

文章编号: 1000-8241(2018)08-0947-05

## 转子结垢造成的离心压缩机振动故障

刘明亮<sup>1,2</sup> 苏昭兴<sup>2</sup>

1. 西安石油大学; 2. 中国石油化工股份有限公司天然气输济管道分公司

**摘要:** 针对某天然气增压站离心压缩机转子结垢导致机组振动超标并触发停机的故障, 利用状态监测技术结合压缩机输气能力变化、内窥镜检测及拆机检修情况对故障机理进行分析, 确定了导致转子不平衡的原因是叶轮结垢。对叶轮和流道垢层进行化验和成因分析, 其结果验证了故障诊断技术的实用性与有效性, 并且提出了加强过滤排污等防控措施, 为天然气长输管道离心压缩机同类故障诊断及处置提供了参考。(图 2, 表 1, 参 22)

**关键词:** 天然气; 长输管道; 离心压缩机; 转子; 结垢; 不平衡; 故障

中图分类号: TE974

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2018.08.017

## Centrifugal compressor vibration fault caused by rotor scaling

LIU Mingliang<sup>1,2</sup>, SU Zhaoxing<sup>2</sup>

1. Xi'an Shiyou University; 2. SINOPEC Yu-Ji Pipeline Company

**Abstract:** In a certain gas booster station, the vibration of centrifugal compressor exceeds the criterion due to the scaling of its rotor, and consequently the centrifugal compressor is shutdown. In this paper, the failure mechanisms of the centrifugal compressor were analyzed by means of the state monitoring technology, combined with transport capacity change of compressor, endoscope detection, and disassembly maintenance. It is confirmed that the cause of the rotor imbalance is the impeller scaling. Then, tests and cause analysis were carried out on the scaling buildup of impeller and passageway, and the practicality and effectiveness of the fault diagnosis technique were verified. Finally, the prevention and control measures were put forward, e.g. strengthening filtration and drainage. The research results provide the reference for the diagnosis and treatment of similar faults of centrifugal compressors for long-distance natural gas pipelines. (2 Figures, 1 Table, 22 References)

**Key words:** natural gas, long distance pipeline, centrifugal compressor, rotor, scaling, imbalance, fault

大功率、高压天然气长输管道是关系到国计民生的重要能源动脉, 而离心压缩机由于排量大、工况平稳、故障率低等优点, 在天然气长输管道中得到广泛应用<sup>[1]</sup>。一旦长输管道离心压缩机出现故障, 造成管道停输, 将对下游用气单位的正常生产以及人民群众的生活造成影响。因此, 应采取有效措施对管道离心压缩机故障进行防控。管输天然气若含有粉尘、液态水等杂质, 将会在压缩机叶轮、流道等部件表面附着结垢, 导致通过面积减小、输气能力降低、输气能耗增加。若叶轮上所结垢层发生脱落, 可造成压缩机转子动平衡破坏, 致使压缩机机体振动上升<sup>[2]</sup>, 严重时可能造成压

缩机无法运行, 甚至发生安全事故<sup>[3]</sup>。

转子不平衡是由于转子部件质量偏心或出现缺损造成的故障, 按发生不平衡的过程可分为原始不平衡、渐发性不平衡及突发性不平衡等情况<sup>[4-5]</sup>。原始不平衡是由于转子制造误差、装配误差以及材质不均匀等原因造成的; 渐发性不平衡是由于转子上不均匀结垢、介质中粉尘的不均匀沉积、介质中颗粒对叶片及叶轮的不均匀磨损以及介质对转子的磨蚀等因素造成的; 突发性不平衡是由于转子出现异常质量损失, 如转子结垢部分脱落、零部件掉落、疲劳断裂损坏等<sup>[6]</sup>。转子不平衡产生的离心力始终作用在转子上, 转子每

转一周,就会在转子或轴承上产生一次振动冲击,其振动频率对应于转子的转动频率<sup>[7]</sup>。通过对华北某天然气长输管道压缩机结垢造成振动停机问题的分析,研究结垢的成因,有针对性地提出预防控制压缩机结垢的措施。

## 1 故障案例

华北地区某天然气增压站安装有3台BCL355型离心压缩机。2012年12月,作为主运行机组的1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>压缩机相继出现机体振动上升现象,故障表现为启机过程中跨越一阶临界转速失败,机组振动保护停机。经多次尝试偶然启动成功后,运行中机体振动较大,接近停机保护值。基于此种情况,对压缩机振动状态进行监测,结合输气能力变化情况及内窥镜检测技术,判断故障原因。

