

# 充气开关小活阀非金属脱粘故障分析与改进

史刚 岳兵 余锋 周浩洋 尹文辉 张翼

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)



**摘要:** 针对某型号充气开关在寿命试验中出现的小活阀非金属脱粘故障, 建立了故障树, 应用故障件失效分析和有限元计算等方法进行了故障定位及机理分析, 确认故障为 35MPa 压力下小活阀非金属变形过大所致。依据分析结果对充气开关进行了改进, 通过在大活阀底面上增加限位台阶的方法限制了小活阀非金属的变形量, 改进后的试验结果表明改进措施合理有效。对活阀非金属脱粘的原因分析和改进具有一定的指导作用。

**关键词:** 充气开关; 小活阀; 非金属脱粘

## Fault Analysis and Improvement of Little Piston's Nonmetal Fall-off of Charge Valve

Shi Gang Yue Bing Yu Feng Zhou Haoyang Yin Wenhui Zhang Yi

(Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076)

**Abstract:** Fault tree was established for the fault of little piston's nonmetal fall-off of charge valve happened during life experiment. Invalidation and FEA analysis were done to locate the fault mechanism, finally the fault was confirmed to be caused by excessive transmutation of little piston's nonmetal. According to the analysis, the structure of charge valve was improved by adding a step on the bottom face of big piston to limit the transmutation of little piston. Experiment showed the improvement was rather effective. The work could serve as a guidance to fault analysis and improvement of piston's nonmetal fall-off.

**Key words:** charge valve; little piston; nonmetal fall-off

### 1 引言

充气开关是火箭、导弹增压输送系统的重要元件, 主要作用是对高压气瓶进行充、放气, 当气瓶工作压力较高时一般为卸荷式开关<sup>[1]</sup>。某型号卸荷式充气开关用于给 35MPa 高压氦气瓶充放气, 在进行多次高压卸荷放气的寿命试验时, 出现了顶杆力异常增加、卸荷困难的现象, 经分解检查发现小活阀非金属已脱粘。针对此故障, 应用故障件失效分析、有限元计算等方法对故障进行了分析和定位, 并进行了结构改进和试验验证, 试验结果证明改进效果良好。

### 2 故障现象

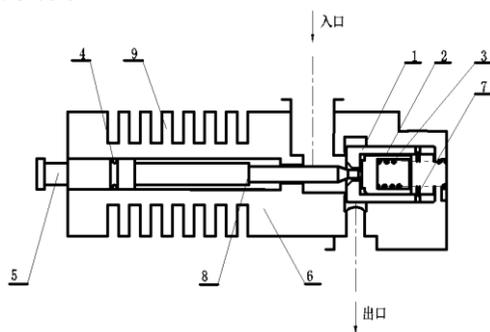


图 1 充气开关工作原理图

1—大活阀 2—小活阀 3—弹簧 4—密封圈 5—螺杆  
6—壳体 7—止动环 8—顶杆 9—壳体翅片

作者简介: 史刚 (1987-), 硕士, 航空宇航推进理论与工程专业; 研究方向: 弹箭体阀门设计。

收稿日期: 2014-09-05

充气开关的工作原理如图 1 所示，为卸荷式手动开关，大、小活阀为嵌套式结构。

当气瓶充气时，转动螺杆带动顶杆顶开小活阀，小活阀运动到止动环处带动大活阀一起运动，阀门开启充气。充气完毕后顶杆退回，大、小活阀在弹簧力的作用下回位，保持密封；气瓶放气时，同样是顶杆先顶开小活阀。小活阀背压腔的高压气体放出，压力迅速下降，同时气瓶的气体来不及充入背压腔，大活阀被高压气顶开，实现了卸荷功能，阀门开启放气。大、小活阀的非金属密封材料均为氟塑料 Fs-46。

