

裂解气压缩机注水防结焦改造

苟蓝天

国家能源集团宁夏煤业有限责任公司烯烃二分公司, 宁夏 银川 750000

[摘要]裂解气压缩机开车的同时,原有的喷射式柴油机技术也随之投入使用。本发明是一种以石油加氢设备中的碳六碳九芳香族化合物为原料,采取多个注油点、均匀喷射的方法。但是,它对润滑油的质量有很高的需求,在使用过程中,会有很多的燃油被吸入到压汽机中进行再循环,从而导致燃料的浪费。同时,喷入的柴油仅能润湿压气机叶片周围的流道,避免对叶片及分隔器的附着,但压气机的出口温度仍较高。此外,由于加氢反应器的操作时间较短,导致其不能稳定、稳定地长期运转。因此,本论文结合国电宁夏煤炭液化公司的实际情况,对热解气化炉装置进行简单的概述,并对其结焦的成因进行详细的剖析;并在此基础上进行对策性的剖析。

[关键词]注水;裂解气;压缩机

DOI: 10.33142/ect.v2i12.14779

中图分类号: TE974

文献标识码: A

Water Injection and Coking Prevention Renovation of Cracking Gas Compressor

GOU Lantian

Olefin Second Branch of CHN Energy Ningxia Coal Industry Co., Ltd., Yinchuan, Ningxia, 750000, China

Abstract: At the same time as the cracking gas compressor is started, the original injection diesel engine technology is also put into use. The present invention is a method of using carbon six carbon nine aromatic compounds from petroleum hydrogenation equipment as raw materials, adopting multiple oil injection points and uniform spraying. However, it has a high demand for the quality of lubricating oil, and during use, a lot of fuel will be sucked into the compressor for recirculation, resulting in fuel waste. At the same time, the injected diesel can only wet the flow channels around the compressor blades, avoiding adhesion to the blades and separators, but the outlet temperature of the compressor is still high. In addition, due to the short operating time of the hydrogenation reactor, it cannot operate stably and steadily for a long time. Therefore, based on the actual situation of Guodian Ningxia Coal Liquefaction Company, this paper provides a brief overview of the pyrolysis gasification furnace device and a detailed analysis of the causes of coking, and based on this, conduct a strategic analysis.

Keywords: water injection; cracking gas; compressor

引言

高温条件下,裂解气中含有丰富的烯类、双烯类物质,在高温条件下会形成黏性的沥青质,堵塞叶轮、隔板、箱体;由于流动通道、密封等原因,会增大压气机的阻力,降低其流动速度,从而对压气机的空气动力特性产生不利的影响。由于离心力的影响,转子表层的高分子材料可能会从转子的表层脱离,从而引起整个系统的动力平衡,从而引起整个系统的振动。针对宁夏煤炭集团液化天然气有限公司生产过程中出现的结焦严重、操作时间短等问题,提出以注水代替原来的注油法,以保证其投入使用后可长期平稳运转;从而减少压气机的温度,减轻积炭,延长运行时间,提高空气动力特性。

1 裂解气压缩机概况

1.1 设计参数

该套设备由意大利 Nuovo Pignone 厂在 1994 年生产,配置有两个气缸(型号为 2 MCL 806 和 2 BCL 508),分为四级,总计拥有 14 个阶段,其设计关键参数详见表 1。

如表 1 所示,可以看出所有阶段的出口温度都没有超出 90℃。通过计算分析,该机组各阶段的设计效率相当高,四段平均效率达到 83.6%。

表 1 压缩机组设计参数

| 项目 | 低压缸 | | 高压缸 | |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | I 段 | II 段 | III 段 | IV 段 |
| 级数 | 3 | 3 | 4 | 4 |
| 进口流量/ (kg·h ⁻¹) | 67883 | 66542 | 68674 | 72281 |
| 进口压力/MPa | 0.129 | 0.290 | 0.678 | 1.545 |
| 进口温度/℃ | 28.46 | 29.03 | 29.51 | 19.61 |
| 出口压力/MPa | 0.316 | 0.705 | 1.649 | 3.758 |
| 出口温度/℃ | 87 | 89 | 90 | 85 |
| 各段功耗/kW | 2083 | 2112 | 2151 | 2175 |