将1<sup>#</sup>压缩机与运行正常的3<sup>#</sup>压缩机进行对比分析,在相同进口、出口压力(两台压缩机并联)的工艺条

件下,调整两台压缩机转速一致,对比输气能力。根据计算,1<sup>#</sup>压缩机在同样工况下瞬时输气量较3<sup>#</sup>压缩机低4.9%。

对压缩机加载过程振动情况进行测试,压缩机初始转速为7 700 r/min,此时压缩机高压侧振动约为27 μm,低压侧振动约为12 μm。转速增加至11 500 r/min时,振动出现急剧上升,高压侧振动攀升至36 μm。此时,缓慢关闭压缩机防喘阀、减少回流量,振动增大明显,并伴有波动,高压侧振动值最高时接近50 μm。压缩机防喘振图像显示防喘振点距离防喘振曲线较近,当进一步提高转速使防喘振点远离防喘振曲线时,振动明显下降。当工况稳定一段时间后,振动趋于稳定。

分析1<sup>#</sup>压缩机提速加载过程中4个测点的振动频谱(图1),其中,VE855X、VE855Y分别为压缩机高压侧 $x$ 和 $y$ 方向的测点,VE856X、VE856Y分别为压缩机低压侧 $x$ 和 $y$ 方向的测点。4个测点的振动频率均以工频为主,经判断,排除轴不对中情况<sup>[2]</sup>,可能原因因为压缩机转子不平衡或腔内流道不畅<sup>[8-9]</sup>。

