

# 洁净蒸汽发生器产生泄漏的原因分析及改进措施

李鸿超（斯派莎克工程（中国）有限公司，上海 201400）

**摘要：**介绍了某洁净蒸汽发生器在开机的过程中发生泄漏的情况，然后对可能产生泄漏的各种原因进行分析，法兰强度、刚度不足、垫片失效、应力松弛、螺栓应力不均匀，管箱上下部分温差过大而产生不一致的热胀冷缩，从而得出泄漏的原因，并提出了改进的措施。

**关键词：**洁净蒸汽发生器；泄漏；法兰；热胀冷缩

**Abstract:** This paper introduces the leakage of a CSG during the start-up process, and then analyzes various possible causes of leakage, such as insufficient flange strength and stiffness, gasket failure, stress relaxation, uneven bolt stress, and inconsistent thermal expansion and cold contraction caused by too large temperature difference between the upper and lower parts of the channel, so as to find out the causes of leakage and put forward improvement measures.

**Keywords:** CSG; Leakage; Flange; Heat expansion and cold contraction

CSG (clean steam generator) 洁净蒸汽发生器设计用于产生高品质的洁净蒸汽，满足洁净系统的工艺和设备要求。该系统以工业蒸汽为热源，通过精确的控制系统，加热纯水或去离子水，产生洁净蒸汽。应用于啤酒酿造业、医药业、生物化学、电子业和食品行业等需要洁净蒸汽用于工艺加热、加湿等设备中。

## 1 泄漏现象描述

某公司设计的洁净蒸汽发生器结构（图1）。工业蒸汽从管箱上部进入，加热壳程中的纯水，产生洁净蒸汽。工业蒸汽被纯水冷却，变成冷凝水，从管箱下部排出。该蒸汽发生器的设计参数详见表1。前端管箱公称直径 DN500，壳体公称直径 DN1000。蒸汽发生器在首次开机运行过程中发生泄漏，泄漏点位于前端管箱法兰与管板连接处的下半部分，水滴和蒸汽向下泄漏，但是运行一定时间后泄漏现象会自动消失。停机后再开机，该现象反复出现。对此问题，展开具体分析。

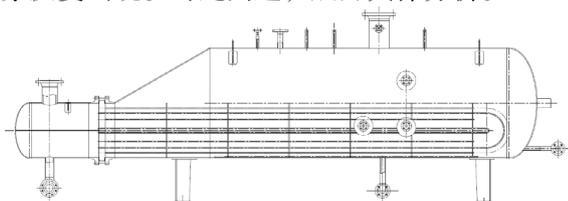


图1 洁净蒸汽发生器简图

表1 洁净蒸汽发生器设计及运行参数

	设计压力 /MPa	设计温度 /°C	工作压力 /MPa	工作温度 /°C	介质	主材
壳程	0.9	180	0.6	20/165	纯水、蒸汽	S31603
管程	1.0	184	0.9	180/60	蒸汽、冷凝水	S30408

## 2 泄漏产生的原因分析

### 2.1 法兰强度、刚度计算

法兰通过紧固螺栓压紧垫片实现密封，对压力管道法兰来说，由于考虑经常检修，所以螺栓往往比较大而疏，便于安装。为保证压力容器更佳的密封性能，螺栓的布置更适合细而密。法兰设计时，尽可能保证较小的

螺栓中心圆，使得法兰力矩中的各个分力具有较小的力臂，从而降低法兰应力，减小法兰尺寸，在保证安全的前提下，达到节省材料目的。本洁净蒸汽发生器，采用24个M20的螺栓，螺栓中心圆600mm。

流体在垫片处的泄漏以两种形式出现，渗透泄漏和界面泄漏，当法兰强度与刚度不足时，会发生界面泄漏。法兰强度不足，在压力载荷的作用下发生变形，可能会产生泄漏。而法兰刚度不足会使法兰产生过大翘曲变形（转角），使其对垫片的压紧不均匀，也会导致密封失效而产生泄漏，下面按GB/T150.3~150.4-2011《压力容器》对法兰强度和刚度进行计算。

