

卡萨利氨合成塔废热锅炉故障处理

废热锅炉泄漏原因分析及维修方案——在合成氨生产企业中，氨合成塔及废热锅炉等核心设备尤为关键，无论在运行管理还是检修规范方面，都应该高度重视。本文从废热锅炉的泄漏及维修入手，分别从设备的结构特点、使用的材质、损坏位置及形式进行分析，对导致的原因进行了判断。最后通过与制造厂家沟通，给出了修复方案，为有同类型设备的企业处理该问题，提供了参考。

文 / 白彦 宋志宇

PROCESS-Tip

* 更多信息请扫描二维码：



chem.vogel.com.cn

* 反馈编码：A202138

晋 煤天源高平化工有限公司于 2006 年建成投产，设计能力为年生产合成氨 40 万 t、大颗粒尿素 60 万 t。在合成系统氨合成工段，来自双甲精制的新鲜气，进入合成气压缩机高压缸加压后，经循环段压缩至 14.2 MPa，温度 74.3 ℃，然后进入气气换热器的壳程，在此被来自锅炉给水预热器的热气体加热到 208 ℃，进入合成塔反应生成合成氨。

从合成塔出来的气体，氨含量约为 18.04%(V)，温度约为 426 ℃，该气体首先进入合成塔废热锅炉被冷却到 270 ℃，然后进入锅炉给水预热器管程，当被冷却到 234.5 ℃，并同时副产部分中压蒸汽，出锅炉给水预热器的热气体先后进入热气气换热器、水冷器等换热设备，最终被冷却至 -10 ℃ 成为产品氨。其工艺流程方框图

本文作者供职于山西晋煤天源化工有限公司。

见图 1，废热锅炉设备主要技术参数见表 1。

氨合成塔及废热锅炉是合成氨生产的关键设备之一，制造厂

采用的是瑞士卡萨利公司的三触媒床两换热器轴径向合成塔内件，合成塔废热锅炉为固定管板釜式 U 形管换热器，设计采用偏心管

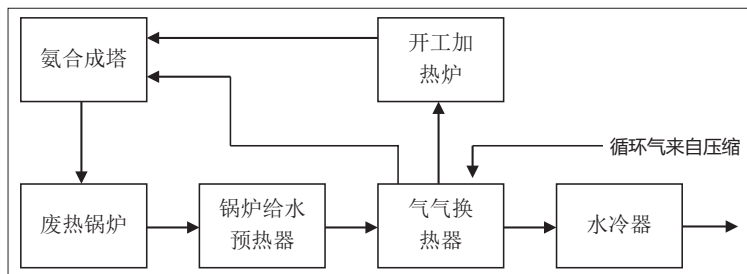


图 1 工艺流程方框图

表 1 废热锅炉主要技术参数

项目	壳程		管程	
	进口	出口	进口	出口
介质	水	水、水蒸气	合成气	合成气
设计压力 MPa	3.4		16.4	
设计温度 (℃)	-10/250		450 ~ 350	
工作压力 MPa	3.0		14.70	
工艺温度 (℃)	204	234	422	270
换热面积	140 m ²			
规格	φ=1 050/1 400 L=5 900/9 356 mm			
重量	22 500 kg		生产单位	卡萨利
合成气工艺组分 (%)				
H ₂	N ₂	NH ₃	CH ₄	Ar
51.20	16.96	18.04	9.44	4.36

