

油分离器回油不畅对压缩机排气温度的影响机理

王飞冰 金华海 戴 琦 何 锐
浙江盾安机械有限公司 浙江 绍兴 311835

摘要：本文聚焦油分离器回油不畅对压缩机排气温度的影响机理。先阐述油分离器工作原理、回油不畅诱因与量化表征，接着从润滑性能衰减、内部换热效率下降、制冷剂循环特性改变及不同回油不畅程度差异等方面分析影响机理。基于此提出油分离器与回油系统结构优化、运行工况与参数调控、故障预警与诊断体系构建等对策，旨在为解决回油不畅引发的排气温度升高问题提供理论依据与实践指导。

关键词：油分离器；回油不畅；压缩机排气温度；润滑失效；热力学分析

引言：在制冷压缩系统中，压缩机排气温度是影响系统性能与稳定性的关键参数。油分离器作为保障润滑与系统高效运行的核心部件，其回油情况对压缩机排气温度的有着重要影响。回油不畅会引发一系列连锁反应，导致排气温度异常升高，进而影响压缩机乃至整个制冷系统的正常运行。深入探究油分离器回油不畅对压缩机排气温度的影响机理，并据此提出有效的控制对策，对于提高制冷系统的可靠性与稳定性具有重要的现实意义。

1 油分离器回油机理与失效模式

1.1 油分离器工作原理

油分离器是制冷压缩系统中保障润滑与系统高效运行的关键部件，其核心工作原理是利用气液两相物理特性差异实现油与制冷剂的分离回收。按工作原理不同一般可分为离心式、过滤式和填料式。离心式工作原理：压缩机的排气经油分离器进气管沿切线方向进入筒内，随即高速旋转并自上而下流动。借离心力的作用将排气中密度较大的油滴抛在筒壁上分离出来，沿壁流下，沉积在筒体底部，油从回油管回到压缩机，分离效率一般。过滤式工作原理：高温高压的气态制冷剂通过进气管进入油分离器，进气管出口端及出气管进气端均设有袋装滤网，当气态制冷剂遇到滤网的阻拦时，其中的油滴会在滤网上凝结，最终落入油分底部，底部沉积的油通过回油管回到压缩机，分离效率高于离心式。填料式工作原理：在油分离器的上方出口处装设填料（一般采用金属丝网），高压制冷剂气体进入油分离器后，由于过流截面较大，气体流速突然降低并改变方向，加上进气时几层金属网网的过滤作用，即将混入气体制冷剂中的润滑油分离出来，并下滴落聚集在容器底部，油从回油管回到压缩机，分离效率优于过滤式。不同系统应用对油分最低分离效率需求不同，一些高要求应用场景会采用离心及填料组合式油分，用于提高分离效率。

组合式油分工作原理：在压缩机排出的高温高压油气混合物进入分离器后，首先通过入口导流结构实现气流减速与转向，利用惯性力使密度较大的油滴脱离气流轨迹，撞击分离器内壁后聚集成液膜沿壁面流动；随后，气流经过滤网、离心叶片或填料层等核心分离单元，进一步捕获细小油雾，实现深度分离^[1]。分离后的制冷剂气体从分离器顶部出口进入后续冷凝环节，而底部聚集的润滑油则通过专门的回油管路，在压差作用下或借助回油泵输送回压缩机曲轴箱，完成润滑油的循环复用。该过程需保证分离效率与回油稳定性的平衡，既要最大限度减少润滑油随制冷剂流失，又要避免回油管路堵塞或回油过量影响系统工况。

1.2 回油不畅的典型诱因

油分离器回油不畅的产生由结构设计缺陷、运行工况波动及部件老化损坏等多类因素共同诱发。从结构层面看，回油管路管径选型过小、管路走向不合理存在过多弯头或死弯、回油阀阀芯卡滞或开启度不足，油分腔体过短进入油分的气体将分离出来的油液吹起，以及分离器底部积油腔设计不合理导致排油口堵塞，均会直接阻碍润滑油流动。运行工况方面，压缩机负荷频繁波动尤其是长期低负荷运行时，油气混合物流量不足，难以形成足够压差驱动回油；系统蒸发温度过低导致润滑油粘度急剧增大，流动性下降，也会造成回油受阻。另外，部件老化失效是长期运行后的主要诱因，如分离滤网堵塞、离心分离单元磨损导致分离效率下降，润滑油中混入杂质造成回油管路结垢，以及压差传感器或回油泵故障导致主动回油动力不足等，这些因素均会破坏回油系统的正常循环，引发回油不畅问题。