轴向应力：

$$[\sigma]_H = \frac{fM_o}{\lambda\delta_f^2 D_i} = 143.25 \text{MPa} < \min[1.5[\sigma]_f^t, 2.5[\sigma]_f^c] = 147.4 \text{MPa}$$

径向应力：

$$[\sigma]_R = \frac{1.33\delta_f e + 1}{\lambda\delta_f^2 D_i} M_o = 25.62 \text{MPa} < [\sigma]_f^t = 98.2 \text{MPa}$$

切向应力：

$$[\sigma]_T = \frac{M_o Y}{\delta_f^2 D_i} - Z\sigma_R = 35.68 \text{MPa} < [\sigma]_f^t = 98.2 \text{MPa}$$

综合应力：

$$\max[0.5([\sigma]_H + [\sigma]_R), 0.5([\sigma]_H + [\sigma]_T)] = 89.47 \text{MPa} < [\sigma]_f^t = 98.2 \text{MPa}$$

刚度系数：

$$J = \frac{52.14V_f M_o}{\lambda E \delta_o^2 K_i h_o} = 0.539 \leq 1$$

通过对法兰的应力计算，判定结果，法兰强度和刚度是合格的。

### 2.2 垫片失效

法兰密封的渗透泄漏，主要是流体通过垫片材料本体毛细管的泄漏，除与介质压力、温度、粘度、分子结构等流体状态性质有关外，主要与垫片的结构和材质有关。由于洁净蒸汽发生器所产生的洁净蒸汽需要满足FDA要求，石墨缠绕垫无法使用，一次侧（蒸汽侧）和二次侧（纯水侧）均采用3mm厚的RPTFE垫片。这种

垫片具有优良的压缩、回弹性和密封性，且能耐 200℃ 的高温，同时观察现场实际的泄漏情况，排除渗透泄漏的可能性。法兰在加工时，表面会产生微小的不平整处，通过预紧螺栓，压紧垫片，使垫片产生压缩变形，将法兰表面的凹凸不平处填满，达到初始密封条件。在这个过程中垫片会承受最大螺栓载荷的作用，可能会使垫片产生压缩塑性变形，丧失回弹的能力，当法兰在内压力的作用下法兰密封面彼此分离时，垫片不能回弹，就会产生泄漏，所以垫片需要有足够的宽度使其能承受满足初始密封的最大螺栓载荷。本洁净蒸汽发生器垫片单位面积的预紧力

$$W_{mi} = \left( \frac{A_m + A_s}{2} [\sigma]_b \right) / \left( \frac{3.14 (D_{外}^2 - D_{内}^2)}{4} \right) = 15.43 \text{MPa} < 4y = 82.8 \text{MPa}$$

所以垫片宽度满足要求。

### 2.3 应力松弛

应力松弛是指构件总变形（弹性变形和塑性变形）保持不变，蠕变使塑性变形不断增加，弹性变形相应减少，而应力随时间缓慢降低的现象。往往会带来不利影响，如高压蒸汽管道中，法兰紧固螺栓的锁紧力可能随时间降低，故每隔一段时间需拧紧一次，以防泄漏产生。应力松弛是材料在高温下随时间发生的非弹性变形的积累过程。本洁净蒸汽发生器开机过程中即发生泄漏，所以排除应力松弛产生泄漏的可能性。

### 2.4 螺栓应力不均匀

紧固流程不正确会使某些螺栓松动，而其他一些螺栓则过度拧紧，从而导致垫圈压碎。这会导致在工作过程中泄漏，特别是在高温工作过程中当重负荷的螺栓松动时。本洁净蒸汽发生器螺栓紧固时采用对称，交叉的顺序的旋紧，并且进行多次紧固。保证每一个螺栓均匀受力。从而排除由于螺栓应力不均匀而导致泄漏。

