

doi: 10.7690/bgzdh.2024.07.010

## 2.4 m 跨声速风洞蝶阀工作原理及故障处理

杨可朋, 师建元, 叶 伟

(中国空气动力研究与发展中心高速空气动力研究所, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 介绍 2.4 m 跨声速风洞大口径蝶阀的结构特点、配置形式, 分析蝶阀阀杆断裂故障的原因, 得出阀杆断裂的主要因素, 并制定相应维修方案以及日后使用、维护、保养的方法。结果表明, 该分析能为提高阀门使用寿命和降低设备使用风险提供参考。

**关键词:** 高速风洞; 蝶阀; 故障

**中图分类号:** TJ011; V211.74 **文献标志码:** A

## Working Principle and Troubleshooting of Butterfly Valve in 2.4 m Transonic Wind Tunnel

Yang Kepeng, Shi Jianyuan, Ye Wei

(High Speed Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** This paper introduces the structural characteristics and configuration of the butterfly valve of the big bore in the 2.4 m transonic wind tunnel, analyzes the reasons for the fracture of the valve stem of the butterfly valve, obtains the main factors for the fracture of the valve stem, and formulates the corresponding maintenance plan and the methods for use, maintenance and maintenance in the future. The results show that the analysis can provide a reference for improving the service life of the valve and reducing the risk of the equipment.

**Keywords:** high speed wind tunnel; butterfly valve; fault

### 0 引言

蝶阀具有相对成本低、体积小以及开关时间短等特点, 在暂冲式高速风洞中得到广泛使用, 主要用于风洞进气管路截断阀或快速开关阀。在多数暂冲式高速风洞进气管道阀门系统配置中, 第 1 道阀采用闸阀或电动蝶阀, 作为安全屏障; 第 2 道阀采用液动蝶阀, 作为快速开关阀和第 2 道安全保障阀; 第 3 道阀采用套筒式环状缝隙阀作为调压阀。

笔者以 2.4 m 跨声速风洞进气管路快速开关阀 (DN1400 蝶阀) 出现的故障为例, 进行诊断、分析、研究。该蝶阀阀体由泰科公司旗下 Vanessa 公司制造, 液压驱动装置由泰科公司旗下 BIFFI 公司制造, 口径 DN1400。随着使用年限的增加, 近年来该蝶阀先后出现密封不严、阀杆断裂以及阀杆轴向窜动等故障, 严重影响了风洞试验的顺利进行。风洞蝶阀使用中常见的上述故障在水电、核电等应用领域并不经常出现, 这是因为风洞蝶阀具有启闭频繁 (试验一次启闭一次)、开关速度极快 (3 s 左右)、冲击大、振动剧烈等特点; 因此, 笔者针对风洞应用领域, 进行蝶阀故障诊断研究。

### 1 蝶阀工作原理及结构特点

#### 1.1 蝶阀工作原理

图 1 给出了风洞中各道阀门依照气流的流向布置情况。

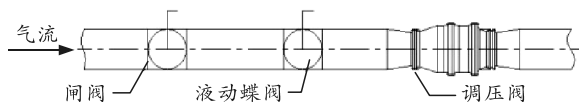


图 1 风洞阀门装配图

高速风洞大口径蝶阀均为三偏心硬密封结构, 是一种独特的 1/4 回转式三偏心零泄漏阀门, 如图 2 所示<sup>[1]</sup>。

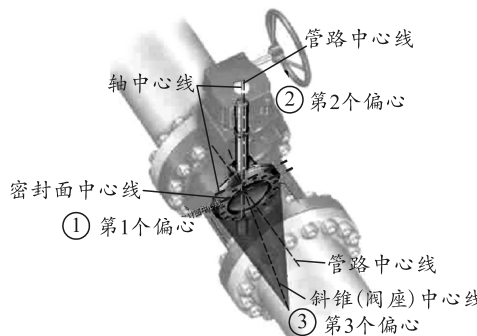


图 2 阀体三偏心结构

收稿日期: 2024-03-19; 修回日期: 2024-04-20

第一作者: 杨可朋(1989—), 男, 陕西人。

常规双偏心结构是在设计时将轴偏离密封面中心线，形成第1个偏心；轴稍稍偏离管路中心线，形成第2个偏心。偏心的目的在于使阀板开至大约 $20^\circ$ 之后，阀座与密封圈之间脱离，从而减少摩擦。三偏心结构是指在传统双偏心结构的基础上增加独特偏心：第3个偏心—斜锥<sup>[2]</sup>。这种三偏心结构使得阀座与密封圈在阀门整个开关行程中完全脱离。这一独特的偏心组合，利用了凸轮效应，完全消除了摩擦，从而实现阀门 $90^\circ$ 行程中，阀座与阀板上的密封圈之间无摩擦，减小了磨损和泄漏的可能<sup>[3]</sup>。

