

# 高温高压阀门阀体的可靠性分析

谢 川

(西南化工研究设计院有限公司双流分公司, 四川 成都 610200)

**摘 要** 高温高压阀门阀体应用广泛, 确保阀门阀体具有较高的可靠性, 可使阀门在实际当中发挥出较大的作用, 从而为相关工作的开展打下坚实基础。所以, 在高温高压阀门阀体使用时, 应注重阀体可靠性的分析。基于此, 本文以故障模式、影响和危害性分析 (FMECA) 法为例, 对高温高压阀门阀体的可靠性分析进行了研究, 以期为更好地应用高温高压阀门提供有益参考。

**关键词** 高温高压阀门; 阀体; 可靠性; FMECA 分析

**中图分类号:** TH13

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2097-3365(2023)11-0109-03

高温高压阀门是现代工业领域较为常见的元件之一, 直接关系到工业生产的效率与质量, 然而需要注意的是, 阀门应用环境较为恶劣, 温度与压力较高, 很容易使阀门出现损伤, 影响工业生产活动的顺利进行。为了及时发现高压阀门出现的问题, 相关机构通常采用故障模式、影响和危害性分析 (FMECA) 的方式对阀门检测, 并根据检测结果, 按照一定顺序对危害性进行排序, 并以此为基础, 全面对阀体失效部位进行可靠性分析, 对阀门设计与使用具有重要意义。

## 1 高温高压阀门阀体的 FMECA 分析流程

1. 根据阀门规格尺寸特点, 结合相关规定要求, 选择最佳的分析范围, 如阀门系统的组成、复杂程度等, 并将阀门系统各组成部分分级与分类。

2. 评估故障层次, 确定各模块的复杂程度, 分析各模块的复杂性, 并以此为基础, 合理地模块复杂性进行等级划分。

3. 按照 FMECA 原理进行阀门故障模式影响分析, 共分为两部分, 一个是 FMEA 分析, 主要有故障模式、引发原因、对阀门造成的影响、具体检查方式与最终的解决方案等内容; 另一个是 CA 分析, 即危害性评估, 判断故障的严重水平, 并分析出现各种故障的概率<sup>[1]</sup>。

4. 根据 RMECA 分析结果构建产品可靠性图, 利用表格的形式直观展示出故障类型, 同时分析该故障可能造成的影响等。

## 2 基于 FMECA 的高温高压阀门阀体分析

本研究选择的是以球阀与锥阀为主的双密封凸轮传动结构阀门, 为了方便研究, 将其简化成如图 1 所示。阀门反复操作过程中, 在介质压力长期作用下,

很容易导致球阀出现变形等问题, 影响阀门的密闭性, 进而引发介质泄漏问题。同时, 锥阀关闭操作时, 由于锥阀与阀座可频繁碰撞, 也会导致锥阀损伤, 从而降低整个阀门的密闭性。

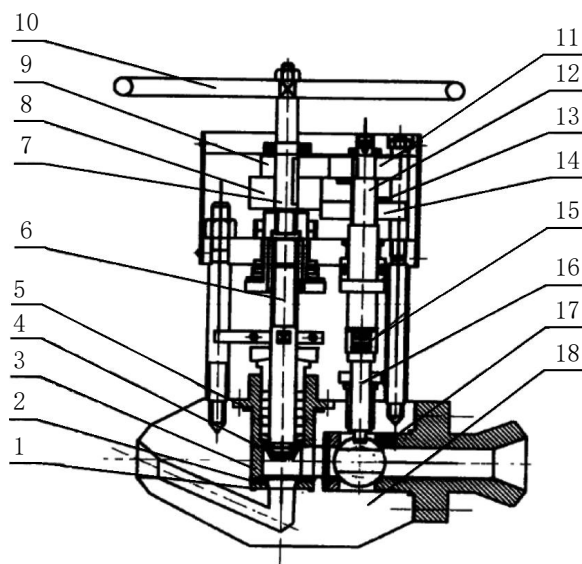


图 1 高温高压阀门结构简图

(注: 1、5 表示密封垫; 2 表示阀座; 3 表示笼套; 4 表示阀芯; 6 表示上截止阀杆; 7 表示下截止阀杆; 8 表示主动齿轮; 9 表示主动凸轮; 10 表示首轮; 11 表示被动凸轮; 12 表示上球阀杆; 13 表示离合器; 14 表示被动齿轮; 15 表示转接套; 16 表示下球阀杆; 17 表示球体; 18 表示阀体。)

