

文章编号: 1003-1480 (2021) 06-0006-04

直推式分离螺母分离间隙分析与研究

林连斌¹, 张娟², 陈文龙³, 吴小军¹, 马晨曦¹, 李清旭³

(1.上海宇航系统工程研究所, 上海, 201109; 2. 上海卫星工程研究所, 上海, 201109; 3. 陕西应用物理化学研究所, 陕西 西安, 710061)

摘要: 为确保解锁后的分瓣螺母与螺杆有足够的间隙, 针对一种直推式分离螺母和利用弹簧抽出螺杆的连接解锁装置, 分析其分离过程, 并对单侧及双侧螺纹钩挂工况下的压紧杆进行了受力分析; 同时, 对双侧螺纹钩挂工况下分离螺母的最小分离间隙进行理论计算, 计算结果可应用于分离螺母的设计与分析。

关键词: 分离螺母; 直推式; 连接解锁装置; 分离间隙

中图分类号: TJ450.2 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2021.06.002

Analysis and Study on Separation Clearance of Separation Nut with Direct Thrust Model

LIN Lian-bin¹, ZHANG Juan², CHEN Wen-long³, WU Xiao-jun¹, MA Chen-xi¹, LI Qing-xu³

(1. Aerospace System Engineering Shanghai, Shanghai, 201109; 2. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai, 201109; 3. Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an, 710061)

Abstract: To ensure enough clearance between the split nuts and the screw, aimed at a separation nut of direct thrust model and connecting-unlocking device using spring extract screw, the separation process was analyzed, and the force analysis of compression rod under one-sided hook and double hooks conditions was carried out. Meanwhile, the minimum clearance of the separation nut under double hooks condition was calculated, the result can be applied to the design and analysis of separation nuts.

Key words: Separation nut; Direct thrust model; Connecting and unlocking device; Separation clearance

分离螺母因其大承载、无污染、低冲击等优点广泛应用于火箭连接、卫星帆板、天线等装置的连接解锁。为保证分离螺母的分离可靠性, 解锁后的分瓣螺母与螺杆应保证足够的间隙。常见分离螺母结构形式主要有两种: 一种是反推式, 即箍套运动方向和点火器燃气输出方向相反; 另一种是直推式, 即箍套运动方向和点火器燃气输出方向相同。本文针对一种基于直推式分离螺母和利用弹簧抽出螺杆的连接解锁装置, 通过分析其分离过程, 对压紧杆在单侧螺纹钩挂及双侧螺纹钩挂工况下进行受力分析, 以及对双侧钩挂工况下的最小分离间隙进行计算, 提出了该方案下

分离螺母最小分离间隙的设计依据。

1 分离螺母解锁装置结构及工作原理

1.1 分离螺母连接解锁装置

分离螺母连接解锁装置包括分离螺母和压紧释放装置, 如图1所示。分离螺母由壳体、分瓣螺母、内筒活塞、点火器、后堵帽、剪切销、密封垫等零件组成^[1]; 压紧释放装置由压紧支撑套、锁紧螺母、压紧杆、承力碗、弹簧、弹簧端盖、头套等零部件组成。被连接件通过锁紧螺母和压紧支撑套固定在压紧释

