

反向喷管的滚珠式打开机构

任 亿 君

摘 要

本文介绍了滚珠式打开机构的结构，侧重分析了滚珠受力及影响打开时间的因素，提出了设计中必须注意的事项。滚珠式打开机构经多项目考核试验，工作是可靠的。文中列有部分试验结果和数据，可供参考。

一、结 构

固体火箭发动机推力终止用的反向喷管要求伴有性能良好的打开机构，滚珠式打开机构就是这样的一种新型结构。

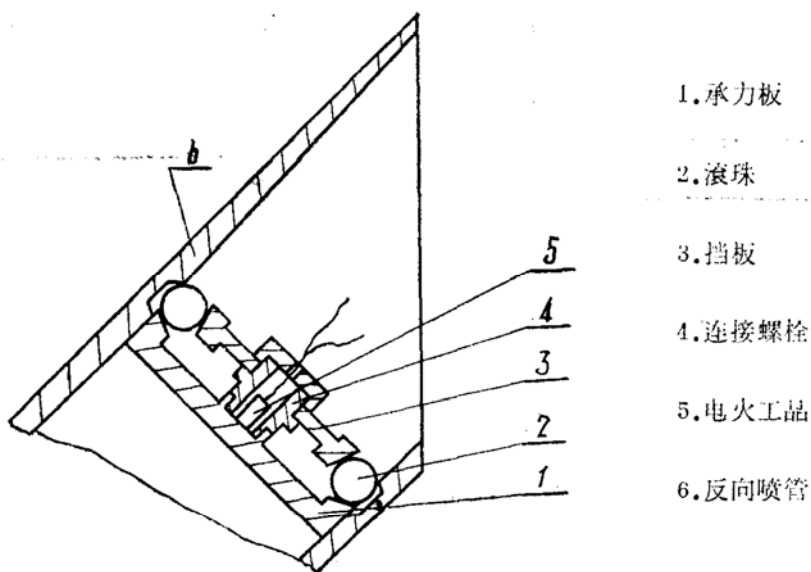


图 1

滚珠式打开机构的示意图见图1。承力板，兼作堵盖，上有均布弧形槽，供滚珠周向定位。电爆管得到推力终止信号后引爆，截断连接螺栓，兼作抛放挡板的动力。在承力板抛放时，反向喷管中的密封绝热层在燃烧室工作压力下被切割，同时抛去。此外还有防松装置等辅助零件，图中未画出。

二、滚珠受力分析与计算

滚珠式打开机构设计中应把滚珠受力分析放在重要的地位。因为滚珠所受的力不仅关系到滚珠本身及与之相接触的各零件的设计,且对机构的工作性能(包括机构工作的可靠性)产生不可忽视的影响。

机构未接到终止指令前,滚珠受反向喷管壁、承力板及挡板的约束(如图2所示),处于静止平衡状态,作用在每个滚珠上的三力: F_I , F_{II} , F_{III} 各构成一平面平衡力系。

现假定各滚珠受力状况完全相同,滚珠和与它相接触的各零件均是绝对刚体。则对单个滚珠的受力可进行如下典型分析。

过滚珠球心及反向喷管轴线作一平面,并在平面内取直角坐标系 XOY , Y 轴平行于反向喷管轴线(向外为正), X 轴垂直于反向喷管轴线(亦是向外为正),如图3所示。