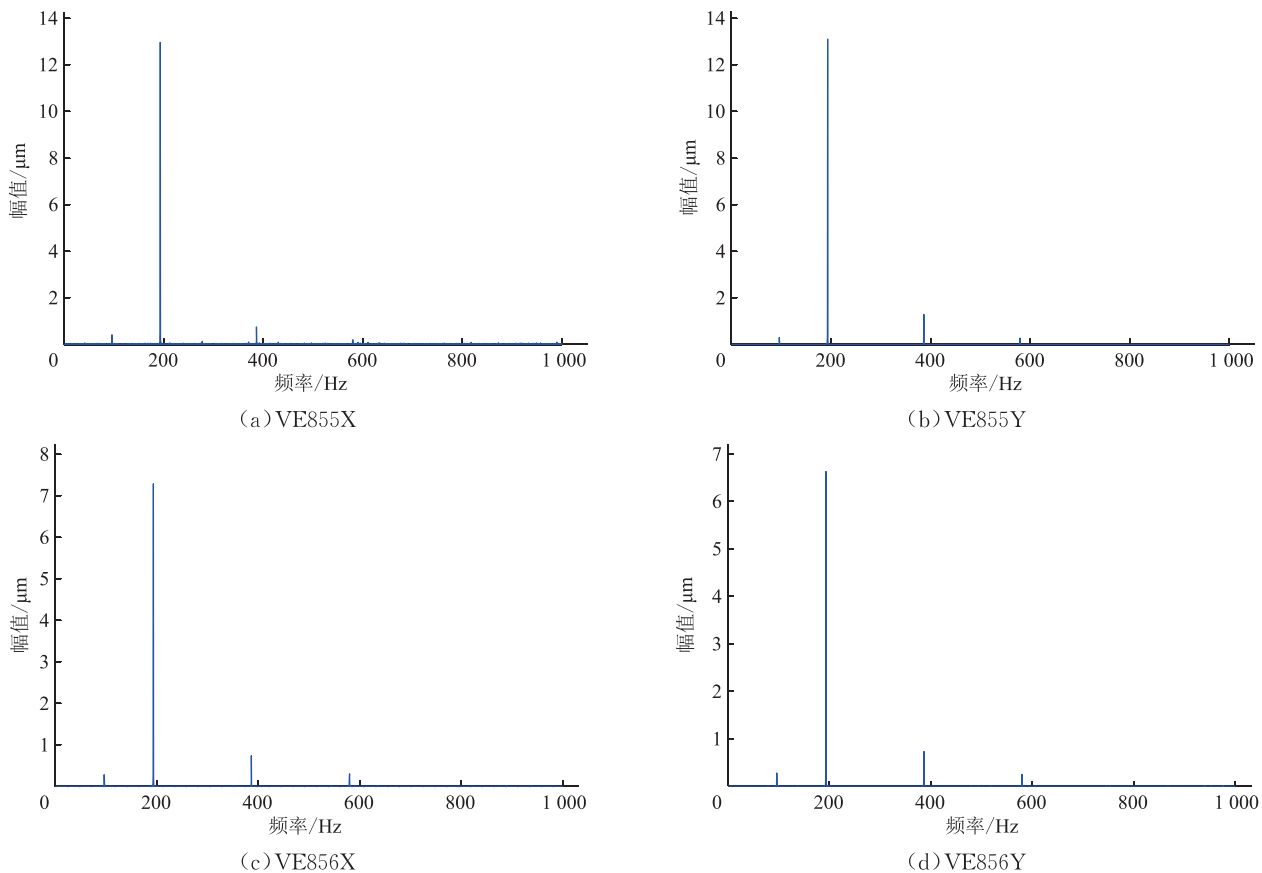


图1 1<sup>#</sup>压缩机提速加载过程中4个测点的振动频谱

为进一步确定故障原因,采用内窥镜对压缩机内部流道进行检查。内部流道表面颜色较浅且凹凸不平部分为垢层,颜色较深且表面光滑部分为垢层脱落后

的流道金属面。通过检查,压缩机第一级叶轮处显示流道出现明显结垢,垢层减小了天然气的通过面积。同时,可以发现内部垢层出现了部分脱落。

## 2 故障分析

拆解检查 1# 压缩机内部结垢情况,发现隔板及叶轮出现了较为严重的表面结垢(图 2),其中低压侧结垢最为明显,最厚处垢层达 10 mm。天然气通过面积大幅减小,压缩机输气能力受到影响。同时,转子垢层出现明显脱落现象,证明转子动平衡遭到破坏。在进行隔板、转子除垢并对转子重新调整动平衡后,压缩机回装试车,振动恢复正常值。加载状态下压缩机高压侧振动值降为 18  $\mu\text{m}$ ,低压侧振动值为 26  $\mu\text{m}$ ,转子的动平衡恢复好。



(a) 隔板

(b) 叶轮

图 2 1# 压缩机内部隔板及叶轮结垢情况

结合振动数据及压缩机检修情况进行故障机理分析:①受天然气气质的影响,压缩机内部流道逐步出现结垢现象,压缩机输气能力受到影响,在同样转速的情况下,相比于正常压缩机输气能力显著偏低。②压缩机转子在停机期间,压缩机腔内温度由运行温度(超过 90 $^{\circ}\text{C}$ )降为室温(冬季为 0 $^{\circ}\text{C}$ ),在热胀冷缩作用下,叶轮表面垢层出现部分脱落,转子动平衡遭到破坏<sup>[10-11]</sup>。③转子动平衡的破坏,造成压缩机启机过程无法跨越一阶临界转速<sup>[12]</sup>,同时振动值随转速提升而增大。偶然启机成功后,加负载过程中,由于防喘阀的缓慢关闭,进入压缩机的天然气逐步减少,压缩机进出口压差增大。低压侧的严重结垢造成压缩机内部进入高压侧的天然气量受到影响,引发旋转失速,促使振动加剧<sup>[13]</sup>。增大进入压缩机的天然气量后,旋转失速问题得到缓解,振动降低。

对压缩机内部除下的垢层应用非黏土矿物 X 射线衍射方法进行分析<sup>[14-15]</sup>,得出结垢主要成分(表 1),这些组分均溶于水<sup>[16-17]</sup>。由于冬季生产下游市场天然

表 1 压缩机内部结垢主要成分质量分数 %

氯化钠	罗水氯铁石	钙芒硝	二氯化铁
72.1	13.8	7.5	6.6

气用量增大,气田开井数量急剧增加,新投产气井往往存在含液量大的问题。压缩机前卧式过滤器排液量大幅上升,每日排液量达 800 L,但由于过滤器脱水能力有限,大量液态游离水随天然气进入压缩机。综合以上因素,压缩机内部结垢原因应为:气井中液态水携带井盐进入压缩机腔体,在腔体内温度上升的情况下,受到叶轮撞击后水分蒸发,盐类物质附着于叶轮及流道形成结垢。

## 3 预防措施

压缩机内部结垢,将直接影响压缩机的输气能力,并威胁机组运行安全,因此应采取以下预防措施:①气田严格控制产出天然气的含水量,采取有效的脱水工艺,如三甘醇脱水、低温脱水<sup>[18]</sup>等,从而消除天然气中的液态游离水,从根本上避免压缩机结垢。②加强对压缩机前端分离器的管理,加大排污力度,定期检查更换过滤器滤芯,最大限度地过滤掉天然气中液态水与固体粉尘。若天然气所含游离水量较大,过滤分离器无法有效拦截,可以考虑在过滤分离器前安装临时旋风分离器。③加强压缩机腔体排污,每次停机后进行排污检查,清除腔体内污液,同时可以监控天然气的含液量。

