

GE水煤浆气化装置氧气系统出现的问题及应对措施



庞刚*

中国石油化工股份有限公司九江分公司，江西九江 332004

摘要：GE水煤浆气化装置高压氧气系统在运行过程的安全性，至关重要！高压和高浓度对氧气管道和阀门都构成了极大的运行风险。重点介绍煤制氢装置投入正常生产运行后，先后出现的几起氧气事故及事件（管线燃爆、泄漏、煤浆污染等）问题，从源头进行原因分析，提出改进优化应对措施，从而有效确保氧气系统有效安全运行。本文主要针对历年运行过程中，发生的典型案例进行回顾分析，总结以往事故及事件处置过程的应急判断、操作调整、停工处理和事故及事件应对分析改进措施。氧气系统的管线、阀门及相关附件，在生产运行过程中本身就存在一定的潜在危险性。氧气系统在施工作业之初，管线焊接安装、脱脂钝化、化学清洗、分析检测等全面监控。并且氧气系统验收标准极为苛刻和严格：要求焊接氧化物彻底剥离；紫光照射无蓝点；樟脑片及密闭性测试合格。同时，运行期间的密闭性和巡回检查都十分重要。只有从严把控氧气系统的安全性，才能在源头及时控制异常及隐患的发生。

关键词：燃爆；污染；多硫酸；腐蚀；密闭性；反窜；限流孔板

DOI: [10.57237/j.cse.2023.04.001](https://doi.org/10.57237/j.cse.2023.04.001)

Problems and Countermeasures in the Oxygen System of GE Coal Water Slurry Gasification Plant

Pang Gang*

China Petroleum and Chemical Corporation Jiujiang Branch, Jiujiang 332004, China

Abstract: The safety of the high-pressure oxygen system in the operation of GE coal water slurry gasification device is crucial! High pressure and concentration pose significant operational risks to both oxygen pipelines and valves. This article focuses on several oxygen accidents and events (such as pipeline explosion, leakage, coal slurry pollution, etc.) that occurred after the coal hydrogen production unit was put into normal production and operation. The root causes were analyzed, and improvement and optimization measures were proposed to effectively ensure the effective and safe operation of the oxygen system. This article mainly reviews and analyzes typical cases that have occurred during the operation process over the years, and summarizes the emergency judgment, operation adjustment, shutdown handling, and accident and event response analysis and improvement measures for past accidents and event handling processes. The pipelines, valves, and related accessories of the oxygen system inherently pose certain potential hazards during production and operation. At the beginning of construction operations, the oxygen system comprehensively monitors pipeline welding and installation, degreasing and passivation, chemical cleaning, analysis and testing, etc. And the

*通信作者：庞刚, pangg.jjsh@sinopec.com

acceptance standards for the oxygen system are extremely strict and demanding: it requires the welding oxide to be completely peeled off; Purple light irradiation without blue spots; Camphor slices and sealing test are qualified. At the same time, airtightness and patrol inspection during operation are very important. Only by strictly controlling the safety of the oxygen system can we timely control the occurrence of anomalies and hidden dangers at the source.

Keywords: Explosion; Pollution; Polysulfuric Acid; Corrosion; Tightness; Anti Channeling; Restriction Orifice Plate

1 前言

九江石化公司煤制氢装置引进了 GE 水煤浆技术，由 $45000\text{Nm}^3/\text{h}$ 的空分、 $105000\text{Nm}^3/\text{h}$ 煤制氢（水煤浆气化、耐硫变换、酸性气体脱除、甲烷化）等单元组成。装置主要采用煤炭为原料，为配套炼化装置提供高纯度氢气，生产运行成本较为低廉。

高压氧气系统是煤制氢装置连续安全运行的关键物料流程，系统管线泄漏、阀门故障、异物污染等，都将威胁装置运行生产安全。严重时，可导致装置全线停工及重大安全事故发生[1]。面对氧气系统出现的异常状况，及时准确的应对处置，可以避免事态的恶化及扩大。

2 高压氧气工艺流程简介及说明

氧气系统主要由两股纯度 $\geq 99.6\%$ 氧气流向构成：
(1) 空分高换复热后为 $44000\text{Nm}^3/\text{h}$ 、 5.6MPa(G) 作为氧

