

大型芳烃装置吸附分离程控阀研制

梁连金

(上海开维喜阀门有限公司 上海 201414)

摘要: 介绍了大型芳烃装置吸附分离程控阀的研制难点、研制主要参数和结构、关键零件计算和有限元分析、气动执行机构的选择、冷态和热态试验。研制的产品通过国产化样机评定,具备开展装置实际工业化考核条件。

关键词: 芳烃装置;程控阀;气动

1 概述

吸附分离单元是大型芳烃装置的核心装置,其主要作用是采用特定的吸附剂,利用模拟移动床工艺,对芳烃的对二甲苯进行吸附,再用解析剂将对二甲苯从吸附剂上分离下来。程控阀是吸附分离单元的关键设备,其作用是根据顺控程序,按照既定逻辑程序进行开关,实现模拟移动床吸附和分离。根据已国产化的大型芳烃装置工艺包要求,在吸附塔床解吸剂线、抽出液线、进料线、抽余液线、解吸剂冲洗线、抽出液冲洗线、进料冲洗线的程控阀同时参与控制,目前阀门最大规格为NPS12,压力等级为Class 300。每台程控阀由阀门本体、气动执行机构和气动附件组成,任何一个零部件的故障都会影响吸附分离单元正常操作。鉴于程控阀的苛刻工况要求,其研制难点为:

(1) 动作频繁,阀门动作16000次/年,每次包括:约75秒开和30分钟关;

(2) 密封等级高,阀座双向密封满足ANSI/FCI 70-2 Class VI级,壳体和填料外泄漏满足ISO 15848-2 B级要求;

(3) 动作时间快且要求重复精度高,全行程时间小于2秒,时间可调范围:1.5~3秒,重复精度:±0.1秒;

(4) 无故障率99.999%;

(5) 气缸及附件的使用寿命和可靠性要求高,执行机构正常使用寿命不低于30万次等。

2 研制主要参数及阀门结构

2.1 研制主要参数

阀门安装位置:集管解吸剂线;阀门规格:NPS10;

压力等级:Class 300;介质名称:对二甲苯(液);

设计压力:3.52MPa;入口压力:0.9~1.34MPa;

最大关闭差压:2.62/-1.65MPa;设计温度:200℃;

操作温度:177℃;阀体材质:ASTM A105;

连接型式:法兰连接;球体及密封面材料:

ASTM A182 F51+表面硬化;

阀座及密封面材料:ASTM A182 F51+表面硬化;泄漏等级:双向ANSI/FCI 70-2 Class VI级;

操作方式:气动,双作用;全行程时间:<2s(1.5~3s可调),重复精度±0.1s。

2.2 阀门结构

阀门结构如图1所示,其主要结构特点为:

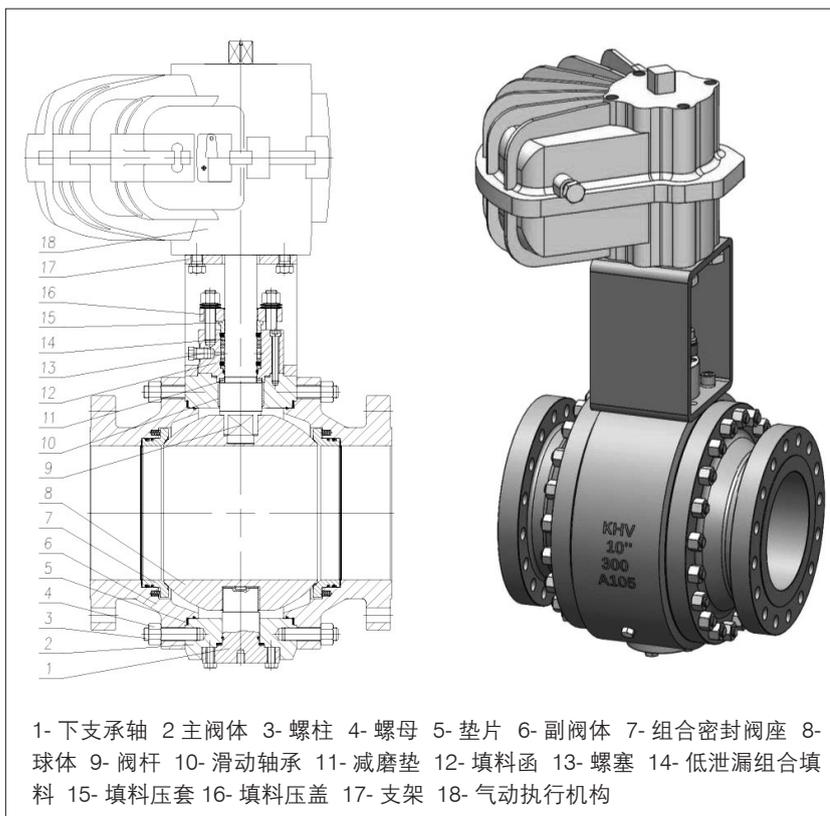
(1) 阀门采用三段式、上下枢轴固定球和双向密封结构设计;