充气开关进行寿命试验时，出口保持 35MPa 高压，反复通过顶杆顶开阀门卸荷放气。若干次后，发现顶杆顶开力异常增大，卸荷困难。经分解检查，发现小活阀非金属塑料面有异常凸出，且塑料块已可整体活动，判断为脱粘，如图 2 所示；小活阀金属骨架中心硬芯相对外围金属面有明显凹陷，顶杆总长相对安装前降低了 1.5mm。

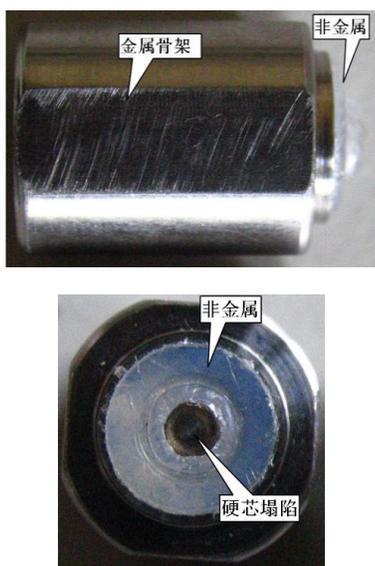


图 2 小活阀故障件

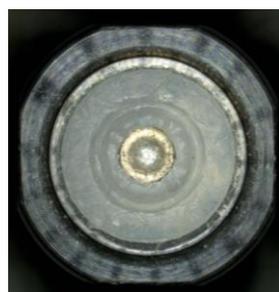
### 3 故障件失效分析

为准确定位小活阀非金属塑料块的脱粘原因，对故障件进行了失效分析。

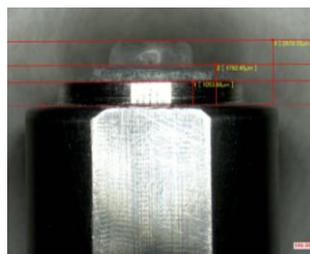
#### 3.1 外观形貌及尺寸测量

小活阀宏观形貌见图 3，塑料块中部存在一均匀的环形压痕，应是与大活阀的阀座接触挤压所形成，压痕内侧塑料块材料向上凸起变形、呈圆筒状，压痕

外侧塑料块上存在多条尺寸不一、方向各异的损伤痕。侧面观察，整个密封块相对于骨架端面存在明显的拔出、错位。对塑料块的相关尺寸进行了测量，测量结果见表 1。



a 俯视



b 侧视

图 3 小活阀宏观形貌

表 1 塑料块相关尺寸测量结果

测量项目	测量值/mm
压痕深度	0.40
凸起变形区内径	2.58
凸起变形区相对骨架端面高度	1.82
密封块外边缘相对骨架端面高度	0.74

#### 3.2 塑料块断口观察



图 4 塑料块撕裂断口宏观形貌

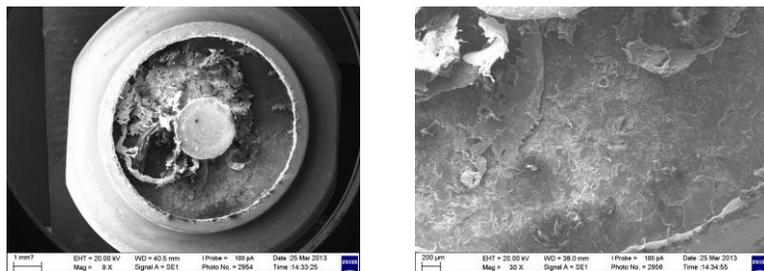


图5 塑料块撕裂断口微观形貌

采用机械方法将塑料块从金属骨架中取出,可见骨架中心硬芯明显低于端面,测得二者高度差约0.68mm。与密封块接触的骨架底面、端部内圆及中心硬环外圆表面均附着有白色的密封块材料,断面较为粗糙,宏观形貌见图4;扫描电镜下观察,密封块各部分断口均呈撕裂形貌,未见明显的材料缺陷存在,微观形貌见图5。