气产品送往煤气化界区；(2) 2000m^3 氧气后备储罐、后备氧泵供应。两股氧气汇入氧气总管线，保障水煤浆气化单元安全用氧需求。

由于水煤浆气化装置生产工艺的特殊性，每一台气化炉的开车、停车/跳车都会在瞬间对氧气总管的压力造成波动，从而影响其他系列气化炉的稳定运行。为了保证下游装置操作的连续性、稳定性和安全性，考虑到备用泵的启动及自控阀门操作延迟时间，设置必要的氧气后备系统。

当空分意外跳车时，使用氧气缓冲罐和管网容量维持氧气压力，冷备的高压液氧泵立即自动加负荷，在 10s 内达到氧气设定压力 5.6MPa(G) ，同时汽化器的蒸汽控制阀自动打开到设定开度，气化高压氧气 $45000\text{Nm}^3/\text{h}$ 送入管网，实现无扰切换，保证高压氧气系统稳定和安全用氧[2]。具体见下图 1：

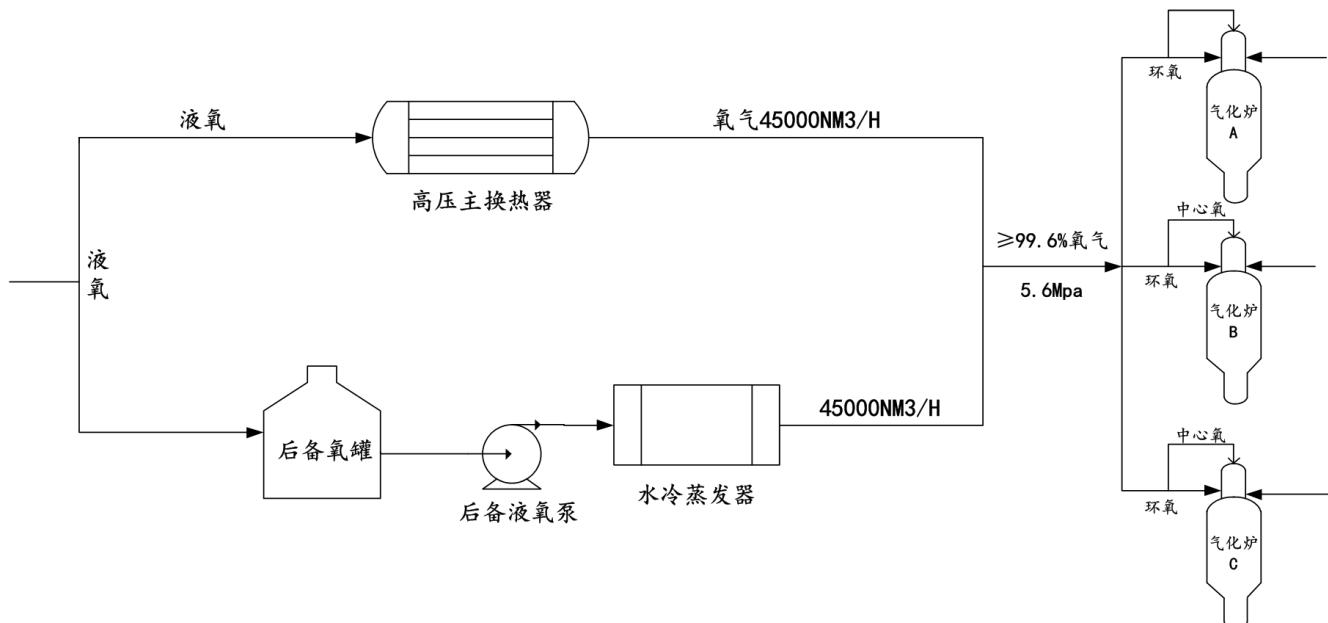


图 1 氧气系统流程简图

3 高压氧气系统曾出现过的问题

高压氧气在大流速且干燥的界面易产生静电，如果产生火花就可能发生燃烧。正常工况下 5.6MPa(G)、25 ℃ 的 99.5% 高纯度氧气与 4.8MPa(G)、57 ℃ 煤浆一同进入气化炉烧嘴混合参加反应，生成主要成分为 CO 和 H₂ 的粗合成气。为确保进入气化炉的高压氧气流量适应氧煤比稳定要求，氧气系统流量控制所测氧气流量在温度、压力补偿单元中经温压补偿计算后，再经氧气纯度校正输送至流量控制器输出控制氧气流量。但在运行生产过程中，仍然可能导致氧气系统出现异常：