1.2 运行状况

表 2 展示机组在改造之前的运行状况。观察表格 2 的数据,可以发现机组存在以下几方面的问题:首先,在

机组的工作转速（7170 转/分钟）高于额定转速（7010 转/分钟）的情况下，第三和第四段的流量未能达到设计的流量标准，这表明机组的实际效率未达到设计效率；其次，在总压比（27.9）低于设计总压比（29.13）以及进口温度低于设计标准（除第四段）的情况下，各个段的出口温度普遍高于设计温度，这反映出压缩机的摩擦损耗增加，导致温度上升和严重的结焦现象，进而使得压缩机的效率低于设计水平，影响其气动性能；最后，机组还出现气封腐蚀的问题。

表 2 压缩机改造前的运行参数

| 项目 | 低压缸 | | 高压缸 | |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | I 段 | II 段 | III 段 | IV 段 |
| 级数 | 3 | 3 | 4 | 4 |
| 进口流量/ (kg · h ⁻¹) | | | 66517 | 64108 |
| 进口压力/MPa | 0.134 | 0.351 | 0.854 | 1.755 |
| 进口温度/℃ | 25.3 | 27.5 | 26.5 | 26.5 |
| 出口压力/MPa | 0.373 | 0.878 | 1.900 | 3.738 |
| 出口温度/℃ | 93 | 98 | 100 | 100 |

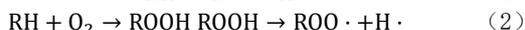
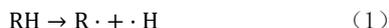
2 结焦对裂解气压缩机的影响

2.1 焦物形成机理

在裂解气压缩机内，由于烯烃在特定温度下发生聚合作用，形成结焦物质，这一过程在有铁或其氧化物作为催化剂时尤为显著，它们充当促进聚合反应的触媒。聚合作用起始于一类称为自由基的粒子，这些粒子通常源于稳定分子在受热时的分解（公式 1）。

当存在氧气及氧化物时，烯烃会被氧化，进而生成不稳定的过氧化物，这些过氧化物在分解过程中同样能够产生自由基（公式 2）。

随着压缩机持续工作，各级通道、叶轮以及转子上的聚合物不断沉积，使得通道宽度减小，阻力升高，进而引起温度的上升。由于聚合物在系统内的结焦不均，这会导致压缩机产生较大的振动，从而显著影响其工作效率。



2.2 防止结焦的措施

为确保裂解气压缩机能够长时间稳定运作，避免结焦现象是至关重要的。在工业生产中，一般采取三种措施：加油、加水以及涂覆防垢层。针对该设备，工艺上实施加油策略，其机理在于注入特定的洗油，将洗油微滴分散于裂解气体中，进而在裂解气的流通过程中形成油膜层，这样可以降低聚合物对流通表面的黏附或减轻其黏附程度。因此，注入的洗油量务必要充足。

仅仅通过注入洗油可以减缓结焦的形成，令焦质变得更加松散。但是，为进一步减缓聚合物的结焦速度，工艺

上还要求必须将各出口段的温度控制在 90℃ 以下，防止大分子稳定地转化为自由基，进而有效控制聚合物沉积层的厚度。

2.3 焦物对压缩机运行的影响

该设备在 2019 年年末进行性能升级，从 140kVa 提升至 180kVa 的过程中，尽管压缩机及其透平部分并未进行调整，却对其进行全面检修。该压缩机在此后四年多时间里保持着长时间的稳定运行。然而，自 2023 年 11 月起，设备的高压缸轴承振动开始显著增加，频繁触发超限警报。经过一系列操作，包括更换洗涤油、添加阻聚剂和注入清洁分散剂等，确保压缩机能够继续运作，直至 2024 年 4 月的计划性停机维护。