## 1.2 蝶阀阀体结构

蝶阀分为阀体上端、阀体中部、阀体下端。蝶阀阀体外形结构如图3所示，主要部件包括：1) 阀体，焊接结构，材料为碳素铸钢；2) 阀座，堆焊Gr.21 不锈钢耐磨材料；3) 阀杆，材料2Cr13；4) 阀板，材料WCB；5) 密封圈，材料1Cr17Ni7+石墨板<sup>[4]</sup>。

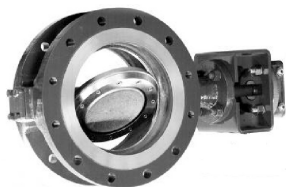


图3 阀体结构

## 1.3 蝶阀驱动装置

驱动装置转动部件与阀杆通过键连接，驱动装置固定部分与阀体安装支架通过螺栓、销固定连接。驱动装置如图4所示，其特点是阀关闭可靠。该阀打开时，由油缸驱动曲柄以及克服弹簧力，实现阀 $90^\circ$ 翻转；关闭时油缸缩回，弹簧实现阀板关闭。通过调节控制油缸进油或回油流量，调整阀的开启和关闭时间以减缓阀门冲击。

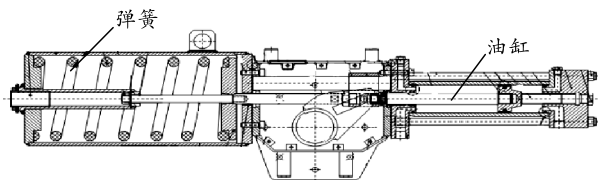


图4 液压机组合驱动装置

# 2 风洞蝶阀故障

## 2.1 故障现象

在2011年1月24日某项目试验过程中，蝶阀出现较大内泄漏，试动时发现蝶阀关闭触点无法正常接触，动作过程有异响，检查发现在阀体颈部位置处的阀杆出现断裂，如图5所示。

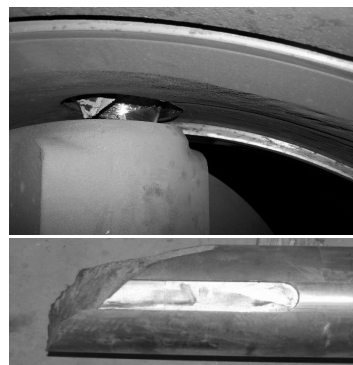


图5 阀杆断裂

## 2.2 蝶阀使用工况

2.4 m 风洞蝶阀工作介质为干净空气，阀前压力2.1 MPa，阀后压力 $0.1\sim 2.1$  MPa。该阀门及其驱动器于2001年上半年经现场安装调试合格后，投入使用。发生阀杆断裂情况时，使用时间为10余年，总计开关次数在23 000余次左右。

## 3 阀杆断裂故障诊断

### 3.1 原因分析

蝶阀阀杆断裂是典型的疲劳损伤，分析其使用工况，可以发现：

1) 蝶阀全关时间只有1 s，蝶阀关闭时阀杆受较大冲击载荷；

2) 阀杆与阀板传递扭矩的键槽存在应力集中问题，断口沿键槽边缘开裂；

3) 前端阀门距蝶阀进气前端3 m，阀板尾迹使得阀杆长期受交变气动力载荷影响。

针对以上情况，利用有限元及CFD手段对其进行详细分析，明确故障原因<sup>[5]</sup>。

### 3.2 阀杆受力分析

经计算，阀杆承受最大静态力矩为 $215\ 600\ \text{N}\cdot\text{m}$ ，通过有限元方式对其进行受力分析，阀杆最大应力出现在两侧键槽处，应力为478.65 MPa(如图6所示)，阀杆安全系数为1.87(阀杆材料为40Cr)。