收稿日期: 2021-07-19

作者简介: 林连斌(1989-), 男, 工程师, 从事运载火箭机械总体技术研究。

放装置上,压紧释放装置通过压紧杆与分离螺母中分瓣螺母拧紧实现连接锁紧^[2]。

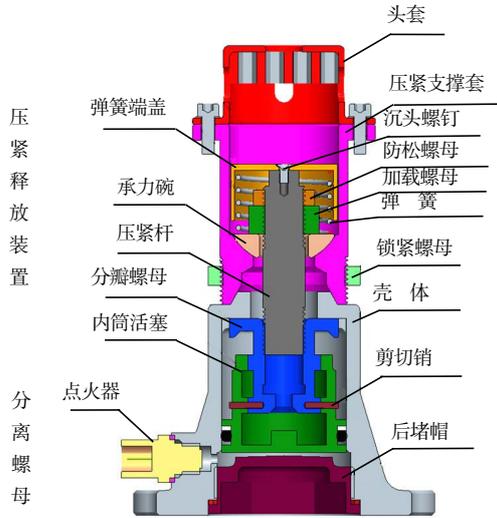


图1 分离螺母连接解锁装置示意图
Fig.1 Layout of separation nut connecting and unlocking device

1.2 分离螺母连接解锁装置分离过程

分离螺母连接解锁装置解锁时,点火器点火后产生高温高压燃气,推动内筒活塞向上运动剪断剪切销,同时内筒活塞运动一定距离后解除分瓣螺母径向约束,内筒活塞继续向上运动至上端面边缘与底端凸台边缘,同时挤压分瓣螺母上下对应斜面,使其四瓣张开一定距离,解除压紧杆约束,压紧杆在弹簧作用下实现抽出。分离螺母解锁装置分离过程如图2所示。

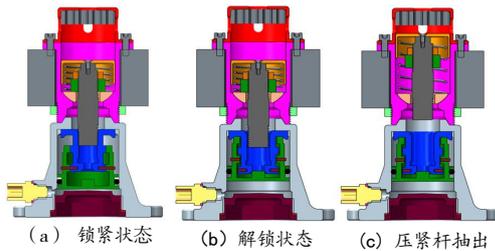


图2 分离螺母连接解锁装置工作过程示意图
Fig.2 Working process of separation nut connecting and unlocking device

2 分离螺母最小分离间隙分析

分离螺母连接解锁装置在解锁分离过程中包含分瓣螺母张开和压紧杆抽出两部动作。虽然弹簧端盖在压紧杆抽出过程中起到了导向和限位作用,但一般在弹簧端盖和压紧支撑套之间间隙设计时需要综合

考虑结构尺寸和行为公差,以及产品在使用环境下发生变形等情况,在保证导向效果的同时需要预留足够的间隙,以防止弹簧端盖运动时发生卡死。

由于弹簧端盖和压紧支撑套间存在一定的间隙,在分瓣螺母张开后,如果分瓣螺母与压紧杆间隙过小,解锁瞬间球碗转动可能导致压紧杆螺纹与分瓣螺母螺纹钩挂的情况^[3]。为得到基于最严酷工况下的分离螺母最小分离间隙,本文分析过程均不考虑因为弹簧端盖和压紧支撑套间配合间隙过小,导致压紧杆在抽出过程中不会发生旋转或者平移的情况,也不考虑弹簧端盖的限位影响。

在解锁分离过程中分瓣螺母螺纹与压紧杆螺纹间存在单边钩挂和双边钩挂的可能。对抽出过程压紧杆受力进行分析,若压紧杆在抽出过程所受外力平衡则表明压紧杆发生了卡滞故障^[4]。

2.1 单侧螺纹钩挂工况

对单侧钩挂工况下压紧杆抽出过程中压紧杆受力情况进行分析,在空间环境下不考虑结构自重,压紧杆所受外力包括:弹簧推力 F 、分瓣螺母螺纹对压紧杆螺纹法向力 N_2 、压紧杆螺纹摩擦力 f_2 、弹簧端盖和压紧支撑套间径向力 N_1 、弹簧端盖和锁紧支撑套间摩擦力 f_1 , N_1 与 f_1 合力为 F_1 。

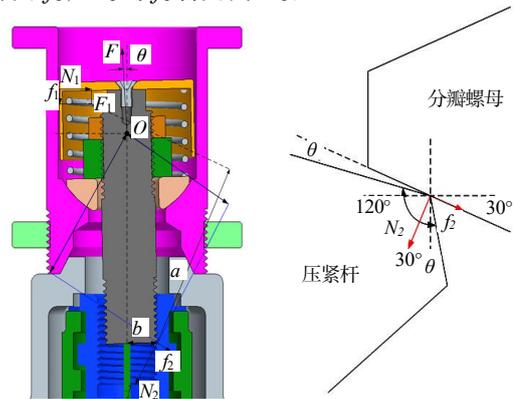


图3 压紧杆单侧钩挂受力分析图
Fig.3 Force analysis of compression rod under one-sided hook condition