重启后不到一个月，裂解气压缩机的中压缸轴承振动出现不稳定，频繁发生轴振动超标及严重超标报警，同时压缩机出口温度也出现升高。停机检查时发现，中压缸和低压缸的缸体以及转子存在严重的焦块沉积问题。

3 结焦原因分析

3.1 结焦状况

在完成检修的裂解气压缩机投入运行不久，其轴振动幅度持续上升，并触发因振动过高而设定的警报。对设备进行停机检查时，发现中压缸第二级第三叶轮的流道内焦块堆积现象较为严重。入口流道并未出现焦块沉积，但在隔板、扩压器以及回流室等部位焦块堆积较为显著，叶轮上的焦块沉积虽不如隔板严重，但仍较为松散，可以手工去除，呈黑色。

至于中压缸的第三级第三叶轮，其结焦状况相对较轻，仅在隔板等固定部件上观察到少量焦块，这些焦块的表面呈现黑色，质地松软，类似沥青。

对比之下，低压缸的结焦程度优于中压缸，叶轮表面相对洁净。

3.2 结焦物分析结果

经过详细分析检验，发现结焦物质能够被有机溶剂轻易溶解，主要成分为 C₅ 及其以上的聚合物，并且在该结焦物的灰分中检测到铁元素及其氧化物的存在。具体的化验数据详见表 3。

表 3 结焦物化验结果

| 有机物 | 低压缸 | | 高压缸 | |
|-----|--------------------------|---------------------------------------|-------|---------------------------------------|
| | C ₅ 聚合物及芳烃聚合物 | -99 | 不饱和酸酯 | 90 |
| 灰分 | | -1 | | 10 |
| | Fe | 0.6 (Fe ₂ O ₃) | Fe | 5.5 (Fe ₂ O ₃) |
| | Si | 0.04 (SiO ₂) | Si | 0.2 (SiO ₂) |
| | Ca | 0.01 (CaCO ₃) | Na | 0.2 |
| | Mn | 0.0 | Al | 0.2 |
| | S | 0.01 | -- | -- |

3.3 原因分析

经过对结焦位置及其生成物的详细剖析,技术团队归结出结焦现象是由多重要素共同作用引起的:

(1) 观察结焦物的形态可以推断,裂解气压缩机内部发生的结焦为液态结焦,主要由高分子组分(尤其是 C_6 以上的二烯类物质)在压缩机内的长时间滞留造成。

(2) 在高负荷运作期间,尤其是设备更新后初期,裂解温度相对较低,而燃料油投入量偏高,导致水洗塔的清洗效能不理想,高分子物质向后推移,除沫网的去除效能不足,使得携带液体的裂解气进入压缩机。

(3) 系统内残留的物质可能充当聚合反应的触发体,促使裂解气压缩机流道中的聚合、结焦和结垢过程加速。

(4) 系统中的氧、铁及其氧化物容易与有机物质反应生成铁的络合物(例如二茂铁),这会催化聚合反应,进而导致结焦现象。

(5) 中压缸和低压缸的洗油喷嘴注入量若分配不均或雾化效果不佳,会导致局部洗油未能充分润湿流道,从而在这些区域形成焦质。

4 采用注水技术的原因及理论基础

4.1 采用注水技术的原因

在裂解设施中,裂解气压缩机扮演着至关重要的角色,犹如整个系统的中枢,它的运行质量直接关联到乙烯生产设施的安全性、稳定性以及能否实现长期连续运作。

分离出的气体中富含乙烯、丙烯、丁二烯等不饱和烃类,以及多种硫化物、氧化物和芳香烃等,成分极其繁杂。在特定的温度和压力条件下,丁二烯等高分子不饱和烃易发生脱氢和缩合作用,进而生成各类焦油状聚合物。研究发现,一旦温度升至 90°C 以上,重质成分(主要包括丁二烯和其他高聚二烯烃)的聚合速率显著提升,产生的焦油状聚合物(在高温下呈现黏稠流体状态,常温下则硬度类似于沥青)会在压缩机叶轮、流道、隔板及内部密封件上沉积,导致压缩机部件性能退化。随着聚合物层厚的增加,部件表面的聚合物在离心力作用下可能会部分剥落,影响转子的动态平衡,极端情况下可能因轴承振动或位移超出限度而触发连锁停机,甚至需要在较短的运行间隔内提前进行检修和清洗流道。为最大限度地推迟聚合反应的出现,必须对压缩机各出口段的温度进行精确控制,业界通常采用注入油品或水的方法来抑制聚合反应的进程。