### 3.3 失效分析结论

经分析,塑料块相对于骨架端面存在明显的拔

出、错位,取下密封块后可见与密封块接触的金属骨架表面均存在白色的密封块材料,断面微观均呈撕裂形貌,未见材料缺陷存在,由此判断分离面位于密封块材料内部。结合试验工况分析认为,塑料块与金属骨架发生分离应是试验过程中受一定载荷作用,密封块发生过载撕裂所致。

### 4 故障树分析

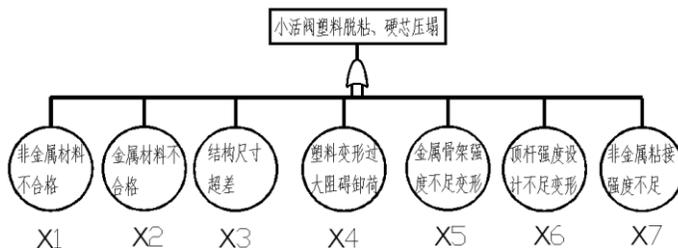


图6 故障树

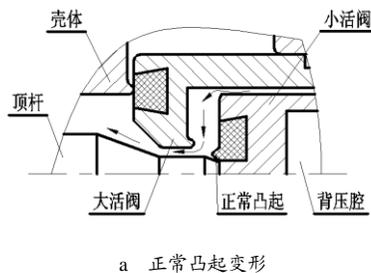
以充气开关小活阀非金属脱粘、硬芯压塌作为顶事件,分析可能导致此故障的底事件,建立故障树如图6所示。

#### 4.1 材料不合格或尺寸超差

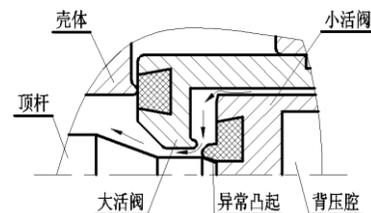
经过对同批次金属、非金属原材料的复验和结构尺寸复测,原材料性能满足要求,结构尺寸合格,此故障模式可排除。

#### 4.2 塑料变形过大阻碍卸荷

在35MPa高压作用下,阀座会压入小活阀塑料中,造成塑料变形凸出,凸出量对整个高压气体的卸荷通道有一定影响,如图7所示。根据卸荷通道设计,若塑料凸出过多,会引起气体通道流阻增加<sup>[2]</sup>。此时小活阀背压腔内的高压气体无法正常泄至大活阀自动开启,进而导致卸荷功能失效,顶杆力异常增加。这个过程反复进行数次后,可能会导致顶杆和小活阀金属硬芯变形,塑料在金属基体变形的挤压下脱出。



a 正常凸起变形



b 异常凸起变形

图7 塑料变形凸起示意图

这种故障模式与故障件状态高度一致，无法排除。

### 4.3 顶杆或小活阀金属骨架强度设计不足

若顶杆或小活阀金属骨架的强度设计不足，在顶杆力的作用下会发生微量形变，反复动作有可能导致塑料变形加大，粘接界面脱粘，对此故障模式进行了有限元计算。顶杆材料为铝青铜 QA110-4-4，小活阀金属骨架材料为不锈钢 F151。根据背压腔压力的作用面积计算，当卸荷功能正常时，顶杆力需克服的力仅为 440N；卸荷功能失效时，35MPa 背压无法完全卸荷，顶杆力最大需克服 3958N。

使用 Abaqus 软件进行有限元分析<sup>[3]</sup>，顶杆及小活阀的建模如图 8 所示，由于塑料块对顶杆、小活阀金属骨架的强度无影响，因此建模时未考虑塑料块。



图 8 有限元建模

将小活阀上端固支约束，在顶杆上施加载荷力，从 440N 开始线性增加。当载荷力为 440N 时，顶杆和小活阀金属骨架最大应力分别仅为 130MPa 和 207MPa，远低于两种材料的屈服强度<sup>[4]</sup>，不会发生塑性变形；而载荷力增加到 2587N 时，由于变形过大，计算中止。此时小活阀金属骨架最大应力为 904MPa，已超出材料屈服强度，中心产生塌陷位移 0.57mm。计算得到的 440N 和 2587N 载荷力下的应力云图如图 9 所示。