垂直方向力平衡:

$$F \cos \theta = f_1 + N_2 \sin 60^\circ + f_2 \sin 30^\circ \quad (1)$$

水平方向力平衡:

$$F \sin \theta + N_2 \sin 30^\circ = N_1 + f_2 \sin 60^\circ \quad (2)$$

对干涉点力矩平衡:

$$F_1 a + F b = 0 \quad (3)$$

由于公式中各参数均大于0，公式恒不成立，故螺纹单侧钩挂不会导致卡滞故障。

2.2 双侧螺纹钩挂工况

压紧杆螺纹发生双侧钩挂工况如图4所示。其受力分析如图5所示。

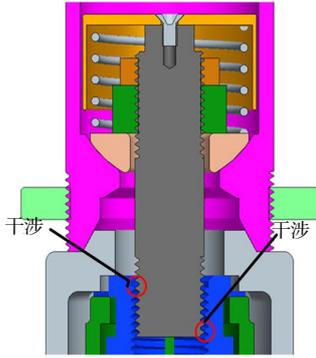


图4 压紧杆双侧钩挂示意图

Fig.4 Layout of compression rod under double hooks condition

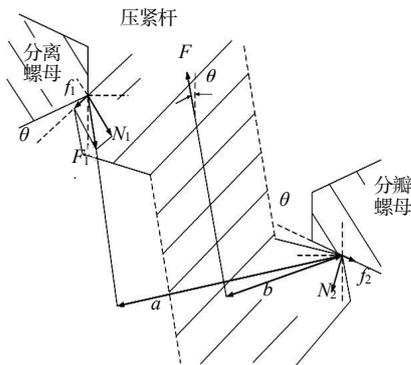


图5 压紧杆双侧钩挂受力示意图

Fig.5 Force analysis of compression rod under double hooks condition

因压紧杆在螺母解锁瞬间发生偏转 θ ，使压紧杆与分瓣螺母在根部和顶部发生双向干涉，在弹簧力 F 作用下会发生自锁而达到力平衡，即压紧杆存在卡滞的工况，其外力平衡方程如下：

垂直方向力平衡：

$$F \cos \theta = f_1 \sin(30^\circ + \theta) + N_1 \cos(30^\circ + \theta) + N_2 \sin 60^\circ + f_2 \sin 30^\circ \quad (4)$$

水平方向力平衡：

$$F \sin \theta + N_2 \sin 30^\circ + f_1 \cos(30^\circ + \theta) = N_1 \sin(30^\circ + \theta) + f_2 \sin 60^\circ \quad (5)$$

对于干涉点力矩平衡：

$$F_1 a + F b = 0 \quad (6)$$

2.3 分离螺母分离间隙分析

根据以上分析，在压紧杆抽出过程中，如果发生单侧钩挂不会产生卡滞工况，只有发生双侧钩挂时才会产生卡滞工况。故设计时分瓣螺母与压紧杆径之间间隙应足够大，以确保分瓣螺母与压紧杆不发生螺纹双侧钩挂工况。

压紧杆螺纹双侧钩挂如图6所示。对分瓣螺母连接解锁装置结构进行分析，分离间隙即分离螺母中分瓣螺母工作张开后螺母小径与压紧杆螺纹大径之间的间隙 δ ，如图6(a)所示。分离瞬间由于冲击等原因螺杆发生横向位移 b ，使得压紧螺杆螺纹与分瓣螺母螺纹一侧啮合，最大啮合宽度等于螺牙高度 c ，如图6(b)所示。接着由于压紧杆绕着球型承力碗中心O点转动，当压紧杆转动角度为 θ 时，原先啮合一侧螺纹从A点运动至A₁点，而原先未啮合一侧螺纹从B点运动到B₁点，如果A点至A₁点水平位移小于 c ，且B点运动到B₁点的水平位移大于 $2\delta + c$ ，则压紧杆螺纹和分瓣螺母螺纹发生双侧钩挂。压紧杆螺纹双侧钩挂位置及几何尺寸示意图如图7所示。