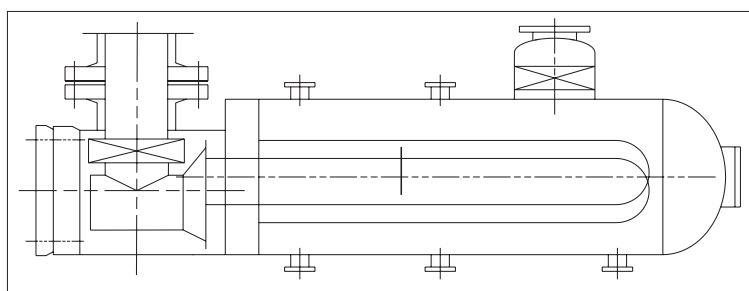


图2 设备结构简图

板、合金短管、连接管、管板堆焊耐热层以及内孔焊等技术，技术标准采用 ASME VIII、AD 2000 及 TEMA R。

由于合成塔气体出口温度为 420℃，压力约 14.7 MPa，且 H₂ 含量较高 (51.20 %)，工况特殊，因此在设备选材上需要综合考虑热强度、耐氢腐蚀以及回火脆化等问题。同时由于冷热介质接触，其温差较大 (200℃ 左右)，所以要求换热管与管板的焊接质量必须稳定可靠，其设备结构简图见图 2。

存在主要问题

2017 年 4 月在对合成废热锅炉蒸汽冷凝液的例行取样检测过程中，检测出了氨离子含量，其浓度从最初的 50 mg/L，逐步扩大到 1 200 mg/L。初步判断是由于废热锅炉泄漏造成，对生产造成了极大影响，同时蒸汽系统也存在着超压的隐患。

系统停车隔离后，经检查发现确实是废热锅炉换热管泄漏，因其结构的特殊性，为进一步判断其泄漏位置及原因：

采用工业内窥镜（型号：VIS 2000 PRO 美国）对换热管内部进行了检查，结果如图 3~6。

通过使用工业内窥镜对 118 根换热管逐根进行检查，疑似有腐蚀及泄漏的管道共计 12 根，如

图 7。疑似腐蚀及泄漏位置多为管板最下侧（内外）3 排管道，泄漏位置多数为从管板处向内 0.5 m 左右，通过内窥镜检查，基本排除了内孔焊接质量及管板受热变形、开裂的因素。

采用涡流检测（型号：EEC-39 爱德森电子）对所有换热管道内部进行了检测，结果如下：

1. 内圈（工艺气进口侧）列管

（1）探伤结果

① 列管探伤未发现明显的

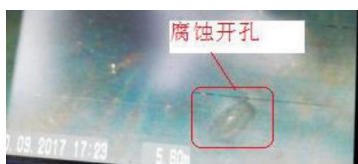


图3 部分泄漏管道：怀疑泄漏位置从管板处向内 0.4 m 左右



图4 部分泄漏管道：怀疑泄漏位置从管板处向内 0.5 m 左右，连续腐蚀小坑



图5 部分泄漏管道：泄漏位置从管板处向内 0.4 m，明显孔洞

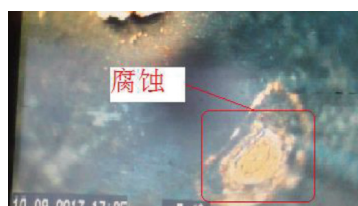


图6 未泄漏的管道：对未发生泄露的管道进行检测，从管板处向内 0.6 m 处有点蚀

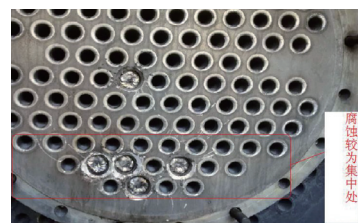


图7 工业内窥镜对换热器的检查显示泄漏处

可记录缺陷信号。

② 靠下部的少部分列管（主要是最下面三排）局部涡流探伤抖动较大，对应部位涡流测厚有明显的腐蚀减薄信号。

（2）测厚结果

① 列管壁厚分布范围比较分散，实际测得壁厚范围在 1.90~2.70 mm。

② 部分列管均存在程度不一的腐蚀减薄，腐蚀减薄明显的位置一般靠近管板的前半部。

（3）壁厚统计见表 2

2. 外圈（工艺气出口侧）列管

（1）探伤结果

① 列管涡流探伤发现靠下部的列管探伤信号幅值、相位明显异常、杂乱，有异常杂乱信号的位置主要在位于靠近管板的前两块隔板内（距管口约 3 m 的范围内），也有少数异常信号位置在管子的后部、甚至分布整根直管段；在对应位置涡流测厚都发现有明显的、严重程度不一的异常腐蚀减薄信号。