1.3 回油不畅的量化表征

回油不畅可通过系统运行参数变化、部件状态监测及油液分析等多维度进行量化表征，为故障诊断提供精

准依据。从参数监测角度,压缩机曲轴箱油位是最直接的表征指标,当油位持续低于最低刻度线且补充润滑油后仍无法维持稳定,即可判定为回油不畅;同时,回油管路进出口压差会显著增大,正常工况下回油压差一般维持在0.1-0.3MPa,当压差超过0.5MPa时,表明管路存在严重堵塞。油液分析方面,通过检测压缩机排出油液的含制冷剂浓度,若浓度超过5%则说明分离回油效果不佳;润滑油的粘度、酸值等指标会随回油不足产生异常变化,粘度下降幅度超过15%或酸值升高至0.5mgKOH/g以上,均间接反映回油不畅导致油液劣化加速。另外,分离器顶部排气带油量增加,后续冷凝器换热效率下降、蒸发压力波动幅度增大等,也可作为回油不畅的辅助量化表征指标。

2 油分离器回油不畅对压缩机排气温度的影响机理分析

2.1 润滑性能衰减引发的摩擦生热激增机理

回油不畅致使压缩机内部润滑系统油液供给匮乏,这是引发排气温度升高的核心机理之一。压缩机中的曲轴、连杆、活塞、轴承等运动部件,高度依赖连续稳定的油膜来实现有效润滑。当回油出现不足状况时,运动部件表面的油膜厚度会显著变薄,严重时甚至会出现油膜破裂的现象。此时,金属部件之间便会直接接触,产生干摩擦或者边界摩擦。依据摩擦学原理,摩擦系数会随着油膜厚度的减小而呈指数级增大。而摩擦生热功率与摩擦系数、正压力以及相对运动速度均呈正相关关系,所以摩擦生热会急剧猛增^[2]。例如,滚动轴承在正常润滑状态下,摩擦生热功率大约在50-100W之间,然而一旦油膜破裂,摩擦生热功率可骤然增加至500W以上。这些额外产生的摩擦热会直接传递到压缩机排气腔,同时,运动部件温度升高会进一步加热流经的制冷剂气体,最终导致排气温度显著上升。润滑不足还会加剧部件的磨损,磨损产生的金属碎屑混入油液中,进一步恶化润滑环境,形成“润滑衰减-摩擦生热-温度升高”的恶性循环,严重影响压缩机的正常运行。

2.2 压缩机内部换热效率下降机理

回油不畅会通过破坏压缩机内部换热环境,致使换热效率降低,进而间接引发排气温度升高。在压缩机正常工作过程中,润滑油不仅承担着润滑运动部件的重要作用,还充当着内部换热介质的关键角色。它通过油液循环,将运动部件产生的热量传递至压缩机壳体以及制冷剂气体中,以此实现内部温度的均衡。然而,当回油不足时,换热介质的总量会减少,换热面积与换热功率也会随之降低。这样一来,运动部件产生的热量就无法

及时导出,导致内部温度不断积聚升高。与此同时,少量残留的润滑油会因温度升高而出现碳化现象,在压缩机气缸壁、排气阀等关键换热表面形成积碳涂层。积碳的导热系数仅为金属的1/10-1/20,这会显著增加换热热阻,极大地阻碍热量从内部向外部制冷剂传递。例如,当气缸壁积碳厚度达到0.5mm时,换热效率可下降30%以上,大量热量会滞留于排气腔,使得排气温度进一步升高,严重时甚至会超过150℃的安全阈值,给压缩机带来严重损害。

2.3 制冷剂循环特性改变的间接影响机理

回油不畅会通过改变制冷剂循环特性,间接对压缩机排气温度产生影响。当油分离器回油受阻时,未被回收的润滑油会随着制冷剂一同进入冷凝、蒸发等后续环节,从而导致制冷剂循环系统中油液含量增加。润滑油与制冷剂混合后,会改变制冷剂的热力学性质,比如降低制冷剂的汽化潜热、增大其粘度等。在蒸发环节,由于混合油液的制冷剂汽化潜热下降,这意味着单位质量制冷剂吸收的热量减少,进而导致蒸发压力降低,使得压缩机吸气压力也随之下降。根据压缩机的工作特性,吸气压力降低会导致压缩比增大,而压缩功与压缩比呈正相关关系,压缩功增加会使压缩过程中产生的热量增多。同时混合油液的高粘度会增加制冷剂在管路中的流动阻力,导致循环流量减小,压缩机排气量相对不足,排气腔内气体被过度压缩,进一步加剧排气温度升高。润滑油在冷凝器内会附着于换热管表面,降低冷凝效率,导致冷凝压力升高,也会间接增大压缩负荷与排气温度,影响整个制冷系统的稳定运行。