### 2.1 系统任务

该阀门用于气压系统的调节, 内部介质是高压气体, 系统由 #25 钢制成, 工作通道直径是 30mm, 工作

表1 阀门 FMECA 分析表

序号	部件	故障模式	故障原因	故障影响			严酷度	优化措施	危害性
				局部影响	高一层次影响	最终影响			
01	阀体	阀体裂开	部件疲劳、介质冲击	结构内损	系统泄露	巨大经济损失	I	采用抗性更高的材料	36
		泄露	密封圈老化, 垫片不匹配	闭合不严, 内漏	阀门失效	巨大经济损失	III	定期更换	21
		连接脱落	拧紧力矩不足	介质外漏	阀门失效	巨大经济损失	III	采用高强度的螺栓螺母	14
02	阀杆	断裂、磨损	部件强度、硬度低	启闭模块不能动作	阀门失效	系统瘫痪	III	采用强度大的部件	21
03	笼套	堵塞、磨损	内部颗粒物多且摩擦大	启闭模块不能动作	阀门失效	系统故障	III	及时更换	14
04	密封垫	堵塞、磨损	介质腐蚀性且摩擦大	密封面破坏	管道内漏	闭合不严	II	定期更换	32

压力是 17MPa, 以确保其具有 10000 开关操作的寿命。

## 2.2 FMECA 分析表的构建

高压阀门运行时, 故障一般出现在承压部件处, 因而本文研究中可将非承载部件忽略。通过对该阀门故障失效影响的进一步分析, 可构建出如表 1 所示的 FMECA 分析表。

## 2.3 FMECA 分析总结

对高温高压阀门研究与分析时, 可将其看作是一个简单的系统, 主要包括阀体、阀杆与笼套等部分构成。通过 FMECA 分析可知, 高温高压阀门运行时, 失效故障通常出现在阀体、笼套、阀杆及密封垫位置, 因而在稳定性分析时, 应将这 4 个部位作为重点, 全面分析故障模式, 判断引发故障的基本原因, 将故障影响分级, 从而制定出相应的解决方案, 以此确保高压阀门能够安全、稳定地运行, 为生产工作的开展打下良好基础<sup>[2]</sup>。在上述 FMECA 表当中, 因为添加了危害性分析使得其可以对阀门失效模式的各个不同影响展开全面分析。对于上述几种故障模式来说, 阀体泄漏是最为常见且危害性最大的一种危害, 这是因为阀门工作时, 需要频繁地进行打开与关闭操作, 加之内部环境较为恶劣, 压力较高, 介质具有较强的腐蚀性, 使得阀体表面磨损严重, 从而影响阀体的密封性, 导致整个阀门出现内部介质泄露的问题, 严重情况下, 甚至会导致阀体裂开<sup>[3]</sup>。所以, 在阀门日常运维管理

过程中, 应以表 1 中的分析结果, 在合理的时间段内, 采取科学、合理的方式对阀门进行修复与更换, 以确保整个阀门系统可以安全、稳定运行<sup>[4]</sup>。本文研究当中, 仅选择了故障模式最多的阀体作为研究对象, 对阀门运行可靠性进行了分析。

## 3 阀门阀体的可靠度分析计算

### 3.1 基于应力-强度模型的可靠度计算

应力-强度模型的主要原理为: 先检测机械零件的极限应力, 并以此为基础, 与预设值进行对比, 判断实际应力值是否高于预设应力值, 若高于预设应力值, 则表示零件失效, 反之则表示零件可以正常运行。但需要注意的是, 高温高压阀门阀体实际运行时, 周边环境较为恶劣, 存在诸多影响因素, 导致阀体极限应力并不固定, 而是在不断发生改变, 通过检测可以发现, 阀体极限应力变化存在正态分布特点<sup>[5]</sup>。随着阀门运行时间的逐渐提升, 阀体的衰弱曲线单调递减。而应力分布与强度变化则是随机性的, 使得干涉区(阴影部分)出现明显改变。

以干涉理论为基础, 可将可靠性解释为强度高于应力的概率, 即:

$$R(t)=P(\delta>S)=P(\delta-S>0)=P(\delta/S>1) \quad (1)$$

只要符合该公式, 阀门阀体就不会出现失效问题。处于  $t_0$  时间点处, 两分布之间存在一定的安全裕度; 随着运行时间的逐渐增加, 阀体强度不断下降, 当达

到  $t_1$  时间点后, 两分布出现干涉, 使得阀体失效。根据这一原理, 即可推导出阀体的可靠性计算公式, 具体为:

$$R = P(\delta > s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(s) \left[ \int_{-\infty}^{\infty} g(\delta) d\delta \right] ds = \int_{-\infty}^{\infty} g(\delta) \left[ \int_{-\infty}^{\infty} f(s) ds \right] d\delta \quad (2)$$

其中,  $s$  表示阀体的工作应力;  $\delta$  表示阀体材料强度;  $f(s)$  表示应力分布概率密度函数;  $g(\delta)$  表示强度分布的概率密度函数。

若应力与强度均符合正态分布特点, 则可将公式 (2) 简化为:

$$R = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Z_R} \exp\left[-\frac{Z^2}{2}\right] dZ = \varphi(Z_R) \quad (3)$$

其中,  $Z_R$  表示联结系数, 又称之为可靠性系数。将上述公式进一步转换后, 即可得到可靠性系数值, 具体为:

$$Z_R = -\frac{\mu_s - \mu_\delta}{\sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_\delta^2}} \quad (4)$$

其中,  $\mu_s$  表示应力的平均值;  $\mu_\delta$  表示应力的标准差;  $\sigma_s$  表示强度的平均值,  $\sigma_\delta$  表示强度的标准差。