② 有异常信号的管道共计

表 2 工艺气进口侧管道壁厚检测结果

单位: mm

壁厚	1.90	1.95	2.00	2.05	2.10	2.20	2.30	2.35	2.40	2.45	2.50	2.55	2.60	2.65	2.70
根数	2	2	12	11	10	8	9	7	10	12	12	10	6	4	3

表 3 工艺气出口侧管道壁厚检测结果

单位: mm

壁厚	1.30	1.40	1.45	1.50	1.55	1.65	1.70	1.80	1.85	1.90	1.95	2.00
根数	2	1	2	6	1	1	2	4	4	5	6	10
壁厚	2.05	2.10	2.15	2.25	2.30	2.35	2.40	2.45	2.50	2.55	2.60	2.65
根数	9	10	6	7	7	5	7	9	8	1	1	4

24 根。

(2) 测厚结果:

①列管壁厚分布范围很分散,实际测得壁厚范围在1.30~2.65mm。

②部分列管（主要在靠管板下部、堵管周围）发现有明显的异常腐蚀减薄信号，腐蚀减薄程度不一，有异常腐蚀减薄信号的位置主要在位于近管板的前两块隔板（距管口约3 m的范围内），与涡流探伤结果相对应。

(3) 壁厚统计如表 3

结合两种检测结果,判定工艺气出口侧管道腐蚀较为严重,决定对打压有漏点及测厚壁厚较薄的列管进行堵管处理。

工有管台, U 形管管头与管台相对接, 从孔内实现管子和管台的焊接, 另外, 由于进气端温度较高, 为保护管板, 在管板进气侧堆焊 9 mm 厚 INCONEL 600 合金, 同时, 在堆焊层处加工凹槽, 合金短管与凹槽相对接, 也采用内孔焊结构(见图 8)。

由于合成塔出口气体温度约 420℃, 易使管板部件产生热应力变形, 该设备 U 形管采用同心圆排列, 热端位于管板中心部分, 冷端配置在管板的外缘, 整个管子呈辐射状的排列, 同时设置内联箱, 高温气体通过管板中心部位的内联箱进入 U 形管, 换热后再从外侧换热管出来返回废锅管侧集箱 (见图 9), 从而保证了管

板径向应力均匀分布,同时也降低了管箱周边的热应力。

在材质选用上,壳程筒体材料选用 SA-516, 70 级,壳程接管材料选用 SA-350 LF2 级 I 类,管箱、封头、接管以及管板锻件材料选用 12CrMo9-10, 换热管材料选用 10CrMo9-10。设备主要受热承压部件选用的材料均是欧标 10028《压力容器用钢——第二部分规定高温性能的非合金和合金钢》中材料,该材料具有优良的抗氢腐蚀和耐高温氧化能力。主体材料的化学成分见表 4,机械性能见表 5。

原因判断

废热锅炉的给水由锅炉给水预热器提供, 锅炉给水预热器顶部在设计时安装有爆破片, 前期因爆破片破裂, 导致废热锅炉液位在短时间内骤降, 然而未引起操作人员的重视, 没有及时停车进行冷却降温; 后期更换爆破片后, 补水速度过快, 可能造成换热管冷热温差变化较大, 材料特性发生变化 (因设备目前仍在运行, 故暂时无法检测换热管材质