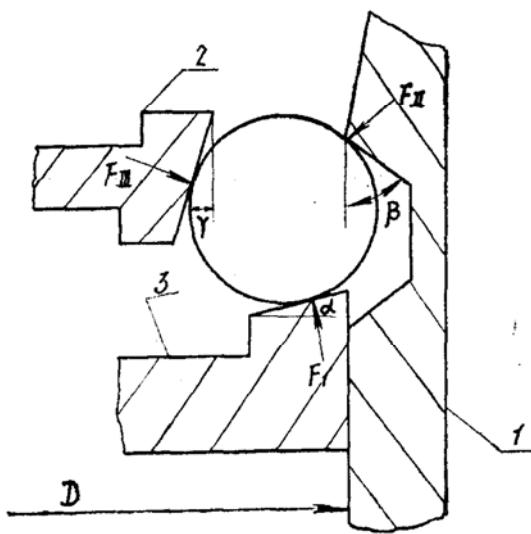


图 2

1. 反向喷管 2. 挡板 3. 承力板

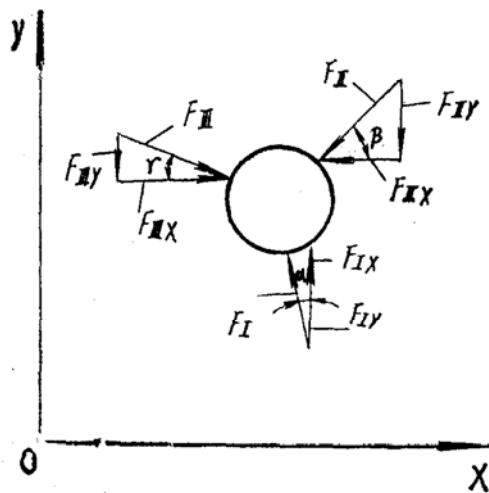


图 3

建立滚珠的平衡方程,可解得:

$$F_{Ix} = \frac{F_{\text{承力板}}}{n} \cdot \tan \alpha \quad (1)$$

$$F_{IIx} = \frac{F_{\text{承力板}}}{n} \cdot \left(\frac{\cot \gamma - \tan \alpha}{\cot \gamma + \cot \beta} \right) \cdot \cot \beta \quad (2)$$

$$F_{IIIx} = \frac{F_{\text{承力板}}}{n} \cdot \left(\frac{\cot \beta + \tan \alpha}{\cot \gamma + \cot \beta} \right) \cdot \cot \gamma \quad (3)$$

$$F_{IY} = \frac{F_{\text{承力板}}}{n} \quad (4)$$

$$F_{IIY} = \frac{F_{\text{承力板}}}{n} \cdot \left(\frac{\cot \gamma - \tan \alpha}{\cot \gamma + \cot \beta} \right) \quad (5)$$

$$F_{\text{IIY}} = \frac{F_{\text{承力板}}}{n} \cdot \left(\frac{\text{ctg} \beta + \text{tg} \alpha}{\text{ctg} \gamma + \text{ctg} \beta} \right) \quad (6)$$

式中: $F_{\text{承力板}}$: 发动机工作压力作用于承力板的载荷。

$$F_{\text{承力板}} = \frac{\pi}{4} D^2 P$$

D: 承力板直径 (见图2);

P: 发动机工作压力。

n: 滚珠数目。

由上可见:

1) $\alpha = 0$ 时,

$$F_{\text{IX}} = 0, F_{\text{IIY}} = F_{\text{IX}}$$

2) $\gamma = 0$ ($\alpha \approx 90^\circ$, $\beta \approx 0^\circ$) 时,

$$F_{\text{IY}} = 0, F_{\text{IIY}} = F_{\text{IY}}$$

3) $\alpha = \gamma = 0$ ($\beta \approx 0^\circ$) 时,

$$F_{\text{IX}} = F_{\text{IY}} = 0, F_{\text{IIY}} = F_{\text{IX}}, F_{\text{IIY}} = F_{\text{IY}}。$$

由于D, P及n, α , β , γ 均在设计时已知或需预先设定, 故根据(1)~(6)式可求出 F_{IX} , F_{IY} , F_{IIY} , F_{IIY} , F_{IX} , F_{IY} 。同时, 根据力的合成原理, 可进而求得 F_{I} , F_{II} , F_{II} 。其中,

$$F_{\text{I}} = \frac{F_{\text{承力板}}}{n} \sqrt{1 + \text{tg}^2 \alpha}$$

$$F_{\text{II}} = \frac{F_{\text{承力板}}}{n} \left(\frac{\text{ctg} \gamma - \text{tg} \alpha}{\text{ctg} \gamma + \text{ctg} \beta} \right) \cdot \sqrt{1 + \text{ctg}^2 \beta}$$

$$F_{\text{II}} = \frac{F_{\text{承力板}}}{n} \left(\frac{\text{ctg} \beta + \text{tg} \alpha}{\text{ctg} \gamma + \text{ctg} \beta} \right) \cdot \sqrt{1 + \text{ctg}^2 \gamma}$$