3.1 高压氧气管线燃爆

事故回顾：2016 年，煤制氢装置两台运行气化炉氧气流量低低联锁跳车，此时空分装置仍处于运行状态。当班人员针对异常，立即汇报并安排装置做紧急停车处理。现场快速检查发现氧气防爆墙附近有明火燃烧，立即手动停液氧泵，切断氧气。事后发现自氧气外送阀前法兰到止逆阀后法兰全部损坏，外部有过火燃蚀痕迹。空分装置相应区域进行紧急警戒隔离。

3.2 高压氧气管线污染

2016 年 C 系列气化炉正常停车后，吊出气化炉工艺烧嘴，检查发现氧气管线中存在大量的煤浆。针对该现象，立即对炉头氧气管线进行全面检查，最终确认外环氧管线、中心氧管线、煤浆氮气吹扫管线均有大量煤浆窜入。其中，氧气管线氧气下游切断阀后均被煤浆污染，氮气管线的氮塞总阀后均被污染[3]。

3.3 中心氧气阀门关断

事件回顾：2017 年 7 月 28 日凌晨 0: 20 分，当班 DCS 内操监盘发现气化 B 系列氧气量突然降低了 5%、氧煤比正常控制值降低了 6%，经检查发现气化 B 系列中心氧流量显示为 0，但仪表却显示中心氧调节阀阀门开度是 28%，经现场确认，中心氧阀故障关闭；

1: 15 分，经过现场仪表人员处理，中心氧阀仪表手动开启，装置生产恢复正常。整个处理过程中心氧断流近 1 个小时。

3.4 烧嘴外环（氧气）腐蚀开裂

事件回顾：2022 年 6 月 6 日 17 时 25 分，煤制氢

装置操作工巡检过程中听到异响，进一步检查发现 A 系列气化炉工艺烧嘴炉外环氧通道有多处“气孔”，高压氧气持续嗤出泄漏并且有尖锐气鸣声响。装置立即启动应急预案，A 系列气化炉紧急停炉处理，并于当晚拔出烧嘴进行检查。

4 原因分析及应对措施

高压氧气系统是煤制氢装置（空分、气化单元）连续运行的关键物料流程，在正常运行过程中，时刻巡检管控氧气系统的安全，对于装置长周期稳定运行尤为重要。针对运行中发生的不同异常工况，准确做出判断和处置，可以有效避免事态恶化和扩大。及时总结管控高压氧气系统，优化应急工况的处置措施。将隐患消除在萌芽阶段，从而避免生产事故发生。

4.1 高压氧气管线燃爆的原因分析及应对措施

高压氧气系统燃爆事故较为多发，网上案例介绍和分析也比较多。防爆墙内高压氧气管线发生燃爆事故后，立即从工艺操作技术参数、装置运行状况及燃爆事故现场原始情况等进行分析。

4.1.1 工艺操作技术参数分析

相关技术参数事故发生前后运行趋势图 2 如下：

从图 2 可以分析如下：

- 1) 事故发生前氧气管网在空分装置和气化装置的运行稳定。
- 2) 事故发生时，氧气压力迅速下降，但较低压力时，气化压力比空分下降的速率稍缓，这是因为氧气缓冲罐的作用，最低处因液氧管线有液氧汽化维持空分氧气有一点压力。
- 3) 事故发生时，氧气流量在气化装置显示直线下降是氧阀间管线损坏使得氧气中断，而空分氧流量先有上升，也是因先管线断开泄压拉高，而后损坏。
- 4) 事故发生前后，因管线断开泄压拉高流量，使得换热不匹配而使空分氧气温度下降，待氧气卸完后，温度在换热下则出现回升。
- 5) 事故发生前后，外送阀一直处于全开阀位。