原因分析及解决方案

为了满足该设备苛刻工况的要求,在设备结构上采用了偏心管板,管板前段设置一块板及法兰,板固定在法兰上,中间有密封垫,板及法兰上有开孔,开孔的布置与管板进气侧换热管布置相同,法兰与管板中间由 INCONEL600 合金短管焊接。板、法兰、管板以及换热管中间由 475 mm 长 INCONEL 600 合金连接管连接,连接管前段焊接在板上,后端约 350 mm 长缠绕 1.5 mm 厚陶瓷纸,连接管末端插入换热管内。换热管与管板采用内孔焊技术,该设备管板壳侧面内侧加

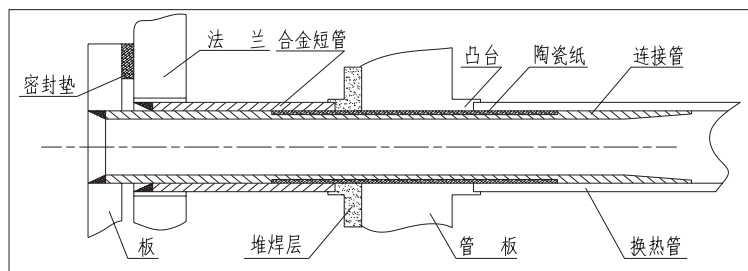


图 8 进气侧设备结构图

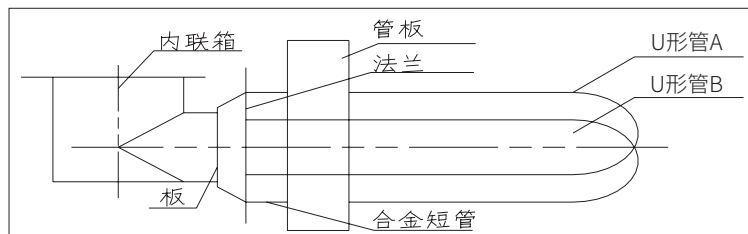


图 9 换热管分布图

表 4 主体材料化学成分

牌号	C	Si	Mn	P	S	Al	N	Cr	Cu	Mo	Ni
12CrMo9-10	0.10-0.15	≤ 0.30	0.30-0.80	≤ 0.015	≤ 0.010	0.010-0.040	0.012	2.00-2.50	0.25	0.90-1.10	≤ 0.30
10CrMo9-10	0.08-0.14	≤ 0.50	0.40-0.80	≤ 0.020	≤ 0.010	0.012	2.00-2.50	0.3	0.9-1.10	≤ 0.30	

表 5 主体材料机械性能

牌号	交货条件	厚度 /mm	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率 /%	冲击韧性 /KV..J(-20%)
12CrMo9-10	+QT	150-250	≥ 355	540-680	≥ 18	≥ 27
10CrMo9-10	+NT	≤ 16	≥ 310	180-630	≥ 18	待定

特性变化)；同时由于废锅水侧无加药装置长期运行，在设备内部集聚了腐蚀性物质。综合以上原因导致了换热管的腐蚀，以上分析也可说明为何工艺气出口侧（外侧下部）换热管损坏较多的原因。

堵漏解决方案

1. 因设备结构的特殊性，由卡萨利厂家提供了专业的堵漏方案，具体步骤如下（见图 10，图 11）

(1)将475 mm长INCONEL 600合金连接管与板的焊接部分用角磨机磨开，在连接管上焊接一个内螺纹接头，将倒锤与连接管固定，最后用倒锤将连接管取出；

(2) 加工专用堵头（见图 7），长度为 360 mm，材质为 INCONEL600 合金，插入原连接管位置处；

(3) 堵头在管板处采用胀接形式，胀管长度 80 mm，胀管厚度 3.55 mm，堵头前段穿过板，与法兰孔内金属短管内壁焊接；

(4) 出口侧换热管道，同样加工堵头（见图 12），长度为 280 mm，材质为 INCONEL 600 合金，堵头末端与管板胀接，胀管长度 80 mm，胀管厚度 3.55 mm，前段与管板堆焊层焊接。