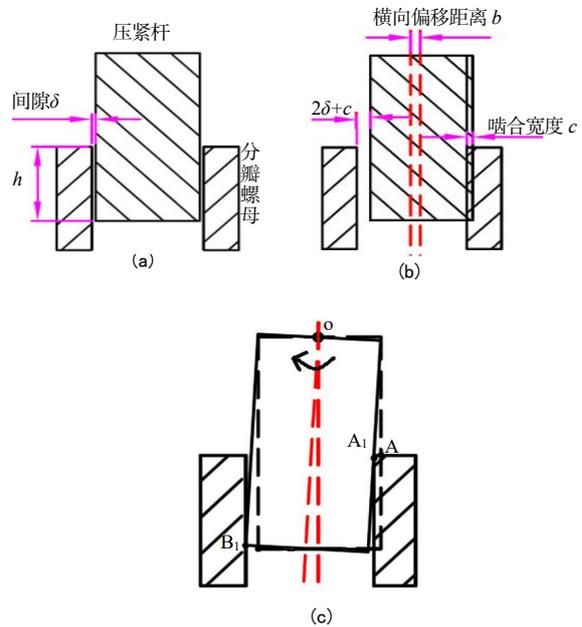


图6 压紧杆螺纹双侧钩挂示意图

Fig.6 Diagram of double hooks of compression rod thread

以出现双侧钩挂临界状态进行分析，即A点运动A₁点时，水平方向位移正好等于最大啮合宽度即螺牙高度 c ，且此时B点运动到B₁点的水平方向位移等于 $2\delta + c$ 。

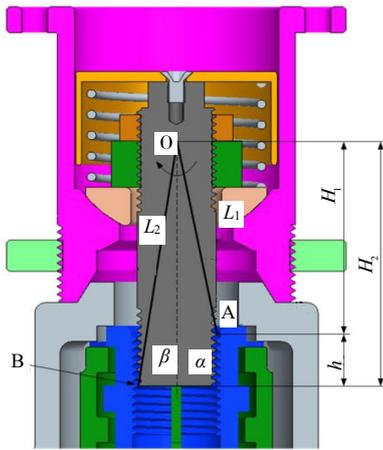


图7 压紧杆螺纹双侧钩挂位置及几何尺寸示意图

Fig.7 Position and geometry of double hooks of compression rod thread

由图 6~7 可知:

A 点运动到 A₁ 点的水平方向位移为:

$$L_1 \theta \cos \alpha = c \quad (7)$$

B 点运动到 B₁ 点的水平方向位移为:

$$L_2 \theta \cos \beta = 2\delta + c \quad (8)$$

由式 (7) ~ (8) 可得到:

$$\delta = \frac{c}{2} \left(\frac{L_2 \cos \beta}{L_1 \cos \alpha} - 1 \right) = \frac{c}{2} \left(\frac{H_2 - H_1}{H_1} \right) = \frac{ch}{2H_1} \quad (9)$$

即不发生压紧杆双侧钩挂的最小分离间隙 δ_{\min} :

$$\delta_{\min} = \frac{ch}{2H_1} \quad (10)$$

由式 (10) 可知不发生压紧杆双侧钩挂的最小分离间隙 δ_{\min} 与螺牙高度 c 、压紧杆螺纹与分瓣螺母螺纹配合高度 h ，以及球形承力碗中心距螺纹上配合点高度 H_1 相关。分离螺母设计时应保证分瓣螺母张开后

与压紧杆的间隙大于最小分离间隙 δ_{\min} ，并根据相应设计规范留足安全余量，以确保不会因产生压紧杆螺纹双侧钩挂而导致卡滞故障的发生。

3 结论

综上所述，在分离螺母连接解锁装置解锁过程中，压紧杆螺纹和分瓣螺母螺纹间单侧钩挂不会导致卡滞故障的发生，只有双侧钩挂才会导致卡滞故障的发生。通过理论分析计算，可知不发生压紧杆双侧钩挂的最小分离间隙 δ_{\min} 与螺牙高度、压紧杆螺纹与分瓣螺母螺纹配合高度，以及球形承力碗中心距螺纹上配合点高度相关，分离螺母设计时应保证分瓣螺母张开后与压紧杆间间隙大于最小分离间隙 δ_{\min} ，并根据相应设计规范留足安全余量，以确保不会因压紧杆螺纹双侧钩挂而导致卡滞故障的发生。

参考文献:

- [1] 张修科,张醒,吴昊,王金童,杨树彬.新型直推式分离螺母设计研究[J].火工品,2013(6):5-8.
- [2] 张营,杨树彬,王键,杨安民,文冲,吴瑞德.直推式低冲击分离装置的设计[J].火工品,2007(6):33-35.
- [3] 高滨,李忠刚,马景.分离螺母的关键设计参数分析[J].航天返回与遥感,2001,22(2):63-65.
- [4] 高滨.火工驱动分离装置的应用[J].航天返回与遥感,2004,25(1):55-59.