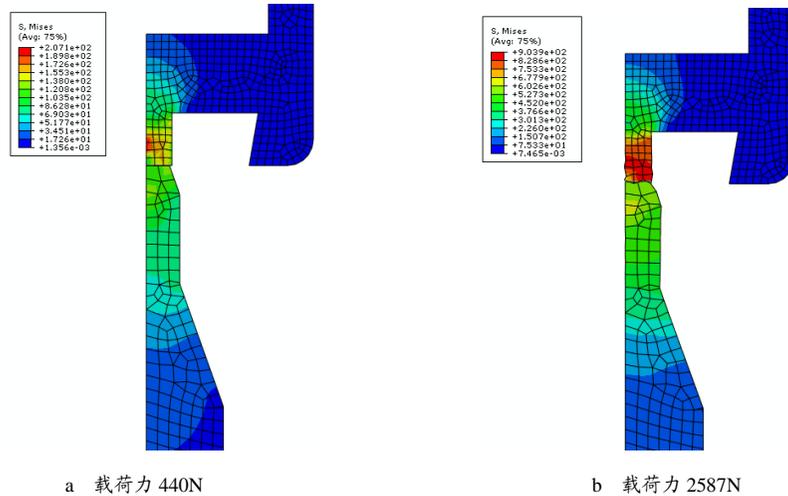


图 9 顶杆、小活阀金属骨架强度有限元分析

上述计算结果表明，卸荷功能正常时，顶杆和小活阀强度满足要求；卸荷功能不正常时，顶杆载荷力增加，达到一定程度后顶杆和小活阀金属骨架发生塑性变形。这与故障件小活阀金属硬芯塌陷、顶杆总长度缩短的故障现象一致，从而也印证了卸荷功能失效的故障模式。

因此，顶杆或小活阀金属骨架强度设计不足的故障模式可排除。

### 4.4 非金属粘接强度不足

对非金属的生产工艺进行复查，结果表明，小活阀的生产严格遵循工艺规程要求，无未按要求操作的工序。小活阀毛坯加工成产品后，进行着色检查，结果表明粘接界面相容性良好，无渗漏情况。对同批次产品进行粘接性能测试，平均粘接强度达到 21.3MPa，

满足设计要求。因此，这种故障模式可排除。

综上所述，充气开关小活阀非金属脱粘的故障可定位于小活阀塑料变形过大，阻碍了正常卸荷。

## 5 故障机理分析

为进一步验证故障机理，使用 AMESim 软件对充气开关的卸荷功能进行仿真计算。

### 5.1 仿真建模

充气开关的卸荷能力由各段卸荷通道的面积决定，因此搭建了如图 10 所示的 AMESim 仿真模型<sup>[5]</sup>，将卸荷通道简化为 4 个孔板：1 代表大活阀与壳体间的进气通道，2 代表大活阀与小活阀的流通通道，3 代表小活阀出口的流通通道，4 代表阀门出口。

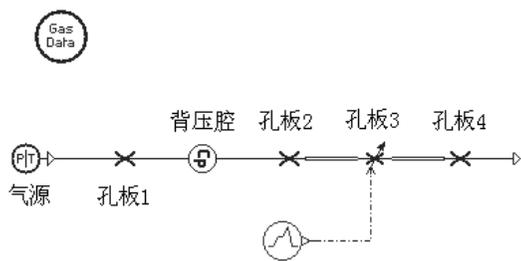


图10 卸荷能力仿真建模

设定气源压力为 35MPa，各孔板直径按照实际流通面积的当量直径。小活阀塑料的凸出高度主要会减小孔板3的面积，引起排气不畅，小活阀背压腔压力升高。

### 5.2 计算结果

当小活阀塑料凸出高度为 0.3mm 时，计算得到背压腔压力可卸荷至 8MPa；当小活阀塑料凸出高度为 1.5mm 时（故障件状态为 1.82mm），背压腔压力只能卸至 31MPa，如图 11 所示。

