP	安全分类	燃点(°C)
R22	86.48	-40.84	-160.0	96.13	4.986	1.905	0.055	1600	A1	不燃
R290	44.1	-42.7	-187.1	96.8	4.256	4.46	0	0	A3	510

的基本条件,同时R290也具有其自身的特征。

(1) 饱和液体密度

从表1可以看出,饱和液态下R290的密度比R22小很多,这表明在相同容积的压缩机中,R290的充注量比R22小很多。相关实验证明,相同系统体积下,R290的充注量为R22的43%左右,这也为R290系统的充注量满足国家标准提供了条件。但这同样存在另一个问题,即在油中的溶解度和R22相同的情况下,R290溶解体积也将是R22的2倍左右,这将会导致系统中实际有效的冷媒量大大减少。

(2) 可燃性和爆炸性

根据国家标准:《GB/T 7778-2008 制冷剂编号方法和安全性分类》,R290的安全分类为A3等级,即R290具有可燃性和爆炸性。因此,在《GB 4706.32-2012 家用和类似用途电器的安全热泵、空调器和除湿机的特殊要求》中,对R290的充注量进行了严格限制,而在美国、日本则是抵制使用R290。为解决R290充注量限制的问题,肖友元^[12]在系统设计方面提出了解决办法,但因为油品和冷媒的溶解度会对系统造成比较大的影响,故并未涉及油品方面的设计。溶解度过大将导致冷媒有效质量减少,此时就算对系统进行优化仍可能造成性能下降,所以在压缩机设计阶段要考虑油品的选择问题。

3.2 R290冷媒和油的相容性设计

3.2.1 油品极性的选择

为了调查目前市场上各冷冻机油和R290的相容性,本文通过苯胺点来进行评价。苯胺点是

润滑油在苯胺相互溶解为单一液相的最低温度,苯胺点越高,极性越小。苯胺点的评价方法根据《GB/T 262 石油产品苯胺点测定法》进行测试。

通过评价各种油品的苯胺点,可以判断润滑油的极性大小。而根据相似相容的原理,极性越大的润滑油和R290的溶解性越小,从而为选择合适的油品提供参考。表2是对各种油品的苯胺点评价结果。

表2 不同油品苯胺点对比表

Table 2. Comparison of Aniline in different oils

油种类	苯胺点(°C)
聚 α 烯烃(PAO)	140
矿物油	111
烷基苯(AB)	74
多元醇酯(POE)	<-10
聚亚烷基乙二醇(PAG)	<-10

从表2可以看出,各类油品的极性从小到大排列为:PAO<矿物油<AB<POE/PAG。值得说明的是,由于实验设备限制,未能将POE和PAG区分开来。若仅从极性判断,POE和PAG相对较为合适用于R290。

3.2.2 溶解度的设计

熊爱凌^[11]在研究R290和油品混合特性中对比评价了POE和PAG在R290冷媒中的溶解度,结果显示PAG和R290溶解度最小,对冷媒特性影响效果较小。为了进一步确认各种油品在R290冷媒下的溶解度,本文设计了测量溶解度的实验装置,如图4所示。该设备含有一个高压容器,高压容器上有两根导管,其中一根用于抽