若压缩机内部已经发生结垢,可采取拆解清洗或在线清洗的方式进行处理。其中应用在线清洗时需注意对清洗液 pH 值和密封气压力的控制,防止清洗液对叶轮、级间密封造成腐蚀,避免清洗液进入干气密封造成密封动静环的损坏<sup>[19-22]</sup>。

## 4 结束语

应用以振动检测为核心的故障诊断技术,可以实现离心压缩机结垢故障的分析,为准确快速判断压缩机故障原因、组织检修提供了有力帮助,验证了故障诊断技术的实用性与有效性,为类似故障的准确判断与分析提供了宝贵经验。

## 参考文献:

- [1] 冯亮,李一为,李一宁.离心压缩机运行养护通用性软件的开发与应用[J].油气储运,2016,35(9):970-974.  
FENG L, LI Y W, LI Y N, et al. Development and application of universal operating maintenance software for centrifugal compressors[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2016, 35(9):970-974.
- [2] 姚林德,俞建良,张德国,等.MVR蒸发系统进口离心风机叶轮结垢的振动故障判断及消除策略[J].当代化工,2018,47(5):988-990,994.  
YAO L D, YU J L, ZHANG D G, et al. Vibration fault judgment and elimination strategy of the impellers in the centrifugal fan of MVR evaporation system[J]. Contemporary Chemical Industry, 2018, 47(5):988-990, 994.
- [3] 高义,金硕,张泽,等.压缩机组故障统计及故障树分析[J].油气储运,2017,36(12):1457-1461,1466.  
GAO Y, JIN S, ZHANG Z, et al. Fault statistics and fault tree analysis on compressor set[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(12):1457-1461, 1466.
- [4] 王春生.离心压缩机振动分析[D].天津:天津大学,2004:36-41.  
WANG C S. The vibration analysis of turbocompressor[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004: 36-41.
- [5] 李刚,谷思宇,贾东卓,等.燃驱压缩机性能监测系统的开发[J].油气储运,2018,37(1):52-56.  
LI G, GU S Y, JIA D Z, et al. Development of performance monitoring system used for turbine-driven compressor set[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(1):52-56.
- [6] YAN X G, GUAN H L, ZHANG Y Y. Vibration response and its characteristics of centrifugal compressor with rotating stall[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 17(1): 136-141.
- [7] 刘建雄.某型航空发动机转子系统典型振动故障机理建模及响应特性研究[D].武汉:华中科技大学,2015:8-17.  
LIU J X. Study on typical vibration fault mechanism modeling and response characteristics of certain aero engine rotor system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015:8-17.
- [8] HOWARD C Q, SNYDER S D, HANSEN C H. Calculation of vibratory power transmission for use in active vibration control[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 233(4):569-581.
- [9] 毕德龙,张文振,王国欣,等.离心压缩机旋转失速测试诊断与故障研究[J].风机技术,2013(3):79-83.  
BI D L, ZHANG W Z, WANG G X, et al. Testing diagnosis and fault research on rotating stall fault of centrifugal compressor[J]. Compressor, Blower & Fan Technology, 2013(3):79-83.
- [10] SYVERUD E, BREKKE O, BAKKEN L E. Axial compressor deterioration caused by saltwater ingestion[J]. Journal of Turbomachinery, 2008, 129(1):119-126.
- [11] 常户星,陈肇日,刘向阳,等.离心式湿气压缩机转子在线清洗技术——以莺歌海盆地乐东气田为例[J].天然气工业,2014,34(6):130-134.  
CHANG H X, CHEN Z R, LIU X Y, et al. On-line cleaning of the rotor of a wet gas centrifugal compressor: A case from the Ledong Gas Field in the Yinggehai Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(6):130-134.
- [12] 高松林.离心压缩机实际一阶临界转速值的确定[J].压缩机技术,2015(1):24-26.  
GAO S L. Determination of actual first-order critical speed value of centrifugal compressor[J]. Compressor Technology, 2015(1): 24-26.
- [13] 唐善华,薛献忠.离心式压缩机喘振问题分析[J].油气储运,2004,23(1):36-38.  
TANG S H, XUE X Z. Problem analysis on the surge of centrifugal compressor[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2004, 23(1):36-38.
- [14] 谢飞,吴明,陈旭,等.油田注水系统结垢腐蚀机理[J].油气储运,2010,29(12):896-899.  
XIE F, WU M, CHEN X, et al. Mechanism of scaling corrosion for water injection system of oilfield[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2010, 29(12):896-899.
- [15] 高淑红,张江江,张志宏,等.塔河油田集输管道内FeS的形成及自燃风险[J].油气储运,2014,33(1):111-114.  
GAO S H, ZHANG J J, ZHANG Z H, et al. Risk analysis on formation and spontaneous combustion of FeS in gathering pipeline of Tahe Oilfield[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(1):111-114.
- [16] 徐素国,梁卫国,赵阳升.钙芒硝岩盐溶解特性的实验研究[J].辽宁工程技术大学学报,2005,24(1):5-7.  
XU S G, LIANG W G, ZHAO Y S. Experimental study on dissolution characteristic of glauberite rock salt[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2005, 24(1):5-7.