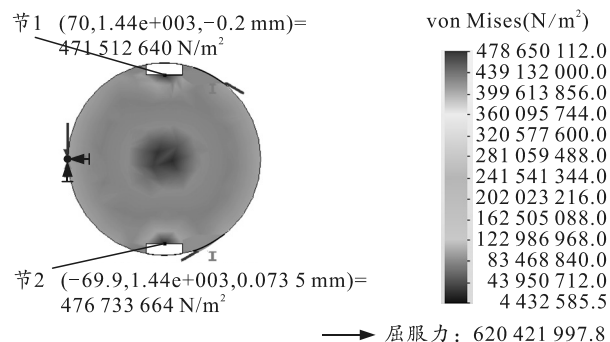
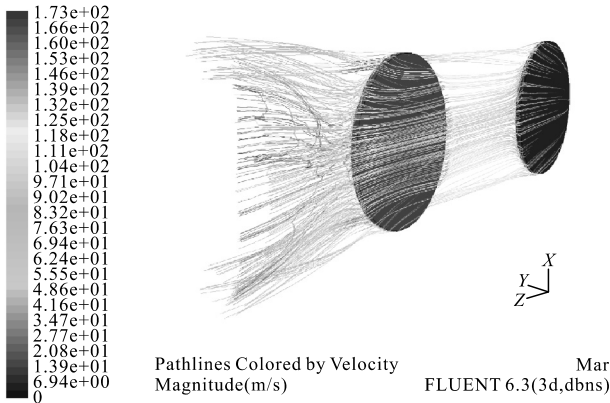


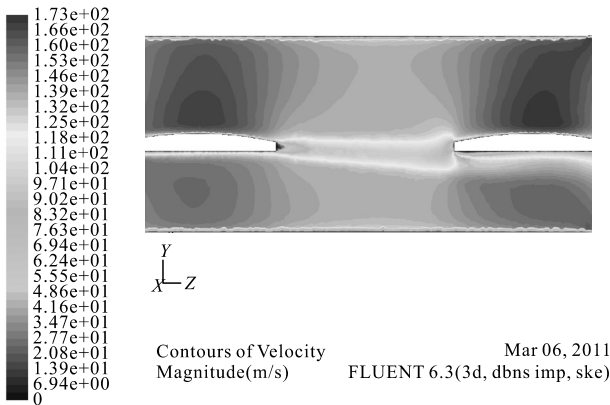
图6 阀杆受力强度分析

### 3.3 电动蝶阀对快速蝶阀的影响

为分析电动蝶阀尾流对快速蝶阀的影响，进行气动力仿真，尾流云图如图 7 所示，受力曲线如图 8 所示。

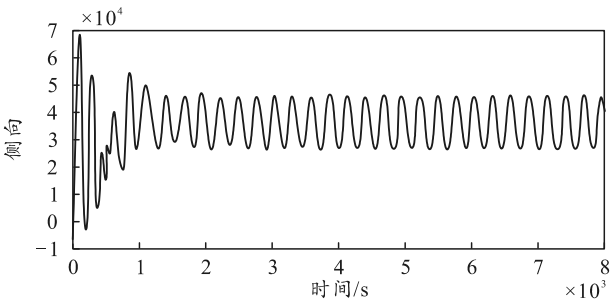


(a) 流体仿真

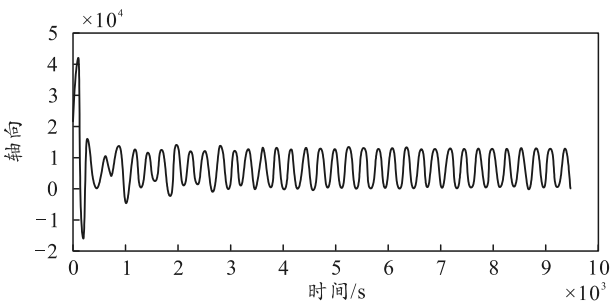


(b) 尾流云图

图 7 电动蝶阀对快速蝶阀气动力影响



(a) 承受侧向力 45 000 N



(b) 承受轴向力 12 000 N

图 8 快速蝶阀脉动力曲线

从上图可以看出：

1) 电动蝶阀蝶板未有效衰减的气流脉动尾迹很快传递到快速蝶阀处；

2) 在 2 台阀门开启状态下，快速蝶阀阀板受到较大的非正常侧向力及阻力，侧向力最大 45 000 N，最小 27 000 N，阻力最大 12 000 N，最小 1 600 N，侧向力及阻力均呈明显的周期性变化，并将直接传递到阀杆上。

### 3.4 诊断结论

通过蝶阀关闭过程中的静态受力分析，阀杆最大应力达到 478.65 MPa，但在实际使用过程中，由于阀门关闭时间为 1 s，速度非常快，会对阀杆产生非常严重的冲击载荷(冲击载荷至少是静态载荷的几倍)，再加上气动冲击载荷，阀杆的受力情况比计算状态要严重得多。

同时，前端阀门距蝶阀进气前端 3 m，远达不到两阀距离应大于当地管道公称直径 8 倍以上<sup>[6]</sup>的要求，使得蝶阀阀板完全处于前端阀门的阀板尾迹中，阀杆长期受交变气动力载荷影响。

