

包带式星箭紧锁预紧力分析*

唐乾刚 孙世贤

(国防科技大学航天技术系 长沙 410073)

摘要 根据星箭连接处受力情况及紧锁装置的特点,分析了星箭连接处发生松动的可能性,导出了星箭紧锁所需包带预紧力计算公式,提出了解决包带应力分布不均匀的方法。通过与两种型号的实验结果对比,证明了本文分析方法的正确性和计算公式的可信性。本文所得结论为包带式星箭紧锁结构设计提供了依据。

关键词 星箭紧锁,包带,预紧力

分类号 O313.5, V414.1

An Analysis of Preforce in the Locking Device of the Satellite and Launching Vehicle with Wrapband

Tang Qianga ng Sun Shixian

(Department of Aerospace Technology, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract According to the force of connecting place and feature of the locking device, the possibilities of loosening in the connecting place of the satellite and launching vehicle are studied in this paper. The formulae of preforce the wrapband needs are obtained by applying the theory of a general force system and friction. The distribution of wrapband stress is analysed, and the method for solving the nonuniform distribution of the stress is put forward. Comparad with the experimental results of the two types of the device, it is proved that the method of analysis and the formulae of calculation are reliable. The conclusions provide a basis for designing the locking structure of a satellite and launching vehicle with wrapband.

Key words locking of satellite and launching vehicle, wrapband, preforce

包带式星箭紧锁方法现已广泛应用于大型运载系统中^[1]。包带式紧锁结构主要由V形卡块和包带组成。预先给包带一定的拉力,使卡块紧锁星体与箭体。在实际结构中,到底施加多大的预紧力不是一目了然的,预紧力过小,就达不到紧锁目的,发射将失败;预

* 1995年5月16日收稿

紧力过大,会使结构破坏。如对每一个不同结构进行实验来确定预紧力,将导致反复多次实验,造成人力物力及时间的浪费。因此,通过理论分析,得到既能达到紧锁目的,又能保证结构安全的预紧力是很重要的。

紧锁预紧力涉及空间摩擦力系数,摩擦力是一个有条件的约束,其大小方向由实际受力情况而定^[2]。包带预紧力又是一个未知量,因而给分析带来了困难。包带与卡块间存在的摩擦、不同包带长度及加载方式,使包带应力分布产生很大差别,太大的差别将直接影响紧锁预紧力、强度设计及运行中对紧锁结构的监视^[1]。本文的目的就是要解决上述问题。

1 受拉时所需预紧力

包带式星箭紧锁结构如图 1 示。因结构属空间问题,卡块间的不连续及受外载时内力变化规律不易确定。为了便于分析,对受拉时作如下假设:①受拉前后包带预紧力不变化;②卡块上下侧面所受的力相同;③力沿 θ 角均匀分布,卡块间隙用乘子 δ 描述;④卡块有向外的运动趋势时,框间正压力为零。

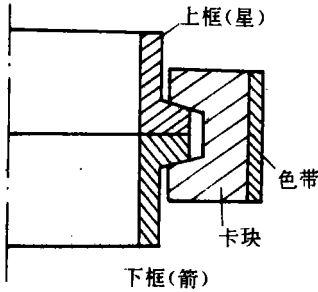


图 1 紧锁结构示意图

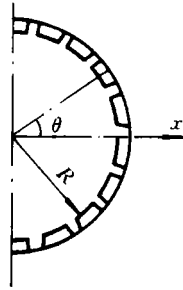


图 2 卡块分布示意图

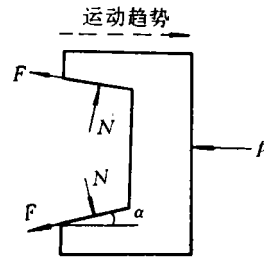


图 3 卡块受力图

设结构受拉时,卡块有向外的运动趋势,即达到临界状态。此时 $F=fN$, f 为卡块与框间的摩擦系数。对上框,由假设④可得拉力为

$$T = N(\cos\alpha + fN\sin\alpha)2\pi R = 2\pi RN(\cos\alpha + f\sin\alpha) \quad (1)$$

其中 N 为框边单位弧长上所受的力。以单位弧长的卡块为研究对象,可得

$$p = 2N(\sin\alpha - f\cos\alpha) = 2N\cos\alpha(\tan\alpha - f) \quad (2)$$

p 为单位弧卡块受包带的压力。设包带拉力为 S ,易得 $S=PR$ 。由式(1)及(2)可得

$$\begin{cases} S_{\min}^{(T)} = 0, & \tan\alpha \leq f \\ S_{\min}^{(T)} = T(\tan\alpha - f)/[\pi(1 + f\tan\alpha)], & \tan\alpha > f \end{cases} \quad (3)$$