- [17] 孙家娟,范广,张引莉,等.铁粉与氯气反应能生成二氯化铁吗?[J].大学化学,2016,31(4):80-82.  
SUN J J, FAN G, ZHANG Y L, et al. Can iron powder react with chlorine to produce iron(II) dichloride?[J]. University Chemistry, 2016, 31(4): 80-82.
- [18] 马卫锋,张勇,李刚,等.国内外天然气脱水技术发展现状及趋势[J].管道技术与设备,2011(6):49-51.  
MA W F, ZHANG Y, LI G, et al. Development status and trend of natural gas dehydration technique at home and abroad[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2011(6): 49-51.
- [19] 陈湛泓.离心式压缩机转子结垢解决方案实践[J].设备管理与维修,2013(5):16-18.  
CHEN Z H. Practice of centrifugal compressor rotor scaling solution[J]. Plant Maintenance Engineering, 2013(5): 16-18.
- [20] 胡广生,袁欢,彭峰.叶轮在线清洗系统在制氧离心空气压缩机上的应用[J].风机技术,2009(1):71-74.  
HU G S, YUAN H, PENG F. The application of on-line cleaning system for impeller in oxygen making centrifugal air-compressor[J]. Compressor, Blower & Fan Technology, 2009(1): 71-74.
- [21] 林玉娟,张浩,张翼.天然气压缩机转子结垢成因探讨[J].科学与技术,2008,8(4):1028-1030.  
LIN Y J, ZHANG H, ZHANG Y. Rotor scaling formation origin mechanism research of centrifugal compressor[J]. Science Technology and Engineering, 2008, 8(4): 1028-1030.
- [22] 陈春江,王立军,吕静.离心式压缩机沉积物的形成和在线清洗[J].纯碱工业,2010(1):29-30.  
CHEN C J, WANG L J, LYU J. Sediment forming and online cleaning of the centrifugal compressor[J]. Soda Industry, 2010(1): 29-30.

(收稿日期:2016-11-30;修回日期:2018-05-24;编辑:李华)

**基金项目:**中国石油化工股份有限公司科技开发项目“榆林首站压缩机优化运行技术研究”,35150021-14-ZC0607-0005。

**作者简介:**刘明亮,男,1975年生,高级工程师,2013年毕业于山东农业大学会计学专业,现主要从事天然气长输管道生产管理工作。地址:山东省济南市历下区世纪大道15002号,250001。电话:0531-62322808,Email:liuming8868@163.com

(上接第946页)

- [23] 冯素敬,张建功,王裴,等.采气用笼套式节流阀阀芯尺寸和节流开度研究[J].石油矿场机械,2017,46(1):48-53.  
FENG S J, ZHANG J Q, WANG P, et al. Study on valve core size and opening degree of sleeve choke used in gas production[J]. Oil Field Equipment, 2017, 46(1): 48-53.
- [24] 战晓溪,李悦钦,刘萍萍,等.笼套式控制节流阀失效机理研究[J].腐蚀与防护,2010(9):718-722.  
ZHAN X X, LI Y Q, LIU P P, et al. Failure mechanism of control choke[J]. Corrosion & Protection, 2010(9): 718-722.
- [25] 魏鑫.笼套式节流阀阀芯失效机理分析与改进研究[D].成都:西南石油大学,2015:36-48.  
WEI X. Erosion failure and experimental analysis of throttle valve cemented carbide[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015: 36-48.

(收稿日期:2016-12-25;修回日期:2018-05-24;编辑:李华)

**基金项目:**中国石化科技部项目“元坝超深高含硫气藏开发关键技术研究”,P13056。

**作者简介:**袁淋,男,1990年生,工程师,2015年硕士毕业于西南石油大学油气田开发工程专业,现主要从事采油气工艺及安全管理工作。地址:四川省阆中市七里新区巴都大道,637400。电话:15228918103,Email:yuanlin343@163.com