针对以上导致阀杆断裂的主要因素，在维修过程中要重点考虑减小阀杆冲击和前段阀板尾流对蝶阀的影响。

## 4 蝶阀维修方案

### 4.1 工艺方案

蝶阀维修工作主要包括对阀体进行解体维修，加工配作一根阀杆，增加一套旁通阀等，详细工艺方案如下：

1) 拆卸清洗阀各部件，研磨密封面，如图 9 所示。



图 9 调整密封圈

2) 将阀板密封与阀座密封调整严实，并对压紧螺栓进行防松处理，如图 10 所示。



图 10 压板螺钉防松

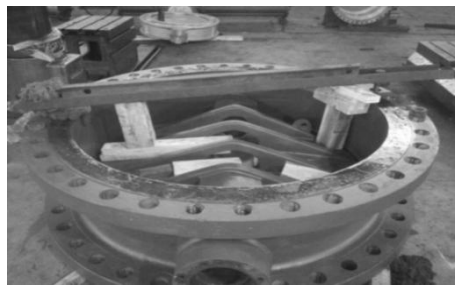


图 11 压紧阀板配镗轴孔

3) 将阀板与阀座压紧后，配镗轴孔，如图 11 所示。

4) 根据轴孔实际尺寸，制造阀杆及各部件并保证质量，如图 12 所示。

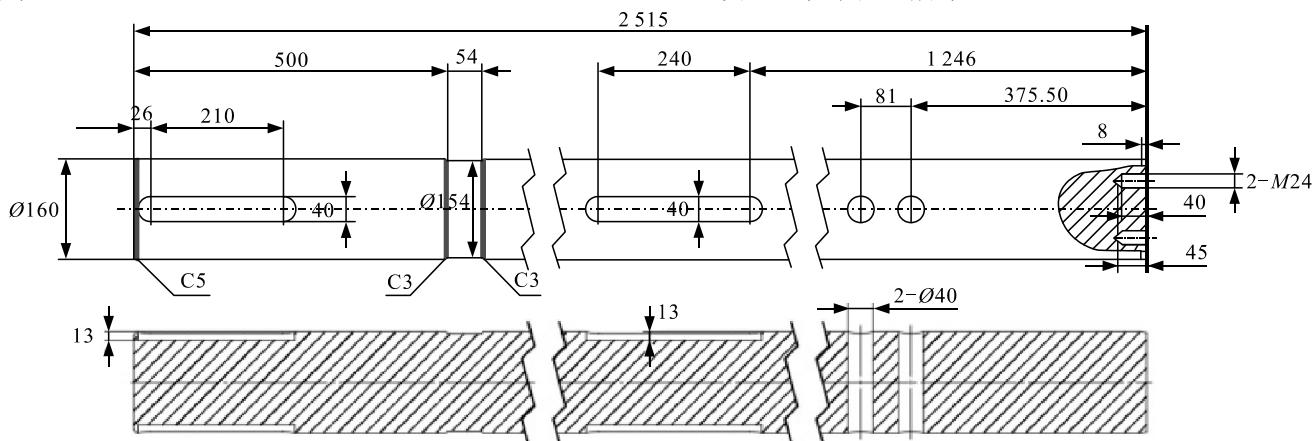


图 12 阀杆设计

5) 装配。将阀杆与阀板通过销、键连为一体，并对销做防松处理。

调试，确保动作灵活、无别卡、无异响。

6) 调整阀杆轴向定位，严格控制动配合间隙，如图 13 所示。

8) 密封试验，如图 14 所示。



图 13 阀杆定位调整



图 14 水压试验

阀杆的定位非常关键。锁紧螺栓必须严格按照规定扭矩执行。螺栓过紧，影响阀转动灵活性和密封性能；过松会造成阀在开启过程向上窜动，影响阀的密封和增加摩擦阻力。

在阀门进气端安装堵板，进行水压密封试验，按规范逐步加压，确保不漏水；排完水后，进行气压密封试验，按规范逐步加压，确保无泄漏。

高强度止推垫片、推力轴承、压盖之间间隙必须严格控制，以免造成摩擦阻力过大或定位不准。安装时，需要现场测量，考虑滑动配合间隙合理。

9) 增加旁通阀。在正常情况下，阀门最大开启力矩为 80 000 N·m，其中压力偏心力矩为 30 000 N·m(按 2.1 MPa 压力计算)，阀杆最大应力为 254 MPa，位置在两侧键槽处，阀杆安全系数为 2.4。为改善蝶阀工况，平衡开启压力，减小开启力矩，在蝶阀位置新增加了旁路阀。

7) 动作试验。阀体和执行机构厂内组装完成以后，连接液压控制系统，进行空载全开、全关阀门