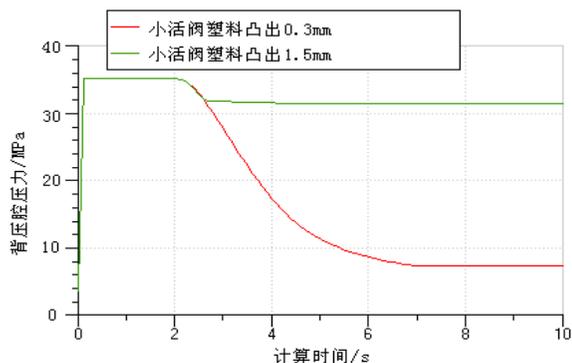


图11 卸荷能力计算结果

计算结果表明，小活阀塑料凸出达到 1.5mm 时，背压腔卸荷功能已基本失效。此时顶杆作用力比正常情况下增大，多次动作后导致小活阀金属骨架的塌陷和塑料的撕裂脱粘。

### 6 改进措施及验证

为避免小活阀变形过大，在大活阀的底面上增加了一个限位台阶，以限制小活阀塑料的变形，如图 12 所示。当 35MPa 气压作用在小活阀上时，小活阀的金属骨架首先与台阶接触限位，此时塑料凸出量较小，并且不会再继续变形。

改进后的充气开关重新进行了寿命试验，整个试验过程中顶杆动作正常，未再出现顶开力异常增加的

故障。分解检查发现小活阀塑料凸出量较小，约为 0.25mm，变形情况正常，如图 13 所示。试验结果证明改进措施合理有效。

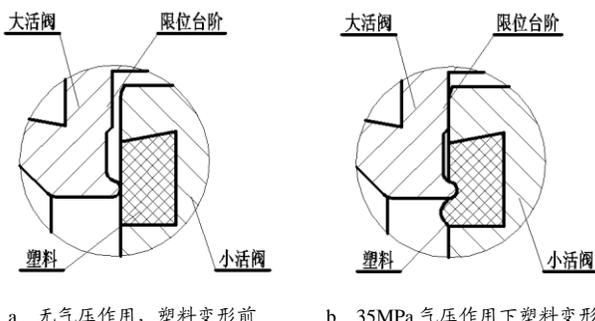


图12 改进后大、小活阀结构

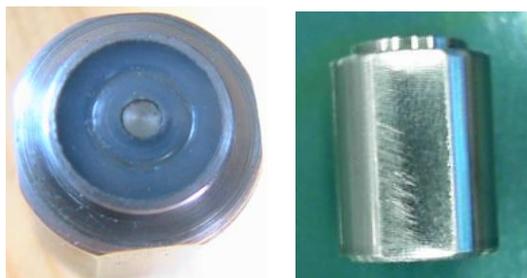


图13 寿命试验后小活阀

### 7 结束语

- a. 经过故障树的建立和故障模式分析，充气开关小活阀非金属脱粘故障可定位于 35MPa 压力下塑料变形过大；
- b. 对充气开关的卸荷功能进行了 AMESim 仿真分析，结果证实塑料凸出量过大时，会影响正常卸荷，导致顶杆作用力增加；
- c. 对充气开关进行了结构改进，在大活阀底面增加变形限位台阶，试验结果表明该措施合理有效；
- d. 对活阀非金属脱粘问题的原因分析及改进具有一定的指导作用。

### 参考文献

- 1 王心清, 等. 导弹与航天-结构设计[M]. 北京: 宇航出版社, 2005
- 2 于瞳. 卸荷式液控液压截止阀的研究[D]. 天津: 天津理工大学硕士学位论文, 2011: 1~5
- 3 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006
- 4 成大先, 等. 机械设计手册(第五版)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007
- 5 付永领, 齐海涛. LMS Imagine.Lab AMESim 系统建模和仿真实例教程 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011