压缩机的润滑系统通常采用剩余油料(其芳香烃成分不少于 85% ,沸程在 $204\sim 304^{\circ}\text{C}$ 之间,含硫量低,不含砷元素),然而这种做法伴随着一些问题,比如对油质的高标准要求,较高的油料使用量,以及出口处的冷却效果不理想。此外,压缩机流道内易于发生聚合反应,形成焦状沉积物,同时还受到上游油品生产设备运行周

期的影响。鉴于此,传统的加油方法正逐步被新的注水技术所替代。

4.2 采用注水技术的理论基础

在热解气体压缩机中,引发聚合反应的因素是温度。为了避免高分子材料在叶片和隔膜表面的粘附,通常采用的方法是提高压机进口绝对压力和出口绝对压力,或使压机各个阶段的出口温度都下降。但是,现有的压缩机进口压力受限于裂化装置的选择范围,低温装置对压缩机的出口压力进行了限定,这使得降低压缩比的技术难度较大。针对这一问题,一般采用低温(低于 90°C)的方法来抑制聚合。

在热解气体的压缩期内,可以看作是一种拟绝热反应。在这个过程中,进口温度越高,压气机的出口温度也越高。在高温下,热解气体中含有的不饱和碳氢化合物(如烯烃、双烯烃)更容易在热解气体中生成焦炭,从而阻塞压气机的流动通道,降低其运行效率。同时,高温也会造成压气机功率消耗的增加,从而使压气机的工况与等温压缩的期望特性发生偏差。采用特殊的管道结构,驱动流体在压气机中迅速汽化,同时从环境中吸取分解气体中的热,达到传热传质的目的。同时,由于热解气体的降温,其在叶轮入口、压气机各个出口处的温度都会降低,从而使不饱和碳氢化合物的聚合速度减慢,从而使产物的产量有所下降。同时,随着热解气体温度的下降,气体压力趋于等温,这一阶段的能量消耗最少。与此同时,喷射出来的雾化水可以不断地冲洗高分子焦,并将其与热解气体一起从压气机通道中排放出去。

从热力学角度分析,将水注射到压缩机中,可以降低压缩机出口的温度,在保持压缩比不变的情况下,等效于降低压力。但是,在喷射湿气的过程中,也提高了压缩机的总的质量流,可以看作是压力头的增大。但是,由于注入水导致的压力水头下降明显高于它的上升速度,所以从整体上来说,可以有效地减小压缩机的能量消耗。

5 裂解气压缩机注水改造

5.1 改造流程

(1) 对润滑油的注入系统实施升级改造,新增流量监控装置和过滤装置。定期对润滑油泵进行精准校准,确保对注入过程的监控如指掌。

(2) 严格监控油洗塔和水洗塔顶部温度,以及裂解气压缩机中间罐的液位,避免压缩机内部出现带液现象和超温状况。强调必须严控压缩机各出口温度,确保不超过 90°C 的安全界限。

(3) 对裂解气的成分进行精确控制,调整新近改造的炉子裂解程度,以降低重质成分的生成量。

(4) 通过PI系统(实时生产信息监控系统)和大型机组故障诊断系统,紧密监测裂解气压缩机轴振动的发展

趋势，并及时采取必要措施。

(5) 针对压缩机隔板上形成的焦质沉积，通过注入焦质分散剂的方式，实现在线清洗焦质的目的。

5.2 改造方案

采用中压锅炉供水（简称 TW）作为水源，该水质清洁，不含油渍及固体杂质，水压维持在 4.0 兆帕。经过循环水冷却器、滤清器、流量测量孔板、电磁阀和压力调节阀的处理后，水分成八个分支送入压缩机各级。在压缩机各级入口，定量喷射雾状水，确保水雾恰好足以湿润通道，避免聚合物和焦油在通道内沉积。注水系统的具体流程详见图 1。