### 2.5 热胀冷缩

洁净蒸汽发生器运行有开机迅速的特点，在开机的初期，管箱上部分为蒸汽，壳体介质为较冷的纯水，换热效率比较高，管箱下半部分为蒸汽冷凝以后形成的冷凝水，管箱上半部分与下半部分会存在超过 100℃ 的温度差，管箱上半部分温度高，管箱法兰受热出现热膨胀对垫片产生挤压现象，而管箱下半部分由于温度较低，会出现向两侧张开的现象，从而存在下半部分产生泄漏的可能性。由于常规的计算方法无法对此进行计算，现采用 ansys 软件对其进行模拟。计算模型包括前端管箱，壳体，管板以及鞍座。为简化计算，忽略换热管和设备开孔。由于模型及载荷对称，因此分析模型取一半。进行稳态传热分析以及应力分析。梁单元连接对应于垫片直径的作用面更符合实际，螺栓采用线体模型的梁单元建模进行螺栓联接组件分析。每个螺栓施加 23633N 的预紧力，管箱法兰与管程侧管板、壳体法兰与壳程侧管板之间进行摩擦接触分析，摩擦系数 0.2。六面体网格可以减少单元数量，加快求解收敛；单元和流体流动方向对齐，可提高分析精度，减少数值错误，网格划分

采用六面体单元。壳体单元格大小 40mm，管箱单元格大小 20mm，管箱法兰、壳体法兰以及管板单元格大小 10mm。共有节点数 116484，单元数 28142，网格平均质量 0.59，有限元模型见图 2。

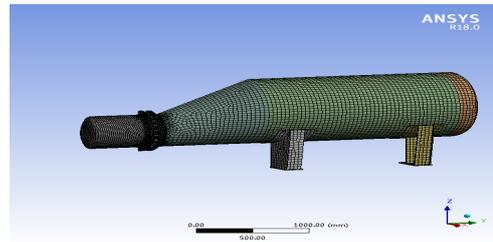


图 2 洁净蒸汽发生器有限元模型

壳体内表面，壳体内表面以及管板壳程侧内表面温度设置为 60℃，管箱上半部分内表面，管板管程侧上半部分内表面温度设置为 165℃，管板管程侧下半部分内表面温度设置为 60℃。然后对洁净蒸汽发生器进行压力与热应力的耦合数值模拟。根据 Contact tool-Pressure，显示管箱法兰与管板接触面的接触应力，上部分接触应力介于 15MPa~90MPa 之间，下部分接触应力介于 0~15MPa 之间（图 3）。根据分析结果，表示管箱法兰下部分与管板接触处会处于分离状态。

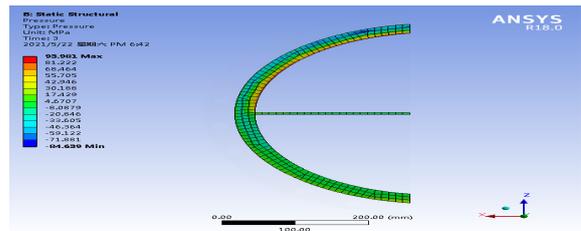


图 3 管箱法兰与管板接触面的接触应力

## 3 结论及改进措施

通过上述分析，说明洁净蒸汽发生器泄漏产生的主要原因可能是开机过程中管箱上半部分和下半部分温差过大，而产生不一样的热胀冷缩所导致。可以通过以下几个方法进行改进：管程侧壳程侧采用回弹性能更好的洁净垫片。初始密封时给予一个较大的预紧力，将垫片压缩，当管箱和管板分离时，较好的回弹性能的垫片可以弥补分离所产生的间隙；壳程侧采用 RPTFE 垫片，管程侧采用石墨缠绕垫，分别计算管程侧和壳程侧法兰在预紧和操作状态下受力；改变螺栓紧固的方法，原有的紧固方法是对角分步进行紧固，可以修改为先紧固上半部分的螺栓，再紧固下半部分的螺栓；紧固件由单螺母加平垫片更改为双螺母加弹簧垫圈；优化管箱结构，前段管箱法兰和管箱筒体采用焊接的结构，前段管箱封头更改为设备法兰和法兰盖的型式，垫片采用缠绕垫；开机过程中，采取缓慢开机的方式，并且对壳程的纯水进行预热，从而可以减缓管箱上下部分的温差。

### 参考文献：

- [1] 王定标, 杨国新, 伊华杰. 非标法兰连接系统结构设计及应力分析 [J]. 郑州大学学报, 2007(2):60-63.
- [2] 朱彦伟 换热器管板两侧成对法兰的强度设计 [J]. 石油和化工设备, 2013(16).