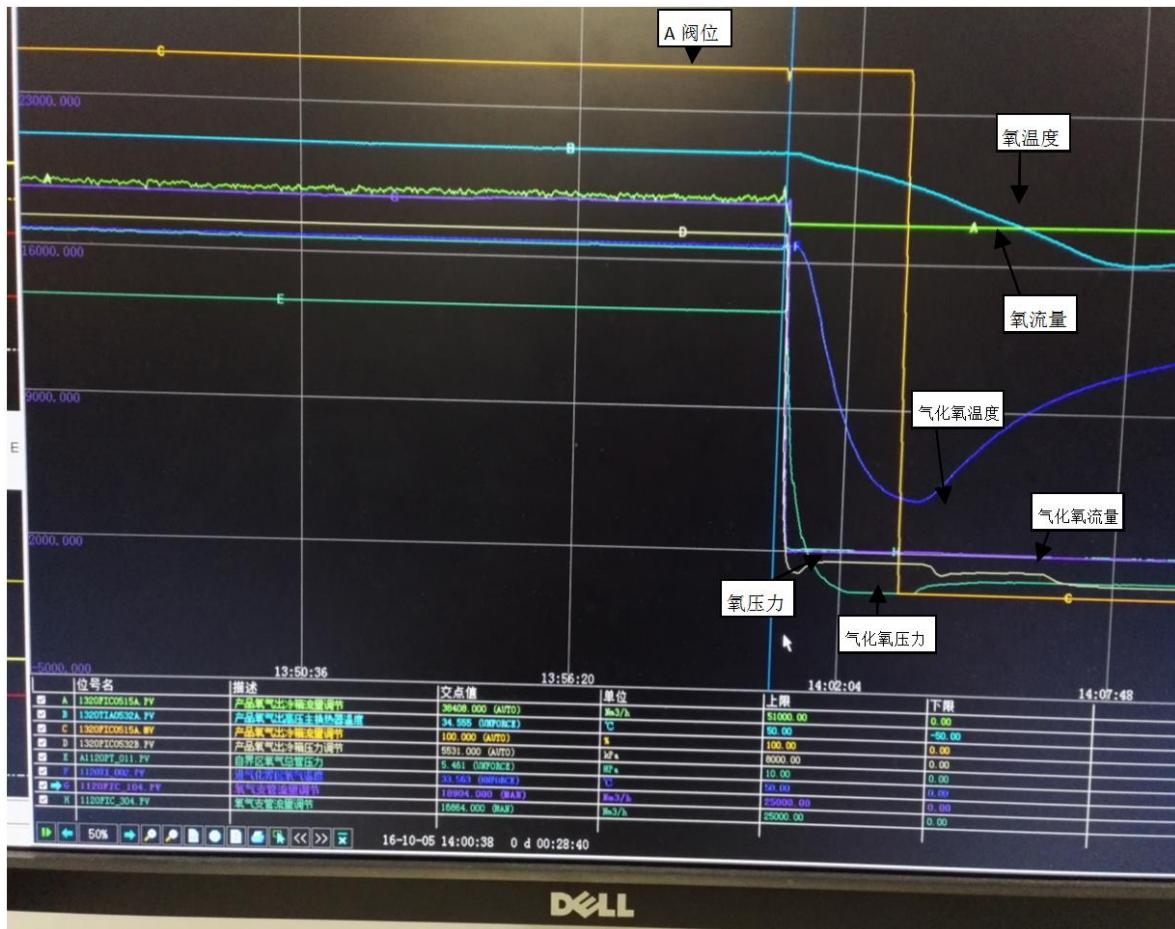


图 2 工艺参数趋势图

4.1.2 运行状况分析

事故发生前，空分装置一直保持连续稳定运行，没有出现停工检修。事发当时装置外送氧气流量量约 $38420 \text{Nm}^3/\text{h}$ ，波动 $100 \text{Nm}^3/\text{h}$ 以内，并且连续稳定运行有 2 天以上，放空阀门和旁路均压阀全关，外送阀门全开[4]。防爆墙外北侧和东侧设有智能巡检点，实行 4G 巡检监控，在事故发生前，巡检未发现异常。事故发生后，及时调取了 DCS 操作记录。在事故发生前没有任何相关操作，气化炉直接出现跳车信号。