(5) 在堵头的密封焊缝上做着色检查。

2. 需注意的焊接工艺

采用手工氩弧焊，焊丝型号，ERNiCr-3；焊接的起弧和收弧一定要在堵头上；由于板的影响，焊接前可将板上孔的尺寸适当扩大，以保证焊接质量；胀管器型号：P3Z-T, 电动胀管器，胀力 1.8 MPa。

3. 检验检测

堵漏结束后，采用了两种检测方法，进行设备查漏。

(1) 壳侧水压试验，按照出厂时水压试验的压力，壳侧水压打压至 4.5 MPa，检查管道是否有

泄漏，保压 30 min，检查是否有压降。

(2) 壳侧氨渗漏试验，壳侧先充氮气，至分析氧气含量 ≤ 0.5 %；引氨气 15 % (V) 进入设备壳侧，当压力达到 0.1 MPa 后，氮气充压至壳侧压力达到 0.6 MPa，将喷有酚酞溶液的试纸贴敷在管板上并保证覆盖全部列管口，壳侧保压 4 h（氨浓度过低可延长保压时间或提高氨浓度缩

(转 P44)

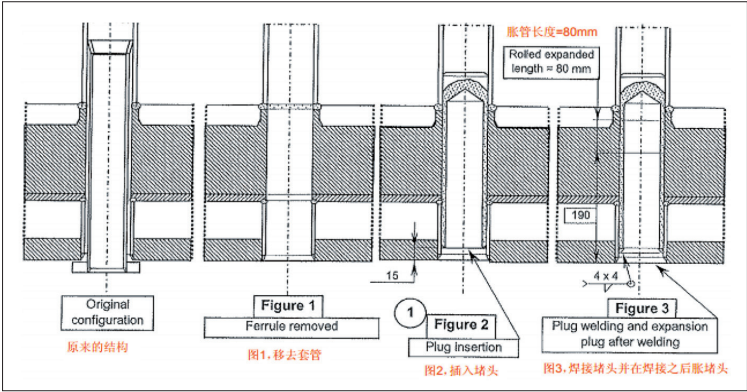


图 10 进气口侧管道堵漏图

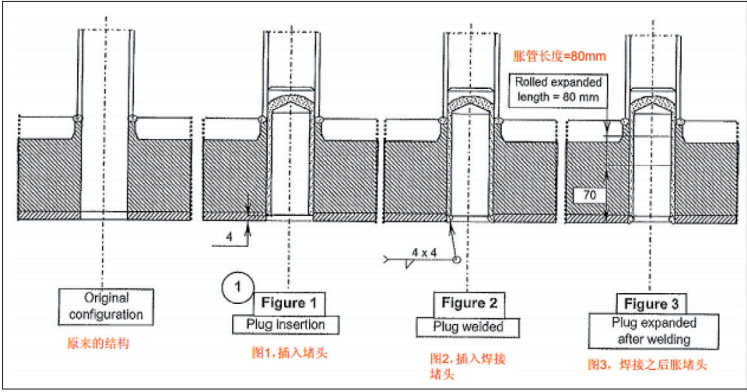


图 11 出气侧管道堵漏图

提高泵的运转稳定性非常重要，其中很重要的一点是提高轴的刚性。为此，西安泵阀总厂有限公司专门申请了一项专利—提高悬臂式离心泵转子刚性的结构（如图 4）。通过该专利的实施，轴的刚性至少可以提高 20% 以上。同时也解决了传统悬臂式离心泵由于轴系刚性差导致的轴封寿命短，甚至出现共振现象，严重时造成破坏性事故的问题。