(2) 主、副阀体采用锻件,可确保压力边界的完整性;

(3) 阀座密封面上设置带有锋利刀口的刮削式结构实现自清洁功能,在阀门开关过程中刮削掉球面粘接物;

(4) 球体和阀座密封面均喷涂硬质合金,通过高精度磨削后可轻松实现ANSI/FCI 70-2 Class VI级密封要求;

(5) 阀杆与轴肩一体式设计,实现防飞出功能,阀杆



1- 下支轴承 2- 主阀体 3- 螺柱 4- 螺母 5- 垫片 6- 副阀体 7- 组合密封阀座 8- 球体 9- 阀杆 10- 滑动轴承 11- 减磨垫 12- 填料函 13- 螺塞 14- 低泄漏组合填料 15- 填料压套 16- 填料压盖 17- 支架 18- 气动执行机构

图1 阀门结构

不会因内压的作用而飞出，可保证设备和人员的安全。

(6) 采用“活载”低泄漏组合填料设计，满足 ISO 15848-2 B 级要求；

(7) 阀杆轴肩处设置双减磨垫，增加一对摩擦副，有效解决了单减磨垫容易出现阀杆卡死问题，提高阀门的安全性和可靠性。

3 关键零件计算和有限元分析

3.1 主阀体最小壁厚计算和有限元分析

3.1.1 最小壁厚计算

根据 ASME B16.34 标准的要求，计算主阀体的最小壁厚。

$$t_{主} = 0.033d_{主} + 4.40 = 0.033 \times 400 + 4.40 = 17.6\text{mm}.$$

考虑到安全性，主阀体壁厚在扣除螺柱直径后，实际壁厚取 36mm。

3.1.2 有限元分析

由于主阀体上下中间开孔，上方平面加工连接填料函和支架的螺纹孔，下平面加工连接下支承轴的螺纹孔，以及两侧加工连接副阀体的螺纹孔，结构非常复杂且不连续性，非常容易引起应力集中。故按照 ASME BPVC. VIII-2 有限元法对主阀体的强度进行分析。分析时，施加载荷分别为：(1) 阀体内腔施加内压：7.665 MPa (38℃时 ASTM A105 材料压力额定值的 1.5 倍)；(2) 与副阀体连接螺栓预紧力：1086825 N；(3) 与填料函连接螺栓预紧力：72806 N；(4) 与支架连接螺栓预紧力：272344 N；(5) 与下支承轴连接螺栓预紧力：48738 N。

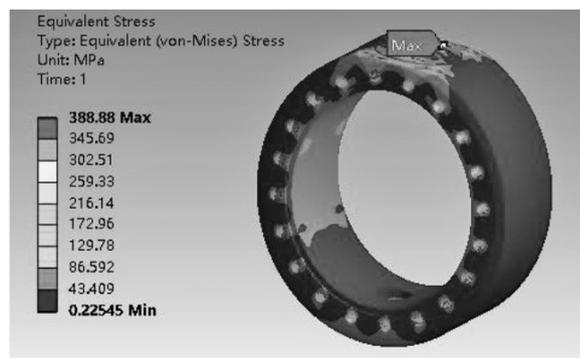


图 2 主阀体等效应力分布云图

主阀体等效应力分布云图如图 2 所示，最大等效应力为 388.88MPa，位于与填料函连接的螺纹孔处。

主阀体的最大等效应力值超出了主阀体 ASTM A105 材料的屈服极限 250MPa，应进行应力强度评定，以保证主阀体的安全性。主阀体最大应力处等效应力线性化云图如图 3 所示。