4.1.3 事故现场状况分析

事故发生前听到一声剧烈爆炸声响，装置直接导致高压氧气中断气化炉跳车。事故发生处的管道材质为不锈钢 UNS 04400，输送介质为纯度 99.5% 的氧气，压力 5.6MPa [5]。根据氧气的特性：高压氧气在流速大且干燥的界面易产生静电，如产生火花则能发生燃烧

[6]。在没有外在因素和本体原因的情况下，事故发生在防爆墙内部、密封点较多的氧阀组间。氧气阀组及管线全面过火，部分管道、阀门损毁，有明显的喷射燃烧、加剧燃烧症状。

针对高压氧气管线发生的燃爆事故，先后从工艺操作技术参数分析、装置运行状况分析、事故现场状况分析。导致事故发生的可能原因如下：

- (1) 氧气密封点可能是出现了泄漏，且泄漏较大。因为一般的小泄漏会迅速泄压扩散，且产生的静电会迅速导走，不会引起火花点燃。如果出现较大泄漏，在高压大流量冲击下，泄漏口有条件出现大量静电，在超过静电转移的最大负荷时会产生电势差[7]，一定程度后就产生火花，同时大量泄漏的氧气在相对封闭的、防爆墙内的氧阀间。泄漏氧气不断富集，达到着火的条件，使得温度急速上升，熔化泄漏口管道加剧燃烧，熔化燃烧的金属喷射开使泄漏口扩展，喷射的熔浆熔化周边管道而进一步扩展泄漏，氧气泄压大量

富集加剧燃烧，造成阀门管线损毁。事故后通过调取周边相邻视频，事故前两分钟，装置外操人员刚从可能出现了泄漏阀组巡检检查通过。如果高压氧气发生泄漏，异响一定能够引起巡检人员的发现和注意。

(2) 高压氧气管线内部焊瘤颗粒（施工残留），经长期大流速切削脱落，随气流直接撞击管线内部通道的阀芯，导致燃爆事故发生。空分单元自原始开工运行近一年，距燃爆阀组不足一米的氧气管线弯头焊缝，在管线施工与后期的检测验收都极为不便和苛刻。结合事发的爆炸声响，阀门、法兰损毁，氧气大流量燃蚀现象，增加了导致事故发生的可能[8]。

4.1.4 高压氧气系统优化管控应对措施

- (1) 定期加强密闭性检查和时时巡回检查。
- (2) 对高压氧气系统关键区域部位（防爆墙内部），加装视频监控。便于及时发现分析事故真实原因和过程。
- (3) 对高压氧气系统流程进行变更：氧气系统流程优化变更，后备液氧系统暂停使用，原止回阀处加盲堵；对氧气总管取消压力、流量高选控制，保留（压力）控制[9]。

4.2 高压氧气管线污染的原因分析及应对措施

针对高压氧气管线被煤浆倒窜的现象，对污染的管线进行逐一拆检。靠近工艺烧嘴头部的煤浆较多，在管壁、单向阀前后、限流孔板前后、阀门前后均有煤浆颗粒附着。煤浆吹扫高压氮气管线上的单向阀被卡死且处在全开位置[10]。见（图 3）。



图 3 单向阀煤浆卡涩

至此完全可以断定，煤浆是通过煤浆氮气吹扫线反窜至氧气管线。在气化炉停炉后，高压氮气对氧气管线和煤浆管线吹扫过程中，由于管线限流孔板设计及实践应用的氮气用量分配不合理（煤浆氮气吹扫线上的限流孔板孔径为 30.7mm，氧气的氮气吹扫线上的限流孔板孔径为 24.6mm）。导致煤浆管线的吹扫压力高于氧气管线的吹扫压力，煤浆被吹扫氮气带入氧气管线，造成高压氧气管线被煤浆污染。

根据分析的原因，对煤浆管线的高压氮气吹扫线进行优化改进如下：

- 1) 在煤浆氮气吹扫线水平管段（限流孔板前），再增设 1 个单向阀，应用双单向阀流程设计。
- 2) 将高压氮气吹扫线的单向阀尽可能靠近煤浆管线，尽可能减少氮气管线被煤浆堵塞及单向阀发生卡涩的可能性。
- 3) 优化氮气吹扫线上的限流孔板的孔径，保证氧气和煤浆管线吹扫氮气分配用量一致。