这样, 根据作用力与反作用力相等原理可知:

(a) 反向喷管壁受单个滚珠传来的径向力及轴向力, 其大小分别与 F_{IIY} 及 F_{IIY} 相等;

(b) 挡板受单个滚珠传来的径向力及轴向力, 其大小分别与 F_{IIY} 及 F_{IIY} 相等。

为使结构设计尽量合理、机构工作可靠及充分利用材料的机械性能, 设计中应使 F_{IIY} 尽量接近或等于 F_{IY} (也即使 F_{IIY} 接近或等于零), 使 F_{IIY} 尽量小, 接近或等于 F_{IX} (也即使 F_{IX} 接近或等于零)。

显而易见, 滚珠所受力与 $F_{\text{承力板}}$, 滚珠数, 及 α , β , γ 有关。当 $F_{\text{承力板}}$ 一定时, 不难由式(1)~(6)得到如下关系 ($\alpha \leq 10^\circ$, $\beta = 30^\circ \sim 60^\circ$, $\gamma \leq 10^\circ$ 时):

增加n、 β 、 γ 和减小 α 可使 F_{IIY} 减小, 而 α 减小可使 F_{IIY} 趋近或等于 F_{IX} ;

增加n、 β 和减小 γ 、 α 可使 F_{IIY} 趋于甚或等于零。

但n, α , β 及 γ 究竟取何值需经具体结构设计, 并进行滚珠受力分析、多次计算、比较和选择后, 兼顾结构的可靠性、强度、刚度、重量、工艺、装配等各方面因素确定。

三、影响打开时间的因素分析

据机构的工作原理，机构的打开时间由各相关时间组成。用式子表示，即为：

$$t_{\text{打开}} = t_{\text{起爆}} + t_{\text{挡板}} + t_{\text{滚珠}} + t_{\text{残药}} + t_{\text{承力板}}$$

式中：

$t_{\text{打开}}$ ：指机构打开时间，即从电火工品通电开始到燃烧室压力开始下降为止之间的时间。

$t_{\text{起爆}}$ ：指电火工品的起爆时间。它与所选用的电火工品及其作用原理有关。若使用引信电雷管，由于其起爆迅速（一般在 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 秒），相对于 $t_{\text{打开}}$ 而言，可略而不计。若用别的电火工品，需计入此时间时， $t_{\text{起爆}}$ 可由实验测得。

$t_{\text{挡板}}$ ：指挡板从开始向外运动到脱离滚珠为止间之时间。它视滚珠和挡板在 XOY 平面内的切线与 Y 轴间的夹角（即前述 γ 角）分二种情况：

(a) 当 $\gamma \approx 0$ 时，挡板与滚珠相接触之面呈倒锥面（锥顶指向发动机）， $t_{\text{挡板}} = 0$ ；

(b) 当 $\gamma = 0$ 时，它与挡板的质量，形状和尺寸，所受的炸药力以及运动时与滚珠相接触的长度等有关。显然，挡板的质量及滚珠与挡板相接触的运动距离愈小，所受炸药力愈大， $t_{\text{挡板}}$ 愈小。 $t_{\text{打开}}$ 中还须考虑爆炸气体充满挡板与承力板间空间，并形成一定压力之所需时间（此时间也是很小的）。

$t_{\text{滚珠}}$ ：指滚珠从开始向内运动到脱离反向喷管滚珠槽为止间之时间。它与滚珠本身的质量，嵌入滚珠槽的深度及 $F_{\text{阻}}$ 等有关。显然，滚珠质量愈小，嵌入愈浅， $F_{\text{阻}}$ 愈大， $t_{\text{滚珠}}$ 愈小。计算将表明，它在 $t_{\text{打开}}$ 中所占的比例也是较小的。

$t_{\text{残药}}$ ：指反向喷管孔口部密封层及残药在打开时被完全切割所需之时间。它与所用密封层及残药的厚度及力学性能等有关。由于它们都是粘弹性材料，因此，为了避免其切割时间过长及散布过大（特别是当导弹的射程范围变化较大时），一般在使用这种推力终止机构的发动机设计中，除了发动机总体要精心考虑反向喷管的位置外，还要求发动机装药设计中对反向喷管孔口部采取一些特殊措施，以尽量减少该处残药（甚或没有残药）。此时， $t_{\text{残药}}$ 可不予单独考虑。