3 基于机理分析的回油系统优化与排气温度控制对策

3.1 油分离器与回油系统结构优化

基于回油不畅的产生机理,对油分离器与回油系统进行结构优化是从根源上解决问题的核心对策。在油分离器结构优化方面,可采用“惯性分离+高效过滤”复合分离结构,在入口增设螺旋导流叶片增强惯性分离效果,内部采用高孔隙率、耐油腐蚀的玻纤滤网提升细小油雾捕获效率;同时优化分离器壳体容积设计,保证油气混合物有足够的停留时间,降低分离负荷。加长油分腔体或设置分隔装置,确保底部油液不被吹起。回油管路优化需重点解决流动阻力问题,选用大管径管路并减少弯头数量,采用平滑过渡的弯管替代直角弯,避免形成局部涡流与积油死区;在管路最低点设置排污口,便于定期清理杂质与积油。另外,可增设回油增压装置,对于大排量压缩机系统采用变量回油泵,根据曲轴箱油位自动调节回油流量;在回油阀前增设过滤器与压差监

测单元,防止杂质堵塞阀芯,确保回油通道畅通。通过结构优化,可显著提升分离效率与回油稳定性,从源头减少回油不畅引发的排气温度升高问题。

增加高孔隙率的填料固然可以提高分离效果,但同样会带来压力损失,压降过高会降低能效,因此在实际应用中还需综合考虑分离效率及压降对整体性能的影响,选择最优方案。

3.2 运行工况与参数调控策略

在制冷或相关工业系统中,运行工况的波动常常会引发回油不畅以及排气温度升高等棘手问题,这些问题若得不到妥善解决,将严重影响系统的性能与稳定性,因此制定科学合理的工况与参数调控策略至关重要。在负荷调控方面,压缩机长期低负荷运行是导致回油不畅的一大诱因。当系统负荷低于30%时,可采取“间歇运行+负荷补偿”的创新模式。通过短时提升负荷,能够显著增大油气混合物的流量,进而形成足够的压差来驱动润滑油顺利回油。合理设定压缩机的启停间隔也十分关键。频繁启停会使压缩机内部的油膜不稳定,影响润滑效果,增加设备磨损,所以要避免这种情况发生。参数调控的核心在于优化与回油相关的运行参数。依据系统负荷的动态变化,精准调整回油阀的开启度,确保回油流量与润滑油的消耗速率相匹配,避免回油过多或过少。

3.3 故障预警与诊断体系构建

构建完善的故障预警与诊断体系,对于实现回油不畅问题的早期识别与及时处置意义重大,能够有效避免排气温度过度升高引发连锁故障,保障系统的安全稳定运行。在监测指标选取上,建立“关键参数+油液特性”的多维度监测体系是基础。实时采集曲轴箱油位、回油管路压差、压缩机排气温度、吸气压力、油液粘度及含制冷剂浓度等核心指标,这些指标能够全面反映系统的运行状态。同时,为每个指标设定科学合理的安全阈值与预警阈值至关重要。例如,将回油压差预警阈值设定为0.4MPa,排气温度预警阈值设定为130℃,当指标接近或超过这些阈值时,就意味着系统可能存在问题^[4]。在

预警系统构建方面,采用PLC+触摸屏的控制架构,结合先进的物联网技术,能够实现监测数据的实时传输与存储。通过对这些数据进行趋势分析,可以提前发现潜在问题,实现早期预警。当指标接近预警阈值时,系统会立即发出声光报警信号,提醒工作人员及时处理。诊断体系则采用“规则推理+数据驱动”的复合诊断方法。基于回油不畅与排气温度升高的机理,建立故障诊断规则库,为故障诊断提供理论依据。利用历史运行数据训练诊断模型,能够实现对回油不畅程度、故障诱因的精准定位。另外,配套建立完善的故障处置预案,明确不同预警等级的处置流程,确保故障发生时工作人员能够快速响应,及时采取调整工况、清理管路等有效措施,保障系统稳定运行。

结束语

油分离器回油不畅对压缩机排气温度的影响是多方面且复杂的。通过对其影响机理的深入分析,明确了润滑性能衰减、换热效率下降、制冷剂循环特性改变等因素在不同回油不畅程度下的作用机制。基于这些机理提出的结构优化、工况调控和故障预警诊断等对策,能够有效降低回油不畅带来的不利影响,控制压缩机排气温度在合理范围内。未来,还需进一步研究更精准的控制策略和更高效的故障诊断方法,以提升制冷系统的整体性能。

参考文献

- [1]冉鹏,罗吉荣,司超.低压喷油螺杆压缩机排气含油量过高的原因分析及如何降低排气含油量[J].压缩机技术,2022,(04):37-41.
- [2]甘捷.喷油式螺杆空压机空气含油量超标原因分析及处理[J].压缩机技术,2021,(02):61-64.
- [3]温万春,谢建生,白文骏.往复压缩机气阀故障诊断一例[J].中国设备工程,2020(20):156-157.
- [4]王林,王小平,靖波,等.浮油回收用轴向涡流分离器分离性能实验研究[J].广州化工,2021,49(18):36-40,51.