在经过优化改进后，高压氧气系统运行至今，再没有出现过煤浆反窜污染的现象。在每次气化炉停车检修及投料开工前，都会对单向阀及管线的状况进行检查确认[11]。

4.3 中心氧气阀门关断的原因分析及应对措施

由于煤浆通道与中心氧通道相互连通，当中心氧阀异常关闭后，部分煤浆必然会通过预混区窜入中心氧通道中[12]。一旦煤浆进入中心氧通道，运行风险将增加，极易导致烧嘴的烧损，甚至引发停车事故。同时，煤浆附着在中心氧通道后，原中心氧区域流动的流场形态发生变化。烧嘴出现偏流或湍流的形式，容易出现气化炉堵渣现象。

4.3.1 原因分析

气化炉 B 系列中心氧流量出现异常归零，立即联系仪表维护人员一同检查现场阀门。发现现场中心氧气阀门处于关闭位置。进一步检查，确认中心氧气调节阀门定位器损坏[13]。考虑在线更换阀门定位器需要一定时间，并且需要标定反复开启调校阀门（决定待气化系列停炉检修时，再进行阀门定位器更换）。经过现场仪表人员处理，按照中心氧阀原运行期间正常阀位，将阀门手动开启至正常阀门刻度位置，中心氧恢复正常运行。

4.3.2 应对措施

正常运行期间，中心氧异常关断。针对如何处置、能不能再次将阀门直接打开投用？曾引起不同争议。有两种观点存在：认为中心氧关断后，气化炉内部反应的粗合成气（CO+H₂）会返回进入中心氧通道，再次开启投用中心氧时，会与氧气混合成为危险爆炸气，存在发生恶性事故风险，必须立即紧急停炉；认为中心氧关断后，环氧与煤浆在预混区混合喷离烧嘴口，对中心氧通道形成抽负效应，再次开启投用中心氧时，不会存在危险性。

通过对 GE 水煤浆气化工艺包研读，并没有发现关于中心氧阀门异常关断的相关提示警告性说明。此事件处置过程也验证了中心氧异常关断后，再次打开阀门投用氧气，未发生操作安全风险。考虑高压氧气的特性，一旦出现中心氧异常中断的事故，从安全性的角度考虑，对后期应对措施需要注意以下几点：

- (1) 中心氧突然关闭后，该系列气化炉负荷不要做任何的调整，稳定氧煤比保持不变。
- (2) 中心氧关断后，需要及时清理现场人员，非必要操作人员必须撤离炉头区域。
- (3) 中心氧流量中断归零，不要对中心氧进行阀门的调整。禁止将阀门突然打开，再次开启中心氧阀门应尽量缓慢匀速打开[14]。

4.4 烧嘴外环（氧气）腐蚀开裂的原因分析及应对措施

工艺烧嘴是水煤浆气化炉的重要部分件（三通道同心），安装在水煤浆气化炉的顶部。工艺烧嘴的工作原理：气化炉工作时，高压氧气与高压水煤浆通过工

艺烧嘴喷入气化炉炉膛进行反应，生成 H₂ 和 CO。该工艺烧嘴从原始开工至今已累计使用 15000h，累计维修 8 次，气化炉不换烧嘴连投了 2 次。此次失效的部分管段为工艺烧嘴炉外（外环氧）部分，材料牌号为 Inconel600 管材。工艺喷嘴失效部分管段内介质为氧气，操作压力为 5.6MPa，操作温度为 33 ℃。

4.4.1 原因分析介绍

当晚拔出烧嘴后，对其各部位进行光谱检测，主材确认为 Inconel600，各元素的含量也符合要求（Ni 含量≥72%，Cr 含量 14-17%）；对各部位进行表面硬度检测，分别为 84.6HRB、94.5HRB、94.1HRB、95.7HRB，均符合≤100HRB 的设计要求；壁厚测定均在 7mm 以上（设计壁厚 7.11），未见减薄情况；PT 检测时发现泄漏部分内外面存在多处开裂。