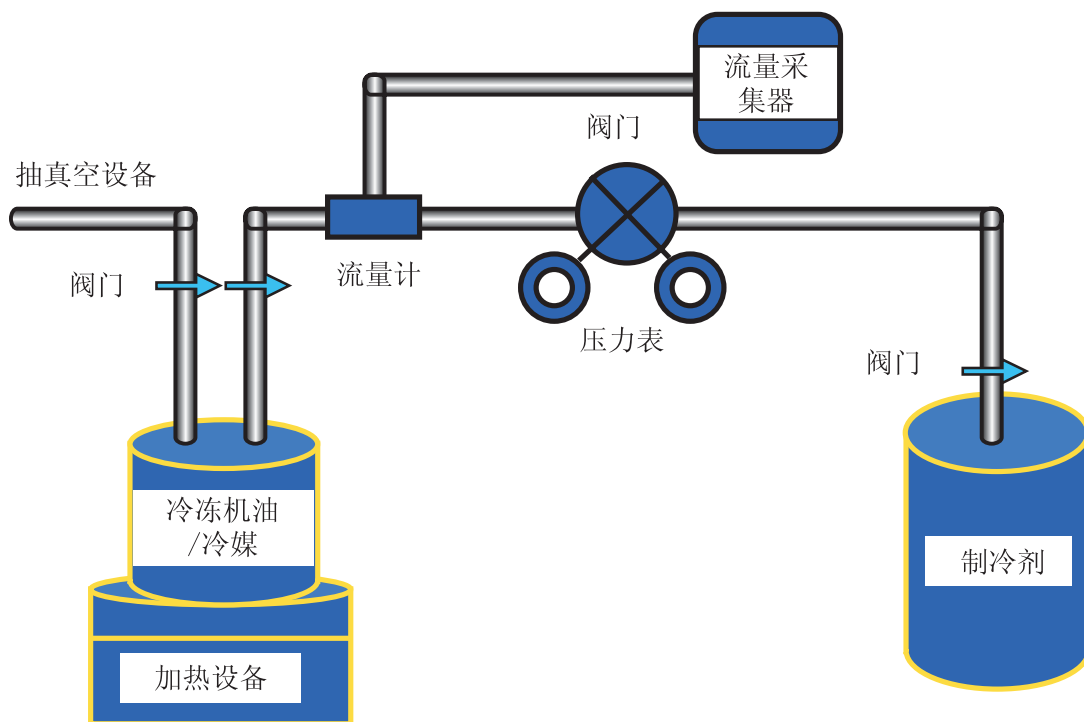


图 4 溶解度测试设备

Fig. 4. Equipment of solubility test

真空, 另外一根与冷媒罐连接, 用于给高压容器封入冷媒, 在封冷媒的管道上有流量计用来控制冷媒的封入量。

实验步骤如下: (1) 在高压容器中封入一定质量 M 的冷冻机油, 记录油面 H_1 , 然后抽真空; (2) 抽完真空后封入一定量 (M_1) 的冷媒, 由于冷媒溶解在油中, 造成油面升高, 记录此时的油面 H_2 ; (3) 根据油面上方气态冷媒的体积计算未溶解的冷媒质量 M_2 ; (4) 将封入冷媒的总量 M_1 减去气体冷媒质量 M_2 , 即为溶解在油品的冷媒量 M_3 ; (5) 计算出冷媒的溶解度为: $M_3/(M+M_3)$ 。结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出, 不同油品溶解度随压力增加均有一定程度上升, 但 PAG 的增幅最小。另外在 0.7 Mpa 时, 矿物油、PAO 和 AB 油溶解度最大, 且三者差别不大, POE 油次之, PAG 最小。从本实验结果可以发现, 虽然 POE 和 PAG 极性都比较大, 但溶解度 PAG 较小。主要原因

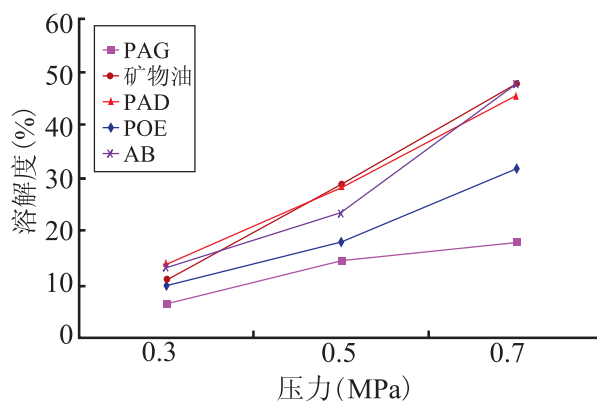


图 5 25°C 下不同油品溶解度曲线图

Fig. 5. Graph of solubility of different oil in 25°C

是本次试验用的 POE 油的分子结构为支链型, 分子间间隙较大, R290 溶解量相对较多; 而 PAG 分子结构为直链型, 溶解度较小。因此从溶解度看, PAG 作为 R290 冷媒的润滑油比较合适, 或者改变 POE 油的结构, 降低溶解度。但是这两种方案均有其局限性: PAG 油由于其体积电阻率较低, 对于电机在壳体内部的密闭式压

缩机来说, 体积电阻率低的油品在安全方面存在问题, 目前行业内基本不采用; 而直链型结构的 POE 存在水解问题, 对稳定性要求非常严格的冷冻机油来说也是要解决的问题。目前在 R410A 冷媒中基本都是使用支链型 POE 油, 因此直链 POE 油是否合适 R290 冷媒需要进一步研究。

3.3 冷冻机油抗磨添加剂的设计

在旋转式压缩机中, 由于冷冻机油封存在压缩机内部, 且一旦封入就无法更换, 故冷冻机油品质直接关系压缩机的使用寿命。目前压缩机的使用寿命大约为 10 年, 也就是说冷冻机油必须保证压缩机在 10 年的运转过程中不会出现异常磨损、卡死等可靠性问题。但仅靠润滑油基础油是无法保证的, 故须在润滑油中添加各种不同的添加剂, 如抗氧化剂、酸捕捉剂和抗磨剂等。其中选择抗磨剂是保证冷冻机油良好润滑性的保证。