2 剪切时所需预紧力

设上下框分别受右左剪力 Q ,包带预紧力在受剪前后仍不变化,正压力与摩擦力是角 θ 的连续函数,卡块间隙仍用乘子 δ 描述(δ 将在最后结果中反映出来)。

以上框为研究对象,则上框有向右的平动趋势,故在框边任意处所受的摩擦力在 oxy 平面内的分量都沿轴 x 负方向(如图 4 示)。将 F_1 分解为 F_θ 和 F_ρ (F_ρ 沿框边斜面母线)。

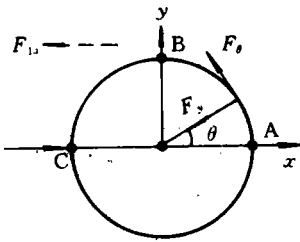


图 4. 摩擦力方向示意图

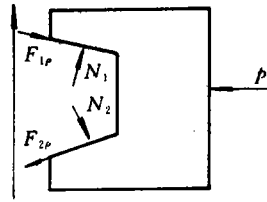


图 5 卡块受力示意图

由几何关系易得

$$\begin{cases} F_\theta = F_1(\theta)\sin\theta / \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\alpha\cos^2\theta} \\ F_\rho = F_1(\theta)\cos\theta / \sqrt{\cos^2\alpha + \sin^2\alpha\cos^2\theta} \end{cases} \quad (4)$$

将 F_ρ 二次投影, 可得

$$\begin{cases} F_r = F_\rho\cos\alpha = F_1(\theta)\cos\theta / \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\alpha\cos^2\theta} \\ F_z = F_\rho\sin\alpha = F_1(\theta)\cos\theta\operatorname{tg}\alpha / \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\alpha\cos^2\theta} \end{cases} \quad (5)$$

对卡块(受力如图 5 示), 有

$$\Sigma F_{ir} = N_1\sin\alpha + N_2\sin\alpha + (F_{1\rho} - F_{2\rho})\cos\alpha - p = 0$$

$$\Sigma F_{iz} = (N_1 - N_2)\cos\alpha - (F_{1\rho} + F_{2\rho})\sin\alpha = 0$$

设处于临界状态, 则 $F_1 = fN_1$, $F_2 = fN_2$ 。再考虑到式(4), 可得

$$N_1 = \frac{p(\cos^2\alpha + \sin^2\alpha\cos^2\theta + f\cos\theta\operatorname{tg}\alpha\sqrt{\cos^2\alpha + \sin^2\alpha\cos^2\theta})}{2(\cos^2\alpha + \sin^2\alpha\cos^2\theta + f^2\cos^2\theta)\sin\alpha} \quad (6)$$

对上框, 卡块对框的正压力与摩擦力的水平分量为

$$Q_x = -2 \int_0^\pi (F_\theta\sin\theta + F_r\cos\theta + N_2\sin\alpha\cos\theta)Rd\theta \quad (7)$$

两框间的正压力 N 为

$$N = 2 \int_0^\pi (N_1\cos\alpha - F_z)Rd\theta \quad (8)$$

两框间的摩擦力为

$$F'_r = -fN = -2f \int_0^\pi (N_1\cos\alpha - F_z)Rd\theta \quad (9)$$

将式(4)、(5)及(6)代入式(7), 并考虑到 $S = pR$, 可得

$$Q'_x = -\xi_1 S_{\min}^{(Q)}; \quad \xi_1 = \int_0^\pi (fG_1\cos\alpha + \sin\alpha\cos\theta)G_2d\theta \quad (10)$$

其中

$$\begin{cases} G_1^{-1} = \sqrt{\cos^2\alpha + \sin^2\alpha\cos^2\theta} \\ G_2 = \frac{G_1^{-2} + f\cos\theta\operatorname{tg}\alpha G_1^{-1}}{G_1^{-2} + f^2\cos^2\theta} \end{cases}$$

将式(5)与(6)代入式(9), 可得

$$F'_r = -\xi_2 S_{\min}^{(Q)}; \quad \xi_2 = \int_0^\pi f(\cos\alpha - \sin\alpha\cos\theta G_1)G_2d\theta \quad (11)$$