### 3.2 阀门阀体强度可靠性计算实例

为了进一步验证上述可靠性计算方法的实际应用效果, 本文选择由 25# 锻钢制成的高温高压阀门阀体作为研究对象进行了试验。通过相关资料查询可知, 该材料的屈服强度是 280MPa, 通过计算, 可推导出屈服强度平均值:  $\mu_s = 1.1 \times 280 = 308\text{MPa}$ 。材料变异系数  $V_s$  是 0.07, 主要利用屈服强度标准差与平均值做比而得, 即  $V_s = \sigma_s / \mu_s$ , 将该公式转换后可推导出该阀体材料服务强度的标准差, 具体为:  $\sigma_s = V_s \times \mu_s = 21.56\text{ (MPa)}$ 。

阀体的主要作用是管道流通, 为了降低研究难度, 本文将假设为材质均匀, 壁厚相同的受内压容器, 阀体直径偏差  $\Delta d$  较小, 处于  $0.01d$  范围内。针对本文研究的阀门阀体来说, 工作通道  $d$  设置成 30mm。由此, 按照尺寸偏差公式:  $\Delta d = 0.01d$  可以推算出阀体的尺寸偏差值, 即 0.3mm, 按照  $3\sigma$  原则, 可得到  $\Delta d = 3\sigma_d$ , 由此可推导出:  $\sigma_d = 0.1\text{ (mm)}$ , 在此基础上, 可计算出阀体的变异系数:  $V \approx 0.0033$ 。

通过该阀门说明书的查询可知, 阀门内部工作介质压力为 17MPa, 正常运行情况下, 受到诸多因素的影响, 使得内部介质压力出现一定的变化, 本文将引发该变化的变异系数  $V_p$  设置成 0.05, 由此可推导出在介质压力作用下阀体的强度标准差, 即:  $\sigma_p = V_p \times \mu_p = 0.85\text{ (MPa)}$ 。

通过资料查询可知, 该阀体的厚度偏差  $V_t$  约为 0.01, 由此可以推导阀体管壁的平均应力, 具体为:  $\mu_t = (55 - 30) / 2 = 12.5\text{mm}$ , 在此基础上, 可计算出阀体管壁的强度标准差, 即:  $\sigma_t = V_t \times \mu_t = 0.125\text{ (MPa)}$ 。

以上述计算结果为依据, 结合上述的变异系数法, 能够计算出阀体盈利的总体变异系数  $V_s$ , 具体为:

$$V_s = (V_p^2 + V_d^2 + V_t^2)^{0.5} \quad (5)$$

通过该公式的计算, 可得到  $V_s \approx 0.0511$ 。

壁厚进行计算时, 采用的公式为:

$$t \leq \frac{pd}{2[s]\phi - p} \quad (6)$$

通过该公式的转换后可以得到:  $[s] \geq [p(d+t)] / 2t\phi$ 。其中,  $t$  表示阀体工作部位的壁厚;  $d$  表示阀体的内部直径;  $p$  表示管道所需要承受压力水平;  $\phi$  表示焊接系数, 即管道焊接区域的损伤程度, 焊接区域损伤越严重,  $\phi$  值越小, 当管道无损伤时,  $\phi$  设置为 1。

之后, 利用上述公式与数据进行计算, 可以得到平均应力值  $\mu_s = 28.9\text{ (MPa)}$ , 平均强度值  $\sigma_s = 1.476\text{ (MPa)}$ 。最后, 按照公式 (4) 计算出可靠性系数  $Z_R = 12.915$ 。通过正常分布表的查询可知, 当 25# 锻钢可靠性技术在 12.915 左右时, 阀体的可靠度为 1, 符合规定要求。

### 4 总结

综上所述, 高温高压阀门作为现代工业领域较为常见的元件, 应采取 FMECA 的方式对各部件故障进行全面分析, 确定各部门故障模式、原因、影响及危害度等, 并以此为基础, 通过应力-强度模型的方式评价各模块的稳定性, 以此准确了解各模块的具体情况, 为各模块运维管理措施的制定提供支持, 有利于阀门的安全、稳定运行。

### 参考文献:

- [1] 孔祥夷, 刘浩燃. 基于可靠性分析的超低温阀门寿命评估研究 [J]. 中国特种设备安全, 2022, 38(10): 32-36.
- [2] 辜志宏. 井口装置阀门的可靠性试验研究及应用 [J]. 内蒙古石油化工, 2022, 48(04): 17-19, 93.
- [3] 卢毅, 郑建明, 赵晨. 低温阀门无失效数据环节可靠性建模方法研究 [J]. 机械科学与技术, 2023, 07(18): 1-11.
- [4] 丁菊, 符明海, 刘书宏. 一种高温高压阀门楔形密封垫改进结构 [J]. 西部特种设备, 2020, 03(05): 21-24.
- [5] 孙丰位, 贺乐全, 陈群, 等. 高温高压金属密封球阀壁厚阀体应力分析 [J]. 阀门, 2018(02): 11-13, 38.