图 4 工艺烧嘴泄漏部位 PT 检测

为进一步分析烧嘴失效机理，烧嘴制造厂家委托中国特检院进行失效分析。中国特检院对失效样件进行了分割，并且进行了严格的断口能谱、裂纹截面金相、成分检验和材料敏化程度测试。对开裂管段和对接焊缝相连的三通段材料进行敏化性，由检测结果可见对接焊缝两侧的材料均已敏化。

表 1 材料敏化性检测结果

材料来源	试样面积 (cm ²)	Ir (mA)	Ip (mA)	Ir/Ip	敏化程度
开裂段	1	118.327	210.569	0.562	敏化
三通段	1	9.599	147.694	0.065	敏化

注：Ir/Ip 比值小于 0.01 表示未敏化；0.01~0.05 为轻微敏化；大于 0.05 为敏化。

烧嘴外环（氧气）腐蚀开裂是基于烧嘴材料敏化后，与形成的连多硫酸接触，在有应力的情况下形成连多硫酸应力腐蚀开裂，产生的裂纹由内壁形成向外壁扩展直至泄漏。

4.4.2 优化应对措施

针对烧嘴外环（氧气）腐蚀开裂现象，对气化炉

停工后的处置进行了优化调整：明确在气化炉工艺烧嘴拔出前，必须对烧嘴持续充氮小流量吹扫性保护，并尽可能在安全条件许可下第一时间拔出工艺烧嘴，避免形成连多硫酸和避免更大应力作用在烧嘴本体；对装置现有气化炉烧嘴 Inconel600 材质全部更新升级为 Inconel625，以提高其抗腐能力[15]。

5 结束语

通过对高压氧气系统出现的异常工况进行总结，优化管控应对措施，能够有效防范并且避免同类事件再次出现。从而有力保障装置的长周期稳定安全运行，实现装置效能与产能的最大化。

参考文献

- [1] 黄小武, 刘凌燕. 制氧事故综合统计分析 [J]. 气体分离. 2004, (03): 18-20.
- [2] 乐精华, 董霞, 余雯钰. 氧气管路专用阀门 [J]. 阀门. 2009, (03): 32-33, 35.
- [3] 陈凤官, 王渭, 明友, 郝伟沙, 耿圣陶, 吴怀昆, 高红彪. 主氧管线轴流式止回阀故障分析及解决措施 [J]. 化工机械. 2018, 45(02): 215-217.
- [4] 付荣申. 煤化工中氧阀的选型 [J]. 石油化工自动化. 2013, 49(04): 20-23.
- [5] 窦晶, 刘梦梦. 氧气管线设计要点分析 [J]. 化学工程与装备. 2021, (08): 205-206.
- [6] 高积勤. 大型煤化工装置汇总氧阀的研发和应用 [J]. 现代化工. 2013, 33(4): 106-107, 109.
- [7] 贾德训. 对氧气管道安全问题的探讨 [J]. 钢铁技术. 2002, (03): 48-52.
- [8] 齐菲. 氧气阀门材质的选择及配管设计的探讨 [J]. 石油化工自动化. 2014, 50(5): 83-85.
- [9] 潘进平, 许明. GE 水煤浆气化装置优化与技改 [J]. 氮肥与合成气. 2018, 46(09): 14-16.
- [10] 胡江平. 煤化工氧气管线止回阀的选用 [J]. 大氮肥. 2017, 40(01): 18-21.
- [11] 赵伯平. 单系列多元料浆气化装置检修前的工艺处理 [J]. 中氮肥. 2019, (01): 7-12.
- [12] 马小璐, 杨宇, 石小波. 德士古水煤浆气化技术简介 [J]. 内蒙古石油化工. 2017, (09): 80-82.
- [13] 贾玮, 李涛. 再谈水煤浆气化中氧气控制阀的选型 [J]. 仪器仪表用户. 2018, 25(12): 63-65.
- [14] 李颖. 浅析降低氧阀潜在风险的措施 [J]. 化工装备技术. 2016, 37(1): 43-44, 56.
- [15] 于秀平. 镍基合金 NO6600 和 NO6625 氧气管线焊接工艺探讨 [J]. 石油化工建设. 2020, (03): 51-54.