对于上框, 在 Q'_x , F'_x 及剪力 Q 作用下平衡, 即 $Q'_x + F'_x + Q = 0$, 于是得

$$S_{\min}^{(Q)} = Q / (\xi_1 + \xi_2) \quad (12)$$

3 $S_{\min}^{(Q)}$ 的近似计算

由于 ξ_1 与 ξ_2 中的被积函数复杂, 难以积分为解析形式, 需用数值方法进行计算。为了便于工程设计人员使用, 下面将 ξ_1 和 ξ_2 的值近似地用解析函数表示。

因为卡块的倾角 α 一般较小, 故可将 F_θ , F_r 及 F_x 近似地由下列式子表示:

$$F_\theta = F_1(\theta)\sin\theta; F_r = F_1(\theta)\cos\alpha\cos\theta; F_x = F_1(\theta)\sin\alpha\cos\theta \quad (13)$$

这相当于把 F_1 的方向与卡块斜面母线方向之夹角近似看成 θ 角。同时, 将式(6) 中的 N_1 在 $A(\theta=0)$, $B(\theta=90^\circ)$ 和 $C(\theta=180^\circ)$ 三点进行分段插值, 由式(6) 可得

$$\begin{cases} N_1(0^\circ) = \frac{p(1 + f\operatorname{tg}\alpha)}{2(1 + f^2)\sin\alpha}; N_1(90^\circ) = \frac{p}{2\sin\alpha} \\ N_1(180^\circ) = \frac{p(1 - f\operatorname{tg}\alpha)}{2(1 + f^2)\sin\alpha} \end{cases} \quad (14)$$

如将 N_1 沿 y 轴方向分段线性插值, 即设

$$N_1(\theta) = a + b\sin\theta \quad (15)$$

考虑到式(14), 可得

$$\begin{cases} N_1(\theta) = \frac{p}{2(1 + f^2)\sin\alpha} [1 + f\operatorname{tg}\alpha + f(f - \operatorname{tg}\alpha)\sin\theta], 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \\ N_1(\theta) = \frac{p}{2(1 + f^2)\sin\alpha} [1 - f\operatorname{tg}\alpha + f(f + \operatorname{tg}\alpha)\sin\theta], \frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi \end{cases} \quad (16)$$

将式(16)代入(13), 由式(7)可得

$$\xi_1 = \frac{\pi f}{(1 + f^2)\sin\alpha} \left[\frac{1 + \cos\alpha}{2} + \frac{2f^2}{3\pi} (2 + \cos\alpha) + \frac{2f\sin^2\alpha}{\pi\cos\alpha} \right] \quad (17)$$

再由式(9), 可得

$$\xi_2 = \frac{f(\pi + 2f^2)}{(1 + f^2)\operatorname{tg}\alpha} - \frac{f^3\operatorname{tg}\alpha}{1 + f^2} \quad (18)$$

于是可得 $S_{\min}^{(Q)}$ 与剪力 Q 间关系。

4 弯曲情况

弯矩 M 对框截面作用力的合力为零, 由线弹性关系, 可知其截面边缘的分布力沿直径是线性分布的^[3]。设最大拉力为 q_0 , 不难得到

$$q_0 = M / (\pi R^2)$$

由于压力不会使结构松动, 故用 q_0 代替所有的 $q(\theta)$, 即将周边力都视为拉力 q_0 , 则理论计算偏安全, 于是有

$$T_M = 2\pi R q_0 = 2M/R \quad (19)$$

这样, 可将弯矩 M 引起的最大拉力 T_M 叠加到实际拉力 T 中, 预紧力仍按式(3)计算。

5 最小预紧力 S_{\min}

由于已将弯矩折合到拉力之中, 故组合载荷只有拉剪组合。从式(3)与式(12) 可看

出,拉剪载荷都与预紧力成线性关系,故可按线性叠加求组合载荷作用下的最小预紧力,即

$$\begin{cases} S_{\min} = \eta \delta Q / (\xi_1 + \xi_2), f \geq \operatorname{tg} \alpha \\ S_{\min} = \eta \delta \left[\frac{Q}{\xi_1 + \xi_2} + \frac{\operatorname{tg} \alpha - f}{\pi(1 + f \operatorname{tg} \alpha)} (T + T_M) \right], f < \operatorname{tg} \alpha \\ \delta = 2\pi R / \sum s_i \end{cases} \quad (20)$$