如图 4 所示，API610 2010 版的资料性附录 K 中轴系的对挠性指数 ISF 用公式 (2) 定义为

$$I_{SF} = \frac{L_1^3}{D_1^4} + \frac{L_2 L_2^2}{D_2^4} \quad (2)$$

5. 定期检查轴承的运转情况是否良好，及时更换有损伤的轴承；合理的选择润滑剂和润滑方法，定期更换润滑剂改善轴承密封装置，避免因润滑不当造成轴承损坏，进而引发振动；轴承的冷却应该采用冷却油池而不是冷却轴承外环，冷却轴承外环会减小轴承的内间隙，导致轴承故障。

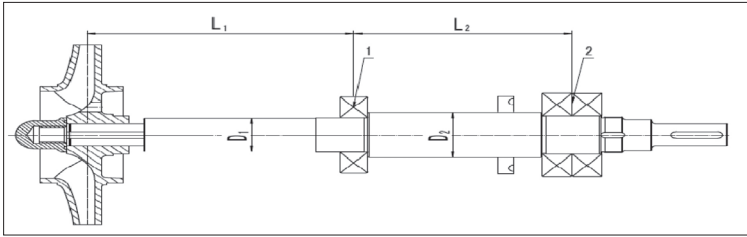


图 4 悬臂式离心泵转子刚性的结构

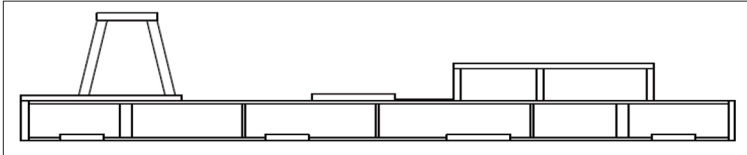


图 5 联合焊接底座的形式

6. 采用联合焊接底座的形式（如图 5）以提高底座的强度，底座的结构尺寸满足 API610 附录 D 中标准底座的尺寸。与 API 标准底座相比，机座基础由原来的泵座、底座分离式结构优化成整体式结构，避免因连接螺栓强度不足导致的振动。

7. 调整机组的同轴度，用千分尺测量联轴器的轴向和径向跳动。轴向最大允差控制在 0.05 mm 的范围内，径向最大允差控制在 0.1 mm 的范围内。此外，联轴器

端面之间应留有所要求的间隙以保证两轴在运转过程中做限定的轴向移动。

结束语

综上所述，造成泵振动的原因是多方面的，它与设备的选型、设计以及安装工艺等都有很大的关系。在很多情况下，其实可以通过提高对水力的设计、加工和安装质量，将机组振动控制在相关标准规定的范围之内，保证装置长期安全的运行。

(接 P41)

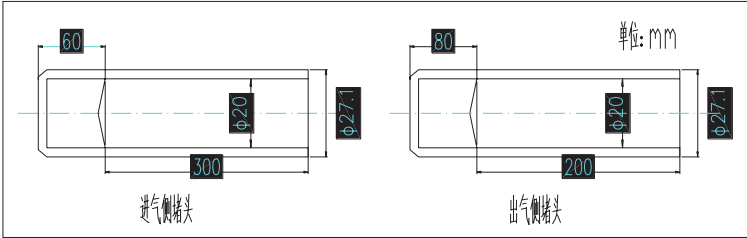


图 12 堵头尺寸图

短保压时间)，检测试纸是否有红色斑点出现并进行准确标记；当压力泄完后，用氮气对壳侧进行置换，分析壳侧氨含量 ≤ 30 ppm 后置换合格。

检修结束后，注意缓慢提温及升压，开车后经检测，漏点已全部消除，因减薄及管道较多，后期运行中，要控制负荷及压力，同时重新制作一台新设备。

总结

由于氨合成塔及废热锅炉在合成氨企业中属于关键核心设备对生产影响较大，因此熟悉和掌握该设备的工艺流程及结构特点尤为关键。该设备采用了多项先进技术，部分技术在国内 GB150—2011《压力容器》中尚未收录，但在实际运行中效果良好，保证了设备运行的安全性、稳定性，值得国内的设计和制造单位认真研究和消化吸收，以提高我国合成废热锅炉的设计和制造水平。