对主阀体最大应力处进行强度评定，评定结果为：

一次局部薄膜应力 PL 为 109.66MPa，小于 250MPa(1.5Sm)，评定合格；

一次局部薄膜应力 PL 加一次弯曲应力 Pb 和二次弯曲应力 Q 为 303.09MPa，小于 500MPa(3Sm)，评定合格；

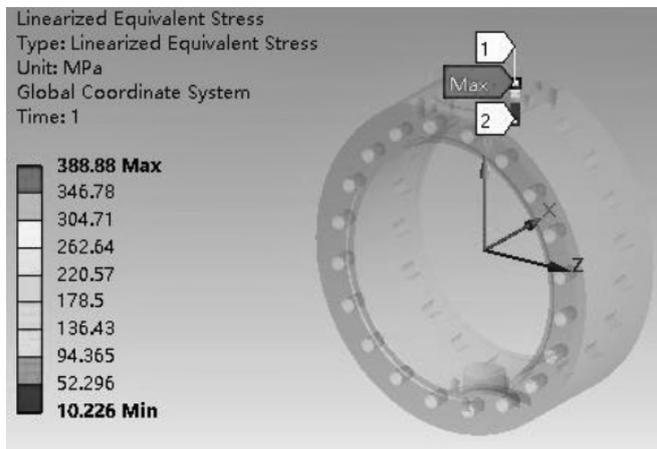


图 3 主阀体最大应力处等效应力线性化云图

评定结果表明主阀体结构安全。

3.2 副阀体最小壁厚计算和有限元分析

3.2.1 最小壁厚计算

根据 ASME B16.34 标准的要求，计算副阀体的最小壁厚。

$$t_{副} = 0.033d_{副} + 4.40 = 0.033 \times 254 + 4.40 = 12.8\text{mm}.$$

考虑到安全性，实际壁厚取 19mm。

3.2.2 有限元分析

由于副阀体加工阀座孔和多个弹簧孔，与主阀体连接的螺栓孔，以及与管道连接的螺栓孔，结构较复杂且不连续性，也容易引起应力集中。也按照 ASME BPVC. VIII-2 有限元法对副阀体的强度进行分析。分析时，施加载荷分别为：(1) 副阀体内腔施加内压：7.665 MPa；(2) 与主阀体连接的螺栓预紧力：1086825 N；(3) 与管道连接螺栓预紧力：630864 N。

副阀体等效应力分布云图如图 4 所示，最大等效应力为 201.11MPa，位于弹簧孔。副阀体最大等效应力未超出副阀体 ASTM A105 材料的屈服极限 250MPa，判



图 4 副阀体等效应力分布云图



图 5 球体和阀座等效应力分布云图
定副阀体结构安全。

3.3 球体和阀座有限元分析

球体和阀座组成了程控阀的密封副，作为一个整体进行有限元分析。球体与阀座设置摩擦接触，摩擦系数为 0.2。球体和阀座与介质接触表面施加 1.1 倍最大关闭压差 2.882MPa；在球体与阀杆接触传递扭矩的内四方形面施加 1.1 倍最大关闭压差下的计算扭矩 2525 N.m。球体和阀座等效应力分布云图如图 5 所示，最大等效应力为 183.24MPa，位于球体与阀杆接触传递扭矩的内四方形。球体和阀座最大等效应力未超出球体和阀座 ASTM A182 F51 材料的屈服极限 450MPa，判定球体和阀座结构安全。

3.4 阀杆有限元分析

在阀杆下方四方形施加 1.1 倍最大关闭压差下的计算扭矩 2525 N.m，上方四方形施加反向扭矩 2525 N.m。阀杆等效应力分布云图如图 6 所示，最大等效应力为 348.28MPa，位于上方四方形与外圆的连接处。阀杆最大等效应力远小于阀杆 ASTM A564 630 材料的屈服极限 1000MPa 且位于压力边界外，判定阀杆结构安全。

4 气动执行机构的选择

在最大关闭压差 2.62MPa 下，程控阀的计算扭矩为 2354N.m，安全系数取 1.5。因此，气动执行机构选型扭矩为 3531N.m。为了满足 30 万次使用寿命和可靠性要求，选用英国 KINETROL 双作用扇

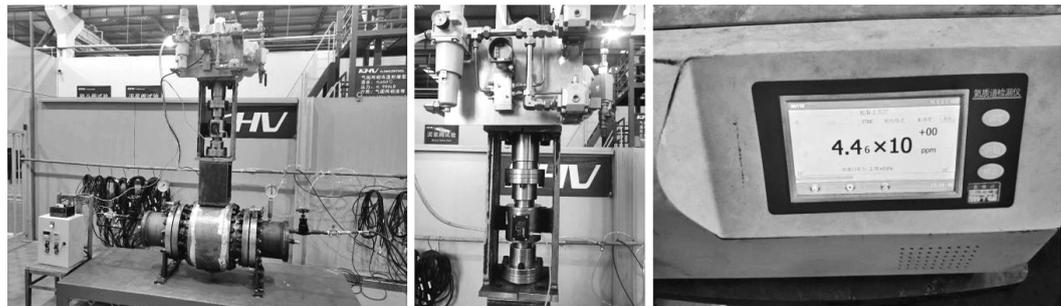


图 7 冷态试验



图 6 阀杆等效应力分布云图

形气动执行机构，型号为 184-100，在 0.4MPa 的气源压力下，其输出扭矩 3750N.m，完全可满足程控阀的选型扭矩要求。

5 冷态和热态试验

5.1 冷态试验

根据技术规格书的要求，程控阀冷态动作试验按照 10000 次 / 开关执行，动作频次按照不多于 3 次 / 分钟设置，并在开始、5000 次、10000 次对阀门按照 API 598 或 ANSI/FCI70-2 VI 级和 ISO 15848-2 B 级要求进行逸散性测试，测试阀门开关力矩。阀门冷态试验如图 7 所示，扭矩测试采用扭矩传感器，逸散性测试采用氮质谱检漏仪。