其中, $\sum s_i$ 为所有卡块弧长之和, η 为安全系数。

设框承受的临界预紧力为 S_{cr} , 则预紧力 S 的范围是

$$S_{\min} \leq S < S_{cr} \quad (21)$$

在式(20)中, ξ_1 和 ξ_2 按式(17)式与(18)式计算,也可按的式(10)式与(11)式用数值方法计算。

6 预紧力的理论计算值与实验对比

6.1 LMXX 火箭包带预紧力

该箭体受最大剪力为 $Q=670.46$ (当量力),折合最大拉力为 1093.4 (当量力),卡块倾角 $\alpha=20^\circ$, $f=0.3$, $S_{cr}=778$ (当量力), $\delta=1.2238$ 。如取 $\eta=1.5$,由式(20)得 $S_{\min}=273.7$ (当量力)。如用式(10)式与(11)的高斯求积公式求 ξ_1 与 ξ_2 ,得 $S_{\min}=274.3$ (当量力)。包带预紧力范围为

$$273.7 \leq S < 778$$

其实验结果是, S 从 300 (当量力)增加到 700 (当量力),结构既未松动也未被破坏。实际所给预紧力为 340 (当量力),发射中紧锁成功。

6.2 LMXXX 火箭包带预紧力

该箭体的所受最大剪力为 180 (当量力),折合拉力最大值为 1003.3 (当量力), $\alpha=15^\circ$, $f=0.3$, $S_{cr}=300$ (当量力)。由式(20)得 $S_{\min}=51.7$ (当量力)。用高斯求积公式计算 ξ_1 与 ξ_2 ,得 $S_{\min}=52.1$ (当量力)。其包带预紧力范围为

$$51.7(\text{当量力}) \leq S < 300(\text{当量力})$$

实验中, S 从 50 (当量力)增加到 280 (当量力),结构未松动也未失稳。

7 包带中面应力分析

由于包带与卡块间存在摩擦,包带中面各处应力是不相同的。如加载(加预紧力)方式不同以及包带段数不同,也将影响包带应力分布。设一微段 MN ,由平衡方程易得 $dS = -dF$ 。再考虑到 $dF = f' p R d\theta = f' S d\theta$,可得

$$dS = -f' S d\theta$$

积分之有

$$S_i = S_{i-1} e^{-f' \beta_i}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (22)$$

其中 m 为每段包带对应的卡块个数, β_i 为第 i 个卡块对应的圆心角, S_i 与 S_{i-1} 分别为卡块 i 两侧之包带的点, S_{i-1} 为靠近施加预紧力的一端。

由式(22)可得递推公式

$$S_i = S_0 e^{-f t_i}; \quad \phi_i = \sum_{k=1}^i \beta_k \quad (23)$$

这样,包带中面应力分布为

$$\sigma_i = \sigma_0 e^{-f t_i}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (24)$$

施加载荷分为两种情况:一是包带一端固定而另一端施加载荷;二是两端同时施加相同的载荷。整个包带可由一段、二段、四段组成。如为二段与四段,则等分。如包带由一段组成,当一端加载时,最小应力与最大应力之比为 95.59% ($f' = 0.01$)、24.40% ($f' = 0.3$);当两端同时加载时,其此值为 97.77% ($f' = 0.01$)、49.39% ($f' = 0.3$)。如包带由四段组成,当一端加载时,其比值为 98.88% ($f' = 0.01$)、70.28% ($f' = 0.3$);当两端同时加载时,其比值为 99.44% ($f' = 0.01$)、83.82% ($f' = 0.3$)。

8 分析与结论

8.1 结构设计时应考虑的因素

(1)为减少预紧力 S , α 越小越好。当 $\alpha < \text{tg}^{-1} f$ 时,无论有多大拉力(只受拉),微小的预紧力可使结构不松动(自锁),只需提供抗剪的预紧力即可。同时,当 α 减小时,所需抗剪预紧力减少。当 α 由 20° 降低到 15° 时,预紧力降低约 20%;当 α 由 15° 降低到 10° 时,预紧力降低约 30%。即 α 越小,所需预紧力越小。

(2)卡块间间隙越小越好。

(3)为减少包带应力分布的不均匀性,最好在包带与卡块间加润滑剂以减少摩擦。同时,包带段数最好取四段,在每段两端以相同方式加载。

(4)如 $S_{\min} \geq S_{cr}$, 需重新设计结构,增大 S_{cr} 或减少 S_{\min} 。

8.2 结论

通过与实验结果对比,验证了本文分析方法的正确性和计算公式的可靠性。本文计算公式简单、实用,为包带式星箭紧锁结构设计提供了依据,可减少多次重复实验。

参 考 文 献

- 1 苏明照. DAS-1 星箭包带应力监视系统. 实验力学, 1993, 8(2): 97~101
- 2 国防科技大学合编. 理论力学(第一版). 北京: 国防工业出版社, 1991
- 3 铁摩辛柯著; 弹性理论. 徐之纶译. 北京: 高等教育出版社, 1990

(责任编辑 卢天凯)