抗磨剂一般分两类: 一类是油性剂; 一类是极压剂。图 6 为典型 Streibek 曲线^[13], 油性剂主要作用在混合润滑区域, 极压剂主要作用在边界润滑区域。油性剂的作用机理是极性分子定向地吸附在金属表面, 由于极性分子的相互作用, 形成一种具有一定强度的表面膜, 使摩擦表面隔开, 从而降低它们之间的摩擦阻力, 减少磨损^[14]。极压剂的作用是在边界润滑时, 由于发生固体接

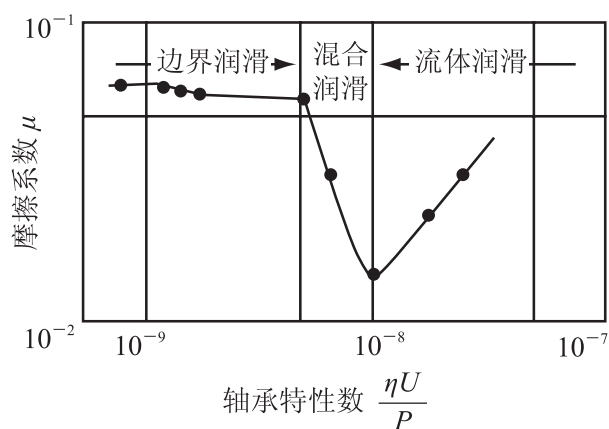


图 6 Streibek 曲线

Fig. 6. MGraphics of Streibek

触, 为防止金属表面剧烈磨损, 添加极压剂在金属表面形成吸附膜或反应膜, 来防止金属表面擦伤^[15], 如图 7 所示。

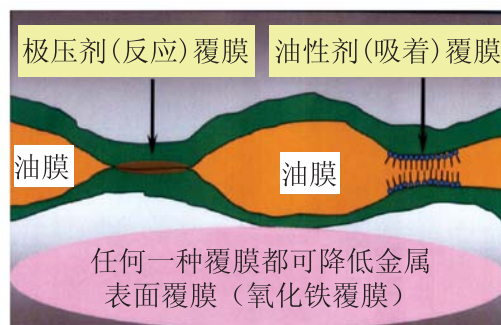


图 7 M 油性剂和抗磨剂作用机理图

Fig. 7. MFunction of Oiliness improver and antiwear agent

在新冷媒 R290 使用油品开发中, 由于 R290 和油具有较强溶解性, 对油品的润滑性提出了更高要求。由于油性剂或抗磨剂的作用范围不一样, 单靠它们可能无法解决这些冷媒压缩机的可靠性问题。从图 8 中可以发现, 在温度较低时, 极压剂效果不明显; 而在温度较高时, 油性剂效果也不明显, 因此, 需要将油性剂和抗磨剂有效地结合起来, 才能更好地提高成品的润滑性能。

相关研究发现, 除了目前常规抗磨剂的选用外, 还可以考虑选择纳米添加剂使用在冷冻机油中。如王瑞祥的研究^[16]发现纳米颗粒可以改善油和

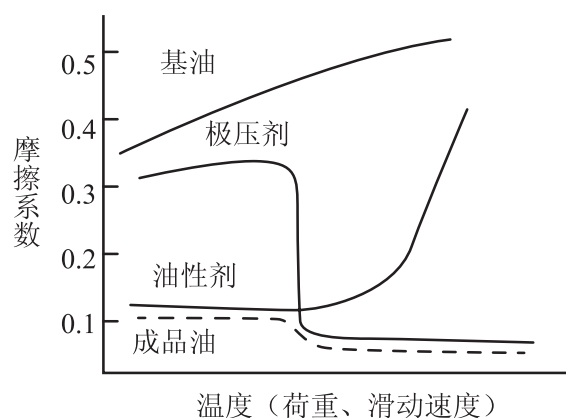


图 8 不同摩擦条件下抗磨剂的效果

Fig. 8. Effect of antiwear agent in different conditions

冷媒的相溶性。吕君英^[17]提出纳米粒子的扩散蠕变机理, 推测纳米粒子作为添加剂可以在较高载荷下表现更好的润滑性能。朱胤^[18]、王瑞祥^[19]通过在压缩机冷冻机油中添加纳米颗粒, 发现纳米颗粒可以提高压缩机性能, 改善压缩机运动部件的磨损。

4 结 论

通过对家用空调压缩机轴承和滑片润滑状况进行分析, 提出了冷冻机油润滑性方面的设计要求和抗磨性方面的设计思路, 并针对 R290 冷媒的特性, 分析了冷冻机油开发方面的要求, 得到结论如下:

(1) 在滚动活塞旋转压缩机中, 轴承和曲轴的润滑状态主要是弹性流体动力润滑, 但在某些角度存在轻微的固体接触; 冷冻机油设计时主要考虑粘度和油性剂的影响。

(2) 在活塞和滑片先端的润滑主要是边界润滑, 而且由于相对速度较低, 油膜很难形成, 为保证耐磨性, 需在油品中考虑极压剂的作用。

(3) 环保冷媒 R290 用油开发最大的问题是油和冷媒过度溶解, 在油品开发时需重点解决。

(4) 根据对现有的冷冻机油溶解度的研究发现, 目前还没有合适的冷冻机油使用在 R290 冷媒中, 因此有必要开发出一种溶解度较小、各项特性又满足冷冻机油要求的油品。

(5) 由于冷媒 R290 和油品的溶解度大, 除了造成油品稀释外, 也会造成添加剂, 特别是抗磨剂的稀释, 抗磨剂效果低下, 因此除了考虑极压抗磨剂和油性剂的协调效果外, 也可以考虑纳米添加剂的应用。

参 考 文 献

- [1] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理(第 2 版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 101.
- [2] Grando FP, Priest M, Prata AT. Lubrication in refrigeration systems: performance of journal bearings lubricated with oil and refrigerant mixtures [C] // Life Cycle Tribology—Proceedings of the 31st Leeds-Lyon Symposium on Tribology, 2005: 481-491.
- [3] Hirayama T, Miura K, Hattori H, et al. Numerical analysis for mixed lubrication in journal bearings of rotary compressors [C] // International Compressor Engineering Conference, 2006: 1786.
- [4] Xie F, Zhang HF, Wu JH. Dynamic analysis of rotor-journal bearing system of rotary compressor [C] // International Compressor Engineering Conference, 2006: 1820.
- [5] Tanaka S, Nakahara T, Kyogoku K. Mixed lubrication analysis of vane tip in rotary compressor [C] // Proceedings of the International Compressor Engineering Conference at Pur-due, 2000: 287-294.
- [6] Ito Y, Hattori H, Miura K. Numerical analysis for rotating motion of a rolling piston in rotary compressors – effective factors for characteristics of rotating motion of a rolling piston [C] // International Compressor Engineering Conference, 2010: 1217.
- [7] Lee YZ, Oh SD, Kim JW, et al. Friction and wear of the vane/roller surfaces depending on several sliding condition for rotary compressor [C] // International Compressor Engineering Conference, 2002: 1531.
- [8] 何国庚, 刘璇斐. R290 在小型空调器中替代 R22 的优势与问题及其解决措施 [J]. 制冷与空调, 2008, 8(2): 58-62.
- [9] 王倩. 房间空调器 R290 替代 R22 的可行性分析 [J]. 茂名学院学报, 2005, 15(3): 38-42.
- [10] 何国庚, 刘强, 倪敏慧, 等. R290 替代 R22 的空调用旋转压缩机优化 [C] // 中国制冷学会 2009 年学术年会论文集, 2009: 612-615.
- [11] 熊爱凌, 韩厚德, 曹红奋. R290 及其冷冻油混合物互溶特性研究 [J]. 上海海事大学学报, 2004, 25(3): 66-70.
- [12] 肖友元, 刘畅, 郭春辉, 等. 自然工质 R290 在家用空调器中的应用研究 [J]. 流体机械, 2009, 37(5): 61-65.
- [13] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理(第 2 版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 207.
- [14] 石油化工科学研究院七室. 润滑油添加剂(VIII) [J]. 石油炼制与化工, 1979, 10: 61-69.
- [15] 石油化工科学研究院七室. 润滑油添加剂(VI) [J]. 石油炼制与化工, 1979, 8: 34-40.
- [16] 王瑞祥, 邹得宝, 张秋丽, 等. 纳米颗粒用于 HFCs 制冷系统的可行性分析 [J]. 流体机械, 2003, 31(Z1): 120-124.
- [17] 吕君英, 龚凡, 郭亚平. 纳米粒子改善润滑油摩擦磨损性能机理的评述 [J]. 应用科技, 2004, 31(11): 51-53.
- [18] 朱胤, 夏四海, 史正良. 纳米材料在旋转式制冷压缩机中的应用研究 [J]. 制冷与空调, 2010, 10(增刊): 112-116.
- [19] 王瑞祥, 邢美波, 张敏, 等. 纳米冷冻机油的制备及其在转子压缩机中的应用 [J]. 流体机械, 2013, 41(4): 34-37.