程控阀冷态试验结果如表 1 所示。

5.2 热态试验

表 1 冷态试验结果

测试阶段	泄漏量 ml/Min		开关力矩 N.m		开关时间		填料处泄漏 ppmv		壳体连接处泄漏 ppmv	
	标准值	试验值	计算值	测试值	标准值	试验值	标准值	试验值	标准值	试验值
试验前 A 端	ANSI/ FCI70 -2:11.1	0	2354	1759	< 2s ，重复精度 ±0.1s	1.39	≤ 100	4.2	≤ 50	4.5
试验前 B 端		0		1763		1.40				
5000 次后 A 端		0		1776		1.42				
5000 次后 B 端		0		1798		1.40				
10000 次后 A 端		0		1780		1.45				
10000 次后 B 端		0		1773		1.37				

表 2 热态试验结果

测试阶段	泄漏量 ml/Min		开关力矩 N.m		开关时间		填料处泄漏 ppmv		壳体连接处泄漏 ppmv	
	标准值	试验值	计算值	测试值	标准值	试验值	标准值	试验值	标准值	试验值
500 次后 A 端	ANSI/ FCI70 -2:11.1	0	2354	2173	重复精度 ±0.1s	1.38	≤ 100	11	≤ 50	6.3
500 次后 B 端		0		2192		1.39				
1000 次后 A 端		0		2147		1.41				
1000 次后 B 端		0		2173		1.42				



图 8 热态试验

根据技术规格书的要求，程控阀热态动作试验在模拟工艺实际运行温度 177℃、最大关闭压差 2.62MPa 下进行，动作试验次数 1000 次 / 开关执行，动作频次按照不多于 3 次 / 分钟设置，并在开始、500 次、1000 次对阀门按照 API 598 或 ANSI/FCI70-2 VI 级和 ISO 15848-2 B 级要求进行逸散性测试，测试阀门开关力矩。阀门热态试验如图 8 所示。

程控阀热态试验结果如表 2 所示。

5.3 试验结果分析

根据表 1 和表 2 试验结果，可得出：

(1) 程控阀冷态和热态试验泄漏量均为“零”泄漏，高于 API 598 或 ANSI/FCI70-2 VI 级标准要求。

(2) 热态试验开关力矩最大值为 2192N.m，冷态试验开关力矩最小值为 1759N.m，热态试验开关力矩较冷态试验开关力矩增加 24.6%。程控阀在冷态试验和热态试验过程中所测得的开关力矩均小于计算值，气动执行机构具有较大安全裕量。

(3) 程控阀在冷态试验和热态试验过程中的开关时间均小于 2s，开关最长时间为 1.45s，最小时间为 1.37s，两

者之差为 0.08s，满足 ±0.1s 的精度要求。

(4) 程控阀的壳体连接处和填料的逸散性泄漏均小于 ISO 15848-2 B 级标准要求。

6 结语

本文对关键零件进行计算和有限元分析，结果均表明关键零件结

构安全。气动执行机构选用叶片式结构，完全满足 30 万次使用寿命和可靠性要求。为了验证程控阀各项性能是否满足使用工况要求，按照技术规格书的要求对程控阀进行了 10000 次冷态和 1000 次热态试验，试验结果满足技术规格书要求。研制的产品通过国产化样机评定，具备开展装置实际工业化考核条件。

参考文献：

- [1] ANSI/FCI 70-2-2013, Control Valve Seat Leakage [S] .
- [2] ISO 15848-2:2015, Industrial valves – Measurement, test and qualification procedures for fugitive emissions Part 2: Production acceptance test of valves [S] .
- [3] ASME B16.34-2020, Valves—Flanged, Threaded, and Welding End [S] .
- [4] ASME BPVC.VIII.2-2019, Rules for Construction of Pressure Vessels Division 2 - Alternative Rules [S] .
- [5] API 598-2016, Valve Inspection and Testing [S] .

作者简介：梁连金（1982-），男，上海人，工程师，技术总监，研究方向：严苛工况阀门的设计。