$t_{\text{承力板}}$ ：指承力板及与其一起运动部分从其运动开始到反向喷管基本打开，燃烧室压力开始下降为止所需的时间。它由二部分时间组成：

(a) 承力板等从原始位置运动到反向喷管斜切口短边处为止所需的时间。在这段时间内，承力板等上所受的燃烧室压力基本不变，可视为作匀加速运动。

(b) 承力板等从反向喷管斜切口短边运动至一定距离（在该距离上，反向喷管基本打开，燃烧室压力开始下降）时所需的时间。由于本段时间内燃气扩散，作用在承力板等上的力在不断变化，实际上，承力板等作变加速运动。

无论哪一种情况， $t_{\text{承力板}}$ 与承力板等运动件的质量、运动距离及所受的作用力有关。显然，运动件的质量及运动距离愈小，由燃气压力所产生的作用力愈大，则 $t_{\text{承力板}}$ 愈小。

多个算例表明， $t_{\text{承力板}}$ 在 $t_{\text{打开}}$ 中占有相当大的比例，其次是 $t_{\text{挡板}}$ （当 $\gamma = 0$ 时）。所以欲减小 $t_{\text{打开}}$ 必须着眼于减小 $t_{\text{承力板}}$ 及 $t_{\text{挡板}}$ 。然而，它总是有一定限度的。这也是它比炸药切割式打开机构的打开时间长之道理所在。

总之，采用引信电雷管，使挡板与滚珠的接触面成带有小夹角的倒锥面（即锥顶指向发

动机, 使 $\gamma \approx 0$) 及在装药设计中采取减小反向喷管孔口部残药等都是减小 t 打开的有效措施。而为使 t 打开的散布度得到控制, 也必须从控制各相关时间的散布度着手。

四、部分试验结果和数据

滚珠式打开机构在研制中经过多项目考核试验, 工作是可靠的。下面是试验的部分结果和数据。

1. 试验器有关参数:

试验器直径: 286毫米;
主喷管喉径: 68毫米;
反向喷管喉径: 58毫米;

反向喷管倾角: 45度;
反向喷管数目: 4个;
滚珠式打开机构总重: 2公斤。

2. 试验结果: 见表1

表 1

试 验 次 序	1	2	3
试验器工作压力 (公斤/厘米 ²)	68.3	64.7	59.2
打 开 时 间 (毫秒)	2.3	2.4	1.75
1*反向喷管机构动作时间 (毫秒)	0.8	1.0	1.05
2*反向喷管机构动作时间 (毫秒)	0.84	1.0	1.05
3*反向喷管机构动作时间 (毫秒)	0.8	1.2	1.05
4*反向喷管机构动作时间 (毫秒)	0.8	1.2	1.05
不 同 步 时 间 (毫秒)	0.04	0.20	0.00

注: (1) 机构动作时间是指机构中的电火工品通电开始到机构上所固定的讯号线被拉断为止的时间间隔;

(2) 不同步时间是指同一试验器上四个反向喷管打开机构动作时间之间的最大差值。

五、机构设计注意事项

尽管反向喷管——滚珠式打开机构这种推力终止装置方案有简单、可靠、终止迅速、同步性良好等优点, 但能否使这些优点发挥, 还有赖于机构的正确设计及良好的工艺保证。特别是设计时需注意:

1. 承力板周边应有一定的导向长度或设置有一定长度的导向凸台。
2. 挡板与滚珠的接触面可以根据需要选用柱面 (即 $\gamma = 0$), 或选带小夹角的倒锥面 ($\gamma \approx 0$), 但在同一发动机中应相同。而且,

(a) 当选为圆柱面时, 挡板应有足够的径向刚度。挡板上不能随便开孔, 挡板边缘与承力板间的间隙不能过大。

(b) 当选为带小夹角的倒锥面时，挡板圆周边界挠度应有限制，连接螺栓应得到适当的加强。

3. 为提高机构的工作可靠性，电火工品可设计有备件。

4. 应努力减轻机构的重量。

文中有关数据引自有关课题研究组的资料，特予鸣谢。