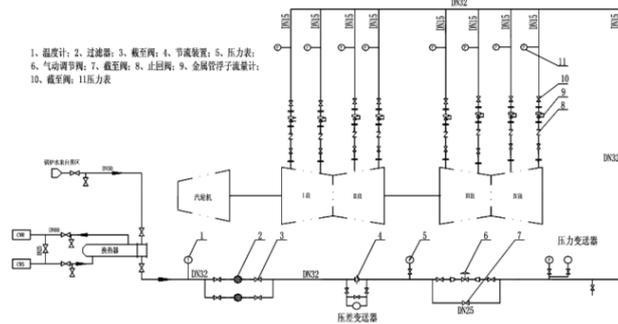


图 1 注水系统流程图

5.3 改造前后压缩机运行数据及对比分析

表 4 压缩机组设计参数

| 项目 | 低压缸 | | 高压缸 | |
|--|-------|-------|-------|-------|
| | I 段 | II 段 | III 段 | IV 段 |
| 进口流量/ ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$) | | | 70149 | 67281 |
| 进口压力/MPa | 0.129 | 0.292 | 0.680 | 1.503 |
| 进口温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 28 | 29 | 30 | 34 |
| 注水流量 ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$) | 800 | 750 | 850 | 900 |
| 注水温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 50 | 50 | 50 | 50 |
| 注水压力/MPa | 0.930 | 1.320 | 2.280 | 3.800 |
| 出口压力/MPa | 0.314 | 0.704 | 1.648 | 3.670 |
| 出口温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 80 | 85 | 88 | 97 |

根据表 4 数据分析，相较于表 2 所展示的改造前数据，可以观察到以下变化：

(1) 通过注水显著提升降温效果，压缩机各出口温度均降至 97°C 以下，前三段的温度甚至未超过 90°C ，较改造前下降超过 10°C ，有效遏制机组结焦的风险；

(2) 第三段和第四段的进口流量较改造前增加大约 5%；

(3) 改造后的压缩机功耗减少 150kW；

(4) 自 2004 年投入运行以来，机组已实现长达 2 年的稳定运行周期，且在最近一次解体检查中发现，机组内部的结焦情况较改造前有明显改善。

6 结束语

通过实施严格的管理手段，并采纳增加洗油频率、喷射焦质分解剂以去除形成的焦状物质、不断输入聚合抑制剂等策略，成功遏制聚合物在裂解气压缩机内部焦化。经过六个月的连续运行，压缩机各部分的轴承振动幅度大致上维持在一个稳定的水平。这些措施有效地减缓并掌握压缩机体内部焦状聚合物的生成，从而为裂解气压缩机的稳定、高效、长期、满负荷、优质运行提供坚实的支撑。

[参考文献]

[1] 冯飞, 姜涛, 郑明岩, 等. 裂解气压缩机段间压差高问题探讨[J]. 乙烯工业, 2024, 36(3): 48-51.

[2] 张江平, 谢明. 裂解气压缩机的结焦与防治[J]. 乙烯工业, 2024, 36(2): 41-46.

[3] 田晓兰, 坎晓杰, 万晓明, 等. 裂解气压缩机长周期运行中的问题及对策[J]. 乙烯工业, 2024, 36(2): 60-64.

[4] 游笑辉, 董亚龙, 王晨宇, 等. 裂解气压缩机注水系统优化[J]. 乙烯工业, 2021, 33(2): 56-58.

[5] 王生伟, 张迎春, 刘源波, 等. 裂解气压缩机段间换热器堵塞在线处理[J]. 乙烯工业, 2020, 32(3): 57-60.

作者简介：苟蓝天（1995.8—），女，毕业于中国矿业大学银川学院，专业化学工程与工艺，当前就职国能宁夏煤业烯烃二分公司，压缩机操作工，助理工程师。